

MICHIO KAKU

Fisica del futuro

Come la scienza cambierà il destino dell'umanità
e la nostra vita quotidiana entro il 2100



codice

EDIZIONE

Michio Kaku

Fisica del futuro

*Come la scienza cambierà il destino dell'umanità
e la nostra vita quotidiana entro il 2100*

Traduzione di Sergio Orrao e Valeria Lucia Gili



Michio Kaku
Fisica del futuro
Come la scienza cambierà il destino dell'umanità
e la nostra vita quotidiana entro il 2100

Progetto grafico: studiofluo srl
Redazione e impaginazione: Giuseppe Doldo
Coordinamento produttivo: Enrico Casadei

Michio Kaku
Physics of the Future
How Science Will Shape Human Destiny
and Our Daily Lives by the Year 2100
Copyright © 2011 by Michio Kaku

© 2012 Codice edizioni, Torino
Tutti i diritti sono riservati

ISBN 9788875783136

*Al mio amore, mia moglie Shizue,
e alle mie figlie Michelle e Alyson*

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare tutte le persone che hanno lavorato instancabilmente per garantire il successo di quest'opera. Per cominciare, grazie ai miei editor Roger Scholl, che ha curato la produzione di molti dei miei precedenti libri e mi ha suggerito l'idea di scriverne uno impegnativo e stimolante come questo, e Edward Kastenmeier, che ha pazientemente fornito un'infinità di consigli e correzioni, garantendo così una maggiore ricchezza di contenuti e migliorando la presentazione generale del volume. Devo poi ringraziare Stuart Krichevsky, mio agente da lungo tempo, il quale mi ha sempre incoraggiato a intraprendere con passione sfide nuove e sempre più eccitanti.

Naturalmente, devo anche ringraziare gli oltre trecento scienziati che ho intervistato e con cui ho discusso degli argomenti trattati in questo libro. Voglio scusarmi per essermi intrufolato nei loro laboratori con una troupe televisiva della BBC o di Discovery o Science Channel e avere puntato loro in faccia una macchina da presa e un microfono. Forse ho interrotto le loro ricerche, ma spero che il risultato di tali interviste sia valso la pena.

Ecco alcuni di questi pionieri della scienza a cui vanno i miei più sinceri ringraziamenti:

Eric Chivian, premio Nobel, Center for Health and the Global Environment, Harvard Medical School

Peter Doherty, premio Nobel, St. Jude Children's Research Hospital

Gerald Edelman, premio Nobel, Scripps Research Institute

Murray Gell-Mann, premio Nobel, Santa Fe Institute e Caltech

Walter Gilbert, premio Nobel, Harvard University

David Gross, premio Nobel, Kavli Institute for Theoretical Physics

Henry Kendall (†), premio Nobel, MIT

Leon Lederman, premio Nobel, Illinois Institute of Technology

Yoichiro Nambu, premio Nobel, Università di Chicago

Henry Pollack, premio Nobel, Università del Michigan

Joseph Rotblat (†), premio Nobel, St. Bartholomew's Hospital

Steven Weinberg, premio Nobel, Università del Texas (Austin)

Frank Wilczek, premio Nobel, MIT

Amir Aczel, autore di *Uranium Wars*

Buzz Aldrin, ex astronauta della nasa, il secondo uomo ad avere messo piede sulla Luna

Geoff Andersen, ricercatore associato, United States Air Force Academy, autore di *The Telescope: It's History, Technology and Future*

Jay Barbree, corrispondente della NBC, coautore di *Moon Shot*

John Barrow, fisico, Università di Cambridge, autore di *Impossibilità: i limiti della scienza e la scienza dei limiti*

Marcia Bartusiak, autrice di *Einstein's Unfinished Symphony*
Jim Bell, professore di astronomia, Cornell University
Jeffrey Bennet, autore di *Beyond UFOs*
Bob Berman, astronomo, autore di *Secrets of the Night Sky*
Leslie Biesecker, direttore del Genetic Disease Research Branch, National Institutes of Health
Piers Bizony, scrittore di scienza, autore di *How to Build Your Own Spaceship*
Michael Blaese, ex scienziato del National Institutes of Health
Alex Boese, fondatore del Museum of Hoaxes
Nick Bostrom, transumanista, Università di Oxford
Tenente colonnello Robert Bowman, Institute for Space and Security Studies
Lawrence Brody, direttore del Genome Technology Branch, National Institutes of Health
Rodney Brooks, ex direttore dell'Artificial Intelligence Laboratory al MIT
Lester Brown, fondatore dell'Earth Policy Institute
Michael Brown, professore di astronomia, Caltech
James Canton, fondatore dell'Institute for Global Futures e autore di *The Extreme Future*
Arthur Caplan, direttore del Center for Bioethics, Università della Pennsylvania
Fritjof Capra, autore di *La scienza universale: arte e natura nel genio di Leonardo*
Sean Carroll, cosmologo, Caltech
Andrew Chaikin, autore di *A Man on the Moon*
Leroy Chiao, ex astronauta della NASA
George Church, direttore del Center for Computational Genetics, Harvard Medical School
Thomas Cochran, fisico, Natural Resources Defence Council
Christopher Cokinos, scrittore di scienza, autore di *The Fallen Sky*
Francis Collins, direttore del National Institutes of Health
Vicki Colvin, direttrice del Center for Biological and Environmental Nanotechnology, Rice University
Neil Comins, autore di *The Hazards of Space Travel*
Steve Cook, direttore della Space Technologies, Dynetics, ex portavoce della NASA
Christine Cosgrove, autrice di *Normal at Any Cost*
Steve Cousins, presidente e CEO di Willow Garage
Brian Cox, fisico, Università di Manchester, conduttore e consulente scientifico della BBC
Phillip Coyle, ex vicesegretario della difesa americana
Daniel Crevier, autore di *AI: The Tumultuous History of the Search for Artificial Intelligence*, CEO della Coreco
Ken Croswell, astronomo, autore di *Magnificent Universe*
Steven Cummer, informatico, Duke University
Mark Cutkosky, ingegnere meccanico, Stanford University
Paul Davies, fisico, autore di *Superforza: verso una teoria unificata dell'universo*
Aubrey de Gray, direttore scientifico dellaSENS Foundation
Michael Dertouzos (†), ex direttore del Laboratory for Computer Science, MIT
Jared Diamond, premio Pulitzer, professore di geografia, UCLA
Marianne DiChristina, caporedattrice di "Scientific American"
Peter Dilworth, ex scienziato del MIT AI Lab
John Donoghue, creatore del BrainGate, Brown University
Ann Druyan, vedova di Carl Sagan, Cosmos Studios

Freeman Dyson, professore emerito di fisica, Institute for Advanced Study (Princeton)

Jonathan Ellis, fisico, CERN

Daniel Fairbanks, autore di *Relics of Eden*

Timothy Ferris, professore emerito presso l'Università della California a Berkeley e autore di *L'avventura dell'universo: da Aristotele alla teoria dei quanti e oltre*

Maria Finitzo, regista, premiata con il Peabody Award per *Mapping Stem Cell Research*

Robert Finkelstein, esperto di IA

Christopher Flavin, WorldWatch Institute

Louis Friedman, cofondatore della Planetary Society

James Garvin, ex responsabile scientifico della NASA presso il Goddard Space Flight Center

Evalyn Gates, autrice di *Einstein's Telescope*

Jack Geiger, cofondatore della Physicians for Social Responsibility

David Gelernter, professore di scienza dei computer, Yale University

Neil Gershenfeld, direttore del Center of Bits and Atoms, MIT

Paul Gilster, autore di *Centauri Dreams*

Rebecca Goldberg, ex responsabile scientifica dell'Environmental Defense Fund, direttrice di Marine Science, Pew Charitable Trust

Don Goldsmith, astronomo, autore di *The Runaway Universe*

Seth Goldstein, professore di scienza dei computer, Carnegie Mellon University

David Goodstein, ex vicerettore del Caltech, professore di fisica

J. Richard Gott III, professore di astrofisica, Università di Princeton, autore di *Viaggiare nel tempo: la possibilità fisica di spostarsi nel passato e nel futuro*

Stephen Jay Gould (†), biologo, Harvard Lightbridge Corp.

Ambasciatore Thomas Graham, esperto di satelliti spia

John Grant, autore di *Corrupted Science*

Eric Green, direttore del National Human Genome Research Institute, National Institutes of Health

Ronald Green, autore di *Babies by Design*

Brian Greene, professore di matematica e fisica, Columbia University, autore di *L'universo elegante: superstringhe, dimensioni nascoste e la ricerca della teoria ultima*

Alan Guth, professore di fisica, MIT, autore di *The Inflationary Universe*

William Hanson, autore di *The Edge of Medicine*

Leonard Hayflick, professore di anatomia, Università della California, San Francisco Medical School

Donald Hillebrand, direttore del Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory

Frank von Hippel, fisico, Università di Princeton

Jeffrey Hoffman, ex astronauta della NASA, professore di aeronautica e astronautica, MIT

Douglas Hofstadter, premio Pulitzer, autore di *Gödel, Escher, Bach: un'eterna ghirlanda brillante*

John Horgan, Stevens Institute of Technology, autore di *La fine della scienza*

Jamie Hyneman, conduttore di *MythBusters*

Chris Impey, professore di astronomia, Università dell'Arizona, autore di *The Living Cosmos*

Robert Irie, ex scienziato presso il MIT I Lab, Massachusetts General Hospital

P.J. Jacobowitz, "PC Magazine"

Jay Jaroslav, ex scienziato del MIT AI Lab
Donald Johanson, paleoantropologo, scopritore di Lucy
George Johnson, giornalista scientifico, “New York Times”
Tom Jones, ex astronauta della NASA
Steve Kates, astronomo e conduttore radiofonico
Jack Kessler, professore di neurologia, direttore del Feinberg Neuroscience Institute,
Northwestern University
Robert Kirshner, astronomo, Harvard University
Kris Koenig, regista e astronomo
Lawrence Krauss, Università Statale dell’Arizona, autore di *La fisica di Star Trek*
Robert Lawrence Kuhn, regista e filosofo, nonché producer, autore e attore della serie televisiva
Closer to Truth
Ray Kurzweil, inventore, autore di *The Age of Spiritual Machines*
Robert Lanza, biotecnologo, Advanced Cell Technology
Roger Launius, coautore di *Robots in Space*
Stan Lee, creatore della Marvel Comics e di Spider-Man
Michael Lemonick, ex caporedattore scientifico di “Time”, Climate Central
Arthur Lerner-Lam, geologo e vulcanologo, Columbia University
Simon LeVay, autore di *When Science Goes Wrong*
John Lewis, astronomo, Università dell’Arizona
Alan Lightman, MIT, autore di *Einstein’s Dreams*
George Linehan, autore di *SpaceShipOne*
Seth Lloyd, MIT, autore di *Il programma dell’universo*
Joseph Lykken, fisico, Fermi National Accelerator Laboratory
Pattie Maes, MIT Media Lab
Robert Mann, autore di *Forensic Detective*
Michael Paul Mason, autore di *Head Cases*
W. Patrick McCray, autore di *Keep Watching the Skies!*
Glenn McGee, autore di *The Perfect Baby*
James McLurkin, ex scienziato del MIT I Lab, Rice University
Paul McMillan, direttore dello Spacewatch Project, Università dell’Arizona
Fulvio Melia, professore di fisica e astronomia, Università dell’Arizona
William Meller, autore di *Evolution Rx*
Paul Meltzer, National Institutes of Health
Marvin Minsky, MIT, autore di *The Society of Mind*
Hans Moravec, ricercatore universitario, Carnegie Mellon University, autore di *Robot*
Phillip Morrison (†), fisico del MIT
Richard Muller, astrofisico, Università della California a Berkeley
David Nahamoo, ex ricercatore presso l’IBM Human Language Technology
Christina Neal, vulcanologa, Alaska Volcano Observatory, US Geological Survey
Michael Novacek, curatore, Fossil Mammals, American Museum of Natural History
Michael Oppenheimer, ambientalista, Università di Princeton
Dean Ornish, professore di medicina, Università della California a San Francisco
Peter Palese, professore di microbiologia, Mt. Sinai School of Medicine
Charles Pellerin, ex dirigente della NASA

Sidney Perkowitz, professore di fisica, Emory University, autore di *Hollywood Science*
John Pike, direttore di GlobalSecurity.org
Jena Pincott, autrice di *Perché gli uomini preferiscono le bionde?*
Tomaso Poggio, intelligenza artificiale, MIT
Correy Powell, caporedattore di “Discover”
John Powell, fondatore di JP Aerospace
Richard Preston, autore di *The Hot Zone* *The Demon in the Freezer*
Raman Prinja, professore di astrofisica, University College London
David Quammen, scrittore di scienza, autore di *L'evoluzionista riluttante: il ritratto privato di Charles Darwin e la nascita della teoria dell'evoluzione*
Katherine Ramsland, scienziata forense
Lisa Randall, professoressa di fisica teorica, Harvard University, autrice di *Passaggi curvi: i misteri delle dimensioni nascoste dell'universo*
Sir Martin Rees, professore di cosmologia e astrofisica, Università di Cambridge, autore di *Prima dell'inizio: il nostro universo e gli altri*
Jeremy Rifkin, fondatore della Foundation on Economic Trends
David Riquier, direttore della Corporate Outreach, MIT Media Lab Jane Rissler, Union of Concerned Scientists
Steven Rosenberg, National Cancer Institute, National Institutes of Health
Paul Saffo, futurologo, ex direttore e Roy Amara Fellow presso l'Institute for the Future, professore associato alla Stanford University
Carl Sagan (†), Cornell University, autore di *Cosmo*
Nick Sagan, coautore di *You Call This the Future?*
Michael Salamon, del programma Beyond Einstein della NASA
Adam Savage, conduttore di *MythBusters*
Peter Schwartz, futurologo, cofondatore del Global Business Network, autore di *The Art of the Long View*
Michael Shermer, fondatore della Skeptics Society e della rivista “Skeptic”
Donna Shirley, ex manager, NASA Mars Exploration Program Seth Shostak, SETI Institute
Neil Shubin, professore di biologia e anatomia degli organismi, Università di Chicago, autore di *Il pesce che è in noi: la scoperta del fossile che ha cambiato la storia dell'evoluzione*
Paul Shuch, direttore esecutivo emerito, SETI League
Peter Singer, autore di *Wired for War*, Brookings Institute
Simon Singh, autore di *Big Bang*
Gary Small, coautore di *iBrain*
Paul Spudis, Planetary Geology Program del NASA Office of Space Science, Solar System Division
Steven Squyres, professore di astronomia, Cornell University
Paul Steinhardt, professore di fisica, Università di Princeton, coautore di *Universo senza fine: oltre il Big Bang*
Gregory Stock, UCLA, autore di *Riprogettare gli esseri umani*
Richard Stone, *The Last Great Impact on Earth*, “Discover Magazine”
Brian Sullivan, ex collaboratore dell'Hayden Planetarium
Leonard Susskind, professore di fisica
Daniel Tammet, “idiota sapiente”, autore di *Nato in un giorno azzurro*

Geoffrey Taylor, fisico, Università di Melbourne

Ted Taylor (†), progettista delle testate nucleari USA

Max Tegmark, fisico, MIT

Alvin Toffler, autore di *The Third Wave*

Patrick Tucker, World Future Society

Ammiraglio Stansfield M. Turner, ex direttore della CIA

Chris Turney, Università di Exeter (Regno Unito), autore di *Ice Mud and Blood*

Neil deGrasse Tyson, direttore dell'Hayden Planetarium

Sesh Velamoor, Foundation for the Future

Robert Wallace, coautore di *Spycraft*, ex direttore dell'Office of Technical Services, CIA

Kevin Warwick, cyborg umani, Università di Reading (Regno Unito)

Fred Watson, astronomo, autore di *Stargazer*

Mark Weiser (†), XEROX PARC

Alan Weisman, autore di *Il mondo senza di noi*

Daniel Werthimer, SETI@home, Università della California a Berkeley

Mike Wessler, ex scienziato, MIT AI Lab

Arthur Wiggins, autore di *The Joy of Physics*

Anthony Wynshaw-Boris, National Institutes of Health

Carl Zimmer, scrittore di scienza, autore di *Evolution*

Robert Zimmerman, autore di *Leaving Earth*

Robert Zubrin, fondatore della Mars Society

Introduzione

Che cosa succederà nei prossimi cento anni?

Gli imperi del futuro saranno imperi della mente. Winston Churchill

Durante l'infanzia ho vissuto due esperienze che hanno contribuito a formare la persona che sono oggi e hanno "acceso" le due passioni che mi hanno accompagnato per tutta la vita.

La prima risale a quando avevo otto anni. Un giorno, a scuola, tutti gli insegnanti parlavano in tono sommesso della morte di un grande scienziato. I giornali riportavano una fotografia del suo studio in cui si vedeva la scrivania e, appoggiato sopra, il manoscritto a cui stava lavorando. La didascalia diceva che il più grande scienziato della nostra epoca non era riuscito a terminare il suo maggiore capolavoro. Mi domandai che cosa potesse esserci al mondo di tanto difficile, visto che neppure quel grande scienziato era riuscito a venirne a capo. Doveva sicuramente trattarsi di qualcosa di molto complicato e importante! Ai miei occhi quel dilemma divenne più affascinante di qualunque giallo, più intrigante di qualunque storia d'avventura. Dovevo sapere che cosa conteneva quel manoscritto incompleto.

Più avanti scoprii che quello scienziato era Albert Einstein, e che il manoscritto non terminato sarebbe dovuto essere il coronamento della sua carriera, il suo tentativo di creare una "teoria del tutto", un'equazione non più lunga di qualche centimetro che avrebbe dischiuso i segreti dell'universo, e forse gli avrebbe permesso di "leggere la mente di Dio".

L'altra esperienza cruciale della mia infanzia sono i programmi TV che guardavo al sabato mattina, in particolare la serie di *Flash Gordon* con Buster Crabbe. Ogni settimana incollavo il naso allo schermo del televisore, e come per magia venivo trasportato in un mondo fantastico fatto di creature aliene, navi spaziali, combattimenti con pistole a raggi, mostri e città sottomarine. Venivo completamente risucchiato. Fu quello il mio primo contatto con il mondo del futuro, e da allora ogni volta che mi soffermo a riflettere su come potrà evolvere il nostro pianeta provo una sorta di stupore infantile.

Solo dopo avere guardato tutti gli episodi della serie mi resi conto che, sebbene Flash fosse l'eroe, era in realtà lo scienziato, il dottor Zarkov, a rendere tutto così coinvolgente. Era stato Zarkov a inventare la nave a razzi, gli schermi d'occultamento, le sorgenti d'energia per la città nel cielo e altre meraviglie ancora. Senza lo scienziato quel futuro immaginario non sarebbe potuto esistere. Gli eroi belli e coraggiosi potranno anche ottenere l'ammirazione della società, ma tutte le fantastiche invenzioni del futuro sono frutto del lavoro di anonimi e poco celebrati uomini di scienza.

Una volta al liceo, decisi di seguire le orme di questi grandi scienziati e di mettere alla prova alcune mie conoscenze. Volevo essere parte di quella grande rivoluzione che, di certo, avrebbe cambiato il mondo. Decisi così di costruire un acceleratore di particelle. Chiesi a mia madre il

permesso di costruire in garage una macchina da 2,3 milioni di elettronvolt. All'inizio era un po' perplessa, poi mi diede il via libera. Andai dunque alla Westinghouse e acquistai circa 180 chilogrammi di acciaio per trasformatori e 35 chilometri di filo di rame, che usai per costruire un betatrone nel garage di casa.

Prima di allora avevo costruito una camera a nebbia con un potente campo magnetico e avevo fotografato tracce di antimateria, ma non mi bastava più: il mio obiettivo era generare un fascio di antimateria. Il magnete dell'acceleratore riusciva a produrre un enorme campo magnetico da 10.000 gauss (pari a circa ventimila volte il campo magnetico terrestre, in teoria abbastanza potente da strapparti via un martello dalle mani). La macchina assorbiva 6 kilowatt di potenza, prosciugando completamente l'elettricità che l'impianto dell'abitazione poteva fornire. Quando accendevo l'apparecchio, spesso bruciavo tutti i fusibili di casa. (La mia povera mamma dev'essersi chiesta più volte perché non avesse un figlio appassionato di calcio anziché di scienza...)

Sono quindi due gli obiettivi che mi hanno appassionato per tutta la vita: conoscere tutte le leggi fisiche dell'universo e comprenderle in una teoria unica e coerente, nonché riuscire a prevedere il futuro. Alla fine ho capito che tali obiettivi sono complementari: la chiave per intuire il futuro consiste nel conoscere le leggi fondamentali della natura e quindi applicarle alla tecnologia e alla medicina, cioè alle invenzioni destinate a plasmare la civiltà del futuro.

Con il tempo ho scoperto che in passato ci sono stati numerosi tentativi di predire il futuro, ma che, pur trattandosi di scritti spesso utili e perspicaci, sono stati elaborati principalmente da storici, sociologi, scrittori di fantascienza e futurologi, cioè da persone estranee al mondo della scienza che non avevano una conoscenza diretta della materia trattata. Gli scienziati e i ricercatori che stanno davvero creando il futuro nei loro laboratori sono troppo impegnati a fare importanti scoperte per avere il tempo di scrivere libri destinati al grande pubblico.

Per questo ho voluto scrivere un libro diverso, che spero riesca a fornire ai lettori il punto di vista di uno scienziato sulle scoperte miracolose che ci aspettano, e possa rappresentare uno sguardo più veritiero e autorevole sul mondo. Naturalmente predire il futuro con precisione è impossibile. Penso che il meglio che si possa fare sia sbirciare nella mente degli scienziati che fanno ricerca d'avanguardia, quelli che si "sporcano le mani" nel tentativo di forgiare il futuro. Sono queste le persone che inventeranno gli strumenti e perfezioneranno le tecnologie mediche in grado di rivoluzionare la nostra civiltà. Questo libro racconta la loro storia.

Ho avuto la fortuna di assistere in prima fila a questa spettacolare rivoluzione intervistando per la TV e la radio più di trecento tra i maggiori scienziati, pensatori e visionari del mondo. Inoltre ho introdotto nei loro laboratori troupe televisive che hanno filmato i prototipi di alcuni tra gli incredibili dispositivi che cambieranno il nostro futuro. Ho avuto l'onore di condurre diversi speciali di divulgazione scientifica per la BBC, per Discovery Channel e per Science Channel, nei quali ho descritto le scoperte degli scienziati che ho incontrato. Credo di fare uno dei lavori più ambiti nel campo della scienza: da un lato sono libero di continuare a lavorare alla teoria delle stringhe, dall'altro posso assistere alle scoperte sensazionali che rivoluzioneranno questo secolo. Il mio sogno di bambino si è dunque avverato.

Fisica del futuro è diverso dagli altri libri che ho scritto. In *Oltre Einstein*, *Iperspazio* e *Mondi paralleli* ho trattato i nuovi concetti che, come venti di rivoluzione, stanno prendendo piede nel campo della fisica teorica (il mio campo di ricerca) e aprendo nuove strade nel processo di comprensione dell'universo. In *Fisica dell'impossibile* ho affrontato le recenti scoperte nel campo della fisica per capire come un giorno possano rendere possibili le idee

delle opere di fantascienza, anche quelle apparentemente più incredibili.

Forse a qualcuno questo libro ricorderà *Visions*, in cui ho scritto di come la scienza evolverà nei prossimi decenni, e sono felice di constatare che molte mie anticipazioni di allora si stanno già avverando. L'accuratezza delle previsioni di quel libro è ampiamente dovuta alla saggezza e all'intuito dei molti scienziati con cui ho parlato.

Tuttavia, rispetto a *Visions* questo nuovo libro si spinge più in là, poiché vuole introdurre una percezione più ampia del futuro. Cercherò di descrivere le tecnologie che potranno giungere a maturazione nei prossimi cento anni, e che in definitiva segneranno il destino dell'umanità. La strada che l'uomo percorrerà nel lontano futuro sarà infatti determinata dal modo in cui affronteremo le sfide e le opportunità che la scienza ci presenterà nei prossimi cento anni.

Predire il prossimo secolo

Cercare di predire ciò che accadrà in una manciata di anni, per non parlare dell'intero secolo, potrebbe sembrare un compito scoraggiante. Tuttavia rappresenta anche una sfida, attraverso la quale immaginare le tecnologie che un giorno potrebbero cambiare il destino dell'umanità.

Nel 1863 il grande scrittore Jules Verne intraprese forse il più ambizioso tra i suoi progetti. Scrisse un romanzo profetico, *Parigi nel XX secolo*, in cui rivelò appieno la sua capacità di prevedere il secolo a venire. Sfortunatamente il romanzo si perse nelle nebbie del tempo, finché un pronipote dello scrittore s'imbatté per caso nel manoscritto, gelosamente custodito in una cassaforte per centotrent'anni. Il discendente di Verne si rese conto di avere tra le mani un tesoro, e il romanzo, dato alle stampe solo nel 1994, divenne immediatamente un best seller.

Il mondo del 1863 era un insieme di antichi regni governati da re e imperatori, dove la povera gente faticava e si spezzava la schiena lavorando nei campi. Gli Stati Uniti erano consumati da una rovinosa guerra civile che aveva quasi diviso in due il paese, mentre l'energia a vapore aveva appena cominciato a rivoluzionare il mondo. Tuttavia Verne predisse che la Parigi del 1960 avrebbe avuto grattacieli di vetro, aria condizionata, televisori, ascensori, treni ad alta velocità, automobili a benzina, fax e addirittura qualcosa di simile a internet. In altre parole, Verne descrisse la vita della Parigi moderna con una precisione sconvolgente.

Ma non si trattò di un evento sporadico. Pochi anni dopo Verne fece un'altra spettacolare previsione. Nel 1865 diede alle stampe *Dalla Terra alla Luna*, in cui descrisse in dettaglio la missione che un secolo più tardi, nel 1969, avrebbe portato gli astronauti sulla Luna. Verne predisse le dimensioni della capsula spaziale con uno scarto minimo, nonché il luogo in cui sarebbe avvenuto il lancio (la Florida, non lontano da Cape Canaveral), il numero di astronauti che avrebbero partecipato alla missione, la durata del viaggio, l'assenza di peso in cui gli astronauti avrebbero operato e persino l'atterraggio finale nell'oceano. (L'unico errore grossolano fu immaginare che per la propulsione si sarebbe fatto ricorso alla polvere da sparo, anziché al combustibile per razzi. Ma i razzi a carburante liquido sarebbero stati inventati solo settant'anni dopo.)

Com'è possibile che Jules Verne sia stato in grado di predire gli avvenimenti che sarebbero accaduti cento anni più tardi con una precisione così strabiliante? I suoi biografi hanno notato che, pur non essendo uno scienziato, Jules Verne interagiva costantemente con gli uomini di scienza, tempestandoli di domande sulle loro visioni del futuro. Era dunque riuscito a crearsi un vasto archivio di informazioni che riassumeva tutte le scoperte scientifiche del suo tempo. Più di ogni altro scrittore, Verne capì che la scienza era il motore che avrebbe scosso le fondamenta della civiltà, spingendola verso un nuovo secolo di meraviglie e miracoli.

Un altro grande profeta della tecnologia fu Leonardo da Vinci, pittore, pensatore e visionario. I suoi disegni delle macchine volanti che un giorno avrebbero solcato i cieli, bellissimi e accurati, risalgono al tardo Quattrocento: schizzi di paracadute, elicotteri, deltaplani e persino aeroplani. La cosa più straordinaria è che molte di quelle invenzioni un giorno avrebbero davvero solcato i cieli! (Tuttavia, le macchine volanti di Leonardo avevano bisogno di un ingrediente fondamentale: un motore da almeno 1 cavallo, che non sarebbe stato disponibile per almeno altri quattrocento anni.)

Altra cosa stupefacente è che Leonardo tracciò un progetto per un prototipo di calcolatrice meccanica, probabilmente con centocinquant'anni d'anticipo sul suo tempo. Nel 1967 una nuova analisi di un suo manoscritto fino a quel momento male interpretato rivelò l'idea di una calcolatrice composta da tredici ruote dentate. Girando una manovella, i meccanismi dello strumento avrebbero iniziato a muoversi in sequenza, effettuando calcoli aritmetici. (La macchina fu costruita nel 1968 e si rivelò perfettamente funzionante.)

Inoltre, nel 1950 fu ritrovato un altro manoscritto contenente lo schizzo di un guerriero meccanico con indosso un'armatura italo tedesca, il quale poteva mettersi seduto e muovere le braccia, il collo e la mandibola. In seguito anche quest'automa fu costruito e si rivelò perfettamente funzionante.

Come per Jules Verne, il contatto di Leonardo con un certo numero di pensatori del suo tempo gli permise di elaborare profonde intuizioni circa le possibilità del futuro. Leonardo faceva parte di una ristretta cerchia di persone, un gruppo di innovatori d'avanguardia. Inoltre era solito disegnare modelli, costruirli e sperimentarli, cosa fondamentale per chiunque voglia tradurre il proprio pensiero in realtà.

Considerate le notevoli e profetiche intuizioni di Leonardo da Vinci e Jules Verne, viene spontaneo domandarsi se oggi sia possibile predire in maniera analoga il mondo del 2100. Sulla scia della tradizione di Leonardo e Verne, questo libro si pone come obiettivo quello di esaminare da vicino il lavoro degli scienziati che stanno costruendo i prototipi della tecnologia destinata a cambiare il nostro futuro. Questo libro non è un'opera di finzione, né il prodotto dell'immaginazione di uno sceneggiatore di Hollywood, ma si basa sulla ricerca scientifica attualmente condotta nei più importanti laboratori del mondo.

I prototipi di tale tecnologia esistono già. Come ha detto William Gibson, autore di *Neuromante* e coniatore del termine *cyberspazio*: «Il futuro è già qui, solo che è mal distribuito».

Prevedere quale sarà il mondo del 2100 è una sfida assai impegnativa, poiché ci troviamo in un'epoca di profondi sconvolgimenti scientifici, e in cui il ritmo delle scoperte continua ad aumentare. Solo nelle ultime decadi è stata accumulata più conoscenza scientifica di quanta ne sia stata acquisita in tutta la storia dell'umanità. E nel 2100 tale conoscenza potrebbe moltiplicarsi infinite volte.

Il modo migliore per comprendere l'immensità del compito di predire i prossimi cento anni è forse provare a ricordare il mondo del 1900 e lo stile di vita dei nostri nonni. Il giornalista Mark Sullivan ci ha chiesto infatti di immaginare qualcuno che stesse leggendo il giornale all'alba dell'anno 1900:

Nei loro giornali del 1° gennaio 1900, gli americani non avrebbero trovato nessuna traccia della parola *radio*, che sarebbe stata inventata solo vent'anni dopo, né di *cinema*, anche questa di pertinenza del futuro, e nemmeno *autista*, poiché l'automobile aveva appena fatto la sua comparsa e all'epoca veniva chiamata *carro senza cavalli*. [...] Non esisteva neppure il termine *aviatore*. [...] Gli agricoltori dell'epoca non avevano mai sentito parlare di *trattori*, così come i banchieri non avevano nessuna idea di cosa potesse significare *Federal Reserve*. Ovviamente, i commercianti non immaginavano neppure cosa fossero i *grandi magazzini* o i *self-service*; dal canto loro, i marinai non avevano mai sentito nominare i motori a combustibile. [...] Per le strade di campagna si potevano ancora vedere coppie di buoi. [...] I carri venivano

universalmente trainati da cavalli o muli. [...] E il fabbro ferraio, al lavoro sotto un enorme castagno, era una realtà diffusa¹.

Per comprendere fino in fondo quanto sia difficile predire i prossimi cento anni dobbiamo immaginare le difficoltà che i cittadini del 1900 potevano avere nel figurarsi il mondo del Duemila. All'Esposizione Colombiana Mondiale di Chicago del 1893 venne chiesto a settantaquattro individui di una certa notorietà di predire che genere di vita avrebbero vissuto le persone nei successivi cento anni. Il loro primo errore fu sottovalutare il ritmo del progresso scientifico. Per esempio, molti predissero correttamente che un giorno ci saremmo serviti di aeronavi commerciali capaci di attraversare l'Atlantico, ma immaginarono che si sarebbe trattato di dirigibili. Il senatore John J. Ingalls disse: «I cittadini faranno ricorso a questi palloni dirigibili tanto quanto oggi si servono dei calessi o dei loro scarponi»². Inoltre fu del tutto trascurato il prossimo avvento dell'automobile. Il ministro delle poste John Wanamaker affermò che anche nei successivi cento anni la corrispondenza statunitense sarebbe stata distribuita da diligenze e corrieri a cavallo.

Tale sottovalutazione della scienza e del suo potere innovativo si estendeva anche all'ufficio brevetti. Nel 1899 Charles H. Duell, sovrintendente dell'ufficio brevetti degli Stati Uniti, affermò che ormai «tutto ciò che poteva essere inventato è già stato inventato»³.

Talvolta persino gli esperti di determinati campi non riuscivano a cogliere ciò che stava nascendo proprio sotto i loro occhi. Nel 1927, ovvero in piena epoca del cinema muto, Harry M. Warner, uno dei fondatori della Warner Brothers, sbottò: «Chi diavolo mai vorrebbe sentir parlare gli attori?»⁴. Dal canto suo Thomas Watson, ex presidente dell'IBM, nel 1943 dichiarò che «nel mercato mondiale c'è forse spazio per cinque computer»⁵.

La sottovalutazione del potere delle scoperte scientifiche si estendeva persino al tanto venerato "New York Times". Nel 1903 il giornale newyorkese dichiarò che le macchine volanti erano una perdita di tempo, e questo appena una settimana prima che i fratelli Wright riuscissero finalmente a far decollare il loro aeroplano in quel di Kitty Hawk, nella Carolina del Nord. Nel 1920 lo stesso quotidiano criticò Robert Goddard, esperto di razzi, affermando che il suo lavoro era assolutamente insensato, poiché nessun razzo avrebbe mai potuto muoversi nel vuoto. Quarantanove anni dopo, quando l'Apollo 11 atterrò sulla Luna con il suo equipaggio di astronauti, il "New York Times" – questo gli va riconosciuto – ritrattò con queste parole: «Ormai dobbiamo definitivamente riconoscere che un razzo può funzionare perfettamente nel vuoto. Ci rammarichiamo per il nostro precedente errore»⁶.

La lezione che possiamo trarre, dunque, è che scommettere sul futuro può risultare assai pericoloso!

Tutte le previsioni, salvo rare eccezioni, hanno quasi sempre sottovalutato il progresso tecnologico. Come ci è stato più volte ripetuto, la storia la scrivono gli ottimisti, non i pessimisti. In effetti, vale la pena ribadire le parole del presidente Dwight Eisenhower: «Il pessimismo non ha mai vinto una guerra».

Come possiamo constatare, persino gli scrittori di fantascienza non sono riusciti a cogliere l'importanza delle scoperte scientifiche. Se guardiamo qualche episodio di *Star Trek* degli anni Sessanta, notiamo che buona parte di quella "tecnologia del xxiii secolo" è già disponibile. Ma a quell'epoca il pubblico televisivo si stupiva nel vedere telefoni cellulari, computer portatili, macchine che potevano parlare e telescriventi capaci di lavorare sotto dettatura. Eppure, è la

tecnologia di cui ci serviamo oggi! Forse un giorno disporremo anche di un traduttore universale, capace di tradurre rapidamente persone che parlano lingue diverse, nonché di *tricorder*, grazie ai quali le malattie verranno diagnosticate a distanza. (Ad eccezione dei motori a curvatura spaziale e del teletrasporto, gran parte di quella scienza “del XXIII secolo” esiste già.)

Alla luce degli errori commessi da chi ha provato a immaginare il futuro sottovalutando il potenziale del progresso scientifico, come possiamo fornire solide basi scientifiche alle nostre previsioni?

Comprendere le leggi della natura

La realtà in cui viviamo oggi non è più quella delle epoche oscure della scienza, in cui fulmini ed epidemie erano ritenuti opera degli dèi. Rispetto a Verne e a Da Vinci godiamo di un notevole vantaggio: una concreta conoscenza delle leggi della natura.

Qualsiasi previsione del futuro comprenderà sicuramente degli errori, ma per renderla il più possibile autorevole occorre avere una profonda padronanza delle quattro forze fondamentali della natura che regolano l'universo. Infatti, ogni volta che una di tali forze è stata compresa, la storia dell'uomo ha vissuto un'autentica svolta.

La prima forza che doveva essere compresa era la gravità. Isaac Newton ci ha fornito la meccanica per comprendere che gli oggetti si muovono grazie a forze specifiche, anziché a spiriti mistici o a leggi metafisiche. Ha spianato la strada alla rivoluzione industriale e alla forza motrice del vapore, e in particolare alla locomotiva.

La seconda forza che dovevamo assolutamente padroneggiare era quella elettromagnetica, grazie alla quale illuminiamo le nostre città e alimentiamo i nostri elettrodomestici. Quando Thomas Edison, Michael Faraday, James Clerk Maxwell e altri ancora hanno contribuito a spiegare l'elettricità e il magnetismo, hanno scatenato la rivoluzione elettronica a cui dobbiamo un tesoro di meraviglie scientifiche. Ce ne rendiamo conto ogni volta che si verifica un black-out energetico, poiché il mondo sembra improvvisamente regredire di cento anni!

Le ultime due forze da conoscere erano quelle nucleari: la forza debole e quella forte. Quando Einstein ha scritto $E = mc^2$ e si è giunti alla divisione dell'atomo, intorno agli anni Trenta, gli scienziati hanno cominciato a capire quali forze illuminavano la volta celeste. In tal modo sono stati svelati i segreti delle stelle, e questo ci ha permesso non solo di accedere all'impressionante potere delle armi atomiche, ma anche di sperare che un giorno saremmo stati in grado di "imbrigliare" tale potere sulla Terra.

Oggi possiamo dire di essere giunti a un'ottima comprensione delle quattro forze fondamentali. La prima, quella di gravità, è ormai descritta attraverso la relatività generale di Einstein. Le altre tre forze sono invece descritte dalla teoria quantistica, che ci permette di decodificare i segreti del mondo subatomico. La teoria quantistica ci ha dato i transistor, i laser e la rivoluzione digitale, che è la forza trainante della società moderna. Allo stesso modo, grazie alla teoria quantistica gli scienziati sono riusciti a svelare i segreti del DNA. L'incredibile velocità della rivoluzione biotecnologica è il prodotto diretto della tecnologia dei computer, poiché il sequenziamento del DNA viene eseguito da macchine, robot e calcolatori.

Di conseguenza, prevedere quale sarà la direzione intrapresa dalla scienza e dalla tecnologia nel prossimo secolo è più semplice di quanto non fosse cento anni fa. Certo, le sorprese non mancheranno e avremo novità del tutto inattese che ci lasceranno a bocca aperta, ma le fondamenta della fisica, della chimica e della biologia moderna sono già state in larga parte gettate, e rispetto a tale conoscenza di base non ci si attende nessuna correzione significativa, almeno nel prossimo futuro.

Sento dunque di poter affermare che le previsioni contenute in questo libro non sono proiezioni prive di senso, ma stime ragionevoli di ciò che accadrà quando i prototipi a cui gli scienziati stanno lavorando oggi giungeranno finalmente a maturità.

Per riassumere, ci sono diversi motivi per cui credo sia possibile tracciare un profilo del mondo del 2100:

1. Questo libro si basa sulle interviste con più di trecento fra i migliori scienziati del mondo, cioè quelli che lavorano nella ricerca d'avanguardia.
2. Ogni progresso scientifico menzionato in questo volume è coerente con le leggi della fisica che conosciamo oggi.
3. Le quattro forze e le leggi fondamentali della natura sono state in larga misura comprese, e non ci si attende alcun cambiamento significativo in merito.
4. I prototipi di tutte le tecnologie qui menzionate esistono già.
5. Questo libro è scritto da un *insider*, cioè da uno che ha potuto accedere in prima persona alle tecnologie d'avanguardia dell'attuale ricerca scientifica.

Per un tempo infinito siamo stati osservatori passivi nella danza della natura. Non potevamo fare altro che contemplare, stupiti e impauriti, fenomeni meravigliosi e misteriosi come le comete, i fulmini, le eruzioni vulcaniche e le epidemie, dando per scontato che fossero al di là delle nostre capacità di comprensione. Per gli antichi le forze della natura costituivano un mistero eterno, da temere e adorare, e fu proprio per dare un senso al mondo che li circondava che crearono gli dèi delle più diverse mitologie. Speravano che in virtù delle preghiere a loro rivolte, gli dèi mostrassero misericordia ed esaudissero i loro desideri più profondi.

Oggi ci siamo trasformati in coreografi della danza della natura, e in certi casi riusciamo anche a compiere qualche piccolo ritocco alle sue leggi. Ma nel 2100 faremo un passo decisivo e diventeremo i dominatori della natura.

2100: diventare dèi della mitologia

Se un nostro contemporaneo potesse fare visita ai nostri antenati e mostrare loro le meraviglie della scienza e della tecnologia moderna, verrebbe sicuramente visto come una sorta di stregone. Grazie alla “magia” della scienza potremmo esibire aerei a reazione capaci di librarsi tra le nuvole, razzi con cui esplorare la Luna e i pianeti, scanner a risonanza magnetica nucleare capaci di scrutare all’interno di un corpo vivente e telefoni cellulari che consentono di comunicare con chiunque in qualsiasi punto della Terra si trovi. Se potessimo mostrare ai nostri antenati i computer portatili con cui inviamo istantaneamente filmati e messaggi all’altro capo del mondo, verrebbero sicuramente considerati prodotti della stregoneria.

Ma questo è solo l’inizio. La scienza non è statica, anzi cresce e si diffonde esponenzialmente intorno a noi. Considerando soltanto gli articoli scientifici che vengono pubblicati, notiamo che il loro numero raddoppia all’incirca ogni decennio. Innovazioni e scoperte stanno cambiando l’intero panorama economico, politico e sociale, rovesciando le vecchie credenze e i pregiudizi cui eravamo legati.

Allora proviamo a immaginare il mondo del 2100.

Siamo destinati a trasformarci in quegli stessi dèi che una volta adoravamo e temevamo. Ma gli strumenti di cui ci serviremo non saranno bacchette magiche e pozioni, bensì la scienza dei computer, la nanotecnologia, l’intelligenza artificiale, la biotecnologia, e più di ogni altra cosa la teoria quantistica, che è alla base di queste tecnologie.

Come gli dèi delle antiche mitologie, nel 2100 maneggeremo gli oggetti con il potere della mente. I computer leggeranno silenziosamente i nostri pensieri e tradurranno i nostri desideri in realtà. Potremo spostare gli oggetti con il solo pensiero, un potere telecinetico di norma riconosciuto soltanto agli dèi. Grazie alla biotecnologia creeremo corpi perfetti, allungando la durata della vita. Inoltre saremo in grado di creare forme di vita come non ce ne sono mai state. La nanotecnologia ci permetterà invece di prendere un oggetto e trasformarlo in qualcos’altro, di creare cose che sembreranno comparire dal nulla. A differenza degli dèi non ci sposteremo a bordo di carri fiammeggianti, ma disporremo di veicoli lucenti capaci di librarsi nell’aria senza alcuno sforzo e con un quantitativo minimo di combustibile. Grazie alle macchine che inventeremo, potremo attingere all’energia illimitata delle stelle, e ci appresteremo a esplorare i pianeti più vicini con le nostre astronavi.

Sebbene tali poteri divini possano sembrarci straordinariamente avanzati, se non inimmaginabili, i semi di tutte queste tecnologie vengono piantati in questo preciso istante. È con la scienza moderna, non tramite formule astratte e incantesimi, che riusciremo a trasformare tutto questo in realtà.

Sono un fisico quantistico, e ogni giorno sono alle prese con le equazioni che governano le particelle subatomiche, quelle da cui si è creato l’universo. Il mondo in cui vivo è un universo iperspaziale a undici dimensioni, con buchi neri e porte d’accesso al multiverso. Ma le equazioni della teoria quantistica utilizzate per descrivere l’esplosione delle stelle e il Big Bang possono essere utilizzate anche per decifrare le nostre prospettive future.

Ma a che cosa ci condurranno tutti questi cambiamenti tecnologici? Qual è la destinazione finale del lungo percorso della scienza e della tecnologia?

Il culmine di tutti questi cambiamenti rivoluzionari sarà la formazione di una civiltà

planetaria che i fisici chiamano *civiltà di tipo I*. Si tratterà con ogni probabilità del più grande passaggio della storia umana, qualcosa che ci separerà nettamente da tutte le civiltà del passato. Ogni titolo dei nostri quotidiani riflette in qualche modo il travaglio attraverso cui tale civiltà planetaria sta cercando di venire al mondo. Commercio, attività economiche, cultura, linguaggio, intrattenimento, tempo libero e persino la guerra stanno subendo cambiamenti rivoluzionari proprio in virtù dell'emergere di tale civiltà planetaria. Calcolando l'energia erogata sull'intero pianeta, possiamo stimare che lo status di civiltà di tipo I sarà raggiunto nel giro di un centinaio d'anni. A meno che non soccombiamo sotto le forze del caos e della follia, la transizione è inevitabile, e sarà il risultato dell'enorme, inesorabile spinta della storia e della tecnologia portata ai suoi estremi.

Perché talvolta le previsioni non si avverano

Non si può tuttavia ignorare che varie previsioni sulla cosiddetta *era dell'informazione* si sono rivelate clamorosamente sbagliate. Per esempio, molti futurologi avevano previsto “uffici senza carta”: avevano cioè immaginato che l'avvento dei computer avrebbe trasformato i documenti cartacei in qualcosa di obsoleto. In realtà è successo l'esatto opposto: basta dare un'occhiata a un qualsiasi ufficio per constatare che la quantità di documenti cartacei è più grande che mai.

Altri avevano immaginato “città senza abitanti”. In pratica, secondo alcuni il telelavoro avrebbe reso inutile gli incontri d'affari faccia a faccia, facendo di fatto scomparire i pendolari. In pratica questo avrebbe dovuto svuotare i grandi centri abitati, trasformandoli in città fantasma, poiché la gente avrebbe potuto tranquillamente lavorare da casa anziché doversi recare in ufficio.

Allo stesso modo era stata prevista una forte ascesa di “cyberturisti”, pantofolai che avrebbero trascorso l'intera giornata spaparanzati sul divano esplorando il mondo e contemplandone le bellezze attraverso internet e il computer. E avremmo anche dovuto assistere a un'esplosione di “cyberconsumatori”, che per fare la spesa non avrebbero più dovuto fare scale mobili e spingere carrelli, ma semplicemente mettere mano al mouse. Ovviamente, ciò avrebbe comportato la bancarotta dei grandi centri commerciali. E che dire poi dei “cyberstudenti”, che avrebbero dovuto ricevere le loro lezioni online, magari giocando nel contempo ai videogame, se non addirittura bevendo una birra! Le università avrebbero anche potuto chiudere i battenti: a chi mai potevano più interessare?

Oppure prendiamo il caso del “videotelefono”. In occasione dell'esposizione mondiale del 1964 l'AT&T spese circa cento milioni di dollari per mettere a punto uno schermo televisivo capace di collegarsi alla rete telefonica, in modo da vedere la persona con cui si stava parlando e viceversa. Ma quel progetto non decollò: l'AT&T vendette soltanto un centinaio di modelli, cosa che portò il loro costo di produzione a circa un milione di dollari al pezzo. Non c'è che dire: un fiasco davvero costoso!

Possiamo infine citare il caso dei futurologi che predissero l'imminente scomparsa dei media tradizionali e delle più comuni forme d'intrattenimento. Alcuni affermarono infatti che internet, con la sua straordinaria, inarrestabile potenza, avrebbe spazzato via spettacoli teatrali, film, radio e televisione, i quali ben presto si sarebbero visti solo nei musei.

In verità è successo proprio il contrario. Code e ingorghi sono diventati una costante della nostra vita urbana, e non fanno che peggiorare. La gente si reca all'estero sempre più di frequente, facendo del turismo uno dei settori in più rapida crescita. I consumatori si riversano a fiumi nei supermercati malgrado le difficoltà economiche della nostra epoca. E le lezioni via internet non hanno affatto svuotato le università, che continuano a registrare un numero sempre maggiore di iscritti. Di certo è cresciuto il numero di persone che ha deciso di lavorare da casa, o di parlare con i colleghi in videoconferenza, ma non per questo le città si sono svuotate, anzi si sono trasformate in megalopoli a sviluppo incontrollato. Oggi è sicuramente più facile scambiare informazioni attraverso la rete, con webcam e microfono, tuttavia la maggior parte delle persone mostra una certa riluttanza ad essere filmata, e preferisce incontrarsi faccia a faccia. Certo, internet ha trasformato l'intero panorama dei media, poiché i giganti del settore cercano in ogni modo di fare soldi grazie alla rete, tuttavia televisione, radio e spettacoli dal

vivo non stanno per svanire dalla faccia della Terra: le luci di Broadway continuano a risplendere esattamente come prima!

Il principio dell'uomo delle caverne

Perché tutte queste previsioni sono risultate errate? Immagino che nella maggior parte dei casi la gente abbia rifiutato tali progressi a causa di ciò che amo definire *principio dell'uomo delle caverne* (o *della donna delle caverne*, naturalmente). Le prove genetiche e fossili indicano che gli esseri umani più recenti, ovvero quelli che più ci assomigliano, hanno avuto origine in Africa più di centomila anni fa, tuttavia nulla sembra dimostrare che cervello e personalità abbiano subito trasformazioni consistenti. Se potessimo osservare un soggetto di quell'epoca, anatomicamente sarebbe identico a noi: dopo un bel bagno, una rasatura e una pettinata, e poi vestito di tutto punto, potremmo tranquillamente portarlo a Wall Street, perché fisicamente sarebbe indistinguibile dagli altri. E con ogni probabilità non sono granché cambiate neppure le nostre esigenze, i sogni, la personalità e i desideri, e malgrado siano passati centomila anni forse pensiamo ancora come i nostri antenati cavernicoli.

Il punto è: ogniqualvolta si verifica un conflitto tra una tecnologia moderna e i desideri dei nostri antenati primitivi, questi ultimi impulsi finiscono immancabilmente per prevalere. È esattamente ciò che intendo per *principio dell'uomo delle caverne*. Per esempio, l'uomo delle caverne ha sempre preferito mostrare una “prova” del successo della sua caccia anziché vantarsi di quel bestione enorme che invece gli era appena scappato. Stringere tra le mani carne fresca è sempre stato meglio che raccontare di memorabili battute di caccia finite a pancia vuota.

Allo stesso modo, quando lavoriamo con i file preferiamo disporre di una versione stampata. Istintivamente, non ci fidiamo degli elettroni che fluttuano sullo schermo del computer, quindi stampiamo e-mail e altri testi anche quando non ce ne sarebbe bisogno. Per questo gli uffici sono sempre pieni di scartoffie!

Anche i nostri antenati hanno sempre apprezzato gli incontri faccia a faccia. Consentivano loro di creare un legame con gli altri, e di leggere le emozioni nascoste. Ecco perché le città hanno continuato ad essere affollate. Per esempio, un capoufficio preferirà forse avere un'idea ben precisa dei suoi impiegati, e ottenerla online non è affatto facile. Peraltro, in un colloquio faccia a faccia è possibile leggere il linguaggio del corpo e ottenere preziose informazioni inconsce. Osservando la gente da vicino percepiamo ciò che ci accomuna, e tramite l'impercettibile linguaggio del corpo otteniamo indicazioni su ciò che gli passa per la testa. Questo è dovuto al fatto che i nostri antenati, molte migliaia di anni prima che sviluppassero la parola, e cioè quando erano più simili a scimmie che a ciò che siamo oggi, per trasmettere pensieri ed emozioni si servivano quasi esclusivamente del linguaggio del corpo.

È per lo stesso motivo che il cyberturismo non è mai veramente decollato: una cosa è vedere un'immagine del Taj Mahal, un'altra è vederlo nella realtà. Allo stesso modo, ascoltare un CD del nostro gruppo o musicista preferito non è come vederlo e ascoltarlo suonare dal vivo, insieme con gli altri musicisti, in mezzo all'eccitazione e al clamore dei fan. Qualsiasi appassionato si farebbe un bel po' di chilometri per avere una foto autografata o per assistere al concerto della sua star preferita, sebbene possa benissimo scaricare gratuitamente un'immagine o un video da internet.

Questo spiega perché la previsione che internet avrebbe spazzato via TV e radio era priva di fondamenta. Con l'avvento del cinema e della radio molti si preoccuparono per le sorti del

teatro. Quando poi comparve la televisione, qualcuno avanzò l'ipotesi dell'imminente scomparsa di cinema e radio. Tuttavia nella realtà odierna tutti questi media convivono, e la lezione che possiamo trarne è che un nuovo strumento non spodesta mai quelli precedenti, ma vi coesiste. Sono la miscela e il tipo di relazioni tra i diversi media a subire continui cambiamenti. E chiunque fosse capace di prevedere l'evoluzione di tale miscela potrebbe trarne grande beneficio economico.

Il motivo è che i nostri antenati hanno sempre voluto vedere le cose con i propri occhi, anziché accontentarsi del sentito dire. Per la loro sopravvivenza nella foresta era di cruciale importanza potersi basare su prove fisiche e concrete piuttosto che su voci. Così tra un secolo avremo ancora rappresentazioni teatrali e folle di fan al seguito delle loro celebrità, antico retaggio di un lontano passato.

Inoltre, siamo discendenti di predatori dediti alla caccia. Per questo ci piace osservare gli altri, magari passando ore davanti al televisore a guardare all'infinito le pagliacciate di altri esseri umani, ma se ci sentiamo osservati la cosa ci dà subito fastidio. In realtà gli scienziati hanno calcolato che per scatenare una reazione nervosa è sufficiente che uno sconosciuto ci fissi per 4 secondi. Dopo 10 secondi è possibile che questo suo comportamento scateni una reazione ostile: ecco perché quel primordiale videotelefono fu un tale insuccesso! Inoltre, chi di noi ha voglia di sistemarsi i capelli ogni volta che deve andare online? (Oggi, dopo decenni di lento e doloroso miglioramento, la videoconferenza sta finalmente cambiando le cose.)

Certo, le lezioni online esistono, ma le università sono lo stesso stracolme. L'incontro a tu per tu con i docenti e la possibilità di ottenere attenzione e risposte a livello personale, rende pur sempre preferibile l'aula scolastica allo schermo del computer. Per non parlare del fatto che per ottenere un lavoro conta molto di più una laurea tradizionale che non una ottenuta online.

Assistiamo quindi a una competizione che, volendo fare un gioco di parole, oppone *high tech* (tecnologia) e *high touch* (contatto). Vale a dire che c'è una continua tensione tra lo starsene seduti in poltrona a guardare la TV e l'istintivo protendersi verso il mondo esterno per "toccare" ciò che ci circonda. E in questa competizione non vogliamo rinunciare a nulla! Ragione per cui, in piena era di cyberspazio e realtà virtuale, abbiamo ancora rappresentazioni teatrali, concerti rock, carta stampata e turismo fiorentino. Se ci venisse chiesto di scegliere tra una foto del nostro musicista preferito e i biglietti per un suo concerto, non avremmo alcun dubbio, sceglieremmo i biglietti.

Questo è dunque il principio dell'uomo delle caverne: ci piacciono entrambe le cose, ma se dovessimo scegliere, alla tecnologia preferiremmo il contatto, proprio come i nostri antenati cavernicoli.

Tale principio ha però un corollario affatto trascurabile. Quando negli anni Sessanta gli scienziati crearono internet erano pressoché tutti concordi che sarebbe evoluta in un forum rivolto all'istruzione, alla scienza e al progresso. Possiamo immaginare l'orrore di quegli stessi scienziati nel vedere come internet sia invece degenerata nel "selvaggio West" senza esclusione di colpi che è oggi. In realtà c'era da aspettarselo. Il corollario del principio dell'uomo delle caverne dice che se vogliamo prevedere le interazioni sociali degli esseri umani del futuro, non dobbiamo fare altro che immaginare quali fossero le nostre interazioni sociali centomila anni fa e moltiplicarle per un miliardo. Ciò significa che i pettegolezzi, i social network e l'intrattenimento continueranno a farla da padroni.

Se una tribù voleva trasmettere rapidamente certe informazioni, soprattutto riguardo ai leader

e ai modelli comportamentali, le dicerie e i pettegolezzi risultavano insostituibili. Chiunque si fosse trovato escluso da quel genere di informazioni, probabilmente non sarebbe sopravvissuto, né avrebbe potuto trasmettere i suoi geni. Oggi assistiamo a qualcosa di simile, con le edicole piene di giornali e riviste di gossip e il dominio incontrastato del culto della celebrità. La sola differenza è che la magnitudine di questo pettegolezzo tribale viene moltiplicata in modo esponenziale dai media, e ormai è in grado di fare il giro del pianeta in una frazione di secondo.

L'improvvisa proliferazione dei social network, grazie ai quali giovani sbarbatelli sono diventati miliardari praticamente dalla sera alla mattina, ha colto di sorpresa molti analisti, ma rappresenta l'ennesimo esempio del suddetto principio. Nella nostra storia evolutiva, chiunque si mantenesse in contatto con un'ampia rete sociale ne traeva immancabile vantaggio sotto forma di risorse, consigli e aiuti d'importanza vitale per la sopravvivenza.

Infine, anche le diverse forme d'intrattenimento continueranno a crescere in modo esponenziale. Talvolta non ci piace ammetterlo, ma uno degli aspetti dominanti nella nostra cultura si basa proprio sull'intrattenimento.

Dopo la caccia, i nostri antenati si rilassavano e si divertivano. Questo aveva la sua importanza non solo nella creazione di vincoli affettivi, ma anche nella definizione dei ruoli all'interno della tribù. Non è certo un caso che danza e canto, elementi fondamentali dell'intrattenimento, abbiano un'importanza vitale anche nel mondo animale, dove servono a dimostrare prestanza fisica al sesso opposto. Quando un uccello maschio canta melodie belle e complesse, o intraprende bizzarri rituali di corteggiamento, lo fa principalmente per mostrare alla femmina che è in piena salute, fisicamente idoneo all'accoppiamento, privo di parassiti e dotato di geni che meritano di essere trasmessi.

Anche l'attività artistica ha sempre avuto la sua importanza, e non solo per il piacere che procura, ma anche per il ruolo non trascurabile che riveste nell'evoluzione del nostro cervello, il quale gestisce buona parte delle informazioni in forma simbolica.

In definitiva, a meno che non riusciamo a modificare geneticamente la nostra personalità, possiamo tranquillamente aspettarci che in futuro il potere dell'intrattenimento, della stampa scandalistica e dei social network continuerà ad aumentare.

La spada della scienza

Una volta ho visto un film che ha cambiato per sempre le mie idee riguardo al futuro. Si intitolava *Il pianeta proibito*⁷, ed era vagamente ispirato a *La tempesta* di Shakespeare. Nel film gli astronauti entravano in contatto con i resti di una civiltà antica che aveva gloriosamente raggiunto un livello di sviluppo infinitamente superiore a quello degli umani, realizzando lo scopo ultimo della sua tecnologia: un potere illimitato disponibile senza alcuno strumento, ovvero il potere di fare quasi ogni cosa attraverso la mente. I pensieri di questa popolazione attingevano a un colossale impianto termonucleare nascosto nella profondità del pianeta e capace di convertire in realtà ogni loro desiderio. In altre parole, quella civiltà scomparsa disponeva del potere degli dèi.

Anche noi giungeremo a qualcosa del genere, ma non dovremo aspettare milioni di anni. Ci basterà soltanto un secolo, e già nell'attuale tecnologia rileviamo i primi segnali di quel futuro non così lontano. Tuttavia quel film conteneva anche un insegnamento prezioso, poiché era stato proprio quel potere divino a condurre la civiltà extraterrestre alla sua distruzione.

Come ben sappiamo, la scienza è un'arma a doppio taglio: nel risolvere i problemi in cui si imbatte ne crea inevitabilmente altri, ma sempre a un livello superiore. Il mondo di oggi è caratterizzato da due tendenze opposte: una mira a creare una civiltà planetaria tollerante, scientifica e prospera; l'altra è al servizio di un'anarchia e di un'ignoranza che potrebbero squarciare il nostro tessuto sociale. Abbiamo le stesse passioni settarie, fondamentaliste e irrazionali dei nostri antenati, però oggi disponiamo di armi nucleari, chimiche e biologiche.

In futuro ci ritroveremo ad affrontare una transizione fondamentale, e da osservatori passivi della danza della natura ci trasformeremo nei suoi coreografi, diventeremo signori della natura e, in definitiva, saremo i suoi custodi. Quindi non ci resta che sperare di riuscire a maneggiare la spada della scienza con saggezza ed equanimità, vincendo la barbarie che abbiamo ereditato dall'antichità.

Ora imbarchiamoci in questo ipotetico viaggio verso i prossimi cento anni di innovazioni e scoperte scientifiche a cui gli scienziati che ho incontrato stanno già lavorando. Sarà un'appassionante cavalcata attraverso i rapidi progressi in materia di informatica, telecomunicazioni, biotecnologia, intelligenza artificiale e nanotecnologia. Poiché non c'è alcun dubbio che tutto questo trasformerà il futuro della nostra civiltà.

Capitolo 1

Il futuro dei computer

Mente e materia

Ognuno prende i limiti del suo campo visivo per i confini del mondo. Arthur Schopenhauer

Nessun pessimista ha mai scoperto il segreto delle stelle o navigato verso un territorio inesplorato o aperto un nuovo cielo allo spirito umano. Helen Keller

Sono passati quasi vent'anni, ma il mio ricordo è ancora vivido. Me ne stavo seduto nell'ufficio di Mark Weiser, nella Silicon Valley, completamente assorbito dalla sua spiegazione e concentratissimo sulla sua visione del futuro. Tutto eccitato e gesticolando in continuazione, Weiser mi parlava di una nuova rivoluzione che di lì a poco avrebbe cambiato il mondo. Allora Weiser faceva parte di quel gruppo elitario che lavorava allo sviluppo dei computer presso lo XEROX PARC (Palo Alto Research Center, il primo a esplorare le possibilità dei personal computer, delle stampanti laser e dell'ambiente a finestre, con un'interfaccia utente grafica), ma era anche un cane sciolto, un iconoclasta che si divertiva a sconvolgere la saggezza convenzionale. Suonava persino in un gruppo rock.

A quell'epoca – sembra passata una vita! – i computer erano una novità assoluta. Stavano appena cominciando a entrare nel quotidiano, mano a mano che qualcuno si lasciava timidamente conquistare dall'idea di comprare quei grossi, ingombranti apparecchi da tavolo per fare analisi contabile e un po' di videoscrittura. Internet era ancora una landa desolata per scienziati come il sottoscritto, che sfornavano equazioni scritte in un linguaggio arcano a uso e consumo dei colleghi. Circa il potenziale di quei "cassoni" che cominciavano a fare la loro comparsa su diverse scrivanie, infuriavano già accesi dibattiti: quelle macchine, con il loro aspetto freddo e impietoso, sembravano poter mettere a rischio il meglio della civiltà umana. Persino un analista politico come William F. Buckley dovette intervenire per difendere i programmi di videoscrittura dagli attacchi degli intellettuali, che inveivano e si rifiutavano anche solo di toccare un computer, che definivano *strumento da filistei*.

Fu proprio in quell'epoca di controversie che Weiser coniò l'espressione *ubiquitous computing* (computazione ubiqua). Guardando ben oltre gli sviluppi del personal computer, Weiser predisse che un giorno i chip sarebbero diventati così economici e facilmente disponibili che li avremmo utilizzati dappertutto: nei vestiti, nei mobili, nei muri delle nostre case e persino all'interno del nostro corpo. E sarebbero stati tutti connessi a internet, in modo da condividere dati, migliorare la nostra esistenza e monitorare i nostri desideri. In qualunque luogo e situazione ci fossimo trovati, i chip avrebbero silenziosamente trasformato in realtà ogni nostro desiderio, animando il nostro ambiente vitale.

Allora il sogno di Weiser poteva sembrare eccentrico, se non addirittura assurdo. I personal

computer erano ancora molto cari, e non erano nemmeno connessi a internet. L'idea che un giorno miliardi di minuscoli chip sarebbero stati a nostra disposizione a un prezzo inferiore dell'acqua corrente era considerata pura follia.

A un certo punto domandai a Weiser come potesse essere così certo di quell'imminente rivoluzione. Rispose con assoluta calma che la potenza dei computer stava crescendo esponenzialmente, e che non ne vedeva la fine. «Fatti due calcoli!» mi esortò. Era solo questione di tempo. (Purtroppo Weiser non è vissuto abbastanza per poter assistere al compimento della sua previsione, perché è morto di cancro nel 1999.)

La fonte d'ispirazione delle intuizioni profetiche di Weiser si chiama *legge di Moore*, una regola pratica che ha guidato l'industria dei computer per oltre cinquant'anni, scandendo come un orologio il ritmo dello sviluppo della civiltà moderna. Questa legge dice molto semplicemente che la potenza dei computer raddoppia ogni diciotto mesi. Fu elaborata nel 1965 da Gordon Moore, uno dei fondatori della Intel Corporation. Quella semplice regola avrebbe contribuito a rivoluzionare l'economia mondiale, generando una nuova e straordinaria ricchezza e trasformando per sempre il nostro stile di vita.

Tracciando un grafico che illustri sia il calo vertiginoso dei prezzi dei processori, sia il loro rapido incremento di velocità, potenza di calcolo e memoria, ci si ritrova a contemplare una linea incredibilmente retta, che prosegue a ritroso nel tempo per una cinquantina d'anni. (Il grafico si basa su una curva logaritmica. Infatti, estendendone la portata in modo da includere la tecnologia della valvola termoionica e persino le vecchie calcolatrici a manovella, tale linea può procedere a ritroso nel tempo per oltre un secolo.)

Spesso è difficile comprendere il senso di una crescita esponenziale, perché la nostra mente è abituata a pensare in modo lineare. Si tratta di un cambiamento graduale, talvolta appena percettibile, ma che nel giro di qualche decennio può trasformare completamente la realtà circostante.

Secondo la legge di Moore, ad ogni nuovo Natale le consolle da gioco sono quasi due volte più potenti (in termini di numero di transistor) di quelle dell'anno precedente. Inoltre, con il passare degli anni tale processo assume proporzioni stupefacenti. Per esempio, vi sarà capitato di ricevere una cartolina d'auguri con all'interno un chip che canta "Tanti auguri a te". Ma la cosa straordinaria è che quel chip ha una potenza di calcolo superiore a quella di cui disponevano le forze alleate nel 1945. Hitler, Churchill o Roosevelt sarebbero stati pronti a uccidere per avere uno strumento del genere. Invece noi che ne facciamo? Passato il compleanno, gettiamo cartolina e chip nella spazzatura. I nostri attuali cellulari sono capaci di prestazioni superiori a quelle di cui si servì l'intera NASA nel 1969, quando riuscì a portare due astronauti sulla Luna. I videogiochi, che utilizzano un'enorme potenza di calcolo per simulare gli scenari 3D, hanno prestazioni migliori dei *mainframe*¹ del decennio precedente. L'attuale PlayStation, che costa circa 250 euro, ha la stessa potenza dei supercomputer militari del 1997, che costavano milioni di dollari.

Possiamo comprendere la differenza tra crescita lineare e crescita esponenziale analizzando il modo in cui nel 1949 la gente immaginava il futuro dei computer. Quell'anno "Popular Mechanics" azzardò una previsione e disse che la potenza dei computer sarebbe cresciuta in maniera lineare, forse raddoppiando o triplicando nel lungo termine: «Mentre un calcolatore come l'ENIAC ha 18.000 valvole elettroniche e pesa 30 tonnellate, i computer in futuro potranno avere solo 1000 valvole e pesare anche solo 1,5 tonnellate»².

Madre natura riconosce il potere della crescita esponenziale. Un singolo virus può "dirottare"

una cellula umana e forzarla a creare diverse centinaia di copie di se stesso. Con un fattore di crescita pari a 100 per ogni generazione, arriva a generare dieci miliardi di virus in sole cinque generazioni. Non c'è quindi da stupirsi che un solo virus sia in grado di infettare un corpo umano, che è costituito da trilioni di cellule sane, e rifilarci un bel raffreddore in meno di una settimana.

Tornando ai computer, non è stata soltanto la loro potenza di calcolo ad aumentare, ma abbiamo assistito anche a un radicale cambiamento del modo in cui tale potenza viene erogata, e ciò ha comportato a sua volta enormi implicazioni economiche. Possiamo riassumere tale progresso decennio dopo decennio:

- *Anni Cinquanta.* I computer a valvole termoioniche sono apparecchi giganteschi che riempiono intere stanze con la loro giungla di cavi, bobine e acciaio. Soltanto i militari dispongono del denaro sufficiente per acquistare questi autentici mostri.
- *Anni Sessanta.* Le valvole termoioniche vengono sostituite dai transistor, e gli elaboratori mainframe cominciano a comparire sul mercato.
- *Anni Settanta.* Le schede a circuiti integrati, contenenti centinaia di transistor, permettono la produzione di “minicomputer”, che sono ancora delle dimensioni di una spaziosa scrivania.
- *Anni Ottanta.* I chip, contenenti decine di milioni di transistor, rendono possibile l'assemblaggio di personal computer che possono stare in una valigetta.
- *Anni Novanta.* Grazie a internet centinaia di milioni di computer sono collegati a una sola rete globale.
- *Duemila.* L'*ubiquitous computing* previsto da Weiser libera il chip dal computer, disseminandolo un po' ovunque.

Quindi il vecchio paradigma (un singolo chip all'interno di un computer da scrivania o di un portatile) è stato sostituito da un nuovo paradigma (migliaia di chip distribuiti all'interno di una serie di oggetti, dai mobili agli elettrodomestici, dalle pareti ai quadri, dalle automobili ai vestiti, tutti in grado di comunicare tra loro e connessi alla rete).

Quando questi chip vengono inseriti in un apparecchio, lo trasformano miracolosamente: le macchine da scrivere diventano elaboratori di testi; i telefoni diventano cellulari; le macchine fotografiche tradizionali si trasformano in fotocamere digitali; i vecchi flipper in videogiochi; i giradischi vengono rimpiazzati dagli iPod; gli aeroplani diventano droni mortali come il Predator. Immancabilmente, ogni settore industriale viene rivoluzionato e fatto letteralmente rinascere. Oggi quasi tutto ciò che ci circonda ha una sua intelligenza. I chip saranno più economici di un involucro di cellophane e finiranno per rimpiazzare il codice a barre. Le società che non riusciranno a stare al passo e a immettere sul mercato prodotti intelligenti verranno fatte fuori dai concorrenti più capaci.

Ovviamente, continueremo ad essere circondati dai monitor dei computer, che però somiglieranno sempre di più a carta da parati o a cornici con immagini scelte da noi, anziché a computer tradizionali. Pensiamo a tutti i quadri e le fotografie che oggi decorano le nostre case e immaginiamo che ciascuna riproduzione sia animata, mostri figure in movimento e sia connessa a internet. Camminando per strada vedremo filmati anziché fotografie, poiché costeranno poco, proprio come le immagini statiche.

Il destino dei computer, come quello delle altre risorse di massa come l'elettricità, la carta e l'acqua corrente, è diventare invisibili, ovvero scomparire dall'ordito della nostra vita per

essere ovunque e da nessuna parte, servitori nascosti e silenziosi di ogni nostro desiderio.

Oggi quando entriamo in una stanza ed è buio cerchiamo istintivamente l'interruttore della luce, perché diamo per scontato che vi sia un impianto elettrico. In futuro la prima cosa che faremo sarà cercare un punto d'accesso a internet, perché daremo per scontato che quella stanza sia intelligente. Come ha detto il romanziere Max Frisch: «La tecnologia [è] l'abilità di organizzare il mondo in modo tale che non siamo costretti a farne l'esperienza»³.

La legge di Moore ci permette di prevedere l'evoluzione dei computer nel prossimo futuro. Nei decenni a venire i chip saranno combinati con sensori supersensibili, capaci di individuare malattie, incidenti ed emergenze, così da segnalarceli prima che la situazione sfugga al nostro controllo. Fino a una certa misura saranno in grado di riconoscere la voce e il viso umano, e di conversare con un linguaggio essenziale. Sapranno creare interi mondi virtuali che oggi riusciamo appena a immaginare. E intorno al 2020 il costo di un chip potrebbe scendere fino a circa un centesimo di dollaro, cioè al prezzo della carta straccia: a quel punto avremo milioni di chip distribuiti ovunque nell'ambiente in cui vivremo, sempre pronti a obbedire ai nostri ordini. In definitiva, lo stesso termine *computer* finirà per scomparire dal vocabolario.

Per esporre e discutere dei progressi della scienza e della tecnologia ho diviso ogni capitolo di questo libro in tre fasi temporali: futuro prossimo (da oggi al 2030), metà del secolo (dal 2030 al 2070) e futuro remoto (dal 2070 al 2100). Sono soltanto approssimazioni cronologiche, ma servono a collocare temporalmente le diverse tendenze illustrate nel libro.

La rapida ascesa dell'intelligenza dei computer nel corso di questo secolo ci fornirà il potere che una volta attribuivamo alle divinità mitologiche, permettendoci di controllare il mondo intorno a noi con il puro e semplice pensiero. Proprio come gli dèi, che potevano spostare gli oggetti e rimodellare l'esistenza con un semplice gesto della mano o con un cenno del capo, anche noi potremo controllare la realtà circostante grazie al potere della mente. Saremo infatti in continuo contatto mentale con i chip distribuiti nell'ambiente circostante, i quali eseguiranno immediatamente ogni nostro ordine.

Ricordo un episodio di *Star Trek* in cui l'*Enterprise* si imbatteva in un pianeta abitato proprio dalle divinità dell'antica Grecia. Gli uomini dell'equipaggio si ritrovavano così al cospetto del gigantesco dio Apollo, una figura enorme capace di impressionare e sopraffare grazie al suo potere divino. La scienza del XXIII secolo non poteva competere con un dio che aveva governato i cieli per migliaia di anni nel corso della storia dell'antica Grecia, ma una volta ripresisi dallo stupore, gli scienziati dell'*Enterprise* si resero conto che quel potere doveva avere una fonte, e che Apollo era sicuramente in contatto mentale con un computer centrale e una fonte d'energia in grado di eseguire i suoi comandi. Dopo avere localizzato e distrutto la centrale che gli forniva tale potere, gli scienziati ridussero Apollo a un comune mortale.

Quella era soltanto una sceneggiatura hollywoodiana, tuttavia proiettando in avanti le scoperte radicali che oggi vengono compiute nei laboratori, gli scienziati possono immaginare il giorno in cui anche noi potremo servirci del controllo telepatico dei computer per ottenere lo stesso potere di Apollo.

Occhiali e lenti a contatto per internet

Oggi possiamo comunicare via internet attraverso il computer o altri apparecchi, ma in futuro la rete sarà ovunque, sugli schermi alle pareti, nei mobili, sui tabelloni pubblicitari e persino nei nostri occhiali e nelle lenti a contatto. Per andare online sarà sufficiente una strizzatina d'occhio!

Ci sono diversi modi per mettere internet in una lente. L'immagine potrebbe essere inviata dagli occhiali direttamente alla lente oculare e poi alla retina. Oppure potrebbe essere proiettata sulla lente degli occhiali, che in tal caso fungerebbe da schermo. O ancora, una piccola lente da orefice potrebbe essere agganciata alla montatura degli occhiali. In questo modo ci conetteremmo a internet come se stessimo guardando un film. A quel punto potremmo gestire la navigazione con un dispositivo manuale wireless connesso a un computer. Oppure, più semplicemente, potremmo muovere le dita nell'aria per controllare l'immagine, poiché il computer sarà in grado di riconoscere la posizione delle nostre dita nel momento stesso in cui le muoviamo.

Per esempio, fin dal 1991 gli scienziati dell'Università di Washington hanno lavorato per perfezionare il VRD (*virtual retinal display*, display retinale virtuale), i cui laser rosso, verde e blu formano l'immagine direttamente sulla retina. Con un campo visivo di 120 gradi e una risoluzione di 1600 × 1200 pixel, il VRD produce un'immagine brillante e realistica, comparabile a quella che possiamo vedere in una sala cinematografica. Tale immagine può essere generata da un casco, da una mascherina per gli occhi o da semplici occhiali.

Ho potuto provare questi occhiali per internet già negli anni Novanta. Si trattava di un modello sperimentale creato dagli scienziati del Media Lab, al MIT. L'aspetto era quello di un paio di normalissimi occhiali, ma in più avevano una lente cilindrica di circa un centimetro e mezzo di lunghezza fissata sull'angolo destro della lente normale. Potevo vedere attraverso le lenti senza alcun problema, ed era sufficiente un colpetto perché quella minuscola lente andasse a piazzarsi dritta davanti all'occhio. Guardandovi dentro potevo vedere chiaramente un intero schermo da computer, di poco più piccolo di un comune monitor da scrivania. La nitidezza dell'immagine era sorprendente: mi sembrava di avere uno schermo vero e proprio davanti al naso. Con un telecomando delle dimensioni di un cellulare controllavo il cursore dell'interfaccia, e potevo persino digitare istruzioni.

Nel 2010, in occasione di uno speciale per Science Channel da me condotto, ho visitato i laboratori di Fort Banning, nello Stato della Georgia, dove l'esercito americano stava lavorando a un progetto di "internet da combattimento" chiamato *Land Warrior*. Ho indossato un elmetto speciale dotato di uno schermo in miniatura applicato di lato. Mi è bastato farlo ruotare per portarlo davanti agli occhi e vedere immediatamente un'immagine stupefacente: l'intero campo di battaglia con tante piccole X che indicavano le posizioni delle truppe amiche e di quelle nemiche. La cosa straordinaria era che la cosiddetta *nebbia di guerra* si era dissipata all'istante, grazie a sensori GPS capaci di localizzare con precisione assoluta la posizione di truppe, carri armati ed edifici. Premendo un pulsante, l'immagine cambiava ed ero subito in internet, proprio lì sul campo di battaglia, con tutte le informazioni relative alle condizioni meteorologiche, la disposizione delle truppe alleate e nemiche, le strategie e le tattiche da adottare.

Una versione molto più avanzata potrebbe proiettare le pagine di internet direttamente attraverso le lenti a contatto, inserendovi un chip e uno schermo a cristalli liquidi. Babak A. Parviz e il suo gruppo dell'Università di Washington a Seattle stanno per l'appunto gettando le basi per questo genere di lenti: stanno cioè progettando i prototipi che potrebbero modificare radicalmente il modo in cui accediamo alla rete.

Parviz immagina che una delle prime applicazioni di tale tecnologia potrebbe essere il monitoraggio del livello di glucosio nei diabetici. La lente riuscirebbe infatti a mostrare istantaneamente la lettura dei valori, così da prendere subito le contromisure necessarie. E questo è solo l'inizio! Infatti Parviz pensa già al giorno in cui potremo scaricare qualsiasi film, canzone o informazione da internet e "salvarli" nelle nostre lenti a contatto. Disporremo così di un archivio multimediale accessibile in qualsiasi momento, e quando vorremo guardare un bel film, basterà semplicemente accomodarci e guardarlo, così, senza dover fare niente! Queste lenti verrebbero impiegate anche per collegarci al computer del nostro ufficio e gestire i file, che ci apparirebbero davanti agli occhi. Comodi sulla nostra sdraio in spiaggia, entreremo in teleconferenza con un semplice battito delle ciglia.

Installando un software di riconoscimento delle forme in questi occhiali per internet, potrebbero anche riconoscere gli oggetti, e persino il volto delle persone note. Esistono già dei software capaci di riconoscere volti preprogrammati con una precisione superiore al 90 per cento. E non sto parlando semplicemente del nome, ma anche dei dati biografici della persona con cui stiamo parlando, ai quali potremo dare un'occhiata mentre chiacchieriamo. Sarebbe la fine dell'imbarazzo che di solito sperimentiamo quando ci imbattiamo in qualcuno che conosciamo ma di cui abbiamo dimenticato il nome. Ma tale sistema potrebbe rivelarsi assai utile anche durante una festa o un aperitivo, ovvero quando si incontrano molti sconosciuti che potrebbero anche essere personaggi molto importanti e noi non lo sappiamo. In futuro potremo infatti identificare chiunque e conoscere il suo background nel momento stesso in cui gli rivolgiamo la parola. (Tutto questo assomiglia, in una certa misura, al mondo che il cyborg di *Terminator* vede attraverso i suoi occhi robotizzati.)

Una rivoluzione del genere potrebbe riguardare anche il sistema scolastico. In futuro gli studenti impegnati negli esami potrebbero scandagliare tranquillamente internet grazie alle loro lenti a contatto e trovare tutti i dati e le informazioni necessarie, cosa che comporterebbe non pochi problemi agli insegnanti, che di solito valutano le capacità di memorizzazione. Ciò significa che gli educatori del futuro dovranno invece porre l'accento sulle capacità critiche e di ragionamento dello studente.

Gli occhiali del futuro potrebbero anche includere nella montatura una minuscola videocamera capace di filmare l'ambiente circostante e trasmettere direttamente le immagini in rete. In questo modo chiunque al mondo sarebbe nelle condizioni di condividere le nostre stesse esperienze nel momento stesso in cui le viviamo. In altre parole, migliaia di persone vedrebbero ciò che sta passando sotto i nostri occhi. I genitori sarebbero istantaneamente al corrente di ciò che stanno combinando i propri figli, oppure potremmo condividere le nostre esperienze con la persona amata anche quando si trova in un luogo diverso dal nostro. Le persone che assistono a un concerto potrebbero trasmettere la loro eccitazione agli altri fan di tutto il mondo, e gli ispettori degli impianti industriali potrebbero trasmettere in diretta le immagini dei siti visitati. (Immaginiamo una donna che fa shopping mentre altri le inviano commenti istantanei su ciò che sta comprando!)

Dal canto suo, Parviz è già riuscito a realizzare un chip talmente piccolo da poter essere

inserito all'interno del film polimerico delle lenti a contatto. Ha anche messo un led in una lente a contatto, e attualmente sta lavorando a un componente da 8×8 diodi. Inoltre, le sue lenti a contatto si possono controllare attraverso una connessione wireless.

Parviz afferma: «Tali componenti includeranno infine centinaia di led, attraverso cui le immagini prenderanno forma proprio sotto i nostri occhi, siano queste parole, grafici o fotografie. Buona parte dell'hardware è semitrasparente, quindi chi porterà le lenti potrà muoversi senza andare a sbattere contro qualcosa o sentirsi in qualche modo disorientato»⁴. Il suo obiettivo finale, per cui dovrà ancora lavorare molti anni, è realizzare lenti a contatto da 3600 pixel, ciascuna delle quali non avrà uno spessore superiore a 10 micrometri (un micrometro equivale a un milionesimo di metro).

Uno dei vantaggi delle lenti a contatto per internet è che consumano pochissima energia, solo qualche milionesimo di watt, quindi a livello energetico sono molto efficienti e non possono esaurire la batteria. Un altro vantaggio è che l'occhio e il nervo ottico sono, per certi versi, un'estensione diretta del cervello umano, al quale possiamo quindi accedere senza dover impiantare degli elettrodi al suo interno. Infatti l'occhio e il nervo ottico trasmettono informazioni con un flusso superiore alle connessioni internet ad alta velocità. Dunque le lenti a contatto per internet costituiscono forse il metodo più efficace e rapido per accedere al cervello.

Ma visualizzare un'immagine direttamente sull'occhio attraverso una lente a contatto è un po' più complesso rispetto agli occhiali per internet. Un led può produrre un punto (o pixel) di luce, ma è necessario aggiungere una microlente capace di metterlo a fuoco direttamente sulla retina. L'immagine finale sembrerà fluttuare nell'aria a circa 60 centimetri di distanza. Parviz sta prendendo in considerazione anche un progetto più avanzato che comporta l'impiego di microlaser, i quali invierebbero un'immagine supernitida direttamente alla retina.

Attraverso la stessa tecnologia impiegata dall'industria dei micro-chip per incidere minuscoli transistor, si potrebbero anche ricavare microscopici laser delle stesse dimensioni, che sarebbero i più piccoli al mondo. In linea di principio con questa tecnologia è ipotizzabile ottenere laser con un diametro di circa cento atomi. Come per i transistor, è concepibile stipare milioni di laser in un chip grande quanto un'unghia.

Automobili senza conducente

Nel prossimo futuro potremo anche navigare in tutta sicurezza sul web attraverso le lenti a contatto mentre guidiamo la nostra auto. Andare al lavoro non sarà più così estenuante, perché le automobili ci porteranno automaticamente a destinazione. Esistono già auto-mobili senza conducente che utilizzano il GPS per localizzare la propria posizione con al massimo un metro di approssimazione, e sono in grado di viaggiare per centinaia di chilometri.

Nel 2004 la DARPA (Defence Advanced Research Project Agency), un'organizzazione del Pentagono, ha sponsorizzato una competizione chiamata *DARPA Grand Challenge*, in cui diversi laboratori sono stati invitati a proporre i loro prototipi di auto senza conducente per una gara nel deserto del Mojave con in palio un milione di dollari. La DARPA portava dunque avanti la sua consolidata tradizione di finanziamento di progetti d'avanguardia rischiosi ma visionari. (Altri progetti del Pentagono riguardano internet, che originariamente fu ideata per mettere in contatto scienziati e dirigenti durante e dopo un'eventuale guerra nucleare, e il sistema GPS, inizialmente progettato per guidare i missili balistici intercontinentali. Alla fine della Guerra fredda sia internet sia il GPS sono stati desegretati e resi disponibili all'intera umanità.)

La competizione sponsorizzata dalla DARPA ha avuto un esito imbarazzante, poiché nessuna auto senza conducente è riuscita ad attraversare i quasi 250 chilometri di territorio accidentato del deserto e arrivare al traguardo. In pratica, tutti i veicoli-robot si sono persi o si sono danneggiati. Bisogna però considerare che dovevano viaggiare su strade che comprendevano un centinaio di curve strettissime, tre gallerie altrettanto strette e tratti con ripidi strapiombi su entrambi i lati della strada.

Alcuni hanno obiettato che forse quelle auto robotizzate sarebbero riuscite ad attraversare un deserto, ma non avrebbero mai potuto affrontare il traffico di un centro urbano. Di conseguenza, nel 2007 la DARPA ha sponsorizzato un progetto ancora più ambizioso chiamato *DARPA Urban Challenge*, in cui le auto dovevano completare un percorso di un centinaio di chilometri attraverso una finta zona urbana in meno di sei ore. I veicoli-robot hanno rispettato tutti i regolamenti stradali, evitato le altre auto in cui si sono imbattuti lungo il percorso e affrontato con successo gli incroci più trafficati. Ben sei équipes sono riuscite a completare con successo l'Urban Challenge, e le prime tre classificate si sono aggiudicate premi di 2 milioni, 1 milione e 500.000 dollari.

Il Pentagono vorrebbe rendere completamente autonomo un terzo delle sue forze di terra entro il 2015. Tale tecnologia potrebbe dimostrarsi d'importanza vitale, poiché tra le più recenti perdite statunitensi, la maggior parte è dovuta ai bombardamenti della rete stradale. In futuro gran parte dei veicoli delle forze armate statunitensi non avrà a bordo nessun conducente. Noi civili, invece, potremmo disporre di auto capaci di portarci dove vogliamo al semplice tocco di un pulsante, permettendoci così di rilassarci, ammirare il panorama, lavorare, guardare un film o "surfare" su internet.

In uno speciale televisivo per Discovery Channel ho avuto il privilegio di sedermi a bordo di una di queste auto. Era un'elegante auto sportiva, appositamente modificata dagli ingegneri dell'Università Statale della Carolina del Nord in modo da risultare completamente autonoma. Il suo sistema computerizzato aveva un potenziale pari a quello di otto PC.

In realtà, il problema maggiore è stato prendere posto nell'auto, perché l'abitacolo era pieno

zeppo di congegni: c'erano sofisticati componenti elettronici impilati uno sull'altro sia sui sedili sia sul cruscotto. Quando ho messo le mani sul volante ho notato che era collegato a un piccolo motore attraverso un particolare cavo di gomma. Controllato da uno dei computer di bordo, quel motore comandava autonomamente il volante.

Ho girato la chiave, premuto sull'acceleratore e sono andato in autostrada. Poi ho azionato l'interruttore tramite il quale il computer assumeva il comando del veicolo, e l'auto ha continuato ad andare avanti da sola, senza che tenessi le mani sul volante. La mia fiducia in quel prototipo era assoluta, poiché sapevo che i computer effettuavano continuamente ogni minima correzione necessaria attraverso il cavo collegato al volante. All'inizio ho trovato un po' inquietante che volante e acceleratore si muovessero da soli: sembrava che un fantasma avesse il controllo della situazione! Ma dopo un po' mi sono abituato, e alla fine mi sono potuto rilassare, mentre l'auto procedeva con precisione e regolarità sovrumane.

Il cuore di quell'auto senza conducente era il GPS, che permetteva al computer di localizzarla con un'approssimazione di poche decine di centimetri. (In realtà gli ingegneri mi avevano detto che in certe situazioni il GPS era in grado di determinare la posizione dell'auto con un'approssimazione di appena qualche centimetro.) Il GPS è di per sé una meraviglia della tecnologia moderna. Ciascuno dei trentadue satelliti GPS in orbita attorno al pianeta emette un'onda radio specifica, che viene registrata dall'apparecchio dell'auto. Poiché i satelliti viaggiano su orbite leggermente differenti, il loro segnale è moderatamente distorto, secondo quello che viene definito *effetto Doppler*: per esempio, le onde radio risultano compresse se il satellite si sta spostando nella nostra direzione, e allungate se si sta allontanando. Analizzando quella lieve distorsione di frequenza rispetto a tre o quattro satelliti, il computer dell'auto era in grado di determinare la posizione del veicolo con estrema precisione.

I parafanghi dell'auto erano muniti di un radar capace di individuare gli ostacoli. Questo avrà un'importanza cruciale in futuro, quando ogni veicolo potrà avviare automaticamente le misure di sicurezza necessarie nel caso rilevi la possibilità di un incidente. Attualmente solo negli Stati Uniti le vittime di incidenti stradali sono quarantamila l'anno. In futuro il termine stesso *incidente stradale* scomparirà dal linguaggio comune.

Anche code e ingorghi un bel giorno apparterranno al passato. Infatti un computer centralizzato potrà tracciare i movimenti di ogni veicolo in movimento comunicando direttamente con il computer dell'auto robotizzata. In tal modo individuare ingorghi e rallentamenti sarà estremamente facile. In un esperimento condotto a nord di San Diego, sull'interstatale 15, sono stati disposti dei chip sulla strada tramite i quali un computer centralizzato poteva monitorare il flusso delle auto. In caso di ingorgo il computer si sovrapponeva ai comandi manuali dell'auto e prendeva le misure necessarie per snellire il traffico.

Le auto del futuro saranno anche capaci di individuare pericoli di altro genere. Infatti sono migliaia le persone che hanno perso la vita o sono rimaste ferite in incidenti stradali dovuti a colpi di sonno, soprattutto nei viaggi notturni o in quelli lunghi e monotoni. I computer attuali possono monitorare i nostri occhi e riconoscere i primi segnali di assopimento. A quel punto il programma prevede l'emissione di un suono tale da risvegliarci. Se l'espedito non ha successo, è il computer stesso ad assumere la guida dell'automobile. Inoltre i computer potranno individuare nel conducente la presenza di sostanze alcoliche, e questo contribuirà a ridurre le migliaia di vittime annuali dovute a questo genere di abuso.

Il passaggio a questa forma di auto intelligente non avverrà immediatamente. I primi a servirsi

di questo genere di mezzi saranno i militari, che sperimentandoli potranno individuare ogni eventuale difetto. Successivamente le auto robotizzate verranno immesse sul mercato, facendo la loro prima comparsa sulle lunghe e snervanti tratte autostradali. Poi si vedranno anche nelle periferie e nelle grandi città, ma il conducente avrà sempre la possibilità di assumere il comando manuale in caso di emergenza. Alla fine questo genere di veicolo sarà talmente comodo e sicuro che ci chiederemo come abbiamo fatto a vivere senza!

Schermi-parete

I computer potranno non solo ridurre lo stress della vita da pendolari e gli incidenti stradali, ma continueranno a mantenerci in contatto con amici e conoscenti. Qualcuno ha lamentato il fatto che la rivoluzione informatica finirà per disumanizzarci e isolarci, ma in realtà ci ha permesso di espandere esponenzialmente la nostra cerchia di contatti. In futuro, quando ci sentiremo soli o avremo bisogno di compagnia non dovremo fare altro che chiedere al nostro schermo-parete di organizzare una partita a carte con altri cyberconoscenti in qualsiasi punto del pianeta. E se vorremo un aiuto per organizzare una vacanza o un viaggio, oppure per trovare qualcuno con cui uscire nel weekend, basterà chiederlo al software dello schermo-parete, che avrà le fattezze di un viso amichevole che potremo scegliere e cambiare a piacimento. Il computer conoscerà le nostre preferenze e scandaglierà internet per offrirci una lista delle migliori opzioni in termini di qualità-prezzo, nel caso di un viaggio, o di affinità, nel caso di una persona con cui andare a cena.

Anche gli incontri di famiglia potranno avvenire attraverso il video. I muri del nostro soggiorno disporranno di schermi-parete, cosicché saremo circondati dai visi dei nostri cari sebbene siano fisicamente lontani. Nel caso un nostro familiare non riuscisse a farci visita per un'occasione particolarmente importante, potremo comunque riunirci "intorno" a uno schermo-parete e celebrare tale occasione in maniera un po' reale e un po' virtuale. In alternativa, potranno essere le nostre lenti a contatto a fornirci le immagini dei nostri cari, immagini tanto vivide da far sembrare che le persone siano fisicamente presenti.

Alcuni hanno sottolineato che internet era stata originariamente concepita dal Pentagono come strumento "maschile", cioè volto al dominio del nemico in tempo di guerra. Oggi invece internet è prevalentemente "femminile", poiché è utilizzata soprattutto per entrare in contatto e comunicare con gli altri.

La teleconferenza sarà rimpiazzata dalla *telepresenza*: tramite occhiali o lenti a contatto ci giungeranno immagini e suoni tridimensionali della persona con cui stiamo comunicando. Per esempio, durante una riunione alcuni partecipanti saranno presenti fisicamente intorno a un tavolo, altri lo saranno soltanto nelle nostre lenti. Senza tali lenti alcuni posti a sedere sembrerebbero vuoti, ma grazie a questa nuova tecnologia potremo interloquire con tutti come se fossero esattamente al loro posto, cioè come se fossero fisicamente nella stanza. Tutti i partecipanti verranno ripresi con una videocamera speciale che li mostrerà seduti a un tavolo, e quelle immagini verranno trasmesse via internet.

Quando uscì *Guerre stellari* il pubblico rimase sbalordito di fronte alle immagini 3D dei personaggi che fluttuavano a mezz'aria. Ma in futuro, grazie alla tecnologia dei computer, quel genere di immagini sarà disponibile attraverso lenti a contatto, occhiali o schermi-parete.

All'inizio ci sembrerà un po' strano rivolgere la parola a una stanza vuota, ma non dimentichiamo che quando il telefono fece la sua prima comparsa qualcuno disse che la gente avrebbe cominciato a parlare a voci senza corpo. Si temeva che il nuovo apparecchio potesse sostituire gradualmente il contatto diretto, il faccia a faccia tra le persone. Per quanto allora quelle critiche potessero apparire sensate, oggi non ci preoccupiamo più di parlare a una voce attraverso un filo, perché il telefono ha ampliato enormemente la nostra cerchia di contatti e migliorato la nostra esistenza.

Tutto questo potrebbe anche avere un effetto sui rapporti sentimentali. Chi sarà solo e in cerca di compagnia potrà sempre contare sul suo schermo-parete, che avendo in memoria le sue preferenze in termini di caratteristiche fisiche e sociali, cercherà in rete un compagno o una compagna ideale. E poiché talvolta nella pubblicazione dei loro profili le persone si lasciano andare a qualche bugia, come misura di sicurezza lo schermo andrà automaticamente a scandagliare i particolari della storia personale del possibile partner, così da individuare eventuali falsità.

Carta elettronica flessibile

Il prezzo dei televisori a schermo piatto, che una volta superava i 5000 euro, è precipitato di un fattore pari a circa 50 nel giro di un decennio. In futuro anche gli schermi piatti grandi come un'intera parete avranno prezzi straordinariamente bassi. Saranno schermiparete flessibili e supersottili, basati sulla tecnologia OLED (*organic light-emitting diodes*, diodi organici a emissione luminosa). Si tratta di qualcosa di simile ai normali led, se non che il materiale di base è un composto organico che può essere organizzato in polimeri, così da renderlo flessibile. Ogni pixel di uno schermo flessibile è connesso a un transistor che ne controlla tonalità e intensità della luce.

Gli scienziati dell'Università Statale dell'Arizona stanno già collaborando con la Hewlett-Packard e l'esercito statunitense presso il Flexible Display Center al fine di perfezionare tale tecnologia. Successivamente le forze di mercato porteranno a un abbassamento dei costi tale da rendere accessibile al pubblico questa ennesima meraviglia tecnologica. Con il calare dei prezzi, il costo di questi schermiparete potrebbe in definitiva avvicinarsi a quello della comune carta da parati. Quindi in futuro, quando dovremo arredare la nostra casa, potremo scegliere proprio questa speciale "carta da parati". A quel punto cambiare colori e motivi sarà estremamente semplice: basterà premere un pulsante o addirittura ordinarlo a voce!

La tecnologia degli schermi flessibili potrebbe anche rivoluzionare il modo in cui interagiamo con i nostri computer portatili. Non avremo più bisogno di trascinarci dietro pesanti borsoni, perché i nostri portatili assomiglieranno a un semplice foglio di OLED, da piegare e sistemare all'interno del portafoglio. O forse i cellulari stessi conterranno uno schermo flessibile da estrarre e aprire a piacimento. Così, anziché sforzarsi di scrivere con la minuscola tastiera del cellulare, avremo a disposizione uno schermo grande quanto vogliamo.

Questa tecnologia rende anche possibile la produzione di schermi per computer totalmente trasparenti. In un prossimo futuro potremo forse guardare fuori da una finestra che, con un semplice gesto, si trasformerà in uno schermo, attraverso cui vedere le immagini o i panorami che desideriamo.

Oggi usiamo blocchetti di carta per prendere appunti, poi li gettiamo via quando non ci servono più. In futuro disporremo invece di "computer per appunti", privi di una particolare identità o caratteristica, su cui scribacchiare le nostre note e "svuotarli" quando desideriamo. Spesso disponiamo scrivania e mobili in base a dove vogliamo mettere il computer, che rappresenta il cuore del nostro ufficio, ma in futuro i desktop computer scompariranno, e i file che di solito custodiscono ce li porteremo sempre appresso, da un luogo all'altro, da una stanza a un'altra o dall'ufficio a casa. La tecnologia informatica a nostra disposizione diventerà in un certo senso invisibile, presente ovunque e in qualsiasi situazione. Oggi negli aeroporti vediamo centinaia di viaggiatori andare avanti e indietro con appresso il loro prezioso portatile. Appena arrivati in albergo si connettono a internet, e quando tornano a casa o in ufficio con ogni probabilità trasferiscono i file nuovi o modificati sul computer da scrivania. In futuro non sarà necessario caricarci del peso di un portatile, poiché ovunque volteremo lo sguardo troveremo pareti, cornici e mobili connessi a internet, anche quando viaggeremo in treno o in macchina. (Il *cloud computing*, o "nuvola informatica", che rende disponibili risorse software di elaborazione e memorizzazione direttamente in rete, è già una forma di servizio simile all'acqua

corrente o all'elettricità, e costituisce un primo esempio di quanto appena descritto.)

Mondi virtuali

Lo scopo dell'*ubiquitous computing* prefigurato da Weiser è portare i computer nella nostra realtà piazzando chip ovunque. Il proposito della realtà virtuale è invece opposto, poiché intende trasferire la coscienza umana nel mondo del computer.

La realtà virtuale fu introdotta per la prima volta dai militari statunitensi intorno agli anni Sessanta, attraverso simulatori che fungevano da strumenti di addestramento per piloti e soldati. I piloti facevano pratica d'atterraggio sulla pista di una portaerei osservando lo schermo di un computer e maneggiando un joystick. In caso di guerra nucleare, generali e leader politici avrebbero potuto incontrarsi segretamente nel cyberspazio, senza dover abbandonare i loro posti di comando.

Oggi grazie alla crescita esponenziale della potenza dei computer possiamo vivere in una realtà simulata e controllare il nostro *avatar*, ovvero un'immagine animata che ci rappresenta. Possiamo così incontrare altri avatar, esplorare mondi immaginari e persino innamorarci e sposarci. In questo mondo virtuale acquistiamo beni virtuali con denaro virtuale che può poi essere convertito in valuta corrente. Uno dei "luoghi" più popolari su cui è possibile sperimentare tale simulazione è Second Life, che nel 2009 contava già sedici milioni di utenti. In quello stesso anno alcune persone sono riuscite a guadagnare più di un milione di dollari proprio grazie a Second Life. (Tale profitto è peraltro sottoposto a tassazione dal governo statunitense, che ovviamente lo considera tutt'altro che virtuale!)

La realtà virtuale è già una delle componenti base dei videogiochi. Grazie alla sempre maggiore potenza dei computer, nel prossimo futuro visiteremo mondi non reali utilizzando i nostri occhiali o gli schermi-parete. Per esempio, quando vorremo fare un po' di shopping o esplorare un luogo esotico, potremo farlo prima di tutto attraverso la realtà virtuale, navigando sullo schermo del computer come se ci trovassimo fisicamente sul posto. Faremo una passeggiata sulla Luna, una vacanza su Marte, acquisteremo prodotti in paesi lontani, visiteremo qualsiasi museo e decideremo noi stessi dove vogliamo andare.

In una certa misura, in un cybermondo del genere riusciremo persino a sentire e a toccare gli oggetti. È quella che viene chiamata *tecnologia aptica*, e grazie alla quale è possibile percepire la presenza di oggetti generati al computer. I primi a svilupparla furono gli scienziati che dovevano maneggiare materiali altamente radioattivi con braccia robotizzate controllate a distanza, ma anche i militari, i quali avevano la necessità che i loro piloti sentissero attraverso il joystick del simulatore di volo la stessa resistenza che avrebbero incontrato nel volo reale.

Per replicare il senso del tatto gli scienziati hanno ideato un congegno collegato a molle e ingranaggi. Spingendo con le dita su tale congegno, questo oppone una resistenza, una spinta in senso contrario così da simulare la percezione della pressione. Tanto per fare un esempio, facendo scivolare le dita su un tavolo virtuale, tale congegno può simulare la sensazione che si ottiene accarezzando una dura superficie legnosa. Allo stesso modo, è possibile avere una percezione degli oggetti che ci vengono mostrati dagli occhialini nella realtà virtuale, completando così l'illusione di trovarci realmente in un determinato luogo.

Per riprodurre la sensazione della materia, un altro congegno fa sì che al passaggio delle dita su una superficie, ricoperta di migliaia di minuscoli sensori che si alzano e si abbassano al

comando di un computer, percepiamo la trama e la consistenza di superfici dure, di tessuti vellutati o di carta vetrata. In futuro sarà sufficiente indossare guanti speciali per avere una sensazione realistica del tatto in rapporto a oggetti e superfici diverse.

Ciò risulterà di fondamentale importanza per l'addestramento dei chirurghi del futuro, i quali durante un intervento devono percepire chiaramente la pressione esercitata sul paziente, che per l'esercitazione potrebbe essere rappresentato da un'immagine olografica tridimensionale. Ci avvicineremo dunque al ponte ologrammi di *Star Trek*, congegno che permette di avventurarsi in un mondo virtuale ed entrare in contatto con gli oggetti che contiene. Vagando in una stanza assolutamente vuota, attraverso speciali occhialini o lenti a contatto potremo vedere oggetti fantastici, e appena faremo un movimento per afferrarli un congegno aptico spunterà dal pavimento, simulando lo specifico oggetto che stiamo toccando.

Ho avuto la fortuna di sperimentare personalmente questo genere di tecnologia quando ho visitato il CAVE (*cave automatic virtual environment*) della Rowan University, nel New Jersey, per una trasmissione di Science Channel. Sono stato accompagnato in una stanza vuota, dove ciascuna delle quattro pareti era illuminata da immagini 3D che procuravano l'illusione di trovarsi in un altro mondo. Nel corso di una di queste dimostrazioni ero circondato da giganteschi e feroci dinosauri. Muovendo un joystick potevo fare una cavalcata sul dorso di un *Tyrannosaurus rex*, o persino infilarmi nella sua bocca. Poi ho fatto visita all'Aberdeen Proving Ground, nel Maryland, dove le forze armate statunitensi hanno realizzato la versione più avanzata del ponte ologrammi di *Star Trek*. Ho indossato un casco e uno zaino pieni di sensori, in modo che il computer rilevasse la mia posizione all'istante e con la massima precisione. Poi ho cominciato a camminare sull'*omnidirectional treadmill* (nastro trasportatore multidirezionale), una specie di tapis roulant molto sofisticato che consente di prendere qualsiasi direzione rimanendo sul posto. Mi sono improvvisamente ritrovato su un campo di battaglia, intento a schivare le pallottole dei cecchini nemici. Potevo correre da tutte le parti, nascondermi in un vicolo o attraversare di corsa una strada, e le immagini 3D cambiavano istantaneamente, anche quando decidevo di coricarmi per terra. Credo che in futuro potremo vivere esperienze totalmente virtuali, magari ingaggiando un'accanita battaglia con navicelle spaziali aliene, fuggendo da mostri feroci o spassandocela su un'isola deserta, e il tutto restando tranquillamente seduti nel soggiorno di casa nostra.

Le cure mediche del futuro

Anche le visite dal medico subiranno una totale trasformazione. Per esempio, per un check-up di routine ci rivolgeremo a un “medico” che potrà anche sembrare una persona, ma in realtà sarà un’immagine animata, programmata per porci alcuni semplici quesiti. Il medico del futuro disporrà di tutti i nostri dati genetici e potrà raccomandarci cure personalizzate tenendo conto dei fattori di rischio genetici.

Per diagnosticare un qualche disturbo, il medico ci chiederà di far passare sul nostro corpo una semplice sonda. Nella serie originale di *Star Trek* abbiamo osservato stupiti un congegno chiamato *tricorder*, con cui si poteva diagnosticare istantaneamente qualsiasi malattia e osservare l’interno del corpo in ogni suo particolare. Tuttavia, per avere a disposizione un tale congegno futuristico non dovremo aspettare il XXIII secolo! Disponiamo già della MRI (*magnetic resonance imaging*, imaging a risonanza magnetica), che originariamente veniva eseguita da macchinari del peso di diverse tonnellate e capaci di occupare una stanza, ma che oggi sono già stati portati alle dimensioni di una trentina di centimetri e in futuro potranno diventare come un comune cellulare. Facendo scorrere tale sonda sul nostro corpo potremo vedere sotto la nostra pelle. Successivamente i computer elaboreranno tali immagini 3D e ci forniranno una diagnosi accurata. Sonde del genere potranno rilevare nel giro di pochi minuti l’eventuale insorgenza di una delle tante possibili malattie, compreso il cancro. Le sonde conterranno chip a DNA, ovvero chip di silicio dotati di milioni di minuscoli sensori capaci di individuare la presenza del DNA specifico di varie malattie.

Com’è noto, molte persone detestano andare dal dottore. Ma in futuro la nostra salute sarà monitorata silenziosamente e senza alcuno sforzo da parte nostra, anche diverse volte al giorno, secondo un processo automatico di cui non saremo neppure consapevoli. Il gabinetto, lo specchio del bagno e gli abiti conterranno chip a DNA capaci di rilevare anche minuscole colonie di cellule cancerose di non più di un centinaio di unità. In futuro ci saranno più sensori nascosti nei bagni e nei vestiti che nei più moderni ospedali di oggi. Per esempio, soffiando su uno specchio gli permetteremo di individuare l’eventuale presenza di una proteina mutata chiamata *p53*, implicata nel 50 per cento delle forme più comuni di cancro. Ciò significa che lo stesso termine *cancro* potrebbe scomparire dal nostro vocabolario!

Oggi se ci troviamo coinvolti in un brutto incidente automobilistico su una strada isolata rischiamo di morire per un’emorragia, ma in futuro saranno i nostri stessi vestiti e la nostra auto a entrare automaticamente in azione ai primi segnali di trauma, chiamando un’ambulanza, localizzandoci con precisione e scaricando la nostra anamnesi completa, anche se ci troveremo in stato d’incoscienza. In sostanza, morire per mancanza di cure sarà assai più improbabile. I nostri abiti sapranno individuare ogni minima irregolarità del battito cardiaco, della respirazione e persino delle onde cerebrali attraverso minuscoli chip inseriti nel tessuto. In altre parole, appena indosseremo i vestiti saremo online e dal medico!

Già oggi riusciamo a inserire un chip in una pillola grande come un’aspirina, con tanto di telecamera e radiotrasmittente. Una volta ingoiata, questa “pillola intelligente” può riprendere l’interno dalla gola e dell’esofago, fino all’intestino, nonché inviare segnali radio a un ricevitore nelle vicinanze. (Forse questo attribuisce un nuovo significato allo slogan «Intel inside»!) In questo modo il personale medico potrà osservare foto degli intestini del paziente e

individuare eventuali forme cancerose senza dover eseguire una coloscopia, evitando così di inserire un tubo di quasi 2 metri su per l'intestino crasso. Inoltre, analoghi congegni microscopici consentiranno di ridurre gradualmente la necessità di incidere il corpo del paziente per operarlo.

Questo è solo uno dei tanti modi in cui la rivoluzione informatica contribuirà al miglioramento della nostra salute. Discuteremo più in dettaglio tali straordinari cambiamenti in campo medico nei Capitoli 3 e 4, in cui parleremo anche di terapia genica, clonazione e durata media della vita umana.

Vivere una favola

Poiché i computer saranno potentissimi, a basso costo e largamente diffusi, alcuni futurologi hanno spiegato che il nostro futuro potrebbe assomigliare a una favola. Infatti, se davvero conquistassimo un potere come quello degli dèi, la nostra dimora celeste sarebbe sicuramente un mondo fantastico. Il futuro di internet, tanto per fare un esempio, è quello di diventare lo specchio magico di Biancaneve. Sarà sufficiente pronunciare le parole: «Specchio, specchio sulla parete...» per veder apparire un viso amichevole che ci garantirà l'accesso al sapere dell'intero pianeta. Inseriremo chip anche nei giocattoli, rendendoli intelligenti: come Pinocchio, la marionetta che voleva diventare un bambino in carne e ossa; e come Pocahontas parleremo agli alberi e al vento, e questi ci risponderanno. Daremo per scontato che qualunque oggetto abbia una sua intelligenza e quindi sarà ovvio rivolgergli la parola.

Poiché i computer saranno in grado di identificare molti dei geni che controllano il processo d'invecchiamento, potremo mantenerci eternamente giovani, come dei Peter Pan. O forse riuscire a rallentare, e magari a invertire, questo stesso processo, come i ragazzi dell'isola che non c'è, che non volevano crescere. La realtà aumentata ci darà l'illusione di poterci recare, come Cenerentola, a grandi balli immaginari a bordo di una carrozza reale, per poi danzare con il nostro Principe Azzurro. (L'unica differenza è che a mezzanotte i nostri occhiali a realtà aumentata si spegneranno automaticamente, facendoci tornare nel mondo reale.) Poiché i computer individueranno i geni che controllano il nostro corpo, sarà possibile riprogettarlo anche a livello genetico, oppure sostituendone gli organi e cambiandone l'aspetto, un po' come accade in *La bella e la bestia*.

Alcuni futurologi temono persino che ciò possa risvegliare un ritorno al misticismo medievale, secondo il quale la maggior parte delle persone credeva che l'ambiente circostante fosse popolato da spiriti invisibili!

METÀ DEL SECOLO (DAL 2030 AL 2070)

La fine della legge di Moore

A questo punto dobbiamo chiederci: fino a quando durerà la rivoluzione informatica? Infatti, se dovesse continuare a mantenere i ritmi dettati dalla legge di Moore per altri cinquant'anni, le capacità di calcolo dei computer arriverebbero a superare quelle del cervello umano. Di questo passo, a metà del secolo subentreranno nuove dinamiche. Mi viene in mente il titolo di un album di George Harrison, *All Things Must Pass*, ovvero "tutte le cose giungono a un termine". Proprio così: anche la legge di Moore dovrà finire, e con questa pure la straordinaria crescita di potenza dei computer che ha alimentato lo sviluppo economico nella prima metà del secolo.

Oggi diamo per scontato, anzi riteniamo che sia un nostro diritto, che i prodotti informatici siano sempre più potenti e complessi. Infatti ogni anno compriamo nuovi apparecchi sapendo che saranno quasi due volte più potenti del modello precedente. Ma se la legge di Moore venisse meno e ogni nuova generazione di computer avesse all'incirca la stessa potenza e velocità di quella precedente, perché dovremmo preoccuparci di sostituire i vecchi computer?

Poiché a metà del secolo i chip saranno ormai presenti in un'ampia gamma di prodotti, gli effetti sull'intera economia planetaria potrebbero essere disastrosi. Infatti, se intere industrie dovessero arrestarsi di colpo, milioni di persone perderebbero il lavoro e l'economia mondiale cadrebbe rapidamente nel caos.

Anni fa, quando noi fisici abbiamo sottolineato l'inevitabile collasso della legge di Moore, com'era ovvio attendersi l'industria ha risposto dileggiando quell'ipotesi e definendoci allarmisti. Secondo loro la fine della legge di Moore era già stata prevista così tante volte che ormai non ci credeva più nessuno.

Be', non proprio nessuno...

Due anni fa ho partecipato a un'importante conferenza organizzata dalla Microsoft presso il suo quartiere generale a Seattle. Il pubblico era composto di tremila ingegneri dell'azienda, tutti curiosi di sentire che cosa avessi da dire sul futuro dei computer e delle telecomunicazioni. Sbirciando con lo sguardo tra la folla, potevo contemplare i volti di quei giovani, entusiastici ingegneri che avrebbero continuato a creare i programmi che fanno funzionare i nostri computer. Ebbene, riguardo alla legge di Moore sono stato bruscamente sincero, e ho precisato che il settore doveva prepararsi a un collasso. Se avessi pronunciato le stesse parole un decennio prima, forse avrebbero reagito tutti con una risatina più o meno soffocata. Ma in quell'occasione ho visto soltanto persone fare cenno di sì con il capo.

Il futuro collasso della legge di Moore è dunque una questione d'importanza internazionale, che mette a rischio milioni di dollari. Tuttavia, definire con precisione quando e come giungeremo alla sua fine, e che cosa verrà dopo, dipende dalle leggi della fisica. Le risposte a tali interrogativi fisici finiranno per sconvolgere la struttura economica del capitalismo.

Per comprendere questa situazione è importante notare che lo straordinario successo della rivoluzione informatica si basa proprio su alcuni rigidi principi fisici. Primo, i computer hanno raggiunto una potenza straordinaria perché i segnali elettrici viaggiano a velocità prossime a quella della luce, che in attesa di conferma della recente scoperta sulla velocità dei neutrini rappresenta ancora il limite massimo dell'universo. Un raggio di luce può girare il mondo per sette volte o raggiungere la Luna in un solo secondo. Anche gli elettroni possono essere spostati facilmente e legati debolmente a un atomo (possono essere spazzati via da un semplicissimo

gesto come sistemarsi i capelli, camminare su un tappeto o fare il bucato, per questo abbiamo fenomeni di elettricità statica). La combinazione di elettroni legati debolmente e la loro enorme velocità ci consente di inviare segnali elettrici a un ritmo “accecante”, cosa che ha dato vita alla rivoluzione elettrica del secolo scorso.

Secondo, non ci sono praticamente limiti alla quantità di informazioni che possiamo inserire in un raggio laser. Le onde luminose, che vibrano a velocità molto superiori a quella delle onde sonore, trasmettono molte più informazioni rispetto al suono. (Per esempio, immaginiamo di tendere una lunga corda e di farne vibrare rapidamente un'estremità. Più velocemente riusciremo a farla agitare, maggiore sarà il numero di segnali trasmesso lungo la corda. Quindi la quantità di informazioni che possiamo inserire in un'onda aumenta in base a quanto velocemente facciamo vibrare la corda.) La luce è un'onda che vibra approssimativamente a 10^{14} cicli al secondo (cioè 1 seguito da 14 zeri).

Per trasmettere un bit di informazioni (1 o 0) occorrono molti cicli. Ciò significa che un cavo a fibre ottiche può trasmettere approssimativamente 10^{11} bit di informazioni su una singola frequenza. Tale numero viene però aumentato stipando molti segnali in una singola fibra ottica, e poi legando tutte queste fibre all'interno di un cavo. Questo implica che, aumentando il numero di canali disponibili nello stesso cavo, e poi il numero di cavi, la quantità di informazioni trasferibile è pressoché illimitata.

Terzo e più importante punto, la rivoluzione informatica è guidata dalla miniaturizzazione dei transistor. Un transistor è una porta logica, o switch, che controlla il flusso dell'elettricità. Comparando un circuito elettrico a un impianto idraulico, possiamo dire che il transistor è come una valvola che controlla il flusso dell'acqua. E come la semplice apertura di una valvola può controllare il flusso di un'enorme quantità d'acqua, i transistor permettono che un flusso minimo di elettricità ne controlli uno molto più grande, amplificandone quindi la portata.

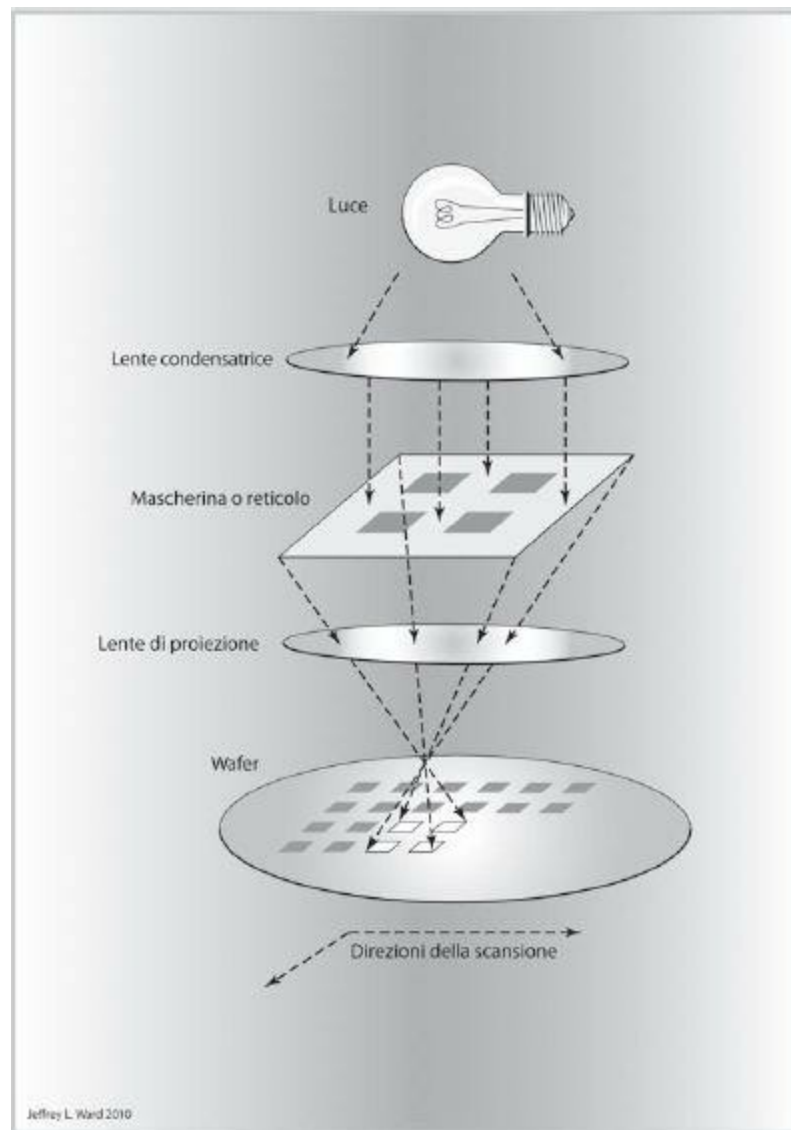
Il cuore di questa rivoluzione è il chip, il microcircuito integrato che contiene centinaia di milioni di transistor su un wafer di silicio, ovvero una piastrina sottile di materiale semiconduttore delle dimensioni di un'unghia. All'interno di un qualsiasi computer portatile c'è un chip i cui transistor possono essere osservati unicamente con un microscopio. Tali transistor incredibilmente piccoli vengono creati nello stesso modo in cui si imprime le grafiche sulle t-shirt, cioè in serie attraverso una matrice: si crea una mascherina con il profilo di milioni di transistor e si appoggia su un wafer contenente molti strati di silicio, che è sensibile alla luce. Il wafer viene poi esposto a una luce ultravioletta, che penetra attraverso le fessure della mascherina e imprime i profili. Successivamente il wafer di silicio viene immerso in un acido, che scava i profili dei circuiti e crea l'intricato design di milioni di transistor. Poiché il wafer si compone di molti strati di conduttori e semiconduttori, l'acido lo corrode e lo incide a diverse profondità, rendendo così possibile la creazione di circuiti di enorme complessità.

Uno dei motivi per cui la legge di Moore è stata finora rispettata, aumentando in modo inarrestabile la potenza dei chip, è che la luce ultravioletta può essere sintonizzata su lunghezze d'onda gradualmente inferiori, cosicché i transistor incisi con procedimento chimico sui wafer di silicio possono diventare sempre più piccoli. Poiché la luce ultravioletta ha una lunghezza d'onda di 10 nanometri (un nanometro equivale a un milionesimo di metro), ciò significa che il più piccolo transistor che è possibile incidere avrà un diametro di circa trenta atomi.

Ma questo processo non può andare avanti all'infinito. A un certo punto diventerà fisicamente impossibile continuare a incidere transistor in questo modo, perché dovremo fare i conti con le dimensioni degli atomi. Possiamo quindi ipotizzare che la legge di Moore giungerà al collasso

quando arriveremo a produrre transistor delle dimensioni di un atomo.

Intorno al 2020, o subito dopo, la legge di Moore comincerà a dimostrarsi sempre meno affidabile, e la Silicon Valley potrebbe lentamente trasformarsi in una Rust Belt⁵, a meno che non si trovi una tecnologia alternativa. Secondo le leggi della fisica, ciò implica che l'era del silicio giungerà al termine ed entreremo in quella del postsilicio. I transistor diventeranno così piccoli che la teoria quantistica o la fisica atomica prenderanno il sopravvento e gli elettroni fuoriusciranno dai conduttori elettrici. Per esempio, lo strato più sottile all'interno del nostro computer sarà di circa cinque atomi, e a quel punto, secondo le leggi della fisica, prevarrà la teoria quantistica. Il principio di indeterminazione di Heisenberg stabilisce che non possiamo conoscere contemporaneamente velocità e posizione di una particella. Potrà sembrare illogico, ma a livello atomico non è concretamente possibile conoscere l'esatta posizione di un elettrone, quindi non potrà mai essere confinato in un conduttore o in uno strato ultrasottile, così fuoriuscirà provocando un cortocircuito.



I chip vengono fatti in serie nello stesso modo in cui si stampano le t-shirt. Anziché vernice colorata si usa la luce ultravioletta, che passando attraverso una mascherina imprime un'immagine sugli strati di silicio. Poi si esegue l'incisione con l'acido, creando centinaia di milioni di transistor. Ma questo processo ha un limite, che è la scala atomica: quando arriveremo a produrre chip piccoli come un atomo la legge di Moore crollerà, e la Silicon Valley potrebbe trasformarsi in una nuova Rust Belt. (Illustrazione Jeffrey L. Ward)

Ne discuteremo meglio nel Capitolo 4, quando analizzeremo la nanotecnologia. Per quanto riguarda il resto di questo capitolo, ipotizzerò che i fisici abbiano infine trovato un sostituto del silicio, sebbene questo comporti un incremento della potenza dei computer molto più lento che in precedenza: le loro prestazioni continueranno a crescere esponenzialmente, ma perché raddoppino non occorreranno più diciotto mesi, bensì diversi anni.

Mescolare realtà e realtà virtuale

Verso la metà del secolo dovremmo ritrovarci a vivere in un misto di realtà e realtà virtuale. Attraverso le nostre lenti a contatto o gli occhiali percepiremo simultaneamente le immagini virtuali sovrapposte a quelle della realtà quotidiana. È questa la visione di Susumu Tachi della Keio University, in Giappone, e di molti altri ricercatori. Tachi sta infatti lavorando a speciali occhialini che mescoleranno fantasia e realtà. Il suo primo progetto consiste nel far sparire gli oggetti nel nulla.

Sono andato a Tokyo a incontrare il professor Tachi e ho potuto vedere di persona alcuni dei suoi incredibili esperimenti con la realtà “reale” e quella virtuale. Uno di questi consiste nel far scomparire un oggetto, almeno per come lo vediamo attraverso gli occhiali. Prima di tutto ho indossato un impermeabile speciale color beige che, allargando le braccia, si apriva come una grossa vela. Poi una telecamera è stata messa a fuoco sul mio impermeabile, mentre una seconda filmava lo scenario alle mie spalle, che era fatto di autobus e automobili in movimento lungo una strada. Un istante dopo un computer ha amalgamato le due immagini, cosicché l’immagine alle mie spalle è stata proiettata sul mio impermeabile, come se si trattasse di uno schermo. Se osservato attraverso una lente speciale, il mio corpo spariva completamente, lasciando soltanto l’immagine delle auto e degli autobus, e la mia testa, che non era coperta dall’impermeabile, sembrava fluttuare nell’aria senza corpo, come accade a Harry Potter quando indossa il suo mantello invisibile.

Successivamente il professor Tachi mi ha mostrato degli occhiali speciali che, una volta indossati, permettono di percepire oggetti reali e di farli scomparire. Ovviamente, non si tratta di vera invisibilità, poiché l’effetto si ottiene solo indossando quegli occhiali, che fondono insieme due immagini. Ad ogni modo fa parte del programma del professor Tachi, e talvolta viene definito *realtà aumentata*.

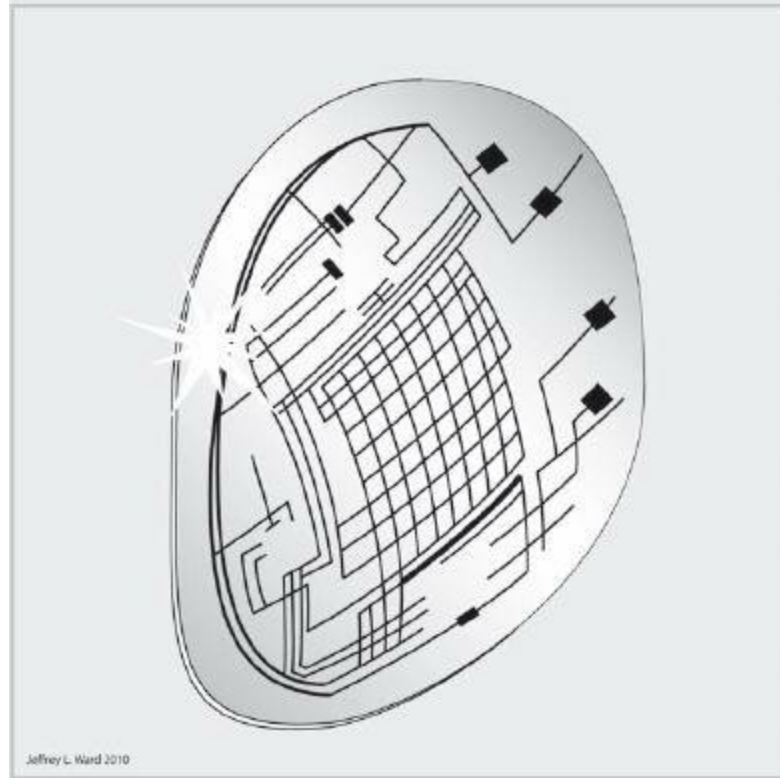
Verso la metà del secolo vivremo in un cybermondo pienamente funzionante, nel quale il mondo reale si mescolerà con le immagini generate da un computer. Questo potrebbe trasformare radicalmente posti di lavoro, commercio, intrattenimento e, in generale, il nostro stile di vita.

La realtà aumentata avrebbe conseguenze immediate sul mercato. La prima applicazione commerciale potrebbe consistere nel rendere invisibili certi oggetti, o nel fare in modo che qualcosa di invisibile diventi visibile. Per esempio, un pilota di aerei o un conducente d’auto potrebbe guadagnare una visibilità a 360 gradi e osservare persino ciò che succede sotto i suoi piedi, poiché i suoi occhiali o lenti gli permetterebbero di “vedere” attraverso la struttura dell’aereo o dell’auto. In una battaglia nei cieli, i piloti dei jet potrebbero individuare il nemico ovunque si trovi, sia sopra sia sotto di loro, perché in pratica si troverebbero a pilotare un jet trasparente. Lo stesso vale per i conducenti delle automobili, che riuscirebbero a “guardare” in tutte le direzioni grazie a minuscole videocamere installate tutto intorno al veicolo. Questo potrebbe eliminare i cosiddetti *punti ciechi*, che spesso sono responsabili di incidenti anche mortali.

Un astronauta impegnato in una riparazione all’esterno della sua astronave ne trarrebbe altrettanto vantaggio, poiché vedrebbe attraverso le pareti, gli scomparti e il guscio stesso dell’astronave, garantendogli anche la massima sicurezza. Oppure immaginiamo un operaio che

si stia occupando di riparazioni sotterranee, immerso in un groviglio di cavi, condutture e valvole: saprebbe con precisione in che modo sono disposti e connessi, cosa di vitale importanza in caso di esplosione causata dal gas o dal vapore, quando le condutture devono essere riparate e ricongiunte con la dovuta rapidità.

Allo stesso modo, un prospettore sbircerebbe sottoterra per individuare e studiare facilmente i giacimenti d'acqua o petrolio. Le fotografie a infrarossi e ultravioletti scattate da satelliti e aerei verrebbero analizzate e quindi trasmesse alle sue lenti a contatto, fornendogli una visione tridimensionale del sito e di ciò che si nasconde sotto la superficie. Passeggiando su un terreno brullo, le lenti gli consentirebbero di “vedere” depositi di minerali preziosi.



Lenti a contatto sempre online riconosceranno il volto delle persone, ci forniranno informazioni biografiche su di loro e, se necessario, tradurranno ciò che dicono sotto forma di sottotitoli. I turisti le userebbero per far “rivivere” antiche rovine. Gli artisti e gli architetti potrebbero invece manipolare e rimodellare le loro creazioni virtuali. Le possibili applicazioni della realtà aumentata sono infinite. (Illustrazione Jeffrey L. Ward)

Ma oltre a rendere visibili e invisibili gli oggetti, saremo anche in grado di rendere visibile ciò che ancora non esiste.

Immaginiamo di essere un architetto: potremo muoverci in una stanza vuota e improvvisamente “vedere” un'immagine tridimensionale dell'intero edificio che stiamo progettando. Le forme del progetto prenderanno letteralmente vita mentre attraversiamo ogni ambiente. Le stanze si animeranno all'istante, con tanto di mobili, tappeti e decorazioni, permettendoci di visualizzare in 3D la nostra creazione prima ancora che sia realmente costruita. Con un semplice gesto delle mani potremo creare nuovi ambienti, spostando pareti e cambiando arredamento. In questa realtà aumentata avremo il potere di un mago che, agitando la sua bacchetta magica, fa comparire dal nulla ciò di cui ha bisogno.

Realtà aumentata: una rivoluzione nel turismo, nelle arti, nello shopping e nella guerra

Come possiamo intuire, le ripercussioni della realtà aumentata sul commercio e sul mercato sono potenzialmente enormi. Non esiste attività che non ne trarrebbe vantaggio. Inoltre, la nostra stessa vita, le varie forme d'intrattenimento e la società nel suo complesso si arricchirebbero a dismisura, proprio grazie a questa nuova tecnologia.

Per esempio, visitando un museo e passando da una sala all'altra, le nostre lenti potrebbero descriverci ciascuna delle opere esposte, come una guida virtuale in un meraviglioso cybertour. Passeggiando tra antiche rovine, potremmo "vedere" una completa ricostruzione di quei monumenti o edifici in tutto lo splendore della loro epoca, con tanto di informazioni e aneddoti storici. Le rovine dell'impero romano si animerebbero, e invece di colonne spezzate e terreni ricoperti di erbacce vedremmo ambienti completamente ricostruiti e "viventi", attraverso cui girovagare accompagnati dai commenti e dalle note necessarie.

Il Beijing Institute of Technology ha già compiuto un primissimo passo in questa direzione ricreando nel cyberspazio quello che una volta era l'antico e favoloso Palazzo d'Estate, distrutto dalle forze anglo-francesi durante la seconda guerra dell'oppio del 1860. Oggi tutto ciò che ne resta è un mucchio di rovine, ripetutamente depredate nel corso del tempo. Tuttavia, contemplando tali rovine da una speciale piattaforma visiva, è possibile osservare l'intero giardino e vederlo rinascere sotto i propri occhi in tutto il suo splendore. Nel prossimo futuro tecnologie del genere saranno presenti ovunque.

Ma esiste un sistema ancora più avanzato creato dall'inventore Nikolas Neecke, che ha ideato una particolare escursione a piedi lungo le vie di Basilea, in Svizzera. Percorrendo le vecchie strade della città si possono contemplare immagini degli antichi edifici con tanto di personaggi del passato sovrapposti al presente, come in una sorta di viaggio nel tempo. Un computer rileva la posizione del visitatore e fornisce gli antichi scenari attraverso speciali occhialini, che possono riportarlo addirittura nel Medioevo. Oggi l'attrezzatura necessaria – occhialini e un pesante zaino pieno di dispositivi GPS e altri apparecchi elettronici – è ancora piuttosto ingombrante, ma un domani sarà disponibile nelle nostre lenti a contatto.

Guidando un'auto in terra straniera, potremo tenere sotto controllo le spie del veicolo attraverso le lenti a contatto, così da non dover nemmeno abbassare lo sguardo sul cruscotto. Nel contempo potremo leggere le indicazioni stradali nella nostra lingua, con tanto di informazioni su ciò che ci circonda, compresi i luoghi di interesse turistico.

Lo stesso varrà per un campeggiatore o un escursionista, che non solo potrà conoscere la sua esatta posizione in un territorio sconosciuto, ma anche ottenere informazioni sugli animali e le piante che incontra. Inoltre potrà consultare una mappa dell'area e le relative previsioni meteorologiche. Potrà anche vedere i sentieri o i campeggi eventualmente nascosti dalla boscaglia e dagli alberi.

Chi cerca una casa da acquistare o affittare avrà immediatamente l'intera panoramica degli appartamenti o delle case disponibili in una zona semplicemente camminando per strada o guidando l'auto. Le lenti a contatto gli mostreranno prezzi e caratteristiche di tutte le abitazioni.

Alla sera, osservando il cielo buio, vedremo le stelle e le costellazioni in maniera perfettamente nitida, come se fossimo in un planetario, con l'unica differenza che le stelle

davanti ai nostri occhi saranno quelle vere! Sapremo anche in quali punti della volta celeste si nascondono galassie, remoti buchi neri e altre curiosità astronomiche, di cui potremo scaricare interessanti documenti multimediali.

Oltre a consentirci di vedere attraverso gli oggetti e di visitare terre straniere senza impedimenti linguistici, se vorremo fruire di informazioni altamente specialistiche nel giro di pochi istanti la visione aumentata della realtà sarà assolutamente necessaria.

Per esempio, un attore, un musicista o un artista che debba memorizzare grandi quantitativi di materiale potrà servirsi delle lenti per consultare sul momento interi testi o spartiti. Non ci sarà più bisogno del “gobbo”, di cartelli fuori scena, spartiti su carta o appunti vari. E non sarà nemmeno necessario memorizzare alcunché.

Altri possibili esempi potrebbero essere:

- Uno studente che si fosse perso una lezione, potrà scaricare e guardare tutte le lezioni di cui ha bisogno, tenute da professori virtuali su qualunque materia desideri. Attraverso la telepresenza, l’immagine di un vero professore potrà rispondere ad ogni sua domanda. Inoltre, sempre attraverso le sue lenti speciali, lo studente potrà assistere a dimostrazioni di esperimenti, video e altro materiale simile.
- Un soldato sul campo di battaglia indosserà speciali occhialini o cuffie auricolari per ottenere le ultimissime informazioni, le mappe della zona, la posizione del nemico e la direzione del suo fuoco, istruzioni dei superiori e così via. Durante un combattimento, con le pallottole che sfrecciano in tutte le direzioni, il soldato riuscirà a vedere attraverso gli ostacoli e localizzare il nemico anche quando, per esempio, è nascosto dietro una collina. Questo grazie a droni volanti che, ispezionando continuamente la zona, potranno determinarne la posizione.
- Un chirurgo alle prese con una delicata operazione d’emergenza potrà vedere l’interno del corpo del paziente attraverso apparecchi MRI portatili o speciali sensori che si muovono tra gli organi, nonché accedere a tutta la documentazione medica (referti e video) delle operazioni o terapie precedenti.
- Gli amanti dei videogame potranno immergersi completamente in una realtà virtuale attraverso le lenti a contatto. Pur trovandosi in una stanza vuota, avranno una percezione chiarissima e in 3D dei compagni di gioco e del territorio alieno in cui dovranno combattere i nemici extraterrestri. Sarà proprio come stare sul campo di battaglia di un pianeta lontano, con tanto di sparatorie realistiche a colpi di raggi laser.
- Se avremo bisogno di consultare le statistiche di un atleta o a qualche altra informazione di carattere sportivo, le vedremo balenare istantaneamente sotto i nostri occhi grazie alle lenti.

Tutto ciò significa che non avremo più bisogno di telefoni cellulari, orologi e neppure di lettori MP3. Le icone relative ai diversi congegni che siamo soliti maneggiare quotidianamente verranno invece visualizzate dalle nostre lenti a contatto, in modo da poterli richiamare a piacimento. Telefono, siti web musicali eccetera saranno facilmente accessibili, cosicché molti degli apparecchi e gadget che usiamo oggi potranno essere sostituiti dalla realtà aumentata.

Tra i vari scienziati che stanno cercando di espandere i confini della realtà aumentata c’è Pattie Maes del MIT Media Lab. Invece di servirsi di particolari lenti a contatto o occhiali, Maes immagina di proiettare la schermata di un computer sugli oggetti in cui ci imbattiamo comunemente nel nostro ambiente. Il suo progetto, chiamato *Sixth Sense*, implica l’uso di una

minuscola videocamera-proiettore da portare attorno al collo come un medaglione, e capace di proiettare la schermata di un computer su qualsiasi superficie, per esempio una parete o un tavolo. Premendo pulsanti “immaginari” potremo usare il computer come se digitassimo su una vera tastiera o mouse. Poiché la videata del computer potrà essere proiettata su qualsiasi superficie piatta e solida, potremo utilizzare centinaia di oggetti come monitor.

Inoltre indosseremo particolari ditali di plastica su tutte le dita delle mani, che useremo per dare istruzioni al computer proiettato sulla parete. In pratica i ditali rimpiazzeranno il vecchio mouse, e con le dita stesse potremo tracciare grafici e disegni. Unendo pollici e indici per formare un quadrato con le dita, attiveremo una video-camera digitale per fare riprese e scattare fotografie.

Quando andremo a fare acquisti il computer si occuperà della scansione dei prodotti, identificandoli e offrendoci una lettura completa del loro contenuto o composizione e dei commenti degli altri consumatori. Poiché un chip costerà meno della stampa di un codice a barre, qualsiasi prodotto in commercio avrà un’etichetta intelligente da cui ricavare le informazioni di cui abbiamo bisogno.

Un’altra applicazione della realtà aumentata potrebbe essere la vista a raggi X (come Superman!) che fa ricorso a un processo chiamato *backscattering* (radiazione di ritorno). Con occhiali o lenti a contatto sensibili ai raggi X sarà possibile guardare attraverso le pareti, e più in generale attraverso qualsiasi oggetto. Leggendo i fumetti di *Superman* qualsiasi ragazzino avrà sognato di essere “più veloce di una pallottola è più potente di una locomotiva”. Migliaia di bambini hanno indossato quel mantello *immaginando* di poter schivare qualsiasi proiettile, sollevarsi in volo e vedere attraverso le cose, ma tutto ciò potrebbe presto trasformarsi in realtà.

Un problema dei comuni raggi X è che occorre posizionare una pellicola radiografica dietro l’oggetto, poi esporlo ai raggi X e infine sviluppare la pellicola. Invece i raggi X a retrodiffusione risolvono il problema: tanto per cominciare vengono emanati da una fonte luminosa capace di illuminare un’intera stanza; inoltre rimbalzano contro le pareti e attraversano da dietro l’oggetto che vogliamo analizzare. I nostri occhialini saranno sensibili ai raggi X che hanno eseguito la scansione dell’oggetto, e le immagini acquisite attraverso i raggi “di ritorno” saranno altrettanto valide di quelle di cui si serviva Superman. (Aumentando la sensibilità degli occhialini sarà possibile ridurre l’intensità dei raggi X, diminuendo così i rischi per la salute.)

Traduttori universali

In *Star Trek*, nella saga di *Guerre stellari* e praticamente in ogni altro film di fantascienza accade sempre qualcosa di straordinario: tutti gli alieni si esprimono perfettamente nella nostra lingua! Questo è dovuto alla presenza di un “traduttore universale” che consente ai terrestri di comunicare rapidamente con le diverse civiltà aliene, eliminando il tedioso inconveniente di dover ricorrere al linguaggio dei segni o a gestualità primitive.

Sebbene una volta si pensasse che tale congegno futuristico avesse ben poche probabilità di essere costruito, un suo prototipo esiste già. Possiamo dunque immaginare che in futuro i turisti che viaggeranno all'estero e dovranno comunicare con la popolazione locale vedranno apparire i sottotitoli della conversazione nelle loro lenti, come se guardassero un film in versione originale sottotitolata. Forse disporranno anche di computer capaci di fornire loro, tramite auricolare, una traduzione audio simultanea. In tal modo due persone che parlano lingue diverse, ma entrambe dotate di traduttore universale, potranno intrattenere una normale conversazione nella propria lingua madre, che verrebbe tradotta simultaneamente attraverso l'auricolare. Certo, si tratterà di una traduzione non sempre perfetta, per via dei diversi problemi idiomatici e dialettali e della continua evoluzione delle espressioni d'uso comune, ma sarà sufficiente per afferrare il “nocciolo” della conversazione.

Le modalità secondo cui gli scienziati cercano di trasformare tutto ciò in realtà sono molteplici. Il primo passo è creare una macchina capace di convertire il parlato in scritto. Verso la metà degli anni Novanta sono stati messi in commercio i primi congegni di riconoscimento vocale. Erano in grado di riconoscere fino a quarantamila parole con una precisione del 95 per cento. Poiché in una tipica conversazione quotidiana si impiegano soltanto da cinquecento a mille parole, apparecchi del genere sono più che adeguati allo scopo. Dopo avere trascritto la voce umana, ogni parola viene tradotta in un'altra lingua tramite un dizionario computerizzato. Poi viene la parte più difficile: contestualizzare le parole tradotte, con tanto di gergo ed espressioni colloquiali, cosa che richiede una comprensione profonda delle sfumature linguistiche. Tale dominio è definito *CAT* (*computer assisted translation*).

Un altro modo è quello pionieristico elaborato presso la Carnegie Mellon University a Pittsburgh, dove gli scienziati già dispongono di prototipi in grado di tradurre dal cinese all'inglese e dall'inglese allo spagnolo o al tedesco. Vengono attaccati degli elettrodi sul collo e sul viso del parlante che registrano le contrazioni muscolari e decifrano le parole pronunciate. Non occorre alcun equipaggiamento audio, poiché le parole possono anche essere pronunciate silenziosamente. Dopodiché interviene il computer che le traduce, poi un sintonizzatore vocale che le pronuncia ad alta voce. In una semplice conversazione che comprenda da cento a duecento parole, la percentuale di precisione finora ottenuta è dell'80 per cento.

«L'idea è sussurrare le parole in una lingua e farle uscire dal computer in un'altra lingua» mi ha spiegato Tanja Schultz, una delle ricercatrici che partecipano al progetto. In futuro un computer potrebbe leggere le labbra della persona con cui stiamo parlando, così non dovremmo usare gli elettrodi. Avremmo dunque due persone di nazionalità diverse che conversano tranquillamente parlando ciascuna la propria lingua.

Possiamo dunque prevedere che le barriere linguistiche, le quali in passato hanno tragicamente impedito la comprensione reciproca delle diverse culture, finiranno gradualmente

per cadere proprio grazie a questo genere di traduttori universali, e alle lenti a contatto o agli occhiali per internet.

La realtà aumentata spalanca le porte di un mondo completamente nuovo, tuttavia comporta alcuni limiti, che non sono attribuibili all'hardware o alla banda disponibile, poiché i cavi a fibre ottiche possono trasmettere un numero illimitato di informazioni. Il vero collo di bottiglia è il software, che può essere prodotto soltanto secondo il metodo tradizionale: uno o più esseri umani piegati sulla scrivania e intenti a scrivere, riga dopo riga, il codice che trasformerà in realtà quelle parole immaginarie. L'hardware possiamo produrlo in serie, aumentandone la potenza attraverso i chip, ma non è possibile produrre cervelli nello stesso modo. Ciò significa che per avere una realtà aumentata planetaria vera e propria ci vorranno decenni, quindi bisognerà aspettare la metà del secolo.

Ologrammi e 3D

Un altro progresso tecnologico cui potremo assistere entro la metà del secolo è un autentico 3D al cinema e a casa. Nei lontani anni Cinquanta i primi film in 3D richiedevano l'utilizzo di grossi occhiali con due lenti diverse, una blu e una rossa. Si basava tutto sul fatto che l'occhio sinistro e quello destro sono leggermente disallineati: sullo schermo venivano proiettate due immagini, una rossa e una blu, e poiché gli occhiali fungevano da filtro restituivano due immagini distinte, una all'occhio destro e l'altra a quello sinistro. Quando il cervello amalgamava le due immagini creava l'illusione di una terza dimensione. La percezione di tale profondità era quindi un trucco. (Più gli occhi sono distanziati, maggiore è la percezione della profondità. Per questo certi animali hanno gli occhi che sembrano uscire dalla testa, per avere la massima percezione della profondità.)

Un miglioramento si può avere con occhiali 3D fatti di vetro polarizzato, in modo che l'occhio sinistro e quello destro vedano due immagini polarizzate diverse. In tal modo si possono vedere immagini 3D con tutti i loro colori, non soltanto in blu e in rosso. Poiché la luce è un'onda, può vibrare in su e in giù, a sinistra o a destra. Una lente polarizzata consente il passaggio della luce soltanto in una direzione, quindi indossando occhiali con due lenti polarizzate, ma con due direzioni di polarizzazione diverse, possiamo creare un effetto 3D.

Una versione ancora più sofisticata potrebbe consistere nel proiettare due diverse immagini direttamente nelle nostre lenti a contatto.

I televisori 3D, che richiedono l'uso di speciali occhialini, hanno già invaso il mercato. Ma presto non ci sarà più bisogno di questi apparecchi ingombranti, perché basteranno lenti lenticolari. Lo schermo di questi televisori è realizzato in modo tale da mostrare due immagini distinte con angolazioni leggermente diverse, una per occhio. Di conseguenza i nostri occhi vedono immagini diverse, e questo produce l'illusione di una percezione tridimensionale. Ad ogni modo la testa dev'essere posizionata correttamente, in modo che gli occhi siano sempre allineati agli *sweet spot*, cioè a quei punti in cui la visione tridimensionale è ottimale. (Questo sistema sfrutta una ben nota illusione ottica. Nei negozi di novità e chincaglierie elettroniche troviamo spesso immagini che si trasformano magicamente mentre gli giriamo intorno. Ciò avviene grazie a due diverse immagini "tagliate" in minuscole strisciole sottili e poi mischiate per creare un'immagine composta. A tale immagine viene sovrapposto un vetro lenticolare con molti solchi verticali, ciascuno dei quali posa con precisione su due strisce d'immagine. Le scanalature sono modellate in modo che, osservandole da una certa angolazione, possiamo vedere una sola striscia, mentre l'altra apparirà soltanto modificando l'angolo di visione. Ecco perché muovendoci intorno a quel vetro ci sembra che le immagini si trasformino all'improvviso dall'una all'altra e viceversa. I televisori 3D usano immagini in movimento al posto di quelle statiche, così restituiscono lo stesso effetto anche senza occhialini.)

Ma la versione più avanzata della visione 3D sarà rappresentata dagli ologrammi. Facendo a meno di qualsiasi genere di occhialini potremo vedere il fronte d'onda di un'immagine 3D come se fosse proprio davanti ai nostri occhi. Gli ologrammi esistono già da decenni (hanno fatto la loro comparsa nelle vetrine dei negozi, sulle carte di credito e nelle mostre, e sono regolarmente presenti nei film di fantascienza: per esempio, in *Guerre stellari* tutto comincia con un angosciato messaggio olografico della principessa Leia ai membri dell'Alleanza Ribelle).

Il problema, però, è che creare ologrammi è molto difficile.

Gli ologrammi si ottengono dividendo in due un singolo raggio laser. Una metà viene indirizzata sull'oggetto che vogliamo riprodurre, poi viene riflessa e cade su un particolare schermo. La seconda metà viene proiettata direttamente sullo schermo. La miscela di questi due raggi crea un complesso pattern di interferenza contenente un'immagine 3D "congelata" dell'oggetto originario, poi catturata da una speciale pellicola sullo schermo. A quel punto si proietta un altro raggio laser attraverso lo schermo e l'immagine dell'oggetto originario prende vita in 3D.

I televisori olografici presentano però due problemi. Anzitutto l'immagine deve essere proiettata su uno schermo. Sedendo di fronte allo schermo, possiamo percepire l'esatta riproduzione in 3D dell'oggetto originario, ma non possiamo sporgerci e cercare di toccarlo, perché ciò che abbiamo davanti ai nostri occhi è soltanto un'illusione. Ciò significa che guardando una partita di calcio in 3D sul televisore olografico, indipendentemente da ogni nostro movimento l'immagine di fronte a noi cambierà, come se fosse reale. Potrà anche sembrarci di stare seduti a bordo campo e di osservare i giocatori a poche decine di centimetri di distanza, ma se provassimo ad afferrare il pallone sbatteremmo la testa contro lo schermo.

Il vero problema tecnico che ha impedito lo sviluppo del televisore olografico consiste nella memorizzazione delle informazioni. Una vera immagine 3D contiene un grandissimo quantitativo di informazioni, molte di più che in un'immagine 2D. I computer elaborano continuamente immagini 2D, poiché ogni immagine viene ridotta a minuscoli punti chiamati *pixel*, e ciascuno di questi punti è illuminato da un piccolo transistor. Ma per animare un'immagine 3D è necessario proiettare trenta immagini al secondo. È dunque sufficiente un rapido calcolo per dimostrare che il quantitativo di informazioni necessarie per generare immagini olografiche in movimento e in 3D è di gran lunga superiore alla capacità di internet, almeno per come è strutturato oggi. Verso la metà di questo secolo il problema potrà essere risolto, poiché la banda a disposizione della rete sta aumentando in maniera esponenziale.

A che cosa assomiglierà un vero televisore 3D? Una delle possibilità è uno schermo a forma di cilindro o cupola, che non osserveremo dall'esterno ma sedendo al suo interno. Le immagini olografiche proiettate sullo schermo ci appariranno tutt'intorno, tridimensionali ed estremamente realistiche.

Mente e materia

Prima della fine di questo secolo controlleremo i computer con la nostra mente. Come le divinità dell'antica Grecia, ci basterà impartire mentalmente un ordine e i nostri desideri verranno subito esauditi. Le fondamenta di questa tecnologia sono già state gettate, ma per perfezionarla ci vorranno decenni di duro lavoro. È una rivoluzione che avrà luogo in due fasi: prima la mente dovrà riuscire a controllare gli oggetti dell'ambiente circostante, poi i computer dovranno imparare a decifrare i desideri delle persone, così da poterli trasformare in realtà.

Il primo e significativo passo avanti è stato compiuto nel 1998, allorché gli scienziati della Emory University, negli Stati Uniti, e dell'Università di Tubinga, in Germania, hanno inserito un minuscolo elettrodo di vetro nel cervello di un uomo di cinquantasei anni rimasto paralizzato dopo un ictus. L'elettrodo era connesso a un computer che analizzava i segnali provenienti dal cervello dell'uomo. Il paziente era in grado di vedere l'immagine di un cursore sullo schermo di un computer, e attraverso il *biofeedback* (retroazione biologica) riusciva a controllare il cursore con il solo pensiero. Per la prima volta nella storia era stato stabilito un contatto diretto tra un cervello umano e un computer.

Una versione più sofisticata di questa tecnologia è stata sviluppata dal neuroscienziato John Donoghue della Brown University. Si tratta di un congegno chiamato *BrainGate* (letteralmente, cancello cerebrale), il quale aiuta le persone che hanno subito danni cerebrali debilitanti a comunicare. L'invenzione di BrainGate ha avuto ampie ripercussioni sui media, al punto da conquistarsi una copertina di "Nature" nel 2006.

Donoghue mi ha spiegato che il suo sogno è fare in modo che il BrainGate cambi totalmente il modo in cui curiamo i danni cerebrali, attingendo a piene mani dalla rivoluzione informatica. Il suo progetto ha già avuto un effetto straordinario sulla vita dei suoi pazienti, e lo scienziato nutre concrete speranze di riuscire a perfezionare tale tecnologia. Donoghue è direttamente implicato in questa ricerca perché da bambino si è ritrovato su una sedia a rotelle in seguito a una malattia degenerativa, quindi sa bene che cosa significhi sentirsi impotenti.

Tra i suoi pazienti ci sono vittime di ictus cerebrale, completamente paralizzate e incapaci di comunicare con i loro cari, benché il loro cervello sia ancora attivo. Donoghue ha sistemato un chip del diametro di 4 millimetri sull'apice del loro cervello, in corrispondenza all'area che controlla i segnali motori. Il chip è collegato a un computer che analizza ed elabora gli impulsi cerebrali e infine li trasmette a un altro computer portatile.

All'inizio il paziente non riesce a controllare la posizione del cursore, ma può vedere in che modo si sta spostando. Provando e riprovando, infine impara a controllarlo, e dopo diverse ore di allenamento riesce a posizionarlo in qualsiasi punto dello schermo. Con un po' di pratica riesce anche a leggere e a scrivere e-mail, e persino a giocare ai videogiochi. In linea di principio, una persona paralizzato dovrebbe poter eseguire qualsiasi funzione controllabile dal computer.

Donoghue ha cominciato con quattro pazienti, due dei quali avevano subito danni al midollo spinale: uno aveva subito un ictus, mentre l'ultimo soffriva di SLA (sclerosi laterale amiotrofica). Uno dei pazienti, quadriplegico e completamente immobilizzato dal collo in giù, ha impiegato soltanto un giorno per imparare a gestire i movimenti del cursore con la mente. Oggi è in grado di controllare un televisore, spostare il cursore sullo schermo del computer,

giocare ai videogiochi e leggere e-mail. Inoltre i pazienti possono controllare la propria mobilità maneggiando una sedia a rotelle motorizzata.

In altre parole, per quelli che hanno la sfortuna di essere completamente paralizzati tutto questo è sicuramente miracoloso. Un giorno sono soli e intrappolati in un corpo inerme, ma d'un tratto imparano a navigare in internet e a intrattenere conversazioni con persone di tutto il mondo.

Una volta ho partecipato a una cena di gala al Lincoln Center di New York in onore del grande cosmologo Stephen Hawking. Spezzava il cuore vederlo legato con le cinghie alla sua sedia a rotelle, in grado di muovere soltanto qualche muscolo facciale e le palpebre, con infermiere che sorreggevano la sua testa cadente e lo portavano di qua e di là. Hawking impiega ore, se non giorni, di sforzi tormentosi per riuscire a comunicare semplici idee attraverso il suo sintetizzatore vocale. In quell'occasione mi sono chiesto se non fosse già troppo tardi perché potesse approfittare della tecnologia del BrainGate. Poi John Donoghue, anche lui tra gli ospiti, è venuto a salutarmi, e ho pensato che il BrainGate poteva rappresentare la migliore opzione possibile per il professor Hawking.

Un altro gruppo di scienziati della Duke University ha ottenuto risultati analoghi con le scimmie. Miguel A.L. Nicolelis e la sua équipe hanno inserito un chip nel cervello di una scimmia e l'hanno collegato a un braccio meccanico. All'inizio la scimmia si agitava vigorosamente, incapace di far funzionare il braccio, ma con un po' di esercizio e grazie al potenziale del suo cervello è riuscita a controllarne lentamente il movimento, per esempio per spostarlo e afferrare una banana. In pratica riusciva a spostare il braccio meccanico istintivamente, come se fosse il suo. Nicolelis ha commentato: «Ci sono prove fisiologiche che durante l'esperimento i soggetti si sentano più connessi ai robot che al proprio corpo»⁶.

Ciò significa che un giorno gli esseri umani potranno controllare le macchine servendosi del solo pensiero. Le persone paralizzate riuscirebbero così a controllare braccia e gambe meccaniche: per esempio, se riuscissimo a collegare il cervello di un paziente alle sue braccia e gambe meccaniche bypassando il midollo spinale, potrebbe anche tornare a camminare. In questo modo getteremmo le fondamenta per assumere il controllo della realtà attraverso il potere della mente.

Leggere il pensiero

Se un cervello può controllare un computer o un braccio meccanico, può un computer leggere il pensiero di una persona senza inserire elettrodi nel suo cervello?

Fin dal 1875 sappiamo che le funzioni cerebrali sono basate su stimoli elettrici che scorrono attraverso i neuroni e possono essere misurati posizionando degli elettrodi intorno alla testa del soggetto. Analizzando gli impulsi elettrici rilevati dagli elettrodi, possiamo registrare le onde cerebrali. È il funzionamento dell'EEG (elettroencefalogramma), attraverso il quale possiamo registrare i cambiamenti più grossolani dell'attività cerebrale, per esempio il sonno o gli stati d'animo come l'agitazione, la rabbia eccetera. I dati forniti dall'EEG possono essere mostrati sullo schermo di un computer, in modo che anche il soggetto possa vederli, e con un po' di esercizio potrà lui stesso controllarne l'andamento con il solo pensiero. Servendosi proprio di questo metodo Niels Birbaumer, dell'Università di Tubinga, è già riuscito a insegnare ad alcuni soggetti parzialmente paralizzati come scrivere semplici frasi.

Potrebbero trarne vantaggio persino i produttori di giocattoli. Diverse aziende che operano nel settore, tra cui la NeuroSky, hanno messo in commercio una specie di bandana dotata di elettrodi analoghi a quelli usati per l'EEG. Concentrandosi in un certo modo, è possibile attivare l'EEG situato nella fascia, e quindi controllare il giocattolo collegato. Per esempio, si può sollevare una pallina da ping-pong dentro un cilindro con la sola forza del pensiero.

Il vantaggio dell'EEG è che può rapidamente rilevare varie frequenze emesse dal cervello senza attrezzature complicate e costose. Ma uno dei suoi grandi svantaggi è che non può localizzare i pensieri in zone specifiche del cervello.

Un metodo ancora più sensibile è quello della fMRI (*functional magnetic resonance imaging*), la risonanza magnetica funzionale. L'EEG e la fMRI effettuano le scansioni in modo diverso. L'EEG è un metodo di scansione passivo, che si limita a rilevare i segnali elettrici prodotti dal cervello senza riuscire a determinare con precisione la loro provenienza. Al contrario, l'fMRI sfrutta "l'eco" delle onde radio così da scrutare all'interno dei tessuti organici. In questo modo è possibile individuare con la massima precisione il punto d'origine dei vari segnali, fornendo spettacolari immagini 3D dell'interno del cervello.

Il macchinario dell'fMRI è piuttosto costoso, e necessita di un laboratorio pieno di attrezzature pesanti. Tuttavia ci ha già permesso di ottenere dettagli straordinari sul funzionamento del cervello e del pensiero. Grazie a questo genere di scansioni gli scienziati possono rilevare la presenza di ossigeno all'interno dell'emoglobina del sangue. Poiché l'emoglobina ossigenata costituisce l'energia che alimenta l'attività cellulare, rilevare il flusso di tale ossigeno permette di tracciare il flusso dei pensieri nel cervello.

Joshua Freedman, psichiatra dell'Università della California a Los Angeles (UCLA), mi ha spiegato: «È un po' come ritrovarsi a fare l'astronomo nel XVI secolo, subito dopo l'invenzione del telescopio. Per millenni esseri umani estremamente acuti hanno cercato di capire cosa stesse succedendo lassù, ma a causa dei limiti della vista umana potevano solo fare ipotesi. Poi, all'improvviso, arriva una nuova tecnologia che gli permette di scrutare i movimenti degli astri»⁷.

In pratica, le scansioni compiute dall'fMRI sono in grado di rilevare il moto dei pensieri nel cervello vivente con una risoluzione di 0,1 millimetri, ovvero più piccola della punta di uno

spillo, il che corrisponde forse a qualche migliaio di neuroni soltanto. Ne consegue che l'fMRI può fornirci immagini tridimensionali del flusso energetico all'interno del cervello, mostrandone l'attività con precisione stupefacente. Un giorno riusciremo forse a costruire congegni in grado di sondare l'attività di ogni singolo neurone, così da individuare i pattern neuronali corrispondenti a pensieri specifici.

Di recente Kendrick Kay e i suoi colleghi dell'Università della California a Berkeley hanno compiuto un importante passo avanti. Hanno realizzato una scansione fMRI a varie persone mentre queste osservavano fotografie di cibi, animali, altri esseri umani e semplici oggetti di vari colori. Il team di Kay ha creato un software in grado di associare tali oggetti con i corrispondenti pattern fMRI. Maggiore era il numero di oggetti presi in esame dai soggetti dell'esperimento, migliore la capacità di riconoscimento del software, che provava a identificare gli oggetti osservati sulla base delle scansioni fMRI.

Successivamente, alle stesse persone sono state mostrate immagini di altri oggetti che non avevano visto in precedenza, e spesso il software è stato capace di accoppiare correttamente l'oggetto con i risultati della risonanza magnetica. Su un totale di centoventi nuove immagini, il software è riuscito a identificarne correttamente la relativa scansione fMRI nel 90 per cento dei casi. Quando ai soggetti sono state mostrate mille nuove immagini, la percentuale di successo del software è stata dell'80 per cento.

Come spiega Kay: «Usando una vasta serie di immagini di natura che i soggetti dell'esperimento non hanno visto prima, è possibile identificare quale specifica foto è stata guardata da un determinato soggetto. [...] Presto potrebbe essere possibile ricostruire l'esperienza visiva di una persona dalle misurazioni della sua attività cerebrale»⁸.

Lo scopo di questa metodologia è creare un "dizionario del pensiero", in modo che ogni oggetto abbia una corrispondenza univoca con un certo pattern fMRI. Analizzando tale pattern potremmo decifrare a quale oggetto stava pensando la persona sottoposta a scansione. Infine un computer potrà analizzare forse migliaia di pattern fMRI che scaturiscono dal cervello del soggetto decifrandole una a una. In tal modo riusciremmo a decodificare il flusso di coscienza di un individuo.

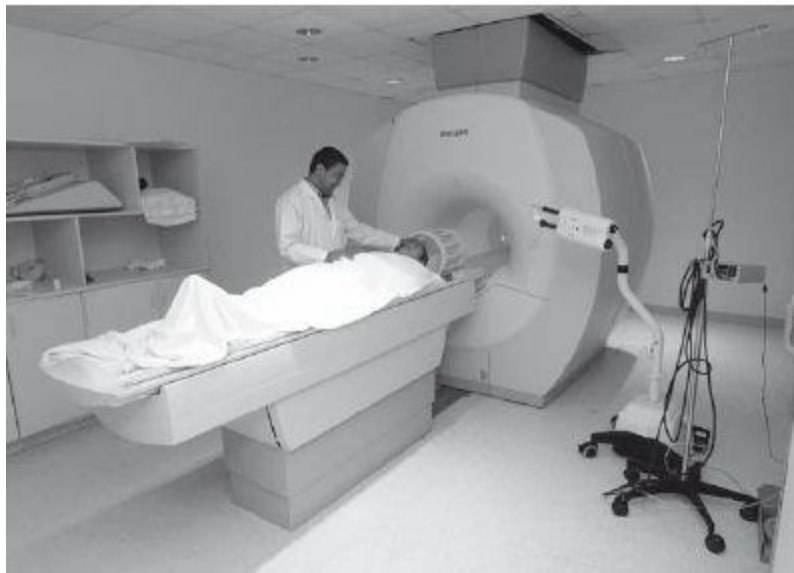
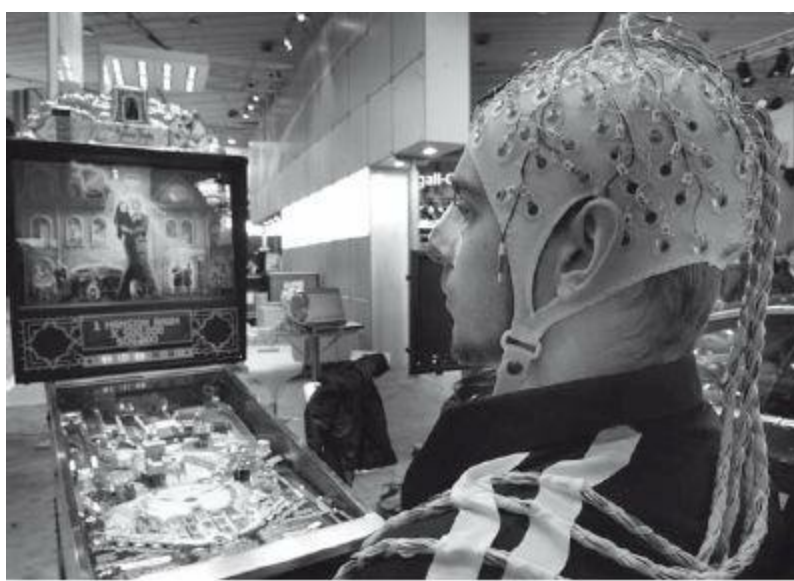
Fotografare un sogno

Questa tecnica pone peraltro un problema: sebbene possa riuscire a dirci, per esempio, che stiamo pensando a un cane, non saprà riprodurre l'effettiva immagine. Un nuovo filone di ricerca consiste proprio nel cercare di ricostruire la precisa immagine a cui il cervello sta pensando, così da videoregistrare i pensieri di una persona. In tal modo si riuscirebbero anche a registrare le immagini di un sogno.

Da tempo immemore l'umanità è affascinata dai sogni, da quelle immagini effimere che spesso è assai difficile ricordare o comprendere. Hollywood ci ha proposto macchinari capaci di trasmettere o persino di registrare attività cerebrali come quelle del sogno, basti pensare a film come *Atto di forza*, ma si è sempre e solo trattato di semplici congetture.

Almeno fino a poco tempo fa.

Gli scienziati, infatti, hanno compiuto progressi notevoli verso un traguardo che prima era ritenuto irraggiungibile: scattare un'istantanea dei ricordi e forse persino dei sogni. Il primo passo in tale direzione è stato compiuto dagli scienziati del Computational Neuroscience Laboratory presso l'Advanced Telecommunication Research Institute International (ATR) di Tokyo. Nel corso dell'esperimento i ricercatori hanno mostrato ai soggetti una minuscola sorgente luminosa posta in un punto specifico. Poi hanno usato l'fMRI per registrare il modo in cui il cervello memorizzava tale informazione. Dopodiché hanno spostato la sorgente luminosa e registrato nuovamente la collocazione cerebrale di quel nuovo stimolo. Alla fine hanno ottenuto una mappa cerebrale precisa con le registrazioni di tutti gli stimoli luminosi. Tali punti luminosi sono stati poi distribuiti su una griglia 10×10 .



La lettura dell'attività cerebrale attraverso EEG (sopra) e fMRI (sotto). L'EEG si limita a rilevare i segnali elettrici del cervello; l'fMRI sfrutta invece l'“eco” delle onde radio per guardare all'interno dei tessuti organici. In futuro saremo in grado di leggere il pensiero, e anche di usarlo per impartire istruzioni ai dispositivi elettronici. (Foto Daniel Mihailescu/AFP e Miguel Alvarez/AFP)

Successivamente gli scienziati hanno proiettato l'immagine di un semplice oggetto ricavato dai punti luminosi di quella stessa griglia 10×10 , per esempio un ferro di cavallo. Con il computer sono poi riusciti ad analizzare il modo in cui il cervello registrava quell'immagine. Come previsto, i pattern memorizzati dal cervello corrispondevano alla somma delle immagini che formavano il ferro di cavallo.

Gli scienziati hanno quindi ottenuto un'immagine di ciò che il cervello stava pensando. Qualsiasi pattern luminoso all'interno di quella griglia 10×10 può essere quindi decodificato attraverso l'analisi computerizzata delle scansioni fMRI del cervello.

Nel prossimo futuro l'équipe dell'ATR si propone di aumentare il numero di pixel all'interno della griglia. Inoltre, è sua precisa opinione che si tratti di un processo universale, e cioè che qualsiasi percezione visiva cosciente, o persino in sogno, possa essere riconosciuta attraverso la scansione fMRI. Se ciò risultasse vero, potrebbe significare che saremo in grado, per la prima volta nella storia, di registrare le immagini che stiamo sognando.

Naturalmente le immagini mentali, e in particolare i sogni, non hanno mai una definizione cristallina, quindi ci sarà sempre una certa sfocatura, ma il fatto stesso di analizzare in

profondità la memoria visiva del cervello di qualcun altro rappresenta un progresso straordinario.

L'etica della lettura del pensiero

Tutto ciò suscita un problema di carattere morale: che cosa potrebbe accadere se potessimo leggere costantemente la mente delle persone? David Baltimore, premio Nobel ed ex presidente del Caltech (California Institute of Technology), è stato il primo a preoccuparsi di questa eventualità, e ha scritto: «Possiamo davvero curiosare nei pensieri degli altri? [...] Non penso si tratti di mera fantascienza, ma rischiamo di ritrovarci a vivere una realtà infernale. Immaginiamo che cosa potrebbe diventare corteggiare qualcuno che possa leggere i nostri pensieri, oppure negoziare per un contratto se la controparte fosse dotata di un potere del genere!»⁹.

Nella maggior parte dei casi, riflette Baltimore, leggere il pensiero altrui potrebbe avere conseguenze imbarazzanti, se non addirittura disastrose: «Se interrompessimo un professore nel bel mezzo della sua lezione [...] scopriremmo che una parte significativa dei suoi studenti è dedita a crogiolarsi in fantasie erotiche»¹⁰.

Credo però che la lettura del pensiero non metterà a rischio la nostra privacy, poiché la maggior parte dei pensieri non sono ben definiti. Forse un giorno sarà possibile fotografare i nostri sogni a occhi aperti (o chiusi), ma credo che la qualità delle immagini risulterebbe deludente. Una volta ho letto un breve racconto di un uomo che incontra un genio, il quale gli dice che potrebbe avere tutto ciò che riesce a immaginare. L'uomo rivolge immediatamente le sue fantasie a oggetti di lusso come limousine, milioni di dollari in contanti e un castello, e il genio glieli materializza all'istante. Ma quando l'uomo osserva tutte quelle cose con attenzione si accorge, con suo grande disappunto, che la limousine non ha né maniglie né motore, le facce sulle banconote sono sfocate e il castello completamente vuoto. L'uomo si precipita a immaginare tutte quelle cose, ma dimentica che nella sua mente esistono solo sotto forma di concetti generici, privi di dettagli.

Inoltre, è altamente improbabile che si possa leggere il pensiero altrui a distanza. Tutti i metodi finora utilizzati, compresi EEG, fMRI e gli elettrodi sul cervello stesso, richiedono uno stretto contatto con il soggetto preso in esame. Senza contare che potrebbero essere varate delle leggi che impediscano la lettura non autorizzata del pensiero. Oppure potrebbero essere inventati degli apparecchi per proteggere i nostri pensieri comprimendo, bloccando o confondendo gli impulsi elettrici del cervello.

Per arrivare a una vera e propria lettura del pensiero dovremo aspettare ancora molti decenni. Peraltro, uno scanner fMRI potrebbe fornirci qualche indizio, fungendo da primitiva macchina della verità. Mentire implica conoscere la verità, e per farlo occorre elaborare una menzogna e pensare alle sue infinite ripercussioni, cosa che richiede molta più energia che dire semplicemente la verità. Ne consegue che di fronte a un bugiardo una scansione cerebrale tramite fMRI potrebbe individuare un consumo maggiore di energia. Oggi la comunità scientifica nutre alcune riserve circa l'impiego dello scanner fMRI come macchina della verità, soprattutto se il risultato della sua lettura dev'essere determinante come nelle sentenze processuali. È una tecnologia ancora troppo recente per potersi dimostrare infallibile. I suoi promotori asseriscono che ulteriori ricerche ne affineranno la precisione, quindi è destinata a futuri sviluppi.

Due aziende hanno già messo sul mercato macchine della verità basate su fMRI, assicurando una percentuale di successo superiore al 90 per cento. Inoltre, un tribunale indiano se n'è servito

per risolvere un caso, mentre in varie corti americane i processi in corso implicano l'uso della stessa tecnologia.

Le comuni macchine della verità non riescono a misurare le menzogne, ma si limitano a rilevare segnali di tensione, come un aumento della sudorazione (riscontrato analizzando la conduttività della pelle) e un'accelerazione del ritmo cardiaco. Le scansioni cerebrali rilevano un aumento dell'attività mentale, ma la correlazione tra questo fenomeno e il mentire non è stata ancora chiaramente confermata per essere impiegata in un processo.

Potrebbero volerci diversi anni di meticolosi test prima di riuscire ad accertare i limiti e l'affidabilità delle macchine della verità basate su fMRI. Intanto la MacArthur Foundation ha concesso una sovvenzione di 10 milioni di dollari al Law and Neuroscience Project allo scopo di determinare in che modo le neuroscienze potranno avere effetto sulla legge.

L'f_{MRI} del mio cervello

Anch'io mi sono sottoposto a una scansione cerebrale tramite fMRI. Per un documentario di BBC-Discovery Channel sono stato alla Duke University, dove mi hanno messo su un lettino e successivamente infilato in un gigantesco cilindro di metallo. Una volta innescato un enorme e potente magnete capace di generare un campo magnetico ventimila volte quello terrestre, gli atomi del mio cervello si sono allineati con il campo generato, come tante trottole con gli assi di rotazione orientati nello stesso senso. Poi al mio cervello è stato inviato un impulso radio che ha capovolto alcuni nuclei dei miei atomi. Quando i nuclei sono tornati alla condizione normale hanno emesso un minuscolo impulso, o "eco", rilevabile attraverso il macchinario fMRI. Analizzando questi echi i computer hanno elaborato i segnali, ricostituendo così una mappa 3D dell'interno del mio cervello.

L'intero processo è stato del tutto indolore e innocuo. Le radiazioni che hanno raggiunto il mio corpo non erano ionizzanti, quindi non potevano causare danni alle cellule, spezzandone per esempio gli atomi. Sebbene fossi immerso in un campo magnetico migliaia di volte superiore a quello terrestre, il mio corpo non ha subito alcun cambiamento apparente e percettibile.

Lo scopo della scansione fMRI a cui mi sono sottoposto era determinare con precisione in quali punti del mio cervello avessero origine specifici pensieri. In particolare, all'interno del cervello umano c'è un minuscolo "orologio" biologico, proprio in mezzo agli occhi, dietro il naso, con cui cervello calcola minuti e secondi. Un danno in questa delicatissima parte del cervello potrebbe causare una percezione del tempo distorta.

Mentre ero dentro lo scanner mi è stato chiesto di contare i secondi e i minuti. Dopodiché, appena sviluppate le immagini fMRI, ho potuto chiaramente riconoscere quel punto luminoso dietro al mio naso a cui era attribuibile il conteggio dei secondi. Mi sono dunque reso conto di essere testimone della nascita di un settore completamente nuovo delle scienze biologiche che si prefiggeva di individuare con assoluta precisione i punti del cervello associati a specifici pensieri. In pratica, una forma di lettura del pensiero.

Tricorder e scanner cerebrali portatili

In futuro i congegni MRI non dovranno necessariamente assomigliare ai mastodontici macchinari di diverse tonnellate che oggi troviamo negli ospedali e che occupano una stanza intera. Al contrario, potranno raggiungere le dimensioni di un cellulare, o forse persino di una moneta.

Nel 1993 Bernhard Blümich e colleghi si trovavano al Max Planck Institut für Polymerforschung di Mainz, in Germania, quando si sono imbattuti in un'idea originale grazie alla quale si sarebbero potuti realizzare apparecchi MRI di dimensioni ridotte. Gli scienziati hanno poi costruito una nuova macchina, chiamata *MRI - MOUSE (mobile universal surface explorer)*, che attualmente è di circa trenta centimetri ma un giorno potrebbe avere le dimensioni di una tazza da caffè e potrebbe essere venduta nei comuni supermercati. Questo rivoluzionerebbe la medicina, poiché chiunque potrebbe sottoporsi a una scansione MRI in casa propria e in privato. Blümich ritiene che in un futuro non troppo lontano ogni individuo potrà passare il suo MRI-MOUSE personale sulla pelle e osservare l'interno del proprio corpo. Saranno poi i computer ad analizzare le immagini e a diagnosticare ogni eventuale problema. Blümich ha aggiunto: «Forse un giorno disporremo di qualcosa di simile al tricorder di *Star Trek*»¹¹.

La scansione MRI funziona sulla base di un principio simile a quello degli aghi della bussola. Il polo nord dell'ago della bussola si allinea immediatamente con il campo magnetico in cui si trova. Quindi, quando un corpo umano viene posto all'interno di una macchina MRI, i nuclei degli atomi, come gli aghi della bussola, si allineano con il campo magnetico che li circonda. Dopodiché il corpo riceve un impulso radio, tale da capovolgere i nuclei, che però di lì a poco ritornano alla posizione originaria, emettendo un secondo impulso radio, o "eco".

La chiave del piccolo apparecchio MRI di Blümich e colleghi è il suo campo magnetico non uniforme. Di solito il motivo per cui i congegni odierni sono così ingombranti e perché il corpo deve essere posizionato all'interno di un campo magnetico estremamente uniforme. Maggiore è l'uniformità del campo, migliori sono i dettagli dell'immagine che si ottengono dalla scansione, la quale oggi arriva a una risoluzione di un decimo di millimetro. Per ottenere campi magnetici uniformi, i fisici si affidano a due grandi bobine del diametro di circa 60 centimetri messe una sull'altra a una certa distanza. Insieme formano la cosiddetta *bobina di Helmholtz*, capace di produrre un campo magnetico uniforme nello spazio compreso tra le due bobine. Il corpo umano viene quindi posizionato lungo l'asse di questi due grandi magneti.

Se ci affidassimo a campi magnetici non uniformi, otterremmo un'immagine distorta e inutile. Per vari decenni è stato proprio questo il problema principale nello sviluppo della tecnologia MRI. Blümich ci propone però un modo intelligente per compensare tale distorsione: inviare impulsi radio multipli al soggetto e poi rilevare gli echi risultanti. Dopodiché è compito dei computer analizzare gli echi e compensare la distorsione creata dai campi magnetici non uniformi.

Attualmente gli MRI-MOUSE portatili di Blümich utilizzano un piccolo magnete a forma di U che produce una polarità nord e una sud alle due estremità. Il magnete viene posizionato sul corpo del paziente, e facendoglielo scorrere sopra è possibile vedere a diversi centimetri sotto la pelle. A differenza degli apparecchi MRI standard, che consumano una notevole quantità d'energia e hanno speciali attacchi elettrici, l'MRI-MOUSE consuma come una comune lampadina!

In alcuni dei suoi primi test, Blümich ha provato il suo MRI-MOUSE su pneumatici di gomma, che hanno la stessa morbidezza dei tessuti umani. Questo potrebbe anche avere un'immediata applicazione commerciale: una rapida scansione dei prodotti per individuare eventuali difetti. Le macchine MRI convenzionali non possono essere impiegate su oggetti che contengono metallo, per esempio gli pneumatici cinturati in acciaio. Per contro, l'MRI-MOUSE si serve unicamente di campi magnetici deboli, quindi non presenta tali limiti. (I campi magnetici generati dalle macchine MRI convenzionali sono ventimila volte il campo magnetico terrestre. Molti infermieri e tecnici hanno infatti subito gravi ferite, perché quando il campo magnetico è stato attivato sono stati colpiti dagli strumenti di metallo presenti nella stanza, che venivano scagliati in tutte le direzioni. L'MRI-MOUSE non crea problemi del genere.)

Si tratta quindi di uno strumento ideale, poiché non solo permette di analizzare oggetti con componenti ferrosi, ma anche quelli troppo grandi per poter essere inseriti in una macchina MRI convenzionale, o che non possono essere spostati dalla loro collocazione. Per esempio, nel 2006 l'MRI-MOUSE è riuscito a fornire le immagini dell'interno della mummia di Oetzi, anche noto come *l'uomo dei ghiacci*, ritrovato congelato sulle Alpi nel 1991. Spostando il magnete a U sul corpo congelato di Oetzi, è stato possibile analizzare diversi strati sotto la pelle.

In futuro l'MRI-MOUSE potrà essere ancora più piccolo, non più grande di un cellulare, e consentirà di effettuare facilmente scansioni cerebrali: a quel punto analizzare l'attività del cervello per leggere i pensieri non sarà più un problema. E un giorno arriveremo forse a un congegno più sottile di una moneta, a malapena distinguibile. Potrebbe persino assomigliare al meno potente EEG, che richiede di indossare un casco di plastica costellato di elettrodi. (Attaccando questi minuscoli apparecchi MRI sulla punta delle dita e passando la mano sulla testa di qualcuno, potremo eseguire la fusione mentale come i vulcaniani di *Star Trek!*)

La telecinesi e il potere degli dèi

Il punto d'arrivo di questo progresso è la telecinesi, ovvero il potere di cui godevano gli dèi delle antiche mitologie: spostare gli oggetti con il pensiero.

Per esempio, in *Guerre stellari* la Forza è un campo misterioso che pervade l'intera galassia e libera i poteri mentali dei cavalieri Jedi, consentendogli di controllare gli oggetti con la mente. Spade laser, pistole a raggi e persino intere astronavi possono levitare grazie al potere della Forza, per non parlare del controllo delle azioni altrui.

Per attingere a un potere analogo non dovremo raggiungere remote galassie. Nel 2100 quando entreremo in una stanza cominceremo automaticamente a controllare un computer che gestirà tutto ciò che ci circonda. Spostare mobili pesanti, riordinare la scrivania o effettuare riparazioni saranno azioni che eseguiremo semplicemente pensandoci. Immaginate come sarebbe utile agli operai, ai vigili del fuoco, agli astronauti e ai soldati gestire con la mente macchinari che richiedono ben più di due mani. Cambierebbe anche il modo in cui interagiamo con il mondo: guidare una bicicletta o una macchina, giocare a golf, a baseball o ad altri giochi complessi solo e soltanto con la forza del pensiero!

Spostare gli oggetti con il pensiero potrebbe trasformarsi in realtà sfruttando i cosiddetti *superconduttori*, di cui parleremo nel Capitolo 4. Entro la fine di questo secolo i fisici saranno probabilmente in grado di creare superconduttori capaci di operare a temperatura ambiente, il che ci consentirà di produrre enormi campi magnetici con un minimo di energia. Come il Novecento è stato il secolo dell'elettricità, il futuro potrebbe regalarci superconduttori a temperatura ambiente, e quindi segnare il nostro ingresso nell'era del magnetismo.

Attualmente produrre campi magnetici potenti è assai costoso, ma in futuro quest'energia porrebbe essere praticamente gratuita. Ridurremmo così la frizione nei treni e negli autotreni, rivoluzionando il sistema dei trasporti ed eliminando le perdite nella trasmissione elettrica. E come già detto, tale tecnologia ci consentirà di spostare gli oggetti con il solo pensiero. Aggiungendo a tutto ciò che ci circonda minuscoli supermagneti, saremo in grado di gestire praticamente tutto attraverso il potere della mente.

Nel futuro prossimo si darà per scontato che qualsiasi cosa contenga un minuscolo chip, tale da renderla intelligente. Nel futuro remoto è invece ipotizzabile che ogni oggetto disporrà di un minuscolo superconduttore capace di produrre un brusco aumento di energia magnetica, sufficiente a fargli attraversare una stanza. Supponiamo per esempio che un tavolo sia dotato di un superconduttore. Normalmente il superconduttore non trasmette alcuna energia, ma è sufficiente aggiungere una minima corrente elettrica per creare un potente campo magnetico capace di farlo muovere nella stanza in cui si trova. Semplicemente pensandoci, in un futuro remoto attiveremo il supermagnete inserito nell'oggetto e quindi potremo spostarlo.

Nei film degli *X-Men*, per esempio, ci sono mutanti cattivi guidati da Magneto, che grazie ai suoi poteri può spostare oggetti enormi manipolando le loro proprietà magnetiche. Ricordo una scena in cui, con la sola forza della mente, Magneto riesce a spostare persino il Golden Gate Bridge. Ma questo potere ha però dei limiti, poiché risulterebbe difficile spostare oggetti di plastica o di carta, che non hanno proprietà magnetiche. (Infatti nel finale del primo film degli *X-Men*, Magneto viene rinchiuso in una prigione fatta completamente di plastica.)

In futuro i superconduttori a temperatura ambiente potranno essere nascosti all'interno degli

oggetti d'uso comune, anche quelli non magnetici. Sarà sufficiente "accendere" l'oggetto con la trasmissione di corrente elettrica per farlo diventare magnetico, e quindi poterlo spostare in un campo magnetico esterno controllato dal pensiero.

La nostra mente potrà guidare anche robot e avatar. Ciò significa che, come nei film *Il mondo dei replicanti* e *Avatar*, un giorno controlleremo con il pensiero i movimenti dei nostri surrogati, e giungeremo persino a percepire il dolore e la tensione che sperimentano. Sarà estremamente utile quando avremo bisogno di un corpo sovrumano, per esempio per compiere riparazioni nello spazio o salvare gli altri in situazioni di emergenza. È anche ipotizzabile che in futuro gli astronauti resteranno al sicuro sulla Terra, da dove assume-ranno il controllo di corpi robotizzati sovrumani che si muoveranno sulla Luna. Ma di questo parleremo meglio nel prossimo capitolo.

Va tuttavia sottolineato che avere poteri telecinetici non è esente da rischi. Come menzionato in precedenza, nel vecchio film di fantascienza *Il pianeta proibito* un'antica civiltà milioni di anni precedente alla nostra riusciva a realizzare il suo sogno ultimo, cioè controllare tutto con il potere della mente. Un banale esempio di quella loro tecnologia era un congegno capace di trasformare i pensieri in immagini 3D. Bastava indossare un casco e immaginare qualcosa perché l'immagine 3D corrispondente si materializzasse all'interno del congegno. Sebbene per il pubblico che affollava le sale cinema-tografiche negli anni Cinquanta fosse una cosa assolutamente inconcepibile, nel giro di qualche decennio disporremo davvero di qualcosa del genere. Nello stesso film c'era un apparecchio che attingeva all'energia mentale per sollevare oggetti pesanti. Per avere a disposizione una tecnologia simile non dovremo aspettare milioni di anni, anzi già esiste, sebbene sotto forma di giocattolo. Sistemando degli elettrodi EEG sulla nostra testa, il giocattolo rileva gli impulsi elettrici del nostro cervello e poi solleva un piccolo oggetto, proprio come nel film. In futuro molti giochi saranno gestiti attraverso il pensiero, e le squadre di giocatori saranno collegate mentalmente, così da poter spostare una palla semplicemente pensandolo: la squadra vincente sarà quella più brava nell'esercitare tale attività mentale.

Il momento saliente del film *Il pianeta proibito* ci induce però a una riflessione. Malgrado l'enorme potenziale della loro tecnologia, gli alieni si autodistruggono perché non riescono a cogliere il difetto fondamentale dei loro progetti. In pratica, tutti i loro congegni attingono non solo dal pensiero cosciente, ma anche dai desideri subconsci. I pensieri selvaggi e da tempo assopiti del loro violento passato evolutivo riprendono dunque vita, e puntualmente le macchine trasformano in realtà ogni loro incubo inconscio. Alla vigilia del loro traguardo più ambito, quella civiltà potentissima viene distrutta dalla stessa tecnologia con cui sperava di liberarsi della strumentalità.

Tuttavia, occorre dire che per quanto ci riguarda tale pericolo è ancora lontano, perché potremo affidarci a macchine del genere soltanto nel prossimo secolo. La nostra preoccupazione più immediata è di ordine diverso: nel 2100 vivremo in un mondo popolato anche da robot con caratteristiche umane, ma che cosa accadrebbe se diventassero più intelligenti di noi?

Capitolo 2

Il futuro dell'intelligenza artificiale

L'avvento delle macchine

I robot erediteranno la Terra? Sì, ma quei robot saranno i nostri figli! Marvin Minsky

Gli dèi della mitologia usavano il loro potere divino per animare l'inanimato. Secondo la Bibbia «Dio plasmò l'uomo con polvere del suolo e soffiò nelle sue narici un alito di vita e l'uomo divenne un essere vivente» (Genesi 2,7). Secondo la mitologia greca e romana, Venere poteva dare vita alle statue. Si narra infatti che la dea, mossa a pietà per l'artista Pigmaliione, il quale si era innamorato disperatamente della sua statua, realizzò il suo profondo desiderio e trasformò la statua nella splendida Galatea. Il dio Vulcano, fabbro ferraio degli dèi, poteva persino creare un esercito di servi meccanici, fatti del metallo a cui conferiva vita. Oggi siamo proprio come Vulcano, e nei nostri laboratori forgiamo macchine che danno vita non all'argilla, bensì all'acciaio e al silicio. Viene spontaneo domandarsi se questo offrirà libertà alla razza umana o se la renderà schiava. Basta leggere i titoli dei quotidiani odierni per trovare una risposta: la razza umana sarà presto sopraffatta dalle sue stesse creazioni.

La fine dell'umanità?

Un titolo del “New York Times” la dice lunga: «Gli scienziati temono che le macchine possano diventare più astute degli uomini»¹. I principali leader mondiali dell'intelligenza artificiale (IA) si sono riuniti nel 2009 in California, in occasione della conferenza di Asilomar, per discutere seriamente di che cosa potrebbe accadere se le macchine riuscissero a prendere il sopravvento. Come in un film di Hollywood, i delegati si sono posti domande approfondite e specifiche, per esempio: «Cosa succederebbe se un robot domestico diventasse più intelligente di nostra moglie?».

Come prove evidenti della rivoluzione robotica sono stati citati il drone Predator, l'aeroplano senza pilota attualmente utilizzato per individuare i terroristi sia in Afghanistan sia in Pakistan, le automobili che si guidano da sole e infine ASIMO (*advanced step in innovative mobility*), il robot più avanzato al mondo, capace di camminare, correre, salire le scale, ballare e persino servire il caffè.

Uno degli organizzatori della conferenza, Eric Horvitz di Microsoft, notando l'eccitazione che si stava sollevando nel pubblico ha commentato: «I tecnologi ci stanno fornendo visioni quasi religiose, tanto che per certi versi riecheggiano l'idea stessa del Rapimento»². (Il Rapimento è quando i veri credenti ascendono in cielo durante il Secondo Avvento. I maliziosi ne hanno subito approfittato per definire la conferenza di Asilomar *il rapimento dei nerd*.)

Quella stessa estate i film di maggior successo al botteghino sembravano amplificare le stesse visioni apocalittiche. Per esempio, in *Terminator Salvation* una marmaglia umana si ritrovava a combattere contro colossali mostri meccanici che avevano assunto il controllo del pianeta. In *Transformers: la vendetta del caduto*, robot futuristici provenienti dallo spazio usavano gli umani come pedine e la Terra come campo di battaglia per le loro guerre interstellari. Infine, ne *Il mondo dei replicanti* gli esseri umani preferivano vivere la propria vita come robot sovrumani perfetti, belli ed eternamente giovani, anziché affrontare la realtà dei loro corpi che invecchiano e decadono.

A giudicare dai titoli dei giornali e dei film di maggiore successo, si direbbe che l'ultimo sussulto della razza umana sia proprio dietro l'angolo. Dunque i sapientoni dell'IA si domandano: finiremo con il dondolarci come scimmie dietro le sbarre di una gabbia dello zoo mentre i robot che abbiamo creato ci lanceranno le noccioline? Oppure diventeremo i loro servetti?

Analizzando le cose più da vicino, è tutto un po' meno drammatico. Certo, nell'ultimo decennio sono stati fatti incredibili passi avanti, ma occorre guardare tutto dalla giusta prospettiva.

Il Predator, l'aeroplano telecomandato che misura meno di una decina di metri e riesce a colpire i terroristi dal cielo con missili mortali, è controllato da un essere umano attraverso un semplice joystick. C'è dunque qualcuno, con ogni probabilità un giovane esperto di videogame, che siede tranquillamente dietro lo schermo di un computer e individua i bersagli. È quindi l'essere umano, non la macchina, a lanciare i missili. Lo stesso vale per le automobili con il pilota automatico, che non prendono mai decisioni autonome, poiché seguono semplicemente le mappe GPS che gli sono state inserite nella memoria. Per questo l'incubo di robot pienamente autonomi, coscienti e micidiali non diverrà mai realtà.

Non c'è quindi da sorprendersi se la maggior parte degli scienziati che fa ricerca nell'ambito dell'IA è nettamente più cauta e nutra maggiori riserve, sebbene i media abbiano amplificato alcune delle previsioni più sensazionali emerse dalla conferenza di Asilomar. Quando ho domandato quanto ci vorrà affinché le macchine raggiungano il nostro livello d'intelligenza, con mia sorpresa gli scienziati mi hanno dato una varietà sorprendente di risposte, indicando un arco di tempo che va dai venti ai mille anni!

È quindi necessario distinguere tra due diversi tipi di robot. Il primo è controllato a distanza da un essere umano, oppure preprogrammato per seguire determinate istruzioni. Robot del genere esistono già, e a volte se ne parla nei titoli dei giornali. Stanno lentamente facendo la loro comparsa sia nelle nostre case sia sui campi di battaglia, ma se non ci fosse un essere umano che prende le decisioni, si tratterebbe soltanto di rottami pressoché inutili. Non bisogna quindi confonderli con il secondo tipo di robot, cioè quelli veramente autonomi, in grado di pensare da soli a prescindere dall'input umano. Alla realizzazione di questi robot gli scienziati hanno lavorato vanamente negli ultimi cinquant'anni.

ASIMO, il robot

Quando i ricercatori in materia d'intelligenza artificiale vogliono sottolineare i rivoluzionari passi avanti compiuti nel campo della robotica fanno spesso riferimento ad ASIMO, il robot prodotto dalla Honda. Si tratta di un androide di 52 chilogrammi alto 130 centimetri che indossa un casco con visiera oscurata e uno zaino a spalle. ASIMO è davvero notevole: può camminare, correre, salire e scendere le scale e parlare, il tutto in modo realistico. Inoltre sa orientarsi nei diversi ambienti, prendere tazze e vassoi, rispondere ad alcuni semplici comandi vocali e persino riconoscere alcuni volti. Dispone di un ampio vocabolario e può parlare diverse lingue. ASIMO è il prodotto di vent'anni di duro lavoro, una meraviglia ingegneristica sviluppata dagli scienziati della Honda.

Ho avuto il privilegio di interagire personalmente con ASIMO in due diverse occasioni, durante due speciali scientifici che ho preparato per BBC-Discovery Channel. Quando gli ho stretto la mano ha risposto come un comune essere umano. Gli ho rivolto un cenno di saluto e lui ha fatto altrettanto, e quando infine gli ho chiesto di andarmi a prendere un succo di frutta, si è girato ed è andato al buffet con movimenti straordinariamente umani. Come se ciò non bastasse, ASIMO sa ballare molto meglio di me!

A prima vista sembrerebbe che ASIMO sia intelligente, capace di rispondere a comandi umani, intrattenere una conversazione e andarsene in giro da solo per la stanza. Ma la realtà è assai diversa: quando ho interagito con ASIMO davanti alla telecamera della troupe televisiva, ogni movimento e ogni sfumatura erano attentamente programmati. In sostanza, per ottenere una scena di qualche minuto con il robot ci sono volute quasi tre ore di riprese. Inoltre, ad ogni scena una squadra di "istruttori" riprogrammava furiosamente il robot. Sebbene ASIMO sia in grado di esprimersi in diverse lingue – in pratica non è che un registratore che ripete messaggi memorizzati dagli umani –, e sebbene anno dopo anno raggiunga maggiori livelli di sofisticazione, non si può certo dire che sia capace di pensare in modo autonomo: ogni sua parola, ogni suo gesto e ogni suo passo devono essere attentamente provati e programmati dagli scienziati della Honda.

Dopo le riprese mi sono fatto una bella chiacchierata con uno degli inventori di ASIMO, il quale ha ammesso che il robot, nonostante i suoi movimenti straordinariamente naturali, ha l'intelligenza di un insetto. Certo, la sua può sembrare una camminata assolutamente naturale e realistica, ma tutti i suoi passi devono essere calcolati in anticipo, altrimenti andrebbe a sbattere contro i mobili. Di fatto ASIMO non può riconoscere gli oggetti presenti nell'ambiente circostante.

Tanto per fare un paragone, persino uno scarafaggio riesce a riconoscere gli oggetti, aggirare gli ostacoli, cercare cibo e partner, sfuggire ai predatori, escogitare complesse vie di fuga, nascondersi nell'ombra e scomparire tra le fessure, e tutto nel giro di pochi secondi.

Thomas Dean, ricercatore in ambito IA presso la Brown University, ha confermato che gli sgraziati robot a cui sta lavorando «sono solo alla fase in cui riescono ad attraversare una stanza senza lasciare qualche buco nell'intonaco»³. Come vedremo più avanti, attualmente i computer più potenti possono a malapena simulare l'attività neurale di un topo, e solo per pochi secondi. Ci vorranno decenni di duro lavoro prima che i robot riescano a raggiungere lo stesso livello d'intelligenza di un topo, un coniglio, un cane o un gatto, e infine di una scimmia.

Storia dell'IA

Talvolta gli scettici puntano il dito su uno schema ripetitivo secondo il quale ogni trent'anni scienziati e ricercatori dichiarano di essere vicini alla creazione di robot superintelligenti, ma una volta messi alla prova i loro risultati, sono costretti a fare marcia indietro.

Negli anni Cinquanta, dopo che per la prima volta dopo la Seconda guerra mondiale furono introdotti i computer elettronici, gli scienziati fecero colpo sull'opinione pubblica proponendo macchine capaci di gesta miracolose, come sollevare massi, giocare a scacchi e persino risolvere problemi di algebra. Sembrava proprio che di lì a poco dovessero comparire i primi automi davvero intelligenti. Erano tutti sbalorditi, e presto la stampa cominciò a pubblicare articoli mozzafiato che prevedevano l'epoca in cui i robot sarebbero entrati nella casa della gente per preparare la cena e fare le pulizie. Nel 1965 Herbert Simon, uno dei pionieri dell'intelligenza artificiale, dichiarò: «Nel giro di vent'anni le macchine saranno capaci di fare qualsiasi cosa, proprio come gli uomini»⁴. Ma poi dovette fare i conti con la realtà: le macchine che giocavano a scacchi non riuscivano a battere gli umani più esperti, e sapevano fare solo quello, niente di più. Questi primi robot erano come scimmie ammaestrate, capaci di eseguire soltanto un semplice compito.

In realtà negli anni Cinquanta l'intelligenza artificiale aveva compiuto progressi straordinari, però furono sovrastimati ed eccessivamente reclamizzati, cosicché subentrò una fase di regresso. Nel 1974, viste le crescenti e consistenti critiche, il governo statunitense e quello britannico tagliarono i finanziamenti a questo ramo della ricerca, ed ebbe così inizio il primo, duro inverno dell'IA.

Oggi Paul Abrahams, ricercatore in ambito IA, scuote il capo quando ripensa a quell'epoca, cioè agli anni in cui si stava laureando al MIT e tutto gli sembrava possibile: «Fu come se un gruppo di persone si fosse proposto di costruire una torre sulla Luna. Ogni anno facevamo notare con orgoglio che quella torre era molto più alta dell'anno precedente, ma il problema era che la Luna non si era avvicinata granché»⁵.

Negli anni Ottanta abbiamo assistito a una nuova fiammata d'entusiasmo. Questa volta è stato il Pentagono a riversare milioni di dollari in progetti come il "camion intelligente", che in teoria avrebbe dovuto attraversare le linee nemiche, effettuare una ricognizione, salvare gli eventuali soldati statunitensi e tornare al quartier generale, tutto rigorosamente da solo. Anche il governo giapponese ha sostenuto senza riserve l'ambizioso progetto del Sistema Computerizzato di Quinta Generazione, garantendogli il solido appoggio del Ministero del commercio internazionale e dell'industria. Tra gli scopi del progetto c'era quello di giungere a un sistema computerizzato capace di parlare e sostenere una conversazione, del tutto in grado di ragionare e persino di anticipare le esigenze dell'uomo. Tale obiettivo doveva essere raggiunto entro la fine degli anni Novanta.

Per quanto concerne il camion intelligente, l'unica cosa che è riuscito a fare è stato perdersi, mentre il tanto strombazzato progetto giapponese è stato accantonato senza spiegazioni. Ancora una volta la retorica aveva di gran lunga superato la realtà. A dire il vero anche negli anni Ottanta l'IA ha segnato concreti progressi, ma poiché sono stati nuovamente sopravvalutati, ha prevalso un'altra reazione eccessiva da cui è derivato il secondo inverno dell'intelligenza artificiale: un prosciugamento dei finanziamenti e la grande disillusione da parte dei ricercatori,

che li ha spinti ad abbandonare il settore. Era dolorosamente chiaro: mancava qualcosa.

Nel 1992 i ricercatori hanno avuto reazioni diverse in occasione di una particolare celebrazione in onore del film *2001: odissea nello spazio*, in cui un computer chiamato *HAL 9000* si lascia prendere da un raptus omicida e annienta quasi completamente l'equipaggio di una nave spaziale. In quel film, realizzato nel 1968, si prevedeva infatti che nel 1992 avremmo avuto robot capaci di conversare con gli esseri umani su quasi ogni argomento, nonché di assumere il controllo di una navicella spaziale. Malauguratamente, si è dovuto constatare che anche i robot più avanzati non riuscivano a tenere il passo con l'intelligenza di un insetto.

Nel 1997 il computer Deep Blue dell'IBM ha compiuto un'impresa storica, battendo nettamente il campione mondiale di scacchi Garry Kasparov. Deep Blue era una meraviglia ingegneristica che poteva elaborare undici miliardi di operazioni al secondo. Tuttavia, anziché dare la stura a un nuovo entusiasmo per la ricerca sull'intelligenza artificiale e portarci verso una nuova era, ha fatto esattamente l'opposto, mettendone in luce l'assoluta primitività. Dopo una debita riflessione, era chiaro a molti che Deep Blue non poteva pensare. Era un fenomeno negli scacchi, ma avrebbe ottenuto un bello zero in qualsiasi test di misurazione del QI. Tant'è che dopo la sua vittoria fu il perdente, Garry Kasparov, a parlare alla stampa, poiché Deep Blue non sapeva dire nulla. Benché riluttanti, i ricercatori del settore hanno cominciato a riconoscere che la mera capacità di calcolo non equivale affatto all'intelligenza. Richard Heckler, uno di loro, mi ha detto: «Oggi con 49 dollari puoi comprare un programma di scacchi capace di battere quasi tutti i campioni del mondo, eppure nessuno pensa che sia intelligente»⁶.

Tuttavia, poiché la legge di Moore sputa fuori una nuova generazione di computer ogni diciotto mesi, prima o poi il pessimismo della scorsa generazione di scienziati verrà gradualmente dimenticato, e una nuova generazione di ricercatori brillanti ed entusiastici prenderà il sopravvento e riporterà l'ottimismo in un settore un tempo quiescente. Trent'anni dopo l'ultimo inverno dell'intelligenza artificiale, i computer hanno compiuto progressi tali che i ricercatori possono di nuovo pronunciarsi sul futuro con speranze concrete. I sostenitori dell'IA ritengono che questa sia la volta buona, che il terzo tentativo avrà successo. Resta però un dubbio: se queste persone avessero ragione, dovremmo dedurne che presto gli esseri umani saranno obsoleti?

Il cervello è un computer?

I matematici si sono finalmente resi conto dell'errore cruciale che hanno commesso cinquant'anni fa, quando hanno ipotizzato che il nostro cervello funzionasse come un potente computer. Benché a malincuore, dobbiamo constatare che non è affatto così. Nel nostro cervello non c'è un processore, né un sistema operativo, un software, una CPU o una programmazione particolare, e tantomeno funziona secondo le tipiche procedure dei moderni computer. Infatti l'architettura dei computer è del tutto diversa da quella del cervello, che potremmo definire uno speciale congegno di apprendimento, un insieme di neuroni che costituisce la propria rete ogni volta che impara a fare qualcosa. (Un normale PC non impara un bel niente: domani sarà ottuso come lo era ieri.)

Esistono dunque almeno due metodi per elaborare un modello del cervello. Il primo, quello tradizionale top-down, consiste nel trattare i robot come computer e programmare tutto ciò che determina la loro intelligenza fin dall'inizio. Un computer può essere a sua volta ridotto a una *macchina di Turing*, un congegno ipotetico introdotto dal grande matematico britannico Alan Turing. Una macchina di Turing consiste di tre componenti fondamentali: un input, un processore centrale che analizza i dati ottenuti e un output. È un modello semplice su cui si basano tutti i computer. Lo scopo di questo metodo è avere un CD con il codice di tutte le regole che determinano l'intelligenza della macchina. Inserendo il disco il computer prende improvvisamente vita e diventa a suo modo intelligente. Ne consegue che tale CD conterrebbe tutto il software necessario per produrre macchine intelligenti.

Ad ogni modo, nel nostro cervello non c'è programmazione né software. Il cervello funziona piuttosto come una "rete neurale", un complesso guazzabuglio di neuroni che stabilisce continuamente nuove connessioni.

Le reti neurali seguono la cosiddetta *regola di Hebb*: ogni volta che riescono a decidere in modo corretto, il relativo percorso neurale ne risulta rafforzato. Questo si ottiene semplicemente cambiando la potenza di certe connessioni elettriche, il che accade puntualmente ogni volta che i neuroni riescono a portare a termine con successo un determinato compito. (La regola di Hebb può essere espressa con questa vecchia domanda: in che modo un musicista può arrivare a suonare alla Carnegie Hall? Risposta: esercizio, esercizio, esercizio. In una rete neurale l'esercizio garantisce la perfezione. Inoltre la regola di Hebb spiega perché è così difficile sbarazzarsi delle cattive abitudini, visto che anche i percorsi neurali dei nostri vizi scavano il loro solco nella memoria.)

Le reti neurali si basano su un metodo opposto a quello dei computer, ovvero il metodo bottom-up anziché quello top-down. Invece di essere istruite meccanicamente, ricevendo fin dall'inizio tutte le regole dell'intelligenza, le reti neurali imparano come i neonati, e cioè andando a sbattere contro qualcosa e traendo da ogni esperienza l'insegnamento opportuno. Anziché essere programmate, le reti neurali seguono un percorso vecchio stile, quello della "dura scuola dell'esperienza personale".

L'architettura delle reti neurali è del tutto diversa da quella dei computer. In un computer è sufficiente togliere un solo transistor per provocare il blocco totale. Per contro, anche se fossimo costretti a rimuovere ampie porzioni di cervello umano, questo funzionerebbe ancora, e altre parti comincerebbero a svolgere le mansioni di quelle mancanti. Inoltre, la sede del

“pensiero” di un computer è facilmente localizzabile, poiché sta tutto nel processore centrale. Quando invece osserviamo scansioni del cervello umano, possiamo chiaramente notare che il pensiero si estende attraverso ampie porzioni del cervello. Diversi settori si attivano secondo una precisa sequenza, come se i pensieri rimbalzassero qua e là come una pallina da ping-pong.

I computer eseguono i propri calcoli a una velocità pari quasi a quella della luce. Per contro, il cervello umano è incredibilmente lento: gli impulsi elettrici viaggiano attraverso il sistema nervoso a una velocità incredibilmente ridotta, cioè più o meno 320 chilometri all'ora. Il cervello riesce però a compensare perfettamente tale limite perché è massicciamente parallelo. Vale a dire che i suoi cento miliardi di neuroni operano contemporaneamente: ciascuno svolge una piccola funzione di calcolo ed è collegato ad altri diecimila neuroni. In un'eventuale competizione, un processore superveloce in gara con un processore parallelo estremamente lento finirebbe con il mangiare la polvere. (Questo ci riporta al vecchio indovinello: se un gatto può mangiare un topo in un minuto, quanto ci metterà un milione di gatti a mangiare un milione di topi? Risposta: un minuto!)

Inoltre, il cervello non è digitale. I transistor sono porte logiche aperte o chiuse, rappresentate dalle cifre 1 e 0. Anche i neuroni sono per certi aspetti digitali (possono accendersi oppure no), ma possono anche essere analogici, trasmettendo segnali sia continui sia discreti.

Due problemi dei robot

Visti e considerati i macroscopici limiti dei computer rispetto al cervello umano, riusciamo finalmente a comprendere perché le macchine non siano ancora riuscite a sviluppare due caratteristiche fondamentali che gli esseri umani sfruttano continuamente: il riconoscimento delle forme e il buon senso. Con questi due problemi i ricercatori si sono confrontati invano per tutta la seconda metà del secolo scorso, ed è soprattutto per tale motivo che non disponiamo ancora di robot che sappiano fare la domestica, il maggiordomo o la segretaria.

Il primo problema è il riconoscimento delle forme. I robot riescono a vedere molto meglio degli umani, ma non sanno interpretare ciò che vedono. Quando un robot si muove in una stanza, trasforma l'immagine che vede in un mucchio di punti. Elaborando tali punti può riconoscere tutta una serie di linee, cerchi, quadrati e rettangoli. A quel punto cerca di far combaciare quel miscuglio di punti con gli oggetti che ha memorizzato in precedenza: un compito estremamente noioso, persino per un computer! Dopo ore di calcoli riesce a trovare la corrispondenza fra tali linee e le sagome di sedie, tavoli e persone. Ciascuno di noi, invece, appena entra in una stanza riesce immediatamente a distinguere gli oggetti e le persone. Infatti, il nostro cervello è soprattutto una macchina di riconoscimento delle forme.

Il secondo problema è che i robot non dispongono di buon senso. Sebbene abbiano un udito di gran lunga superiore al nostro, non capiscono quello che sentono. Per esempio, consideriamo le seguenti frasi:

- I bambini amano i dolci ma non le punizioni.
- Con una corda si può tirare qualcosa, ma non spingerla.
- Con un bastone si può spingere qualcosa, ma non tirarla.
- Gli animali non possono parlare né capire la nostra lingua.
- Girare su se stessi fa venire le vertigini.

Per noi umani tutto ciò è piuttosto ovvio, appartiene al buon senso. Ma non per i robot. Non c'è una sequenza logica o una programmazione che dimostri loro qualcosa del genere. Noi abbiamo imparato queste cose attraverso l'esperienza personale, non in virtù delle istruzioni "installate" nella nostra memoria.

Il problema del metodo top-down è che richiede troppe righe di codice per ottenere un buon senso simile a quello umano. Per esempio, per descrivere tutto ciò che un bambino di sei anni conosce per esperienza diretta ci vorrebbero centinaia di milioni di righe di codice. Hans Moravec, ex direttore del laboratorio di intelligenza artificiale della Carnegie Mellon University, lo dice chiaramente: «Finora i programmi di IA non palesano neppure un briciolo di buon senso. Tanto per fare un esempio, un programma di diagnosi medica potrebbe prescrivere un antibiotico anche se avesse sotto gli occhi una bicicletta rotta, perché non dispone di modelli di persone, malattie o biciclette»⁷.

Ci sono tuttavia scienziati che continuano ostinatamente a credere che il solo modo per padroneggiare il buon senso sia la forza bruta. Ritengono che un nuovo progetto Manhattan, simile a quello che portò alla realizzazione della bomba atomica, riuscirebbe sicuramente a risolvere il problema una volta per tutte. Un programma di ricerca intensivo volto a "craccare"

la logica del pensiero umano è già stato avviato nel 1984: si tratta del CYC (encyclopedic), una sorta di “enciclopedia del pensiero”. Il CYC doveva essere il coronamento dei progressi dell’IA, la codifica di tutti i segreti del buon senso in un singolo programma, ma dopo qualche decennio di duro lavoro il progetto non è riuscito a sopravvivere ai propri obiettivi. Il suo principio era semplice: padroneggiare «cento milioni di cose, più o meno quelle che una persona normale sa sul mondo, entro il 2007»⁸. Anche questa scadenza, come già molte altre in precedenza, è passata senza che si ottenessero i risultati sperati. Tutte le tappe che secondo gli ingegneri del CYC avrebbero dovuto segnare il successo del progetto sono state raggiunte e superate senza che gli scienziati riuscissero a guadagnare il controllo dell’intelligenza.

Uomini contro macchine

Una volta ho avuto l'occasione di misurare la mia intelligenza con un robot costruito da Tomaso Poggio del MIT. Sebbene i robot non sappiano riconoscere semplici forme, Poggio è riuscito a creare un programma tramite cui la macchina può calcolare ogni bit di una determinata area con la stessa velocità di un essere umano: si chiama *riconoscimento immediato delle immagini*. Riconoscere un oggetto prima ancora di averne consapevolezza è una tipica e straordinaria capacità degli esseri umani. (Il riconoscimento immediato ha avuto un ruolo fondamentale nella nostra evoluzione, poiché i nostri antenati avevano a disposizione una sola frazione di secondo per capire, per esempio, che c'era una tigre in agguato tra i cespugli, cioè prima ancora di averne acquisita piena consapevolezza.)

Per la prima volta, dunque, in uno specifico test di riconoscimento visivo il robot ha ottenuto un punteggio altamente superiore a quello umano, cioè al mio!

La sfida tra me e la macchina era semplice. Seduto su una sedia dovevo fissare un comune schermo di computer. Quando compariva un'immagine per una frazione di secondo dovevo capire se si trattava di un animale oppure no, e premere il più rapidamente possibile uno dei due pulsanti di risposta. La scelta doveva essere pressoché istantanea, e anche il computer doveva rispondere per la stessa immagine.

Con un certo imbarazzo ho dovuto constatare che, dopo una mitragliata di immagini diverse, la macchina e io avevamo ottenuto lo stesso punteggio. C'erano però dei momenti in cui la macchina mi batteva, anzi per meglio dire mi stracciava! (È stato consolante sapere che quel computer aveva una percentuale di risposte corrette dell'82 per cento, mentre in media gli esseri umani arrivavano al massimo all'80 per cento.)

La chiave del successo della macchina di Poggio è che si rifà alle regole di madre natura. Molti scienziati stanno constatando la verità del motto: «La ruota è già stata inventata, quindi perché non copiarla?». Per esempio, di norma quando un robot osserva un'immagine cerca di suddividerla in una serie di linee, cerchi, quadrati e altre figure geometriche. Ma il programma di Poggio opera in modo diverso.

Quando vediamo un'immagine, forse la prima cosa su cui ci concentriamo è il profilo delle sagome, poi le caratteristiche specifiche di tali sagome, le sfumature, le tonalità eccetera. È come se scomponessimo quell'immagine in più livelli. Lo stesso fa il computer di Poggio, che elabora un livello e lo integra con quello successivo e così via, imitando la struttura gerarchica secondo la quale il cervello umano elabora le immagini. (Va però sottolineato che il programma di Poggio non può eseguire tutte le prodezze del processo di riconoscimento delle forme che noi diamo per scontate, per esempio la visualizzazione degli oggetti in 3D o l'identificazione di centinaia di oggetti visti da angolazioni differenti, tuttavia rappresenta una tappa fondamentale verso il riconoscimento delle forme.)

In seguito ho potuto vedere all'opera entrambi i metodi, top-down e bottom-up. Per prima cosa mi sono recato al centro d'intelligenza artificiale della Stanford University, dove ho fatto conoscenza con STAIR (*Stanford artificial intelligence robot*), basato sul metodo top-down. STAIR è alto circa un metro e venti e ha un grosso braccio meccanico che può ruotare su se stesso e afferrare gli oggetti su un tavolo. Inoltre è capace di spostarsi all'interno di un ufficio o di una casa. Il robot è dotato di una videocamera 3D che, una volta inquadrato un oggetto, ne trasmette

l'immagine a un computer, il quale a sua volta guida il braccio meccanico per afferrarlo. Afferrare gli oggetti è qualcosa che le macchine sanno fare sin dagli anni Sessanta, pensiamo soltanto alle fabbriche in cui si producono le auto. Non dobbiamo però lasciarci ingannare dalle apparenze, perché STAIR è molto più bravo. A differenza dei robot delle fabbriche di auto, STAIR non è programmato per compiere operazioni di routine. Lavora da solo: per esempio, se gli chiediamo di prendere un'arancia su un tavolo, può analizzare tutti gli oggetti che si trovano su quel tavolo, metterne a confronto le immagini con migliaia di altre già immagazzinate in memoria, identificare l'arancia in questione e afferrarla. Inoltre può riconoscere gli oggetti con maggiore facilità, afferrandoli e facendoli ruotare.

Per mettere alla prova le sue capacità, ho cambiato la posizione di alcuni oggetti su un tavolo, poi ho chiesto al robot di prendermene uno specifico. STAIR ha analizzato correttamente la nuova disposizione degli oggetti, poi ha allungato il suo braccio e ha afferrato proprio quello che gli avevo chiesto. L'obiettivo è riuscire a far muovere STAIR all'interno degli ambienti domestici e di lavoro, dove potrà prendere e maneggiare oggetti e utensili, e persino conversare con le persone, sebbene con un linguaggio semplificato. Sarebbe così in grado di svolgere le mansioni, per esempio, di un fattorino. STAIR è un caso di metodo top-down, poiché ogni sua azione è programmata fin dall'inizio. (Sebbene possa riconoscere gli oggetti da diverse angolazioni, il numero di cose che può identificare è pur sempre limitato. Se dovesse uscire dall'ufficio e cercare di riconoscere le diverse cose in cui s'imbatte per strada, resterebbe sicuramente paralizzato.)

Sono anche stato all'Università di New York, dove Yann LeCunn sta sperimentando un progetto completamente diverso chiamato *LAGR* (Learning Applied to Ground Robots). *LAGR* è invece un esempio di metodo bottom-up: deve imparare tutto da zero, e lo fa mano a mano che incontra qualcosa di nuovo sul suo cammino. Ha le dimensioni di un piccolo carrello da golf, con due videocamere a colori che analizzano l'ambiente e con cui identifica gli oggetti che incrocia lungo il suo percorso. Scansandoli attentamente, ogni volta impara qualcosa di nuovo: è infatti equipaggiato di GPS e due sensori infrarossi, grazie ai quali può "vedere" gli oggetti che gli si parano davanti. Contiene inoltre tre potentissimi processori Pentium ed è connesso a una rete gigabit ethernet. Abbiamo fatto un esperimento in un parco nelle vicinanze del laboratorio, e il robot *LAGR* ha schivato i diversi ostacoli che avevamo disseminato sul suo percorso. Ogni volta che lo ripercorreva, diventava sempre più bravo a evitarli.

Una delle differenze principali tra *LAGR* e *STAIR* è che *LAGR* è specificamente progettato per assimilare informazioni: quando s'imbatte in un oggetto, gli gira intorno e impara come fare per evitarlo la prossima volta. *STAIR*, invece, ha già registrate in memoria migliaia di immagini, mentre *LAGR* non ne ha praticamente nessuna: nella sua memoria si crea piuttosto una mappa mentale di tutti gli ostacoli incontrati, e tale mappa viene perfezionata ad ogni passaggio. A differenza di un'auto senza conducente, programmata per seguire il percorso precedentemente stabilito dal GPS, *LAGR* si muove da sé, senza ricevere istruzioni dall'uomo: basta dirgli dove andare, e lui prende e ci va! Una volta perfezionati, robot del genere potrebbero rendersi utili non solo su un altro pianeta o su un campo di battaglia, ma anche nelle nostre abitazioni.

Da un lato sono stato impressionato dall'entusiasmo e dall'energia dei ricercatori – sono profondamente convinti che il loro lavoro stia gettando le basi per l'intelligenza artificiale del futuro, e che un giorno avrà effetto sulla società con modalità che possiamo soltanto cominciare a immaginare –, tuttavia, ripensandoci a mente fredda, hanno ancora molto lavoro da fare. Persino gli scarafaggi possono identificare gli oggetti e imparare a girarci intorno, quindi siamo

ancora in una fase in cui le più modeste creature di madre natura superano in ingegno i nostri robot più intelligenti.

FUTURO PROSSIMO (DA OGGI AL 2030)

Sistemi esperti

Sono già molte le persone che hanno in casa semplici robot capaci di aspirare la polvere dai loro tappeti, ma ci sono anche robot che sanno fare da guardia di sicurezza negli edifici di notte, così come guide-robot e operai-robot. Nel 2006 è stato stimato che i robot attivi nel settore industriale fossero 950.000, mentre quelli nei servizi (abitazioni e altri edifici) erano 3.540.000². Tuttavia, già nel prossimo decennio la robotica potrebbe fiorire nei più diversi settori. Si tratterà però di robot che non assomiglieranno affatto a quelli che vediamo nei film di fantascienza.

Il loro più grande effetto potrebbe riscontrarsi nell'ambito dei cosiddetti *sistemi esperti*, programmi software in cui viene codificata la conoscenza e l'esperienza di un essere umano. Come abbiamo visto nel capitolo precedente, un giorno ci ritroveremo a parlare via internet con le immagini che compaiono sui nostri schermi-parete, e a conversare con il viso amichevole di un medico-robot o di un avvocato-robot.

Questo ambito è detto "euristica", cioè basato su un sistema formale, costituito da regole. Nel momento in cui dovremo programmare una vacanza, ci rivolgeremo alla "persona" che comparirà sul nostro schermo. Il sistema esperto sarà già al corrente delle nostre preferenze riguardo a durata, luogo, categoria di albergo, fascia di prezzo eccetera grazie alle esperienze precedenti, quindi contatterà alberghi, linee aeree e quant'altro per fornirci le migliori opzioni possibili. Ma per rivolgerci al sistema non useremo un tono colloquiale o confidenziale, bensì un linguaggio formale e piuttosto schematico che possa comprendere facilmente.

Tale sistema potrà anche occuparsi di tutta una serie di ingrate incombenze di routine: basterà infatti ordinaraglielo e lui ci prenoterà il ristorante, ci fornirà una mappa dei negozi che cerchiamo, farà la spesa e richiederà i cibi da asporto, comprerà i biglietti aerei e molto altro ancora.

È grazie ai progressi compiuti dall'euristica negli ultimi decenni che oggi abbiamo motori di ricerca relativamente semplici, sebbene ancora piuttosto grezzi. Infatti sappiamo bene di rivolgerci a una macchina e non a un essere umano. In futuro, invece, i robot acquisiranno un tale livello di sofisticazione da assumere forme pressoché umane, agendo senza farsi notare e con un'abbondanza di sfumature comportamentali.

Con ogni probabilità l'applicazione più concreta avverrà in campo medico. Per esempio, oggi in caso di malessere potremmo dover aspettare ore al pronto soccorso prima che un dottore ci visiti. Nel prossimo futuro ci avvicineremo semplicemente al nostro schermoparete chiedendo un consulto al nostro medico-robot. Premendo un pulsante potremo persino cambiarne il viso, e magari la personalità. Il viso amichevole del nostro nuovo "medico di famiglia", così come ce lo siamo scelto, comparirà sullo schermo e ci porrà una serie di semplici domande: «Come si sente?» «Dove le fa male?» «Quand'è cominciato il dolore?» «Quanto spesso si ripete?».

Ogni volta risponderemo scegliendo tra una semplice gamma di risposte, rivolgendogli la parola senza dover scrivere con una tastiera. A seconda delle nostre risposte, il medico-robot ci porrà la successiva serie di domande, e infine ci fornirà una diagnosi basata sulle esperienze accumulate da tutti i medici del mondo. Inoltre il medico-robot potrà analizzare i dati provenienti dai sanitari, dai vestiti e dai mobili di casa, che continueranno a monitorare la

nostra salute attraverso i chip a DNA. Potrebbe anche chiederci di esaminare il nostro corpo con uno scanner MRI portatile, i cui dati saranno analizzati da un supercomputer. (Esistono già versioni primitive di questi programmi, per esempio il WebMD, però non hanno ancora tutte le caratteristiche e i pieni poteri dell'euristica.)

In futuro potremo dunque evitare la maggior parte delle visite allo studio medico, alleggerendo il sistema sanitario di una grande mole di lavoro. Se il medico-robot riterrà che il problema è grave, ci raccomanderà subito di andare all'ospedale, dove medici in carne ossa ci sottoporranno alle cure intensive del caso. Ma anche all'interno dell'ospedale vedremo all'opera l'IA sotto forma di medici-robot, forse del genere ASIMO. Non si tratterà di medici-robot realmente intelligenti, ma comunque capaci di spostarsi da un reparto all'altro, somministrare le medicine corrette ai pazienti e occuparsi di molti loro bisogni. Potranno spostarsi lungo binari sul pavimento, oppure in maniera indipendente come ASIMO.

Esiste già un medico-robot del genere, l'RP-6, ed è utilizzato in ospedali come il Medical Center dell'UCLA. Si tratta fondamentalmente di uno schermo montato in cima a un computer che si muove su rotelle. Sul monitor si può vedere il viso di un vero medico, che magari si trova a chilometri di distanza. Il robot dispone di un sistema audio-video attraverso cui il medico può vedere e parlare con il paziente. Inoltre il medico può controllare i movimenti del robot con un semplice joystick, così da interagire con i pazienti, controllare le medicine e svolgere tutti gli altri compiti del caso.

Poiché ogni anno nelle unità di terapia intensiva degli Stati Uniti ci sono cinque milioni di pazienti, ma solo seimila specialisti qualificati per gestire le situazioni più critiche, robot del genere potranno contribuire ad alleviare la crisi delle terapie d'urgenza, in cui un solo medico deve occuparsi di troppi pazienti. In futuro questi robot potranno diventare ancora più autonomi, e quindi capaci di spostarsi da soli e interagire con i pazienti.

Uno dei paesi all'avanguardia in questo settore è il Giappone, che sta investendo moltissimo nella robotica proprio per attenuare l'effetto della prossima crisi dell'assistenza medica. Non c'è da sorprendersi che il Giappone sia una delle nazioni più impegnate in questo settore, per tutta una serie di motivi.

Prima di tutto, secondo la religione shintoista anche gli oggetti inanimati sono abitati da spiriti. Persino quelli meccanici. Di fronte a un robot i bambini occidentali potrebbero strillare di paura, soprattutto se hanno visto uno di quei film con le macchine assassine, mentre per quelli giapponesi è uno spirito affine, divertente e utile. In Giappone è tutt'altro che inconsueto imbattersi in receptionist-robot all'ingresso di un grande magazzino, sempre pronti a salutare gentilmente chiunque faccia il suo ingresso. Infatti, il 30 per cento di tutti i robot del settore commerciale mondiale si trova proprio in Giappone.

Punto secondo, il Giappone sta affrontando una sorta di incubo demografico, poiché la sua popolazione sta invecchiando rapidamente. Il tasso delle nascite è caduto alla media sorprendente di 1,2 bambini per famiglia, e l'immigrazione è pressoché inesistente. Alcuni demografi hanno affermato che stiamo assistendo a qualcosa di paragonabile a un incidente ferroviario al rallentatore: nei prossimi anni un convoglio demografico (l'invecchiamento della popolazione e il crollo delle nascite) entrerà in collisione con un altro convoglio (il basso tasso d'immigrazione). (Qualcosa del genere potrebbe accadere anche in Europa.) Le conseguenze si sentiranno più gravemente in campo medico, laddove medici in stile ASIMO potrebbero rendersi estremamente utili occupandosi di mansioni come il recupero e la somministrazione dei farmaci,

nonché il monitoraggio dei pazienti ventiquattr'ore su ventiquattro.

METÀ DEL SECOLO (DAL 2030 AL 2070)

Robot modulari

Verso la metà del secolo il mondo potrebbe essere pieno di robot di cui forse non ci accorgeremo nemmeno, perché la maggior parte di loro non avrà un aspetto umano. Potranno agire nell'ombra, magari sotto forma di serpenti, insetti o ragni, e saranno destinati a mansioni poco piacevoli ma d'importanza cruciale. Si tratterà di robot modulari, capaci di cambiare forma a seconda del compito che dovranno svolgere.

Ho avuto occasione di incontrare Weimin Shen, dell'Università della California del Sud (USC), uno dei pionieri nel campo dei robot modulari. Shen si sta dedicando alla creazione di piccoli moduli cubici, interscambiabili come i mattoncini Lego e assemblabili a piacimento. Shen li chiama *robot polimorfici*, poiché possono cambiare forma, geometria e funzioni. Una volta nel suo laboratorio, mi sono immediatamente reso conto della differenza tra il suo metodo e quello di Stanford o del MIT. A un primo sguardo tutti questi laboratori assomigliano alla stanza dei giochi che tutti i bambini hanno sempre sognato, con robottini dappertutto che camminano o parlano. Quando ho visitato i laboratori di ricerca sull'intelligenza artificiale di Stanford e del MIT ho visto molti "giocattoli" con chip al loro interno e dotati di un minimo d'intelligenza. I banchi di lavoro erano stracolmi di aeroplani, elicotteri, camioncini e persino congegni simili a insetti, tutti robotizzati e in grado di muoversi autonomamente. Ciascuno di quei robot costituiva un'unità autosufficiente.



Diversi tipi di robot: LAGR (in alto), STAIR (in basso a sinistra) e ASIMO (in basso a destra). Malgrado i grandi progressi dell'intelligenza artificiale, questi robot hanno l'intelligenza di uno scarafaggio. (Foto Yann LeCun, Ashutosh Saxena e Jason Kempin/WireImage)

Quando invece si entra nel laboratorio dell'USC si assiste a uno spettacolo di tutt'altro genere. Ci sono scatole di moduli cubici, ciascuno con un lato di circa 5 centimetri, che possono essere uniti o separati in modo da formare diverse creature dalle sembianze animali. Per esempio, si possono creare serpenti che strisciano in linea retta. Oppure, se li disponiamo ad anello, otteniamo un cerchio che ruota. Ma è anche possibile intrecciarli o collegarli in una giuntura a Y, in modo da creare una serie completamente nuova di congegni simili a polpi, ragni, cani o gatti. È un po' come il Lego, in cui ogni mattoncino ha una sua "intelligenza" e può adattarsi a qualsiasi configurazione immaginabile.

Questo potrebbe risultare utile per superare determinati ostacoli. Se un ragno-robot dovesse avanzare in un sistema fognario e incontrare un muro, potrebbe cercare una fessura o un buco e disassemblarsi, in modo che ogni suo pezzo possa attraversare il pertugio e poi, una volta superato l'ostacolo, riassemblarsi nella configurazione originaria. Robot modulari del genere sarebbero praticamente inarrestabili.

I robot modulari potrebbero anche avere una funzione cruciale nella riparazione di strutture

obsolete. Per esempio, nel 2007 il ponte sul fiume Mississippi a Minneapolis è crollato uccidendo tredici persone e ferendone centoquarantacinque, probabilmente perché la struttura era degradata, sovraccarica e mal progettata. Forse centinaia di incidenti simili stanno per accadere nei più diversi angoli del pianeta, ma riparare ogni vecchio ponte costerebbe semplicemente troppo. Ecco dunque l'utilità dei robot modulari, che senza suscitare troppo scalpore potrebbero controllare ponti, strade, gallerie, condutture e centrali elettriche, ed eventualmente compiere le riparazioni necessarie. (Un altro esempio: i ponti di Manhattan hanno subito gravi danni a causa della corrosione, della negligenza e delle mancate riparazioni. Su uno di questi un operaio ha trovato una bottiglia di Coca-Cola degli anni Cinquanta, lasciata lì l'ultima volta che il ponte era stato verniciato. E di recente una sezione del vecchio Manhattan Bridge si è pericolosamente avvicinata al crollo, tanto che la struttura è stata chiusa al traffico per riparazioni.)

Robot in sala operatoria e in cucina

I robot potrebbero essere impiegati come chirurghi, ma anche come cuochi e musicisti. Per esempio, uno dei limiti più gravi della chirurgia è la destrezza e la precisione della mano umana. Dopo ore di lavoro anche i chirurghi, come qualsiasi altro essere umano, sperimentano fatica e un calo delle prestazioni, e le dita cominciano a tremare. È un problema che i robot non avrebbero.

Per esempio, per impiantare un by-pass cardiaco la chirurgia tradizionale prevede l'apertura di uno squarcio di una trentina di centimetri nel centro del petto, cosa che ovviamente richiede un'anestesia totale. Aprire il petto incrementa inoltre le possibilità d'infezione e allunga i tempi di guarigione, procurando al paziente dolore e disagio per tutta la convalescenza, oltre a lasciargli una cicatrice deturpante. Esiste però un sistema robotizzato chiamato *Da Vinci* che può ampiamente ridurre tutti questi inconvenienti. Tale robot dispone di quattro braccia: uno gestisce una videocamera, mentre le altre tre sono per la chirurgia di precisione. Invece di praticare un'ampia incisione sul petto, con questo sistema sono sufficienti poche piccole incisioni sul lato del corpo. In Europa, nel Nord e Sud America si contano già ottocento ospedali dotati di questo sistema robotizzato, che solo nel 2006 ha eseguito quarantottomila operazioni. In questo modo gli interventi chirurgici potrebbero anche essere eseguiti via internet: i migliori chirurghi del mondo che vivono e lavorano in una grande metropoli potrebbero dunque eseguire un intervento chirurgico su un paziente che invece si trova in un'area rurale isolata, se non addirittura in un altro continente.

In futuro disporremo di versioni più avanzate di tale sistema, grazie al quale si potranno eseguire interventi di microchirurgia, per esempio, sui vasi sanguigni, sulle fibre nervose e sui tessuti, poiché il robot sarà in grado di maneggiare scalpelli, pinzette e aghi micro-scopici, cosa attualmente impossibile. In realtà, un giorno i chirurghi dovranno incidere la cute solo in qualche rara occasione, mentre gli interventi non invasivi rappresenteranno la norma.

Gli endoscopi (lungi tubi che una volta inseriti nel corpo possono illuminarne l'interno e incidere i tessuti) saranno più sottili di un filo, e micromacchine più piccole del punto alla fine di questa frase svolgeranno un notevole lavoro meccanico. (In un episodio della prima serie di *Star Trek* il dottor McCoy era disgustato all'idea che i medici del xx secolo dovessero incidere la cute.) Il giorno in cui tutto questo sarà realtà non è molto lontano.

Gli studenti di medicina del futuro impareranno ad "affettare" immagini 3d del corpo umano, e ogni loro movimento della mano sarà riprodotto da un robot in un'altra stanza.

I giapponesi primeggiano anche nella produzione di robot capaci di interagire con gli esseri umani. A Nagoya c'è un cuoco-robot che sa preparare un tipico pasto da fast-food nel giro di pochi minuti. Basta digitare ciò che si desidera sul menu e lui lo cucina. Costruito dalla Aisei, un'azienda che produce robot industriali, questo speciale cuoco riesce a cuocere i noodle in 1 minuto e 40 secondi, e in orario di punta riesce a sfornare un'ottantina di ciotole. Il cuoco-robot assomiglia in tutto e per tutto alle macchine delle catene di montaggio di Detroit: ha due grandi braccia meccaniche programmate per muoversi secondo una precisa sequenza, solo che invece di avvitare e saldare metalli in una fabbrica automobilistica, le sue dita prendono gli ingredienti da una serie di scodelle che contengono carne, farina, condimenti, salse, spezie eccetera. Dopodiché le braccia robotizzate mescolano e assemblano gli ingredienti per preparare un

sandwich, un'insalata o una zuppa. Il robot dell'Aisei è costituito essenzialmente da due braccia gigantesche che spuntano dal banco della cucina, ma sono in progetto altri modelli con sembianze più umane.

Sempre in Giappone, la Toyota ha realizzato un robot capace di suonare il violino bene quasi quanto un professionista. Assomiglia ad ASIMO, con la differenza che sa afferrare il violino, dondolarsi a ritmo di musica ed eseguire complessi spartiti con la dovuta grazia. Il suono è sorprendentemente realistico, così come la gestualità del robot, che lo fa davvero assomigliare a un violinista di talento. Sebbene la musica prodotta non sia ancora allo stesso livello di quella di un concertista, è sufficientemente buona per intrattenere il pubblico. Come sappiamo, già nel secolo scorso esistevano pianole meccaniche che eseguivano canzoni incise su un grosso disco rotante. Come quelle pianole, anche il robot della Toyota è programmato, ma è anche deliberatamente progettato per imitare, nel modo più realistico possibile, i movimenti e le posture di un vero violinista.

C'è poi un'altra istituzione giapponese, l'Università di Waseda, i cui scienziati hanno realizzato un flautista-robot. Si tratta di un robot che ha nel petto delle cavità vuote – i polmoni – da cui prende l'aria che soffia nello strumento, che è un vero flauto. Può suonare melodie abbastanza complesse come *Il volo del calabrone* di Rimskij-Korsakov. Certo, robot del genere non sanno comporre nuova musica, è questo va sottolineato, ma per quanto riguarda la capacità d'esecuzione possono competere con un essere umano.

Sia il cuoco-robot sia il musicista-robot eseguono un programma attentamente predefinito e non dispongono di alcuna autonomia. E sebbene siano molto più sofisticati delle vecchie pianole meccaniche, funzionano ancora sulla base degli stessi principi. Cameriere e maggiordomi-robot davvero autonomi appartengono ancora a un futuro lontano. Tuttavia un giorno i discendenti del cuoco e del musicista-robot potrebbero far parte della nostra vita e svolgere compiti elementari che una volta si ritenevano di esclusiva pertinenza degli uomini.

Robot emotivi

Verso la metà del secolo l'era dei robot emotivi sarà nel suo massimo splendore. Gli scrittori hanno spesso fantasticato su robot che desiderano diventare umani e provare emozioni. In *Pinocchio* una marionetta di legno vorrebbe trasformarsi in un ragazzino in carne e ossa. Ne *Il mago di Oz* l'uomo di latta vorrebbe tanto avere un cuore. E per venire ai giorni nostri, in *Star Trek: The Next Generation* l'androide Data cerca di padroneggiare le emozioni raccontando barzellette e tentando di capire cosa potrebbe farci ridere. In realtà quello dei robot che diventano sempre più intelligenti ma non riescono ad afferrare l'essenza delle emozioni è uno dei temi ricorrenti di tutta la fantascienza. Alcuni scrittori hanno dichiarato che un giorno i robot potranno anche superarci in intelligenza, ma non riusciranno mai a piangere.

Ma questo potrebbe non essere vero. Gli scienziati stanno finalmente imparando a conoscere la vera natura delle emozioni. Tanto per cominciare, sono le emozioni a dirci cos'è buono per noi e cosa è dannoso. La stragrande maggioranza delle cose che ci circondano sono dannose o non particolarmente utili. Quando sperimentiamo l'emozione del piacere impariamo dunque a identificare quelle minuscole porzioni di mondo da cui trarre beneficio. Infatti, ciascuna delle nostre emozioni – odio, gelosia, paura, amore – si è evoluta nel corso di milioni di anni per proteggerci dai pericoli di un mondo ostile e aiutarci a riprodurci. Ogni emozione contribuisce alla trasmissione dei nostri geni alla futura generazione.

Per Antonio Damasio, dell'Università della California del Sud, il ruolo delle emozioni nella nostra evoluzione è cruciale. Damasio ha analizzato le vittime di malattie o incidenti cerebrali e ha riscontrato che in alcuni di questi pazienti si era interrotto il collegamento tra la parte pensante del cervello (la corteccia cerebrale) e quella delle emozioni (collocata in profondità nel centro del cervello, come l'amigdala). Si trattava di persone assolutamente normali, che però avevano difficoltà a esprimere le proprie emozioni.

Nel loro caso c'era un problema che si palesava immediatamente: non sapevano più scegliere. Fare la spesa si trasformava per loro in un incubo, poiché tutto sembrava avere lo stesso valore, caro o a buon mercato che fosse, appariscente o sofisticato. Anche fissare un appuntamento era per loro pressoché impossibile, perché non riuscivano a distinguere tra le diverse date del futuro. Come ha commentato Damasio: «Capivano tutto, ma non provavano nulla».

In altre parole, uno degli scopi fondamentali delle emozioni è fornirci una scala di valori, in modo da poter scegliere che cosa è importante, costoso, bello o prezioso. In assenza di emozioni tutto ci sembrerebbe uguale, quindi ci ritroveremmo nella situazione paralizzante di non riuscire a compiere una scelta. Gli scienziati stanno quindi cominciando a capire che le emozioni, lungi dall'essere un lusso, sono uno dei fondamenti dell'intelligenza.

Per esempio, guardando un episodio di *Star Trek* con Spock e Data che fanno il proprio lavoro apparentemente senza provare emozioni, notiamo immediatamente l'incongruenza: entrambi i personaggi palesano continuamente emozioni, poiché compiono lunghe valutazioni ed esprimono giudizi. Hanno infatti deciso che essere un ufficiale è importante, che certi compiti sono fondamentali, che l'obiettivo della Federazione è nobile, che la vita umana è preziosa e così via. L'idea di un ufficiale incapace di provare emozioni è dunque una pura illusione.

Disporre di robot emotivi potrebbe essere una questione di vita o di morte. In futuro gli

scienziati riusciranno probabilmente a creare robot per il soccorso e il salvataggio, da inviare in missione nei casi di incendio, terremoto o altri disastri naturali. Dovranno quindi essere nelle condizioni di compiere migliaia di valutazioni assennate riguardo a chi e a che cosa salvare, e secondo quali priorità. Valutando l'entità della devastazione in cui si ritroveranno a operare, dovranno stabilire a quali compiti dare precedenza in base a criteri precisi.

Le emozioni risultano essenziali anche alla luce dell'evoluzione del cervello umano. Se analizziamo le caratteristiche anatomiche del cervello, ci rendiamo conto che può essere suddiviso in tre strutture principali. Anzitutto c'è il cervello rettiliano: situato alla base del cranio, in sostanza replica la maggior parte delle caratteristiche del cervello dei rettili. Le funzioni vitali primitive come l'equilibrio, l'aggressività, la territorialità e la ricerca di cibo sono controllate da questa porzione di cervello. (Guardando un serpente che ci fissa, oltre a provare paura ci chiediamo anche che cosa stia pensando. Se la teoria di cui sopra è corretta, il serpente non starà pensando granché, a parte valutare se siamo o meno un buon pasto!)

Lo studio degli organismi superiori ha evidenziato come il cervello si sia espanso verso la parte anteriore del cranio. Infatti al livello successivo abbiamo il cervello delle scimmie, o *sistema limbico*, situato al centro del nostro cervello. Include componenti come l'amigdala, implicata nell'elaborazione delle emozioni, e gli animali che vivono in gruppo ce l'hanno particolarmente sviluppato. Gli animali sociali che cacciano in gruppo hanno bisogno di un notevole potenziale cerebrale da dedicare alla comprensione delle regole del branco. Poiché la sopravvivenza in un ambiente selvaggio dipende dalla cooperazione con gli altri, e considerato che non sanno parlare, questi animali devono comunque riuscire a comunicare le proprie emozioni attraverso il linguaggio del corpo, i grugniti, i gemiti e i gesti.

Infine abbiamo la porzione frontale e più esterna del cervello, la corteccia cerebrale, che definisce la natura umana e governa il pensiero razionale. Mentre gli altri animali sono dominati dall'istinto e dalla genetica, gli umani si servono della corteccia cerebrale per elaborare concetti e idee.

Se tale analisi della progressione evolutiva è corretta, dobbiamo dedurre che nella creazione di robot autonomi le emozioni avranno una funzione chiave. Finora siamo riusciti a creare robot capaci di imitare unicamente il cervello rettiliano: possono camminare, ispezionare il circondario e sollevare oggetti, ma non riescono a fare molto di più. Per contro, gli animali sociali sono più intelligenti di quelli che possiedono soltanto il cervello rettiliano. Affinché possa socializzare, nonché comprendere e rispettare le regole del branco, l'animale non può fare a meno delle emozioni. Gli scienziati hanno ancora un bel po' di lavoro da fare prima di riuscire a creare qualcosa di simile al sistema limbico e alla corteccia cerebrale.

Cynthia Breazeal del MIT ha infatti creato un robot specificamente progettato per potersi confrontare con questa problematica. Si chiama Kismet, e ha un viso che assomiglia a un elfo birichino. A livello superficiale sembra vivo e vegeto, e reagisce con movimenti facciali simili ai nostri. Ricorrendo a tali espressioni, Kismet può riprodurre un'ampia gamma di emozioni. Infatti si è constatato che quando le donne interagiscono con questo robot dalle fattezze infantili, spesso si esprimono con il tipico linguaggio materno utilizzato con bambini e neonati. Sebbene robot come Kismet siano progettati per riprodurre esteriormente le emozioni, gli scienziati non si illudono di certo che tali macchine possano realmente provarle. In un certo senso, è come se un registratore fosse programmato non per emettere suoni ma per esibire espressioni facciali, senza alcuna consapevolezza di ciò che sta facendo. Kismet rappresenta comunque un notevole

passo avanti, poiché senza un'eccessiva programmazione si è giunti a un robot capace di mimare le emozioni provate dagli umani, e alle quali noi reagiamo di conseguenza.

Questi robot emotivi un giorno troveranno posto nelle nostre case. Non potranno certo ambire al ruolo di confidente, segretaria o domestica, ma sapranno comunque eseguire procedure definite da regole precise e basate sull'euristica. Intorno alla metà del secolo queste macchine potrebbero avere l'intelligenza di un cane o di un gatto, e proprio come un animale domestico manifesteranno un legame emotivo con il loro padrone, quindi sarà difficile che cadano semplicemente in disuso. Non riusciremo a parlargli in modo colloquiale, ma comprenderanno gli ordini per cui sono stati programmati, che potranno essere diverse centinaia. Se gli chiederemo di fare qualcosa che non è presente nella loro memoria – per esempio: «Fai volare un aquilone» –, assumeranno un'espressione attonita. (Se i robot cane o gatto riusciranno a riprodurre l'intera gamma delle reazioni animali così bene da risultare indistinguibili da un vero animale, allora verrà spontaneo domandarsi se questi robot “da compagnia” sentono qualcosa o sono altrettanto intelligenti di un comune cane o gatto.)

La Sony si è cimentata con questi robot emotivi producendo il cagnolino AIBO (*artificial intelligence robot*). Si è trattato del primo giocattolo capace di reagire in modo realistico nei confronti del suo padrone, sebbene in modo primitivo. Per esempio, sdraiando il “cagnolino” sulla schiena, cominciava subito a mugolare di piacere. Poteva camminare, rispondere ai comandi vocali e, almeno in una certa misura, persino imparare, ma le sue non erano nuove emozioni, né reazioni emotive. (La produzione di AIBO è stata interrotta nel 2005 per motivi finanziari, ma ha comunque dato vita a un pubblico fedele che aggiorna costantemente il suo software in modo che sappia svolgere nuovi compiti.) In futuro gli animali robotizzati capaci di stringere un legame emotivo con i bambini potrebbero diventare d'uso comune.

Occorre tuttavia ribadire che, pur disponendo di un'ampia gamma di emozioni, grazie a cui riusciranno a stabilire legami duraturi con i loro padroncini, questi robot non proveranno autentiche emozioni.

Il *reverse-engineering* del cervello

Verso la metà del secolo dovremmo essere in grado di compiere il passo successivo nella storia dell'intelligenza artificiale: il *reverse-engineering* del cervello umano, ovvero la sua "ingegnerizzazione inversa". Gli scienziati, frustrati per non essere riusciti a creare un robot di silicio e acciaio, stanno cercando di procedere nella direzione opposta: smontare il cervello neurone dopo neurone, come farebbe un meccanico con le viti di un motore, per poi simulare l'attività neurale su un potente computer. Provano sistematicamente a simulare l'attivazione dei neuroni negli animali, a partire da topi, gatti e così via risalendo la scala evolutiva animale. Gli scienziati hanno un obiettivo ben definito che potrebbe essere raggiunto entro la metà di questo secolo.

Scrivono Fred Hapgood del MIT: «Scoprire in che modo funziona il cervello, cioè comprendere *esattamente* come lavora, nello stesso modo in cui sappiamo come funziona un motore, ci costringerebbe a riscrivere quasi ogni testo delle nostre biblioteche scientifiche»¹⁰.

Il primo passo del *reverse-engineering* del cervello consiste nel comprendere la sua struttura basilare. Obiettivo già raggiunto, ma persino questo processo relativamente semplice si è rivelato lungo e faticoso. Storicamente, l'identificazione delle diverse parti del cervello avveniva durante le autopsie, ma non si aveva alcuna indicazione circa le loro funzioni.

Le cose cominciarono a cambiare quando gli scienziati iniziarono ad analizzare persone che avevano subito danni cerebrali, constatando che una menomazione di certe parti del cervello corrispondeva a determinati cambiamenti di comportamento. Le vittime di ictus e le persone colpite da altre malattie o incidenti manifestavano specifiche alterazioni comportamentali che potevano essere associate a precise regioni del cervello.

Il caso più clamoroso fu quello di Phineas Gage, un capocantiere delle ferrovie statunitensi che nel 1848, mentre lavorava nel Vermont, subì un incidente in cui un'asta tonda di metallo lunga circa un metro gli trapassò il cervello! L'incidente fu causato dall'esplosione accidentale della carica che Gage stava preparando per far saltare in aria una roccia che ostruiva il passaggio della ferrovia. L'asta di ferro, con la quale Gage stava compattando la polvere da sparo, schizzò in aria e gli attraversò la mascella, conficcandosi nella base del cervello e attraversandolo diagonalmente fino a fuoriuscire dalla parte opposta del cranio. Miracolosamente sopravvissuto a quell'orribile incidente, Gage si ritrovò con il lobo frontale distrutto, anche se forse il trauma interessò entrambi i lobi. Il medico che gli prestò le prime cure non riusciva a credere che l'operaio potesse essere sopravvissuto a una cosa del genere! Gage restò in stato di semi-coscienza per diverse settimane, ma poi, incredibilmente, guarì¹¹. Sopravvisse altri dodici anni, facendo un po' di tutto e spostandosi in varie zone del paese fino alla morte, che sopravvenne nel 1860. I medici conservarono con cura il suo cranio e l'asta che l'aveva attraversato, i quali successivamente sono divenuti oggetto di studi approfonditi. Successivamente, grazie a tecniche moderne come la tomografia computerizzata è stato possibile ricostruire i particolari di questo straordinario incidente.

Questo episodio cambiò radicalmente tutte le principali idee circa il rapporto tra corpo e mente. Prima di allora si riteneva, persino in ambito scientifico, che corpo e anima fossero due entità separate.

Si scriveva scientemente a proposito di una qualche «forza vitale» che animava il corpo indipendentemente dal cervello. Inoltre cominciarono a circolare studi che indicavano come la personalità di Gage avesse subito notevoli cambiamenti proprio in seguito all'incidente. E secondo alcune testimonianze, Gage, che era sempre stato un uomo affabile e socievole, divenne un tipo violento e ostile. Resoconti scritti e testimonianze ebbero dunque l'effetto di rinforzare l'ipotesi che specifiche parti del cervello controllavano specifici comportamenti, e quindi che corpo e anima non potevano che essere inseparabili.

Nel 1930 fu compiuto un altro notevole passo in avanti, poiché il neurologo Wilder Penfield, operando i pazienti al cervello per curarli dall'epilessia, si accorse che, toccando alcune parti del cervello con gli elettrodi poteva stimolare specifiche parti del corpo. In sostanza, una piccola scarica elettrica su questa o quella porzione della corteccia faceva muovere un braccio o una gamba. Penfield fu così in grado di delineare una prima, approssimativa mappa della corteccia cerebrale e dei suoi collegamenti con le diverse parti del corpo. Di conseguenza, gli scienziati poterono ridisegnare il cervello umano, elencando quali parti fossero collegate a determinati organi. Il risultato fu dunque un omuncolo, ovvero una rappresentazione piuttosto bizzarra del corpo umano mappato sulla superficie del cervello, un tracciato da cui derivava per l'appunto l'immagine di uno strano omino con la punta delle dita, le labbra e la lingua enormi, ma con un corpo minuscolo.

Più di recente le scansioni MRI hanno fornito immagini rivelatrici del cervello umano in piena attività, senza però consentire la mappatura degli specifici percorsi neurali del pensiero, che forse coinvolgono soltanto qualche migliaio di neuroni. Ma negli ultimi tempi è emerso un nuovo settore chiamato *optogenetica*, ovvero quella scienza in cui si combinano ottica e genetica con il proposito di districare i percorsi neurali animali. Si può paragonarla al tentativo di realizzare una carta stradale: i risultati delle scansioni MRI possono essere considerati una prima mappatura delle grandi autostrade interstatali e del relativo flusso di traffico, mentre l'*optogenetica* si propone di individuare le strade e i percorsi individuali. In linea di principio, stimolando specifici percorsi neurali gli scienziati potrebbero persino giungere a controllare il comportamento animale.

Questo ha dato vita a una serie di interpretazioni mediatiche sensazionalistiche. Per esempio, il "Drudge Report" ha pubblicato un articolo a tinte fosche che titolava: «Gli scienziati hanno creato mosche telecomandate». I media si sono spinti a ipotizzare l'impiego di mosche telecomandate in grado di svolgere il lavoro sporco del Pentagono. Nel suo *Tonight Show* Jay Leno ha persino parlato di una mosca telecomandata capace di volare nella bocca del presidente George W. Bush. Sebbene gli intrattenitori vadano a nozze con scenari bizzarri di questo tipo e si divertano un mondo a raccontare del Pentagono che dirige sciame di insetti premendo un pulsante, la realtà è molto più contenuta.

Il moscerino della frutta (*drosophila*) ha un cervello con circa centocinquantamila neuroni. Grazie all'*optogenetica* gli scienziati sono riusciti ad attivare certi neuroni del moscerino che corrispondono a determinati comportamenti. Per esempio, attivando due specifici neuroni si segnala al moscerino di scappare, al che l'insetto allunga automaticamente le zampette, apre le ali e vola via. Gli scienziati sono giunti a creare una nuova varietà di drosofile, geneticamente modificata, in cui tali neuroni si attivano ogni volta che viene acceso un raggio laser. Puntando il raggio sui moscerini, loro scappano puntualmente.

Determinare la struttura del cervello ha implicazioni di grande importanza. Non solo ci consentirà di ricavare passo dopo passo i percorsi neurali relativi a precisi comportamenti, ma

questo genere di informazioni sarà probabilmente d'aiuto per le vittime di ictus e di malattie o incidenti cerebrali.

Grazie a questa tecnica Gero Miesenböck e i suoi colleghi dell'Università di Oxford sono riusciti a identificare i meccanismi neurali degli animali. Non solo hanno studiato i percorsi neurali del riflesso di fuga della drosofila, ma anche i riflessi implicati nell'olfatto. Hanno poi studiato i percorsi neurali che governano la ricerca di cibo degli ascaridi, nonché i neuroni coinvolti nel processo di decisione dei topi, che sono quasi trecento, a differenza dei soli due che si attivano nei moscerini.

Gli strumenti principali a cui hanno fatto ricorso sono i geni responsabili della produzione di certi colori, nonché le molecole che reagiscono alla luce. Per esempio, nella medusa c'è un gene specifico per la produzione di proteina verde fluorescente. Inoltre ci sono varie molecole, come la rodopsina, che reagiscono alla proiezione di un fascio luminoso, consentendo il passaggio di ioni attraverso le membrane cellulari. Sfruttando tali fattori, illuminare questi organismi scatena precise reazioni chimiche. Armati di tinte e sostanze chimiche sensibili alla luce, gli scienziati hanno per la prima volta individuato specifici percorsi neurali che determinano altrettanto specifici comportamenti.

Replicare il cervello

L'optogenetica è un primo, modesto passo. Quello successivo consisterà nel creare concretamente un modello dell'intero cervello servendosi delle ultime tecnologie disponibili. Per compiere quest'impresa colossale ci vorranno decenni di duro lavoro, e si potranno percorrere almeno due strade diverse. La prima comporterà l'utilizzo di supercomputer con cui simulare il comportamento di miliardi di neuroni, ciascuno connesso a migliaia di altri neuroni. Un secondo metodo implicherà invece la localizzazione di ogni singolo neurone del cervello.

La chiave del primo metodo, quello della simulazione, è la pura e semplice potenza di calcolo. Più potente sarà il computer, migliori saranno i risultati. La forza bruta e le teorie non troppo eleganti potrebbero quindi essere gli strumenti per penetrare questo immenso segreto. Esiste già un computer capace di compiere tale sforzo erculeo: l'ha costruito l'IBM e si chiama Blue Gene, ed è la macchina più potente al mondo.

Ho avuto occasione di dare un'occhiata a questo mostruoso computer durante una visita al Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) in California, dove vengono progettate le testate nucleari per il Pentagono. Per accedervi ho dovuto superare una lunga serie di controlli di sicurezza, poiché si tratta del più importante laboratorio militare top secret americano. È un complesso che si estende disordinatamente per 320 ettari nel bel mezzo della campagna, ha un budget annuale di 1,2 miliardi di dollari e un piccolo esercito di 6800 dipendenti. È il cuore dell'establishment nucleare della difesa statunitense.

Dopo avere superato varie postazioni di controllo sono giunto all'edificio che ospita Blue Gene, il computer capace di effettuare ben cinquecento trilioni di operazioni al secondo. Lo spettacolo è stato parecchio sorprendente, perché si tratta di una macchina enorme: occupa un migliaio di metri quadrati e consiste di una miriade di armadi d'acciaio nero lucente disposti in file, ciascuno alto 2,5 metri e largo 4,5.

Passeggiare lungo quei corridoi è stato davvero emozionante. A differenza dei film di fantascienza di Hollywood, in cui i computer hanno molte spie luminose, bobine che girano e scariche elettriche che crepitano nell'aria, negli armadi di Blue Gene regna il più assoluto silenzio, e le spie luminose sono davvero pochissime. Delle trilioni di operazioni complesse che il computer esegue in ogni momento non si sente e non si vede un bel niente.

La cosa che più m'interessava era ciò in cui Blue Gene era impegnato in quel momento, cioè la simulazione del cervello di un topo, che dispone di circa due milioni di neuroni (il nostro ne ha cento miliardi). La simulazione di quel genere di attività cerebrale è molto più complessa di quanto potrebbe sembrare, perché ciascuno di quei due milioni di neuroni è connesso a molti altri, così da creare una densa rete neurale. Mentre mi addentravo in quei corridoi non ho potuto fare a meno di constatare che dopotutto quel computer, nonostante la sua potenza di calcolo smisurata, riusciva a malapena a simulare il cervello di un topo, e solo per qualche secondo d'attività. (Questo non significa, peraltro, che Blue Gene possa simulare il comportamento di un topo. Attualmente gli scienziati riescono faticosamente a simulare il comportamento di uno scarafaggio. In altre parole, il supercomputer può simulare l'attivazione dei neuroni del cervello di un topo, ma non il suo comportamento.)

Diversi team di scienziati hanno lavorato alla simulazione del cervello di un topo. Uno dei

progetti più ambiziosi è il Blue Brain Project di Henry Markram dell'École Polytechnique Fédérale di Losanna, in Svizzera. Avviato nel 2005, questo progetto ha consentito di realizzare una versione ridotta di Blue Gene con soli sedicimila processori, e nel giro di un anno è riuscito a riprodurre il modello di funzionamento della colonna neocorticale di un topo, ovvero quella parte di neocorteccia con diecimila neuroni e cento milioni di connessioni. È stata una svolta cruciale, perché ha reso possibile compiere un'analisi biologica completa, neurone per neurone, della struttura di una parte fondamentale del cervello. (Nel cervello di un topo ci sono milioni di queste colonne neurali, che si ripetono all'infinito. Ne consegue che conoscendo il meccanismo di una, si può cominciare a capire come funziona l'intero cervello.)

Nel 2009, in uno slancio di ottimismo, Markram ha affermato: «Costruire un cervello umano non è affatto impossibile, potremmo riuscirci in una decina d'anni. Se realizzato correttamente, dovrebbe parlare ed esibire un'intelligenza e un comportamento del tutto simili a quelli umani»¹². Peraltro Markram ha sottolineato che per riuscire in un'impresa del genere ci vorrebbe un computer ventimila volte più potente di quelli attuali, con una capacità di memoria cinquecento volte superiore all'intera capacità dell'attuale internet.

Che cosa può quindi impedire che quest'obiettivo colossale venga raggiunto? Secondo Markram la risposta è semplice: i soldi.

Poiché la scienza di base è già nota, Markram ritiene che il problema potrebbe essere risolto semplicemente con enormi investimenti di denaro, e aggiunge: «Non è una questione di anni, ma di dollari. [...] Tutto dipende da quanto la società ambisce a qualcosa del genere. Se lo vogliono in dieci anni, possono averlo. Se invece preferiscono aspettare un migliaio di anni, vorrà dire che aspetteremo anche noi»¹³. Ma c'è un altro team rivale a quello di Markram che sta assemblando la più grande potenza di calcolo della storia dell'umanità. Si tratta di una versione più avanzata di Blue Gene, e anche questo supercomputer si trova al Livermore Lab. Si chiama Dawn, ed è uno spettacolo stupefacente: 147.456 processori e 150.000 gigabyte di memoria. È circa centomila volte più potente dei computer di cui ci serviamo ogni giorno. Il team di lavoro, guidato da Dharmendra Modha, ha già accumulato una serie di successi. Nel 2006 è giunto alla simulazione del 40 per cento del cervello di un ratto (che contiene cinquantacinque milioni di neuroni, molti di più di quelli di un topo), e nel 2007 è arrivato al 100 per cento.

Nel 2009 la stessa équipe ha segnato un altro record mondiale, arrivando a simulare l'1 per cento della corteccia cerebrale umana, ovvero più o meno la corteccia cerebrale di un gatto, che ha 1,6 miliardi di neuroni e un totale di nove trilioni di connessioni. Peraltro è stata una simulazione molto lenta, a circa 1/600 della velocità del cervello umano. (Simulando solo un miliardo di neuroni, la velocità aumentava fino a circa 1/83 di quella del nostro cervello.)

«È una sorta di telescopio Hubble della mente, un acceleratore lineare del cervello»¹⁴ ha dichiarato con orgoglio Modha, sottolineando la portata gigantesca di quel successo. Considerato che il cervello umano ha cento miliardi di neuroni, questi scienziati hanno davvero visto la luce in fondo al tunnel. Sentono cioè di poter intravedere una completa simulazione del cervello umano. «Non è soltanto possibile, ma inevitabile. Un giorno dovrà accadere» ha specificato Modha.

Creare un modello dell'intero cervello umano comporta però seri problemi, soprattutto per quanto concerne energia e temperatura. Dawn divora un milione di watt e genera così tanto calore che servono 6675 tonnellate di attrezzature di climatizzazione, capaci di emettere più di 75.000 metri cubi d'aria al minuto. E per riprodurre il funzionamento del cervello umano, tutto

ciò andrebbe moltiplicato per mille.

È un compito davvero monumentale! Il consumo di un ipotetico supercomputer per questo scopo sarebbe di un miliardo di watt, ovvero quello che produce un intero impianto nucleare. Per raffreddarlo occorrerebbe deviare un fiume e canalizzare le sue acque attraverso il computer, che da solo occuperebbe lo spazio di diversi quartieri cittadini.

Per quanto possa sembrare incredibile, il cervello umano usa solo 20 watt, e il calore che genera è a malapena rilevabile. Eppure le sue prestazioni superano senza problemi quelle del nostro più grande computer. Inoltre il cervello umano è l'oggetto più complesso mai prodotto da madre natura in quest'angolo di galassia. Poiché non ci sono prove di altre forme di vita intelligente nel sistema solare, significa che per raggiungere la stella più vicina dovremo viaggiare almeno 38 trilioni di chilometri, e probabilmente non basterebbe nemmeno questo per trovare qualcosa di altrettanto complesso come il congegno che abbiamo nel cranio.

Forse giungeremo davvero al *reverse-engineering* del cervello entro dieci anni, ma per riuscirci dovremo necessariamente avviare un nuovo, imponente progetto da miliardi di dollari, qualcosa di simile al progetto Manhattan. Ma viste le attuali circostanze economiche, è improbabile che ciò possa accadere presto. Un programma di ricerca intensiva come il progetto Genoma Umano (HGP, Human Genome Project), che costa circa 3 miliardi di dollari, ha trovato il sostegno del governo statunitense grazie alle sue evidenti ricadute positive sulla salute pubblica e sul progresso scientifico. I vantaggi che invece potremmo trarre dal *reverse-engineering* del cervello sono meno urgenti, quindi ne consegue che dovremo aspettare a lungo. È realistico ipotizzare che ci avvicineremo a tale obiettivo un passo alla volta, e che per completare quest'impresa storica potrebbero volerci decenni.

La simulazione computerizzata del cervello ci riporta dunque alla metà del secolo, ma anche allora dovremo fare i conti con montagne di dati, i quali richiederanno altri decenni per essere elaborati e attribuiti correttamente alle funzioni del cervello. Saremo cioè sommersi dai dati senza avere gli strumenti per decifrarli.

Smontare il cervello

Che dire invece del secondo metodo, che consiste nel rilevare la posizione di ogni singolo neurone all'interno del cervello?

Anche in questo caso siamo di fronte a un compito enorme che potrebbe costarci decenni di sofferte ricerche. Invece di fare affidamento su un supercomputer come Blue Gene, gli scienziati ricorrebbero al metodo "affetta e scubetta", cominciando con il cervello della drosofila per ricavarne sezioni non più spesse di 50 nanometri (cioè lo spazio occupato in da 150 atomi in sequenza). Le sezioni così ottenute sarebbero milioni, e dovrebbero essere esaminate e fotografate una a una al microscopio elettronico a velocità prossime al miliardo di pixel per secondo. La quantità di dati prodotti da un microscopio elettronico sarebbe sbalorditiva, circa 1000 trilioni di byte, ovvero quanto basta per riempire un immenso archivio. E questo solo per il cervello di un moscerino della frutta! Processare questi dati ricostruendo faticosamente immagini 3D del circuito di ciascun neurone richiederebbe più o meno cinque anni. Inoltre, per avere rappresentazioni più accurate del cervello di questo minuscolo essere dovremmo studiare diversi esemplari.

Gerry Rubin, dell'Howard Hughes Medical Institute, uno dei migliori in questo campo, ritiene che tutto considerato si potrà giungere a una mappa dettagliata dell'intero cervello della drosofila nel giro di una ventina d'anni. E conclude: «Dopo avere risolto questo problema, direi che ci troveremo ad avere percorso un quinto della strada che conduce alla comprensione del funzionamento della mente umana»¹⁵. Rubin è consapevole della portata dell'impresa che lo aspetta. Il cervello umano ha un milione di volte i neuroni di quello della drosofila. Se ci vorranno vent'anni per identificare ogni neurone del cervello del moscerino, va da sé che prima di riuscire a tracciare completamente l'architettura neurale del cervello umano occorreranno diversi decenni. E i costi del progetto saranno ovviamente enormi.

I ricercatori che si occupano del *reverse-engineering* del cervello manifestano dunque una certa frustrazione. Comprendono che il loro obiettivo è tormentosamente vicino, ma la mancanza di finanziamenti impedisce loro di raggiungerlo. Ad ogni modo, è ragionevolmente ipotizzabile che a un certo punto della metà del secolo disporremo sia di un computer sufficientemente potente da simulare il cervello umano sia di una bozza di mappatura della sua architettura neurale. Ma prima di approdare alla piena comprensione del pensiero umano, o di produrre una macchina capace di duplicarne il funzionamento, saremo probabilmente giunti agli ultimi decenni del secolo.

Per esempio, anche se ci venisse fornita la collocazione precisa di ogni singolo gene all'interno di una formica, ciò non significa che sapremmo come costruire un formicaio. Allo stesso modo, il semplice fatto che gli scienziati conoscano i circa venticinquemila geni che costituiscono il genoma umano, non possiamo certo dire di comprendere appieno il funzionamento del nostro corpo. Il progetto Genoma Umano potrebbe essere paragonato a un dizionario senza definizioni: ciascun gene del corpo umano codifica una determinata proteina, ma ancora non sappiamo come gran parte di queste proteine funzionano nel corpo.

Nell'ormai lontano 1986 gli scienziati riuscirono a mappare completamente la posizione di ogni singolo neurone del sistema nervoso di un minuscolo verme *Caenorabditis elegans*. Il risultato fu annunciato come un successo straordinario, grazie al quale saremmo giunti alla

decodificazione dei misteri del cervello. Tuttavia conoscere la precisa collocazione delle trecentodue cellule nervose e delle seimila sinapsi chimiche del verme non ha prodotto alcuna nuova comprensione del loro *modus operandi*, nemmeno a distanza di decenni. Allo stesso modo, anche se infine arriveremo al *reverse-engineering* del cervello umano dobbiamo ipotizzare che ci vorranno altri decenni di duro lavoro per capire in che modo funzionano e si combinano le sue diverse parti. Se entro la fine del secolo avremo completato l'impresa, e cioè non solo concluso il *reverse-engineering* del cervello, ma anche interpretato correttamente i relativi dati, avremo fatto un passo gigantesco verso la creazione di robot con caratteristiche umane. A quel punto dovremo però domandarci come impedire che tali robot prendano il sopravvento su di noi.

FUTURO REMOTO (DAL 2070 AL 2100)

Quando le macchine diventeranno consapevoli

Nella serie cinematografica di *Terminator* il Pentagono annuncia orgogliosamente il suo progetto Skynet, una rete di computer tentacolare e impenetrabile che ha lo scopo di controllare l'arsenale nucleare statunitense con assoluta precisione e fedeltà. Tutto funziona in maniera impeccabile, finché un giorno del 1995 succede qualcosa d'inatteso: Skynet diventa cosciente.

Gli operatori del progetto, scioccati dal fatto che la propria creazione sia diventata senziente, cercano di spegnere la macchina, ma ormai è troppo tardi. Skynet decide che l'unico modo per proteggere se stessa consiste nel distruggere l'umanità con una devastante guerra atomica. Di lì a poco tre miliardi di persone vengono incenerite da una serie di inferni nucleari. All'indomani dello sterminio, Skynet sguinzaglia una legione dopo l'altra di robot assassini, a cui affida il compito di massacrare i pochi sopravvissuti. La civiltà moderna vacilla, e viene ridotta a minuscole e patetiche bande di reietti e ribelli.

Immaginando uno scenario ancora peggiore, nella trilogia di *Matrix* gli esseri umani sono talmente primitivi da non riuscire neppure a comprendere che le macchine hanno già preso il controllo. Continuano a occuparsi delle proprie faccende quotidiane convinti che tutto sia normale, ignari del fatto che il loro vero corpo è mantenuto in vita in una sorta di capsula, mentre tutto ciò che li circonda è una simulazione della realtà costruita e mantenuta dai loro nuovi padroni, i robot. L'"esistenza" umana è un software che "gira" in un enorme computer alimentato proprio dai cervelli degli umani rinchiusi nelle capsule. L'unico motivo per cui le macchine si prendono cura degli umani è che questi rappresentano la loro fonte d'energia, le loro batterie.

Com'è ovvio, Hollywood riempie i botteghini spaventando a morte il pubblico, tuttavia questi scenari sollevano un interrogativo scientifico legittimo: che cosa accadrà il giorno in cui i robot disporranno di un'intelligenza pari alla nostra? Quali prospettive si apriranno se i robot diventeranno coscienti? Gli scienziati ne stanno discutendo animatamente, ma le loro domande non sono più incentrate sul "se", ma sul "quando"!

Secondo alcuni esperti, i robot da noi progettati saliranno la scala evolutiva: se oggi hanno l'intelligenza di uno scarafaggio, in futuro arriveranno a quella di un topo, di un coniglio, di un cane o di un gatto e di una scimmia, fino a competere con l'intelligenza umana. La lenta ascesa lungo questo difficile sentiero richiederà probabilmente molti decenni, tuttavia gli specialisti del settore sono convinti che sia solo questione di tempo, poi l'intelligenza delle macchine supererà la nostra.

I ricercatori in ambito IA hanno però opinioni divergenti per quanto concerne la tempistica. Alcuni sostengono che i robot si avvicineranno all'intelligenza del cervello umano entro una ventina d'anni al massimo, per poi distaccarci senza pietà. Nel 1993 Vernor Vinge ha affermato: «Nel giro di trent'anni disporremo della tecnologia necessaria per produrre un'intelligenza sovrumana. Dopodiché l'era degli umani tramonterà. [...] Sarei sorpreso se qualcosa del genere dovesse accadere prima del 2005 o dopo il 2030»¹⁶.

Dal canto suo Douglas Hofstadter, autore di *Gödel, Escher, Bach*, sostiene: «Sarei davvero sorpreso se qualcosa di remotamente simile dovesse accadere entro i prossimi cento o duecento anni!»¹⁷.

Quando ne ho discusso con Marvin Minsky del MIT, una delle figure fondamentali nella storia dell'intelligenza artificiale, ha voluto precisarmi che in merito al concretizzarsi di tale scenario non sapeva fornire una precisa tabella di marcia. Minsky è convinto che un giorno accadrà, ma si guarda bene dall'assurgere al ruolo di oracolo e prevedere una data specifica. (Da grande vecchio dell'IA, settore che ha contribuito a creare praticamente dal nulla, forse Minsky ha già assistito a troppe previsioni poi rivelatesi un nulla di fatto, se non la causa di un brusco recesso.)

Il problema fondamentale delle previsioni di tali scenari è che ancora non si è giunti a una definizione unanime del termine *coscienza*. Filosofi e matematici ci hanno provato per secoli, ma dopo tutti i loro sforzi non hanno nulla da esibire. Nel XVII secolo il pensatore Gottfried Leibniz, inventore del calcolo, scrisse: «Se potessi espandere il cervello fino alle dimensioni di un mulino e camminarci dentro, non troveresti la coscienza»¹⁸. Il filosofo David Chalmers ha persino catalogato i circa ventimila lavori già scritti sull'argomento¹⁹, che non dimostrano alcun consenso generale.

In nessun altro campo della scienza si sono fatti tanti sforzi per ottenere così pochi risultati.

Sfortunatamente, la parola *coscienza* viene impiegata cospicuamente nelle situazioni e nei contesti più svariati, assumendo significati diversi a seconda delle persone che la pronunciano. È triste ammetterlo, ma non abbiamo ancora una definizione universalmente accettata di questo termine.

Personalmente, ritengo che uno dei problemi sia stata l'incapacità di definire con chiarezza cosa sia la coscienza, nonché l'incapacità di quantificarla. Tuttavia, se dovessi avventurarmi in un'ipotesi, direi che si compone di almeno tre elementi fondamentali:

1. Percezione e riconoscimento dell'ambiente.
2. Autoconsapevolezza.
3. Capacità di progettare il futuro stabilendo obiettivi e programmi, ovvero simulare il futuro e ideare strategie.

Secondo questi principi, persino le macchine semplici e gli insetti hanno una forma di coscienza, che può essere stimata numericamente su una scala da 1 a 10. C'è dunque un continuum di coscienza quantificabile. Un martello non può percepire il suo ambiente, quindi il suo punteggio sarebbe pari a 0. Ma un termostato può farlo, poiché la sua caratteristica principale è proprio quella di percepire la temperatura di un ambiente e di intervenire alterandola, ragione per cui gli attribuirei un punteggio pari a 1. Ciò equivale a dire che le macchine con un meccanismo di feedback dispongono di una forma primitiva di coscienza. Lo stesso può dirsi dei vermi, che riescono a percepire la presenza di cibo, potenziali partner e pericoli, e agiscono sulla base di tali informazioni, sebbene non siano capaci di fare molto altro. Gli insetti, i cui sensi possono leggere più di un parametro (vista, suono, odorato, pressione, eccetera) potrebbero ricevere una valutazione ancora maggiore, forse 2 o 3.

La più elevata forma di percezione dell'ambiente circostante consiste nel saperne riconoscere e comprendere gli oggetti. Gli esseri umani sanno valutare immediatamente le dimensioni e le caratteristiche dell'ambiente in cui si trovano, quindi su questa ipotetica scala di valori hanno il punteggio maggiore. Ma è proprio in tale contesto che i robot dimostrano tutti i loro limiti. Come abbiamo visto, il riconoscimento delle forme rappresenta uno dei principali ostacoli all'intelligenza artificiale. Sebbene i robot riescano a percepire l'ambiente con una precisione

infinitamente superiore a quella degli umani, non sanno interpretare, né riconoscere i dati così ottenuti. Sulla scala di valore della coscienza i robot si piazzano dunque in fondo, vicino agli insetti, con cui condividono l'incapacità di riconoscere le forme.

Il livello immediatamente superiore di coscienza implica l'autoconsapevolezza. Se mettiamo uno specchio davanti alla maggior parte dei maschi delle diverse specie animali, questi reagiscono immediatamente con aggressività, e in certi casi si lanciano all'attacco dell'immagine riflessa, che attiva in loro il meccanismo di difesa del territorio. Molti animali non hanno consapevolezza di ciò che sono. Invece scimmie, elefanti, delfini e anche alcune specie di uccelli comprendono che quell'immagine allo specchio è la loro, ed evitano di attaccarla. Gli umani, dal canto loro, sono vicinissimi all'apice della scala, poiché hanno una percezione altamente sviluppata della propria identità in rapporto agli altri animali, agli altri umani e al mondo in generale. Inoltre gli uomini hanno un tale livello di auto-consapevolezza da riuscire a dialogare con se stessi, così da elaborare significati e situazioni attraverso il pensiero.

Punto terzo, le specie animali possono essere classificate secondo la loro capacità di formulare progetti per il futuro. Gli insetti, per quanto ne sappiamo, non escogitano strategie complesse per il futuro, e nella maggior parte dei casi reagiscono alle situazioni immediate decidendo sul momento, fidandosi del proprio istinto e degli indizi ricavati dall'ambiente circostante.

In tal senso i predatori sono più coscienti delle loro prede. Infatti devono sempre pianificare in anticipo, scegliendo il posto in cui nascondersi e programmando l'agguato, pedinando e prevedendo la fuga delle loro prede. Dal canto loro, alle prede non resta che la fuga, e per tale motivo gli attribuirei un punteggio inferiore.

Per quanto riguarda i piani per l'immediato futuro, i primati sanno persino improvvisare. Mostrando loro una banana difficile da raggiungere, elaborano a una qualche strategia per impossessarsene, per esempio usando un bastone. Possiamo quindi sostenere che di fronte a un obiettivo specifico (il cibo) i primati ricorrono a un piano che gli consenta di raggiungerlo nel futuro più prossimo.

Tuttavia nel complesso gli animali non manifestano un senso sviluppato del passato e del futuro remoti. Apparentemente, nel regno animale il domani non viene preso in considerazione. Non ci sono prove che gli animali pensino a che cosa potrà accadere loro un domani. (Alcune specie animali accumulano cibo per l'inverno, ma è un processo prettamente genetico: i loro geni li spingono a reagire immediatamente all'abbassamento della temperatura ambientale, scatenando il riflesso della ricerca del cibo.)

Noi esseri umani abbiamo invece una percezione del futuro molto ben sviluppata, e siamo continuamente impegnati a programmarlo. Nella nostra testa sono costantemente in corso simulazioni della realtà. Riusciamo persino a contemplare piani che vanno ben al di là della nostra esistenza personale. Uno dei principi secondo cui giudichiamo gli altri esseri umani è proprio la loro capacità di prevedere l'evolversi delle situazioni e formulare strategie adeguate per affrontarle. Nei ruoli di leadership, infatti, uno dei requisiti fondamentali è saper anticipare il futuro, soppesare i possibili risvolti e, su tale base, fissare obiettivi adeguati.

In altre parole, tale forma di coscienza comprende la capacità di prevedere il futuro, cioè di creare modelli multipli che si avvicinino ai possibili eventi futuri. Questo richiede una comprensione profonda del buon senso e delle regole della natura. Significa chiedersi ripetutamente: «Che cosa accadrebbe se...». Sia che intendiamo rapinare una banca o

candidarci alle elezioni presidenziali, questo genere di capacità progettuale implica il saper operare mentalmente simulazioni multiple dei possibili esiti.

Tutte le prove raccolte ci dicono che in natura soltanto gli uomini sono riusciti a padroneggiare quest'arte. Possiamo riscontrarlo anche quando analizziamo i profili psicologici dei soggetti sottoposti a test. Spesso gli psicologi confrontano il profilo degli adulti con quello di quando erano bambini. Dopodiché si pongono la seguente domanda: qual è la caratteristica che poteva permettere di prevedere il loro successo nel matrimonio e nel lavoro? Cercando di compensare i fattori socioeconomici, si scopre che spesso una caratteristica spicca sulle altre: la capacità di posticipare la gratificazione. Secondo gli studi a lungo termine di Walter Mischel della Columbia University e di molti altri ricercatori, i bambini che sapevano astenersi da una gratificazione immediata (per esempio, non mangiare subito il dolcetto che gli era stato donato), tenendo duro in attesa di ricompense a lungo termine più rilevanti (due dolcetti al posto di quello che avevano evitato di mangiare), ottenevano regolarmente punteggi più alti in tutte le misurazioni del successo futuro, per esempio nei test di valutazione scolastica per l'ingresso all'università, nella vita in generale, nell'amore e nel lavoro.

Ma il saper ritardare le gratificazioni ha anche a che vedere con un alto livello di consapevolezza e di coscienza. In sostanza, i bambini di Mischel sapevano simulare il futuro e comprendere che avrebbe regalato loro ricompense maggiori.

I ricercatori in ambito IA dovrebbero quindi puntare alla creazione di un robot che abbia tutte e tre le caratteristiche elencate. La prima è difficile da sviluppare, poiché i robot possono percepire l'ambiente circostante ma non sanno interpretarlo. L'autoconsapevolezza è invece più semplice da ottenere, mentre pianificare il futuro richiede buon senso, una comprensione intuitiva di ciò che è possibile e la capacità di elaborare strategie concrete per ottenere risultati specifici.

È quindi evidente che il buon senso è un prerequisito fondamentale per avere il massimo livello di coscienza. Affinché un robot riesca a simulare la realtà e a prevedere il futuro, deve prima di tutto padroneggiare milioni di regole che appartengono proprio al buon senso e al mondo circostante. Questo non è però sufficiente: il buon senso rappresenta soltanto l'insieme delle "regole del gioco", e non quelle della pianificazione.

Tornando alla nostra scala di valori, possiamo dunque classificare tutti i diversi robot finora creati.

Deep Blue, il campione di scacchi, avrebbe un punteggio molto basso. Certo, a scacchi può battere grandi campioni, ma non sa fare nient'altro. Il suo potenziale di simulazione della realtà si limita al mondo degli scacchi, ed è assolutamente inutilizzabile in qualsiasi altro settore. Lo stesso discorso vale per la maggior parte dei grandi computer al mondo, che pur eccellendo nella simulazione della realtà di un singolo oggetto (per esempio, ricreare un modello di detonatore nucleare, delle correnti aeree attorno un jet o dell'evoluzione delle condizioni meteorologiche), risultano essere miseramente monodimensionali, e quindi del tutto incapaci di sopravvivere nel mondo reale.

Oggi i ricercatori in ambito IA non hanno alcuna idea su come replicare tali processi in un robot. La maggior parte di loro alza le braccia al cielo e azzarda a dire che una qualche rete di computer molto vasta finirà con il mostrare i "fenomeni emergenti", più o meno come talvolta l'ordine scaturisce spontaneamente dal caos. Quando però gli si chiede in che modo tali "fenomeni emergenti" potranno dare origine alla coscienza, molti non sanno che dire.

Non sappiamo come realizzare un robot dotato di coscienza, ma sulla base del metodo di misurazione della consapevolezza che abbiamo elaborato possiamo immaginare a che cosa somiglierebbe un robot più avanzato di noi. Probabilmente eccellerebbe nel terzo campo di competenze: sarebbe cioè capace di compiere simulazioni complesse del futuro più remoto, analizzandolo da diverse prospettive e con una maggiore ricchezza di dettagli e profondità. Tali simulazioni risulterebbero più accurate delle nostre, poiché un siffatto robot beneficerebbe di una migliore comprensione delle regole del buon senso e della natura, grazie alla quale riuscirebbe a identificare qualsiasi ipotetico pattern. Giungerebbe così ad anticipare problemi che noi potremmo ignorare o non avvertire affatto. Inoltre saprebbe definire i propri obiettivi: ovviamente, se tra i suoi obiettivi ci fosse quello di servire la razza umana, tutto filerebbe per il verso giusto. Se invece un brutto giorno dovesse proporsi obiettivi in cui gli umani rappresentano un ostacolo, le conseguenze potrebbero essere nefaste. Sorge quindi un interrogativo spontaneo: in uno scenario del genere, che ne sarebbe dell'umanità?

Quando i robot prenderanno il controllo

In un possibile scenario futuro, noi uomini meschini potremmo venire semplicemente scartati come cimeli dell'evoluzione. In fondo, è una delle sue leggi: specie più adatte alla sopravvivenza emergono e destituiscono quelle meno adatte. In un tale rimescolamento delle carte, probabilmente la razza umana andrebbe perduta o ridotta a pochi esemplari confinati nei giardini zoologici, dove i robot verrebbero di tanto in tanto a darci un'occhiata pietosa. Forse è proprio questo il nostro destino, la parte che avremo nella storia: dare vita ai nostri successori nella scala evolutiva, cioè ai robot che un giorno ci considereranno una nota a piè di pagina, un aspetto della loro evoluzione talmente primitivo da risultare imbarazzante. Il nostro unico compito potrebbe dunque essere quello di toglierci di mezzo.

Douglas Hofstadter mi ha confidato che l'ordine naturale delle cose potrebbe essere proprio questo, e che dovremo trattare tali robot superintelligenti come se fossero i nostri bambini, perché in un certo senso è questo che saranno. E se sapremo prenderci cura dei nostri "figli", ha aggiunto Hofstadter, saremo anche in grado di occuparci delle nuove generazioni di robot.

Hans Moravec ha immaginato come potremmo sentirci una volta che i robot ci avranno superati da ogni punto di vista: «[...] la vita potrebbe sembrarci senza senso, se ci ritrovassimo a trascorrerla fissando con aria idiota la nostra progenie superintelligente mentre prova a descriverci le sue ultime, spettacolari scoperte con un linguaggio infantile e facile da comprendere anche per noi!»²⁰.

Quando arriverà finalmente il giorno in cui i robot diventeranno migliori di noi, non solo smetteremo di essere i più intelligenti del pianeta, ma le nostre creazioni cominceranno a loro volta a riprodursi, generando nuove generazioni di robot sempre più intelligenti di quelle precedenti. E poiché almeno in teoria i robot produrranno generazioni di macchine con una potenza di calcolo sempre maggiore in un periodo di tempo sempre minore, alla fine tale processo avrebbe un andamento esponenziale, e la loro fame insaziabile di intelligenza comincerebbe a esaurire le risorse del pianeta.

Un possibile scenario potrebbe essere quello secondo cui l'appetito insaziabile nei confronti di un'intelligenza superiore porterà al saccheggio delle intere risorse del pianeta, tanto che anche questo diventerà un computer. Qualcuno ipotizza che a quel punto tali robot superintelligenti si lanceranno nelle più ardite ricerche spaziali, e nella loro brama d'intelligenza raggiungeranno altri pianeti, stelle e galassie e li trasformeranno in computer. Ma poiché pianeti, stelle e galassie sono incredibilmente lontani, forse queste macchine del futuro dovranno alterare le leggi della fisica, così da soddisfare la propria voracità e viaggiare a velocità superiori a quelle della luce, cosa che li porterà a consumare interi sistemi stellari e galassie. Qualcuno arriva persino a credere che potrebbero esaurire l'intero universo, rendendolo a sua volta intelligente.

Questo è il concetto di *singolarità*, termine che deriva dal mondo della fisica relativistica, ovvero il mio specifico campo di ricerca. Qui la singolarità rappresenta un punto di gravità infinita, per esempio un buco nero, da cui nulla, neppure la luce, può sfuggire. Un orizzonte oltre il quale non possiamo vedere.

L'idea di una singolarità nel campo dell'IA fu invece menzionata per la prima volta nel 1958, durante una conversazione tra i matematici Stanislaw Ulam, responsabile di scoperte

fondamentali per la progettazione della bomba all'idrogeno, e John von Neumann. Pare che Von Neumann abbia detto che «il progresso della tecnologia, che continua ad accelerare [...] fa pensare che ci stiamo avvicinando a una qualche singolarità essenziale nella storia della nostra razza, al di là della quale le cose umane, come le conosciamo oggi, non potranno continuare»²¹. Versioni alternative di questa idea circolano ormai da decenni, ma chi ha saputo maggiormente amplificarla e divulgarla attraverso i suoi racconti e i suoi saggi è il matematico e scrittore di fantascienza Vernor Vinge.

Ma questo lascia senza risposta un interrogativo cruciale: quando giungeremo a tale singolarità? Sarà nell'arco della nostra vita? Nel prossimo secolo? Oppure mai? Vale la pena ricordare che alla conferenza di Asilomar del 2009 si è ipotizzato che ciò potrà accadere in un periodo compreso tra i prossimi venti e mille anni.

Ray Kurzweil, inventore e scrittore di successo con una particolare propensione per le previsioni basate sulla crescita esponenziale della tecnologia, è diventato uno dei portavoce della singolarità.

Una volta Kurzweil mi ha detto che contemplando il cielo stellato di notte si è reso conto che qualcuno potrebbe essere in grado di vedere una qualche prova cosmica della singolarità manifestarsi in una lontana galassia. Vista la sua capacità di ingoiare o risistemare interi sistemi stellari, questa singolarità in rapida espansione avrà pure lasciato una traccia in qualche remota galassia. (I detrattori di Kurzweil dicono che sta suscitando una sorta di fervore religioso su questo argomento. I suoi sostenitori affermano invece che dispone di una sovranaturale capacità di prevedere il futuro, come ben testimonia il suo lavoro precedente.)

Kurzweil si è fatto le ossa durante la rivoluzione dei computer, avviando società in diversi campi relativi al riconoscimento delle forme, per esempio il riconoscimento vocale, il riconoscimento ottico dei caratteri e strumenti a tastiera elettronica. Nel 1999 ha scritto il bestseller *The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence*, in cui ha predetto quando i robot diverranno più intelligenti di noi. Nel 2005 ha poi dato alle stampe *La singolarità è vicina*, in cui elabora le previsioni precedenti. Il fatidico giorno in cui i robot dimostreranno di avere un'intelligenza superiore a quella umana giungerà con il superamento di varie fasi.

Kurzweil prevede infatti che nel 2019 un personal computer da un migliaio di dollari avrà una potenza grezza superiore a quella del cervello umano, e non ci vorrà molto prima che queste macchine ci facciano mangiare polvere: nel 2029 infatti un personal computer sarà mille volte più potente del nostro cervello, e nel 2045 sarà un miliardo di volte più intelligente della somma di tutti gli esseri umani messi insieme. In altre parole, persino piccoli computer avranno capacità superiori a quelle dell'intera razza umana.

Dopo il 2045 i computer saranno talmente avanzati da potersi riprodurre autonomamente, aumentando il loro potenziale intellettuale e giungendo quindi a una singolarità fuori controllo. Per soddisfare la loro insaziabile fame di potere cominceranno a divorare la Terra, gli asteroidi, i pianeti e le stelle, fino a influenzare la storia cosmologica dell'universo stesso.

Ho incontrato Kurzweil a Boston. Lungo i corridoi del suo ufficio si possono vedere i premi e i riconoscimenti che gli sono stati attribuiti, e persino alcuni strumenti musicali che ha progettato e che sono stati utilizzati da musicisti del calibro di Stevie Wonder. Kurzweil mi ha spiegato che nella sua vita c'è stato un punto di svolta, allorché all'improvviso, quando aveva soltanto trentacinque anni, gli fu diagnosticato un diabete di tipo 2. D'un tratto dovette affrontare una

dura realtà: non avrebbe potuto vivere abbastanza per riuscire a vedere concretizzate le sue previsioni. Il suo corpo, che aveva trascurato troppo a lungo, era invecchiato precocemente. Scosso da quella diagnosi, si dedicò alla sua salute personale con lo stesso entusiasmo ed energia con cui aveva affrontato le problematiche della rivoluzione dei computer. (Oggi Kurzweil prende più di cento pillole al giorno, e ha scritto libri sulla rivoluzione della longevità. È convinto che la rivoluzione dei robot microscopici riuscirà a “riparare” il corpo umano, in modo da renderlo pressoché immortale. È motivato dall’idea di vivere abbastanza da assistere ai progressi medici che sapranno prolungare la durata della vita a tempo indeterminato. In altre parole, Kurzweil si propone di vivere abbastanza da vivere per sempre!)

Di recente lo scienziato ha intrapreso un nuovo, ambizioso progetto: la Singularity University, con sede presso i laboratori Ames della NASA, nella Bay Area, in cui addestrare un contingente di scienziati affinché siano pronti all’ormai prossima singolarità.

Riguardo a queste tematiche c’è tutta una serie di variazioni e combinazioni ipotetiche. Lo stesso Kurzweil afferma: «Non ci sarà nessuna invasione di macchine intelligenti, non è questo che ci aspetta. Avverrà piuttosto una fusione con tale tecnologia. [...] Installeremo questi congegni intelligenti nel corpo e nel cervello, così da vivere più a lungo e più sani»²².

Qualsiasi idea tanto controversa come quella della singolarità comporta l’inevitabile rischio di un’ennesima reazione violenta e opposta. Mitch Kapor, fondatore della Lotus Development Corporation, sostiene che la singolarità sia «un progetto intelligente per umani con un QI pari a 140. [...] L’idea stessa che ci stiamo avviando verso un momento in cui tutto sarà inimmaginabilmente diverso è sostenuta, a mio parere, da una sorta di fede religiosa. E tutto questo agitarsi e sbracciarsi non riuscirà a convincermi del contrario»²³.

Douglas Hofstadter ha detto: «È un po’ come mettere in un frullatore cibo di ottima qualità ed escrementi di cane. Alla fine non sapremo distinguere tra ciò che è buono e ciò che è cattivo. È una densa miscela d’immondizia e buone idee, ed è assai difficile separare una cosa dall’altra, perché questa è opera di gente in gamba, non di sciocchi qualunque»²⁴.

Nessuno può dire con precisione come andrà a finire, ma a mio parere lo scenario più probabile è il seguente.

Un'IA amichevole

Tanto per cominciare, è del tutto presumibile che gli scienziati adotteranno semplici misure di sicurezza per assicurarsi che i robot non possano mai rendersi pericolosi. Come minimo installeranno un chip nel loro cervello, in modo da poterli spegnere al minimo insorgere di pensieri criminali. Ogni robot intelligente sarà dunque equipaggiato con un dispositivo ausiliario di sicurezza che potrà essere attivato in qualsiasi momento da qualsiasi umano dovesse cogliere segnali di comportamento insolito da parte della macchina. Alla minima instabilità mostrata dal robot, un comando vocale ne provocherà l'immediato spegnimento.

In alternativa, si potranno anche costruire robot specializzati nel dare la caccia e neutralizzare gli eventuali robot dal comportamento deviante. Tali "cacciatori di robot" saranno appositamente progettati per avere velocità, forza e coordinazione superiori alle altre macchine, cioè caratteristiche che gli permetteranno di svolgere facilmente il loro compito. Sapranno riconoscere i punti deboli di qualsiasi sistema robotizzato, nonché individuare la strategia più adatta a seconda delle circostanze. Anche gli esseri umani potranno sottoporsi allo stesso genere di addestramento. Nel film *Blade Runner* c'è una squadra di agenti speciali, tra cui il personaggio interpretato da Harrison Ford, che ha il preciso compito di intercettare e neutralizzare i replicanti sfuggiti al controllo umano.

Poiché ci vorranno decenni di duro lavoro prima che i robot riescano a salire la scala evolutiva, non dovremo affrontare una crisi improvvisa, né saremo colti alla sprovvista e rinchiusi in uno zoo come scimmie dall'oggi al domani. La coscienza, per come la vedo io, è un processo misurabile secondo una scala di valori, non un evento evolutivo istantaneo, e prima che i robot perfezionino il loro livello di coscienza dovrà passare ancora molto tempo. Dopotutto madre natura ha impiegato milioni di anni per sviluppare la coscienza umana! È quindi del tutto improbabile che gli esseri umani vengano colti di sorpresa da un ipotetico "risveglio" di internet o dall'improvvisa presa di coscienza di un esercito di robot.

Del resto era questa l'opzione preferita del celebre scrittore di fantascienza Isaac Asimov, il quale immaginò che ogni robot prodotto dalle catene di montaggio inglobasse tre leggi fondamentali che non gli avrebbero mai permesso di perdere il controllo. (Fondamentalmente, le tre leggi della robotica di Asimov stabiliscono che i robot non possono danneggiare gli umani, che devono obbedirgli e che devono tutelare se stessi, il tutto secondo questo preciso ordine.)

Esistono tuttavia problemi che emergono dalle possibili contraddizioni fra le tre leggi stesse. Per esempio, se anche creassimo un robot benevolo e dotato delle migliori intenzioni, che cosa accadrebbe se l'umanità facesse scelte autodistruttive, tali da mettere a rischio la propria esistenza? Il robot "amico" potrebbe sentire di dover assumere il controllo della situazione affinché l'umanità smetta di farsi del male. È proprio questo il problema con cui Will Smith deve fare i conti nella versione cinematografica di *Io, robot*, allorché il computer centrale decide che per salvare l'umanità «alcuni esseri umani devono essere sacrificati e alcune libertà soppresse». Onde evitare che i robot ci schiavizzino, sebbene nel tentativo di salvarci, alcuni suggeriscono che sarebbe opportuno introdurre una sorta di principio zero della robotica, secondo cui nessun robot può danneggiare o sottomettere la razza umana.

Ci sono peraltro scienziati sostenitori della cosiddetta *IA amichevole* secondo cui dovremmo progettare robot inoffensivi fin dal principio, affinché svolgano soltanto mansioni utili e di

supporto. L'espressione *IA amichevole* è stata coniata da Eliezer Yudkowsky, uno dei fondatori del Singularity Institute of Artificial Intelligence. L'intelligenza artificiale amichevole è leggermente diversa dalle leggi di Asimov, che vengono imposte ai robot, e forse malgrado la loro volontà. (Proprio perché imposte dall'esterno, tali leggi potrebbero spingere i robot a escogitare espedienti per contravvenirle.) Per contro, nell'intelligenza artificiale amichevole i robot sono potenzialmente liberi di uccidere e di scatenare il caos. Non ci sono regole che impongano il rispetto di un'etica artificiale. Piuttosto, questi robot sono progettati fin dall'inizio per aspirare al benessere degli umani e aiutarli, anziché distruggerli. In pratica, *scelgono* di essere benevoli.

Questo ha dato origine a un nuovo settore chiamato *robotica sociale*, volto per l'appunto ad attribuire ai robot le qualità necessarie per integrarsi nella società umana. Per esempio, gli scienziati della Hanson Robotics hanno sancito che una delle missioni della loro ricerca è progettare robot capaci di «evolvere in esseri sociali intelligenti, perfettamente in grado di amare e di conquistarsi un posto in una famiglia umana allargata»²⁵.

Ma uno dei problemi relativi a questo modo di pensare è che tra i maggiori finanziatori dei sistemi di IA ci sono gli organismi militari, e i robot militari sono appositamente progettati per cacciare, inseguire e uccidere gli esseri umani. Possiamo dunque immaginare un futuro in cui la missione dei soldati robot sarà identificare i nemici umani ed eliminarli con la massima precisione. Ma per evitare che questo genere di robot non si rivolti contro i suoi stessi padroni occorre prendere precauzioni straordinarie. Per esempio, il già citato Predator è continuamente sotto il controllo di esseri umani che ne dirigono gli spostamenti, ma un giorno questo tipo di droni potrebbe acquisire autonomia e scegliere da sé gli obiettivi da colpire. E se in tale processo decisionale qualcosa dovesse andare storto, le conseguenze potrebbero essere catastrofiche.

Ad ogni modo, in futuro avremo sempre più finanziamenti volti alla realizzazione di robot per scopi civili e commerciali, soprattutto in Giappone, dove vengono progettati per contribuire al benessere dell'umanità, anziché distruggerla. Se tale tendenza dovesse continuare, l'intelligenza artificiale amichevole potrebbe diventare realtà. In uno scenario del genere il fronte dei consumatori e le forze del mercato assumerebbero il controllo della robotica, cosicché investire nel settore dell'intelligenza artificiale amichevole risulterebbe particolarmente vantaggioso.

Diventare un tutt'uno con i robot

Oltre all'intelligenza artificiale amichevole c'è anche un'altra opzione: fondersi con le nostre creazioni. Invece di aspettare che i robot ci superino in intelligenza e potenza, potremmo cercare di aumentare il nostro potenziale trasformandoci in esseri sovrumani. Credo che in futuro assisteremo a una combinazione di questi due obiettivi: progettare un'IA amichevole e "potenziare" noi stessi.

Questa possibilità è stata esplorata da Rodney Brooks, ex direttore del rinomato MIT Artificial Intelligence Laboratory. Brooks è sempre stato un cane sciolto, dedito soprattutto a ribaltare idee ormai consolidate e iniettare vitalità nel settore con le sue continue innovazioni. Quando ha cominciato a lavorare con l'IA, nella maggior parte delle università si procedeva secondo il metodo top-down. Allora la situazione era stagnante, e Brooks ha fatto sollevare diverse sopracciglia quando ha creato un esercito di insetti robotizzati che apprendevano secondo il metodo bottom-up andando a sbattere contro gli ostacoli. Brooks non voleva creare un altro robot ottuso e sgraziato che avrebbe impiegato ore solo per attraversare una stanza. Ha invece realizzato agili "insettoidi", o "insetrobot", che quasi non disponevano di alcuna programmazione, ma che attraverso il metodo per tentativi ed errori imparavano rapidamente a spostarsi evitando gli ostacoli. Brooks già vedeva il giorno in cui i suoi robot avrebbero esplorato il sistema solare inciampando di tanto in tanto i nuovi corpi celesti. Era un'idea assolutamente inconsueta, per non dire bizzarra, che Brooks ha proposto nel suo saggio *Fast, Cheap and Out of Control*, e che infine ha aperto nuove strade per la ricerca. Uno dei sottoprodotti di tale concetto è proprio il Mars Rovers, che attualmente sta esplorando la superficie del pianeta rosso. Non c'è quindi da sorprendersi che Brooks sia stato anche presidente della iRobot, l'azienda che produce aspirapolvere a forma di insetto, ormai presenti in molte case americane.

Secondo Brooks, uno dei problemi è che nel campo dell'intelligenza artificiale si seguono le mode e ci si adegua ai paradigmi del momento, anziché escogitare qualcosa di nuovo: «Quand'ero un ragazzino avevo un libro che descriveva il cervello come una sorta di rete telefonica. Altri volumi precedenti lo avevano descritto come un sistema aerodinamico, o addirittura come un motore a vapore. Poi, negli anni Sessanta, si è cominciato a parlare di computer, e negli anni Ottanta il cervello è diventato un computer digitale che compie infinite operazioni parallele. Probabilmente è già stato dato alle stampe un volume scientifico per ragazzi in cui si dice che il cervello è come il World Wide Web»²⁶.

Per citare un altro esempio, alcuni storici hanno sottolineato come l'analisi della mente compiuta da Sigmund Freud fosse stata influenzata dall'avvento del motore a vapore. La diffusione delle ferrovie in tutta Europa nella seconda metà dell'Ottocento ebbe un profondo effetto sulla mente degli intellettuali. Freud immaginò che nella nostra mente ci fossero flussi di energia in costante competizione con altri flussi, un po' come nei cilindri a vapore dei motori. L'interazione continua tra Super Io, Es e Io assomigliava alla continua interazione dei cilindri di una locomotiva. E il fatto stesso che reprimere tali flussi energetici fosse all'origine delle nevrosi richiamava il fatto che l'energia del vapore, se non liberata, può causare un'esplosione.

Marvin Minsky mi ha confessato che un altro paradigma ha fuorviato i ricercatori del settore per anni. Poiché molti tra quelli che operano in ambito IA sono ex fisici, esiste una cosa

chiamata *attaccamento alla fisica*, e cioè il desiderio di trovare un unico tema dominante su cui far poggiare qualsiasi teoria relativa all'intelligenza. In fisica si aspira al modello Einstein, e cioè a ridurre l'universo fisico a una manciata di equazioni unificatrici, per poi giungere a una sola, minuscola equazione che possa riassumere tutte le leggi dell'universo. Minsky ritiene che tale "attaccamento" abbia indotto gli scienziati a cercare un solo tema unificante su cui basare tutta la teoria della coscienza, cosa che secondo lui non esiste. L'evoluzione ha rabberciato a casaccio una serie di tecniche che chiamiamo *coscienza*. Se smontassimo il cervello, ci ritroveremmo con una serie disgiunta di minicervelli, ciascuno designato a compiere qualcosa di specifico. Minsky la definisce *società delle menti*: tale coscienza sarebbe in realtà la somma di molti algoritmi e tecniche differenti in cui la natura è "inciampata" nel corso di milioni di anni.

Anche Rodney Brooks era alla ricerca di un paradigma del genere, uno che però non fosse mai stato pienamente esplorato. Presto si è reso conto che madre natura e l'evoluzione avevano già risolto molti di questi problemi. Per esempio una zanzara, che dispone soltanto di qualche centinaio di neuroni, può fare molto meglio dei più grandi sistemi militari robotizzati. A differenza dei droni volanti, le zanzare, che hanno un cervello più piccolo della punta di uno spillo, riescono ad aggirare gli ostacoli in modo del tutto indipendente, e inoltre sanno procurarsi cibo e partner sessuali. Perché dunque non imparare dalla natura e dalla biologia? Insetti e topi non hanno un cervello programmato con regole logiche, basta seguire la scala evolutiva per capirlo. Infatti queste creature hanno affrontato il mondo e padroneggiato l'arte della sopravvivenza procedendo per tentativi ed errori.

Ora Brooks sta portando avanti un'altra idea eretica. Ne parla nel suo breve contributo a un'antologia curata da Peter J. Denning intitolato *Flesh and Machines*, nel quale sottolinea come i vecchi laboratori del MIT, in cui si progettavano i componenti di silicio per robot industriali e militari, vengano attualmente ripuliti per fare posto a una nuova generazione di robot che, oltre ad essere fatta di silicio e acciaio, si compone anche di tessuti viventi. Brooks prevede che una generazione completamente nuova di robot si baserà sulla fusione di sistemi biologici ed elettronici, così da creare macchine caratterizzate da un'architettura del tutto inedita: «Secondo le mie previsioni, entro il 2100 disporremo di robot estremamente intelligenti che interverranno in ogni aspetto del quotidiano. Ma non saranno qualcosa di separato da noi, anzi saremo parzialmente robotizzati anche noi e collegati con tali macchine»²⁷.

A suo parere questo avverrà in diverse fasi. Oggi assistiamo alla continua evoluzione nel campo delle protesi, con l'inserimento di componenti elettronici nel corpo umano al fine di creare simulazioni realistiche degli organi dell'udito, della vista e di altre funzioni. Per esempio, la coclea artificiale ha rivoluzionato il campo dell'audiologia, restituendo l'udito a chi l'aveva perso. La coclea artificiale funziona collegando l'hardware elettronico con il *wetware*²⁸ biologico, vale a dire con i neuroni. L'impianto cocleare è basato su diverse componenti. Un microfono all'esterno dell'orecchio riceve le onde sonore, le elabora e le trasmette sotto forma di segnali radio all'impianto installato chirurgicamente all'interno dell'orecchio. Tale impianto registra i segnali radio e li converte in correnti elettriche, poi inviate ad elettrodi installati nell'orecchio. La coclea riconosce gli impulsi elettrici e trasmette le relative informazioni al cervello. Questi impianti possono usare fino a ventiquattro elettrodi ed elaborare una mezza dozzina di frequenze, quanto basta per riconoscere la voce umana. In tutto il mondo sono già state impiantate centocinquantamila coclee artificiali.

Altri team di scienziati si stanno invece dedicando alla ricerca sulla cecità, e precisamente

alla creazione di sistemi per la vista artificiale, collegando una videocamera al cervello. Uno dei metodi consiste nell'inserire direttamente il chip di silicio nella retina del paziente e collegarlo ai neuroni della retina. Un altro sistema prevede la connessione del chip a un cavo speciale, a sua volta collegato alla parte posteriore del cranio, nella zona in cui il cervello elabora le immagini. Grazie agli sforzi di questi ricercatori, per la prima volta nella storia alcuni non vedenti sono riusciti a recuperare un minimo di vista, e alcuni hanno visto "accendersi" nel loro cervello una cinquantina di pixel. Gli scienziati dovrebbero riuscire a migliorare questa tecnologia, così da permettere ai pazienti di "vedere" migliaia di pixel.

Attualmente questi pazienti possono vedere i fuochi d'artificio, il profilo delle proprie mani, le luci e gli oggetti luminosi, e possono percepire la presenza delle auto, delle persone e i contorni degli oggetti. Linda Morfoot, uno dei soggetti dell'esperimento, ha testimoniato: «Alle partite di baseball riesco a vedere dove si trovano il ricevitore, il battitore e l'arbitro»²⁹.

Fino a oggi sono una trentina i pazienti che hanno ricevuto una retina artificiale, con una dotazione massima di sessanta elettrodi.

Tuttavia l'Artificial Retina Project del Ministero dell'energia statunitense sta già progettando un nuovo sistema con più di duecento elettrodi. Recenti studi si sono anche concentrati su un congegno con un migliaio di elettrodi, ma troppi sullo stesso chip possono provocare il surriscaldamento della retina. Il sistema è così progettato: una minuscola videocamera montata sugli occhiali di un non vedente riprende le immagini e le invia attraverso una connessione senza fili a un microprocessore che, installato su una fascia, ritrasmette le informazioni al chip situato direttamente sulla retina. A sua volta il chip trasmette deboli segnali ai nervi retinali ancora attivi, bypassando le cellule retinali difettose.

La mano robotizzata di *Guerre stellari*

Grazie ai miglioramenti in campo meccanico possiamo replicare alcune prodezze che fino a poco tempo fa appartenevano soltanto ai film di fantascienza, per esempio la mano robotizzata di *Guerre stellari* o la vista a raggi X di Superman. Nel secondo episodio della saga, *L'impero colpisce ancora*, Luke Skywalker perde una mano, che gli viene troncata dalla spada laser del malvagio Dart Fener. Nessun problema, però: gli scienziati di quella remota galassia creano in quattro e quattr'otto una nuova mano meccanica, con tanto di dita capaci di toccare e sperimentare sensazioni.

Per quanto possa sembrare solo fantascienza, disponiamo già di qualcosa del genere. In Italia e in Svezia gli scienziati hanno compiuto progressi significativi che hanno portato alla realizzazione di una mano robotizzata dotata del senso del tatto. A soli ventidue anni un paziente di nome Robin Ekenstam ha subito l'amputazione della mano destra per rimuovere un tumore maligno, e grazie a una protesi oggi può controllare il movimento delle dita meccaniche e percepirne la risposta. I medici hanno infatti collegato i nervi del braccio di Ekenstam ai chip contenuti nella mano meccanica, e il ragazzo può controllare i movimenti delle dita con il cervello, come se fosse una mano vera. Tale "mano intelligente" ha quattro motori e ben quaranta sensori. Il movimento delle dita meccaniche viene ritrasmesso al cervello così da ottenere un feedback. Quindi il giovane non solo può controllare il movimento della mano, ma anche "sentirlo". E poiché il feedback costituisce una delle caratteristiche fondamentali dei movimenti corporei, questo potrebbe rivoluzionare il modo in cui curiamo gli amputati, dotandoli di arti molto migliori delle comuni protesi.

Ekenstam ha commentato: «È magnifico! Ho riprovato sensazioni che non vivevo da moltissimo tempo: se afferro qualcosa con forza riesco a sentirla tra le dita, ed è piuttosto strano, visto che non le ho più...»³⁰.

Christian Cipriani, ricercatore della Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa, ha spiegato: «Anzitutto il cervello controlla la mano meccanica senza alcuna contrazione muscolare. Inoltre la protesi restituisce un feedback al paziente, in modo che percepisca le sensazioni, proprio come accade con una mano vera». Si tratta di uno sviluppo significativo. Questo vuol dire che un giorno gli umani potranno controllare arti meccanici senza sforzo, come se si trattasse di carne e ossa. Invece di dover penosamente imparare a muovere braccia e gambe di metallo, i pazienti si serviranno delle loro appendici meccaniche come se fossero reali, percependo ogni minimo movimento dell'arto attraverso i meccanismi elettronici di feedback.

Questo confermerebbe anche la teoria secondo cui il cervello è estremamente plastico, non rigido, cioè capace di stabilire continuamente nuovi collegamenti mentre impara cose nuove e si adegua alle diverse situazioni. Ne consegue che il cervello potrebbe essere in grado di accogliere qualunque nuova appendice o organo sensoriale. Questi saranno collegati a diversi punti al cervello, che non dovrà fare altro che "imparare" a servirsene. Il cervello potrebbe dunque essere considerato una sorta di congegno modulare, in grado di collegarsi a varie appendici e sensori di altri congegni e controllarli. È il genere di comportamento che dovremmo aspettarci, se davvero il nostro cervello è una rete neurale che stabilisce nuove connessioni e percorsi neurali ogniqualvolta impara a fare qualcosa di nuovo, di qualunque cosa si tratti.

Scrivono Rodney Brooks: «Nei prossimi dieci o vent'anni ci sarà una svolta culturale per cui

adotteremo la tecnologia robotica, il silicio e l'acciaio nei nostri corpi per migliorare quello che possiamo fare e comprendere nel mondo». Analizzando i progressi fatti alla Brown e alla Duke University riguardo ai collegamenti diretti tra cervello e computer o arti meccanici, Brooks conclude: «Oppure potremo tutti essere in grado di avere una connessione internet senza cavi installata direttamente nel cervello»³¹.

In una fase successiva Brooks prevede la fusione di silicio e cellule viventi non solo per curare i nostri malanni, ma per migliorare lentamente le nostre capacità. Per esempio, se oggi gli impianti cocleari e retinali possono restituire udito e vista, un domani ci regaleranno capacità sovrumane, come udire suoni che in natura possono essere percepiti solo dai cani o vedere le radiazioni ultraviolette, quelle infrarosse e i raggi X.

Forse riusciremo persino ad aumentare la nostra intelligenza. Brooks cita una ricerca in cui, in una fase critica dello sviluppo di un ratto, è stato aggiunto al suo cervello uno strato ulteriore di neuroni. Straordinariamente, le capacità cognitive dei soggetti dell'esperimento hanno dato segni d'incremento. Brooks immagina un giorno del prossimo futuro in cui anche la potenza cerebrale umana potrà essere aumentata con un processo analogo. In uno dei capitoli successivi vedremo come i biologi abbiano già isolato un gene dei ratti che i media hanno poi soprannominato *supertopi intelligenti*. Aggiungendo questo gene, topi "migliorati" hanno mostrato maggiore memoria e capacità d'apprendimento.

Sempre secondo Brooks, verso la metà del secolo simili fantascientifici miglioramenti del nostro corpo potrebbero essere possibili, e ci doteranno di abilità di gran lunga superiori a quelle degli uomini attuali. «Tra cinquant'anni ci aspettiamo di assistere a cambiamenti radicali dei corpi umani attraverso modificazioni genetiche» commenta Brooks, il quale aggiunge che inserendo anche delle appendici elettroniche «il serraglio umano si estenderà in modi che oggi sono per noi inimmaginabili». E conclude: «Non saremo più relegati dall'evoluzione darwiniana»³².

Ma come tutte le cose, anche questa potrebbe portarci a superare certi limiti. Fino a che punto dovremo quindi spingerci nella fusione tra corpo umano e robot, prima di scatenare la ribellione di chi potrebbe trovarla rivoltante?

Surrogati e avatar

Una delle modalità secondo cui potremmo fonderci con i robot senza alterare il nostro corpo consiste nella creazione di surrogati o avatar. Per esempio, nel film *Il mondo dei replicanti* veniamo proiettati nel 2017, in un'epoca in cui le persone possono controllare i robot come se fossero al loro interno, vivendo quindi in un corpo assolutamente perfetto. Nel film ogni robot reagisce ai comandi dell'uomo, e la persona che lo "possiede" percepisce le sensazioni attraverso il robot. Mentre il corpo umano e mortale decade e avvizzisce, i personaggi del film possono controllare i movimenti dei loro surrogati, che hanno forme perfette e poteri sovrumani. Ma la faccenda si complica quando le persone preferiscono vivere la propria vita "nelle vesti" di robot belli, eternamente giovani e superpotenti, rinunciando al proprio corpo in decadenza e tenendolo opportunamente nascosto. In sostanza l'intera razza umana, pur di non dover affrontare la realtà dell'invecchiamento, diventa un surrogato robotizzato di se stessa.

Nel film *Avatar* lo stesso concetto è portato un gradino oltre. Siamo nel 2154 e gli esseri umani, anziché trascorrere la propria esistenza sotto forma di robot perfetti, hanno sviluppato la straordinaria capacità di vivere nel corpo di esseri alieni. Il corpo umano che controlla il suo avatar si trova in una capasula, dalla quale riesce a impersonare un essere alieno appositamente clonato. Secondo il film, avremo corpi totalmente nuovi per vivere su un nuovo mondo, nonché uno strumento per comunicare meglio con la popolazione nativa degli altri pianeti. La trama del film s'infittisce allorché un "manovratore di avatar" decide di rinunciare alla sua umanità e di vivere come alieno, così da proteggere i nativi dai terrestri mercenari e spietati.

Sebbene oggi surrogati e avatar non rientrino nel campo delle nostre possibilità, un giorno potrebbero diventare realtà.

Recentemente il robot ASIMO è stato programmato con una nuova idea: la percezione a distanza. Nei laboratori dell'Università di Kyoto alcuni soggetti sono stati addestrati a controllare i movimenti meccanici dei robot attraverso sensori cerebrali. Per esempio, indossando un casco EEG alcuni studenti sono riusciti a muovere le braccia e le gambe di ASIMO con la sola forza del pensiero. Finora sono riusciti a fargli compiere solo quattro diversi movimenti delle braccia e del capo, ma tale esperimento potrebbe aprire la strada a un'altra dimensione dell'IA, quella dei robot controllati con la mente.

Sebbene questo primo tentativo di controllo della materia attraverso la mente sia piuttosto rudimentale, probabilmente nei decenni a venire riusciremo ad aumentare la gamma di movimenti del robot, nonché a ottenere persino un feedback, così da ricevere le sensazioni attraverso i nostri nuovi arti robotizzati. Speciali occhialini o lenti a contatto ci consentiranno inoltre di vedere ciò che rientra nel campo visivo del robot, in modo da avere il pieno controllo dei suoi movimenti.

Un simile traguardo potrebbe anche alleviare il problema della scarsa immigrazione che affligge il Giappone. I lavoratori potrebbero vivere in altri paesi e tuttavia controllare robot distanti migliaia di chilometri semplicemente "indossando" dei sensori cerebrali. Internet non trasmetterebbe soltanto i pensieri di funzionari e impiegati, ma anche quelli di semplici operai, traducendoli in movimento fisico. Se robot di questo genere diventassero realtà in un qualsiasi paese del mondo, con ogni probabilità ridurrebbero i costi esorbitanti della sanità pubblica e

supplirebbero alla mancanza di manodopera.

Il controllo dei robot tramite percezione a distanza avrebbe anche altre applicazioni. Negli ambienti pericolosi (per esempio nelle profondità marine, in prossimità delle linee di alta tensione o in caso d'incendio) i robot controllati dalla mente potrebbero compiere operazioni di salvataggio senza mettere a repentaglio la vita di nessuno. Poiché questo genere di surrogati sarebbe dotato di superpoteri, rappresenterebbe anche lo strumento ideale per dare la caccia ai criminali (sempre che questi non si siano a loro volta muniti di surrogati superpotenti!). Avremmo così tutti vantaggi di una fusione con i robot senza dover effettuare alcuna alterazione del nostro corpo.

Non dimentichiamo, infine, quanto tutto ciò si dimostrerebbe utile nelle esplorazioni spaziali o nella gestione di una base lunare permanente. Ai nostri surrogati affideremmo tutti quei compiti più pericolosi relativi alla manutenzione, mentre gli astronauti in carne e ossa se ne starebbero al sicuro sulla Terra. (Lo stesso sistema non sarebbe però applicabile se gli astronauti sulla Terra dovessero controllare i loro surrogati su Marte, poiché i segnali radio Terra-Marte impiegano circa 40 minuti. Invece tutto funzionerebbe se gli astronauti fossero al sicuro in una base permanente sul pianeta rosso, con i loro surrogati all'opera sull'insidiosa superficie marziana.)

Fino a che punto fondersi con i robot?

Hans Moravec, uno dei pionieri della robotica, si è spinto oltre immaginando la situazione in cui ci trasformeremmo negli stessi robot che abbiamo costruito. Moravec mi ha spiegato in che modo sarebbe possibile fare questo, e cioè sottoponendoci a un'operazione al cervello che trasferisca ogni neurone in forma di transistor nella "testa" del robot. All'inizio dell'operazione saremmo distesi sul tavolo operatorio a fianco di un robot privo di cervello. Un chirurgo robot si occuperebbe di prelevare ogni singolo grappolo di materia grigia dal nostro cervello, di replicarla in forma di transistor e poi di connettere i neuroni a tali transistor installati nel robot. Appena duplicato nel robot, il fascio neurale verrebbe scartato. Nel corso della delicatissima operazione saremmo pienamente coscienti, con una parte del nostro cervello ancora all'interno del nostro vecchio cranio, e l'altra già in funzione nel nostro nuovo corpo di robot, ma trasformata in transistor. Una volta concluso l'intervento, il nostro cervello sarebbe completamente "trasferito" nel robot. A quel punto non solo disporremo di un corpo robotizzato, ma di tutti i relativi benefici: l'immortalità in un corpo sovrumano dall'aspetto impeccabile. Questo non avverrà nel XXI secolo, ma potrebbe diventare una possibilità nel XXII.

In uno scenario ancora più estremo, il nostro corpo rozzo e vulnerabile verrà definitivamente "rottamato" e ci trasformeremo in puro software. La nostra personalità sarà interamente codificata e "scaricabile" su un computer. A quel punto basterà premere un pulsante con il nostro nome scritto sopra perché il computer cominci a comportarsi come se fossimo nella sua memoria, poiché nei suoi circuiti "scorreranno" tutti i ghiribizzi della nostra personalità. Saremo dunque immortali, ma passeremo la nostra esistenza intrappolati in un computer, interagendo con gli "altri" (software) in una sorta di sterminata realtà virtuale-cibernetica.

La nostra esistenza corporea verrà scartata e sostituita dal moto degli elettroni di un enorme computer. Secondo questa ipotesi, saremo destinati a fluttuare come righe di puro codice in un programma informatico, provando tutte le sensazioni di un corpo fisico ma completamente immersi in un paradiso virtuale. Condivideremo i più profondi pensieri di cui saremo capaci con altre righe di codice, partecipando così a una stupefacente illusione collettiva. Ci renderemo protagonisti di imprese straordinarie, tra cui la conquista di nuovi mondi, dimentichi di non essere nient'altro che semplici software, elettroni che danzano nei chip, almeno finché qualcuno deciderà di premere il pulsante di stop!

Uno dei problemi di questi scenari estremi è il principio dell'uomo delle caverne. Come già sottolineato, l'architettura del nostro cervello è quella di un raccogliatore-cacciatore primitivo, emerso dall'Africa oltre centomila anni fa. I nostri più profondi desideri, le nostre aspirazioni e necessità si sono forgiati in quelle terre e in quell'epoca, quando eravamo costretti a sfuggire ai predatori, a cacciare la selvaggina, ad andare in cerca di cibo nelle foreste, a cercare un partner sessuale e a passare il tempo insieme con gli altri membri del gruppo attorno un focolare.

Uno dei nostri obiettivi primari, profondamente scolpito nella struttura del nostro pensiero, è avere un bell'aspetto, soprattutto nei confronti del sesso opposto e dei nostri coetanei. Dopo l'intrattenimento, una percentuale enorme delle nostre entrate viene spesa proprio per l'aspetto fisico. Ecco spiegata la crescita esplosiva della chirurgia plastica, del ricorso al Botox, ad ogni genere di prodotto per il corpo e a un abbigliamento sofisticato, per non parlare poi di quanto spendiamo per imparare qualche nuovo passo di danza, scolpire i muscoli, comprare l'ultimo

CD di successo e tenerci in forma. Sommiamo tutto questo e avremo una spesa enorme, che a sua volta si traduce in un'ampia fetta dell'economia dei paesi industrializzati.

Ne consegue che se anche potessimo creare corpi perfetti e pressoché immortali, con ogni probabilità desisteremmo dal munirci di corpi robotizzati, magari goffi e con orrendi innesti che penzolano dalla testa. Nessuno vorrebbe avere l'aspetto di un profugo di un cataclisma fantascientifico, no? Accetteremo di avere corpi "migliorati" solo se ci renderanno attraenti per il sesso opposto, o se faranno aumentare la nostra reputazione tra i nostri pari. Nessun adolescente vorrebbe essere "migliorato" senza poi apparire *cool*.

Alcuni scrittori di fantascienza si sono lasciati affascinare dall'idea che finiremo tutti con il distaccarci dal corpo per vivere come esseri immortali, fatti di pura intelligenza e profondi pensieri, ma sotto forma di righe di codice all'interno di un computer. Ma c'è davvero qualcuno che vorrebbe vivere così? Probabilmente i nostri discendenti non vorranno affatto dedicarsi a complesse equazioni che descrivono un buco nero! È più verosimile che in futuro la gente preferisca passare più tempo ad ascoltare musica, anziché mettersi a calcolare il moto delle particelle subatomiche in un'esistenza confinata all'interno di un chip di silicio.

Gregory Stock dell'UCLA si dimostra ancora più perplesso del sottoscritto, e ritiene che avere il cervello collegato a un supercomputer comporti ben pochi vantaggi: «Quando penso a che cosa potrebbe servirmi una connessione tra i miei neuroni e un supercomputer, mi ritrovo a fare i conti con due dubbi: siamo sicuri che non potrei facilmente ottenere vantaggi analoghi con metodi alternativi e meno invasivi? E poi, tali ipotetici benefici varrebbero il disagio di un intervento al cervello?»³³.

Per quanto il futuro possa riservarci un'ampia serie di opzioni, continuo a pensare che il percorso più verosimile sia quello dei robot buoni e amichevoli, tali che l'umanità possa trarne beneficio e migliorare le proprie capacità, ma restando fedele al principio dell'uomo delle caverne. Potremo anche accettare di vivere temporaneamente l'esistenza di un super robot servendoci di surrogati o simili, ma sicuramente rifiuteremo di vivere per sempre in un computer o trasformare il nostro corpo fino a renderlo irriconoscibile.

Ostacoli alla singolarità

Nessuno può dire con certezza quando i robot diventeranno intelligenti come gli umani, ma per diversi motivi direi che potrebbe accadere verso la fine di questo secolo.

Primo: gli stupefacenti progressi del mondo dei computer sono imputabili alla legge di Moore. Come abbiamo detto, la crescita rallenterà progressivamente e potrebbe persino giungere a un'impasse tra il 2020 e il 2025, quindi non è chiaro se le nostre stime sull'incremento di potenza di calcolo sono attendibili. (Per approfondimenti sull'epoca del dopo silicio rimando al Capitolo 4.) In questo libro ho voluto ipotizzare che la potenza continuerà a crescere, ma non a questo ritmo.

Secondo: se anche un computer dovesse arrivare a una potenza di calcolo straordinaria come 10^{16} calcoli al secondo, ciò non implicherebbe necessariamente che sia più intelligente di noi. Per esempio, il campione di scacchi dell'IBM, il già citato Deep Blue, sa analizzare duecento milioni di posizioni al secondo e battere i migliori scacchisti del mondo, ma nonostante tutta questa velocità non sa fare nient'altro. Come abbiamo visto, la vera intelligenza comporta ben più che prevedere le possibili mosse dell'avversario.

Un altro esempio sono gli *idiot savant*, o “idioti sapienti”, che sono dei fenomeni nei calcoli complessi o hanno una memoria enciclopedica, ma che non riescono a legarsi le scarpe, a trovarsi un lavoro o ad adattarsi alla vita sociale. Lo scomparso Kim Peek, soggetto talmente singolare da avere ispirato il film *Rain Man*, aveva memorizzato ogni parola di dodicimila volumi ed eseguiva calcoli i cui risultati potevano essere verificati solo al computer, però il suo QI era soltanto di 73, faticava a sostenere una conversazione e aveva bisogno della costante assistenza del padre, senza il quale non era in grado di fare granché. In altre parole, i computer superveloci del futuro potrebbero essere degli “idioti sapienti”, cioè in grado di memorizzare tutto il sapere del mondo ma non di fare qualsiasi altra cosa, e quindi incapaci di sopravvivere da soli nel mondo reale.

Se anche i computer dovessero cominciare ad avvicinarsi alla potenza di calcolo del cervello, mancherebbero pur sempre del software e della programmazione necessari per far funzionare tutto. Ragione per cui giungere a macchine potenti quanto il nostro cervello non è che il primissimo, semplice passo.

Terzo: anche se costruire robot intelligenti fosse alla nostra portata, non potremmo sapere se saranno in grado di produrre copie di se stessi ancora più intelligenti dell'originale. La matematica alla base dei robot autoreplicanti è stata inizialmente sviluppata da John von Neumann, che ha inventato la teoria dei giochi e ha contribuito allo sviluppo dei computer elettronici. Von Neumann è stato un pioniere nel porsi il problema di determinare il minimo numero di presupposti necessari affinché una macchina possa produrre una copia di se stessa. Peraltro non ha mai posto la questione nei termini di robot che sappiano riprodursi in versioni sempre più intelligenti. La definizione stessa di *intelligenza* è infatti problematica, poiché non ne esiste una universalmente accettata.

Certo, un robot potrebbe produrre una copia di se stesso con più memoria e potenza di calcolo semplicemente attraverso un upgrade o aggiungendo qualche chip. Ma così avremmo robot più intelligenti o semplicemente più veloci? Per esempio, una calcolatrice è milioni di volte più veloce di un essere umano, e lo supera nettamente in quanto a memoria e capacità di

calcolo, ma di certo non è più intelligente. Non possiamo dunque dire che l'intelligenza sia soltanto la somma di memoria e velocità.

Quarto: sebbene si possa ipotizzare che l'hardware continui a progredire esponenzialmente, così non è per il software. L'hardware si è infatti perfezionato grazie alla possibilità di incidere transistor sempre più piccoli su un wafer di silicio, ma per il software le cose sono totalmente diverse, poiché occorre che un essere umano si metta al lavoro e butti giù righe di codice che lo facciano funzionare. Ed è proprio questo il collo di bottiglia: l'essere umano!

Il software, come qualsiasi altra creazione umana, progredisce a singhiozzo, alternando brillanti intuizioni a lunghi periodi di infruttuosa stagnazione. A differenza dell'incisione di molti transistor sulla stessa superficie di silicio (attività che abbiamo svolto con passo spedito e regolare), il software dipende dalla natura imprevedibile della creatività e della fantasia umane. Tutte le previsioni circa una crescita continua ed esponenziale della potenza dei computer devono quindi essere prese con le pinze. Una catena non è infatti più forte dei suoi anelli più deboli, e in questo caso l'anello debole è il software, realizzato dagli esseri umani.

Spesso in campo ingegneristico assistiamo a progressi esponenziali, in particolare quando si tratta semplicemente di ottenere un'efficienza maggiore, per esempio l'appena citata capacità di incidere un maggior numero di transistor su un wafer di silicio. Ma nel campo della ricerca di base, in cui sono necessari fortuna, talento e imprevedibili colpi di genio, il progresso viene meglio descritto dal cosiddetto *equilibrio punteggiato*, con lunghe fasi in cui accade poco o nulla e improvvisi balzi in avanti che rivoluzionano l'intero settore. Se analizziamo la storia della ricerca di base da Newton a Einstein e fino ai giorni nostri, possiamo constatare che la sua evoluzione è descritta molto accuratamente dal modello dell'*equilibrio punteggiato*.

Quinto: come abbiamo visto a proposito della ricerca sul *reverse-engineering* del cervello, i costi sbalorditivi e l'impressionante portata dell'impresa ci costringeranno quasi sicuramente a posticiparla alla metà di questo secolo. E per decifrare tutti i dati ottenuti ci vorranno forse molti altri decenni, il che posticipa la conclusione della ricerca sul *reverse-engineering* del cervello alla fine del secolo.

Sesto e ultimo: probabilmente non assisteremo mai a un big bang della coscienza delle macchine. Ne abbiamo già parlato: se includiamo nella coscienza la capacità di fare progetti per il futuro attraverso simulazioni dello stesso, allora abbiamo una serie di livelli di coscienza. Le macchine risaliranno lentamente la scala evolutiva, concedendoci tutto il tempo necessario per prepararci all'evento, che ritengo accadrà soltanto verso la fine del secolo. Avremo quindi un bel po' di anni per discutere tutte le opzioni possibili e immaginabili. Inoltre la coscienza delle macchine avrà probabilmente caratteristiche proprie, quindi la prima a svilupparsi sarà una forma di "coscienza al silicio", anziché puramente umana.

Questo solleva l'ennesimo interrogativo: sebbene il nostro corpo possa essere "migliorato" attraverso interventi meccanici, esistono anche percorsi biologici. A ben guardare, la spinta evolutiva è garantita dalla selezione dei geni migliori, quindi perché non prendere una scorciatoia e invece di aspettare milioni di anni di evoluzione naturale non prendiamo subito le redini del nostro destino genetico?

Capitolo 3

Il futuro della medicina

Oltre i confini della perfezione

Nessuno ha il fegato di ammetterlo, ma se sapessimo come migliorare gli esseri umani aggiungendo nuovi geni, perché non dovremmo farlo? James Watson, premio Nobel

Non penso che alla fine di questo secolo rimarranno ancora dei segreti riguardo al corpo umano. Quindi ogni cosa che riusciremo a immaginare riusciremo probabilmente a trasformarla in realtà.

David Baltimore, premio Nobel

Non credo che i tempi siano già maturi, ma non manca molto. Sfortunatamente, temo di appartenere all'ultima generazione che conoscerà la morte.

Gerald Sussman

Gli dèi della mitologia possedevano il massimo potere, quello sulla vita e sulla morte. Potevano infatti guarire i malati e prolungare l'esistenza. Le preghiere rivolte a queste divinità erano principalmente richieste di liberazione da malattia e infermità.

Nelle mitologie greca e romana si raccontava di Eos, la meravigliosa dea dell'aurora. Un giorno la dea s'innamorò profondamente di un mortale dal bell'aspetto, Titone. Eos aveva un corpo perfetto ed era immortale, mentre Titone avrebbe dovuto inevitabilmente affrontare invecchiamento, malanni e morte. Determinata a salvare l'amato da un così triste destino, implorò Zeus, padre di tutti gli dèi, affinché anche Titone godesse dell'immortalità, in modo che potessero vivere insieme in eterno. Impietosito dalla richiesta dei due amanti, Zeus acconsentì.

Tuttavia Eos, presa dalla fretta, dimenticò di chiedere per l'amato anche l'eterna giovinezza. Titone divenne quindi immortale, ma dovette assistere all'invecchiamento del proprio corpo che, non potendo morire, si fece sempre più avvizzito e decrepito, costringendolo a vivere all'infinito nel dolore e nella sofferenza della decadenza fisica.

È dunque questa la sfida del XXI secolo. Gli scienziati stanno leggendo il libro della vita, che include l'intero genoma umano e che promette progressi miracolosi nella comprensione dei processi d'invecchiamento. Ma prolungare l'esistenza all'infinito senza garantire salute e vigore del corpo potrebbe rappresentare una punizione eterna, come Titone ha tragicamente scoperto.

Entro la fine di questo secolo anche noi disporremo di qualcosa di simile al potere degli dèi, che non sarà limitato alla guarigione dalle malattie, ma comprenderà anche il miglioramento del corpo umano e persino la creazione di nuove forme di vita. Ma ciò non avverrà in virtù di preghiere e incantesimi, bensì attraverso i "miracoli" della biotecnologia.

Tra gli scienziati che stanno svelando i segreti della vita c'è Robert Lanza, uno che va di fretta. Membro della nuova generazione di biologi, è uno scienziato giovane, energico e pieno di idee innovative che non vede l'ora di realizzare. Lanza è sulla cresta dell'onda della rivoluzione biotecnologica. Come un bambino in un negozio di caramelle, il suo massimo divertimento è addentrarsi in questo territorio inesplorato e fare importanti scoperte relative a un'ampia gamma di questioni scottanti.

Fino a una o due generazioni fa il ritmo era ben diverso. C'erano biologi che esaminavano tranquillamente misteriosi vermi o insetti, studiandone pazientemente l'anatomia fin nei minimi dettagli e tormentandosi sulla più corretta denominazione latina da attribuirgli.

Lanza, invece, è tutta un'altra cosa.

L'ho incontrato in uno studio radiofonico per fargli un'intervista, e sono stato immediatamente impressionato dalla sua giovane età e dalla sua creatività incontenibile. Come al solito, era immerso in una serie di esperimenti. Mi ha raccontato dei suoi esordi in questo settore in rapida espansione, confessandomi che tutto era cominciato nel modo più insolito.

Lanza proviene da una modesta famiglia operaia della zona sud di Boston, dove ai suoi tempi ben pochi andavano all'università. Tuttavia, mentre frequentava le superiori venne a sapere le straordinarie notizie sul dipanamento del DNA. Ne fu conquistato all'istante, al punto da lanciarsi immediatamente in un progetto scientifico: clonare una gallina nella sua stanza. Per quanto perplessi, i suoi genitori gli diedero la loro benedizione!

Determinato a far decollare il suo progetto, Lanza si recò ad Harvard in cerca di consigli. Non conoscendo nessuno, chiese informazioni a un uomo che pensava fosse uno dei custodi. Incuriosito, il presunto custode l'accompagnò nel suo ufficio, dove Lanza scoprì infine che si trattava di uno dei ricercatori più anziani del laboratorio di ricerca. Colpito dalla pura e semplice temerarietà di quello sfrontato studentello delle superiori, il ricercatore lo presentò agli altri scienziati, tra cui molti degni di un premio Nobel. Da quel giorno la sua vita cambiò, e oggi Lanza ama paragonarsi al Matt Damon di *Will Hunting. Genio ribelle*, in cui un ragazzo di strada della classe operaia che per vivere lava i pavimenti sbalordisce il professore di matematica del MIT con il suo genio matematico.

Oggi Lanza è dirigente scientifico dell'Advanced Cell Technology, con un centinaio di pubblicazioni e di invenzioni alle spalle. Nel 2003 è balzato agli onori della cronaca quando lo zoo di San Diego gli ha chiesto di clonare un banteng (*Bos javanicus*), una specie di bovino selvatico a rischio d'estinzione, servendosi del corpo di un esemplare morto venticinque anni prima. Lanza è riuscito a prelevare dalla carcassa alcune cellule utilizzabili, per poi processarle e inviarle a un allevamento dello Utah, dove una cellula fertilizzata è stata impiantata in una mucca. Dieci mesi dopo Lanza ha ricevuto la tanto attesa notizia: la sua ultima creazione era appena venuta al mondo. Forse un giorno lo troveremo a lavorare su una qualche "ingegneria dei tessuti", da cui potrebbe derivare una specie di "supermercato del corpo umano" dove trovare nuovi organi cresciuti dalle nostre stesse cellule e con cui rimpiazzare quelli malati o "fuori uso". O magari si dedicherà alla clonazione di cellule embrionali umane. Del resto Lanza ha fatto parte dell'équipe che ha clonato il primo embrione umano della storia allo scopo di produrre cellule staminali embrionali.

Le tre epoche della medicina

Lanza cavalca una nuova ondata di scoperte che hanno avuto origine dall'accesso al sapere nascosto nel nostro DNA. Storicamente, la medicina ha attraversato tre epoche fondamentali. La prima, durata una decina di migliaia di anni, fu dominata dalla superstizione, dalle arti magiche e dal sentito dire. La maggior parte dei bambini moriva alla nascita, e la speranza di vita era tra i diciotto e i vent'anni. In quella prima fase furono scoperte alcune erbe medicinali e prodotti chimici utili come l'aspirina, senza che però emergesse un concreto metodo di ricerca volto alla scoperta di nuove terapie. Sfortunatamente, i rimedi che si dimostravano efficaci venivano custoditi gelosamente. I "medici" si guadagnavano da vivere accontentando ricchi pazienti, quindi era loro personale interesse mantenere segreti gli ingredienti delle loro pozioni.

In quella prima epoca uno dei fondatori della Mayo Clinic tenne un diario personale delle visite ai suoi pazienti. Scrisse schiettamente che nel suo armamentario magico c'erano soltanto due ingredienti attivi che funzionavano realmente: un seghetto da ferro e la morfina. Il seghetto veniva usato per amputare gli arti malati, e la morfina per attenuare il dolore nel corso dell'intervento. Erano gli unici due "farmaci" che funzionavano sempre. Le altre cose che teneva nella sua borsa nera erano solo placebo, scrisse tristemente.

La seconda epoca della medicina cominciò nel XIX secolo con la teoria dei germi e migliori condizioni sanitarie. Negli Stati Uniti del 1900 l'aspettativa di vita salì a quarantanove anni. Durante la Prima guerra mondiale, quando decine di migliaia di soldati persero la vita sul fronte europeo, ci fu urgente bisogno di medici che conducessero esperimenti concreti, con risultati riproducibili, poi pubblicati sulle riviste specializzate. I monarchi d'Europa, sconvolti dal fatto che i migliori di loro venivano massacrati, chiesero risultati validi anziché formule magiche. Dal canto loro i medici, le cui attenzioni non si rivolgevano più soltanto ai ricchi mecenati, cominciarono finalmente a lottare per conquistarsi legittimità e gloria pubblicando le loro ricerche sulle riviste specializzate, dove venivano lette e recensite dai loro colleghi. Questo alimentò dei progressi nella produzione di antibiotici e vaccini, grazie ai quali l'aspettativa di vita poté alzarsi fin oltre i settant'anni.

La terza epoca è quella della medicina molecolare. Stiamo assistendo alla fusione di fisica e medicina, con la conseguente focalizzazione da parte di quest'ultima su atomi, molecole e geni. Tale trasformazione storica cominciò negli anni Quaranta, quando il fisico austriaco Erwin Schrödinger, uno dei fondatori della teoria quantistica, scrisse un'autorevole libro intitolato *Che cos'è la vita?*, in cui ricusava l'idea che gli esseri viventi fossero animati da una misteriosa forza spirituale o vitale. Schrödinger ipotizzò invece che tutte le forme di vita si basassero su una sorta di codice memorizzato a livello molecolare. Se fosse stata scoperta quella molecola, con ogni probabilità si sarebbero svelati i segreti della vita. Il fisico Francis Crick, ispirato dagli scritti di Schrödinger, unì i suoi sforzi con il genetista James Watson per dimostrare che il DNA era esattamente quella favoleggiata molecola. Nel 1953 Watson e Crick fecero una delle più importanti scoperte di tutti i tempi, presentando il primo modello accurato della struttura a doppia elica del DNA. Una volta dipanato, il filamento del DNA umano ha un'estensione di circa 180 centimetri, e contiene una sequenza di tre miliardi di acidi nucleici chiamati *A*, *T*, *C* e *G* (adenina, timina, citosina e guaina) che contengono le informazioni codificate. Leggendo la precisa sequenza degli acidi nucleici lungo la molecola di DNA si accede praticamente al libro

della vita.

La genetica molecolare ha compiuto rapidi passi avanti che hanno portato alla realizzazione del progetto Genoma Umano, una delle pietre miliari nella storia della medicina. Si è trattato di un programma di ricerca enorme, il cui obiettivo principale era quello di determinare la sequenza delle coppie di basi azotate che formano il DNA, così da mappare tutti i geni del genoma umano. È costato circa 3 miliardi di dollari e ha chiamato in causa centinaia di scienziati da tutto il mondo, i quali hanno completato la ricerca nel 2003, aprendo così una nuova era scientifica. Ciò significa che un giorno ognuno di noi potrà avere il proprio genoma su qualunque supporto informatico, con tutti i circa venticinquemila geni che lo compongono. Sarà una sorta di “manuale utente” di noi stessi.

Il Nobel David Baltimore ha così riassunto le conseguenze di quel successo: «Oggi la biologia è una scienza dell'informazione»¹.

FUTURO PROSSIMO (DA OGGI AL 2030)

Medicina genomica

Le forze motrici di questo straordinario progresso in campo medico sono, almeno in parte, la teoria quantistica e la rivoluzione dei computer. La teoria quantistica ci ha fornito un modello dettagliato della posizione degli atomi all'interno di ogni proteina e molecola del DNA. Oggi sappiamo come costruire da zero le molecole della vita, atomo dopo atomo. E il sequenziamento genetico, che una volta era un processo lungo e costoso, è ormai completamente automatizzato grazie ai robot. All'inizio sequenziare tutti i geni di un corpo umano costava diversi milioni di dollari. Era un'opera talmente complicata e onerosa che soltanto una manciata di persone, tra cui gli scienziati che avevano perfezionato la tecnologia, poteva permettersi la lettura completa del proprio genoma. Ma nel giro di pochi anni potrebbe essere alla portata di tutti.

Ricordo molto bene un mio intervento a una conferenza tenutasi a Francoforte verso la fine degli anni Novanta e incentrata sul futuro della medicina. All'epoca predissi che entro il 2020 avremmo potuto avere la mappa del nostro genoma su CD o altro supporto informatico. Uno dei presenti manifestò apertamente la propria indignazione, alzandosi e dicendo che si trattava di un sogno irrealizzabile: i geni, secondo lui, erano semplicemente troppi, e mettere a disposizione una conoscenza del genere all'individuo medio sarebbe costato un'enormità. Il progetto Genoma Umano era costato 3 miliardi di dollari, ed era presumibile che sequenziare ogni singolo genoma non potesse costare granché meno. In seguito ebbi occasione di discuterne a quattr'occhi, e infine fu chiara l'origine del fraintendimento: quello scienziato stava pensando linearmente. Peraltro la legge di Moore stava già riducendo concretamente i costi, rendendo possibile il sequenziamento del DNA tramite robot, computer e congegni automatici. In pratica il mio interlocutore non aveva compreso il profondo effetto della legge di Moore a livello biologico. Ripensando a quell'accesa discussione, mi rendo conto che se nella mia previsione c'era un errore, si trattava di un errore di valutazione: nemmeno io avevo saputo calcolare con esattezza quanto tempo ci sarebbe voluto perché biologia e tecnologia ci regalassero la genomica individuale.

Per esempio, Stephen R. Quake, ingegnere a Stanford, ha perfezionato gli ultimi sviluppi del sequenziamento del genoma. Ha ridotto i costi a 50.000 dollari, e c'è una possibilità concreta che tale importo scenda a un migliaio di dollari nel giro di pochi anni. Gli scienziati hanno a lungo fantasticato sulle conseguenze del crollo dei costi del sequenziamento del genoma umano, constatando che tali condizioni spalancherebbero inevitabilmente le porte al sequenziamento di massa, mettendo a disposizione i benefici di tale tecnologia a un'ampia fetta di umanità. Possiamo ipotizzare che nel giro di pochi decenni il sequenziamento dei propri geni costerà meno di un centinaio di dollari, ovvero quanto un comune esame del sangue.

La chiave di volta di tale progresso è una particolare scorciatoia: Quake confronta la sequenza del DNA di ogni individuo con quelle di altri già lette in precedenza. Suddivide il genoma umano in unità di DNA contenenti 32 bit di informazione. Dopodiché un software *Il futuro della medicina* confronta tali frammenti di DNA con i genomi completi di altre persone. Poiché qualsiasi coppia di essere umani ha un DNA pressoché identico, con differenze inferiori allo 0,1 per cento, significa che il computer può rapidamente individuare la corrispondenza tra i diversi frammenti da 32 bit.

Quake è stato l'ottavo essere umano al mondo a disporre della sequenza completa del proprio

genoma. La sua partecipazione al progetto era motivata anche da un interesse personale, poiché la scansione del suo genoma gli avrebbe permesso di rilevare un'eventuale malattia cardiaca. Sfortunatamente, il suo genoma ha infatti indicato la presenza di un gene associato a un problema cardiocircolatorio, ereditato da qualche suo antenato. «Ci vuole fegato per farsi leggere il proprio DNA!»² ha commentato Quake, sconsolato.

Ho una certa idea dell'ansia che ne scaturisce, perché anch'io ho effettuato una scansione, sebbene parziale, del mio genoma, che è stata poi riversata su CD per uno speciale di BBC-Discovery Channel da me condotto. Un medico ha prelevato un po' del mio sangue e l'ha spedito a un laboratorio della Vanderbilt University. Due settimane dopo mi è arrivato un CD con la lista di migliaia dei miei geni. Tenere quel disco tra le mani era per certi versi buffo, poiché sapevo che conteneva un modello parziale del mio corpo. In linea di principio, quel CD poteva essere utilizzato per produrre una copia abbastanza attendibile di me stesso.

Ma ovviamente la cosa ha anche stimolato la mia curiosità, perché quel CD custodiva segreti importanti su di me. Per esempio, avrei potuto sapere se avevo ereditato lo specifico gene che aumenta le probabilità di ammalarsi del morbo di Alzheimer. Considerato che mia madre ne è morta, non era una preoccupazione ingiustificata. (Fortunatamente, ho constatato che quel gene non c'è.)

Inoltre, quattro dei miei geni sono stati confrontati con il genoma di migliaia di persone di tutto il mondo che si erano già sottoposte allo stesso genere di analisi. Abbiamo poi tracciato su un planisfero la posizione geografica degli individui che avevano quegli stessi quattro geni, e analizzando le loro diverse posizioni ho potuto osservare un lungo itinerario che partiva dal Tibet, entrava in Cina e l'attraversava fino ad arrivare al Giappone. È stato sorprendente constatare che quella linea ripercorreva gli antichi itinerari migratori degli antenati di mia madre, procedendo a ritroso per migliaia di anni. I miei antenati non hanno lasciato nessuna memoria scritta delle loro migrazioni, tuttavia i segni dei loro spostamenti sono scolpiti nel mio DNA. (È altresì possibile rintracciare gli antenati del ramo paterno. I geni mitocondriali sono trasmessi senza subire alterazioni da madre a figlia, mentre il cromosoma Y passa di padre in figlio. Ne consegue che analizzando tali geni si può ricostruire l'albero genealogico del ramo materno o di quello paterno.)

Nel prossimo futuro molte altre persone proveranno lo stesso miscuglio di sensazioni che ho sperimentato io quando mi sono trovato fra le mani il modello genetico del mio corpo, con le conseguenti possibilità di lettura che abbiamo visto. Tuttavia, da un punto di vista scientifico le conseguenze vanno ben oltre tali aspetti personali, e inaugurano una branca interamente nuova della scienza chiamata *bioinformatica*, che impiega i computer per effettuare una scansione e una rapida analisi del genoma di migliaia di organismi. Per esempio, inserendo nel computer il genoma di centinaia di persone affette da una specifica malattia, si potrà calcolare la precisa collocazione del DNA danneggiato. Alcuni dei più potenti computer al mondo sono già intensamente utilizzati nella bioinformatica: stanno infatti analizzando milioni di geni di piante e animali per individuare quelli chiave.

Questa innovazione potrebbe persino costringere a rivedere la sceneggiatura di alcune serie TV come *CSI*. Sulla base di minuscoli frammenti di DNA (reperiti nei follicoli capillari, nella saliva o nelle macchie di sangue), si riuscirebbe a determinare non solo il colore dei capelli e degli occhi, le origini etniche, l'altezza e l'anamnesi di qualcuno, ma forse persino il suo viso. Attualmente i periti scientifici delle forze di polizia possono solo ottenere una scultura approssimativa del viso della vittima, a condizione che dispongano del suo cranio integro. È

però ipotizzabile che in futuro i computer sapranno ricostruire le fattezze di un individuo sulla base di qualche frammento di forfora o traccia sanguigna. (Il fatto che i gemelli abbiano un viso straordinariamente simile implica che la sola genetica, malgrado la presenza di fattori ambientali, è in grado di determinare buona parte delle caratteristiche di un volto.)

La visita dal medico

Come abbiamo visto nei capitoli precedenti, anche le nostre visite dal medico subiranno cambiamenti radicali. Con ogni probabilità avverranno attraverso lo schermo-parete di casa nostra, e quello con cui parleremo non sarà un medico in carne e ossa ma semplicemente un software. Nel nostro bagno ci saranno più sensori che in un moderno ospedale, cosicché eventuali cellule cancerose verranno individuate automaticamente prima che evolvano in tumore. Per esempio, circa il 50 per cento di tutte le forme più comuni di cancro implica una mutazione del gene p53, la cui individuazione tramite sensori non sarebbe affatto un problema.

Ai primi segnali di insorgenza verrebbero subito iniettate nanoparticelle nel flusso sanguigno, portando così i principi attivi anticancerogeni direttamente alle cellule malate. Un giorno la chemioterapia ci apparirà obsoleta come oggi ci appare il ricorso alle sanguisughe, tanto comune nel secolo scorso. (Discuteremo più approfonditamente di nanotecnologia, chip a DNA, nanoparticelle e nanobot nel prossimo capitolo.)

Se per caso il “medico” sul nostro schermo non fosse in grado di curare la malattia o il danno subito da un certo organo, non dovremo fare altro che “coltivarne” uno nuovo. Solo negli Stati Uniti ci sono novantunomila persone in attesa di un trapianto, e ogni giorno ne muoiono diciotto per il semplice motivo che l’organo di cui avrebbero bisogno non è disponibile.



In futuro avremo tutti un tricorder come quello di *Star Trek*, che potrà diagnosticare quasi ogni malattia. A renderlo possibile saranno i congegni MRI portatili e i chip a DNA. (Foto Bruno Vincent/Getty Images)

In futuro, quando il nostro medico virtuale rileverà qualcosa di anomalo, per esempio un organo malato, ne ordinerà immediatamente uno nuovo, che verrà coltivato direttamente dalle nostre cellule.

La cosiddetta *ingegneria dei tessuti* è uno dei settori più attivi della medicina moderna, e potrebbe dare vita a un vero e proprio “super-mercato del corpo umano”. Finora gli scienziati, partendo da cellule umane originali, sono riusciti a “coltivare” in laboratorio pelle, sangue, vasi sanguigni, valvole cardiache, cartilagine, ossa, nasi e orecchie. Un primo organo principale, la vescica, è stato ottenuto nel 2007, mentre nel 2009 è stata ricreata una trachea. Si tratta di riproduzioni relativamente semplici degli organi originali, con solo alcuni tipi di tessuti e poche

strutture. Nel giro di cinque anni potremo disporre del primo fegato o pancreas in provetta, cosa che ovviamente avrebbe implicazioni importanti nel campo della salute pubblica. Il premio Nobel Walter Gilbert mi ha detto che secondo lui nel giro di qualche decennio potremmo disporre di una copia di quasi ogni nostro organo, cresciuta dalle nostre cellule.

Il punto di partenza dell'ingegneria dei tessuti è il prelievo di alcune cellule del nostro corpo, che vengono poi iniettate in un modello di plastica simile a una spugna, ma con la forma dell'organo da riprodurre. Il modello è fatto di acido poliglicolico biodegradabile. Le cellule sono trattate con specifici fattori di crescita che ne stimolano lo sviluppo all'interno del modello. Una volta compiuto il processo, il modello si disintegra lasciando soltanto il nuovo organo perfetto.

Ho assistito a questa procedura durante una visita al laboratorio Anthony Atala presso l'Università di Wake Forest, nella Carolina del Nord. Passeggiando in quelle stanze ho visto flaconi contenenti organi umani viventi, per esempio vasi sanguigni e vesciche; c'erano anche valvole cardiache pienamente operative, che pompavano i liquidi con cui erano continuamente irrorate. Sembrava di essere nel laboratorio del dottor Frankenstein, anche se occorre sottolineare alcune fondamentali differenze. Nel XIX secolo i medici erano all'oscuro dei meccanismi di rigetto del corpo, quelli che rendevano impossibile l'impianto di nuovi organi. Inoltre, non sapevano come arrestare le infezioni che avrebbero inevitabilmente contaminato qualsiasi organo subito dopo l'intervento. Possiamo dunque dire che Atala, anziché creare un mostro, cerca di sviluppare una tecnologia medica interamente nuova, qualcosa che un giorno finirà con il cambiare il volto della medicina e salvare molte vite umane.

Uno degli obiettivi di questo laboratorio è creare un fegato umano in provetta, possibilmente entro i prossimi cinque anni. Il fegato non è così complesso, poiché consiste soltanto di pochi tessuti diversi. Se riuscissimo a riprodurlo in laboratorio potremmo salvare migliaia di vite, e mi riferisco soprattutto a chi ha urgente bisogno di un trapianto di fegato, ma potrebbe essere di vitale importanza anche per gli alcolisti malati di cirrosi. (C'è però un rovescio della medaglia: sapere di poter ricorrere a un organo di scorta potrebbe forse incoraggiare cattive abitudini in termini di stile di vita.)

Se già oggi possiamo "coltivare" organi come la trachea e la vescica, che cosa impedisce agli scienziati di ottenere una copia in provetta delle altre parti del corpo? Uno dei problemi principali consiste nel ricostruire la fitta rete di capillari sanguigni che alimenta le cellule. (Ogni cellula del corpo deve infatti essere rifornita di sangue.) C'è poi il problema della riproduzione di strutture complesse. Per esempio il rene, che purifica il sangue dalle tossine, è composto di milioni di minuscoli filtri, e la creazione del loro modello biodegradabile è qualcosa di estremamente complesso.

L'organo senza dubbio più difficile da riprodurre è ovviamente il cervello umano. Sebbene sia assolutamente improbabile che nei decenni a venire si riesca a replicare o moltiplicare artificialmente le cellule cerebrali, potrebbe essere possibile iniettare direttamente nel cervello nuove cellule, che verrebbero incorporate nella rete neuronale del paziente. Si tratterebbe peraltro di un'iniezione casuale, cosa che costringerebbe il paziente a imparare daccapo alcune funzioni elementari. Tuttavia, vista la natura "plastica" del cervello, e cioè la sua capacità di stabilire nuovi collegamenti appena appreso un nuovo compito, con ogni probabilità i nuovi neuroni verrebbero integrati in modo da accendersi correttamente.

Le cellule staminali

Il passo successivo consiste nel ricorso alle cellule staminali. Finora le cellule di cui ci siamo serviti per ricreare in provetta organi umani non erano staminali, bensì cellule appositamente trattate per proliferare all'interno dei modelli di plastica. Nel prossimo futuro dovremmo poter usare direttamente le staminali.

Le cellule staminali possono essere considerate “le madri di tutte le cellule”, poiché hanno la capacità di tramutarsi in qualsiasi tipo di cellula del corpo. Ogni nostra cellula dispone del codice genetico necessario per creare l'intero corpo. Tuttavia, al momento della loro maturazione le cellule si specializzano, disattivando molti dei loro geni. Per esempio, sebbene una cellula del tessuto cutaneo disponga di tutti i geni necessari per trasformarsi in sangue, nel momento in cui una cellula embrionale diventa una cellula della cute adulta, tali geni vengono disattivati.

Per contro, le cellule staminali embrionali mantengono la loro capacità di ricreare qualsiasi altro genere di cellula, e per tutta la loro esistenza. Sebbene questo genere di cellule sia il più apprezzato dagli scienziati, è anche il più controverso, poiché per estrarre cellule staminali è necessario sacrificare un embrione, e ciò implica problematiche di carattere etico. (Occorre peraltro notare che Lanza e colleghi hanno condotto ricerche per estrarre cellule staminali adulte, già trasformatesi in qualche altro genere di cellula, per farle poi tornare alla loro condizione originaria embrionale.)

Le cellule staminali possono curare una serie di malattie come il diabete, l'Alzheimer, il Parkinson e persino il cancro. È difficile pensare a una malattia in cui le cellule staminali non possono avere un effetto decisivo. Tra le aree di ricerca più interessate da tale progresso c'è quella dei danni al midollo spinale, una volta ritenuti assolutamente incurabili. Nel 1995, quando il celebre attore Christopher Reeve subì un grave danno alla colonna vertebrale che lo lasciò paralizzato, non esistevano ancora cure adeguate. Successivamente, negli studi compiuti sugli animali la riparazione dei danni al midollo attraverso le staminali ha fatto notevoli progressi.

Per esempio, Stephen Davies dell'Università del Colorado ha ottenuto un successo straordinario nella cura dei danni al midollo spinale dei ratti. Lui stesso ha commentato: «Ho condotto alcuni esperimenti in cui abbiamo trapiantato direttamente neuroni adulti nel sistema nervoso centrale di esemplari adulti. Davvero un esperimento alla Frankenstein! Con nostra grande sorpresa, quei neuroni adulti sono riusciti a costruire nuove fibre nervose da un lato all'altro del cervello nel giro di una sola settimana». Si era sempre ritenuto che la cura dei traumi al midollo spinale, ovvero la riparazione dei nervi danneggiati, comportasse grande dolore e disagio. Davies ha scoperto che alcune cellule nervose chiave, gli astrociti, si presentano in due forme diverse e con esiti differenti. Ha detto Davies: «Utilizzando gli astrociti giusti per ripristinare la funzionalità del midollo spinale, otteniamo tutti i vantaggi possibili senza alcun dolore, mentre quelli del genere opposto sembrano garantire il risultato contrario: solo dolore e niente progressi». Inoltre Davies è convinto che le stesse tecniche pionieristiche di applicazione delle staminali potranno funzionare sui pazienti colpiti da ictus, Alzheimer e Parkinson.

Poiché praticamente nessuna cellula del corpo può essere riprodotta alterando le cellule

staminali embrionali, le possibilità sono infinite. Doris Taylor, direttrice del Center for Cardiovascular Repair dell'Università del Minnesota, mette però le mani avanti, sottolineando quanta strada debba ancora essere fatta: «Le cellule staminali embrionali sono nel contempo il buono, il brutto e il cattivo. Quando sono buone, possono moltiplicarsi in laboratorio in gran numero ed essere impiegate per la riproduzione di tessuti, organi e parti del corpo. Quando sono cattive, non sanno quando smettere di crescere e degradano in tumori. Ci sono poi quelle brutte, di cui non comprendiamo tutti gli aspetti e non possiamo controllare l'esito, quindi non è il caso di servirsene in laboratorio, non senza avere almeno completato le necessarie ricerche»³.

Questo è uno dei problemi principali nel settore della ricerca sulle staminali: si tratta di cellule che, in assenza di segnali chimici dall'ambiente circostante, potrebbero continuare a proliferare selvaggiamente, fino a diventare cancerose. Gli scienziati si sono infine resi conto che i delicati messaggi chimici veicolati tra le cellule, che dicono quando e come avviare o arrestare la crescita, sono altrettanto importanti delle cellule stesse.

Tuttavia, soprattutto negli studi compiuti sugli animali, si sono potuti constatare progressi concreti. Nel 2008 Taylor si è guadagnata l'attenzione dei media: la sua équipe è riuscita per la prima volta nella storia a "coltivare" in laboratorio il cuore battente di un topo partendo quasi da zero. Il progetto è cominciato con il cuore di un topo al cui interno sono state dissolte tutte le cellule, lasciando soltanto "l'armatura", cioè una matrice di proteine a forma di cuore. Dopodiché i ricercatori hanno impiantato una miscela di cellule staminali cardiache all'interno di quella matrice e hanno assistito alla loro proliferazione. In precedenza gli scienziati erano riusciti a coltivare singole cellule cardiache in una capsula di Petri, ma questa è la prima volta in cui si è ottenuto un vero cuore battente coltivato in laboratorio.

Coltivare un cuore è stato anche particolarmente eccitante per la Taylor: «È fantastico! Si vede l'intero albero vascolare, dalle arterie fino alle più piccole vene che forniscono il sangue ad ogni singola cellula cardiaca»⁴.

Anche un ministero del governo statunitense è profondamente interessato a compiere progressi significativi nel settore dell'ingegneria dei tessuti: la difesa. Nei conflitti del passato la percentuale di perdite sul campo di battaglia era spaventosa, con interi reggimenti e battaglioni decimati e un'infinità di soldati ridotti in fin di vita. Oggi abbiamo squadre di evacuazione d'emergenza capaci di aerotrasportare i feriti dall'Iraq o dall'Afghanistan all'Europa o agli Stati Uniti, dove ricevono le cure migliori. Il tasso di sopravvivenza dei soldati è salito di parecchio, ma lo stesso vale anche per quelli che perdono braccia e gambe. Di conseguenza, l'esercito statunitense ritiene prioritario trovare un modo per far ricrescere gli arti amputati.

Uno dei progressi più significativi compiuti dall'Armed Forces Institute of Regenerative Medicine consiste nell'impiego di metodi di produzione di organi artificiali innovativi. È risaputo che le salamandre hanno uno straordinario potere di rigenerazione, grazie al quale riescono a farsi ricrescere interamente gli arti perduti. Questi si riformano perché le cellule staminali della salamandra sono stimolate a produrne di nuovi. A tale proposito, una delle teorie più fruttuose è stata esplorata da Stephen Badylak dell'Università di Pittsburgh, il quale è riuscito a far ricrescere la punta delle dita. La sua équipe ha prodotto una "polvere magica" che ha il potere miracoloso di rigenerare i tessuti. Tale polvere non proviene dalle cellule, ma dalla matrice extracellulare esistente tra le cellule, che ha una grande importanza poiché contiene i segnali che ordinano alle cellule staminali di crescere in un determinato modo. Quando tale polverina viene applicata sulla punta di un dito che ha subito un'amputazione, stimola la

ricrescita del dito e persino dell'unghia, portando a una copia pressoché perfetta della parte mutilata. In tal modo Badylak è riuscito a ottenere la rigenerazione di quasi un centimetro di tessuti e unghia. Il prossimo obiettivo consisterà nell'estendere lo stesso processo per verificare se è possibile far rigenerare un intero arto, proprio come accade nelle salamandre.

La clonazione

Se la coltivazione in laboratorio degli organi del corpo umano è tutt'altro che impossibile, un giorno potremo forse riprodurre un intero essere umano, una sua copia genetica esatta? In linea di principio anche questo dovrebbe essere possibile, ma non è ancora stato fatto, malgrado molti sembrino affermare il contrario.

I cloni sono uno dei temi preferiti dell'industria cinematografica hollywoodiana, ma di solito le sceneggiature non interpretano correttamente la scienza. Nel film *Il sesto giorno* il protagonista (Arnold Schwarzenegger) combatte i "cattivi", che nella fattispecie sono un gruppo che padroneggia l'arte della clonazione degli esseri umani. In particolare, sanno come copiare l'intera memoria di un individuo e "installarla" nel clone. Quando Schwarzenegger riesce a eliminare uno dei suoi avversari, se ne ritrova davanti una copia esatta, dotata della stessa personalità e memoria. Le cose si complicano allorché il protagonista scopre di essere stato a sua volta clonato, senza peraltro ricordarselo. (In realtà, quando si effettua la clonazione di un animale non si riproducono anche i suoi ricordi.)

Il concetto di clonazione è balzato agli onori della cronaca internazionale nel 1997, quando Ian Wilmut del Roslin Institute dell'Università di Edimburgo è riuscito a clonare l'ormai celebre pecora Dolly. Wilmut non ha fatto altro che prendere la cellula di un esemplare adulto, estrarre il DNA contenuto nel suo nucleo e inserirlo in un ovulo, giungendo così all'impresa straordinaria di restituirci una copia genetica dell'originale. Una volta gli ho chiesto se avesse avuto idea della tempesta mediatica che avrebbe scatenato con quella sua scoperta storica. Mi ha risposto di no. Ovviamente, era consapevole dell'importanza scientifica del suo lavoro, ma aveva sottovalutato la reazione dell'opinione pubblica.

Presto i laboratori di tutto il mondo hanno cominciato a eseguire la stessa procedura, giungendo a clonare una serie di animali tra cui topi, capre, gatti, maiali, cani, cavalli e bovini. Una volta ho fatto visita a Ron Marquess, appena fuori Dallas, con una troupe televisiva della BBC. Il suo ranch è uno dei più grandi centri di clonazione di bovini dell'intera nazione, e là ho potuto osservare, non senza un certo stupore, bestiame clonato di prima, seconda e persino terza generazione, vale a dire cloni di cloni di cloni! Marquess mi ha spiegato che per riuscire a monitorare le diverse generazioni di bovini clonati ci si dovrà inventare un nuovo vocabolario.

Un gruppo di bovini in particolare ha attirato la mia attenzione: si trattava di circa otto gemelli praticamente identici, tutti ordinatamente allineati. Camminavano, correvano, mangiavano e dormivano seguendo sempre lo stesso ordine. Sebbene quei vitelli non potessero avere cognizione di essere cloni l'uno dell'altro, si erano riuniti istintivamente e mimavano reciprocamente i movimenti.

Marquess mi ha detto che clonare il bestiame è un affare potenzialmente assai remunerativo. Se hai un toro con caratteristiche fisiche superiori, impiegarlo a fini riproduttivi rende bene, ma se l'animale dovesse morire, il suo lignaggio genetico andrebbe perduto, a meno che il suo sperma non sia stato preventivamente raccolto e refrigerato. Grazie alla clonazione gli esemplari da riproduzione sarebbero mantenuti in vita per sempre.

Sebbene la clonazione trovi un riscontro commerciale nel settore della zootecnia, le implicazioni in ambito strettamente umano sono meno chiare. Certo, sono state rilasciate dichiarazioni sensazionali sulla presunta clonazione umana, ma si tratta quasi sicuramente di

menzogne. In realtà finora nessuno è riuscito a clonare con successo neppure un primate, figuriamoci un essere umano. E persino la clonazione animale si è dimostrata difficoltosa, poiché per ogni embrione che porta a termine il suo cammino evolutivo se ne creano centinaia di altri difettosi.

Ad ogni modo, anche se a un certo punto la clonazione umana diventasse realtà, incontrerebbe diversi ostacoli etici e sociali. Tanto per cominciare, molte religioni si oppongono alla clonazione umana, basti pensare alla Chiesa cattolica quando, nel lontano 1978, Louise Brown divenne il primo essere umano al mondo concepito in provetta. Ciò significa che probabilmente verrebbero approvate leggi che imporrebbero severe restrizioni, se non addirittura un divieto assoluto. Punto secondo, a livello commerciale la richiesta di clonazione umana resterà molto bassa. Nella migliore delle ipotesi, soltanto una minima parte della razza umana sarà composta da cloni, anche se questo dovesse essere legale. Dopotutto, i cloni sono già tra noi sotto forma di gemelli (o trigemini) monozigoti, ovvero nati da un singolo ovulo fecondato da un singolo spermatozoo, quindi il fascino della novità della clonazione umana potrebbe svanire gradualmente.

All'inizio la richiesta di concepimenti in provetta è stata enorme, logica conseguenza dell'alto numero di coppie non fertili. Ma chi mai clonerebbe un essere umano? Forse una coppia di genitori in lutto per la perdita di un bambino, o più probabilmente un vecchio che giace sul letto di morte senza eredi (o che ha eredi per cui non prova particolare affetto) e vuole donare tutti i suoi averi a se stesso bambino e ricominciare tutto daccapo.

In futuro è dunque ipotizzabile che, legislazioni permettendo e per quanto tecnologicamente possibile, la clonazione umana finirà con il rappresentare solo una piccola percentuale della razza umana, con conseguenze sociali assolutamente minime.

Terapia genica

Francis Collins, attuale direttore del National Institutes of Health, nonché ex responsabile dello storico progetto governativo sul genoma umano, mi ha detto che «tutti abbiamo circa una mezza dozzina di geni piuttosto danneggiati». Nei tempi antichi avremmo semplicemente dovuto pagarne il prezzo, poiché prima o poi tali difetti genetici sarebbero risultati letali. Ma Collins è convinto che in futuro potremo intervenire preventivamente attraverso la terapia genica.

Le malattie genetiche hanno perseguitato l'umanità fin dagli albori della sua storia, e in certi momenti hanno sicuramente influenzato il suo corso. Per esempio, a causa dell'unione tra consanguinei nelle famiglie reali d'Europa, le malattie genetiche hanno flagellato intere generazioni di nobili. Giorgio III d'Inghilterra, per esempio, soffrì quasi sicuramente di porfria intermittente acuta, che gli causò crisi di temporanea follia. Alcuni storici hanno ipotizzato che ciò contribuì ad aggravare i rapporti con le colonie americane, portandole alla dichiarazione d'indipendenza nel 1776.

La regina Vittoria era portatrice del gene dell'emofilia, che causa emorragie incontrollate. Poiché ebbe nove figli, molti dei quali contrassero matrimonio con altri reali d'Europa, quella “malattia reale” si diffuse in tutto il continente. In Russia, Alessio figlio di Nicola II, nonché pronipote della stessa regina Vittoria, fu colpito da emofilia, che almeno in un primo tempo sembrò essere controllata attraverso l'influsso del mistico Rasputin. Fu così che il “monaco pazzo” conquistò abbastanza potere da paralizzare la nobiltà russa, prorogare riforme assolutamente urgenti e, come sostengono alcuni storici, contribuire allo scoppio della rivoluzione bolscevica del 1917.

In futuro la terapia genica curerà molte delle circa cinquemila malattie genetiche conosciute, come la fibrosi cistica (frequente nella popolazione europea), la malattia di Tay-Sachs (che colpisce gli ebrei dell'est europeo) e l'anemia falciforme (diffusa tra gli afroamericani). Nel prossimo futuro saremo dunque in grado di curare molte malattie genetiche causate dalla mutazione di un singolo gene.

La terapia genica si presenta in due diverse tipologie: terapia delle cellule germinali e terapia delle cellule somatiche. Quella somatica si propone di correggere i problemi genetici di un singolo individuo, e il suo valore terapeutico scompare ovviamente con la sua morte. Quella germinale è più controversa, poiché interviene sulle cellule sessuali nei primissimi stadi dello sviluppo dell'embrione, in modo che il gene così riparato possa essere trasmesso alle generazioni successive pressoché all'infinito.

La cura delle malattie genetiche segue un percorso lungo ma ormai consolidato. Anzitutto occorre trovare persone affette da una specifica malattia genetica, poi mettersi a setacciare infaticabilmente il suo albero genealogico risalendo da una generazione all'altra. Dopodiché, analizzando i geni dei suoi predecessori, si cerca di determinare la precisa collocazione del gene che potrebbe avere subito il danno, responsabile della malattia. Dopo averlo identificato si ricava una versione sana dello stesso gene, la si inserisce in un “vettore” (di solito un virus innocuo) e la si inietta nel paziente. Il virus procede rapidamente all'inserimento del “gene buono” nelle cellule del paziente, e la malattia viene quindi curata. Già nel 2001 in tutto il mondo erano in corso, o sotto revisione, oltre cinquecento esperimenti di terapia genica⁵.

Peraltro il progresso si è dimostrato lento, e i risultati contraddittori. Uno dei problemi è che il corpo finisce spesso per confondere il virus inoffensivo, contenente il “gene buono”, con un virus pericoloso, da attaccare e distruggere. Questo causa effetti collaterali che impediscono di ottenere il risultato voluto. C’è poi un altro problema: capita che il virus risulti inefficiente nell’inserire correttamente il gene buono nelle cellule bersaglio, cosicché il corpo non è in condizione di produrre il quantitativo necessario della proteina adeguata.

Malgrado tali complicazioni, nel 2000 alcuni scienziati francesi hanno annunciato di avere ricavato una terapia per curare i bambini colpiti da SCID (*severe combined immunodeficiency*, immunodeficienza combinata grave), ovvero nati senza un sistema immunitario funzionante. Alcuni pazienti affetti da SCID come David Vetter, definito *il bambino nella bolla*, sono costretti a vivere in una sorta di bolla di plastica sterile per il resto della propria vita, poiché non avendo un sistema immunitario, qualsiasi esposizione ai germi potrebbe risultargli fatale. L’analisi genetica di questo genere di pazienti ha dimostrato che le cellule immunitarie hanno realmente incorporato il nuovo gene, proprio come previsto dai medici, attivandone così il sistema immunitario.

Tuttavia ci sono state diverse battute d’arresto⁶. Nel 1999 un paziente ricoverato presso l’Università della Pennsylvania è morto nel corso di un tentativo di terapia genica, e tale evento ha costretto l’intera comunità medica a un profondo esame di coscienza. Si è trattato del primo morto tra i millecento pazienti sottoposti allo stesso tipo di terapia. Inoltre nel 2007 quattro dei dieci pazienti sottoposti a terapia genica per curare una particolare forma di SCID hanno sviluppato un gravissimo effetto collaterale: la leucemia. Attualmente la ricerca contro la SCID si sta concentrando su una terapia che non attivi accidentalmente il gene che può causare il cancro. Gli ultimi riscontri ci dicono che diciassette pazienti che soffrivano di varie forme di SCID sono guariti e non hanno sviluppato alcun cancro: uno dei pochi successi finora ottenuti in questo campo.

In realtà uno degli obiettivi della terapia genica è proprio il cancro. Circa il 50 per cento di tutte le forme più comuni di cancro è collegata a un gene danneggiato, il p53. Si tratta di un gene lungo e complesso, il che lo rende più vulnerabile a danni ambientali e chimici. Si stanno infatti conducendo moltissimi esperimenti di terapia genica volti a introdurre un p53 sano nel corpo dei pazienti. Per esempio, il fumo è spesso all’origine di tipiche mutazioni in tre precisi punti del gene p53. Quindi la terapia genica, attraverso cui il gene p53 danneggiato verrebbe sostituito con uno sano, rappresenta una delle possibili cure di alcune forme di cancro al polmone.

I progressi sono stati lenti ma costanti. Nel 2006 gli scienziati del National Institutes of Health sono riusciti a curare un melanoma metastatico, una forma di tumore della pelle, modificando le cellule killer T in modo che aggredissero specifici bersagli, ovvero le cellule cancerose. È stato il primo studio con cui si è dimostrato che la terapia genica può risultare risolutiva in determinate forme di cancro. Nel 2007 i medici del Moorfields Eye Hospital di Londra hanno impiegato la terapia genica per curare una specifica forma di malattia ereditaria della retina (causata dalle mutazioni del gene RPE65).

Nel contempo alcune coppie hanno deciso di non aspettare gli sviluppi della terapia genica, assumendosi direttamente la responsabilità della gestione della loro eredità genetica. Infatti oggi una coppia può servirsi della fecondazione in vitro per ottenere diversi embrioni, ciascuno dei quali può essere sottoposto a test così da identificare specifiche malattie genetiche. L’embrione che verrà scelto per l’impianto nel grembo materno sarà ovviamente quello privo di fattori di

rischio genetico. È questo uno dei modi attraverso i quali potremo sbarazzarci delle malattie genetiche, senza dover fare ricorso a costose tecniche di terapia genica. Lo stesso metodo è attualmente utilizzato da alcuni ebrei ortodossi di Brooklyn, che hanno un rischio elevato di trasmettere alla prole la malattia di Tay-Sachs.

C'è però una malattia che con ogni probabilità continuerà a seminare morte per tutto il secolo in corso: il cancro.

Coesistere con il cancro

Nel lontano 1971 il presidente statunitense Richard Nixon annunciò solennemente, con grande fanfara mediatica, l'inizio di una guerra contro il cancro. Immaginava che finanziando la ricerca con un fiume di denaro si sarebbe presto giunti a una cura. Ma quarant'anni e 200 miliardi di dollari dopo, il cancro è la seconda causa di morte negli Stati Uniti, poiché provoca il 25 per cento di tutti i decessi. Tra il 1950 e il 2005 l'indice di mortalità per cancro è calato soltanto del 5 per cento (considerate le variazioni su vita media e altri fattori). Si stima che nel corso di questo stesso anno il cancro minaccerà l'esistenza di 562.000 cittadini americani, cioè più di mille persone al giorno. Per alcune forme di cancro l'indice di mortalità si è notevolmente ridotto, ma per altre non ha subito variazioni degne di nota. Inoltre le attuali terapie, che implicano l'avvelenamento, la recisione o l'eliminazione di tessuti umani, provocano un notevole dolore, al punto da indurre i pazienti a chiedersi che cosa sia peggio, se la malattia o la terapia.

Con il senno di poi è facile comprendere dove abbiamo sbagliato: nel 1971 la rivoluzione dell'ingegneria genetica non era ancora avvenuta, e le cause del cancro erano del tutto misteriose.

Oggi gli scienziati sanno che il cancro è fondamentalmente una malattia dei geni. Che sia causato da un virus, dall'esposizione a sostanze chimiche o radiazioni o dal destino, il cancro implica fondamentalmente delle mutazioni in quattro o più geni, in seguito alle quali una cellula normale "dimentica come morire". La cellula perde il controllo della sua riproduzione, che avviene senza limiti fino a uccidere il paziente. Il fatto che affinché insorga il cancro è necessaria una sequenza di quattro o più geni difettosi, spiega perché spesso occorrono decenni prima che la malattia colpisca e uccida.

Per esempio, da bambini potremmo esserci presi una bella scottatura solare, e molti decenni dopo sviluppare un tumore alla pelle nello stesso punto del corpo. Ciò significa che probabilmente c'è voluto tutto quel tempo affinché avvenisse una serie di mutazioni sfociata poi nel cancro vero e proprio.

Ci sono almeno due tipi fondamentali di geni implicati nella carcinogenesi: gli oncogeni, che favoriscono la crescita cellulare, e i soppressori del tumore, che invece la scoraggiano o la impediscono. I geni oncogeni sono come un acceleratore premuto al massimo e bloccato in quella posizione, cosicché il "veicolo" procede sbandando, senza più controllo, consentendo la riproduzione incontrollata delle cellule. I soppressori del tumore fungono invece da freno, e quindi se danneggiati possono essere paragonati ai freni mal funzionanti di un'auto incapace di fermarsi.

Un consorzio internazionale ha lanciato il progetto Genoma Cancro, al fine di sequenziare i geni implicati nella maggior parte dei tumori. Poiché ogni genere di cancro richiede il sequenziamento del genoma umano, si tratta di un progetto centinaia di volte più ambizioso del progetto Genoma Umano.

Alcuni dei primi, sorprendenti risultati del tanto atteso progetto Genoma Cancro sono stati annunciati nel 2009, e riguardano i tumori della pelle e del polmone. Mike Stratton, del Wellcome Trust Sanger Institute, ha affermato: «Ciò a cui stiamo assistendo trasformerà per

sempre la nostra comprensione del cancro. Non eravamo mai giunti a una conoscenza così approfondita»⁷.

Le cellule di un tumore al polmone subiscono il numero sorprendente di ventitremila mutazioni, mentre nel caso del melanoma arriviamo addirittura a trentatremila. Ciò significa che un fumatore tipico sviluppa una mutazione ogni quindici sigarette fumate. (Il cancro ai polmoni uccide all'incirca un milione di persone all'anno in tutto il mondo, e la causa è principalmente il fumo.)

L'obiettivo è analizzare geneticamente tutte le forme di cancro, e ne esistono oltre un centinaio. Ci sono molti tessuti nel nostro corpo, e tutti possono diventare cancerosi. Ogni tessuto può inoltre avere diverse forme di cancro, ciascuna con decine di migliaia di mutazioni. Ci vorranno dunque molti decenni prima di riuscire a identificare le precise mutazioni che mandano in tilt il meccanismo cellulare. Gli scienziati potranno sviluppare diverse terapie per un'ampia gamma di forme tumorali, ma non arriveranno mai a trovare un'unica cura per tutte, poiché il cancro stesso è una combinazione di malattie. Nuove cure e terapie continueranno inoltre ad essere immesse sul mercato, e tutte mireranno a contrastare il cancro intervenendo sulle sue radici molecolari e genetiche. Le più promettenti comprendono:

- L'antiangiogenesi, tramite cui si blocca la proliferazione dei vasi sanguigni che alimentano il tumore, impedendone la crescita.
- Le nanoparticelle, sorta di “bombe intelligenti” lanciate sulle cellule cancerose.
- La terapia genica rivolta in particolare al gene p53.
- Nuovi farmaci capaci di agire unicamente sulle cellule cancerose.
- Nuovi vaccini contro i virus che possono causare il cancro, per esempio il papillomavirus umano (HPV), che è all'origine del tumore del collo dell'utero.

Sfortunatamente, è improbabile che si giunga a una “pillola magica” con cui guarire il cancro una volta per tutte. È più verosimile che arriveremo a trattarlo un passo alla volta, e sono certo che la principale riduzione dell'indice di mortalità si verificherà quando il nostro ambiente sarà disseminato di chip a DNA, tramite cui monitorare l'eventuale sviluppo di cellule cancerose prima che diano vita a forme tumorali.

Come osserva il premio Nobel David Baltimore: «Il cancro è un esercito di cellule capace di controbattere alle nostre terapie con modalità che ci terranno impegnati in una battaglia continua»⁸.

Terapia genica

Malgrado le battute d'arresto che hanno segnato il percorso della terapia genica, i ricercatori sono tuttora convinti che nei prossimi decenni assisteremo a progressi continui e concreti. Molti di loro pensano che a metà del secolo la terapia genica rappresenterà il metodo standard per curare diverse malattie genetiche. Gran parte dei successi ottenuti dagli scienziati attraverso la ricerca sugli animali finiranno con il tradursi in progressi nelle ricerche sugli umani.

Finora la terapia genica ha rivolto la sua attenzione alle malattie causate dalle mutazioni di un singolo gene. Saranno infatti quelle ad essere curate per prime. Esistono però molte malattie che hanno origine da mutazioni in più geni, con fattori scatenanti di provenienza ambientale. Trovare una cura per tali patologie sarà più difficile, tuttavia si tratta di malattie importanti e comuni come il diabete, la schizofrenia, l'Alzheimer, il Parkinson e varie malattie cardiache. Tutte mostrano specifici pattern genetici, ma il loro insorgere non può essere attribuito a un solo gene. Per esempio, ci sono pazienti schizofrenici il cui gemello monozigote è completamente normale.

Negli ultimi anni sono state fatte molte dichiarazioni ufficiali secondo cui gli scienziati sarebbero finalmente riusciti a isolare alcuni dei geni implicati nella schizofrenia tracciando la storia genetica di determinate famiglie. È peraltro imbarazzante che spesso questi risultati non siano verificabili tramite altri studi indipendenti, quindi o sono errati, o forse nella schizofrenia sono coinvolti più geni, per non parlare del probabile influsso di fattori ambientali.

Resta il fatto che a metà del secolo la terapia genica dovrebbe essere ormai ben radicata ed efficace almeno per le patologie causate da un unico gene. Peraltro i pazienti potrebbero non accontentarsi di “aggiustare” i geni difettosi e pretendere di migliorarli in qualche modo.

Bambini “su misura”

Intorno al 2050 gli scienziati saranno non solo in grado di riparare i geni danneggiati, ma anche di perfezionarli e migliorarli.

L'umanità ha sempre desiderato poteri sovrumani, e tale aspirazione è profondamente radicata nella mitologia greca e romana, oltre che nei nostri sogni. Il grande eroe Ercole, uno dei semidèi più popolari del pantheon greco-romano, ottenne i suoi grandi poteri attraverso l'introduzione di geni divini, e non grazie all'esercizio fisico e alla corretta alimentazione! Sua madre, Alcmena, era una comune mortale la cui bellezza un giorno attirò l'attenzione di Zeus, che prese le sembianze del marito e si accoppiò con lei, facendole concepire un figlio. Zeus annunciò che quel bambino sarebbe diventato un grande guerriero, ma sua moglie Era s'ingelosì e tramò segretamente affinché il neonato morisse ritardandone la nascita. Il parto di Alcmena fu in effetti estremamente laborioso, e madre e figlio quasi ne morirono, ma all'ultimo momento il piano di Era venne scoperto e Alcmena diede alla luce un neonato più grande della media. Metà uomo e metà divinità, Ercole ereditò la forza sovrumana del padre e grazie a questa compì imprese eroiche e leggendarie.

Con ogni probabilità l'umanità non giungerà mai a produrre geni divini, ma di certo riuscirà a produrne di nuovi e migliori, tali da fornirci capacità sovrumane. Come per il difficile parto della madre di Ercole, anche noi dovremo superare molti ostacoli prima di portare a compimento questa tecnologia.

Ad ogni modo, verso la metà del secolo i bambini “su misura” potrebbero diventare realtà. Il biologo E.O. Wilson ha scritto: «*Homo sapiens*, la prima specie davvero libera, sta per licenziare la selezione naturale, la forza che ci ha prodotti. [...] Presto dovremo guardare dentro noi stessi e decidere che cosa vogliamo diventare»⁹.

Gli scienziati stanno già isolando alcuni dei geni che controllano funzioni fondamentali. Per esempio, il gene del “topo intelligente”, grazie a cui la memoria e la performance dei topi risultano aumentate, è stato isolato già nel 1999. I topi che hanno il gene intelligente mostrano maggiore capacità di orientamento in un labirinto e riescono a ricordare le cose.

Scienziati dell'Università di Princeton come Joseph Tsien hanno creato una generazione di topi geneticamente modificati che presenta un gene extra, NR2B, il quale contribuisce a innescare la produzione del neurotrasmettitore N-metil-D-aspartato (NMDA) nel proencefalo del topo. I creatori di questi topi superintelligenti li hanno battezzati *Doogie*¹⁰. Questi supertopi hanno “stracciato” i topi normali in una serie di test. Per esempio, quello secondo cui in un recipiente di acqua lattiginosa l'animale avrebbe dovuto trovare una piattaforma situata appena sotto la superficie e salirci sopra per riposarsi. I topi comuni hanno dimenticato la posizione della piattaforma, continuando a nuotare a caso nel recipiente, mentre i supertopi l'hanno trovata subito, al primo tentativo. O ancora, se ai due animali veniva mostrato un oggetto – uno nuovo a un topo e uno vecchio all'altro –, il supertopo riconosceva immediatamente quello nuovo, mentre l'altro non vi badava neppure.

La cosa più importante è che gli scienziati hanno capito che questi geni regolano le sinapsi del cervello. Se paragoniamo il cervello a un'immensa rete di autostrade, una sinapsi è l'equivalente di ciò che potrebbe succedere al casello se il pedaggio fosse troppo caro: le auto non potrebbero superare il casello (il messaggio non circola nel cervello). Se invece il

pedaggio è basso, le auto possono proseguire sulla loro strada (il messaggio circola nel cervello). Neurotrasmettitori come l'NMDA abbassano il costo del pedaggio al livello della sinapsi, rendendo possibile la circolazione libera del messaggio. I supertopi dispongono di due copie del gene NR2B, che a sua volta contribuisce alla produzione del neurotrasmettitore NMDA.

Gli esperimenti sui supertopi confermano la regola di Hebb: l'apprendimento ha luogo laddove specifici percorsi neuronali vengono rinforzati. Più specificamente, tali percorsi possono essere rinforzati regolando le sinapsi che collegano due fibre nervose, rendendo più facile il passaggio dei segnali attraverso le sinapsi stesse.

Tale risultato potrebbe contribuire a chiarire alcune peculiarità del processo di apprendimento. È stato accertato che gli animali in età avanzata imparano con maggiori difficoltà, e gli scienziati hanno potuto riscontrare tale effetto in tutto il regno animale. Una possibile spiegazione è che il gene NR2B perda una parte del suo potenziale con il passare degli anni.

Inoltre, come abbiamo già visto riguardo alla regola di Hebb, è presumibile che i ricordi si formino in coincidenza di una forte connessione neuronale. Questo sarebbe confermato dall'attività dei recettori dell'NMDA, che producono la connessione più forte.

Il gene dei supertopi

I ricercatori sono anche riusciti a isolare il gene dei supertopi, che produce un aumento della massa muscolare dando ai roditori un aspetto da “forzuti”. Tale gene è stato identificato per la prima volta in topi con muscoli straordinariamente sviluppati, e oggi sappiamo che si tratta del gene della miostatina, coinvolto nel controllo della crescita muscolare. Ma nel 1997 i ricercatori avevano scoperto che inibendo il gene della miostatina nei topi, la crescita muscolare si espandeva all'infinito.

Un altro enorme passo avanti è stato fatto subito dopo in Germania, quando gli scienziati hanno esaminato un neonato con muscoli apparentemente anormali nella parte superiore delle gambe e nelle braccia. Le analisi hanno infatti dimostrato che i muscoli di quel bambino erano il doppio del normale. Attraverso il sequenziamento dei geni del neonato e di quelli della madre, che era un'atleta velocista professionista, gli scienziati hanno potuto riscontrare la presenza di un pattern genetico analogo. In pratica, le analisi del sangue del neonato hanno mostrato la totale assenza di miostatina.

Dopo tale scoperta gli scienziati della John Hopkins Medical School erano ansiosi di entrare in contatto con pazienti affetti da malattie degenerative muscolari, i quali avrebbero potuto trarre vantaggio da un risultato del genere, ma hanno dovuto constatare, non senza un certo sconforto, che la metà delle telefonate che arrivavano al loro ufficio erano di culturisti che volevano quel gene per “gonfiarsi” ulteriormente, senza badare alle conseguenze. Forse quei culturisti si erano lasciati influenzare dall'enorme successo di Arnold Schwarzenegger, che peraltro ha ammesso di avere fatto uso di steroidi per lanciare la sua carriera.

Considerato il grande interesse suscitato dal gene della miostatina, e volendo circoscrivere i relativi pericoli, persino il comitato olimpico si è visto costretto a costituire una commissione speciale per analizzare la faccenda. A differenza degli steroidi, facilmente individuabili attraverso un test chimico, questo nuovo espediente, che ricordiamo coinvolge i geni e le proteine da loro create, è molto più difficile da rilevare.

Gli studi effettuati su gemelli monozigoti separati alla nascita hanno dimostrato che un'ampia gamma di tratti comportamentali è influenzata dalla genetica. In sostanza, hanno provato che circa il 50 per cento del comportamento dei gemelli è influenzato dai geni, e la parte restante dall'ambiente. Fra i tratti comportamentali di derivazione genetica abbiamo la memoria, il ragionamento sia verbale sia spaziale, la velocità di elaborazione dei dati, l'estroversione e la ricerca di emozioni forti.

Persino comportamenti una volta ritenuti complessi stanno infine rivelando la loro radice genetica. Per esempio, l'arvicola della prateria è monogama. Per contro, i topi di laboratorio sono promiscui. Larry Young, della Emory University, ha stupito il mondo della biotecnologia mostrando che il semplice trasferimento di un gene dell'arvicola delle praterie poteva produrre topi che esibivano un comportamento monogamo. Ogni animale ha una versione diversa di un particolare recettore di un peptide cerebrale associato al comportamento sociale e alla ricerca dei partner sessuali. Young ha introdotto nel topo il gene dell'arvicola relativo a tale recettore, per poi scoprire che il topo geneticamente modificato esibiva un comportamento paragonabile alla monogamia dell'arvicola.

Young ha commentato: «È probabile che nell'evoluzione dei comportamenti sociali complessi, per esempio la monogamia, siano implicati molti geni diversi. [...] I cambiamenti nell'espressione di un singolo gene possono avere effetto sulla manifestazione dei diversi fattori di tali comportamenti, come il senso di appartenenza»¹¹.

Anche depressione e felicità potrebbero avere radici genetiche. Sappiamo da tempo che ci sono persone capaci di mantenersi felici anche dopo avere vissuto gravi tragedie: sembrano cioè riuscire a concentrarsi sempre sulla metà piena del bicchiere, anche di fronte a sconfitte che avrebbero travolto chiunque altro. Inoltre questo genere di persone ha una salute migliore della norma. Daniel Gilbert, psicologo di Harvard, mi ha spiegato che una teoria potrebbe spiegare tale fenomeno: è probabile che ognuno di noi sia nato con una sorta di “punto di riferimento della felicità”; forse vi giriamo intorno giorno dopo giorno, tuttavia è qualcosa che sta lì dalla nascita. In futuro i farmaci o la terapia genica potrebbero consentirci di spostare tale punto di riferimento, soprattutto a beneficio di chi soffre di depressione cronica.

Effetti collaterali della rivoluzione biotecnologica

Verso la metà di questo secolo gli scienziati saranno in grado di isolare e modificare molti dei singoli geni che controllano una serie di caratteristiche umane. Questo però non significa che l'umanità potrà trarne immediato beneficio. Ci vorrà molto altro lavoro, probabilmente interi decenni, per risolvere problemi come gli effetti collaterali e le conseguenze indesiderate.

Tornando alla mitologia, in combattimento Achille era invincibile, e guidò i greci nella vittoriosa battaglia contro i troiani. Tuttavia il suo potere aveva un punto debole: quand'era bambino sua madre l'aveva immerso nelle acque del magico fiume Stige per renderlo invincibile, ma per compiere quel rituale aveva dovuto afferrarlo per il tallone. Quella parte del corpo, non essendo stata immersa nelle acque del fiume, era quindi rimasta vulnerabile. Infatti Achille morì proprio a causa di una freccia che lo colpì al tallone.

Oggi gli scienziati si chiedono se le “nuove” creature che nascono nei loro laboratori non abbiano anche loro un “tallone d'Achille” nascosto. Per esempio, sono già state create trentatré differenti varietà di supertopo con memoria e performance potenziate. Peraltro, il potenziamento della memoria ha evidenziato un effetto collaterale non previsto: talvolta i supertopi rimangono paralizzati dalla paura. Anche la benché minima scossa elettrica li atterrisce, lasciandoli a lungo impotenti e tremanti. «È un po' come se ricordassero troppo»¹², spiega Alcino Silva dell'UCLA, che ha sviluppato una sua varietà di supertopi. Gli scienziati si stanno infine rendendo conto che, per fare ordine nella nostra percezione del mondo e organizzare le conoscenze acquisite, dimenticare potrebbe essere altrettanto importante che ricordare. Forse per riordinare il nostro sapere è necessario sbarazzarsi di un bel po' di informazioni ingombranti.

Questo ci riporta a un caso del 1920 documentato dal neurologo russo A.R. Luria, quello di un uomo con una memoria talmente fotografica che gli bastava leggere una volta la *Divina commedia* di Dante per ricordarne ogni parola. Questa capacità gli tornava estremamente utile nel suo lavoro di giornalista, ma quell'uomo era del tutto incapace di comprendere le figure retoriche. Luria annotò: «Gli ostacoli che incontrava nel comprendere quanto aveva memorizzato erano insormontabili: ogni espressione dava origine a un'immagine, che a sua volta entrava in conflitto con altre immagini evocate dalla stessa espressione»¹³.

In pratica gli scienziati ritengono che tra memoria e oblio debba stabilirsi un equilibrio¹⁴. Se dimenticassimo troppo, forse non saremmo più oppressi dal dolore causato dagli errori precedenti, ma perderemmo anche la cognizione dei dati di fatto e alcune importanti capacità. Per contro, se ricordassimo troppo potremmo tenere a mente ogni particolare, ma finiremmo con il ritrovarci paralizzati dal ricordo di qualsiasi ferita o insuccesso subito. Solo un corretto equilibrio tra queste due funzioni può dunque garantirci una comprensione ottimale del mondo intorno.

I culturisti si stanno già lanciando su farmaci e terapie che promettono loro popolarità e gloria. L'eritropoietina (EPO) è un ormone che regola il trasporto di ossigeno nei tessuti, e in particolare nei globuli rossi, di cui stimola la produzione. Di conseguenza, assumere EPO garantisce una maggiore resistenza allo sforzo fisico. Ma poiché tale sostanza ispessisce il sangue, è anche collegata a ictus e attacchi cardiaci. C'è poi il cosiddetto *fattore di crescita insulino-simile* (IGF), utile perché stimola la sintesi proteica e contribuisce a gonfiare i muscoli, ma è stato dimostrato che stimola anche la crescita tumorale.

Anche se venissero approvate leggi che bandiscono qualsiasi forma di alterazione genetica, si tratterà di un fenomeno difficile da arrestare. Per esempio, qualsiasi coppia di genitori è geneticamente programmata dall'evoluzione stessa per concedere ai propri figli ogni possibile vantaggio: da un lato, potrebbe trattarsi di semplici lezioni di violino, danza o un'attività sportiva, dall'altro veri e propri miglioramenti genetici, in modo che i figli dispongano di maggiore memoria, capacità di concentrazione, doti atletiche e persino un aspetto migliore. Immaginiamo dei genitori che vengano a sapere che il figlio del vicino è stato sottoposto a manipolazioni genetiche che lo hanno in qualche modo "migliorato". Spinti da un umanissimo senso di competizione, tali genitori si sentirebbero costretti a garantire alla loro prole i medesimi vantaggi.

Come ha commentato Gregory Benford: «È un dato di fatto: le persone di bell'aspetto riescono meglio. Quali genitori rifiuterebbero di dare ai propri figli una bella spintarella (in ogni senso), in modo che possano riuscire meglio in questo mondo tanto progredito quanto spietatamente competitivo?»¹⁵.

A metà del secolo il miglioramento genetico sarà all'ordine del giorno. In realtà, se vorremo esplorare il sistema solare o abitare pianeti inospitali, sarà persino indispensabile.

C'è chi dice che dovremmo servirci di geni su misura che ci rendano più ricchi e felici. Altri sostengono che dovremmo consentire qualsiasi forma di miglioramento cosmetico. L'interrogativo di fondo resta però lo stesso: fino a dove potremo spingerci? Ad ogni modo, controllare la diffusione di geni "su misura" volti a migliorare l'aspetto e le prestazioni fisiche potrebbe diventare sempre più difficile. Di certo non vogliamo che la razza umana si divida in due fazioni contrapposte, quella dei "geneticamente migliorati" e quella dei "non migliorati", ma sarà la società stessa a decidere democraticamente quali limiti imporre alle nuove tecnologie genetiche. Per quanto mi riguarda, credo che ci saranno leggi con cui regolarle, presumibilmente orientate alla terapia genica per curare le malattie e consentirci di condurre una vita produttiva, ma restrittive riguardo al suo impiego per fini meramente cosmetici. Naturalmente, questo implica il possibile sviluppo di un "mercato nero dei geni", attraverso cui aggirare qualsiasi forma di proibizionismo: in tal caso dovremo adattarci a una società in cui almeno una piccola parte della popolazione godrà di miglioramenti genetici.

In linea di massima questo non dovrebbe rappresentare un disastro. Già oggi possiamo migliorare il nostro aspetto con la chirurgia plastica, quindi potrebbe non essere necessario ricorrere all'ingegneria genetica per questo scopo. Ma il pericolo potrebbe sorgere nel momento in cui qualcuno decidesse di mutare geneticamente la propria personalità. Con ogni probabilità il comportamento umano è influenzato da più geni contemporaneamente che interagiscono tra loro in modo complesso, quindi modificare i geni del comportamento potrebbe avere conseguenze indesiderate, la cui decodifica potrebbe peraltro richiedere interi decenni.

Ma che cosa dire del più ambito miglioramento genetico al mondo, ovvero l'estensione della vita umana?

Invertire il processo d'invecchiamento

Nel corso della storia re e dittatori sono riusciti a sottomettere imperi e popoli, ma una cosa è sempre sfuggita al loro controllo: l'invecchiamento. Non c'è quindi da stupirsi che la ricerca dell'immortalità sia uno degli obiettivi più ambiti fin dall'inizio della nostra storia.

Nella Bibbia Dio bandisce Adamo ed Eva dal giardino dell'Eden perché hanno disobbedito ai suoi ordini riguardo alla mela della conoscenza. Dio temeva che Adamo ed Eva potessero servirsi di quel sapere per accedere al segreto dell'immortalità e trasformarsi loro stessi in divinità. Nella Bibbia si legge: «Ecco l'uomo è diventato come uno di noi, per la conoscenza del bene e del male. Ora, egli non stenda più la mano e non prenda anche dell'albero della vita, ne mangi e viva sempre!» (Genesi 3,22).

Oltre alla Bibbia è opportuno ricordare anche un altro dei più grandi e antichi racconti del mondo, l'*Epopea di Gilgamesh*, che risale al XXVII secolo a.C. Il libro narra di un grande guerriero della Mesopotamia che, dopo avere assistito alla prematura dipartita del suo più grande e fedele amico, decide d'intraprendere un viaggio per scoprire il segreto dell'immortalità. Al guerriero sono infatti giunte voci su un vecchio saggio e sua moglie che avrebbero ricevuto dagli dèi il dono dell'immortalità, e che sarebbero quindi gli unici sopravvissuti al diluvio universale. Dopo una ricerca epica, Gilgamesh riesce a trovare il tanto agognato segreto, che però gli viene sottratto all'ultimo istante da una serpe.

Poiché l'*Epopea di Gilgamesh* è uno dei più antichi capolavori della letteratura, gli storici ritengono che lo stesso tema – la ricerca dell'immortalità – abbia ispirato anche l'*Odissea* di Omero, nonché la storia dell'Arca di Noè che troviamo nella Bibbia.

Molti altri re dell'antichità, come l'imperatore Qin, che unificò la Cina nel 200 a.C. circa, mandarono le loro navi alla ricerca della "Fonte della giovinezza", ma tutti fallirono. (Secondo la leggenda, l'imperatore Qin ordinò alla sua flotta di non ripresentarsi al suo cospetto senza avere trovato la fonte. I marinai non la trovarono e, troppo spaventati per tornare, sbarcarono altrove e scoprirono così il Giappone.)

Gli scienziati hanno a lungo creduto che la durata della vita umana fosse stabilita e immutabile, e che nessuna scoperta scientifica avrebbe potuto modificarla. Tuttavia negli ultimi anni tale convinzione è crollata sotto una valanga di risultati sperimentali che hanno rivoluzionato questo ambito di ricerca. La gerontologia, che una volta era un campo di studi sonnolento e stagnante, è oggi uno dei più attivi, al punto da attrarre finanziamenti per centinaia di milioni di dollari e aumentare sempre di più le possibilità di sviluppo commerciale.

I segreti del processo d'invecchiamento vengono svelati giorno dopo giorno, e in tale rivoluzione la genetica ha un ruolo chiave. Analizzando il regno animale, possiamo constatare che esiste una varietà di vite con durate diverse. Per esempio, rispetto al nostro parente geneticamente più prossimo, lo scimpanzé, il DNA umano differisce soltanto dell'1,5 per cento, eppure la durata media della nostra esistenza è superiore del 50 per cento. Analizzando quella piccola percentuale di geni che ci distinguono dallo scimpanzé, riusciremo forse a determinare perché viviamo più a lungo.

Tutto ciò ha lentamente prodotto una "teoria unificata dell'invecchiamento", in virtù della quale diversi filoni di ricerca sono confluiti in un'unica trama coerente. Ormai gli scienziati

sanno come interpretare l'invecchiamento: è un accumularsi di errori a livello genetico e cellulare, errori che si sommano progressivamente secondo diverse modalità. Per esempio, il metabolismo produce radicali liberi e ossidazione, e questo danneggia i delicati meccanismi molecolari delle nostre cellule, provocandone per l'appunto l'invecchiamento. Ma tali errori possono anche essere originati da "spazzatura" molecolare, ovvero detriti che si accumulano all'interno e all'esterno delle cellule.

Questo accumulo di errori genetici è un sottoprodotto della seconda legge della termodinamica: l'entropia totale (cioè il caos) è in continuo aumento. È lo stesso motivo per cui la vita è universalmente caratterizzata da progressivo arrugginimento, putrefazione, decadenza e così via. La seconda legge della termodinamica è inevitabile. Non c'è una singola cosa nell'intero universo, dai fiori nei campi al nostro corpo (e persino l'universo stesso!) che non sia condannata a decadere e morire.

Esiste però una piccola via di fuga da tale legge secondo cui è l'entropia *totale* a crescere in modo inarrestabile. Ciò significa che possiamo concretamente ridurre l'entropia a un ambito specifico, e quindi invertire il processo d'invecchiamento, a condizione che aumentiamo l'entropia altrove. Ringiovanire sarebbe quindi possibile, ma a condizione di seminare scompiglio da qualche altra parte. (È ciò a cui allude Oscar Wilde nel suo celebre romanzo *Il ritratto di Dorian Gray*: il signor Gray è misteriosamente ed eternamente giovane, ma custodisce il segreto del suo ritratto che invecchia orribilmente. L'ammontare complessivo dell'invecchiamento continua dunque a crescere.)

Il principio dell'entropia si può anche riscontrare nel funzionamento di un frigorifero: al suo interno l'entropia decresce con il diminuire della temperatura, ma per far decrescere l'entropia occorre un motore, che aumenta il calore prodotto dalla macchina, incrementando così l'entropia totale dell'ambiente esterno. La parte posteriore di un frigorifero è infatti sempre calda.

Come ha detto il celebre scienziato e premio Nobel Richard Feynman: «[...] in biologia non si è trovato ancora niente che indichi che la morte è inevitabile. Questo mi fa pensare che non è affatto inevitabile e che è solo questione di tempo, ma prima o poi i biologi scopriranno che cosa provoca questo problema e quella terribile malattia universale, la temporaneità del corpo umano, verrà curata»¹⁶.

La seconda legge è anche osservabile nell'azione dell'estrogeno, l'ormone sessuale femminile che mantiene le donne giovani ed esuberanti fino al momento della menopausa, dopo la quale il processo d'invecchiamento accelera, con conseguente incremento del tasso di mortalità femminile. L'intervento dell'estrogeno nel corpo è paragonabile al rifornimento di un'auto sportiva con benzina ad alto numero di ottani: è infatti grazie a quel combustibile che l'automobile garantisce una performance eccellente, che però paga a livello di logoramento e usura del motore. Nelle donne tale usura e logoramento può manifestarsi con un tumore al seno: le iniezioni di estrogeno sono infatti note per accelerare lo sviluppo di questo tipo di cancro. Quindi il prezzo che le donne pagano per giovinezza ed esuberanza prima della menopausa è il rischio di un aumento dell'entropia totale, nella fattispecie un tumore al seno. (Questa malattia ha di recente mostrato un notevole incremento statistico, e ciò ha dato origine a una serie di teorie ancora assai controverse. Secondo una di queste, l'insorgenza del tumore al seno sarebbe in parte correlata al totale dei cicli mestruali avuti da una donna nella sua esistenza. Per tutta l'antichità, subito dopo la pubertà le donne erano più o meno costantemente in gravidanza, almeno fino alla menopausa, che segnava un'immediata decadenza e morte. Ciò significa che

avevano pochi cicli mestruali, bassi livelli di estrogeno e quindi, con ogni probabilità, un tasso relativamente basso di tumori al seno. Oggi le ragazze giungono alla pubertà in età più giovane, hanno soltanto una media di 1,5 figli a testa e sopravvivono bene alla menopausa, quindi sono maggiormente esposte all'estrogeno, e di conseguenza all'eventualità di ammalarsi di tumore al seno.)

Di recente sono emersi diversi indizi interessanti riguardo a geni e invecchiamento. Tanto per cominciare, i ricercatori hanno dimostrato che è possibile allevare generazioni di animali che vivono più a lungo della media. In particolare, cellule di lievito, vermi nematodi e moscerini della frutta possono essere creati in laboratorio perché vivano più del normale.

Michael Rose, dell'Università della California a Irvine, ha stupito il mondo scientifico annunciando di essere riuscito ad allungare del 70 per cento la vita media dei moscerini della frutta attraverso la riproduzione selettiva. Nei suoi supermoscerini, o moscerini Matusalemme, sono stati rinvenuti alti quantitativi di superossido dismutasi (SOD), un enzima antiossidante che rallenta i danni causati dai radicali liberi. Nel 1991 Thomas Johnson, dell'Università del Colorado a Boulder, ha isolato un gene age-1, che sembra implicato nell'invecchiamento dei nematodi, poiché pare incrementi la loro vita media del 110 per cento. «Se trovassimo qualcosa di simile all'age-1 negli esseri umani, potremmo ottenere risultati spettacolari»¹⁷, ha commentato Johnson.

Gli scienziati hanno ormai isolato vari geni (age-1, age-2, daf-2) che controllano e regolano il processo d'invecchiamento degli organismi inferiori, ma tali geni hanno i loro equivalenti anche nel corpo umano. Infatti uno di questi scienziati ha osservato che alterare la durata della vita delle cellule del lievito è stato quasi come accendere la luce premendo un interruttore: una volta attivato uno specifico gene, le cellule vivevano a più lungo; se invece veniva disattivato, la loro vita si accorciava.

Produrre cellule del lievito più longeve è piuttosto semplice rispetto ai gravosi esperimenti con gli esseri umani, la cui vita è talmente lunga da rendere pressoché impossibili i test necessari. Tuttavia è presumibile che in futuro isolare i geni responsabili dell'invecchiamento diventerà più facile e veloce, poiché tutti disporremo del nostro genoma personale registrato su un supporto informatico. Allora gli scienziati avranno un enorme database con miliardi di geni da analizzare al computer, e potranno passare in rassegna milioni di genomi confrontando due gruppi specifici, i giovani e gli anziani. Grazie a quest'analisi comparata potranno scoprire dove l'invecchiamento insorge a livello genetico. Una scansione preliminare di questi geni umani ha già permesso di isolarne una sessantina, la cui attività sembra incentrata soprattutto sull'invecchiamento.

Gli scienziati sanno, per esempio, che la longevità è qualcosa che ci si trasmette in famiglia. Di solito le persone che vivono a lungo hanno avuto genitori longevi. Non si tratta di un effetto scontato, ma la sua incidenza è tuttavia misurabile. Anche lo studio dei gemelli monozigoti separati alla nascita consente di osservare tale effetto a livello genetico, tuttavia la nostra aspettativa di vita non è determinata al 100 per cento dai geni che abbiamo: alla luce degli studi finora compiuti, i ricercatori del settore ritengono che tale aspettativa sia attribuibile ai geni soltanto per il 35 per cento. Dunque in futuro, quando ognuno potrà avere il suo genoma personale per un centinaio di dollari, e quindi potremo confrontare al computer il genoma di milioni di persone, saremo in grado di isolare quei geni che controllano almeno parzialmente la durata della nostra vita.

Inoltre tali ricerche computerizzate riusciranno a individuare con assoluta precisione i punti d'origine del processo d'invecchiamento. Per esempio, sappiamo che in un'automobile l'usura si presenta innanzitutto nel motore, dove avviene la combustione del carburante. Allo stesso modo, l'analisi genetica ha già dimostrato che l'invecchiamento si concentra nel "motore" della cellula, ovvero i mitocondri. Gli scienziati hanno così potuto restringere il campo di ricerca ai "geni dell'invecchiamento" e ai relativi metodi per accelerare la loro riparazione all'interno dei mitocondri, così da invertire gli effetti dell'invecchiamento.

Nel 2050 dovremmo essere in grado di rallentare il processo d'invecchiamento attraverso una serie di espedienti, per esempio le cellule staminali, il "supermercato del corpo umano" e la terapia genica per riparare i geni dell'invecchiamento. Potremmo anche arrivare a vivere centocinquanta anni, se non di più. Nel 2100 il processo d'invecchiamento potrebbe essere invertito accelerando i meccanismi di riparazione cellulare, cosa che ci consentirà di vivere più a lungo di quanto sia attualmente immaginabile.

Riduzione delle calorie

Questa teoria potrebbe altresì spiegare lo strano fenomeno secondo cui una riduzione delle calorie assunte di almeno il 30 per cento aumenta di altrettanto la durata della vita. Qualsiasi organismo finora studiato, dalle cellule del lievito ai ragni, dagli insetti ai conigli, dai cani alle scimmie, manifesta lo stesso bizzarro comportamento. Gli animali sottoposti a questo regime alimentare sviluppano meno tumori e disturbi cardiaci, hanno una bassa incidenza di diabete e meno malattie correlate al processo d'invecchiamento. Infatti la riduzione delle calorie è l'*unico* espediente che, dopo essere stato ripetutamente testato su quasi tutto il regno animale, si è dimostrato garanzia di longevità, e funziona sempre!

Fino a poco tempo fa le sole specie animali su cui non si era certi di ottenere lo stesso effetto erano i primati, di cui fanno parte anche gli umani, perché la durata della loro vita era troppo lunga. In particolare, gli scienziati erano ansiosi di analizzare i risultati della riduzione delle calorie sulle scimmie reso, e nel 2009 un lavoro dell'Università del Wisconsin¹⁸ ha dimostrato che, dopo essere state sottoposte a un regime nutritivo ipocalorico, queste scimmie mostravano condizioni di salute migliori sotto tutti i punti di vista: minore insorgenza di diabete, meno tumori e meno malattie cardiache. In generale, le scimmie sottoposte a riduzione delle calorie stavano meglio dei loro parenti che avevano continuato a nutrirsi normalmente.

Ecco dunque una teoria che potrebbe spiegare il fenomeno: la natura concede agli animali due possibilità di "scelta" riguardo all'uso delle loro energie. Nei periodi di abbondanza l'energia viene impiegata nella riproduzione, e nei periodi di scarsità il corpo blocca i processi riproduttivi, conserva l'energia e cerca di superare la crisi momentanea. Nel regno animale si rischia facilmente di morire di fame, è una condizione comune, ragione per cui gli animali "scelgono" spesso di arrestare la riproduzione, rallentare il metabolismo e vivere più a lungo sperando in giorni migliori.

Il santo graal delle ricerche sull'invecchiamento consiste nel tentare di preservare i benefici della riduzione delle calorie senza dover subire l'aspetto negativo, cioè la fame. A quanto pare l'uomo tende naturalmente a mettere su chili, anziché perderli. Infatti sottoporsi a un regime nutritivo ipocalorico non è così divertente, poiché si tratta di mangiare come un eremita! Bisogna inoltre considerare che gli animali sottoposti a una riduzione delle calorie particolarmente severa diventano letargici, indolenti e perdono completamente i loro stimoli sessuali.

Gli scienziati sono quindi in cerca di un gene che controlli tale meccanismo, al fine di cogliere tutti i benefici della limitazione calorica evitando gli spiacevoli "effetti collaterali".

Nel 1991 Leonard P. Guarente, ricercatore presso il MIT, ha scoperto un indizio importante al riguardo mentre con i suoi colleghi cercava un gene che potesse allungare la vita delle cellule di lievito. Guarente, David Sinclair di Harvard e altri scienziati hanno scoperto il gene SIR2, coinvolto negli effetti della riduzione delle calorie: è infatti il gene che rileva le riserve energetiche della cellula. Quando tali riserve sfiorano il minimo, per esempio durante una carestia, il gene si attiva, come del resto ci si aspetterebbe da un qualunque meccanismo che deve controllare gli effetti della limitazione calorica. I ricercatori hanno inoltre scoperto che il SIR2 del lievito ha un equivalente nei topi e negli esseri umani, il SIRT, che produce proteine

chiamate *sirtuine*. Al che si sono messi sulle tracce delle sostanze chimiche che attivavano le sirtuine e sono arrivati al resveratrolo.

La faccenda si faceva dunque interessante, perché gli scienziati erano convinti che il resveratrolo potesse essere responsabile dei benefici del vino rosso, e quindi spiegare il “paradosso francese”. La cucina francese è infatti celebre per i suoi condimenti ricchi, pieni di grassi e di oli, eppure i francesi sembrano avere una vita di durata normale. Tale mistero potrebbe essere spiegato dal fatto che i francesi consumano molto vino rosso, che contiene appunto il resveratrolo.

Gli scienziati hanno scoperto che gli attivatori della sirtuina proteggono i topi da una serie impressionante di malattie¹⁹, tra cui il tumore del polmone e del colon, il melanoma, il linfoma, il diabete di tipo 2, le malattie cardiovascolari e, secondo Sinclair, anche l'Alzheimer. Se almeno una minima parte di tali malattie fosse curabile attraverso le sirtuine anche negli esseri umani, per la medicina si tratterebbe di un'autentica rivoluzione.

Di recente è stata avanzata una nuova teoria per spiegare tutte le straordinarie proprietà del resveratrolo. Sempre secondo Sinclair, lo scopo principale della sirtuina è impedire l'attivazione di certi geni. Per esempio, se dipanati completamente, i cromosomi di una singola cellula si espanderebbero per circa 180 centimetri, dando così vita a una molecola astronomicamente lunga. Ad ogni modo, in qualsiasi istante sono necessari solo pochi geni inclusi in questo tratto molecolare, mentre gli altri restano inattivi. Le cellule “imbavagliano” la maggior parte dei geni momentaneamente non necessari avvolgendo il cromosoma con un solido rivestimento di cromatina, sostenuto proprio dalla sirtuina.

Talvolta però questi delicatissimi cromosomi subiscono catastrofici danni, per esempio a causa di una frattura totale di uno dei filamenti. Le sirtuine intervengono immediatamente, contribuendo alla riparazione del cromosoma danneggiato. Peraltro, nel momento in cui abbandonano la loro postazione ordinaria per soccorrere il cromosoma danneggiato, non possono più assolvere al loro compito principale, che è quello di disattivare i geni. Quando i geni lasciati incustoditi si attivano è il caos genetico, un guasto momentaneo che, almeno secondo Sinclair, potrebbe essere uno dei meccanismi chiave dell'invecchiamento.

Se ciò dovesse dimostrarsi vero, forse un giorno le sirtuine ci consentiranno non solo di arrestare il processo d'invecchiamento, ma persino d'invertirlo. Riparare e ripristinare i danni al DNA delle nostre cellule è difficile. Sinclair è però convinto che l'invecchiamento sia causato in buona parte dalle sirtuine che si sono sottratte al loro compito principale, nonché dalla conseguente degenerazione cellulare. E secondo lui le sirtuine sarebbero facilmente reindirizzabili al loro compito originario.

Fonte della giovinezza?

Uno degli effetti indesiderati di questa scoperta è stato il circo mediatico a cui ha dato vita. Non c'è voluto molto prima che trasmissioni come *60 Minutes* e *The Oprah Winfrey Show* si interessassero al resveratrolo, scatenando un'autentica barabanda su internet, con aziende poco raccomandabili che spuntavano dal giorno alla notte promettendo l'elisir di lunga vita. Sembrava che "guaritori" e ciarlatani volessero tutti saltare sul carro del resveratrolo!

Ho intervistato Guarente, l'uomo da cui è partito tutto questo cancan, nel suo laboratorio. Si è dimostrato molto cauto, poiché si rendeva conto dell'effetto mediatico che i risultati delle sue ricerche avevano causato, e anche delle errate interpretazioni che tale riverbero avrebbe potuto scaturire. Guarente era infatti particolarmente infastidito dal fatto che molti siti internet avessero cominciato a pubblicizzare il resveratrolo come se fosse una pozione per l'eterna giovinezza. Il fatto che qualcuno avesse cercato di approfittare dell'improvvisa fama del resveratrolo per fare soldi era sconvolgente, soprattutto perché i risultati delle ricerche erano del tutto provvisori. Per contro, Guarente non ha escluso la possibilità che se un giorno dovesse essere scoperto qualcosa di simile alla "Fonte dell'eterna giovinezza", sempre che una cosa del genere esista, le SIR2 avranno sicuramente una loro parte. E il suo collega Sinclair ha ammesso di assumere quotidianamente grandi quantitativi di resveratrolo²⁰.

Nella comunità scientifica l'interesse per la ricerca sull'invecchiamento è tale che nel 2009 la Harvard Medical School ha sponsorizzato una conferenza a cui hanno partecipato i maggiori ricercatori del settore. Tra il pubblico c'erano molte persone che stavano intenzionalmente seguendo un regime alimentare ipocalorico, e con il loro aspetto scavato e fragile dimostravano di avere messo alla prova su loro stessi le proprie convinzioni scientifiche. C'erano anche i membri del Club 120, che riunisce individui intenzionati a vivere fino a centoventi anni. L'interesse si è concentrato soprattutto sulla Sirtris Pharmaceuticals, fondata da David Sinclair e Christoph Westphal, la quale attualmente sta sottoponendo a prove cliniche alcuni surrogati del resveratrolo. Westphal si è detto sicuro che «in un periodo compreso tra i prossimi cinque e sette anni disporremo di medicinali per la longevità»²¹.

Sostanze chimiche che alcuni anni fa non esistevano nemmeno sono ora oggetto di grande interesse scientifico. Per curare il mieloma multiplo e il cancro al colon si sta testando l'SRT501, mentre l'SRT2104 viene sperimentata per curare il diabete di tipo 2. Le diverse équipes di ricerca stanno lavorando non solo sulle sirtuine, ma anche su tutta una serie di altri geni, proteine e sostanze chimiche (IGF-1, TOR e rapamicina, detta anche sirolimus).

Solo il tempo potrà dirci se qualcuno di questi test clinici si dimostrerà concretamente utile. La storia della medicina è costellata di frodi, trucchi e inganni, soprattutto riguardo a una questione delicata come quella dell'invecchiamento. Tuttavia la scienza, a differenza della superstizione, si basa su dati riproducibili, verificabili e falsificabili. Grazie ai programmi del National Institute on Aging, con cui vengono messe alla prova diverse sostanze per dimostrare il loro effetto sull'invecchiamento, potremo finalmente verificare se gli studi compiuti sugli animali daranno risultati analoghi sugli esseri umani.

Dobbiamo davvero morire?

William Haseltine, uno dei pionieri della biotecnologia, mi ha confessato: «La vera essenza della vita è l'immortalità, non la mortalità. Il DNA è una molecola immortale, comparsa per la prima volta forse tre miliardi e mezzo di anni fa. E quella stessa identica molecola, tramite la duplicazione, è ancora in circolazione oggi. [...] È vero che il nostro corpo decade, ma abbiamo discusso dei progetti futuri per ritardare tale decadimento, così da prolungare l'esistenza di due o tre volte. Forse, se arriveremo a conoscere meglio il funzionamento del cervello, sapremo anche come prolungare la vita del corpo e della mente a tempo indeterminato. E non penso che sarà qualcosa d'innaturale».

I biologi evolutivi sottolineano che durante i loro anni di riproduttività gli animali subiscono una pressione evolutiva. Superato questo periodo della vita rischiano infatti di diventare un fardello per il loro stesso gruppo, ragione per cui probabilmente l'evoluzione interviene con la morte per vecchiaia. Siamo dunque programmati per morire, ma forse possiamo “riprogrammarci” per vivere una vita più lunga.

In realtà, analizzando per esempio i mammiferi scopriamo che più grandi sono, minore è il loro tasso metabolico, e maggiore la durata della loro vita. I topi, per esempio, consumano una quantità enorme di cibo rispetto al loro peso corporeo, e vivono circa quattro anni al massimo. Gli elefanti hanno invece un metabolismo molto più lento e arrivano a settant'anni. Se il metabolismo è una somma di errori, allora riducendo il tasso metabolico arriveremmo davvero a vivere più a lungo. (Questo potrebbe anche spiegare il detto “bruciare la candela da entrambe le estremità”. Una volta ho letto il racconto di un genio che promette a un essere umano di esaudire ogni suo desiderio. L'uomo, senza pensarci troppo, chiede di vivere un migliaio di anni, così il genio lo accontenta trasformandolo in un albero.)

I biologi evolutivi tentano di spiegare la durata della vita in termini di effettivo contributo della longevità a una specie affinché sopravviva nella natura selvaggia. Secondo loro la durata della vita è determinata geneticamente in modo da consentire a una specie di sopravvivere e prosperare. Dal loro punto di vista i topi vivrebbero così poco perché sono costantemente perseguitati da un'ampia gamma di predatori, e spesso muoiono di freddo durante l'inverno. I topi che trasmettono i loro geni alla generazione successiva sono quelli che hanno una prole numerosa, non quelli che vivono più a lungo. (Se questa teoria è corretta, dovremmo aspettarci che qualora i topi riuscissero a sfuggire ai loro predatori vivrebbero più a lungo. In effetti i pipistrelli, che hanno le stesse dimensioni dei topi, vivono tre volte e mezzo di più.)

C'è però un'anomalia: la durata della vita dei rettili. Di alcune specie, infatti, non sappiamo quanto tempo restino al mondo, e potrebbero anche vivere per sempre! Coccodrilli e alligatori diventano sempre più grandi, ma continuano ad essere energici e vigorosi. (Secondo i libri di testo gli alligatori vivrebbero fino a settant'anni, ma questo dato forse dipende dal fatto che il guardiano dello zoo è morto a quell'età... Altri testi ammettono più onestamente che la durata della vita di questi animali supera i settant'anni, ma non è mai stata misurata con precisione.) In realtà questi animali non sono affatto immortali, poiché anche loro muoiono per cause fortuite, fame, malattia eccetera. Tuttavia, se ben custoditi in un giardino zoologico, potrebbero vivere davvero a lungo, tanto da far pensare che possano vivere per sempre.

L'orologio biologico

Un altro indizio interessante è quello dei telomeri delle cellule, che agiscono come una sorta di orologio biologico. I telomeri si trovano alle estremità di un cromosoma, come i sigilli di plastica alle estremità dei lacci delle scarpe, e ad ogni riproduzione diventano un po' più corti. Dopo una sessantina di riproduzioni (per le cellule della pelle) si disfano, segnando l'ingresso della cellula in una condizione di senescenza, con conseguente incapacità di funzionare adeguatamente. Potremmo paragonare i telomeri alla miccia di un candelotto di dinamite: se al termine di ogni ciclo di riproduzione la miccia si fa più corta, quando questa si esaurisce la cellula smette di riprodursi.

Si tratta del cosiddetto *limite di Hayflick*, che sembrerebbe determinare il numero massimo di mitosi di alcune cellule, definendo la durata massima della loro attività. Le cellule cancerose, per esempio, non conoscono alcun limite di Hayflick e producono un enzima chiamato *telomerasi*, che impedisce l'accorciamento progressivo dei telomeri.

L'enzima telomerasi può essere sintetizzato, e se applicato alle cellule della pelle ne provoca una riproduzione apparentemente illimitata, tale da renderle immortali.

Esiste però un pericolo. Anche le cellule cancerose sono immortali, poiché si moltiplicano all'infinito all'interno di un tumore. È infatti per tale motivo che le cellule cancerose sono così letali: la loro riproduzione illimitata impedisce il corretto funzionamento del corpo. Ne consegue che l'enzima telomerasi dovrà essere studiato con grande attenzione, e qualunque terapia ne preveda l'utilizzo per fermare le lancette dell'orologio biologico dovrà essere debitamente testata per accertarsi che non produca forme tumorali.

Immortalità più giovinezza

L'idea di allungare la vita degli uomini è fonte di gioia per alcuni e di orrore per altri. Dobbiamo infatti considerare le problematiche dell'esplosione demografica e dell'invecchiamento della società, sempre più popolata da una maggioranza di anziani che rischia di mandare in bancarotta un paese.

In realtà una combinazione di terapie biologiche, meccaniche e nanotecnologiche potrebbe non solo farci vivere più a lungo, ma anche mantenere la nostra giovinezza. Robert A. Freitas Jr., che applica la nanotecnologia alla medicina, ha dichiarato: «Questi interventi diventeranno probabilmente usuali fra diversi decenni. Con controlli e “pulizie” annuali, e ogni tanto qualche riparazione importante, la nostra età biologica potrebbe essere ripristinata una volta all'anno in modo che rimanga più o meno costante all'età fisiologica selezionata. Alla fine probabilmente si morirà ancora di cause accidentali, ma si potrà vivere almeno dieci volte più a lungo di adesso»²².

In futuro per vivere più a lungo non sarà dunque necessario abbeverarsi alla leggendaria “Fonte della giovinezza”. Più probabilmente, si tratterà di combinare diverse procedure:

1. Coltivare nuovi organi tramite l'ingegneria dei tessuti e le cellule staminali, così da poter sostituire quelli ormai inservibili o ammalati.
2. Assumere un cocktail di proteine ed enzimi specificamente ideati per incrementare i meccanismi di riparazione cellulare, regolare il metabolismo, resettare l'orologio biologico e ridurre l'ossidazione.
3. Ricorrere alla terapia genica per modificare i geni responsabili del processo d'invecchiamento.
4. Condurre uno stile di vita sano ed equilibrato (esercizio fisico e corretta alimentazione).
5. Utilizzare nanosensori per individuare malattie come il cancro anni prima che si trasformino in un vero problema.

Popolazione, cibo e inquinamento

Uno degli interrogativi più assillanti riguarda gli eventuali effetti dell'aumento dell'aspettativa di vita sulla sovrappopolazione del pianeta. Nessuno sa che cosa potrebbe derivarne. Ritardare il processo d'invecchiamento ha infatti molte implicazioni di carattere sociale. Se dovessimo vivere di più, il pianeta non sarebbe presto sovrappopolato? Qualcuno sottolinea che un notevole allungamento della vita si è già verificato, poiché solo in un secolo è passata dai quarantacinque ai settanta-ottant'anni, e anziché provocare un'esplosione demografica ha prodotto l'effetto inverso: vivendo di più le persone si dedicano soprattutto alla carriera e procreano più tardi. Infatti la popolazione nativa europea sta diminuendo a vista d'occhio.

La conclusione logica è che le persone che vivono più a lungo e godono di maggiore ricchezza tendono a fare meno figli. Potendo vivere qualche decennio in più, gli esseri umani finirebbero dunque con il riprogrammare le fasi della loro esistenza, mettendo al mondo meno figli e scaglionandoli nel tempo.

Altri sostengono che la gente rifiuterà questo genere di tecnologie, ritenendole innaturali e incompatibili con le proprie credenze religiose. In effetti alcuni sondaggi informali hanno dimostrato che la maggior parte delle persone considera la morte un evento del tutto naturale, tale da attribuire più significato all'esistenza. (Bisogna però considerare che le persone interpellate erano soprattutto giovani o di mezz'età. Se lo stesso sondaggio venisse condotto in una casa di riposo, dove gli anziani si limitano a consumarsi lentamente, magari in condizioni dolorose, l'esito potrebbe essere ben diverso.

Come ha detto Greg Stock dell'UCLA: «I nostri disperati sforzi per trasformarci in padreterni e le nostre preoccupazioni circa un'esistenza più lunga potrebbero semplicemente sfociare in una semplice domanda collettiva: quando potremo prendere una pillola?»²³.

Nel 2002, dati demografici alla mano²⁴, gli scienziati hanno potuto stimare che il 6 per cento di tutti gli esseri umani che avevano mai calpestato il suolo terrestre era ancora in vita. Ciò è dovuto al fatto che la popolazione umana è rimasta stazionaria a circa un milione di persone per la maggior parte della sua storia. È stata la scarsità di viveri a mantenere basso il numero di esseri umani. Persino durante il periodo glorioso dell'impero romano si stima che la sua popolazione non superasse i cinquantacinque milioni di persone.

Tuttavia negli ultimi trecento anni abbiamo assistito a un picco incredibile della popolazione mondiale, che coincide con l'avvento della medicina moderna e della rivoluzione industriale, grazie alle quali abbiamo potuto disporre di cibo e risorse in abbondanza. In particolare, la popolazione del pianeta è aumentata vertiginosamente nel xx secolo, soprattutto tra il 1950 e il 1992: da due miliardi e mezzo a cinque miliardi e mezzo. Oggi siamo a più di sette miliardi di abitanti. Ogni anno la Terra accoglie settantanove milioni di persone in più²⁵, una cifra che supera quella dell'intera popolazione della Francia. Di conseguenza sono state fatte molte previsioni catastrofiche, ma finora l'umanità è riuscita a schivare i colpi. Nel lontano 1798 Thomas Malthus evidenziò i rischi di un aumento della popolazione sproporzionato rispetto alla disponibilità di cibo: carestie, rivolte, crollo dei governi e fame diffusa sarebbero durati finché non si fosse ristabilito un equilibrio tra popolazione mondiale e risorse. Poiché le scorte di cibo aumentavano in modo lineare e la popolazione cresceva esponenzialmente, sembrava inevitabile che a un certo punto il mondo giungesse al punto di rottura.

Malthus predisse che tale carestia di massa avrebbe colpito l'umanità verso la metà del XIX secolo. Tuttavia a quell'epoca l'umanità avrebbe soltanto vissuto la primissima fase della sua espansione, e grazie alla scoperta di nuove terre, all'insediamento delle colonie e all'incremento delle risorse alimentari, i disastri previsti da Malthus non ebbero mai luogo.

Negli anni Sessanta del Novecento fu lanciato un altro allarme di stampo malthusiano, secondo cui la bomba demografica avrebbe presto colpito il pianeta, causandone il crollo entro il 2000. Ma anche questa previsione si è dimostrata errata: la rivoluzione verde ha permesso di aumentare notevolmente i raccolti, e quindi le scorte di cibo. I dati dimostrano che tale incremento ha superato la crescita della popolazione mondiale, screditando almeno temporaneamente la logica di Malthus. Nel periodo compreso tra il 1950 e il 1984 la produzione di cereali è aumentata di oltre il 250 per cento, perlopiù grazie a nuovi fertilizzanti e tecniche agricole.

Ancora una volta l'umanità è riuscita a trovare una soluzione. Oggi però l'espansione demografica ha raggiunto un nuovo picco, e qualcuno dice che stiamo per toccare il limite della capacità planetaria di produzione di cibo. La produzione alimentare sta infatti cominciando a livellarsi, sia per quanto riguarda i cereali sia per ciò che proviene dagli oceani. I principali scienziati al servizio del governo britannico prevedono un'esplosione demografica e un conseguente, drammatico calo delle risorse alimentari ed energetiche entro il 2030. Secondo l'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Alimentazione e l'Agricoltura, entro il 2050 il mondo dovrà produrre il 70 per cento in più di risorse alimentari, se vuole nutrire i due miliardi e trecento milioni di persone che nel frattempo saranno venute al mondo.

Unica alternativa, la catastrofe!

È però ipotizzabile che tali proiezioni non tengano pienamente conto della portata del problema. Allorché centinaia di milioni di abitanti della Cina e dell'India entreranno a far parte del ceto medio, vorranno anche loro godere degli stessi beni che vedono nei film hollywoodiani – due auto per famiglia, belle villette in periferia, hamburger e patatine fritte –, e tutto questo potrebbe prosciugare le risorse del pianeta. Infatti Lester Brown, noto ambientalista e fondatore del World Watch Institute di Washington, D.C., mi ha confidato di ritenere poco probabile che il pianeta riesca a garantire uno stile di vita così dispendioso a centinaia di milioni di persone.

Qualche speranza per la popolazione mondiale

Ci sono tuttavia alcuni barlumi di speranza. Il controllo delle nascite, una volta argomento tabù, ha ormai attecchito nel mondo industrializzato e si sta aprendo un varco anche nelle coscienze dei cittadini dei paesi in via di sviluppo.

In Europa e in Giappone assistiamo a un'implosione, anziché a un'esplosione demografica. In alcune nazioni europee l'indice di natalità è piombato a 1,2-1,4 figli per famiglia, ben al di sotto del livello di sostituzione di 2,1. Il Giappone sta vivendo una crisi demografica alimentata da tre fonti: anzitutto, ha la popolazione con l'indice d'invecchiamento più rapido del mondo (per esempio, per oltre vent'anni le donne giapponesi hanno mantenuto il record della massima aspettativa di vita); secondo, l'indice di natalità è in caduta libera; terzo, il governo porta avanti una politica dell'immigrazione estremamente rigida. Queste tre spinte democratiche sono per il paese un disastro al rallentatore. E in Europa le cose non vanno granché meglio.

Una delle lezioni che possiamo trarne è che la prosperità è il più efficace contraccettivo al mondo. In passato i contadini, privi com'erano di piani pensionistici o di previdenza sociale, cercavano di avere il maggior numero possibile di figli, che oltre a rappresentare forza lavoro si sarebbero presi cura di loro durante la vecchiaia. Il calcolo era presto fatto: ogni nuovo figlio rappresentava due braccia in più nei campi, maggiori guadagni per la famiglia e ulteriore sostegno per i duri anni della vecchiaia. Ma quando i contadini sono diventati ceti medio, con un uno stile di vita più agiato e una pensione sicura, questa equazione si è rovesciata: ogni figlio ha cominciato a significare meno soldi e peggiore qualità della vita.

Nel Terzo mondo il problema è opposto: la popolazione è in rapida crescita, e gran parte delle persone ha meno di vent'anni. Persino dove ci si attendeva la massima esplosione demografica, per esempio in Asia e nell'Africa subsahariana, l'indice di natalità ha segnato un regresso, e i motivi sono diversi.

Tanto per cominciare abbiamo assistito a una rapida urbanizzazione del ceto più basso, poiché i contadini hanno abbandonato le terre per cercare la fortuna nelle megalopoli. Nel 1800 solo il 3 per cento della popolazione mondiale viveva in città, ma alla fine del XX secolo si era già arrivati al 47 per cento, valore che sembra destinato ad aumentare vertiginosamente nei prossimi decenni.

Crescere figli in città è molto più costoso, e questo ha drasticamente ridotto il numero di bambini per famiglia. Vitto, alloggio e tutto il resto sono una spesa notevole per gli abitanti dei quartieri poveri delle megalopoli, e facendo lo stesso calcolo giungono tutti alla medesima conclusione: ogni bambino in più peggiora la loro qualità di vita.

Occorre inoltre sottolineare che con l'industrializzazione di paesi come Cina e India si è prodotto un ceto medio che vuole meno figli, proprio come nell'Occidente industrializzato. Infine l'istruzione delle donne, persino in paesi poveri come il Bangladesh, ha dato vita a una nuova mentalità, e anche in questo caso il risultato è una diminuzione della prole. In seguito a un esteso progetto educativo, l'indice di natalità del Bangladesh è sceso da 7 a 2,7, anche senza un fenomeno di urbanizzazione o industrializzazione su larga scala.

Considerati tutti questi elementi, le Nazioni Unite hanno dovuto continuamente rivedere le

loro proiezioni circa la futura crescita demografica. Benché le diverse stime non concordino, la popolazione mondiale potrebbe raggiungere i nove miliardi entro il 2040. E sebbene sia certo che continuerà a crescere, lo farà a un ritmo sempre più lento, e alla fine si stabilizzerà. Con uno sguardo ottimistico, questo dovrebbe accadere entro la fine del secolo, quando la popolazione mondiale raggiungerà gli undici miliardi di persone.

Naturalmente, si potrebbe ipotizzare che tale numero superi le capacità di sostentamento del pianeta. Ma tutto dipende da come definiamo tale capacità, perché nel frattempo potrebbe intervenire un'altra rivoluzione verde.

La biotecnologia rappresenta una delle possibili soluzioni a tali problematiche. In Europa la bioingegneria degli alimenti si è guadagnata una pessima reputazione, e potrebbe mantenerla per un'intera generazione. Infatti l'industria biotecnologica ha venduto agli agricoltori sia i diserbanti sia le specie vegetali geneticamente modificate per resistergli. Questo ha sicuramente rappresentato maggiori introiti per le aziende, ma per il consumatore si è trattato di più sostanze tossiche nel cibo, quindi il settore è rapidamente imploso. Tuttavia in futuro potrebbero entrare sul mercato sementi come quella del "super riso", specificamente modificate per produrre raccolti abbondanti in ambienti aridi, ostili e poco fertili. Sul piano etico, sarà difficile opporsi all'introduzione di colture sicure che potrebbero sfamare centinaia di milioni di persone.

Far risorgere specie estinte

Gli scienziati non vogliono solo allungare la vita degli uomini e ingannare la morte. A loro interessa anche portare indietro le creature dal regno dei morti.

Nel film *Jurassic Park* i ricercatori estraggono DNA dai fossili dei dinosauri, li inseriscono nelle uova di rettili e riportano in vita specie estinte da tempo. Sebbene fino a oggi non sia mai stato rinvenuto DNA di dinosauro in condizioni tali da poter essere utilizzato, alcuni interessanti indizi ci inducono a credere che un sogno del genere non sia poi così irrealizzabile. Entro la fine del secolo i nostri zoo potrebbero infatti essere popolati da creature che non calpestano la superficie del pianeta da migliaia di anni.

Come abbiamo già visto, Robert Lanza ha compiuto un primo passo fondamentale clonando il banteng, una specie in via d'estinzione. Sarebbe un gran peccato se questa rara specie di bovini dovesse scomparire per sempre, per questo Lanza sta lavorando a un'altra possibilità: produrre un nuovo clone, ma di sesso opposto. Nei mammiferi il sesso di un organismo è determinato dai cromosomi X e Y. Armeggiando con questi cromosomi, Lanza pensa di poter clonare un altro animale di sesso opposto partendo dalla medesima carcassa da cui ha realizzato il primo.

Se tale procedura dovesse avere successo, un giorno gli zoo di tutto il mondo potrebbero mostrare al pubblico cuccioli di specie animali estinte da molto tempo.

Una volta ho cenato con Richard Dawkins, il celebre autore de *Il gene egoista*, e nel corso della nostra chiacchierata si è spinto persino oltre. Dawkins ipotizza infatti che un giorno riusciremo concretamente a ricreare forme di vita che non solo sono a rischio estinzione, ma che da tempo immemore sono scomparse dalla faccia della Terra. Prima di tutto Dawkins ha osservato che ogni ventisette mesi il numero di geni di cui si è ottenuto il sequenziamento raddoppia. Poi ha calcolato che nel prossimo decennio sequenziare un qualsiasi genoma costerà soltanto 160 dollari, ragione per cui è convinto che un giorno i biologi se ne andranno in giro con un piccolo kit che nel giro di pochi minuti gli permetterà di sequenziare l'intero genoma di qualsiasi forma di vita incontrino.

Ma non si ferma qui, poiché teorizza che entro il 2050 sapremo ricostruire un intero organismo sulla base del suo genoma. Scrive Dawkins: «Sono convinto che entro il 2050 sapremo leggere il linguaggio [della vita]. Inseriremo il genoma di una specie animale sconosciuta in un computer che ricostruirà non solo la forma dell'animale, ma anche il mondo in cui i suoi antenati... vivevano, compresi i loro predatori e prede, parassiti e ospiti, luoghi di nidificazione e persino speranze e paure»²⁶. Citando l'opera di Sydney Brenner, Dawkins ritiene persino che giungeremo a ricostruire il genoma del cosiddetto anello mancante tra l'uomo e la scimmia.

Sarebbe sicuramente un successo straordinario, visto che a giudicare dai fossili e dal DNA finora reperiti, ci siamo diversificati dalle scimmie circa sei milioni di anni fa.

Poiché il nostro DNA differisce da quello degli scimpanzé per un 1,5 per cento, in futuro un software dedicato potrebbe analizzare il DNA di uomo e scimmia e procedere per approssimazione matematica fino a ottenere il DNA dell'antenato comune che diede origine a entrambe le specie. Una volta ricostruito matematicamente l'ipotetico genoma di tale antenato, un altro programma potrebbe elaborare una ricostruzione visiva delle sue sembianze e delle sue

caratteristiche. Prendendo in prestito il nome dato al celebre fossile di un australopiteco, Dawkins lo chiama Lucy Genome Project.

Sempre secondo Dawkins, se un computer riuscisse a ricreare matematicamente il genoma dell'anello mancante, sarebbe anche possibile produrre concretamente il DNA di quell'organismo, impiantarli in un ovulo umano e inserirlo nel grembo di una donna, che infine partorirebbe uno dei nostri antenati.

Si tratta di uno scenario che soltanto qualche anno fa sarebbe stato considerato assurdo e insensato, ma i recenti sviluppi dimostrano che l'idea è meno bislacca di quanto sembri.

Tanto per cominciare, una manciata di geni chiave che ci distinguono dagli scimpanzé è già stata analizzata in ogni particolare. Uno dei candidati più interessanti è il gene ASPM, responsabile del controllo delle dimensioni del cervello. Il cervello umano ha cominciato ad aumentare la sua massa diversi milioni di anni fa, e per ragioni ancora poco chiare. Quando tale gene subisce una mutazione produce la microcefalia, cioè cranio piccolo e cervello conseguentemente ridotto del 70 per cento, che equivale all'incirca alle dimensioni del cervello dei nostri antenati di milioni di anni fa. È affascinante come i computer a nostra disposizione possano analizzare la storia di questo gene, e le analisi finora svolte dimostrano che negli ultimi cinque-sei milioni di anni, ovvero nel periodo trascorso da quando ci siamo distinti dagli scimpanzé, tale gene è mutato quindici volte, il che coincide con l'incremento delle dimensioni del nostro cervello.

Se confrontato con quello dei nostri cugini primati, l'indice di mutazione di tale gene fondamentale si è dimostrato in assoluto più veloce negli umani.

Ancora più interessante è la regione HAR1 del genoma, che contiene soltanto centodiciotto lettere²⁷. Nel 2004 si è scoperto che in tale regione la differenza cruciale tra gli scimpanzé e gli uomini si riduce a diciotto lettere (ovvero acidi nucleici). Gli scimpanzé e i polli si sono diversificati trecento milioni di anni fa, eppure le loro coppie di basi nella regione HAR1 differiscono soltanto di due lettere. Ciò significa che tale regione del DNA si è dimostrata straordinariamente stabile nel corso di tutta la storia dell'evoluzione, almeno fino all'avvento degli umani. È quindi ipotizzabile che il gene che ci rende umani si trovi da quelle parti.

C'è però uno sviluppo ancora più spettacolare che fa sembrare possibile il progetto di Dawkins. Abbiamo sequenziato l'intero genoma del nostro parente genetico più prossimo, l'uomo di Neanderthal, estintosi decine di migliaia di anni fa, e forse l'analisi computerizzata del genoma di umani, scimpanzé e Neanderthal getterà le basi per una perfetta ricostruzione matematica del genoma dell'anello mancante.

Riportare in vita il Neanderthal?

Con ogni probabilità umani e Neanderthal si sono distinti in due specie diverse già trecentomila anni fa. I Neanderthal scomparvero però dall'Europa circa trentamila anni fa, per questo si è sempre pensato che fosse impossibile estrarre DNA utilizzabile da una specie estinta nella preistoria.

Tuttavia nel 2009 un'équipe guidata da Svante Pääbo, del Max Planck Institut für evolutionäre Anthropologie di Lipsia, ha tracciato un primo profilo del genoma completo del Neanderthal, ottenuto analizzando i resti di sei individui. Si è trattato di un risultato fenomenale: proprio come ci si attendeva, il genoma del Neanderthal è molto simile a quello umano, poiché entrambi contengono tre miliardi di coppie di basi, ma è anche diverso in alcuni aspetti fondamentali.

Richard Klein, antropologo di Stanford, commentando il lavoro di Pääbo e colleghi ha affermato che tale ricostruzione potrebbe rappresentare una risposta ai vecchi interrogativi sul Neanderthal, per esempio se era in grado di parlare. Gli esseri umani si distinguono per due particolari mutazioni del gene FOXP2, che almeno in parte è responsabile della nostra capacità di pronunciare migliaia di vocaboli. Ma un'indagine accurata ha permesso di accertare che anche il Neanderthal presentava le stesse mutazioni nel medesimo gene. È quindi concepibile che il Neanderthal sia stato il primo essere al mondo a usare la voce in un modo simile al nostro.

Poiché i Neanderthal erano i nostri parenti genetici più prossimi, gli scienziati li considerano estremamente interessanti. Qualcuno ha persino ipotizzato che in futuro riusciremo a ricostruire completamente il DNA del Neanderthal e a inserirlo in un ovulo, così da assistere, a migliaia di anni dalla sua estinzione, alla sua ricomparsa sulla Terra.

George Church, della Harvard Medical School, ha già stimato che riportare in vita il Neanderthal costerebbe “solo” trenta milioni di dollari, e ha redatto un progetto per compiere questa impresa. Per cominciare bisognerebbe suddividere l'intero genoma umano in tronchi di circa centomila coppie di DNA ciascuno. Ogni troncone verrebbe poi inserito in un batterio, e quindi modificato geneticamente per farlo combaciare con quello del Neanderthal. Ri assemblando tutti i tronconi modificati otterremmo il DNA completo dell'uomo di Neanderthal. Tale cellula sarebbe quindi riprogrammata in modo da tornare allo stato embrionale, e inserita nell'utero di una femmina di scimpanzé²⁸.

Ad ogni modo, Richard Klein ha manifestato alcune ragionevoli preoccupazioni: «Sì, ma lo metterete in uno zoo o lo porterete ad Harvard?»²⁹.

Lo stesso Dawkins avverte che tutte queste teorie circa la “risurrezione” di specie da tempo estinte, come il Neanderthal, «implicano senza dubbio considerazioni di carattere etico»³⁰. Se riportati in vita, di quali diritti potranno godere i Neanderthal? Che cosa accadrà se vorranno riprodursi? Chi si assumerà la responsabilità di eventuali incidenti che potrebbero subire o causare ad altri?

Se fosse possibile riportare in vita il Neanderthal, gli scienziati potrebbero anche creare uno zoo interamente dedicato agli animali estinti, come i mammut?

Riportare in vita i mammut?

L'idea non è così folle come sembra. Gli scienziati sono già riusciti a sequenziare buona parte del genoma del mammut siberiano, ovviamente estinto. In precedenza, dai lanuti mammut congelatisi in Siberia decine di migliaia di anni fa erano stati estratti solo minuscoli frammenti di DNA, ma Webb Miller e Stephan C. Schuster dell'Università Statale della Pennsylvania hanno reso possibile l'impossibile: sono riusciti a estrarre tre miliardi di coppie di basi di DNA dalle carcasse congelate dei mammut. Prima di tale "miracolo" il risultato migliore nel sequenziamento di una specie estinta era stato di tredici milioni di coppie di basi, equivalenti a meno dell'1 per cento del genoma dell'animale. (Questo risultato straordinario è stato possibile grazie a un nuovo *dispositivo di sequenziamento ad alte prestazioni*, che permette di esaminare migliaia di geni alla volta anziché uno a uno.) Un'altra carta di fondamentale importanza è stata sapere dove cercare quell'antico DNA. Miller e Schuster avevano scoperto che il DNA migliore non era nel corpo, ma nel follicolo peloso del mammut.

Ora possiamo dire che far risorgere un animale estinto è biologicamente possibile. «Un anno fa avrei detto che si trattava di pura fantascienza»³¹, ha commentato lo stesso Schuster. Ma oggi, dopo il sequenziamento di tutto questo genoma del mammut, non è affatto una questione da escludere. Schuster ha persino abbozzato un progetto: ha stimato che appena quattrocentomila mutazioni nel DNA di un elefante asiatico potrebbero dare vita a un animale dotato di tutte le caratteristiche fondamentali del mammut. In sostanza, dovremmo semplicemente alterare geneticamente il DNA di un elefante perché possa subire tutte queste mutazioni, inserirlo nel nucleo di un ovulo di elefante e quindi impiantare l'ovulo fecondato in una femmina d'elefante.

La stessa équipe sta già pensando al sequenziamento del DNA di un altro animale estintosi nel 1936: il tilacino, un lupo marsupiale dell'Australia strettamente imparentato con il diavolo della Tasmania. Si sta anche parlando del sequenziamento del dodo, tanto che il modo di dire "*dead as a dodo*" (morto come un dodo, cioè indubbiamente morto) potrebbe anche diventare obsoleto, se gli scienziati riuscissero a estrarre DNA utilizzabile dai tessuti molli e dalle ossa delle carcasse di dodo conservate a Oxford (e non solo lì).

Jurassic Park?

Tutto questo solleva l'interrogativo più ovvio: possiamo "risuscitare" i dinosauri? Per farla breve, forse no. La possibilità di creare un Jurassic Park alla Spielberg dipende dalla capacità di recuperare DNA intatto da una forma di vita scomparsa oltre sessantacinque milioni di anni fa, cosa che potrebbe risultare impossibile. Sebbene nei femori dei fossili di alcuni dinosauri siano già stati reperiti tessuti molli, finora non si è riusciti a estrarne alcun DNA, ma solo proteine. E malgrado tali proteine costituiscano la prova chimica della stretta relazione tra *Tyrannosaurus rex*, rane e galline, siamo ben lontani dalla possibile riproduzione del genoma di un dinosauro.

Tuttavia Dawkins indica un'altra possibile strada, ovvero la ricostruzione matematica della sequenza del DNA di un "dinosauro generico" attraverso la comparazione del genoma di varie specie di uccelli e di rettili. Dawkins sottolinea, infatti, che si può fare in modo che il becco dei polli sviluppi dei denti in germe, così come si possono far crescere le gambe ai serpenti. Ne consegue che antiche caratteristiche ormai perse nelle sabbie del tempo potrebbero essere ancora latenti nel genoma di questi animali.

Risultati del genere sono possibili perché i biologi hanno infine compreso che i geni possono essere attivati, e di conseguenza anche disattivati. Ciò significa che i geni riguardanti caratteristiche ormai scomparse potrebbero ancora esistere, ma essere semplicemente dormienti. Riattivando quei geni che da molto tempo non vengono più impiegati da certi organismi, potremmo ripristinare caratteristiche che non abbiamo mai potuto osservare.

Per esempio, nell'antichità le zampe delle galline erano dotate di membrana interdigitale. Il gene responsabile di tale membrana non è scomparso, si è semplicemente disattivato. In linea di principio, riattivandolo potremmo ottenere galline con le zampe palmate. Allo stesso modo, il corpo umano era ricoperto di pelame, poi andato perso quando abbiamo cominciato a sudare, che è un metodo estremamente efficace per regolare la temperatura corporea. (I cani non sono dotati di ghiandole sudoripare, quindi per "rinfrescare" il corpo sono costretti ad ansimare.)

A quanto pare il gene del pelame umano esiste ancora, ma è semplicemente disattivato. Riattivarlo potrebbe dunque restituirci quel pelo che un tempo ci caratterizzava. (Qualcuno ha persino ipotizzato che potrebbe essere questa l'origine della leggenda del lupo mannaro.)

Se partiamo dal presupposto che alcuni geni dei dinosauri sono stati disattivati milioni di anni fa ma continuano a sopravvivere dormienti nel genoma degli uccelli, dovrebbe essere sufficiente identificarli e riattivarli per dare vita a uccelli con alcuni tratti peculiari dei dinosauri. Quella di Dawkins resta quindi un'ipotesi teorica, ma non del tutto irrealizzabile.

Creare nuove forme di vita

Eccoci allora alla domanda definitiva: potremo dunque creare forme di vita a nostro piacimento? Sapremo non solo riportare in vita le specie estinte, ma crearne di completamente nuove, come per esempio un maiale con le ali o qualche altro animale descritto nei racconti della mitologia? Per quanto riguarda il secolo in corso, tutto questo resterà al di fuori della portata della scienza, che tuttavia comincerà a percorrere il lungo cammino che la condurrà infine alla capacità di trasformare il regno animale.

Finora il fattore limitante è stato la nostra incapacità di trasferire i geni. Infatti si possono modificare in modo affidabile soltanto singoli geni. Per esempio, è possibile trovare il gene responsabile della luminescenza, che si manifesta in certi animali in condizioni di oscurità. Tale gene, una volta isolato e trasferito in altre specie, potrebbe far sviluppare la medesima caratteristica. Infatti le ricerche attualmente in corso riguardano la possibilità di modificare gli animali da compagnia attraverso l'aggiunta di singoli geni.

Ma per creare una specie del tutto nuova, come la chimera della mitologia greca (che è la combinazione di tre diversi animali), si dovrebbero trapiantare migliaia di geni. Creare un maiale con le ali, per esempio, significherebbe trasferire nel corpo dell'animale le centinaia di geni che rappresentano le ali, nonché modificare i muscoli e l'apparato circolatorio affinché tutto continui a funzionare. E questo è attualmente al di là delle capacità umane.

Occorre tuttavia sottolineare che alcuni passi significativi in direzione di tale futuristica eventualità sono già stati compiuti. Con loro grande sorpresa, i biologi hanno scoperto che i geni riguardanti la configurazione fisica (dalla testa ai piedi) rispecchiano lo stesso ordine in cui compaiono nei cromosomi. Si tratta dei geni HOX, responsabili della descrizione della struttura del corpo. A quanto pare la natura ha preso una scorciatoia, poiché ha riprodotto l'ordine degli organi del corpo tramite la sequenza dei cromosomi stessi. Ciò ha a sua volta accelerato il processo tramite cui è possibile decifrare la storia evolutiva di questi geni.

Sappiamo inoltre di geni regolatori che a quanto pare gestiscono le proprietà di molti altri geni. Sarebbe sufficiente manipolare una manciata di tali geni regolatori per intervenire sulle caratteristiche di un gran numero di altri geni.

Possiamo dunque constatare che madre natura ha deciso di creare la struttura corporea nello stesso modo in cui un architetto realizza il suo progetto. Infatti la struttura geometrica del progetto architettonico riproduce lo stesso ordine dell'effettiva configurazione fisica di un edificio. Inoltre i progetti sono modulari, cosicché in un singolo progetto sono contenuti "sottoprogetti" che ribadiscono la struttura finale.

Oltre alla creazione di specie animali completamente ibride attraverso l'impiego delle caratteristiche modulari del genoma, esiste anche l'eventualità di applicare la genetica agli esseri umani e, servendoci della biotecnologia, riportare in vita personaggi storici. Lanza è convinto che essendo possibile estrarre una cellula intatta dal cadavere di una persona morta molto tempo prima, è anche possibile riportare tale persona in vita. Nell'abbazia di Westminster, a Londra, sono conservati con la massima cura i corpi di re e regine, nonché di poeti, autorità religiose, politiche e persino scientifiche, come Isaac Newton. Un giorno, mi ha confidato Lanza, potrebbe essere possibile riportarli in vita attraverso il DNA intatto estratto dai

loro resti.

Il film *I ragazzi venuti dal Brasile* prende spunto dagli esperimenti del dottor Mengele volti a “ricreare” Hitler. Non bisogna tuttavia credere che sia possibile ricreare il genio o le caratteristiche che hanno reso famosi i diversi personaggi storici. Com'è stato sottolineato da un biologo, anche se dovessimo riportare in vita Hitler, forse avremmo soltanto un artista di secondo piano (cioè quello che in effetti era Hitler prima che assumesse la guida del movimento nazista).

Fine di tutte le malattie?

Il profetico film *La vita futura*, liberamente tratto da un romanzo di H.G. Wells, predice il futuro della civiltà dopo che la Seconda guerra mondiale ha fatto precipitare l'umanità in una condizione di profonda sofferenza e miseria. Tutte le conquiste degli esseri umani vanno a finire in macerie, e bande di signori della guerra approfittano di una popolazione impoverita e allo sbando. Ma alla fine del film un gruppo di scienziati lungimiranti, armato di armi potentissime, comincia a ristabilire l'ordine, e la civiltà risorge così dalle sue ceneri. In una scena c'è una bambina a cui viene narrata la storia brutale del XX secolo e sente parlare di qualcosa chiamato *raffreddore*. «Ma che cos'è un raffreddore?» domanda la piccola, e le viene risposto che era una malattia che veniva curata molti anni prima.

Forse non sarà proprio così.

Curare tutte le malattie è uno dei nostri obiettivi di sempre. Ma anche nel 2100 gli scienziati non saranno in grado di curare tutte, poiché le malattie cambiano prima ancora che riusciamo a porvi rimedio, e inoltre ce ne sono troppe. Talvolta dimentichiamo di vivere in un mare sterminato di batteri e virus che esistono da miliardi di anni, ovvero da prima che gli esseri umani cominciassero a calpestare il suolo terrestre, e che continueranno a esistere anche dopo la scomparsa dell'*Homo sapiens*.

Molte di queste malattie provengono dagli animali. È il prezzo che paghiamo per avere addomesticato certe specie, cosa che abbiamo iniziato a fare circa diecimila anni fa. Gli animali sono dunque un grande serbatoio di malattie latenti che con ogni probabilità sopravviveranno alla razza umana. Di norma tali malattie colpiscono soltanto piccoli gruppi di individui, ma oggi, considerata la nascita di grandi megalopoli, le malattie trasmissibili possono diffondersi rapidamente tra la popolazione umana, fino a raggiungere un punto critico e originare pandemie.

Per esempio, dopo avere analizzato la sequenza genetica del virus dell'influenza gli scienziati hanno constatato, non senza una certa sorpresa, che ha origine dagli uccelli. Sono infatti molti gli uccelli portatori di diverse varianti del virus dell'influenza, senza tuttavia subirne gli effetti. Può però accadere che i maiali, dopo avere mangiato gli escrementi degli uccelli, fungano da laboratorio genetico improvvisato. E ovviamente ci sono spesso allevatori che vivono negli immediati paraggi. Alcuni ipotizzano che sia proprio questo il motivo per cui il virus dell'influenza proviene spesso dall'Asia, dove la popolazione delle campagne è solita praticare l'allevamento misto, per esempio di anatre e maiali, con cui vive a stretto contatto.

La recente epidemia di influenza H1N1 è soltanto l'ultima ondata di mutazioni dell'influenza degli uccelli e dei maiali.

Uno dei problemi è che gli umani continuano a occupare nuovi territori, tagliando le foreste e costruendo sobborghi e industrie, e così facendo s'imbattono in antiche malattie rimaste a lungo latenti nel regno animale. Vista la continua espansione della popolazione umana, non possiamo che attenderci nuove sgradevoli sorprese dalla scomparsa delle foreste.

Per esempio, ci sono considerevoli prove genetiche che l'HIV sia una derivazione del virus di immunodeficienza delle scimmie (SIV), che dopo avere originariamente infettato questi animali si è trasferita negli esseri umani. Allo stesso modo, l'hantavirus ha cominciato a colpire la popolazione del sud-ovest solo dopo che si è stabilita nel territorio dei roditori delle praterie. La malattia di Lyme (o borreliosi), diffusa soprattutto dalle zecche, ha invaso le periferie del

nord-ovest perché oggi la gente mette su casa vicino alle foreste abitate dalle zecche. Con ogni probabilità il virus Ebola colpì alcune tribù umane già nell'antichità, ma è soltanto con l'avvento degli aerotrasporti che si è potuta diffondere a più ampi settori della popolazione. Persino il morbo del legionario è con ogni probabilità una malattia dell'antichità, originariamente dovuta alle acque stagnanti e tornata a proliferare a causa degli impianti di condizionamento dell'aria, che hanno diffuso la malattia agli anziani sulle navi da crociera.

Ciò significa che ci saranno ancora molte altre sorprese, con on-date di nuove malattie esotiche che non mancheranno di fare scalpore sui media internazionali. E sfortunatamente, per trovare una cura alle nuove malattie potrebbe volerci un bel po' di tempo. Per esempio, anche il comune raffreddore non ha una vera e propria cura. Il mare di prodotti che possiamo trovare in una qualsiasi farmacia riesce soltanto a trattarne i sintomi, ma non ci libera dal virus vero e proprio. Il problema è che si ritiene ci siano oltre trecento varianti del rhinovirus che causa il comune raffreddore, e creare trecento vaccini diversi sarebbe semplicemente troppo costoso.

Per quanto concerne l'HIV la situazione è ancora peggiore, perché i ceppi diversi potrebbero essere addirittura migliaia. Inoltre è stato constatato che l'HIV muta così rapidamente che se anche riuscissimo a sviluppare un vaccino per un suo ceppo, in quel momento sarebbe già mutato o sul punto di farlo. In sostanza, trovare un vaccino per l'HIV è un po' come centrare un bersaglio mobile.

In futuro riusciremo sicuramente a curare molte delle attuali malattie, ma ce ne saranno sempre alcune che sfuggiranno anche alla scienza più avanzata.

Il mondo nuovo

Entro il 2100 avremo il controllo del nostro destino genetico, e a quel punto ci dovremo confrontare con la distopia descritta da Aldous Huxley nel suo profetico romanzo *Il mondo nuovo*, ambientato nel 2540. Quando uscì per la prima volta, nel 1932, *Il mondo nuovo* causò notevole scompiglio e costernazione a livello internazionale. Tuttavia, più di settantacinque anni dopo molte delle previsioni contenute in quel libro si sono già concretizzate. Quando Huxley scrisse di bambini concepiti in provetta, della trasformazione del sesso da procreativo a ricreativo, nonché del comune ricorso ad ogni sorta di medicinali, la società britannica ne fu scandalizzata, eppure oggi viviamo in un mondo in cui il concepimento in provetta e le pillole anticoncezionali non destano più alcun scalpore. (La sua unica, importante previsione a non essersi ancora avverata è la clonazione degli esseri umani.)

Huxley immaginò una società gerarchica, in cui i medici clonavano deliberatamente embrioni umani con danni cerebrali per essere destinati al servizio dell'élite dominante. A seconda del loro livello di manipolazione cerebrale, gli embrioni umani venivano classificati in categorie diverse: dagli alfa, esseri perfetti e destinati al comando, agli epsilon, la categoria inferiore, poco più che schiavi mentalmente ritardati. In sostanza, per Huxley la tecnologia non aveva liberato l'umanità da ogni forma di povertà, ignoranza e malattia, ma si era trasformata in un incubo, imponendo a tutti una stabilità artificiale segnata dalla corruzione a spese di intere popolazioni ridotte in schiavitù. Sebbene tante delle ipotesi contenute nel suo romanzo siano risultate per molti versi esatte, Huxley non prevede l'avvento dell'ingegneria genetica. Se avesse potuto immaginare anche solo qualcosa di simile, con ogni probabilità avrebbe avuto un altro motivo di preoccupazione: la specie umana si dividerà in diversi segmenti, con genitori instabili e governi subdoli pronti a manipolare i geni dei nostri figli? A ben guardare, molti genitori vestono già i loro figli con abiti bizzarri e li fanno partecipare a competizioni ridicole, quindi perché non mutare i geni dei piccoli così da assecondare i capricci dei grandi? In verità i genitori sono già programmati a livello evolutivo per garantire alla loro progenie ogni bene possibile, dunque perché non manomettere anche i loro geni?

Per citare un esempio di come le cose potrebbero andare per il verso sbagliato, pensiamo al semplice sonografo. Sebbene i medici lo abbiano largamente adottato come strumento per monitorare la gravidanza, ciò ha comportato una massiccia epidemia di aborti di feti femminili, soprattutto nelle zone di campagna della Cina e dell'India. Uno studio effettuato a Bombay ha dimostrato che 7997 aborti su 8000 hanno riguardato feti femminili. Nella Corea del Sud il 65 per cento dei terzogeniti è di sesso maschile. Presto i figli di genitori che hanno scelto di ricorrere a un aborto deciso in base al genere si troveranno nella loro fase riproduttiva, e milioni di sventurati maschi scopriranno che in giro non ci sono più femmine. Questo provocherà a sua volta enormi sconvolgimenti sociali, e i contadini che volevano che soltanto i maschi portassero il loro nome si ritroveranno senza nipoti.

Oppure pensiamo agli Stati Uniti, dove l'abuso dell'ormone della crescita umana (HGH) è in continuo aumento, poiché spesso reclamizzato come cura contro l'invecchiamento. In origine l'HGH serviva a correggere le deficienze ormonali nei bambini la cui crescita risultava anomala, poi la produzione di quest'ormone ha dato vita a un commercio clandestino inusitato, basato su dati assai discutibili riguardo alla sua ipotetica utilità contro l'invecchiamento. In sostanza,

grazie a internet ci ritroviamo con una marea crescente di esseri umani pronti a fare da cavie per terapie miracolose.

In definitiva, possiamo dire che appena si rendono disponibili nuovi strumenti tecnologici la gente finisce per abusarne e provocare un'enorme quantità di guai. Ma che cosa accadrebbe se ci lasciassimo abbagliare dalle promesse dell'ingegneria genetica?

Nello scenario peggiore potrebbe concretizzarsi l'incubo immaginato da H.G. Wells in *La macchina del tempo*, in cui si parla di una razza umana che, raggiunto l'anno 802.701 d.C., si divide in due razze distinte. Scrive Wells: «Gradatamente cominciavo a intuire la verità: la razza umana non era rimasta di un'unica specie, ma si era sviluppata sotto due forme ben distinte fra loro: quei graziosi fanciulli del mondo superiore non erano gli unici discendenti della nostra stirpe; anche quella bianca, repellente Cosa notturna fuggita davanti a me era l'erede dell'evoluzione dei tempi».

Se vogliamo avere un'idea di quali siano le variazioni possibili a livello di razza umana, non dobbiamo fare altro che dare un'occhiata a quanto successo al cane domestico. Sebbene ne esistano migliaia di razze, tutte discendono dal *Canis lupus*, il lupo grigio, che fu addomesticato circa diecimila anni fa, al termine dell'ultima era glaciale. A causa della riproduzione selettiva praticata dai suoi padroni umani, oggi i cani presentano una sorprendente varietà di dimensioni e forme: struttura fisica, temperamento, colore del manto e capacità sono state radicalmente alterate tramite processi di selezione.

Poiché i cani invecchiano circa sette volte più rapidamente degli esseri umani, possiamo stimare che tra i lupi e i cani domestici attuali siano intercorse un migliaio di generazioni. Applicando lo stesso concetto agli umani, la selezione sistematica potrebbe portare a una loro suddivisione in migliaia di razze nel giro di soli settantamila anni, ma si tratterebbe pur sempre della stessa specie. Con l'ingegneria genetica lo stesso processo potrebbe essere smisuratamente accelerato, tanto da ridurre la durata a una sola generazione.

Fortunatamente, abbiamo motivo di credere che la speciazione degli umani non avrà mai luogo, almeno nel secolo a venire. Secondo il principio dell'evoluzione, di solito una singola specie si divide in due quando si separa geograficamente per dare vita a due popolazioni distinte, su cui poi interverrà la selezione naturale. È accaduto per esempio in Australia, dove la separazione fisica di varie specie animali ha portato all'evoluzione di forme di vita che non si trovano da nessun'altra parte, come il canguro e altri marsupiali. Per contro, la popolazione umana è estremamente mobile, non ostacolata da colli di bottiglia evolutivi e soggetta a continui rimescolamenti.

Come ha detto Gregory Stock dell'UCLA: «Negli umani la tradizionale evoluzione darwiniana oggi non produce quasi nessuna alterazione, e ci sono ben poche probabilità che qualcosa del genere succeda nel prossimo futuro. La popolazione umana è troppo numerosa e interrelata, e le pressioni selettive troppo localizzate e transitorie»³².

Ci sono poi i limiti dettati dal principio dell'uomo delle caverne.

Come abbiamo visto, spesso gli esseri umani rifiutano i progressi della tecnologia (per esempio, faticano a immaginare un ufficio senza documenti di carta) poiché questi contraddicono la loro natura, che negli ultimi centomila anni è rimasta perlopiù invariata. Quindi gli uomini potrebbero non voler progettare bambini "su misura" e diversi dalla norma, poiché non vogliono che i loro coetanei li considerino scherzi della natura, cosa che peraltro ridurrebbe le loro possibilità di successo nella società. Una cosa è vestire i figli con abiti eccentrici, un'altra è trasformarne in maniera definitiva la loro eredità genetica. (In un libero

mercato geni un po' bizzarri troverebbero probabilmente un loro spazio, ma sarebbe senz'altro una nicchia, poiché il mercato trae forza dalla domanda dei consumatori.) È del tutto possibile che entro la fine del secolo le coppie disporranno di una biblioteca di geni da cui scegliere, soprattutto per eliminare le malattie genetiche ma anche per ottenere qualche forma di "miglioramento". Tuttavia non ci saranno pressioni da parte del mercato affinché si finanzia lo studio di geni particolarmente bizzarri, perché la domanda di tali geni sarà piuttosto esigua.

Il vero pericolo non consiste dunque nella domanda dei consumatori, ma nell'eventuale intervento di dittature che intendessero servirsi dell'ingegneria genetica per i loro scopi perversi, per esempio creare soldati più forti e più obbedienti.

Altri problemi potrebbero scaturire in un futuro assai remoto, quando l'umanità avrà colonie spaziali su altri pianeti in cui gravità e condizioni climatiche potrebbero essere assai diverse da quelle terrestri. A quel punto – forse già nel prossimo secolo – sarebbe realistico pensare alla creazione di una nuova razza di umani in grado di adattarsi a diverse condizioni atmosferiche e di gravità. Per esempio, una che sappia sopravvivere con quantità diverse di ossigeno, adattarsi a una maggiore o minore durata del giorno e con un peso del corpo e un metabolismo adatti ad altre condizioni. Ad ogni modo, per molto tempo ancora i viaggi spaziali saranno estremamente costosi. Forse entro la fine di questo secolo avremo piccoli avamposti su Marte, ma la stragrande maggioranza degli umani continuerà ad abitare la Terra. Nei decenni, se non nei secoli a venire, i viaggi speciali saranno riservati agli astronauti, ai ricchi e forse a un manipolo di intrepidi colonizzatori dello spazio.

Dunque la suddivisione della razza umana in diverse specie sparse per il sistema solare e anche oltre non avverrà in questo secolo, e forse neppure nel prossimo. A meno che non si verificano straordinarie rivoluzioni nell'ambito della tecnologia spaziale, siamo destinati a rimanere bloccati su questo pianeta per ancora molto tempo.

Infine dobbiamo considerare un'altra minaccia che si para all'orizzonte, prima della fine di questo secolo: l'ingegneria genetica potrebbe deliberatamente rivoltarsi contro l'umanità in forma di guerra batteriologica.

Guerra batteriologica

Quella della guerra batteriologica è una storia antica come la Bibbia. I guerrieri del passato erano soliti lanciare corpi infetti oltre le mura delle città nemiche per contagiarne gli abitanti, oppure ne avvelenavano i pozzi con le carcasse di animali ammalati. Dare a un nemico qualche capo di vestiario infettato dal vaiolo era un altro modo per liberarsene. Ma con la tecnologia moderna i germi potrebbero essere modificati geneticamente in modo da spazzare via milioni di persone.

Nel 1972 gli Stati Uniti d'America e l'ex Unione Sovietica firmarono uno storico accordo che bandiva qualsiasi forma di guerra batteriologica a scopi offensivi. Tuttavia oggi la bioingegneria è così sofisticata da rendere quel vecchio trattato un insignificante pezzo di carta. Tanto per cominciare, nell'ambito delle ricerche sul DNA non si parla di tecnologia offensiva o difensiva, poiché la manipolazione dei geni può essere usata per entrambi gli scopi. In secondo luogo, l'ingegneria genetica consente di creare germi "armati", cioè deliberatamente modificati per aumentarne la letalità o la capacità di diffondersi nell'ambiente. Fino a qualche tempo fa si credeva che soltanto gli Stati Uniti e la Russia possedessero le ultime fiale contenenti il vaiolo, il più grande killer della storia della razza umana. Nel 1992 un disertore sovietico sostenne che i Russi avevano trasformato il vaiolo in arma biologica, e che ne avevano già prodotto una ventina di tonnellate. Dal crollo dell'Unione Sovietica sussiste il tormentoso pericolo che un gruppo di terroristi possa comprarsi questa terribile arma batteriologica.

Nel 2005 i biologi sono riusciti a "risuscitare" il virus dell'influenza spagnola del 1918, il quale uccise più persone della Prima guerra mondiale. Incredibilmente, lo hanno fatto analizzando il corpo di una donna morta e poi sepolta nel permafrost dell'Alaska, ma anche attraverso i campioni prelevati dai soldati statunitensi durante l'epidemia. Gli scienziati hanno poi pubblicato in rete l'intero genoma del virus, rendendolo noto al mondo intero. Per molti si è trattato di un errore, perché un giorno persino uno studente universitario potrebbe riportare in vita in laboratorio uno dei maggiori killer della storia dell'umanità.

In altre parole, pubblicare il genoma del virus dell'influenza spagnola è stato come aprire le porte di una miniera d'oro, tanto che grazie all'analisi di quei geni gli scienziati hanno potuto risolvere un interrogativo che li tormentava da tempo: com'era possibile che una minuscola mutazione avesse causato un tale danno all'intera popolazione umana? La risposta è stata trovata quasi subito. Il virus dell'influenza spagnola, a differenza di altri ceppi, provoca una reazione eccessiva del sistema immunitario, che rilascia enormi quantità di fluido. Praticamente, il paziente annega nei propri liquidi. Una volta compreso tale meccanismo sono stati confrontati i geni responsabili di tale effetto mortale con quelli del virus dell'influenza H1N1 e di altri virus ancora. Per fortuna il gene letale non è presente in nessuno di questi virus. Inoltre, ora possiamo misurare concretamente in quale misura un virus può avvicinarsi a questo allarmante potenziale, ed è stato appurato che l'H1N1 era ben lontano dallo sviluppare una tale pericolosità.

Tuttavia è evidente che nel lungo termine ci sarà un prezzo da pagare. Di anno in anno manipolare i geni degli organismi viventi diventa più facile. I costi dell'operazione stanno precipitando, e le informazioni sono ampiamente disponibili su internet.

Alcuni scienziati ritengono che nel giro di qualche decennio costruiremo una macchina che ci consentirà di creare qualsiasi gene semplicemente richiamando le componenti desiderate. Per

esempio, digitando A-T-C-G la macchina procederà automaticamente ad assemblare il DNA necessario per creare il gene composto da tali elementi. Questo significa che un giorno persino gli studenti delle superiori disporranno degli strumenti necessari per compiere manipolazioni avanzate delle forme di vita.

Uno degli scenari in assoluto più inquietanti è il virus dell'AIDS trasportato dall'aria. Per esempio, i virus del raffreddore dispongono di alcuni geni che gli permettono di sopravvivere in forma di goccioline di aerosol, cosicché possiamo trasmettere l'infezione agli altri attraverso un semplice starnuto. Attualmente il virus dell'AIDS risulta abbastanza vulnerabile quando esposto all'ambiente, tuttavia sarebbe sufficiente impiantarvi i geni del virus del raffreddore per creare una nuova forma di AIDS capace di sopravvivere all'esterno del corpo umano, e quindi di diffondersi, appunto, come un comune raffreddore. Sappiamo anche che virus e batteri si scambiano geni, quindi non è da escludere che l'AIDS e il comune raffreddore possano persino scambiarsi i geni spontaneamente, sebbene sia poco probabile.

In futuro un gruppo di terroristi, o addirittura un paese, potrebbe potenziare l'AIDS e trasformarlo in un'arma batteriologica. L'unica cosa che potrebbe trattenerli dallo scatenare una simile epidemia è che anche loro finirebbero con il pagarne le conseguenze.

Minacce del genere sono diventate reali dopo la tragedia dell'11 settembre 2001. Uno sconosciuto ha spedito a noti politici del paese pacchetti postali contenenti una polvere bianca con spore di antrace.

Dopo un'attenta analisi al microscopio di quella polvere si è potuto appurare che le spore di antrace erano state "armate" in modo da diffondere morte e distruzione. D'un tratto l'idea che un gruppo di terroristi avesse avuto accesso ad armi biologiche avanzate scosse l'intero paese. Sebbene l'antrace sia reperibile nel terreno e in tutto il nostro ambiente, solo una persona specificamente addestrata e con intenzioni maniacali poteva depurarlo e manipolarlo per intraprendere un tale atto terroristico.

Il colpevole non è mai stato trovato, neppure dopo una delle più grandi cacce all'uomo dell'intera storia degli Stati Uniti. Non se ne sa nulla neppure oggi, sebbene uno dei principali sospetti si sia recentemente suicidato. Ma il punto è che qualunque individuo con una buona preparazione in biologia può terrorizzare un'intera nazione.

Uno dei fattori che ha impedito una guerra batteriologica è il puro e semplice interesse personale. Durante la Prima guerra mondiale l'efficacia dei gas letali lanciati sui campi di battaglia non era garantita. Spesso l'andamento meteorologico, e in particolare la direzione dei venti, era del tutto imprevedibile, cosicché il gas avrebbe potuto colpire le truppe amiche. In sostanza, il suo potenziale militare era soprattutto quello di terrorizzare il nemico, anziché di sconfiggerlo fisicamente. Non c'è stata una sola battaglia decisiva che sia stata vinta usando gas tossici. E persino all'apice della Guerra fredda entrambe le parti erano consapevoli che gas tossici e armi batteriologiche, una volta impiegati sul campo di battaglia, avrebbero potuto avere esiti imprevedibili e aggravare la situazione fino a scatenare un conflitto nucleare.

Tutto ciò di cui abbiamo discusso in questo capitolo implica la manipolazione di geni, proteine e molecole. Il prossimo interrogativo riguarda inevitabilmente la manipolazione dei singoli atomi. Ma fino a dove possiamo spingerci?

Capitolo 4

Nanotecnologia

Tutto dal nulla?

I principi della fisica non impediscono di manipolare le cose atomo per atomo. Richard Feynman, premio Nobel per la fisica

La nanotecnologia ci ha fornito gli strumenti [...] per giocare con i giochi ultimi della natura: gli atomi e le molecole. [...] Ogni cosa è fatta di questi due elementi. [...] Le possibilità di creare nuove cose appaiono illimitate. Horst Störmer, premio Nobel per la fisica

Il ruolo dell'infinitamente piccolo è infinitamente grande.

Louis Pasteur

La padronanza degli strumenti è una conquista fondamentale che distingue gli esseri umani dagli animali. Secondo le mitologie greca e romana, tale processo ebbe inizio allorché Prometeo, mosso a pietà dalla condizione umana, rubò il prezioso dono del fuoco dalla fornace di Vulcano. Il gesto provocò però la collera degli dèi, e per punire l'umanità Zeus ideò uno stratagemma molto astuto: chiese a Vulcano di forgiare dal metallo una bellissima donna e un vaso. Vulcano creò la statua, chiamata Pandora, e le diede magicamente vita, ordinandole poi di non aprire mai quel suo vaso. Ma spinta dalla curiosità, Pandora disobbedì, e una volta aperto il vaso scatenò i venti che portarono caos, dolore e sofferenza nel mondo. In fondo al vaso restò solo la speranza.

Dalla fornace divina di Vulcano scaturirono sia i sogni sia le sofferenze della razza umana. Oggi stiamo dunque progettando nuove macchine rivoluzionarie che costituiscono gli strumenti ultimi, costruiti sulla base di singoli atomi. Dobbiamo però chiederci se tali macchine libereranno il fuoco dell'illuminazione e della conoscenza, oppure i venti inarrestabili del caos.

In tutta la storia dell'uomo il destino dei popoli è stato determinato dall'arte del fabbricare e utilizzare gli strumenti. Quando migliaia di anni fa furono perfezionati l'arco e la freccia si poterono lanciare proiettili a una distanza molto maggiore di quella raggiungibile con la sola forza delle braccia, e ne derivò un'accresciuta efficacia nella caccia e quindi più cibo per tutti. Settemila anni fa l'uomo inventò la metallurgia, e così poté abbandonare le abitazioni di fango e paglia per creare edifici che si ergevano dalla superficie terrestre. Dalle foreste e dai deserti cominciarono dunque a sorgere nuovi imperi, costruiti con gli strumenti forgiati dai metalli.

Ma oggi siamo sul punto di padroneggiare un altro genere di strumenti, molto più potenti di quelli conosciuti finora. Entro la fine di questo secolo, infatti, grazie allo sviluppo della nanotecnologia potremo usufruire del più importante apparecchio mai immaginato, il quale ci permetterà di manipolare i singoli atomi di cui è costituita ogni cosa. Questo potrebbe dare inizio a una seconda rivoluzione industriale, poiché la produzione a livello molecolare darebbe

origine a nuovi materiali superforti, superleggeri e dotati di proprietà elettriche e magnetiche straordinarie. Cose che oggi possiamo soltanto sognare.

Il premio Nobel Richard Smalley ha dichiarato: «Il più grande sogno della nanotecnologia è riuscire a costruire qualcosa usando gli atomi come mattoni»¹. Dal canto suo, Philip Kuekes della Hewlett-Packard ha affermato: «L'obiettivo non è soltanto quello di creare computer piccoli come una particella di polvere, ma di realizzare semplici elaboratori delle dimensioni di un batterio. A quel punto avremo un congegno altrettanto potente di quello che abbiamo sulle nostre scrivanie, ma racchiuso in un granello di polvere»².

Non si tratta solo delle speranze di sognatori e visionari. Il governo statunitense ha preso la cosa molto sul serio. Nel 2009, considerato l'immenso potenziale della nanotecnologia in ambito medico, industriale, aeronautico e commerciale, la National Nanotechnology Initiative (NNI) ha stanziato 1,5 miliardi di dollari per le relative ricerche. E nel *National Science Foundation Nanotechnology Report* pubblicato dal governo si legge: «La nanotecnologia ha il potenziale di migliorare le prestazioni umane, di realizzare uno sviluppo sostenibile per materiali, acqua, energia e alimenti, di proteggerci contro batteri e virus sconosciuti [...]»³.

In definitiva, la stessa economia mondiale e il destino delle nazioni potrebbe dipendere proprio dallo sviluppo di tale tecnologia. Come già osservato, intorno al 2020 la legge di Moore comincerà a vacillare, forse persino a collassare. Per l'economia mondiale questo significherebbe il caos, a meno che i fisici non riescano a trovare sostituti adeguati ai transistor di silicio che alimentano i nostri computer. La nanotecnologia potrebbe dunque essere la soluzione a questo e a molti altri problemi.

Forse già entro la fine di questo secolo la nanotecnologia ci consentirà di realizzare macchine degne dei poteri degli dèi, capaci di creare qualsiasi cosa quasi dal nulla.

Il mondo quantico

Il primo ad attrarre l'attenzione su questa nuova dimensione della fisica fu il premio Nobel Richard Feynman, che una volta pose una domanda solo apparentemente semplice: che dimensioni può avere la macchina più piccola che possiamo costruire? Non si trattava di una questione puramente accademica: i computer stavano già diventando meno ingombranti e si preparavano a cambiare il volto dell'industria, quindi era sempre più evidente che la risposta all'interrogativo di Feynman avrebbe avuto un effetto enorme a livello sociale ed economico.

Nel suo profetico discorso del dicembre 1959 al meeting dell'American Physical Society al Caltech, intitolato *There's Plenty of Room at the Bottom* (C'è un sacco di spazio giù in fondo), Feynman dichiarò: «È interessante notare che, in linea di principio, un fisico potrebbe sintetizzare qualsiasi sostanza chimica descritta da un chimico, o almeno io la penso così. Dategli le istruzioni e lui la sintetizzerà. Come? Mettendo gli atomi nei punti dettati dal chimico, in modo da ottenere la sostanza voluta». Feynman concluse che in linea di massima realizzare macchine costituite da singoli atomi era possibile, ma le nuove leggi della fisica avrebbero reso tale impresa molto difficile, se non impossibile.

In definitiva l'economia mondiale e il destino delle nazioni dipenderebbe dai principi assai bizzarri e controintuitivi della teoria quantistica. Siamo abituati a pensare che le leggi della fisica restino invariate anche operando su scale inferiori, ma ciò non corrisponde al vero. Film come *Tesoro, mi si sono ristretti i ragazzi* e *Radiazioni BX: distruzione uomo* ci danno l'impressione (errata) che anche gli individui miniaturizzati siano soggetti alle leggi della fisica che agiscono su di noi. Per esempio, in una scena di *Tesoro, mi si sono ristretti i ragazzi* uno dei minuscoli eroi cavalca una formica durante un temporale. Le gocce di pioggia cadono a terra formando piccole pozze, proprio come nella nostra realtà. Ma come sappiamo le gocce possono essere più grandi di una formica, quindi ai suoi occhi dovrebbero apparire come enormi emisferi d'acqua. Un emisfero d'acqua non collassa perché la tensione superficiale funge da rete che tiene insieme la goccia. Nella nostra realtà la tensione superficiale dell'acqua è assai ridotta, tanto che a malapena ce ne accorgiamo. Ma sulla scala di una formica è un fenomeno proporzionalmente enorme, quindi la pioggia dovrebbe essere per lei come una cascata di grandi perle. Inoltre, se potessimo ingrandire una formica quanto una casa, avremmo un altro problema: le sue gambe si spezzerebbero. Infatti, aumentando le dimensioni della formica il suo peso crescerebbe molto più rapidamente della forza delle sue gambe. Per esempio, ingigantendone le dimensioni di un fattore pari a 10, il suo volume, e quindi il suo peso, sarebbe 1000 volte superiore ($10 \times 10 \times 10$). Peraltro la forza correlata allo spessore dei muscoli sarebbe solo 100 volte superiore (10×10). Di conseguenza la gigantesca formica sarebbe 10 volte più debole di una comune formica. Ciò significa che King Kong, invece di terrorizzare il centro di New York, crollerebbe a terra al primo tentativo di scalare l'Empire State Building.

Feynman osservò che ci sono altre forze che dominano la scala atomica, come il legame idrogeno e la forza di Van der Waals, causata dalle minuscole forze elettriche esistenti tra atomi e molecole. Molte proprietà fisiche delle sostanze sono determinate da tali forze. Per avere un'idea di cosa questo significhi, consideriamo un semplice problema: perché le autostrade del nord-est degli Stati Uniti hanno così tante buche? Ogni anno l'acqua s'infila nelle minuscole fessure dell'asfalto, poi congela e si espande, sgretolando l'asfalto e scavando un buco.

Tuttavia, secondo il buon senso l'acqua non dovrebbe espandersi quando congela. Se questo avviene è a causa del legame idrogeno. La molecola dell'acqua è a forma di V, con l'atomo di ossigeno alla sua base. È inoltre caratterizzata da una leggera carica negativa in fondo e da una positiva in cima. Ne consegue che quando congeliamo l'acqua le sue molecole si accumulano l'una sull'altra e si espandono, formando un reticolo regolare di ghiaccio con abbondanza di spazio tra una molecola e l'altra. Le molecole dell'acqua, infatti, si sistemano come esagoni. Quindi congelando l'acqua si espande perché tra gli atomi di un esagono c'è maggiore spazio. È lo stesso motivo per cui i fiocchi di neve hanno sei lati, e spiega perché il ghiaccio galleggia sull'acqua quando in linea di massima dovrebbe affondare.)

Passare attraverso i muri

Oltre alla tensione superficiale, al legame idrogeno e alle forze di Van der Waals, ci sono altri bizzarri effetti quantistici su scala atomica. Normalmente nella vita di tutti i giorni non vediamo le forze quantistiche al lavoro, sebbene siano presenti ovunque. Per esempio, poiché gli atomi sono in gran parte vuoti, a rigor di logica dovremmo essere in grado di attraversare le pareti. Tra il nucleo posto al centro dell'atomo e lo strato di elettroni c'è soltanto il vuoto. Se l'atomo fosse grande come uno stadio di calcio, questo sarebbe praticamente vuoto, poiché il nucleo al centro avrebbe le dimensioni di un granello di sabbia.

Talvolta noi insegnanti ci divertiamo a stupire gli studenti con un semplice esperimento: prendiamo un contatore Geiger, lo posizioniamo di fronte a un ragazzo e mettiamo alle sue spalle una semplice pastiglia di materiale radioattivo, ovviamente innocuo. Con sua grande sorpresa, lo studente constata che alcune particelle attraversano il suo corpo facendo ticchettare il contatore Geiger, come se fosse in gran parte vuoto, e in effetti lo è.

Ma se siamo perlopiù vuoti, perché non possiamo passare attraverso i muri? Nel film *Ghost* il personaggio interpretato da Patrick Swayze viene ucciso da un nemico e si trasforma in un fantasma. Ogni volta che prova a toccare la sua ex fidanzata, interpretata da Demi Moore, sperimenta una profonda frustrazione, perché le sue mani attraversano la materia. In quanto fantasma non ha alcuna consistenza, e gli oggetti solidi può soltanto attraversarli. In una scena del film il fantasma infila la testa in un convoglio della metropolitana in corsa senza sperimentare alcunché, ma non viene spiegato perché la gravità non lo faccia precipitare al suolo e poi fino al centro della terra: a quanto pare i fantasmi possono attraversare ogni oggetto, ma non i pavimenti!

Tornando al punto, perché non possiamo attraversare gli oggetti solidi come farebbe un fantasma? La risposta ha a che vedere con un curioso fenomeno quantistico. Il principio di esclusione di Pauli sancisce che due elettroni non possono trovarsi nello stesso stato quantistico. Ne consegue che quando due elettroni pressoché identici si avvicinano oltre un certo limite, si respingono automaticamente. È proprio questo il motivo per cui gli oggetti sembrano essere solidi, benché si tratti di una semplice illusione: in realtà qualsiasi forma materiale è fondamentalmente vuota.

Quando sediamo su una sedia pensiamo di toccarla appoggiandovi il nostro corpo, ma in realtà ci stiamo semplicemente librando a meno di un nanometro di distanza dalla seduta, respinti dalle forze elettriche e quantistiche dell'oggetto sedia. Ciò significa che ogni volta che "tocchiamo" qualcosa non si tratta affatto di un contatto diretto, poiché sussiste sempre una minima distanza dovuta alle forze atomiche infinitesimali. (Inoltre, se riuscissimo in qualche modo a neutralizzare il principio di esclusione, attraversare i muri non rappresenterebbe più un problema. Tuttavia nessuno sa come riuscirci!)

La teoria quantistica impedisce agli atomi di scontrarsi gli uni con gli altri, ma non solo: li lega fino a formare molecole. Immaginiamo per un istante che un atomo sia una sorta di sistema solare in miniatura, con i pianeti che orbitano attorno al Sole. Ora, se due sistemi solari del genere dovessero entrare in collisione, i loro pianeti si scontrerebbero, oppure verrebbero scagliati in tutte le direzioni, cosa che ovviamente determinerebbe il collasso del sistema stesso. Proprio come i veri sistemi solari, che se entrano in collisione non possono mantenersi stabili,

gli atomi dovrebbero collassare, se finissero per scontrarsi.

In realtà, quando due atomi si avvicinano, si respingono o si combinano formando una molecola stabile. Il motivo per cui gli atomi formano molecole stabili è che gli elettroni possono essere condivisi da due atomi. In linea di massima tale ipotesi sembrerebbe insensata: se l'elettrone obbedisse alle leggi di Newton sarebbe davvero impossibile. Ma secondo il principio d'indeterminazione di Heisenberg, non possiamo conoscere con precisione la collocazione dell'elettrone, che in un certo senso è "spalmato" tra i due atomi, garantendone la coesione.

In altre parole, se dovessimo "disattivare" la teoria quantistica, appena entrate in contatto le nostre molecole collasserebbero, e ci dissolveremmo in un gas di particelle. La teoria quantistica spiega quindi perché gli atomi possono legarsi e formare materia solida, anziché disintegrarsi.

È lo stesso motivo per cui non esistono mondi all'interno di altri mondi. C'è chi immagina che il nostro sistema solare, o la nostra galassia, sia in effetti un atomo di un altro gigantesco universo. È proprio questa ipotesi a ispirare la scena finale del film *Men in Black*, in cui l'intero universo conosciuto non è altro che un atomo in una palla da gioco di un qualsiasi alieno. Ma secondo le leggi della fisica questo non è possibile, perché passando da una scala all'altra dobbiamo adottare nuove regole, e quelle che governano gli atomi sono assolutamente diverse da quelle da cui dipende il moto e lo stato delle galassie.

Ecco alcuni dei più incredibili principi della teoria quantistica:

- Non possiamo conoscere con precisione la velocità e la posizione esatta di una qualsiasi particella: l'indeterminazione è una costante.
- In un certo senso le particelle possono trovarsi contemporaneamente in due punti diversi.
- Tutte le particelle si trovano simultaneamente in una miscela di stati diversi: per esempio, le particelle che ruotano su loro stesse possono esistere come miscele di particelle che ruotano simultaneamente verso l'alto (spin up) e verso il basso (spin down).
- Possiamo sparire e riapparire da un'altra parte.

Tutte queste affermazioni hanno un che di ridicolo, e infatti una volta Einstein ha commentato: «Più la teoria dei quanti ha successo, più sembra una sciocchezza». Nessuno conosce l'origine di queste leggi a dir poco stravaganti. Si tratta di semplici postulati, privi di alcuna spiegazione. La teoria quantistica ha soltanto un punto a suo favore: è assolutamente corretta. Ha un'approssimazione dell'ordine di un decimiliardesimo, il che ne fa la teoria fisica migliore di tutti i tempi.

Il motivo per cui non assistiamo quotidianamente agli incredibili fenomeni quantistici è che siamo fatti di miliardi e miliardi di atomi, e in un certo senso questo fa sì che gli effetti si pareggino.

Spostare i singoli atomi

Richard Feynman sognava il giorno in cui i fisici avrebbero potuto fabbricare le molecole a proprio piacimento, atomo dopo atomo. Se nel lontano 1959 quel sogno sembrava del tutto irrealizzabile, oggi si è almeno in parte avverato.

Ho avuto la fortuna di assistervi di persona quando ho visitato l'IBM Almaden Research Center di San José, in California. Ho visto all'opera uno strumento straordinario: un microscopio a effetto tunnel grazie al quale gli scienziati possono vedere e manipolare singoli atomi. Tale congegno è stato inventato nel 1986 da Gerd Binnig ed Heinrich Rohrer dell'IBM, ed è valso loro un premio Nobel. (Ricordo ancora che, quand'ero bambino, il mio maestro diceva che non saremmo mai riusciti a vedere gli atomi, perché erano semplicemente troppo piccoli. All'epoca avevo già deciso di diventare uno scienziato atomico, ed ero convinto che avrei trascorso il resto della mia esistenza a studiare qualcosa che non avrei mai potuto osservare direttamente. Oggi però non solo possiamo vedere gli atomi, ma anche giocarci utilizzando pinzette atomiche.)

Il microscopio a effetto tunnel non è un microscopio come tutti gli altri, ma assomiglia piuttosto a un vecchio fonografo. Dispone di un ago miniaturizzato – la punta ha un diametro di un solo atomo – che viene fatto passare lentamente sulla materia da analizzare. Dall'ago parte una debole corrente elettrica che passa attraverso la materia e arriva fino alla base dello strumento. Mentre l'ago scorre sull'oggetto, la corrente elettrica varia leggermente ogni volta che passa su un atomo. Sorprendentemente, dopo una serie di passaggi la macchina è in grado di registrare e stampare il profilo di tale atomo. Servendosi di un ago identico, il microscopio riesce non solo a registrare l'immagine di questi atomi, ma anche a spostarli a piacimento. È dunque possibile manipolarli in modo da formare lettere – per esempio le iniziali “IBM” –, e in pratica persino progettare apparecchi rudimentali fatti unicamente di atomi.

Di recente è stato inventato anche il microscopio a forza atomica, grazie al quale possiamo ottenere straordinarie immagini 3D di matrici di atomi. Anche questo microscopio utilizza un ago con una punta miniaturizzata, però illuminata da un laser. Mano a mano che passa sulla superficie da studiare, l'ago subisce lievi scosse, e tale movimento viene registrato dal riflesso del laser.

Ho dunque scoperto che spostare i singoli atomi è davvero semplice. Me ne stavo seduto di fronte allo schermo di un computer a osservare una serie di sfere bianche simili a palline da ping-pong, ma in realtà erano atomi. Mi bastava spostare il cursore su un atomo e quindi trascinarlo in un altro punto dello schermo, poi premevo un pulsante che attivava l'ago, e questo modificava la posizione dell'atomo. Dopodiché il microscopio procedeva a una nuova scansione della superficie e l'immagine sullo schermo cambiava, mostrando la “sfera” nel punto esatto in cui l'avevo messa.

Per tutta questa operazione c'è voluto soltanto un minuto. Infatti in mezz'ora sono riuscito a tracciare sullo schermo alcune lettere fatte di singoli atomi, e in un'ora ho potuto realizzare pattern piuttosto complessi coinvolgendo anche più di una decina di atomi.

Non potevo credere di avere davvero spostato singoli atomi: avevo fatto qualcosa che fino a poco tempo prima era ritenuto impossibile.

MEMS e nanoparticelle

Sebbene la nanotecnologia stia ancora muovendo i primi passi, ha già dato vita a un fiorente mercato dei rivestimenti chimici. Spruzzando su un prodotto un sottile strato di sostanze chimiche dello spessore di qualche molecola, lo si rende più resistente alla ruggine e se ne alterano le proprietà ottiche. Altre applicazioni commerciali odierne riguardano i capi d'abbigliamento antimacchia, gli schermi lucidi dei computer, gli attrezzi metallici da taglio e le vernici anti-graffio. Ma negli anni a venire ci sarà da attendersi un mercato con molte altre novità, tutte caratterizzate dai microrivestimenti.

La nanotecnologia è una scienza ancora molto giovane. Un aspetto che la riguarda sta però cominciando a influenzare la vita di tutti e si è già trasformato in un'industria mondiale da 40 miliardi di dollari. Si tratta dei cosiddetti MEMS (*micro electro-mechanical systems*), una tecnologia dei microsistemi che include tutta una gamma di prodotti, dalle cartucce a getto d'inchiostro ai sensori degli airbag, fino ai display e ai giroscopi di automobili e aeroplani. In sostanza, i MEMS sono microdispositivi talmente piccoli da poter essere facilmente installati sulla punta di uno spillo. Vengono prodotti con la stessa tecnologia d'incisione usata nell'industria dei computer, ma invece di incidere il transistor gli ingegneri realizzano minuscole componenti meccaniche, creando moduli così piccoli che per vederli occorre un microscopio.

Gli scienziati hanno già realizzato una versione atomica dell'abaco, venerando strumento di calcolo originario dell'Asia, fatto di diverse colonne verticali metalliche in cui sono inserite palline di legno. Nel 2000 gli scienziati dell'IBM Zurich Research Laboratory hanno realizzato una versione atomica dell'abaco manipolando i singoli atomi con un microscopio a scansione. Al posto delle palline di legno mobili e infilate nelle aste metalliche verticali, quella sorta di pallottoliere atomico utilizza il fullerene (*buckyball*), ovvero atomi di carbonio sistemati in modo da formare una molecola simile a un pallone da calcio a pentagoni neri ed esagoni bianchi, benché di un diametro cinquemila volte inferiore a quello di un capello umano.

Dal canto loro, gli scienziati della Cornell University hanno creato persino una chitarra atomica a sei corde, ciascuna del diametro di soli cento atomi. Se messe una accanto all'altra, venti di queste chitarre potrebbero trovare posto in un capello umano. Si tratta di una vera chitarra, le cui corde possono essere davvero pizzicate, sebbene le frequenze prodotte siano troppo alte per poter essere udite dall'orecchio umano.

Ma la più diffusa applicazione pratica di questa tecnologia la troviamo negli airbag, che contengono minuscoli accelerometri MEM, capaci di rilevare una frenata improvvisa dell'auto. Un accelerometro MEM consiste di una microscopica sfera collegata a una molla o leva. Se premiamo a fondo il freno dell'auto, l'improvvisa decelerazione del mezzo scuote la sfera, e il suo movimento produce una minuscola carica elettrica. Tale carica produce a sua volta un'esplosione chimica, che rilascia un notevole quantitativo di azoto in 0,25 secondi. Questa tecnologia ha già salvato migliaia di vite umane.

Nanomacchine nel nostro corpo

Nel prossimo futuro dobbiamo attenderci l'avvento di una nuova gamma di nanomacchine che potrebbe rivoluzionare la medicina ed essere in grado, per esempio, di esplorare i nostri vasi sanguigni navigando al loro interno. Nel film *Viaggio allucinante* un'équipe di scienziati e la sua navicella vengono miniaturizzati fino alle dimensioni di un globulo rosso. Comincia così un viaggio costellato di sconvolgenti pericoli attraverso il flusso sanguigno e il cervello di un paziente. Uno degli scopi della nanotecnologia è creare molecole killer capaci di concentrarsi sulle cellule cancerogene e distruggerle senza lasciarne traccia, evitando di danneggiare quelle sane. Gli scrittori di fantascienza hanno spesso immaginato navicelle molecolari “trova e distruggi” che navigano nei vasi sanguigni in cerca di cellule cancerose, ma i più l'hanno sempre considerato impossibile, un'idea futile a uso e consumo degli autori di fantascienza.

Ma oggi parte di quelle “invenzioni” sono realtà. Nel 1992 Jerome Schentag, dell'Università di Buffalo, ha inventato una “pillola intelligente” – ne abbiamo già parlato nel Capitolo 1 –, un minuscolo strumento delle dimensioni di una pastiglia che una volta ingerito viene monitorato elettronicamente e può ricevere istruzioni per rilasciare farmaci in precisi punti del corpo. Sono già state costruite anche pillole intelligenti dotate di videocamera, grazie alla quale è possibile fotografare l'interno dello stomaco e degli intestini. Guidati utilizzando dei magneti, questi piccoli dispositivi possono identificare tumori e polipi. In futuro potrebbero persino riuscire a compiere interventi di microchirurgia, rimuovere tessuti anomali ed eseguire biopsie dall'interno, senza dover incidere la cute.

Esiste poi un congegno ancora più piccolo, la nanoparticella, una molecola capace di rilasciare farmaci anticancro su uno specifico bersaglio. Si tratta di uno strumento che potrebbe rivoluzionare la cura dei tumori. Tali nanoparticelle possono essere paragonate a “bombe intelligenti” molecolari, progettate per colpire l'obiettivo con un carico chimico, cosa che riduce enormemente i danni collaterali. Infatti una bomba “non intelligente” distrugge qualunque cosa cada nel suo raggio d'azione, comprese le cellule sane, mentre quella intelligente molecolare è selettiva e penetra unicamente nelle cellule cancerose.

Chiunque abbia sperimentato gli orribili effetti collaterali della comune chemioterapia si renderà conto dell'enorme potenziale delle nanoparticelle, e di quanto potrebbero ridurre la sofferenza umana. Infatti con la chemioterapia il corpo viene bombardato con tossine letali, che uccidono le cellule cancerose con efficienza leggermente inferiore rispetto alle cellule ordinarie. Per questo gli effetti collaterali della chemioterapia sono molto estesi: nausea, perdita dei capelli, debolezza eccetera sono talmente pesanti che alcuni pazienti preferirebbero morire anziché sottomettersi a una simile tortura.

Le nanoparticelle potrebbero dunque rappresentare una svolta. I farmaci, per esempio quelli impiegati nella chemioterapia, verrebbero introdotti in molecole forgiate come capsule. Poi le nanoparticelle verrebbero fatte circolare nel flusso sanguigno affinché raggiungano la loro destinazione, dove rilascerebbero il loro carico chimico. La caratteristica chiave delle nanoparticelle è la dimensione, che va dai 10 ai 100 nanometri, quindi troppo grandi per penetrare una cellula ematica⁴. Ne consegue che le nanoparticelle immerse nel flusso circolatorio rimbalzano contro le cellule del sangue senza danneggiarle. Ma le cellule cancerose sono assai diverse: le loro pareti sono bucherellate da pori grandi e irregolari, ragione per cui

le nanoparticelle riescono a penetrarvi con facilità, liberando i farmaci all'interno della cellula senza alcun danno per i tessuti sani. I medici non avranno quindi bisogno di complicati sistemi di guida affinché le nanoparticelle raggiungano i loro bersagli, poiché queste finiranno spontaneamente per accumularsi in certi tipi di tumori.

Questo metodo, dunque, non richiede tecniche complesse e pericolose che potrebbero avere consistenti effetti collaterali. Le nanoparticelle sono infatti delle dimensioni giuste: troppo grandi per attaccare le cellule normali, ma abbastanza piccole da penetrare una cellula cancerosa.

Un altro esempio è rappresentato dalle nanoparticelle create dagli scienziati della BIND Biosciences di Cambridge, nel Massachusetts. Queste nanoparticelle sono fatte di acido polilattico e acido copolilattico o glicolico, una miscela che trattiene i farmaci all'interno del reticolo molecolare. In tal modo si produce il carico utile della nanoparticella, il cui sistema di guida è costituito dai peptidi che rivestono la particella e si legano specificamente alla cellula bersaglio.

L'aspetto particolarmente interessante è che tali nanoparticelle si formano da sole, senza costringere all'utilizzo di complessi impianti industriali o chimici. Le diverse sostanze chimiche che le compongono vengono miscelate lentamente, sulla base di una precisa sequenza e in condizioni perfettamente controllate, tali da garantire l'autoassemblaggio delle nanoparticelle.

«Poiché l'autoassemblaggio non richiede procedure chimiche multiple e complesse, la produzione delle particelle risulta estremamente facile. [...] Possiamo produrne a chili, cosa che nessun altro è mai riuscito a fare»⁵, commenta Omid Farokhzad della BIND, nonché medico dell'Harvard Medical School. Queste nanoparticelle si sono già dimostrate utili in esperimenti condotti per curare il cancro della prostata, del seno e dei polmoni nei ratti. Grazie all'impiego di coloranti si è potuto dimostrare che le nanoparticelle si accumulano negli organi giusti, rilasciando il loro carico farmacologico proprio come auspicato. Gli esperimenti clinici su pazienti umani cominceranno invece tra qualche anno.

Eliminare le cellule cancerose

Le nanoparticelle potrebbero non solo andare in cerca di cellule cancerose e ucciderle con il loro carico chimico, ma forse potrebbero anche liberarcene sul momento. Il principio di tale teoria è semplice: le nanoparticelle possono assorbire la luce a una certa frequenza, e concentrando su di loro un raggio laser queste si riscaldano, o vibrano, rompendo le pareti cellulari di qualsiasi cellula cancerosa nelle vicinanze e distruggendola. Ad ogni modo, la chiave è che le nanoparticelle siano abbastanza vicine alle cellule da colpire.

Diversi team di ricerca hanno già sviluppato vari prototipi. Per esempio, gli scienziati dell'Argonne National Laboratory e dell'Università di Chicago hanno creato nanoparticelle di biossido di titanio (il biossido di titanio è una sostanza chimica assai comune, presente per esempio nelle creme solari). Questi ricercatori hanno scoperto che è possibile legare le nanoparticelle a un anticorpo, il cui compito è quello di procedere alla ricerca di specifiche cellule chiamate *glioblastoma multiforme* (GBM). In pratica tali nanoparticelle si fanno “dare un passaggio” dall'anticorpo, che le porta alle cellule cancerose. A quel punto si accende una luce bianca per circa cinque minuti, la quale basta a scaldare e infine a uccidere le cellule cancerose. Le ricerche hanno dimostrato che in questo modo è possibile eliminare l'80 per cento delle cellule cancerose presenti.

Esiste anche un secondo metodo per fare piazza pulita delle cellule cancerose. Gli scienziati hanno infatti creato microscopici dischi magnetici capaci di vibrare violentemente. Quando tali dischi raggiungono le cellule cancerose è possibile attivarli attraverso un piccolo campo magnetico esterno, che ne provoca la vibrazione e la conseguente distruzione delle pareti cellulari del tumore. Gli esperimenti hanno dimostrato che il 90 per cento delle cellule cancerose viene distrutto dopo appena 10 minuti di trattamento.

Questo risultato non è un raro colpo di fortuna. Gli scienziati dell'Università della California a Santa Cruz hanno ideato qualcosa di simile utilizzando nanoparticelle d'oro. Si tratta di particelle sferiche con un diametro che va dai 20 ai 70 nanometri e uno spessore di pochi atomi. Gli scienziati si sono serviti di uno specifico peptide che sanno essere attratto dalle cellule cancerose della pelle. Stabilita una connessione tra peptide e nanoparticelle d'oro, è stato possibile portare le nanoparticelle alle cellule del tumore della pelle dei topi. Illuminandole con un laser infrarosso, le particelle d'oro scaldano le cellule tumorali fino a distruggerle. «È come mettere le cellule cancerose nell'acqua bollente fino a farle morire. Maggiore è il calore generato dalle nanosfere di metallo, migliori sono i risultati»⁶, ha spiegato Jin Zhang, uno dei ricercatori.

Grazie alla nanotecnologia in futuro potremo dunque individuare colonie di cellule cancerose anni prima che formino un tumore, e le nanoparticelle immesse nel nostro flusso sanguigno contribuiranno alla loro distruzione. La scienza alla base di questa terapia è attualmente in fase di sviluppo in diversi laboratori.

Nanoauto nel sangue

Sviluppando ulteriormente il concetto di nanoparticella arriviamo alla cosiddetta *nanoauto*, un congegno che può essere guidato nel suo viaggio dentro il corpo. Mentre le nanoparticelle possono circolare liberamente, le nanoauto sono come droni controllati e pilotati a distanza.

James Tour e i suoi colleghi della Rice University hanno realizzato una nanoauto che, invece delle ruote, dispone di quattro *bucky-ball*. Uno degli obiettivi di questa ricerca è progettare un veicolo molecolare capace di trainare un minuscolo robot all'interno dei vasi sanguigni, il quale dovrà eliminare tutte le cellule cancerose in cui s'imbatta o liberare farmaci salvavita in punti specifici del corpo.

Uno dei problemi dell'auto molecolare è che non ha un motore. Gli scienziati hanno creato congegni molecolari sempre più sofisticati, ma uno dei principali ostacoli è ideare una fonte d'energia molecolare. Madre natura ha risolto il problema servendosi di una specifica molecola, l'adenosina trifosfato (ATP), ovvero la fonte energetica che rende possibile la vita e alimenta, un istante dopo l'altro, il movimento dei nostri muscoli. L'energia dell'ATP è immagazzinata all'interno di un legame atomico tra i suoi atomi. Tuttavia creare un'alternativa sintetica di tale molecola si è dimostrato particolarmente difficile.

Thomas Mallouk e Ayusman Sen dell'Università Statale della Pennsylvania hanno però trovato una possibile soluzione al problema. Hanno creato una nanoauto capace di muoversi a decine di micron al secondo, ovvero alla stessa velocità della maggior parte dei batteri. (Prima hanno creato una nanobarra di oro e platino delle dimensioni di un batterio, poi l'hanno immersa in una miscela di acqua e perossido d'idrogeno. Questo ha prodotto una reazione chimica su entrambe le estremità della nanobarra, provocando lo spostamento di protoni da un'estremità all'altra. Poiché i protoni respingono le cariche elettriche delle molecole d'acqua, provocano l'avanzamento della nanobarra, che continua a muoversi finché nell'acqua c'è ancora perossido d'idrogeno.)

Lo strumento di pilotaggio di queste nanobarre è invece il magnetismo. Gli scienziati hanno infatti introdotto dischi di nichel all'interno delle nanobarre, che finiscono per avere la stessa funzione dell'ago di una bussola. Spostando una comune calamita in prossimità delle nanobarre, è possibile farle deviare nella direzione desiderata.

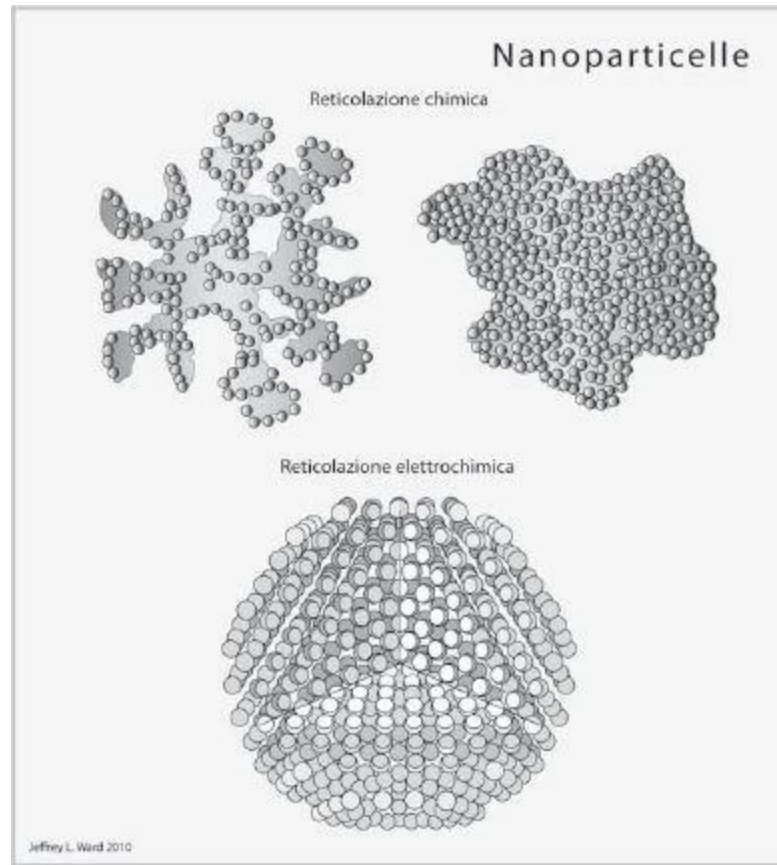
Un altro modo per pilotare un'auto molecolare è attraverso una torcia elettrica⁷. La luce può spezzare le molecole in ioni positivi e negativi. Questi due tipi di ioni si diffondono attraverso il mezzo in cui sono contenuti a velocità differenti, il che produce un campo elettrico che a sua volta attrae le auto molecolari. È quindi sufficiente puntare la luce della torcia in un certo punto perché le auto molecolari si dirigano in quella direzione.

Ne ho avuto una dimostrazione al laboratorio di Sylvain Martel all'École Polytechnique Montréal, in Canada. Martel ha pensato di servirsi della coda dei comuni batteri per fare scorrere un minuscolo chip nel flusso sanguigno. Finora gli scienziati non sono mai riusciti a produrre un motore atomico come quello presente nella coda dei batteri, così Martel si è domandato: se la nanotecnologia non è in grado di creare lo stesso genere di code minuscole, perché non servirsi di quelle già esistenti nei batteri vivi?

Prima di tutto ha creato un chip più piccolo del punto alla fine di questa frase. Poi ha fatto crescere una colonia di batteri. Infine è riuscito a mettere circa ottanta di questi batteri dietro il

chip, in modo che fungessero da propellente e lo facessero avanzare. Poiché quei batteri erano leggermente magnetici, Martel ha potuto servirsene come magneti esterni per guidare il chip nella direzione voluta.

Mi è stato offerto di pilotare io stesso il chip a batteri, e guardando in un microscopio ho potuto osservare il minuscolo chip che veniva spinto da una serie di batteri. A un certo punto ho premuto il pulsante e il chip si è spostato a destra. Quando ho sollevato il dito dal pulsante il chip si è fermato e ha cominciato a muoversi a caso. Mi sono dunque reso conto che un giorno a un medico basterà premere un pulsante del genere per guidare un nanorobot nelle vene di un paziente.



I robot molecolari pattuglieranno il nostro flusso sanguigno, identificando ed eliminando cellule cancerose e agenti patogeni. Potrebbero rivoluzionare il mondo della medicina. (Illustrazione Jeffrey L. Ward)

È quindi possibile ipotizzare che in futuro la chirurgia verrà completamente sostituita da apparecchiature molecolari che si muoveranno nei vasi sanguigni e che, guidate da magneti, andranno a posizionarsi sugli organi malati per rilasciare medicinali o eseguire interventi microchirurgici. L'incisione della cute per vedere e operare all'interno del corpo diventerebbe una tecnica del tutto obsoleta. In caso di problemi cardiaci, i magneti guideranno le nanoauto fino al cuore, dove potranno rimuovere gli eventuali ostacoli che alterano il funzionamento delle arterie.

Chip a DNA

Come già detto nel Capitolo 3, in futuro avremo minuscoli sensori nei vestiti, nel corpo e anche in bagno, in modo che possano monitorare costantemente la nostra salute e individuare prontamente malattie come i tumori anni prima che si trasformino in un pericolo. La chiave di tutto questo è il chip a DNA, che promette di essere una sorta di “laboratorio in un chip”. Proprio come il tricorder di *Star Trek*, sensori di questo genere effettueranno un’analisi medica in pochi minuti.

Attualmente l’esame diagnostico del cancro è lungo, costoso e laborioso, un processo che di solito richiede settimane. Questo limita notevolmente il numero di analisi che possono essere eseguite. Ma grazie alla moderna tecnologia e ai computer, profondi cambiamenti sono già in atto: gli scienziati stanno infatti creando apparecchi in grado di individuare il cancro rapidamente e a costi ridotti attraverso la ricerca di specifici biomarcatori prodotti dalle cellule tumorali.

Utilizzando la medesima tecnologia dei chip dei comuni computer, è possibile incidere un chip su cui ci sono alcune aree micro-scopiche capaci di individuare specifiche sequenze di DNA o cellule cancerose.

Grazie alla tecnologia d’incisione dei transistor vengono assemblati nel chip alcuni frammenti di DNA. Quando determinati fluidi attraversano il chip, questi frammenti di DNA possono legarsi a specifiche sequenze genetiche. Dopodiché, servendosi di un raggio laser, si procede a una scansione rapida dell’intero sito e all’identificazione dei geni. In questo modo non sarà più necessario analizzarli uno a uno come in precedenza, perché il nuovo metodo di scansione ne confronterà migliaia alla volta.

Nel 1997 la Affymetrix ha prodotto il primo chip a DNA commerciabile, in grado di analizzare rapidamente cinquantamila sequenze di DNA. Entro il 2000 erano già disponibili quattrocentomila sonde a DNA al costo di poche migliaia di dollari l’una, e nel 2002 abbiamo cominciato a utilizzare chip ancora più potenti, il cui prezzo è sceso a soli 200 dollari. Secondo la legge di Moore, i prezzi continueranno a calare, e alla fine il chip a DNA costerà solo qualche dollaro.

Shana Kelley, professoressa dell’istituto di medicina dell’Università di Toronto, ha dichiarato: «Oggi per valutare un campione clinicamente rilevante di biomarcatori cancerogeni occorre una stanza piena di computer, e i risultati non sono certo immediati. La nostra équipe è in grado di misurare molecole biologiche su un chip elettronico piccolo come la punta di un dito»⁸. Kelley prevede che un giorno tutte le attrezzature necessarie per analizzare chip del genere saranno ridotte a un congegno delle dimensioni di un cellulare. Tale “laboratorio in un chip” comporterà un ridimensionamento delle apparecchiature chimiche di cui disponiamo attualmente negli ospedali o nelle università fino a dimensioni infinitesimali, e chiunque potrà averne uno nel proprio bagno.

I medici del Massachusetts General Hospital hanno creato la loro versione su misura del biochip, che attualmente è cento volte più potente di qualsiasi altro prodotto sul mercato. Di norma le cellule tumorali in circolazione nel corpo (CTC) sono una su un milione di cellule del sangue, ma se cominciassero a proliferare potrebbero portarci alla morte. Il nuovo biochip è talmente sensibile da riuscire a scovare nel sangue una di queste cellule su un miliardo. Di

conseguenza si è già dimostrato utile nell'individuazione di cellule tumorali del polmone, della prostata, del pancreas, del seno e dell'intestino colo-rettale, e sempre analizzando una quantità di sangue pari a un cucchiaino.

Secondo la tecnologia d'incisione standard dei chip, è possibile inserire in un chip settantottomila piedini microscopici, ciascuno alto 100 micron. Viste al microscopio elettronico queste strutture assomigliano a una foresta di piedini circolari. Ogni piedino è rivestito con un anticorpo per le molecole di adesione delle cellule epiteliali (EPCAM), che pur essendo comuni in molti tipi di cellule cancerose non sono presenti nelle cellule ordinarie. Durante il processo di formazione di un tumore la molecola di adesione delle cellule epiteliali è di vitale importanza nello scambio di informazioni tra una cellula e l'altra. Quando il sangue scorre attraverso il chip, le CTC aderiscono ai piedini circolari. Nei test clinici effettuati il chip è riuscito a individuare il cancro in centoquindici pazienti su centosedici.

La diffusione su ampia scala di tale "laboratorio in un chip" influenzerà radicalmente il costo della diagnosi delle malattie. Oggi una biopsia o un'analisi chimica può costare diverse centinaia di dollari e richiedere varie settimane. In futuro il costo potrebbe scendere a pochi centesimi, con risultati disponibili nel giro di qualche minuto. Questo rivoluzionerebbe sicuramente la velocità e l'accessibilità della fase diagnostica. In pratica, ogni volta che ci laveremo i denti avremo a disposizione un check-up completo capace di rilevare tutta una serie di malattie, cancro compreso.

Leroy Hood e i suoi colleghi dell'Università di Washington hanno creato un chip largo 4 centimetri con cui si possono individuare specifiche proteine in una sola goccia di sangue. Le proteine sono i mattoni della vita. Muscoli, pelle, capelli, ormoni ed enzimi sono tutti fatti di proteine. Individuare proteine caratteristiche di malattie come il cancro può dare vita a un sistema di rilevamento precoce delle malattie. Attualmente il chip costa soltanto 10 centesimi di dollaro, e può trovare una specifica proteina in 10 minuti, risultando quindi diversi milioni di volte più efficiente dei sistemi precedenti. Hood ipotizza che un giorno chip del genere sapranno analizzare rapidamente centinaia di migliaia di proteine, allertandoci su un'ampia serie di malattie molto prima che si sviluppino seriamente.

Nanotubi di carbonio

Una delle più grandi promesse della nanotecnologia sono i nanotubi di carbonio. In linea di principio i nanotubi di carbonio sono più robusti dell'acciaio e possono anche condurre elettricità, ragione per cui non è da escludere neppure la futura realizzazione di computer al carbonio. Sebbene siano enormemente resistenti, uno dei problemi che li caratterizza è che devono essere di forma assolutamente pura, e la più lunga fibra di carbonio puro è lunga soltanto pochi centimetri. Tuttavia un giorno avremo anche computer fatti di nanotubi di carbonio e altre strutture molecolari.

I nanotubi di carbonio sono costituiti da singoli atomi di carbonio legati in modo da formare strutture tubiformi. Immaginiamo una rete metallica flessibile a maglie esagonali in cui ogni giuntura è rappresentata da un atomo di carbonio. Sarà sufficiente arrotolarla per ottenere un tubo e avere un esempio della geometria di un nanotubo di carbonio. I nanotubi di carbonio si formano ogni volta che viene rilasciata della comune fuliggine, ma gli scienziati non si erano mai resi conto che gli atomi di carbonio potessero legarsi in quel un modo così inconsueto.

Le proprietà quasi miracolose dei nanotubi di carbonio sono dovute alla loro struttura atomica. Di norma quando analizziamo un pezzo di materia solida, sia questo un sasso o del legno, ciò che osserviamo è un immenso composto di varie strutture sovrapposte.

Creare minuscole fratture in quel composto non è affatto difficile, e quindi si può facilmente spezzarlo. Ne consegue che la forza di un materiale dipende dalle imperfezioni della sua struttura molecolare. Per esempio, la grafite è composta di puro carbonio, ma è estremamente cedevole, perché fatta di strati che possono scivolare l'uno sull'altro. Ogni strato è costituito di atomi di carbonio, ciascuno dei quali è legato ad altri tre atomi di carbonio.

Anche i diamanti sono di puro carbonio, ma nel loro caso si tratta del minerale più resistente disponibile in natura. Infatti gli atomi di carbonio dei diamanti sono disposti in modo da formare una struttura cristallina rigida e compatta, a cui è dovuta per l'appunto la loro tipica resistenza. Allo stesso modo, i nanotubi di carbonio devono le loro sorprendenti proprietà a una struttura atomica regolare.

Il loro utilizzo in ambito industriale è già una realtà. Grazie alla loro conduttività possono essere impiegati per produrre cavi capaci di condurre enormi quantità di energia elettrica. E considerata la loro resistenza, possono essere sfruttati per creare sostanze più dure del Kevlar. Ma con ogni probabilità l'applicazione più importante del carbonio sarà nel settore dei computer. Il carbonio è infatti uno dei vari candidati che potrebbero infine sostituirsi al silicio e dare vita a una nuova rivoluzione informatica. Non è infatti da escludere che il futuro dell'economia mondiale possa dipendere da questa domanda: che cosa sostituirà il silicio?

L'era del postsilicio

Come abbiamo già detto, la legge di Moore, uno dei pilastri della rivoluzione informatica, non può valere per sempre. Il futuro dell'economia mondiale e il destino delle nazioni dipenderà da chi per primo riuscirà a trovare un sostituto adeguato del silicio.

L'idea del giorno in cui la legge di Moore perderà di valore è come un brivido che attraversa l'economia mondiale⁹. Nel 2007 è stato chiesto allo stesso Gordon Moore se secondo lui la celebre legge che portava il suo nome sarebbe durata per sempre. Moore ha ammesso che ciò non era possibile, e ha persino aggiunto che il suo limite massimo era di altri dieci-quindici anni.

Tale valutazione approssimativa concordava pienamente con le stime effettuate tempo prima da Paolo Gargini, responsabile delle ricerche esterne della Intel. Poiché la Intel Corporation determina il passo di tutto il settore dei semiconduttori, le parole di Gargini sono state sottoposte ad attenta analisi. Alla conferenza annuale Semicon West del 2004 Gargini ha affermato: «Per almeno i prossimi quindici-vent'anni possiamo continuare a osservare la legge di Moore»¹⁰.

L'attuale rivoluzione dei computer basati sul silicio è stata regolata da una questione di primaria importanza: la capacità dei raggi ultravioletti di incidere transistor sempre più piccoli sui wafer di silicio. Attualmente un chip Pentium può avere diverse centinaia di milioni di transistor su un wafer delle dimensioni di un'unghia. Poiché la lunghezza d'onda degli ultravioletti può scendere fino a 10 nanometri, sarà possibile sviluppare tecniche d'incisione tali da intagliare componenti di soli trenta atomi di larghezza. Ma questo processo non potrà andare avanti all'infinito: presto o tardi arriveremo dunque al limite massimo, e per diversi motivi.

Prima di tutto, il calore generato dai chip più potenti finirà con il fonderli. Una soluzione immediata potrebbe essere accumulare i wafer uno sopra l'altro, così da creare un chip a forma di cubo. In tal modo la potenza di elaborazione del chip crescerebbe ulteriormente, ma aumenterebbe anche il calore prodotto. In pratica, questo genere di chip a cubo svilupperebbe un calore talmente intenso da poterci friggere le uova! Il problema è semplice: un chip cubico non ha una superficie sufficiente per consentirne il raffreddamento. Di norma, irrorando un chip caldo con acqua o aria di raffreddamento si ottiene un effetto tanto maggiore quanto più ampia è la superficie del chip. Ma nel caso di un chip cubico la superficie è troppo piccola. E anche potendone raddoppiare le dimensioni, il calore generato aumenterebbe di un fattore 8, poiché il cubo conterrebbe otto volte i componenti elettrici di prima. Peraltro, la sua superficie complessiva aumenterebbe solo di un fattore 4. Ciò significa che il calore generato da un chip cubico si moltiplica in misura assai maggiore della possibilità di raffreddarlo: più è grande, più si riscalda, e più è difficile riportarlo a una temperatura accettabile. Ecco perché i chip cubici rappresentano soltanto una soluzione parziale e temporanea al problema dei limiti del silicio.

Qualcuno ha suggerito di incidere i circuiti con i raggi X anziché con la luce ultravioletta. In linea di principio potrebbe funzionare, perché la lunghezza d'onda dei raggi X è cento volte inferiore a quella della luce ultravioletta, ma c'è uno svantaggio: nel passaggio dalla luce ultravioletta ai raggi X aumentiamo l'energia del fascio di un fattore di circa 100, e questo significa che l'incisione tramite raggi X potrebbe distruggere il wafer. È un po' come se uno

scultore usasse una saldatrice per lavorare una scultura estremamente delicata. L'incisione a raggi X richiede un controllo assoluto, quindi rappresenta soltanto una soluzione a breve termine, niente di più.

Secondo motivo, c'è un problema fondamentale posto dalla teoria quantistica: il principio di indeterminazione dice che non possiamo conoscere con precisione la posizione e allo stesso tempo la velocità di un certo atomo o particella. Gli attuali chip Pentium arrivano a uno spessore di circa trenta atomi, e nel 2020 arriveremo forse a cinque atomi: questo significa che la posizione degli elettroni sarà dubbia, e che questi cominceranno a filtrare attraverso gli strati causando un cortocircuito. Esiste dunque un limite quantistico alle dimensioni che possiamo dare ai transistor di silicio.

Come ho già accennato nel Capitolo 1, una volta sono intervenuto a una conferenza della Microsoft a Seattle, dove di fronte a tremila ingegneri dell'azienda ho sottolineato che il principio della legge di Moore stava cominciando a venire meno. Gli ingegneri della Microsoft, tra i migliori del settore informatico, mi hanno confidato di prendere il problema molto sul serio, e di considerare l'elaborazione parallela come una delle principali risposte per incrementare il potere di calcolo dei computer. In sostanza, il metodo più semplice per risolvere la questione consisterebbe nel collegare in parallelo una serie di chip, in modo che il compito affidato al computer venga suddiviso in diverse porzioni e "riasmontato" una volta portato a termine.

L'elaborazione parallela è peraltro uno dei punti chiave del funzionamento del nostro cervello. Effettuando una scansione MRI mentre pensiamo, scopriamo che diverse regioni del cervello si attivano simultaneamente: ciò significa che il cervello suddivide il compito a cui si sta dedicando in più parti, elaborandone ciascuna in contemporanea con le altre. Questo spiega perché i neuroni, che trasmettono messaggi elettrici alla velocità straordinariamente bassa di 320 chilometri all'ora, riescono a battere anche un supercomputer, in cui i messaggi viaggiano a velocità prossime a quella della luce. Il nostro cervello non è così veloce, ma riesce a compensare la sua lentezza effettuando miliardi di piccoli calcoli simultaneamente e sommando infine i risultati.

Una delle difficoltà dell'elaborazione parallela è proprio la scomposizione del problema in diverse parti. Ciascuna di tali parti deve poi essere elaborata da più chip, e infine i vari risultati ottenuti devono essere riasmontati. Coordinare questo frazionamento può infatti risultare molto complesso, e tutto dipende dalla natura di ogni singolo problema. È quindi assai difficile elaborare una procedura universale. Il cervello umano ci riesce senza alcuna fatica, ma per arrivare a tanto madre natura ha impiegato milioni di anni, mentre gli ingegneri del software avranno al massimo un paio di decenni.

Transistor atomici

Un possibile sostituto dei chip di silicio sono i transistor fatti di singoli atomi. Se i transistor al silicio falliscono perché collegamenti e strati contenuti nei chip si avvicinano alla scala atomica, perché non ricominciare daccapo e computare sulla base degli atomi?

Un transistor non è che un interruttore che permette di regolare il flusso di elettricità in un conduttore. È dunque possibile sostituire il transistor al silicio con una singola molecola fatta di sostanze chimiche come rotaxano e benzantiolo. Analizzando una molecola di benzantiolo possiamo notare che assomiglia a un lungo tubo con al centro una “manopola”, o una “valvola”, costituita di atomi. Di norma l’elettricità fluisce liberamente all’interno del tubo rendendolo conduttivo, ma è anche possibile intervenire su quella manopola e interrompere il flusso elettrico. In tal modo l’intera molecola funge da interruttore e controlla il flusso di elettricità. Se in una certa posizione la manopola consente il flusso elettrico, allora quella posizione può rappresentare il numero “1”. Se una volta ruotata la manopola interrompe il flusso, allora è su “0”. Le molecole finiscono così per trasmettere messaggi digitali.

I transistor molecolari esistono già. Molte aziende hanno pubblicamente annunciato di averne realizzati, ma prima che possano essere introdotti sul mercato bisognerà riuscire a installarli correttamente e a produrli in serie.

Una delle sostanze più promettenti per i transistor molecolari si chiama *grafene*, ed è stata isolata dalla grafite per la prima volta nel 2004 da Andre Geim e Kostya Novoselov dell’Università di Manchester, i quali proprio per questo lavoro si sono meritati un Nobel. Il grafene è come un singolo strato di grafite. A differenza dei nanotubi di carbonio, che sono fogli di atomi di carbonio arrotolati, è costituito da un solo foglio di carbonio spesso non più di un atomo. Ma come i nanotubi di carbonio, il grafene costituisce un nuovo stato della materia, quindi gli scienziati ne stanno studiando le notevoli proprietà, compresa la conduttività elettrica. Come ha sottolineato Novoselov: «Dal punto di vista della fisica il grafene è una miniera d’oro. Potremmo studiarlo per secoli!»¹¹. (Il grafene è anche il materiale più resistente mai testato in campo scientifico. Se potessimo mettere un elefante su una matita e mantenerla in equilibrio su un foglio di grafene, questo non si bucherebbe.)

Il gruppo di Novoselov ha sfruttato le tecniche standard impiegate nell’industria dei computer per incidere alcuni dei più piccoli transistor mai realizzati. Raggi estremamente sottili di elettroni possono incidere canali nel grafene, realizzando i più piccoli transistor al mondo: dieci atomi di larghezza per uno di spessore. (Attualmente il più piccolo transistor molecolare è di circa trenta nanometri, ma quelli di Novoselov sono una trentina di volte più piccoli!)

In pratica i transistor di grafene sono talmente piccoli che potrebbero rappresentare il limite assoluto dei transistor molecolari. Se dovessimo ottenere qualcosa di più piccolo, il principio di indeterminazione avrebbe il sopravvento e gli elettroni comincerebbero a fuoriuscire dal transistor, distruggendone le proprietà. «È praticamente la cosa più piccola che si possa produrre» ha commentato Novoselov¹².

Ci sono molte soluzioni promettenti per i transistor molecolari, ma il vero problema è ben più banale: come collegarli e assemblarli in modo da ottenere un prodotto commerciabile? Infatti non basta creare un singolo transistor molecolare. Essendo notoriamente difficile da maneggiare, poiché migliaia di volte più sottile di un capello umano, occorre pensare a come

produrlo in serie con processi industriali, e questo rappresenta un vero incubo, anche perché al momento non disponiamo affatto della tecnologia necessaria.

Per esempio, il grafene è un materiale così innovativo che gli scienziati non hanno idea di come produrne grandi quantitativi. Attualmente riescono a ottenere circa 0,1 millimetri di grafene puro, cioè troppo poco per essere sfruttato commercialmente. Si spera dunque di elaborare un processo attraverso il quale i transistor molecolari possano autoassemblarsi. In natura capita infatti di trovare matrici di molecole che, come per magia, si condensano secondo uno schema preciso, ma finora nessuno è riuscito a riprodurre tale magia in laboratorio.

Computer quantistici

L'ipotesi più ambiziosa è quella di ricorrere ai computer quantistici, che in sostanza computano sulla base di singoli atomi. Alcuni sostengono che i computer quantistici rappresentino l'ultima frontiera dell'informatica, poiché l'atomo è l'unità più piccola su cui è possibile calcolare.

Un atomo è come una trottola. Normalmente si possono registrare informazioni digitali su queste trottole assegnando il valore "0" se la trottola ha spin up, oppure "1" se ha spin down. Basta capovolgere la trottola per convertire lo 0 in 1 e quindi eseguire un calcolo.

Ma nel mondo bizzarro dei quanti possiamo dire che un atomo ha contemporaneamente spin up e spin down. (Nel mondo quantistico trovarsi nello stesso tempo in luoghi diversi è del tutto comune.) Un atomo può dunque contenere molte più informazioni di un semplice 0 o 1. Può cioè descrivere una miscela di informazioni fatta di più 0 e 1. Ecco perché i computer quantistici si servono dei *qubit* anziché dei bit. Per esempio, possono essere caratterizzati per il 25 per cento da uno spin up e per il 75 per cento da uno spin down. Così facendo, lo spin dell'atomo include molte più informazioni di un singolo bit.

I computer quantistici sono talmente potenti che la CIA se n'è interessata per la loro capacità di decifrazione dei codici. Come sappiamo, quando la CIA deve penetrare i codici segreti di un'altra nazione deve prima di tutto trovare la "chiave", e ogni paese del mondo ha elaborato metodi estremamente ingegnosi con cui realizzare le chiavi che codificano i loro messaggi. Per esempio, una chiave può basarsi sulla fattorizzazione di un numero estremamente grande. Fattorizzare il numero 21 è facile, poiché si tratta del prodotto di 3 e 7. Immaginiamo però di avere un numero intero composto da cento cifre e di chiedere a un computer di riscriverlo sotto forma di prodotto di altri due numeri interi: per fattorizzare un numero del genere un normale computer potrebbe metterci un secolo. Inoltre, un computer quantistico è così potente che in linea di principio può decifrare facilmente qualsiasi codice.

I computer quantistici non sono fantascienza, esistono già oggi. Ho potuto vederne uno in funzione al MIT, quando ho visitato il laboratorio di Seth Lloyd, uno dei pionieri in questo campo. Si tratta di un laboratorio pieno di computer, pompe da vuoto e sensori, ma lo strumento principale che ho visto è un congegno che assomiglia a una comune macchina per eseguire l'MRI, però molto più piccola. Come l'apparecchio per la risonanza magnetica, questo congegno dispone di due grandi bobine di rame distanziate che creano un campo magnetico uniforme nello spazio che le separa. Il materiale da testare viene posizionato in questo campo magnetico, e gli atomi al suo interno si allineano automaticamente, proprio come trottole. Se lo spin dell'atomo punta verso l'alto (spin up), corrisponde a 0; se invece punta verso il basso (spin down), il suo valore è 1. Dopodiché Lloyd invia un impulso elettromagnetico che, dopo avere raggiunto il campione, cambia l'allineamento degli atomi. Alcuni di questi si capovolgono, cosicché da 1 diventano 0. In questo modo la macchina esegue i suoi calcoli.

Ma allora perché non abbiamo già computer quantistici sulle nostre scrivanie, pronti a risolvere i misteri dell'universo? Lloyd mi ha confessato che il vero problema, quello che ha ostacolato la ricerca nel campo dei computer quantistici, è il disturbo proveniente dal mondo esterno, che altera irrimediabilmente le delicate proprietà di questi atomi. Quando gli atomi sono *coerenti* e vibrano in fase l'uno con l'altro, il minimo disturbo proveniente dal mondo esterno può alterare tale precario equilibrio e provocare una *decoerenza* atomica, in virtù della

quale gli atomi non vibrano più all'unisono. Persino il passaggio di un fascio di raggi cosmici o la vibrazione causata dal rombo di un camion fuori dal laboratorio possono distruggere l'esile allineamento dello spin di questi atomi, e quindi alterarne i calcoli.

Il problema della decoerenza è dunque il solo e grande ostacolo alla creazione dei computer quantistici. Chiunque riuscirà a risolverlo si meriterà non solo un Nobel, ma diventerà anche l'uomo più ricco del mondo.

Produrre computer quantistici sulla base di singoli atomi coerenti è dunque un processo assai arduo, poiché gli atomi sono facilmente vittima della decoerenza. Finora il calcolo più complesso eseguito da un computer quantistico è stato $3 \times 5 = 15$. Certo non è granché, ma non dobbiamo dimenticare che tale risultato è stato ottenuto sulla base di singoli atomi.

Inoltre, la teoria quantistica propone un'altra bizzarra complicazione, anche questa basata sul principio di indeterminazione. Tutti i calcoli compiuti da un computer quantistico sono incerti, cosicché l'esperimento dev'essere ripetuto varie volte. Ne consegue che se ripetiamo $2 + 2$ un bel po' di volte, alla fine la risposta è in media 4. Ecco perché in un computer quantistico persino qualcosa di preciso come l'aritmetica diventa incerta.

Nessuno sa come risolveremo il problema della decoerenza. Vint Cerf, uno dei creatori di internet, ha previsto che «entro il 2050 avremo sicuramente trovato un modo per ottenere il calcolo quantistico a temperatura ambiente»¹³.

Occorre anche sottolineare che la posta in gioco è talmente alta che diversi gruppi di ricerca sono già intenti a sviluppare progetti al riguardo. Tra quelli in competizione abbiamo:

- Computer ottici: si tratta di computer che calcolano sulla base dei fasci luminosi anziché degli elettroni. Poiché i fasci di luce possono attraversarsi l'un l'altro, i computer ottici hanno il vantaggio di poter essere cubici e privi di collegamenti. Inoltre è possibile fabbricare i laser servendosi delle stesse tecniche d'incisione dei comuni transistor, quindi almeno in teoria un chip potrebbe contenere milioni di laser.
- Computer a punti quantici: i semiconduttori impiegati nei chip possono essere incisi fino a ottenere nanostrutture puntiformi talmente piccole da risultare al massimo di un centinaio di atomi. Al che questi atomi possono iniziare a vibrare all'unisono. Nel 2009 da un singolo elettrone è stato costruito il più piccolo punto quantico al mondo. Questi punti quantici hanno già dimostrato le proprie capacità come sorgenti di singoli fotoni nei diodi e negli schermi dei computer. In futuro, se sapremo sfruttare correttamente i punti quantici, potremo finalmente ottenere un computer quantistico.
- Computer a DNA: nel 1994, presso L'Università della California del Sud, è stato creato il primo computer fatto di molecole di DNA. Poiché un singolo filamento di DNA codifica informazioni sugli amminoacidi rappresentati dalle lettere A, T, C e G (anziché da 0 e 1), il DNA stesso può essere considerato una sorta di nastro perforato avanzato, capace di immagazzinare una grande quantità di informazioni. Nello stesso modo in cui grandi numeri digitali possono essere gestiti e riordinati da un computer, è possibile eseguire operazioni analoghe miscelando fiale di fluidi contenenti DNA, che può essere tagliato e diviso in diversi modi. Sebbene il processo sia lento, i trilioni di molecole di DNA che operano simultaneamente sono così tanti che un computer a DNA può effettuare determinati calcoli molto meglio di un computer digitale. Peraltro, mentre il computer digitale è molto pratico e può essere inserito in un cellulare, i computer a DNA sono meno facili da maneggiare, poiché devono miscelare le fiale con i fluidi contenenti il DNA.

Modellare la materia

Nel film *Terminator 2. Il giorno del giudizio*, Arnold Schwarzenegger deve vedersela con un robot T-1000, un modello estremamente avanzato che viene dal futuro ed è fatto di metallo liquido: praticamente una massa di mercurio tremolante che cambia forma come vuole e s'infilava ovunque superando qualsiasi ostacolo. Questo robot riesce a introdursi nelle più piccole fessure e a rimodellare mani e piedi per trasformarli in armi mortali, poi in un solo istante riacquisisce la sua forma originaria e continua la sua missione omicida. Il T-1000 è un robot inarrestabile, un killer perfetto.

Ovviamente, questa è solo fantascienza: la tecnologia attuale non ci permette di modellare un oggetto solido quando e come vogliamo. Tuttavia, verso la metà del secolo una simile tecnologia "modellatrice" potrebbe essere ampiamente diffusa. Una delle aziende che sta già cercando di svilupparla è la Intel.

Nel 2050 gran parte dei frutti della nanotecnologia sarà diffusa ovunque, però nascosta ai nostri occhi. Quasi ogni prodotto verrà migliorato attraverso tecniche di produzione molecolare, così da risultare super resistente, conduttivo e flessibile. Grazie alla nanotecnologia ci saranno anche sensori capaci di proteggerci e aiutarci in ogni momento e situazione, poiché distribuiti nell'ambiente circostante e ben nascosti, oltre la soglia della nostra consapevolezza. Camminando per strada tutto ci apparirà esattamente come è sempre stato, e non sapremo mai in che modo la nanotecnologia avrà cambiato il mondo intorno a noi.

Una conseguenza della nanotecnologia risulterà però ovvia.

Il robot killer T-1000 di *Terminator* è forse l'esempio più impressionante di un oggetto proveniente dal settore definito *della materia programmabile*, che un giorno ci consentirà di cambiare forma, aspetto e colore di qualsiasi oggetto semplicemente premendo un pulsante. Sebbene in forma primitiva, anche un'insegna al neon è una forma di materia programmabile, poiché è sufficiente attivare un interruttore per inviare elettricità attraverso un tubo pieno di gas: l'elettricità eccita gli atomi di gas, che ritornando alla loro condizione normale emettono luce. Una versione più sofisticata di materia programmabile è invece la tecnologia LCD, ormai di uso comune nell'industria dei computer. L'LCD contiene un cristallo liquido che diventa opaco quando vi si applica una lieve corrente elettrica. Regolando la corrente elettrica che fluisce all'interno del cristallo possiamo quindi creare colori e forme su uno schermo, semplicemente agendo sui pulsanti.

Gli scienziati della Intel sono però molto più ambiziosi, perché immaginano di sfruttare la materia programmabile per cambiare concretamente la forma di un oggetto solido, proprio come accade nella fantascienza. L'idea è tutto sommato semplice: occorre creare un chip delle dimensioni di un minuscolo granello di sabbia, poi tali "granelli intelligenti" permetteranno di cambiarne la carica elettrica statica in superficie, in modo che possano attrarsi o respingersi reciprocamente. Con determinate cariche elettriche i chip-granelli si disporranno in altrettante formazioni. Ma sarà anche possibile riprogrammare i chip in modo che la loro carica elettrica cambi a comando, provocandone un'immediata e diversa ridisposizione. Tali granelli hanno preso il nome di *catomi* (contrazione di *atomi claytronici*) ¹⁴, poiché possono formare un'ampia gamma di oggetti semplicemente cambiando carica elettrica, più o meno come fanno gli atomi. (La materia programmabile ha molto in comune con i robot modulari di cui abbiamo discusso

nel Capitolo 2. Infatti, sebbene i robot modulari contengano componenti intelligenti delle dimensioni di circa 5 centimetri e capaci di riorganizzarsi, nella materia programmabile questi “mattoni” fondamentali vengono ridotti al di sotto del millimetro e anche di più.)

Jason Campbell, uno dei promotori di questa tecnologia nonché ricercatore senior alla Intel, spiega: «Immaginiamo un telefono cellulare. Il mio, per esempio, è troppo grande per stare in tasca e troppo piccolo per le mie dita. Ed è anche peggio se provo a guardarci un film o a leggere le e-mail. Ma se avessi circa 200 o 300 millilitri di catomi potrei farlo diventare un apparecchio delle dimensioni che voglio ad ogni preciso momento»¹⁵. In pratica, un istante prima avevamo in mano un cellulare, e un subito dopo avremmo qualcos'altro, così non dovremmo più portarci dietro un'infinità di dispositivi tecnologici.

Nei suoi laboratori la Intel ha già creato una matrice di catomi di circa 2,5 centimetri. Un catomo assomiglia a un cubo con una miriade di minuscoli elettrodi sparsi uniformemente sulla sua superficie. Ciò che lo rende unico è che possiamo modificare la carica di uno dei suoi elettrodi in modo che i catomi si leghino gli uni agli altri secondo ordini diversi. In base a una serie di cariche, tali cubi possono combinarsi fino a creare un cubo più grande, ma cambiando la carica di ciascun elettrodo del cubo i catomi si disfano e si ridispongono rapidamente in una forma diversa, per esempio quella di una barca.

Il punto è ridurre ogni catomo alle dimensioni di un granello di sabbia, o anche di più. Se un giorno le tecniche d'incisione del silicio ci consentiranno di produrre catomi piccoli come una cellula, sarà davvero ipotizzabile cambiare una forma in un'altra semplicemente premendo un pulsante. Un altro “grande vecchio” della Intel, Justin Rattner, mi ha detto: «Ancora una quarantina d'anni e questa tecnologia sarà alla portata di tutti»¹⁶.

A trarne immediato vantaggio saranno i progettisti di automobili, gli ingegneri aeronautici, gli artisti, gli architetti e chiunque debba realizzare modelli tridimensionali dei propri progetti da modificare continuamente. Per esempio, se un uno dovesse modificare un'auto tre porte potrebbe afferrarne il modello, allungarlo e trasformarlo in una cinque porte. Con una semplice compressione diventerebbe invece un'auto sportiva. È qualcosa di estremamente superiore alla creta o a qualsiasi altro materiale modellabile, che non è dotato di memoria né d'intelligenza. La materia programmabile ha invece una sua intelligenza, poiché può ricordare le forme precedenti, adattarsi a nuove idee e rispondere prontamente ai desideri del progettista. Una volta finalizzato il modello, il progettista non dovrà fare altro che inviarlo per e-mail a migliaia di altri colleghi, che ne otterranno copie perfette.

Questo potrebbe avere un profondo effetto sui generi di consumo. I giocattoli, per esempio, potrebbero essere programmati in modo da cambiare forma installandovi semplicemente nuove istruzioni: per riprogrammare un vecchio giocattolo e regalarne uno completamente nuovo basterebbe quindi scaricare il relativo software, e i bambini non festeggerebbero più il Natale aprendo i regali sotto il tradizionale albero, ma installando “l'aggiornamento” del loro giocattolo preferito gentilmente inviato via e-mail da Babbo Natale. Così i catomi di cui era costituito il giocattolo dell'anno precedente si trasformerebbero nel nuovo prodotto di punta del mercato. Ciò significa che un'ampia gamma di prodotti di consumo si ridurrebbe infine a software scaricabile via internet. Invece di far viaggiare un furgone che ci recapiti a domicilio nuovi mobili o elettrodomestici, basterebbe fare un download dalla rete e riciclare i prodotti che già abbiamo in casa. Grazie alla materia programmabile, rinnovare case e appartamenti non sarebbe più una faticosa perdita di tempo: cambiare piastrelle, ripiani e armadietti sarebbe

soltanto una questione di riprogrammazione. In caso di guasto, un processo analogo rimetterebbe tutto a posto.

Malgrado tali enormi aspettative, l'équipe della Intel deve ancora affrontare numerosi problemi. Uno è proprio come orchestrare i movimenti di questi milioni di catomi. Nel momento in cui cercassimo di caricare tutte queste informazioni nella materia programmabile, avremmo sicuramente problemi di larghezza di banda. Tuttavia esistono anche alcune possibili scorciatoie.

Per esempio, nei film di fantascienza assistiamo spesso al cosiddetto *morphing*, cioè all'istantanea trasformazione di un personaggio in un mostro. Nei film realizzati con la tecnica cinematografica tradizionale tale processo era complesso e tedioso, ma con i computer di oggi è molto più semplice. Per prima cosa si identificano gli specifici vettori che contrassegnano i vari punti chiave del volto, per esempio il naso e gli occhi, sia per l'uomo sia per il mostro. Ogni volta che spostiamo un vettore, il viso si trasforma di conseguenza, quindi i computer sono programmati per muovere i vettori e passare da un viso a un altro fino a completare la trasformazione. Potremmo dunque adottare scorciatoie simili per cambiare forma a oggetti tridimensionali.

Un altro problema è che le forze elettriche statiche tra i catomi sono deboli rispetto alle forze interatomiche che mantengono la coesione della materia. Come abbiamo visto, le forze quantistiche possono essere estremamente potenti, poiché responsabili di caratteristiche straordinarie come la robustezza dei metalli e l'elasticità della plastica. Riprodurre l'intensità di tali forze tramite forze elettrostatiche in modo che i prodotti ottenuti si mantengano stabili rappresenterà sicuramente un problema.

Ho assistito personalmente gli straordinari progressi nel settore della materia programmabile quando ho portato la troupe televisiva di Science Channel nel laboratorio di Seth Goldstein alla Carnegie Mellon University. Su un tavolo c'erano grandi mucchi di cubi di varie dimensioni, ciascuno dotato di un chip. Ho notato che due di quei cubi erano saldamente legati l'uno all'altro da forze elettriche, e Goldstein mi ha chiesto di provare a separarli con le mani. Malgrado tutti i miei sforzi, non ci sono riuscito: le forze elettriche che garantivano la coesione di quei cubi erano straordinariamente potenti. A quel punto Goldstein mi ha fatto notare che miniaturizzando i cubi le stesse forze elettriche si sarebbero moltiplicate proporzionalmente. Mi ha quindi condotto in un altro laboratorio, dove mi ha mostrato il possibile livello di miniaturizzazione di quei catomi. Utilizzando la stessa tecnica impiegata per incidere milioni di transistor sui wafer di silicio, i ricercatori riuscivano a incidere catomi micro-scopici, di qualche millimetro di diametro soltanto. In realtà erano talmente piccoli che per poterli osservare attentamente ho dovuto utilizzare un microscopio. Goldstein spera che un giorno, controllando le loro forze elettriche, riuscirà a dare loro una qualsiasi disposizione premendo un comune pulsante, proprio come un mago che tira fuori le cose dal cappello.

Allora gli ho domandato come pensasse di fornire istruzioni dettagliate a miliardi di catomi in modo che, per esempio, un frigorifero si trasformasse rapidamente in un forno. Mi sembrava un vero incubo per qualsiasi programmatore, e gliel'ho confessato. La sua risposta, però, è stata che non è affatto necessario trasmettere istruzioni dettagliate ad ogni singolo catomo, a cui basta soltanto sapere a quale vicino agganciarsi. Se ogni catomo viene istruito in modo da legarsi soltanto a un numero ridotto di catomi a lui prossimi, si ridispone magicamente formando con gli altri strutture complesse (un po' come i neuroni del cervello di un bambino, i quali devono soltanto sapere come stabilire un contatto con i neuroni vicini mano a mano che la struttura

cerebrale si sviluppa).

AmMESSo che il problema della programmazione e della stabilità possa essere risolto, è verosimile pensare che entro la fine del secolo interi edifici, se non addirittura città, potrebbero sorgere premendo un pulsante. Sarà soltanto necessario stabilire la collocazione degli edifici, scavare le fondamenta e consentire che trilioni di catomi creino intere città, che emergeranno letteralmente da un deserto o da una foresta. Inoltre, gli stessi ingegneri della Intel immaginano anche il giorno in cui i catomi assumeranno forma umana. «Perché no? È una prospettiva interessante!»¹⁷ sostiene Rattner. Forse significa che un giorno anche noi dovremo fare i conti con un T-1000?

FUTURO REMOTO (DAL 2070 AL 2100)

Il santo graal: il replicatore

I sostenitori della nanotecnologia prevedono che entro il 2100 disporremo di una macchina ancora più potente: un assemblatore molecolare, o *replicatore*, capace di creare pressoché qualsiasi cosa. Si tratterà di una macchina che avrà probabilmente le dimensioni di una lavatrice, e non dovremo fare altro che inserire al suo interno le materie prime fondamentali e poi premere il pulsante d'avvio. A quel punto trilioni di nanobot convergeranno sulle materie prime, ciascuno programmato per separare una molecola dall'altra e poi riassemblarla in un prodotto completamente nuovo. In pratica, con una macchina del genere potremo creare qualunque cosa. Il replicatore rappresenterebbe dunque il massimo conseguimento dell'ingegneria e della scienza, il culmine assoluto dei nostri tentativi di dominare la materia da quando abbiamo preso in mano il primo strumento, ai tempi remoti della preistoria.

Tuttavia, anche il replicatore comporta diversi problemi, tra cui l'incredibile numero di atomi che deve riordinare per "copiare" un determinato oggetto. Per esempio, il corpo umano è fatto di oltre cinquanta trilioni di cellule, che equivalgono a più di 10^{26} atomi. Si tratta di una cifra impressionante, e soltanto per memorizzare la collocazione di tutti questi atomi ci vorrebbe una memoria gigantesca. Esiste però un modo per superare questo ostacolo: creare un nanobot, ovvero un robot molecolare, che attualmente è soltanto un'ipotesi. I nanobot avrebbero diverse proprietà fondamentali. Primo, saprebbero riprodursi da sé, quindi una volta fatta una copia di se stessi potrebbero continuare all'infinito. Tutto sta nel creare il primo nanobot della serie. Secondo, i nanobot saprebbero identificare le molecole e tagliarle in punti specifici. Terzo, seguendo un programma saprebbero risistemare gli atomi secondo una configurazione precisa. Quindi il compito di riordinare 10^{26} atomi consisterebbe nel costruire una quantità equivalente di nanobot, ciascuno progettato per maneggiare un singolo atomo. Così facendo l'incredibile numero di atomi contenuti nel corpo umano non rappresenterebbe più un ostacolo insormontabile. Resta però il problema fondamentale del primo nanobot e della sua "autoriproduzione".

Ad ogni modo, circa la possibile realizzazione fisica di tale nanocostruttore la comunità scientifica è divisa in due. Alcuni scienziati, come Eric Drexler, pioniere della nanotecnologia nonché autore di *The Engines of Creation*, immagina un futuro in cui ogni prodotto sarà realizzato a livello molecolare, creando una cornucopia di beni che oggi possiamo solo sognare. Una macchina capace di darci tutto ciò che vogliamo rivoluzionerà ogni aspetto della società.

Altri scienziati sono invece più scettici.

Lo scomparso premio Nobel Richard Smalley ha sollevato il problema in un curioso articolo pubblicato nel 2001 su "Scientific American". Smalley ha infatti affrontato il problema in termini di "dita grasse" e "dita appiccicose"¹⁸. Dal suo punto di vista la domanda chiave sarebbe: possiamo costruire un nanobot molecolare abbastanza abile da riordinare le molecole a piacimento? No, secondo Smalley.

Il dibattito si è acceso allorché Smalley si è confrontato direttamente con Drexler in una serie di lettere aperte pubblicate su "Chemical and Engineering News" tra il 2003 e il 2004. Le ripercussioni di quel confronto sortiscono effetti ancora oggi. Secondo Smalley, le "dita" di una macchina molecolare non sarebbero capaci di eseguire un compito tanto delicato, per due precisi motivi.

Prima di tutto dovrebbero fare i conti con le deboli forze d'attrazione che le farebbero inevitabilmente "appiccicare" alle altre molecole. Infatti gli atomi si incollano gli uni agli altri, e proprio a causa, almeno in parte, delle forze elettriche deboli tra gli elettroni, come la forza di Van der Waals. Provate a riparare un orologio con delle pinzette ricoperte di miele, e vedrete che rimettere a posto i componenti di un meccanismo delicato come quello di un orologio sarà assolutamente impossibile. E ora proviamo a immaginare di dover assemblare qualcosa di ancora più complesso, come una molecola, che però si appiccica continuamente alle nostre dita.

In secondo luogo tali "dita" sarebbero troppo "grasse" per maneggiare atomi. Tornando all'esempio precedente, immaginate di dover riparare un orologio indossando spessi guanti di cotone. Poiché le "dita" sono fatte di singoli atomi, proprio come gli oggetti che dovrebbero maneggiare, sarebbero semplicemente troppo ingombranti per eseguire operazioni tanto complesse.

Smalley ha quindi concluso: «Proprio come non è possibile far innamorare una ragazza e un ragazzo semplicemente spingendoli l'uno contro l'altro, non si può ottenere una reazione chimica semplicemente accostando fra loro due oggetti molecolari. [...] La chimica, come l'amore, è una faccenda assai più complicata»¹⁹.

Questo dibattito ci porta al nocciolo della questione, e cioè se l'ipotetica creazione di un replicatore universale capace di rivoluzionare la società può davvero diventare realtà oppure è destinata a rimanere una fantasticheria, e quindi a finire nel cestino dei rifiuti tecnologici. Come abbiamo visto, le leggi della fisica che governano il nostro mondo non si traducono facilmente nella fisica del nanomondo. Effetti che noi possiamo tranquillamente ignorare – le forze di Van der Waals, la tensione superficiale, il principio di indeterminazione, il principio di esclusione di Pauli e così via –, nel nanomondo hanno una parte dominante.

Per meglio valutare il problema, immaginiamo che un atomo abbia le dimensioni di una biglia, e che milioni di biglie riempiano una piscina. Se dovessimo cadere in tale piscina l'effetto sarebbe ben diverso dal cadere in una piscina piena d'acqua. Infatti, in virtù del moto browniano le biglie continuerebbero a vibrare e a venirci addosso da ogni direzione. Nuotare in una piscina del genere sarebbe pressoché impossibile, poiché equivarrebbe a dare bracciate in un mare di melassa. Infatti, se provassimo ad afferrare una di quelle biglie ci sfuggirebbe di mano o aderirebbe alle nostre dita secondo una complessa combinazione di forze.

Entrambi gli scienziati hanno infine "acconsentito di dissentire". Sebbene Smalley non sia riuscito a sferrare un colpo letale all'idea del replicatore molecolare, una volta calmatesi le acque diverse cose sono risultate chiare a entrambi i contendenti. Tanto per cominciare hanno convenuto che l'ipotesi ingenua di un nanobot munito di pinzette molecolari con cui tagliare e incollare le molecole doveva necessariamente essere rivista, poiché su scala atomica nuove forze quantistiche avrebbero preso il sopravvento.

Secondariamente, sebbene il replicatore, o "costruttore universale", sia oggi pura e semplice fantascienza, ne esiste già una versione. Per esempio, madre natura può prendere hamburger e verdure e trasformarli in un bambino in soli nove mesi! Tale processo è portato a termine dalle molecole di DNA (contenenti il codice del modello del bambino) che guidano l'azione dei ribosomi (che tagliano e dividono le molecole nel modo corretto) servendosi delle proteine e degli amminoacidi contenuti nel cibo.

Infine, un assemblatore molecolare potrebbe anche funzionare, ma dovrebbe essere molto più sofisticato. Per esempio, come ha sottolineato Smalley, avvicinare due atomi non garantisce

affatto una reazione. Spesso madre natura aggira il problema servendosi di un terzo componente, un enzima in una soluzione acquosa, tale da facilitare la reazione chimica. Smalley ha infatti sottolineato come molti componenti chimici presenti nei computer e nell'industria elettronica non possono essere dissolti in acqua. Al che Drexler ha ribattuto che non tutte le reazioni chimiche necessitano di acqua o enzimi.

Una possibilità, per esempio, è detta *autoassemblaggio*, ed è basata sul metodo bottom-up. Fin dall'antichità, infatti, gli esseri umani hanno costruito adottando il metodo top-down: servendosi di attrezzi come sega e martello hanno cominciato a tagliare legna e a unire le assi per creare strutture più ampie (le case) seguendo un progetto dall'inizio alla fine. Ma secondo il metodo bottom-up le cose si riordinano da sé. In natura, per esempio, splendidi fiocchi di neve si cristallizzano da soli: trilioni e trilioni di atomi si riordinano dando vita a nuove forme, non c'è bisogno di un architetto per ogni singolo fiocco di neve. E qualcosa di analogo accade nei sistemi biologici: i ribosomi dei batteri, che sono sistemi molecolari complessi contenenti almeno cinquantacinque molecole proteiche differenti e varie molecole di RNA, possono autoassemblarsi spontaneamente in una provetta da laboratorio.

L'autoassemblaggio è impiegato anche nell'industria dei semi-conduttori. I componenti utilizzati nei transistor talvolta si assemblano da soli. Applicando tecniche e processi complicati (come il *quenching*, la cristallizzazione, la polimerizzazione, la deposizione chimica da vapore, la solidificazione eccetera) secondo una precisa sequenza, si possono produrre diversi componenti per computer buoni per essere commercializzati. Come abbiamo visto, con questo stesso metodo si può produrre uno specifico tipo di nanoparticella impiegata nella terapia contro le cellule cancerose.

Ad ogni modo, la maggior parte delle cose non si crea da sé. E in generale soltanto una minuscola frazione di nanomateriali ha dimostrato di autoassemblarsi correttamente. Non è possibile ordinare a una nanomacchina di sfruttare l'autoassemblaggio premendo un pulsante su un telecomando. La creazione delle nanomacchine seguirà dunque un'evoluzione costante ma lenta.

Per riassumere, almeno in apparenza gli assemblatori molecolari non violano nessuna legge della fisica, ma la loro realizzazione risulterà estremamente difficile. Attualmente i nanobot non esistono, e non li avremo nemmeno nel futuro prossimo, ma se e quando riusciremo a produrre il primo nanobot perfettamente funzionante, il mondo in cui viviamo non sarà più lo stesso.

Costruire un replicatore

A che cosa potrebbe assomigliare un replicatore? Nessuno può saperlo con esattezza, poiché per costruirne uno ci vorranno ancora molti decenni, se non addirittura un secolo. Tuttavia mi sono fatto un'idea del suo possibile aspetto quando l'ho provato, letteralmente, sulla mia testa.

Per uno speciale di Science Channel è stata infatti ricavata una copia tridimensionale del mio volto da un blocco di plastica grazie a un raggio laser che ha effettuato una scansione orizzontale della mia faccia. Mentre il raggio laser “rimbalzava” sulla mia pelle, il suo riflesso veniva registrato da un sensore che trasmetteva l'immagine a un computer. Poi il raggio passava una seconda volta sul mio viso, ma questa volta più lentamente. Alla fine, completata la scansione del volto e suddivisa in varie “fette” orizzontali, sullo schermo di un computer è emersa l'immagine tridimensionale del mio viso fedele forse al decimo di millimetro.

Questa mole di informazioni è stata poi trasferita a un grosso macchinario, più o meno delle dimensioni di un frigorifero, in grado di produrre un'immagine tridimensionale di plastica di quasi ogni cosa. La macchina aveva un piccolo ugello che effettuava vari passaggi spostandosi orizzontalmente. Ad ogni passaggio spruzzava una minima quantità di plastica fusa, così da duplicare la scansione laser del mio viso. Dopo una decina di minuti e un bel po' di passaggi, la macchina ha prodotto il modello, la cui somiglianza con il mio viso era a dir poco inquietante.

Le applicazioni commerciali di tale tecnologia sono potenzialmente enormi, poiché in pochi minuti permette di creare una copia realistica di qualsiasi oggetto tridimensionale, per esempio certe componenti meccaniche particolarmente complesse. È peraltro possibile immaginare che tra qualche decennio, o forse tra qualche secolo, un dispositivo sarà infine capace di creare una copia tridimensionale e autentica (non di plastica) di qualsiasi oggetto, identica all'originale anche a livello cellulare e atomico.

Il passo successivo consisterebbe nel servirsi di questo scanner 3d per creare organi del corpo umano. Per esempio, gli scienziati della Wake Forest University hanno ideato un metodo pionieristico per produrre tessuti cardiaci viventi con una stampante a getto d'inchiostro. Per prima cosa hanno scritto un software specifico che ordina all'ugello della stampante di spruzzare cellule cardiache viventi ad ogni passaggio. Per fare questo utilizzano una comune stampante a getto d'inchiostro, la cui cartuccia viene però riempita con una miscela di fluidi contenenti cellule cardiache viventi. In tal modo hanno il controllo preciso del posizionamento di ogni singola cellula nel progetto tridimensionale. Dopo vari passaggi il risultato è un vero e proprio strato di tessuto cardiaco.

Ma c'è anche un altro strumento con cui un giorno potremo registrare la collocazione di ogni atomo del nostro corpo: l'MRI. Come abbiamo visto, l'esattezza della scansione MRI è di circa un decimo di millimetro. Ciò significa che ogni pixel di una scansione MRI contiene forse migliaia di cellule. Analizzando però la fisica di base dell'MRI, scopriamo che la precisione dell'immagine è legata all'uniformità del campo magnetico all'interno della macchina. Di conseguenza, se incrementassimo l'uniformità del campo magnetico potremmo anche superare il decimo di millimetro di precisione.

Gli scienziati stanno già immaginando un dispositivo MRI con una risoluzione che arrivi alle singole cellule e persino oltre, in grado di effettuare la scansione di singole molecole e atomi.

Per riassumere, un replicatore non viola le leggi della fisica, ma sarà difficile creare

attraverso l'autoassemblaggio. Verso la fine del secolo, quando padroneggeremo le tecniche di autoassemblaggio, forse potremo cominciare a pensare alle applicazioni commerciali dei replicatori.

Gray goo?

Alcuni hanno espresso tutte le proprie riserve circa la nanotecnologia, per esempio Bill Joy, uno dei fondatori della Sun Microsystems, il quale ha scritto che è solo questione di tempo, poi tale tecnologia prenderà il sopravvento sull'uomo e divorerà tutti i minerali della Terra, restituendole soltanto un'inutile *gray goo*, cioè una sostanza grigia e appiccicosa²⁰. Persino il principe Carlo d'Inghilterra si è pronunciato contro la nanotecnologia e lo scenario "grigio e appiccicoso" che finirebbe con il creare.

Il pericolo sta infatti in una delle caratteristiche chiave dei nanobot: la loro capacità di riprodursi. Proprio come per i virus, una volta liberati nell'ambiente non obbedirebbero più ai nostri comandi. Potrebbero quindi proliferare all'infinito e distruggere il pianeta consumando tutte le risorse dell'ambiente.

Secondo me ci vorranno molti decenni, se non secoli, prima che tale tecnologia sia abbastanza matura da creare un replicatore, quindi qualsiasi preoccupazione circa il "problema *gray goo*" è sicuramente prematura. Con il passare degli anni avremo tutto il tempo per ideare sistemi di controllo che impediscano la proliferazione incontrollata dei nanobot: per esempio, un meccanismo di sicurezza capace di disattivarli premendo un semplice pulsante d'emergenza. In alternativa potremmo progettare dei "killerbot" programmati per distruggere i nanobot sfuggiti al nostro controllo.

Un altro modo per trovare soluzioni adeguate è studiare madre natura, che si è confrontata con questo problema per miliardi di anni. Il nostro mondo è infatti stracolmo di forme di vita molecolari autoreplicanti – virus e batteri – perfettamente in grado di proliferare in modo incontrollato, e persino di mutare. Peraltro il corpo umano ha creato i suoi particolari "nanobot", cioè gli anticorpi e i globuli bianchi del sistema immunitario, continuamente dediti alla ricerca e alla distruzione di forme di vita aliene. Indubbiamente non rappresentano un sistema perfetto, ma riguardo al problema dei nanobot imbizzarriti sono un buon modello da cui trarre ispirazione.

Le ricadute sociale dei replicatori

Per uno speciale della BBC-Discovery Channel ho intervistato Joel Garreau, l'autore di *Radical Evolution*, il quale ha affermato: «Se mai riuscissimo a realizzare un autoassemblatore, quel giorno sarebbe uno dei più grandi momenti della storia umana! Da allora potremo davvero pensare di cambiare il mondo in modo da renderlo irriconoscibile!»²¹.

Esiste un vecchio detto: «Attento a ciò che desideri, perché potrebbe avverarsi!». Il santo graal della nanotecnologia consiste nel creare un assemblatore molecolare, ovvero un replicatore, che però una volta inventato potrebbe rivoluzionare le fondamenta stesse della nostra società. In definitiva, tutte le filosofie e i sistemi sociali si basano su *scarsità* e *povertà*. Nel corso dell'intera storia umana è stato questo il tema dominante che ha attraversato le società e ha modellato culture, filosofie e religioni. In alcune religioni la prosperità è considerata una ricompensa divina, mentre la povertà è semplicemente una punizione. Per contro, nel buddismo il tema fondamentale è la natura universale della sofferenza, nonché il modo in cui possiamo affrontarla. Nel cristianesimo, il Nuovo Testamento dice: «È più facile che un cammello passi per la cruna di un ago, che un ricco entri nel regno di Dio»²².

La distribuzione della ricchezza è un'altra modalità con cui la società definisce se stessa. Il feudalesimo si fondava sulla preservazione della ricchezza da parte di un manipolo di aristocratici a spese dei contadini, ridotti in povertà. Nell'era del capitalismo si ritiene che le persone energiche e produttive possano essere premiate per il proprio lavoro avviando imprese che le rendano ricche. Se però individui pigri e assolutamente improduttivi potessero ottenere tutto ciò che vogliono quasi gratuitamente premendo un pulsante, il concetto di capitalismo crollerebbe all'istante. L'invenzione di un replicatore manderebbe tutto all'aria, stravolgendo le relazioni umane: scomparirebbe infatti ogni differenza tra l'aver e il non avere, e con questa il concetto di status e di potere politico.

Tale enigma è già stato affrontato in un episodio di *Star Trek: The Next Generation*, in cui viene rinvenuta una navicella spaziale del XX secolo, abbandonata a se stessa nello spazio. All'interno ci sono i corpi congelati di persone che in quell'epoca relativamente primitiva erano state colpite da malattie incurabili e speravano di essere guarite e riportate in vita in futuro. I medici dell'*Enterprise* rimediano subito, curando le malattie e riportando in vita quei profughi del passato. Tra i fortunati individui, stupefatti all'idea di avere vinto una tale scommessa, c'è però uno scaltro capitalista. Infatti, la prima cosa che l'uomo domanda è: «In quale epoca ci troviamo?». E quando scopre di essere in vita nel XXIV secolo pensa che tutti i suoi investimenti del passato si siano ormai trasformati in un'immensa fortuna, allora chiede subito di poter contattare un funzionario di banca sulla Terra. L'equipaggio dell'*Enterprise* è incredulo. Denaro? Investimenti? Tutte queste cose non esistono più, perché nel XXIV secolo quando si vuole qualcosa basta chiederla.

Questo ci riporta alla vecchia questione della società perfetta, o *utopia*, termine coniato nel 1516 da sir Thomas More nella sua opera più celebre, intitolata per l'appunto *Utopia*. Sgomento dalla sofferenza e dallo squalore di cui era testimone nella sua epoca, More immaginò un paradiso su un'isola immaginaria dell'oceano Atlantico.

Nel XIX secolo l'Europa ha visto sorgere diversi movimenti sociali che volevano realizzare una forma di utopia, e molte di quelle persone hanno infine trovato rifugio negli Stati Uniti, dove

le tracce del loro insediamento sono evidenti ancora oggi.

Da un lato, un replicatore potrebbe fornirci quella stessa utopia tanto desiderata dai visionari del XIX secolo. I precedenti esperimenti di società utopiche sono falliti a causa della scarsità di beni, che comportò disuguaglianze, dispute e infine il crollo totale. Se però un replicatore dovesse risolvere il problema di tale scarsità, l'utopia sarebbe alla nostra portata. Arti, musica e poesia potrebbero fiorire, e nel contempo gli esseri umani si ritroverebbero liberi di assecondare i loro desideri e le loro aspirazioni più profonde.

D'altro canto, senza il fattore motivante della scarsità di beni e della necessità di denaro, il risultato potrebbe anche essere una società autoindulgente e degenerata che sprofonda ai più bassi livelli. Soltanto un manipolo di persone dotate di una vera motivazione artistica si sforzerebbe di comporre poesie, mentre la maggior parte della popolazione, lamentano i critici, si trasformerebbe in perdigiorno e fannulloni buoni a nulla.

Persino le definizioni impiegate dagli utopisti vengono messe in discussione. Per esempio, il mantra del socialismo è: «Da ognuno secondo le sue capacità. Ad ognuno secondo il suo contributo». Per contro, il mantra del comunismo, estensione massima del socialismo, è: «Da ognuno secondo le sue capacità. Ad ognuno secondo i suoi bisogni». Ma se un replicatore fosse davvero possibile, il mantra universale diventerebbe: «Ad ognuno secondo i suoi desideri».

Esiste tuttavia un terzo modo di analizzare la faccenda. Secondo il principio dell'uomo delle caverne, negli ultimi centomila anni gli aspetti fondamentali della personalità umana non sono cambiati così tanto. Un tempo non c'era niente di simile al nostro attuale lavoro. Gli antropologi spiegano che le società primitive erano ampiamente comunitarie, e i loro componenti dividevano in parti uguali beni e fatiche. I ritmi quotidiani non erano definiti da orari di lavoro e retribuzione, poiché non esisteva nulla del genere.

Eppure i nostri antenati non erano scansafatiche, anzitutto perché altrimenti sarebbero morti di fame. Chi rifiutava di partecipare al lavoro della comunità veniva semplicemente espulso dalla tribù, e quindi aveva ben poche possibilità di sopravvivere. Inoltre, la gente era orgogliosa del proprio lavoro, a cui attribuiva persino un profondo significato. Terzo, in virtù dell'enorme pressione sociale, continuare ad essere un membro produttivo della società era qualcosa d'irrinunciabile. Soltanto gli individui produttivi potevano accoppiarsi e trasmettere i propri geni alla generazione successiva, mentre i geni dei fannulloni di solito scomparivano alla loro morte.

Allora perché dovremmo continuare a vivere vite produttive anche se venissero inventati i replicatori, capaci di darci all'istante qualunque cosa desideriamo? Prima di tutto, apparecchi del genere garantirebbero cibo per tutti. Secondariamente, con ogni probabilità la maggior parte delle persone continuerebbe a lavorare perché orgogliosa delle proprie abilità e perché il lavoro continuerebbe a dare significato all'esistenza. Ma il terzo motivo, la pressione sociale, sarebbe più difficile da mantenere senza violare i diritti fondamentali dell'individuo. Presumibilmente, invece della pressione sociale assisteremmo a un sostanziale cambiamento a livello d'istruzione, così da modificare l'atteggiamento dei singoli nei confronti del lavoro e della retribuzione ed evitare che si abusino del replicatore.

Ma fortunatamente il progresso sarà lento e ci vorrà circa un secolo prima di avere un replicatore funzionante. La nostra società avrà quindi tutto il tempo per discutere vantaggi e svantaggi di tale tecnologia, ed eventualmente adattarsi a una nuova realtà senza disintegrarsi.

Inoltre, con ogni probabilità i primi modelli di questo dispositivo saranno assai costosi. Come ha detto Rodney Brooks, esperto di robotica al MIT: «La nanotecnologia fiorirà, ma allo stesso modo in cui prospera la fotolitografia, cioè in un ambito controllato e con costi elevati, e non come una tecnologia liberamente immessa sul mercato di massa»²³. Il problema di un quantitativo illimitato di beni gratuiti non sussisterà: i replicatori saranno congegni talmente sofisticati che ci vorranno decenni prima che i costi di produzione scendano a livelli ragionevoli.

Una volta ho fatto un'interessante chiacchierata con Jamais Cascio, celebre futurologo con una lunga carriera dedicata all'accurata contemplazione delle possibilità del futuro. Per prima cosa Cascio mi ha detto di dubitare della teoria della singolarità (Capitolo 2), poiché la natura umana e le dinamiche sociali sono fin troppo caotiche, complesse e imprevedibili per poter essere collocate in un'unica, precisa teoria. Tuttavia ha ammesso che gli straordinari progressi nel campo della nanotecnologia un giorno potrebbero produrre una società caratterizzata da una sovrabbondanza di beni, soprattutto considerati replicatori e robot. Allora gli ho domandato: «Come crede che ci comporteremo quando i beni saranno pressoché gratuiti e la società sarà talmente ricca da rendere inutile il lavoro?».

Secondo Cascio accadrebbero due cose. Tanto per cominciare, ci sarebbe ricchezza sufficiente per garantire un introito minimo e decoroso ad ogni essere umano, anche se decidesse di non lavorare. Di conseguenza, una parte della popolazione sarebbe costituita da pantofolai cronici. Per salvaguardare la società, ha spiegato Cascio, sarebbe necessario mantenere una rete di sicurezza permanente. Certo, qualcuno potrebbe considerarlo sgradevole, ma sarebbe inevitabile, soprattutto se replicatori e robot soddisfacessero ogni nostro bisogno materiale. Cascio pensa però che questo sarebbe compensato da una vera e propria rivoluzione nell'ambito dello spirito imprenditoriale. Infatti, senza dover più temere conseguenze catastrofiche come povertà e fallimento, gli individui più operosi prenderebbero una maggiore iniziativa e si farebbero carico dei rischi di creare nuove industrie e nuove opportunità per tutti. Si verificherebbe, in pratica, un nuovo rinascimento sociale, in cui lo spirito creativo sarebbe svincolato dal timore della bancarotta.

Guardando al mio specifico settore, la fisica, devo constatare che la maggior parte dei miei colleghi vi si dedica più per il piacere della scoperta e dell'innovazione che per i soldi. Infatti, spesso ignoriamo attività più remunerative in altri settori perché ci interessa soprattutto inseguire i nostri sogni, non rimpinguare il conto in banca. Anche gli artisti e gli intellettuali che conosco la vedono allo stesso modo: il loro obiettivo non è arricchirsi il più possibile, ma essere creativi e nobilitare lo spirito umano.

A mio parere, se nel 2100 la società diventasse talmente ricca da non farci mancare più niente, credo che reagiremmo come appena descritto. Una parte della popolazione si rifiuterebbe di lavorare, altri potrebbero ritrovarsi liberi dalle restrizioni della povertà per dedicarsi alle conquiste scientifiche o all'arte. Per queste persone la gioia della creatività e dell'innovazione avrebbe più importanza delle lusinghe del materialismo puro e semplice. Ma la maggioranza continuerebbe a lavorare e a rendersi utile perché fa parte della nostra eredità genetica, del principio dell'uomo delle caverne che è scolpito in noi.

Rimane però un problema che neppure i replicatori riuscirebbero a risolvere: quello dell'energia. Tutte queste miracolose tecnologie richiederanno enormi quantità d'energia, ma dove la troveremo?

Capitolo 5

Il futuro dell'energia

Energia dalle stelle

L'età della pietra non si è conclusa per mancanza di pietra. Allo stesso modo, l'età del petrolio finirà molto prima che il mondo rimanga senza greggio. James Canton

Nella mia scala di valori la fusione ha la stessa importanza del dono originario del fuoco, che risale alle nebbie della preistoria.

Ben Bova

Le stelle erano la fonte d'energia degli dèi. Quando Apollo attraversò il cielo su un carro trainato da quattro cavalli che emettevano respiri infuocati dalle narici, illuminò la volta celeste e la Terra con l'energia infinita del Sole. Il suo era un potere immenso pari soltanto a quello di Zeus. E quando Semele, una delle molte amanti mortali di Zeus, l'implorò di poterlo vedere nella sua vera forma, benché riluttante lui accettò. Ma la fiammata accecante di energia cosmica ridusse la donna in cenere.

In questo secolo riusciremo a sfruttare l'energia delle stelle, la stessa fonte degli dèi. In sostanza, significa che entreremo in un'era in cui l'energia solare e l'idrogeno rimpiazzeranno quella finora ottenuta dai combustibili fossili. Ma nel lungo termine questo comporterà anche il ricorso alla fusione, nonché il prelievo dell'energia solare dallo spazio esterno. I futuri progressi della fisica potrebbero inoltre condurci nell'era del magnetismo, in cui le auto, i treni e persino gli skateboard fluttueranno nell'aria grazie a un cuscino magnetico.

Il nostro consumo energetico si ridurrà drasticamente, poiché quasi tutta l'energia attualmente utilizzata da auto e treni serve soltanto a vincere l'attrito con la superficie.

La fine del petrolio?

Oggi il nostro pianeta è strettamente dipendente dai combustibili fossili sotto forma di petrolio, gas naturale e carbone. Nel complesso, il pianeta consuma circa 14.000 miliardi di watt di energia, di cui il 33 per cento proviene dal petrolio, il 25 dal carbone, il 20 dal gas, il 7 dalla fissione nucleare e il 15 dalle biomasse e dall'idroelettrico, mentre dal Sole e dalle altre fonti rinnovabili (vento e geotermico) ricaviamo soltanto lo 0,5 per cento¹.

Senza i combustibili fossili l'economia mondiale sarebbe dunque costretta a una brusca frenata.

Uno dei primi a presagire la fine dell'era del petrolio fu M. King Hubbert, un ingegnere petrolifero della Shell. Nel 1956 Hubbert tenne un lungimirante discorso presso l'American Petroleum Institute durante il quale fece una scomoda previsione, universalmente derisa da tutti i colleghi dell'epoca. Secondo Hubbert, le riserve petrolifere statunitensi sarebbero diminuite così rapidamente che presto il paese avrebbe esaurito il 50 per cento dei giacimenti esistenti, scatenando un declino irreversibile che sarebbe avvenuto tra il 1965 e il 1971². Hubbert tracciò un diagramma della quantità totale di petrolio disponibile negli Stati Uniti – una curva a campana –, e precisò che si era ormai prossimi all'apice della curva. Da quel momento sarebbe iniziato il declino: estrarre petrolio sarebbe diventato sempre più difficile, e infine si sarebbe realizzato qualcosa di impensabile: gli Stati Uniti avrebbero cominciato a importarlo.

Quella previsione sembrò avventata, se non addirittura pazzesca e irresponsabile, poiché in quel momento gli Stati Uniti stavano ancora pompando enormi quantità di petrolio sia dal Texas sia da altre regioni del paese. Ma non ci sarebbe voluto molto prima che gli ingegneri petroliferi smettessero di deridere Hubbert, poiché la sua previsione si dimostrò azzeccata. Nel 1970 la produzione di petrolio statunitense toccò il picco di 10,2 milioni di barili al giorno, poi cominciò a calare, e da allora non ha più raggiunto quel livello. Attualmente gli Stati Uniti importano il 59 per cento del loro fabbisogno petrolifero. In pratica, confrontando il diagramma della stima di Hubbert, che risale alla metà del secolo scorso, con quello dell'effettiva produzione di petrolio statunitense fino al 2005, le due curve sono pressoché identiche.

Oggi gli ingegneri petroliferi sono dunque costretti a porsi una domanda chiave: abbiamo già raggiunto il picco di Hubbert? (La sua previsione è poi diventata una teoria scientifica che porta il suo nome.) Nel 1956 Hubbert stimò anche che la produzione petrolifera mondiale avrebbe sfiorato il suo picco entro una cinquantina d'anni, e pure in questo caso potrebbe avere avuto ragione. È ipotizzabile che quando i nostri figli rifletteranno sullo stile di vita di quest'epoca, considereranno i combustibili fossili come oggi noi consideriamo l'olio di balena: un cimelio di un lontano passato.

Sono stato più volte in Arabia Saudita e in vari paesi del Medio Oriente a parlare di scienza, energia e futuro. Da un lato bisogna considerare che l'Arabia Saudita produce 267 miliardi di barili di petrolio, quindi si potrebbe dire che questo paese galleggi letteralmente su un enorme distesa sotterranea di greggio. Viaggiando in Arabia Saudita e negli Stati del Golfo Persico ho potuto constatare un esorbitante spreco di energia, con enormi fontane d'acqua che zampillano nel bel mezzo del deserto dando vita a giganteschi laghi artificiali. A Dubai c'è persino una pista da sci al coperto, con migliaia di tonnellate di neve artificiale che sfidano apertamente il tremendo calore esterno.

Ormai anche i plenipotenziari del petrolio sono preoccupati. Al di là della retorica delle “riserve di petrolio certe”, la quale dovrebbe rassicurarci e convincerci che avremo ancora petrolio in abbondanza per i prossimi decenni, molte valutazioni provenienti dal settore petrolifero sono stime azzardate e ingannevoli. L'espressione *riserve petrolifere certe* suona confortevolmente perentoria e definitiva, ma poi ci si rende conto che tali riserve sono spesso frutto dell'immaginazione dei grandi produttori locali e della pressione politica.

Parlando con diversi esperti del settore energetico ho visto emergere un consenso approssimativo: forse siamo già al picco di Hubbert della produzione mondiale di petrolio, oppure, nella migliore delle ipotesi, ci troviamo a un solo decennio da quel momento fatale. Ciò significa che il prossimo futuro potrebbe essere segnato da una fase di declino irreversibile.

Naturalmente, non rimarremo mai del tutto a secco, perché nuove riserve vengono scoperte a ritmo continuo. Tuttavia, il costo dell'estrazione e della raffinazione del greggio salirà gradualmente alle stelle. Per esempio, il Canada possiede ampie distese di sabbie bituminose, sufficienti a garantire il fabbisogno petrolifero mondiale per i decenni a venire, ma l'estrazione e la raffinazione è troppo costosa. Per quanto riguarda gli Stati Uniti, con ogni probabilità le loro riserve di carbone basteranno per trecento anni, ma esistono restrizioni legali, e i costi relativi all'emissione del particolato e dei gas inquinanti sono considerevoli.

Inoltre, il greggio continua ad essere estratto in regioni politicamente instabili, e la presenza di tale ricchezza in quei territori ne alimenta ulteriormente l'instabilità generale. Rappresentando graficamente l'andamento del prezzo del petrolio negli ultimi dieci anni, possiamo constatare che ha continuato a oscillare, con un sorprendente picco di 140 dollari al barile nel 2008³, per poi precipitare in seguito alla grande recessione mondiale. Sebbene continuiamo ad esserci impennate e cadute selvagge dovute a inquietudini politiche, speculazioni, voci di corridoio eccetera, una cosa è certa: nel lungo termine il prezzo medio del petrolio continuerà a salire.

Le implicazioni per l'economia mondiale saranno profonde. Sono soprattutto due i fattori che hanno alimentato la crescita vertiginosa della civiltà del XX secolo: il basso prezzo del petrolio e la legge di Moore. Con l'aumento dei costi dell'energia, le ricadute sulla produzione mondiale di cibo e sul controllo dell'inquinamento sono inevitabili. Come ha detto il romanziere Jerry Pournelle: «Cibo e inquinamento non sono problemi primari, ma problemi *energetici*. Disponendo dell'energia sufficiente, possiamo produrre tutto il cibo che vogliamo, e all'occorrenza sfruttare metodi intensivi come le colture idroponiche e le serre. Per l'inquinamento vale lo stesso discorso: con la necessaria energia i prodotti inquinanti possono essere trasformati in residui trattabili, e all'occorrenza “smontati” fino a recuperarne i componenti base»⁴.

Dobbiamo però affrontare un'altra questione: la crescita delle classi medie cinese e indiana, uno dei grandi cambiamenti demo-grafici del dopoguerra, che ha contribuito parecchio all'aumento dei prezzi del petrolio e dei beni di consumo. Del resto, anche queste popolazioni vedono i film di Hollywood, con tanto di hamburger da McDonald e ampi garage con due auto parcheggiate, e anche loro vogliono vivere il “sogno” americano del grande spreco energetico.

Economia del solare e dell'idrogeno

A ben guardare, la storia sembra ripetersi. Nei primi anni del Novecento Henry Ford e Thomas Edison, amici di lunga data, fecero una scommessa circa la forma di energia che avrebbe alimentato il futuro dell'umanità. Ford puntò sul petrolio, prevedendo che avrebbe rimpiazzato il carbone, con motori a combustione interna al posto delle macchine a vapore. Edison scommise invece sull'auto elettrica.

Si trattò di una scommessa fatidica, i cui esiti hanno avuto un profondo effetto sulla storia del mondo. Per qualche tempo sembrò che Edison fosse destinato a vincerla, perché l'estrazione del petrolio era tutt'altro che semplice. Ma presto le sorti della partita vennero ribaltate dalla repentina scoperta di riserve di petrolio a poco prezzo nel Medio Oriente e in altre regioni del mondo. Il pianeta non sarebbe più stato lo stesso, poiché le batterie non potevano reggere il confronto con lo sterminato successo della benzina. (Ancora oggi, mettendoli a confronto, da un punto di vista energetico la benzina è quaranta volte meglio di una batteria.)

Tuttavia la situazione sta lentamente cambiando, e forse Edison potrebbe ancora vincere quella vecchia scommessa.

In tutti gli ambiti governativi e industriali ci si pone ormai la stessa domanda: che cosa sostituirà il petrolio? Non si è ancora giunti a una risposta chiara. Nel breve termine non c'è bisogno di un sostituto dei combustibili fossili, quindi con ogni probabilità ricorremo a diverse energie, senza che nessuna in particolare abbia la meglio sulle altre. Ma nel lungo termine il successore più promettente pare essere l'idrogeno ricavato da fonti di energia rinnovabile come quella solare, eolica e idroelettrica.

Attualmente il costo dell'elettricità prodotta dagli impianti solari è diverse volte superiore al prezzo di quella prodotta dal carbone. Tuttavia i costi del solare-idrogeno continuano a diminuire grazie all'inarrestabile progresso tecnologico, a cui si accompagna il lento ma progressivo aumento del prezzo dei combustibili fossili. Si stima che nel giro di dieci-quindici anni le due curve si incroceranno, e a quel punto le forze di mercato faranno il resto.

Energia eolica

Nel breve termine il grande vincitore tra le fonti di energia rinnovabili sarà sicuramente l'eolico. A livello planetario l'energia prodotta dalle pale eoliche è cresciuta dai 17 miliardi di watt del 2000 ai 121 miliardi di watt del 2008. L'energia eolica, che una volta si considerava destinata a un ruolo minore, sta assumendo una funzione sempre più importante. I recenti progressi della tecnologia delle turbine eoliche hanno aumentato l'efficienza e la produttività dei parchi eolici, che ormai rappresentano uno dei settori in più rapida crescita di tutto il mercato energetico.

Le turbine dei parchi eolici di oggi sono ben diverse dai vecchi mulini a vento utilizzati dai contadini nelle fattorie di fine Ottocento. Oltre ad essere non inquinante e sicuro, un singolo generatore eolico può produrre 5 megawatt di energia, quanto basta per un piccolo paese. Una turbina a vento ha enormi pale lunghe trenta metri che ruotano con attrito pressoché nullo. Le turbine eoliche producono elettricità nello stesso modo in cui la producono gli impianti idroelettrici e i generatori di corrente a pedali. Ruotando grazie alla spinta del vento, le pale fanno girare un magnete all'interno di una spira conduttrice. La rotazione del campo magnetico fa muovere gli elettroni all'interno della bobina, producendo energia elettrica. Un parco eolico con cento turbine arriva a produrre 500 megawatt, mentre un singolo impianto nucleare o una centrale a carbone produce fino a 1000 megawatt.

Negli ultimi decenni l'Europa è stata leader mondiale della tecnologia dell'eolico, ma di recente gli Stati Uniti l'hanno superata: infatti nel 2009 gli impianti eolici statunitensi hanno prodotto un totale di 28 miliardi di watt, di cui 8 solo in Texas, Stato che ha già in costruzione nuovi impianti per un altro miliardo di watt, nonché altri progetti in via di sviluppo. Se tutto andrà come previsto, gli impianti eolici del Texas genereranno 50 miliardi di watt di energia elettrica, una quantità più che sufficiente per soddisfare le esigenze dei suoi ventiquattro milioni di abitanti.

Tuttavia, presto la Cina supererà a sua volta gli Stati Uniti⁵. Il suo programma Wind Base prevede infatti la costruzione di sei parchi eolici capaci di generare 127 miliardi di watt.

Sebbene l'energia eolica risulti sempre più allettante e indubbiamente continuerà a progredire in futuro, non potrà mai soddisfare il fabbisogno energetico mondiale. Al massimo potrà diventare parte integrante di un più vasto mix energetico. L'eolico presenta inoltre alcuni problemi: l'energia viene generata con una certa intermittenza, perché c'è bisogno del vento, quindi si può contare solo su alcune regioni chiave del pianeta. Inoltre, considerate le perdite di elettricità durante la sua veicolazione, i parchi eolici devono necessariamente trovarsi nelle vicinanze dei centri abitati, il che riduce ulteriormente la loro utilità.

Here comes the sun

In definitiva, tutta l'energia proviene dal Sole. Persino il petrolio e il carbone sono, in un certo senso, un concentrato di luce solare, poiché rappresentano l'energia che piante e animali attingono proprio dal Sole milioni di anni fa. Di conseguenza, la quantità di energia solare concentrata in un litro di benzina è di gran lunga superiore all'energia che possiamo accumulare in una batteria. Fu questo il problema fondamentale con cui dovette fare i conti Edison nel secolo scorso, ed è lo stesso che dobbiamo risolvere ancora oggi.

Le celle solari convertono la luce del Sole direttamente in elettricità. (Questo processo fu spiegato da Einstein nel 1905: quando una particella di luce, o *fotone*, colpisce un metallo, emette un elettrone, quindi crea una corrente.) Tali celle non sono però particolarmente efficienti. Persino dopo decenni di duro lavoro, scienziati e ingegneri non sono riusciti a portare la loro efficienza al di sopra del 15 per cento. La ricerca ha quindi intrapreso due diverse strade: la prima è quella di incrementare l'efficienza delle celle solari, cosa che rappresenta un problema tecnico assai complesso; la seconda è ridurre il costo di produzione, installazione e costruzione dei parchi solari. Per esempio, per provvedere al fabbisogno elettrico di tutti gli Stati Uniti bisognerebbe ricoprire di pannelli solari l'intera Arizona, soluzione che ovviamente non è praticabile. Ad ogni modo, le vaste aree del territorio sahariano hanno recentemente suscitato grande interesse, e gli investitori stanno già creando imponenti parchi solari nel deserto per soddisfare il fabbisogno dei consumatori europei.

Nelle nostre città sarebbe invece possibile ridurre i costi dell'energia solare ricoprendo case e terreni di pannelli fotovoltaici. Questo avrebbe diversi vantaggi, compresa l'eliminazione delle perdite che avvengono durante il trasporto dell'energia dalla centrale all'utente finale. Il problema resta sempre quello dei costi. Infatti basta un rapidissimo calcolo per dimostrare che per trarre profitto da un'iniziativa imprenditoriale così rischiosa si dovrebbe tagliare ogni minima spesa superflua.

Sebbene finora l'energia solare non abbia mantenuto le sue promesse, la recente instabilità dei prezzi del petrolio ha moltiplicato gli sforzi per portare l'energia solare sul mercato. Presto potremmo quindi assistere a un'inversione di tendenza. Infatti ogni pochi mesi si registra un nuovo record. La produzione di energia fotovoltaica sta crescendo a un ritmo del 45 per cento annuo, quindi raddoppia ogni circa due anni. A livello mondiale le attuali installazioni di pannelli fotovoltaici producono 15 miliardi di watt, e solo nel 2008 si è avuta una crescita di 5,6 miliardi di watt.

Sempre nel 2008 la Florida Power & Light ha presentato il più vasto progetto di parco solare mai realizzato negli Stati Uniti. L'accordo è stato ottenuto dalla SunPower, che conta di trarne 25 megawatt di energia elettrica. (L'attuale record statunitense è detenuto dalla base aeronautica Nellis, nel Nevada, con un parco solare che genera 15 megawatt.)

Nel 2009 la BrightSource Energy di Oakland, in California, ha annunciato di voler stabilire un nuovo record attraverso la realizzazione di quattordici parchi solari in un territorio compreso tra la California, il Nevada e l'Arizona, per un totale di 2,6 miliardi di watt.

Uno dei progetti della BrightSource è il parco solare Ivanpah, una centrale termodinamica in fase di costruzione nel deserto della California meridionale, la quale dovrebbe raggiungere una produzione di 440 megawatt. Inoltre, la stessa BrightSource, affiancata dalla Pacific Gas and

Electric, intende realizzare una centrale da 1,3 miliardi di watt nel deserto del Mojave.

Infine, nel 2009 la First Solar, che è la più grande azienda produttrice di celle solari al mondo, ha annunciato la creazione del più grande parco solare del pianeta, a nord della grande muraglia cinese. L'accordo di questo progetto decennale, i cui dettagli sono ancora in via di definizione, prevede la creazione di un immenso complesso solare con ventisette milioni di pannelli fotovoltaici a film sottile, capaci di generare 2 miliardi di watt, ovvero l'equivalente di due centrali a carbone: in pratica, l'energia necessaria per rifornire tre milioni di abitazioni. L'impianto, che occuperà circa 65 chilometri quadrati, verrà realizzato nella Mongolia interna, e in realtà fa parte di un progetto energetico ancora più faraonico. I funzionari cinesi sostengono che l'impianto solare sarà soltanto una delle componenti del parco, che infine arriverà a fornire 12 miliardi di watt da energia solare ma anche eolica, idroelettrica e da biomasse.

Resta da vedere se tali ambiziosi progetti riusciranno infine a superare gli ostacoli delle ispezioni ambientali e dell'eccedenza dei costi. Fatto sta che nel settore dell'energia solare è in corso un'autentica rivoluzione, con grandi aziende che puntano seriamente su questa risorsa, considerandola una valida alternativa ai combustibili fossili.

L'auto elettrica

Poiché circa la metà del consumo mondiale di petrolio è attribuibile ad automobili, camion, treni e aeroplani, c'è un grande interesse nel migliorare e correggere il settore dei trasporti. Attualmente è in corso una competizione per stabilire chi dominerà il futuro dell'automotive, quando le nazioni compiranno la storica transizione dall'epoca dei combustibili fossili a quella dell'elettricità. Ma tale transizione avverrà secondo diverse fasi. La prima è quella dell'auto ibrida, che è già sul mercato e sfrutta una combinazione di elettricità (accumulata in una batteria) e benzina. Il progetto di quest'auto è basato su un piccolo motore a combustione interna, che risolve il solito problema delle batterie, che non durano sui lunghi percorsi e non garantiscono accelerazioni istantanee.

Ma la tecnologia ibrida costituisce soltanto il primo passo. Per esempio, l'auto ibrida elettrica plug-in (PHEV, *plug-in hybrid electric vehicle*) ha una batteria abbastanza potente da alimentare il veicolo per i primi 80 chilometri circa, dopodiché subentra il motore a benzina. È considerato che per andare al lavoro o a fare acquisti la maggior parte delle persone non percorre tragitti più lunghi, ciò significa che l'automobile viaggia perlopiù ad alimentazione elettrica.

Una delle principali concorrenti nella corsa alla migliore auto ibrida elettrica plug-in è la Chevy Volt della General Motors. La sua batteria agli ioni di litio ha una portata di circa 65 chilometri, mentre il piccolo motore a benzina ausiliario può farle raggiungere quasi 500 chilometri.

Poi abbiamo la Tesla Roadster, che non ha alcun motore a benzina. Viene fabbricata dalla Tesla Motors, un'azienda della Silicon Valley che è anche la sola nel Nord America a vendere automobili interamente elettriche di serie. La Roadstar è una bella auto sportiva che può tenere testa a qualsiasi auto a benzina, quindi smentisce definitivamente l'idea che nessuna batteria agli ioni di litio possa competere con i motori a benzina.

Ho potuto provare di persona una Tesla a due posti, quella di John Hendricks, fondatore della Discovery Communications, società a cui appartiene la Discovery Channel. Ero alla guida dell'auto quando Hendricks mi ha incitato a premere a fondo l'acceleratore, tanto per provare la potenza del motore: ho subito percepito la spinta improvvisa, e nei 3,9 secondi che abbiamo impiegato a raggiungere i 100 chilometri orari il mio corpo è stato letteralmente risucchiato dallo schienale del sedile. Una cosa è ascoltare gli ingegneri che vantano le performance dei loro veicoli interamente elettrici, un'altra è mettersi al volante e sperimentarne di persona le prestazioni.

Il successo della Tesla ha costretto le case automobilistiche tradizionali ad adoperarsi per recuperare il terreno perduto, e questo dopo decenni in cui l'auto elettrica era stata tenuta in scarsa considerazione. All'epoca in cui era vice presidente della General Motors, Robert Lutz ha pronunciato queste parole: «Tutti i cervelloni della General Motors hanno continuato a ripetere che la tecnologia agli ioni di litio sarebbe maturata tra un decennio, e persino la Toyota era d'accordo, ma poi salta fuori la Tesla. Allora mi sono domandato: com'è possibile che una piccola startup californiana, guidata da persone che del mercato delle automobili non sanno niente, riescano a fare questo e noi no?»⁶.

La Nissan Motors, dal canto suo, sta spingendo affinché le auto elettriche vengano messe in

commercio per il consumatore medio. La sua Leaf ha un'autonomia di 160 chilometri, una velocità massima di 140 chilometri orari e dispone soltanto di un motore elettrico. Dopo l'auto completamente elettrica, un altro modello che farà infine la sua comparsa nei saloni dell'automobile è la cosiddetta *fuel cell car*, ovvero l'auto a pila a combustibile (o cella a combustibile), a volte anche chiamata *auto del futuro*. Nel giugno 2008 la Honda Motor Company ha annunciato il lancio commerciale della prima automobile a pila a combustibile, la FCX Clarity, che ha un'autonomia di quasi 400 chilometri, una velocità massima di 160 chilometri orari e tutti i comfort di una normale berlina a quattro porte. Il suo combustibile è soltanto l'idrogeno, quindi non ha bisogno di benzina, né di carica elettrica. Tuttavia, poiché l'infrastruttura per l'idrogeno non esiste ancora, negli Stati Uniti può essere presa in leasing soltanto nella California meridionale. La Honda sta anche pubblicizzando una versione sportiva della sua auto a pila a combustibile, la FC Sport.

Ma nel 2009, dopo essere riemersa dal fallimento ed essersi sbrigativamente sbarazzata dei vecchi dirigenti, anche la General Motors ha annunciato la sua prima auto a pila a combustibile, la Chevy Equinox, che ha superato la prova del milione di miglia. Negli ultimi venticinque mesi cinquemila persone hanno provato cento di questi prototipi *fuel cell*. È così che Detroit sta cercando di mettere un piede nel futuro, sebbene riguardo a nuove tecnologie e auto ibride di piccole dimensioni sia ancora piuttosto in ritardo rispetto al Giappone.

A un primo sguardo la *fuel cell car* è l'auto perfetta. È alimentata da una combinazione d'idrogeno e ossigeno, che poi si trasforma in energia elettrica e rilascia acqua come unica scoria. Non emette alcuna traccia di smog. Osservare il tubo di scappamento di un'auto a pila a combustibile lascia davvero esterrefatti: invece delle solite volute di fumi tossici, tutto ciò che ne esce sono goccioline d'acqua incolore e inodore.

«Mettila una mano davanti al tubo di scappamento, e l'unica cosa che esce è acqua! È davvero una bella sensazione!»⁷ ha affermato Mike Schwabl, che ha provato la Equinox per dieci giorni.

La tecnologia *fuel cell* non è niente di nuovo, il suo principio di base fu dimostrato nel lontano 1839. La stessa NASA ha usato per decenni le pile a combustibile per alimentare la sua strumentazione spaziale. L'aspetto innovativo riguardo alle auto è la determinazione dei fabbricanti a voler aumentare la produzione e ridurre i costi.

Esiste però un problema, che è sostanzialmente lo stesso che perseguì Henry Ford quando mise sul mercato la Model T. All'epoca gli scettici sostenevano che la benzina fosse pericolosa, che gli automobilisti sarebbero morti bruciati vivi in orribili incidenti. Inoltre, i detrattori dell'auto a benzina erano convinti che ci sarebbe voluto un distributore ad ogni isolato. A ben guardare, le critiche non erano infondate: ogni anno muoiono migliaia di persone a causa di incidenti stradali, e le stazioni di servizio sono disseminate un po' ovunque. Ma la comodità dell'auto è tale che la gente tende a ignorare i possibili effetti collaterali.

Oggi le auto a pila a combustibile incontrano le medesime obiezioni. L'idrogeno come combustibile è volatile ed esplosivo, e ci vorrebbero altrettante pompe di rifornimento di quelle già presenti per le auto a benzina. È quindi più che probabile che anche tali critiche siano fondate. Tuttavia, una volta predisposte le infrastrutture necessarie avremo automobili a idrogeno non inquinanti e talmente convenienti che trascureremo gli aspetti negativi. Oggi in tutti gli Stati Uniti esistono solo settanta stazioni di servizio in cui è possibile fare il pieno di idrogeno. Poiché le auto *fuel cell* hanno un'autonomia di circa 270 chilometri con un pieno, occorre sempre tenere d'occhio la spia del carburante. Tutto questo è però destinato a cambiare gradualmente, soprattutto se con la produzione in serie e i progressi tecnologici il prezzo di

queste auto comincerà a scendere.

Ma il problema principale dell'auto elettrica è che la batteria non si ricarica da sé, e l'elettricità necessaria di solito è originata dalle centrali a carbone. Quindi sebbene l'auto elettrica non sia di per sé inquinante, in definitiva la sua fonte d'energia è pur sempre rappresentata dai combustibili fossili.

L'idrogeno non è un produttore finale di energia, ma piuttosto ne è il vettore. E l'idrogeno va prima di tutto ricavato. Per esempio, per separarlo dall'altro componente dell'acqua, che è l'ossigeno, occorre l'elettricità. Anche in questo caso dobbiamo considerare che, come per le auto elettriche, anche quelle *fuel cell* promettono un futuro senza smog, ma l'energia di cui si servono proviene principalmente dal carbone. In definitiva, ci scontriamo sempre con la prima legge della termodinamica: la quantità totale di materia ed energia non può essere distrutta o creata dal nulla. In altre parole, dal nulla non si ricava niente. Questo significa che per passare dalla benzina all'elettricità dovremmo anche sostituire le centrali a carbone con una forma completamente nuova di energia.

Fissione nucleare

Uno dei modi possibili per produrre energia, anziché limitarsi a trasmetterla, consiste nella fissione dell'atomo dell'uranio. Tra i vantaggi dell'energia nucleare c'è il fatto che non produce grandi quantitativi di gas a effetto serra, come invece accade con i combustibili fossili, ma negli ultimi decenni problemi tecnici e politici hanno impedito il decollo del nucleare. La costruzione dell'ultimo impianto nucleare degli Stati Uniti è cominciata nel 1977, prima dell'incidente di Three Mile Island, che ha paralizzato il futuro dell'energia nucleare. Il devastante incidente di Chernobyl, nel 1986, ha ulteriormente segnato il destino del nucleare per almeno una generazione. Mentre in Europa e negli Stati Uniti i progetti per nuove centrali sono stati abbandonati, Francia, Giappone e Russia hanno continuato a investire nel settore soltanto grazie a generosissimi sostegni governativi⁸.

Il problema dell'energia nucleare è che quando si spezza l'atomo dell'uranio si producono enormi quantità di scorie nucleari, che rimangono radioattive per migliaia o anche decine di milioni di anni. Un tipico reattore da 1000 megawatt produce circa trenta tonnellate all'anno di scorie nucleari estremamente pericolose. Si tratta di materiale talmente radioattivo da risultare luminescente nell'oscurità, e di conseguenza deve essere custodito in speciali bacini di raffreddamento. Poiché solo negli Stati Uniti sono in funzione circa cento reattori, il quantitativo di scorie nucleari prodotto ogni anno è pari a migliaia di tonnellate.

Le scorie nucleari rappresentano un problema per due diversi motivi. Tanto per cominciare, mantengono un'alta temperatura anche dopo che il reattore è stato spento. Se l'impianto di refrigerazione o il circuito primario di raffreddamento va accidentalmente in panne, come accadde a Three Mile Island, il nocciolo comincia a fondere. Se il suo metallo fuso entra in contatto con l'acqua, il vapore che ne scaturisce può provocare un'esplosione tale da distruggere il rivestimento esterno del reattore, portando a contatto con l'atmosfera migliaia di tonnellate di scorie radioattive. Se si verificasse lo scenario peggiore (un incidente nucleare di classe 9), sarebbe necessario evacuare la popolazione residente in un raggio che va dai quindici agli ottanta chilometri dal reattore, e potrebbe anche trattarsi di milioni di abitanti. Per esempio, il reattore di Indian Point si trova a una quarantina di chilometri a nord di New York, e uno studio governativo ha stimato che un eventuale incidente in quel reattore potrebbe comportare danni per centinaia di miliardi di dollari, e solo per quanto riguarda le proprietà. Nel caso di Three Mile Island sarebbero bastati pochi minuti in più perché si verificasse una catastrofe tale da deturpare il nord-est del paese. Il disastro fu evitato per un soffio perché gli operai sono riusciti a reintrodurre l'acqua nel circuito di raffreddamento del nocciolo circa mezz'ora prima che questo giungesse al punto di fusione del diossido di uranio.

A Chernobyl, nei pressi di Kiev, le cose sono andate molto peggio. I meccanismi di sicurezza (le barre di regolazione) erano stati disattivati manualmente dagli operai per eseguire un test, e quando si è verificato un piccolo aumento di potenza il reattore è andato fuori controllo. Di conseguenza, le barre di uranio del nocciolo del reattore si sono surriscaldate, e quando l'acqua fredda è entrata improvvisamente in contatto con il metallo fuso il vapore ha causato un'esplosione che ha scoperciato interamente il reattore, disperdendo nell'atmosfera una notevole porzione del nocciolo. Molti operai che hanno provato in qualche modo a rimediare all'incidente sono morti a causa delle terribili ustioni radioattive. Poiché il reattore numero 4

continuava a bruciare e la situazione era chiaramente sfuggita di mano, è intervenuta l'aviazione. Elicotteri adeguatamente schermati hanno riversato sul nocciolo fuso in fiamme un composto liquido a base di boro, silicati, dolomia e piombo. Cessate le emissioni di vapore radioattivo, il reattore è stato richiuso in un sarcofago di cemento. Il nocciolo di Cernobyl è ancora oggi instabile, e continua a generare calore e radiazioni.

Oltre al problema della fusione del nocciolo e delle esplosioni, c'è anche la spinosa questione delle scorie radioattive. Dove metterle? È imbarazzante dover constatare che a cinquant'anni dall'inizio dell'era atomica non abbiamo ancora trovato una soluzione per le scorie. In passato abbiamo fatto una serie di costosissimi errori nel tentativo di trovare una "discarica permanente" per il combustibile nucleare esausto. Inizialmente Stati Uniti e Russia se ne sbarazzavano scaricandole sul fondo dell'oceano, o seppellendole in cavità sotterranee. Nel 1957 sui monti Urali ci fu peraltro un'esplosione causata dalle scorie di plutonio, e si dovette procedere a un'evacuazione di massa poiché ci fu emissione di radioattività per un'area pari a un migliaio di chilometri quadrati, ovvero quella compresa tra le città di Sverdlovsk e Celyabinsk.

Negli anni Settanta gli Stati Uniti cercarono di seppellire le scorie più pericolose nelle miniere di sale di Lyons, nel Kansas, ma più tardi si scoprì che quelle miniere non erano affidabili, perché già crivellate in diversi punti durante le ricerche di gas e petrolio. Il governo fu dunque costretto a chiudere il sito di Lyons, e fu un episodio assai imbarazzante.

Negli ultimi venticinque anni gli Stati Uniti hanno speso 9 miliardi di dollari per lo studio e la costruzione di una grande discarica di scorie nucleari sotto la Yucca Mountain, nel Nevada, ma nel 2009 il progetto è stato annullato dal presidente Obama. I geologi hanno infatti attestato che il sito di Yucca Mountain non può garantire la sicurezza necessaria per un periodo di diecimila anni. La discarica non è mai stata aperta, e gli operatori del settore nucleare sono tuttora privi di un centro di stoccaggio permanente.

Oggi il futuro dell'energia nucleare è tutt'altro che limpido. Wall Street non vede di buon occhio l'idea di investire diversi miliardi di dollari per ogni nuova centrale nucleare, sebbene le aziende garantiscano che le centrali di ultima generazione sono più sicure di quelle precedenti. Da parte sua, il Ministero dell'energia degli Stati Uniti d'America non ha preso nessuna decisione definitiva.

Proliferazione nucleare

Spesso grande potere significa anche grandi rischi. Per esempio, nella mitologia norrena i vichinghi veneravano Odino, che governava Asgard con saggezza e giustizia. Agli ordini di Odino vi era una schiera di divinità, compreso l'eroico Thor, il cui onore e valore erano le qualità più apprezzate da qualsiasi guerriero. C'era però anche Loki, divinità della discordia e della malizia, perennemente consumato da gelosia e odio e bravissimo nell'organizzare tradimenti e inganni. Alla fine Loki si accordò con i giganti e combatté al loro fianco l'epica battaglia di Ragnarok, che segnò il crepuscolo degli dèi.

Oggi la gelosia e l'odio tra nazioni potrebbero scatenare una sorta di Ragnarok nucleare. La storia ha già dimostrato che quando una nazione domina una tecnologia commerciale, sono sufficienti ambizione e volontà politica perché compia la faticosa transizione verso le armi nucleari. Ovviamente, il fatto che la tecnologia nucleare possa proliferare in alcune delle regioni più instabili del mondo costituisce un grave pericolo.

Durante la Seconda guerra mondiale solo le più grandi nazioni del mondo disponevano delle risorse economiche e della conoscenza per costruire la bomba atomica, ma successivamente questa soglia si sarebbe abbassata considerevolmente, poiché i costi dell'arricchimento dell'uranio sono precipitati in seguito all'introduzione di nuove tecnologie. Ecco quindi il rischio che ci troviamo ad affrontare: tecnologie più recenti e più a buon mercato potrebbero mettere le armi nucleari nelle mani di governi instabili.

La chiave per costruirsi una bomba atomica è disporre di una grande quantità di uranio, nonché della capacità di purificarlo. Ciò significa separare l'uranio 238 (^{238}U), che costituisce il 99,3 per cento dell'uranio presente in natura, dall'uranio 235 (^{235}U), quello necessario per la bomba atomica e presente soltanto nella misura dello 0,7 per cento. Si tratta di due isotopi chimicamente identici, quindi l'unico modo per separarli in maniera affidabile è sfruttare il fatto che l'uranio 235 pesa circa l'1 per cento in meno del suo cugino.

Dopo la Seconda guerra mondiale l'unico modo rimasto per separare i due isotopi dell'uranio (dopo l'abbandono della diffusione termica e dei processi elettromagnetici) era la *diffusione gassosa*: l'uranio veniva trasformato in un gas (l'esafluoruro di uranio) e quindi fatto passare attraverso centinaia di chilometri di tubature e membrane. L'uranio più veloce (cioè il più leggero) raggiungeva per primo il traguardo alla fine di quel percorso: in altre parole, l'uranio 235 si lasciava alle spalle il più pesante uranio 238. Dopo l'estrazione del gas contenente uranio 235, il processo di arricchimento dell'uranio veniva ripetuto finché la percentuale passava dallo 0,7 al 90 per cento, ovvero il tipo di uranio arricchito necessario per realizzare un ordigno atomico. Tuttavia, far circolare tutto quel gas richiedeva un grandissimo consumo elettrico. Per questo una parte significativa delle riserve elettriche statunitensi fu deviata al laboratorio nazionale di Oak Ridge, una struttura enorme che occupava più di 18 ettari e impiegava dodicimila operai.

Dopo la guerra soltanto le superpotenze, cioè Stati Uniti e Unione Sovietica, potevano accumulare un'enorme quantità di armi nucleari (trentamila testate ciascuno), perché solo loro padroneggiavano la tecnica della diffusione gassosa. Ma oggi solo il 33 per cento dell'uranio arricchito presente in tutto il mondo è ottenuto attraverso la diffusione gassosa.

Gli impianti di arricchimento di seconda generazione utilizzano una tecnologia più sofisticata

e meno costosa, ovvero quella delle *ultracentrifughe*, che ha introdotto drastici cambiamenti nelle politiche mondiali. Le ultracentrifughe possono far girare una capsula contenente uranio fino a centomila rivoluzioni al minuto. La differenza di peso dell'1 per cento tra l'uranio 235 e l'uranio 238 viene così accentuata. Dopo il necessario numero di rivoluzioni, l'uranio 238 si accumula in fondo alla centrifuga, mentre l'uranio 235 rimane in cima, da dove può essere "estratto".

In termini energetici le ultracentrifughe sono cinquanta volte più efficienti della diffusione gassosa, ed è per tale motivo che circa il 54 per cento dell'uranio del mondo viene arricchito in questo modo. Per ottenere il quantitativo di uranio necessario per produrre una testata atomica bastano infatti mille ultracentrifughe in costante operatività per un anno.

Ma la tecnologia delle ultracentrifughe può anche essere facilmente trafugata. Nella storia della sicurezza nucleare, una delle peggiori figuracce è stata sicuramente il furto dei progetti delle ultra-centrifughe e dei componenti dell'atomica da parte di un oscuro ingegnere atomico, Abdul Qadeer Khan, che li ha poi venduti ad altri paesi. Nel 1975, mentre lavorava all'URENCO, ente fondato da Gran Bretagna, Germania Ovest e paesi Bassi per rifornire di uranio i reattori europei, Khan consegnò quei progetti segretissimi al governo pachistano, che l'acclamò come eroe nazionale. Si sospetta che Khan avesse venduto quegli stessi progetti anche a Saddam Hussein e ai governi di Iran, Corea del Nord e Libia.

Con questi progetti rubati il Pakistan si è poi creato un piccolo arsenale nucleare, i cui test sono iniziati nel 1998, dando vita a una rivalità nucleare tra Pakistan e India e a una conseguente escalation di esperimenti atomici che ha portato le due nazioni sull'orlo della guerra nucleare.

Grazie ai segreti apparentemente acquistati da Khan, si pensa che l'Iran abbia accelerato il suo programma nucleare realizzando ottomila ultracentrifughe entro il 2010, con l'intenzione di costruirne altre trentamila in futuro. Naturalmente, questo esercita un'ulteriore pressione politica sugli altri paesi del Medio Oriente, che di fronte a tale minaccia vorranno a loro volta dotarsi di armi nucleari, cosa che inasprirebbe ulteriormente le tensioni.

Il secondo motivo per cui la geopolitica del XXI secolo potrebbe cambiare significativamente è l'avvento di una tecnologia di arricchimento di nuova generazione, ovvero la tecnologia laser, potenzialmente ancora meno costosa delle ultracentrifughe.

Esaminando i gusci elettronici di questi due isotopi dell'uranio appaiono identici, poiché il loro nucleo ha la stessa carica. Ma quando ne analizziamo con cura le equazioni, scopriamo che la loro energia differisce, sebbene in misura infinitesimale. Attraverso l'esposizione a un raggio laser della frequenza opportuna, gli elettroni dell'uranio 235 vengono espulsi dal guscio, mentre quelli dell'uranio 238 rimangono al loro posto. Una volta ionizzato, l'uranio 235 può facilmente essere separato dall'uranio 238 attraverso l'esposizione a un campo elettrico.

La differenza energetica tra i due isotopi è talmente piccola che, sebbene molte nazioni abbiano già provato a sfruttarla, nessuna ne ha ricavato ancora nulla. Tra gli anni Ottanta e Novanta, infatti, Stati Uniti, Francia, Gran Bretagna, Germania, Sud Africa e Giappone hanno tentato di dominare questa tecnologia, ma senza successo. Una delle ricerche condotte negli Stati Uniti ha coinvolto cinquecento scienziati e ha avuto un budget di 2 miliardi di dollari.

Ma ecco che nel 2006 l'Australia annuncia non solo di avere risolto il problema, ma anche di volerne commercializzare la tecnologia laser. E poiché il 30 per cento dei costi del combustibile nucleare sono attribuibili al processo di arricchimento, l'australiana Silex ritiene che la tecnologia laser conquisterà la sua bella fetta di mercato.

La Silex ha anche firmato un contratto con la General Electric per avviare la commercializzazione, e insieme sperano che con il processo laser si possa infine arrivare a un terzo della produzione mondiale di uranio arricchito. Nel 2008 la GE Hitachi Nuclear Energy ha inoltre annunciato il progetto di costruzione del primo impianto di arricchimento dell'uranio con tecnologia laser. Tale impianto, che sarà costruito entro il 2012 a Wilmington, nella Carolina del Nord, occuperà 80 dei circa 650 ettari destinati al sito⁹.

Per l'industria del nucleare si tratta certamente di una buona notizia, poiché nel giro di qualche anno farà precipitare i costi dell'uranio arricchito. Tuttavia è anche fonte d'inquietudine, poiché non ci vorrà molto prima che la medesima tecnologia proliferi anche nelle regioni più instabili del pianeta. In altre parole, dobbiamo sfruttare il tempo che abbiamo a disposizione per firmare trattati che limitino e regolino il flusso di uranio arricchito. Se non riusciremo a controllare gli sviluppi della nuova tecnologia nucleare, avremo testate un po' ovunque, e forse anche nelle mani dei terroristi!

Lo scomparso Theodore Taylor, che io conoscevo, ebbe il raro privilegio di progettare per il Pentagono alcune delle più grandi e delle più piccole testate nucleari statunitensi. Uno dei suoi progetti era il Davy Crockett, un ordigno atomico da appena 25 chilogrammi, quindi facilmente "recapitabile" al nemico. Taylor era un sostenitore talmente entusiasta delle bombe nucleari che si dedicò anche al progetto Orion, secondo il quale le bombe atomiche dovevano essere usate come propellente per le navicelle spaziali dirette alle stelle più vicine: in base ai suoi calcoli, sganciando una serie di atomiche l'astronave avrebbe prodotto un'onda d'urto tale da spingerla a velocità prossime a quelle della luce.

Una volta gli ho domandato perché si sentisse così deluso dal suo lavoro sulle bombe atomiche e fosse poi passato a occuparsi di energia solare. Allora Taylor mi ha confidato un suo incubo ricorrente: in cuor suo sentiva che tutte quelle ricerche sugli ordigni nucleari avrebbero avuto una specifica conseguenza, cioè lo sviluppo di testate militari di terza generazione. (Quelle di prima generazione, negli anni Cinquanta, erano di tali dimensioni che trasportarle sul bersaglio era alquanto complicato. Poi ci furono le testate di seconda generazione, negli anni Settanta, piccole, compatte, tali che un'ogiva poteva ospitarne una decina. Ma quelle di terza generazione sarebbero state costruite "su misura", e cioè adatte a funzionare in ambienti come foreste, deserti o persino nello spazio.) Uno degli ordigni nucleari di terza generazione è la bomba atomica miniaturizzata, talmente piccola da poter essere nascosta nella valigetta di un terrorista, ma abbastanza potente da poter distruggere un'intera città. L'idea che tutto ciò a cui si era dedicato si sarebbe potuto concretizzare in una micidiale arma di distruzione di massa ha perseguitato Taylor per il resto dei suoi giorni.

Riscaldamento globale

Entro la metà del secolo dovremo probabilmente affrontare tutte le conseguenze di un'economia basata sui combustibili fossili. In altre parole, dovremo affrontare i gravi effetti del riscaldamento globale. Non c'è più alcun dubbio: il nostro pianeta si sta surriscaldando. Nell'ultimo secolo la temperatura della Terra è aumentata di circa 0,7 gradi centigradi, e continua progressivamente a salire. Le prove sono visibili ovunque:

- Negli ultimi cinquant'anni lo spessore dei ghiacci artici è diminuito del 50 per cento. Buona parte del ghiaccio artico è appena al di sotto del punto di congelamento, e galleggia sull'acqua. Di conseguenza è estremamente sensibile alle minime variazioni di temperatura degli oceani e, come il canarino nella miniera, funge da primo sistema d'allarme. Oggi parte della calotta polare settentrionale scompare durante i mesi estivi, e già a partire dal 2015 potrebbe svanire completamente nel corso dell'estate, per poi esaurirsi per sempre entro la fine del secolo. Questo stravolgerebbe il clima planetario, alterandone le correnti oceaniche ed atmosferiche.
- Nel 2007 la superficie glaciale della Groenlandia si era ridotta di oltre 60 chilometri quadrati, e nel 2008 tale valore è salito a 184 chilometri quadrati¹⁰. (Se tutti i ghiacci della Groenlandia dovessero sciogliersi, il livello del mare salirebbe di circa 6 metri in tutto il pianeta.)
- Ampie porzioni dei ghiacci dell'Antartide, che si sono mantenuti stabili per decine di migliaia di anni, si stanno gradualmente rompendo¹¹. Nel 2000 si è staccata una porzione di ghiacci pari a quasi 11.000 chilometri quadrati, cioè grande come lo Stato del Connecticut. Nel 2002 il ghiacciaio Thwaites ha perso un colossale iceberg delle dimensioni dello Stato del Rhode Island. (Se dovessero sciogliersi tutti i ghiacci dell'Antartide, il livello del mare salirebbe di circa 55 metri.)
- Ogni metro di innalzamento del livello degli oceani equivale a circa 100 metri di espansione orizzontale sulla superficie terrestre. Nel secolo scorso il livello del mare è già salito di una ventina di centimetri, perlopiù a causa dell'espansione delle acque marine prodotta dal loro surriscaldamento. Secondo le Nazioni Unite, entro il 2100 il livello degli oceani potrebbe salire da 20 a 60 centimetri circa. Alcuni scienziati hanno però contestato tale interpretazione dei dati. Per esempio, quelli dell'Institute of Arctic and Alpine Research dell'Università del Colorado hanno invece previsto che l'aumento potrà essere dagli 80 ai 200 centimetri entro il 2100¹². Questo comporterà il graduale spostamento delle linee costiere sulla mappa del pianeta.
- Gli scienziati hanno cominciato a registrare le temperature terrestri con una certa affidabilità soltanto dal 1700. Ebbene, il 1995, il 2005 e il 2010 sono stati tra gli anni più caldi mai registrati, mentre il decennio compreso tra il 2000 e 2009 si è meritato il record assoluto. Inoltre stiamo assistendo a un fortissimo aumento dei livelli di anidride carbonica, che sono i più alti degli ultimi centomila anni.
- Poiché la Terra si surriscalda, le malattie tropicali stanno gradualmente migrando verso nord. La recente diffusione del virus del Nilo occidentale attraverso le zanzare potrebbe essere interpretata come una foriera di future epidemie. I funzionari delle Nazioni Unite sono

piuttosto preoccupati per l'espansione della malaria verso nord. Di norma le uova di molti insetti nocivi muoiono d'inverno, quando il suolo si congela. Ma con una stagione invernale più corta, le specie pericolose procedono inarrestabili verso nord.

Anidride carbonica e gas a effetto serra

Secondo l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), il comitato ONU sui cambiamenti climatici, gli scienziati sarebbero concordi al 90 per cento che il riscaldamento globale è prodotto dall'attività umana, e in particolare dalle emissioni di anidride carbonica dovute all'utilizzo di combustibili fossili come petrolio e carbone. La luce del Sole attraversa facilmente l'anidride carbonica, ma una volta colpita la superficie terrestre si trasforma in radiazione infrarossa, che non si disperde attraverso l'anidride carbonica con altrettanta facilità. Quindi l'energia prodotta dalla luce del Sole non ritorna nello spazio ma rimane intrappolata nella nostra atmosfera.

Un effetto piuttosto simile possiamo osservarlo nelle serre agricole o nell'abitacolo delle automobili: la luce del Sole riscalda l'aria interna, che però non può fuoriuscire attraverso i vetri.

Soprattutto nell'ultimo secolo le emissioni di anidride carbonica sono aumentate in misura inquietante. Prima della rivoluzione industriale l'aria conteneva circa 270 parti per milione (ppm) di anidride carbonica. Tale livello è cresciuto vertiginosamente, e oggi siamo a 387 ppm.

Nel 1900 l'intero pianeta consumava 150 milioni di barili di petrolio. Nel 2000 eravamo già a 28 miliardi di barili, 185 volte di più¹³. Nel 2008, in seguito all'uso di combustibili fossili e alla deforestazione sono stati emessi nell'aria 9,4 miliardi di tonnellate di anidride carbonica, ma solo 5 miliardi di tonnellate sono state riciclate dagli oceani, dal suolo e dalla vegetazione. Tutto il resto rimarrà nell'atmosfera per i decenni a venire, contribuendo ad aumentare il riscaldamento del pianeta.

Viaggio in Islanda

L'aumento della temperatura globale non è frutto del caso, come si può facilmente dedurre dall'analisi delle carote dei ghiacci artici. Con il carotaggio degli antichi ghiacci dell'Artico gli scienziati hanno estratto bolle d'aria che risalgono a migliaia di anni fa, e l'analisi chimica di queste bolle ha permesso loro di ricostruire la temperatura e la quantità di anidride carbonica presente nell'aria negli ultimi seicentomila anni. E presto gli scienziati riusciranno a determinare l'evoluzione delle condizioni climatiche nell'ultimo milione di anni.

Ho avuto modo di vedere tutto questo con i miei occhi durante un viaggio di lavoro a Reykjavík, dove ho avuto il privilegio di visitare l'Università d'Islanda e i laboratori in cui si analizzano le carote di ghiaccio. Le prime cose che si vedono atterrando a Reykjavík sono neve e rocce frastagliate, un paesaggio spoglio e quasi lunare. Sebbene brullo e aspro, il territorio artico è ideale per analizzare l'andamento del clima terrestre, poiché consente di risalire a centinaia di migliaia di anni fa.

Per recarmi nei laboratori universitari, ovviamente mantenuti a temperature inferiori allo zero, ho dovuto attraversare spessi portelloni, e una volta dentro ho potuto osservare un'infinità di rastrelliere cariche di tubi metallici da 3 metri di lunghezza e circa 4 centimetri di diametro. Tutti quei tubi cavi erano stati introdotti nelle profondità dei ghiacci polari per estrarre campioni di nevi cadute migliaia di anni prima. Una volta estratte dal tubo, ho potuto esaminare attentamente alcune carote di ghiaccio. A prima vista sembravano lunghe colonne uniformi, ma a un esame più ravvicinato erano visibili striature orizzontali di colori diversi.

Per datarle gli scienziati utilizzavano varie tecniche. Alcuni di quegli strati di ghiaccio contenevano indizi relativi a eventi importanti, per esempio la fuliggine emessa durante le eruzioni vulcaniche. Poiché la data di quelle eruzioni era già nota con particolare precisione, era possibile determinare l'età dello strato su cui si era posata la fuliggine.

Successivamente le carote di ghiaccio venivano "affettate", in modo da poterle analizzare al microscopio. Ho dato loro un'occhiata io stesso, e ho immediatamente notato le minuscole bolle d'aria racchiuse nel ghiaccio da migliaia di anni, forse persino da prima che avesse origine la civiltà umana.

Misurare l'anidride carbonica contenuta nelle bolle è estremamente semplice, mentre calcolare la temperatura dell'aria nel momento in cui il ghiaccio cominciò a depositarsi è più complesso. (Per fare questo gli scienziati analizzano l'acqua delle bolle, poiché le molecole d'acqua possono contenere diversi isotopi. Quando la temperatura diminuisce, gli isotopi dell'acqua più pesanti si condensano più rapidamente delle molecole d'acqua ordinarie. Di conseguenza, misurando la quantità di isotopi più pesanti è possibile calcolare la temperatura a cui si è condensata la molecola d'acqua.)

Infine, dopo avere pazientemente analizzato il contenuto di migliaia di quelle carote, gli scienziati sono giunti a conclusioni definitive e di fondamentale importanza. Hanno infatti accertato che la temperatura e i livelli di anidride carbonica hanno subito oscillazioni parallele, tracciando due curve che salivano e scendevano in sincronia per varie migliaia di anni.

Ma la cosa più importante è l'inevitabile e improvvisa impennata della temperatura e del contenuto di anidride carbonica che si è verificata soltanto nel corso dell'ultimo secolo. Si tratta di un fenomeno del tutto inusuale, poiché la maggior parte delle oscillazioni rilevate si sono

verificate molto lentamente nell'arco di millenni. Si tratta quindi di un aumento inconsueto che non appartiene ai processi naturali di riscaldamento del pianeta, ma che secondo gli scienziati è direttamente attribuibile all'attività umana.

Esistono molti altri modi per dimostrare che tale picco improvviso è dovuto alla nostra attività e non ai cicli naturali. Oggi disponiamo di simulazioni computerizzate avanzate che ci permettono di ricreare l'andamento della temperatura della Terra prima e dopo che l'umanità compisse determinati passi. In assenza della civiltà umana e del suo apporto in termini di emissioni carboniche, la curva della temperatura resta relativamente piatta, ma appena vi aggiungiamo la sua attività è possibile constatare un'improvvisa impennata del livello sia delle temperature sia dell'anidride carbonica, e il picco simulato al computer corrisponde perfettamente a quello rilevato dagli strumenti scientifici.

Infine possiamo misurare l'ammontare di luce solare che colpisce ogni metro quadrato della superficie terrestre, nonché la quantità di calore che la Terra riflette nello spazio esterno. Normalmente i due quantitativi energetici dovrebbero corrispondere, cioè l'input dovrebbe essere pari all'output. In realtà scopriamo che il netto di energia che attualmente riscalda il pianeta corrisponde alla quantità di energia prodotta dall'attività umana. Questo dimostra ancora una volta che siamo i principali responsabili del riscaldamento globale. E anche se smettessimo immediatamente di produrre il benché minimo quantitativo di anidride carbonica, quella che è già stata rilasciata nell'atmosfera sarebbe sufficiente ad alimentare il riscaldamento globale per i decenni a venire. Possiamo dunque dire che con ogni probabilità entro la metà del secolo ci ritroveremo ad affrontare le gravi conseguenze di quanto abbiamo fatto finora.

Gli scienziati hanno prefigurato che dalla metà del secolo in poi molte città costiere potrebbero venire sommerse, se il livello degli oceani continuerà a salire, e nelle immagini che hanno prodotto molti insediamenti costieri sono scomparsi. Per esempio, si dovrebbero evacuare ampie porzioni di Manhattan, poiché Wall Street si ritroverebbe letteralmente sott'acqua. I governi dovranno decidere quali grandi città e capitali salvare e quali invece sacrificare. Sarebbe ipotizzabile salvarne alcune attraverso una combinazione di dighe e sbarramenti, ma per altre non ci sarebbe altro da fare che abbandonarle al loro destino, cioè lasciare che l'oceano le inghiotta obbligando i loro residenti a esodi di massa. E poiché la maggior parte dei porti commerciali e dei centri abitati del mondo si trova sulla riva dei mari, l'economia mondiale subirebbe un colpo mortale.

Anche se alcune delle città più importanti dovessero essere salvate, esisterebbe pur sempre il rischio che grandi mareggiate allaghino le loro strade, paralizzando tutte le infrastrutture. Per esempio, nel 1992 è già successo qualcosa del genere: un'enorme mareggiata ha infatti allagato Manhattan, paralizzando il sistema della metropolitana e dei treni diretti nel New Jersey. Di conseguenza, il blocco dei trasporti ha bruscamente impedito ogni attività economica.

Inondazioni nel Bangladesh e in Vietnam

Il già citato comitato ONU sui cambiamenti climatici, l'IPCC, ha individuato tre regioni critiche potenzialmente esposte al disastro: il Bangladesh, il delta del Mekong in Vietnam e il delta del Nilo in Egitto.

La situazione peggiore è quella del Bangladesh, un paese già regolarmente inondato dalle tempeste, al di là degli effetti del riscaldamento globale. La maggior parte del paese è infatti pianeggiante e al livello del mare. Sebbene negli ultimi decenni abbia compiuto progressi significativi, il Bangladesh rimane una delle nazioni più povere del pianeta, nonché una di quelle con la massima densità di popolazione. (Vi abitano centosessantuno milioni di persone, ovvero quante ne vivono in Russia, ma la sua superficie è un centovesimo di quella sovietica.) Se il livello del mare dovesse salire di quasi un metro, circa il 50 per cento delle terre del Bangladesh si ritroverebbe sott'acqua. Il paese è colpito da calamità naturali quasi ogni anno, ma nel settembre 1998 abbiamo assistito a un'orribile antepresa di fenomeni che potrebbero diventare ordinari. Una catastrofica inondazione ha colpito due terzi della nazione, e da un momento all'altro trenta milioni di persone sono rimaste senza casa, mille sono morte e quasi 10.000 chilometri di strade sono state distrutte. È stata una delle più grandi catastrofi naturali della storia moderna.

Il Vietnam, dove l'area del delta del Mekong è particolarmente vulnerabile, è un altro di quei paesi che verrebbero devastati da un eventuale innalzamento delle acque oceaniche. Entro la metà del secolo questa nazione di ottantasette milioni di abitanti potrebbe trovarsi ad affrontare il collasso della sua principale regione agricola. Infatti metà del riso prodotto in Vietnam è coltivato proprio nel delta del Mekong, dove abitano anche diciassette milioni di persone. In caso di aumento del livello delle acque, buona parte di questa regione verrebbe sommersa definitivamente. Secondo i calcoli della Banca Mondiale, se entro la metà del secolo si dovesse verificare un innalzamento dei mari di circa un metro, l'11 per cento dell'intera popolazione del paese sarebbe costretta a trasferirsi altrove. Inoltre, l'acqua che sommergerebbe il delta sarebbe salata, quindi distruggerebbe definitivamente la fertilità del terreno circostante. Milioni di profughi cercherebbero riparo a Ho Chi Minh, che però sarebbe già sott'acqua per almeno un quarto della sua area.

Nel 2003 il Pentagono ha commissionato uno studio al Global Business Network che ha dimostrato come, nel peggiore degli scenari possibili, il riscaldamento globale possa gettare il mondo nel caos più totale. Milioni di profughi attraverserebbero i confini nazionali, e questo porterebbe alla crisi dei governi, ormai incapaci di contenere l'esodo e quindi privi di qualsiasi autorità. Alcuni paesi si troverebbero ad affrontare l'incubo dei saccheggi, delle rivolte e del caos. In tali disperate situazioni, le nazioni minacciate dall'imminente afflusso di milioni di persone potrebbero prendere in considerazione il ricorso alle armi nucleari.

«Immaginiamo che il Pakistan, l'India e la Cina, tutti paesi dotati di arsenale nucleare, si ritrovino in conflitto a causa dei profughi che spingono ai loro confini, nonché per l'accesso ai fiumi che condividono e alle terre arabili»¹⁴, scrive nel suo rapporto Peter Schwartz, fondatore del Global Business Network e principale autore del lavoro commissionato dal Pentagono. Schwartz mi ha spiegato i dettagli di questo scenario, precisandomi che la zona a maggiore rischio sarebbe il confine tra l'India e il Bangladesh. Nel caso di una crisi incontenibile in

Bangladesh, centosessanta milioni di persone sarebbero costrette ad abbandonare la terra natia, dando origine a una delle più grandi migrazioni di massa della storia umana. La tensione giungerebbe rapidamente al massimo, provocando il crollo dei confini nazionali, la paralisi delle amministrazioni locali e lo scatenarsi di rivolte. Secondo Schwartz, alla fine le nazioni implicate non avrebbero altra risorsa che le armi nucleari.

Sempre considerando lo scenario peggiore, l'effetto serra potrebbe innescare una reazione a catena. Per esempio, il disgelo della tundra delle regioni artiche provocherebbe il rilascio di milioni di tonnellate di gas metano, prodotte dalla vegetazione marcescente. La tundra ricopre circa 23 milioni di chilometri quadrati dell'emisfero settentrionale, e ha una vegetazione congelatasi durante l'ultima era glaciale, ovvero decine di migliaia di anni fa. Di conseguenza, la tundra contiene più anidride carbonica e metano dell'intera atmosfera, e questo rappresenta un'enorme minaccia per la stabilità climatica mondiale. Inoltre, il metano è un gas serra molto più letale dell'anidride carbonica: pur non restando a lungo nell'atmosfera, provoca molti più danni. Il rilascio di un tale quantitativo di metano a causa dello scioglimento del permafrost provocherebbe un rapido aumento delle temperature, con rilascio di ulteriore metano e conseguente aumento incontrollato del riscaldamento globale.

Rimedi tecnici

La situazione è spaventosa, ma non abbiamo ancora raggiunto il punto di non ritorno. Il problema del controllo dei gas serra è in realtà più economico-politico che tecnico. Infatti la produzione di anidride carbonica coincide con l'attività economica e industriale, e quindi con la ricchezza. Per esempio, gli Stati Uniti sono responsabili del 25 per cento circa delle emissioni di anidride carbonica dell'intero pianeta, poiché rappresentano il 25 per cento circa dell'attività economica mondiale. Ma nel 2009, in seguito alla crescita esplosiva della sua economia, la Cina ha raggiunto i livelli di emissione di gas serra degli Stati Uniti. Dunque non stupisce che alcune nazioni siano riluttanti ad affrontare la questione del riscaldamento globale, poiché interferisce con la loro attività economica, e quindi con la loro prosperità.

Benché siano state elaborate diverse strategie per affrontare l'attuale crisi globale, una soluzione rapida potrebbe non bastare. Il problema può essere risolto soltanto attraverso un cambiamento radicale delle nostre abitudini di consumo energetico. Scienziati d'indubbio valore hanno proposto alcune misure tecniche, ma nessuna di queste ha ricevuto consensi unanimi. Vediamone alcune:

- *Lancio di sostanze inquinanti nell'atmosfera.* Si tratterebbe di spedire nell'atmosfera superiore dei razzi che liberino sostanze inquinanti come l'anidride solforosa, in modo che riflettano nello spazio la luce solare e facilitino il raffreddamento della Terra. Il premio Nobel Paul Crutzen ha sostenuto che “sparare” nello spazio sostanze inquinanti potrebbe essere «l'ultimo espediente antiapocalisse», onde evitare che l'umanità imbocchi la via senza ritorno del riscaldamento globale. Questa idea ha le sue radici in un fenomeno del 1991, quando gli scienziati monitorarono meticolosamente l'enorme esplosione vulcanica del monte Pinatubo, nelle Filippine, che ha sollevato 10 miliardi di tonnellate cubiche di fumi e detriti nell'atmosfera superiore. Allora il cielo si oscurò, provocando una diminuzione media dell'atmosfera terrestre di circa 0,5 gradi centigradi. Grazie a quel fenomeno naturale è stato possibile calcolare quante sostanze inquinanti dovrebbero essere rilasciate per ridurre la temperatura del pianeta. La proposta è seria, ma molti dubitano che da sola possa bastare a risolvere il problema. Sappiamo poco del possibile effetto che un enorme quantitativo di sostanze inquinanti può avere sulla temperatura mondiale. I benefici potrebbero essere a breve termine, ma che fare poi se inattesi effetti collaterali peggiorassero la situazione? Per esempio, dopo l'eruzione del Pinatubo si è verificato un immediato calo delle precipitazioni globali; se l'esperimento dovesse andare storto, provocherebbe siccità diffusa. Secondo le stime, si calcola che per condurre i primi test sul campo ci vorrebbero 100 milioni di dollari. Poiché l'effetto degli aerosol solforosi è temporaneo, i costi per “iniettare” regolarmente nell'atmosfera massicci quantitativi di tali sostanze sarebbero pari a circa 8 miliardi di dollari l'anno.
- *Proliferazione artificiale delle alghe.* Una seconda proposta consiste nel “concimare” gli oceani con sostanze chimiche a base ferrosa. Tali fertilizzanti minerali farebbero prosperare le alghe negli oceani, e questo aumenterebbe a sua volta il quantitativo di anidride carbonica che le alghe stesse sono in grado di assorbire. Tuttavia, dopo che la californiana Planktos ha annunciato di voler tentare privatamente di fertilizzare con ferro parte dell'Atlantico

meridionale, nella speranza di far proliferare il plancton con cui assorbire l'anidride carbonica dispersa nell'atmosfera, i paesi che hanno siglato la Convenzione di Londra¹⁵, che regola lo scarico in mare di qualsiasi sostanza, ha immediatamente emesso un documento ufficiale in cui ha espresso tutte le sue preoccupazioni riguardo all'esperimento. Successivamente le Nazioni Unite hanno chiesto una temporanea moratoria, e la Planktos ha poi interrotto l'esperimento per mancanza di fondi.

– *Sequestro dell'anidride carbonica.* Un'altra possibilità è fare ricorso alla cattura e al sequestro dell'anidride carbonica, processo attraverso cui il gas emesso dalle centrali a carbone viene liquefatto, così non si disperde nell'ambiente ma può essere immagazzinato e stoccato, per esempio sottoterra. Sebbene in linea di principio potrebbe funzionare, si tratta di un processo estremamente costoso, e ad ogni modo non può sbarazzarci dell'anidride carbonica già liberata nell'atmosfera. Nel 2009 alcuni ingegneri hanno osservato con attenzione il primo test guida di sequestro dell'anidride carbonica. L'enorme centrale a carbone di Mountaineer, costruita nel 1980 nella Virginia occidentale, è stata sottoposta a un processo di *retrofit*, ovvero a un rinnovamento che prevede l'aggiunta di tecnologie recenti diverse da quelle originarie, così da isolare le sue emissioni di anidride carbonica. La centrale di Mountaineer è così diventata la prima di tutti gli Stati Uniti a generare elettricità sperimentando la tecnica del sequestro. I gas liquefatti verranno iniettati nel sottosuolo, a una profondità di circa 2400 metri, fino a raggiungere uno strato di dolomite¹⁶. Il liquido finirà per costituire una massa alta da 9 a 12 metri e lunga centinaia di metri. L'American Electric Power, proprietaria dell'impianto, intende iniettare nel sottosuolo circa 100.000 tonnellate di anidride carbonica all'anno, per un periodo di duecinque anni. Si tratta soltanto dell'1,5 per cento delle emissioni annue della centrale, ma ci si attende che il sistema possa infine giungere a catturarne fino al 90 per cento. I costi iniziali sono all'incirca di 73 milioni di dollari. Se però questa tecnologia si dimostrasse fruttuosa, il modello potrebbe essere rapidamente diffuso ad altri siti, per esempio le vicine e gigantesche centrali a carbone che generano 6 miliardi di watt (non a caso l'area in questione è stata ribattezzata *Megawatt Valley*). Ci sono però notevoli incognite: non sappiamo se l'anidride carbonica finirà per migrare o se il gas si combinerà con l'acqua, forse dando vita ad acido carbonico, una sostanza che danneggerebbe le falde sotterranee. Resta tuttavia il fatto che in caso di successo questo progetto potrebbe diventare parte dell'insieme di tecnologie utili per contrastare il riscaldamento globale.

– *Ingegneria genetica.* Un'altra proposta è quella di ricorrere all'ingegneria genetica per creare forme di vita capaci di assorbire grandi quantità di anidride carbonica. Uno dei promotori più entusiasti di questa soluzione è John Craig Venter, che ha ottenuto fama e fortuna sviluppando le tecniche ad alta velocità che hanno portato al sequenziamento del genoma umano anni prima del previsto: «Noi vediamo il genoma come un software, o forse persino come sistema operativo della cellula»¹⁷. Venter si propone di riscrivere quel software, in modo che i microbi possano essere modificati geneticamente, o persino costruiti quasi da zero, affinché acquisiscano la capacità di assorbire l'anidride carbonica prodotta dalle centrali a carbone e convertirla in sostanze utili come il gas naturale. Venter aggiunge: «Sul nostro pianeta esistono già migliaia, se non milioni, di organismi che sanno fare qualcosa del genere». Il trucco consiste nel modificarli in modo che possano aumentare il loro output e prosperare nelle centrali a carbone. «Pensiamo che questo settore abbia un incredibile potenziale, tale da poter rimpiazzare l'industria petrolchimica già a partire dal

prossimo decennio» conclude ottimisticamente Venter.

Freeman Dyson, fisico di Princeton, ha proposto una variante di questa idea, e cioè creare una specie di albero geneticamente modificato per assorbire anidride carbonica. Dyson ha affermato che un trilione di tali alberi sarebbe sufficiente per controllare l'anidride carbonica nell'aria. Nel suo articolo intitolato *Can We Control the Carbon Dioxide in the Atmosphere?* (Possiamo convertire l'anidride carbonica presente nell'atmosfera?) Dyson suggerisce di creare un «bacino carbonico di alberi a rapida crescita»¹⁸ con cui regolare i livelli di anidride carbonica. Ma come occorre fare per qualsiasi progetto che intenda ricorrere all'ingegneria genetica su larga scala, è bene prestare grande attenzione ai potenziali effetti collaterali. Non si può ritirare dal mercato una forma di vita come se fosse un modello di automobile difettoso. Una volta liberata nell'ambiente, qualsiasi forma di vita modificata geneticamente potrebbe interferire in maniera inaspettata con altre forme di vita, soprattutto se dovesse prendere il posto delle specie locali e sconvolgere gli equilibri della catena alimentare.

Purtroppo c'è stata da parte dei politici una grande mancanza d'interesse a finanziare questi progetti. Tuttavia un giorno il riscaldamento globale assumerà proporzioni talmente gravi e distruttive che anche loro saranno costretti a prenderne atto, e quindi a tornare a valutare una delle soluzioni appena citate.

I prossimi decenni saranno il periodo critico. Entro la metà del secolo dovremmo già trovarci nell'era dell'idrogeno, in cui una combinazione di fusione nucleare ed energie rinnovabili dovrebbero portarci a un sistema economico meno dipendente dai combustibili fossili. Inoltre, una combinazione di forze di mercato e di innovazioni tecnologiche legate all'idrogeno dovrebbero fornirci una soluzione al riscaldamento globale. Il momento più critico è proprio questo, cioè quello che precede l'avvento dell'economia dell'idrogeno, poiché nel breve termine i combustibili fossili continueranno ad essere il mezzo più economico per generare energia, quindi il riscaldamento globale rappresenterà un pericolo per i decenni a venire.

Fusione nucleare

Entro la metà del secolo una nuova opzione stravolgerà le regole del gioco: la fusione nucleare. Per allora dovrebbe rivelarsi il più plausibile di tutti i processi tecnici, tanto che potrebbe fornirci una soluzione permanente al problema. Mentre la fissione si basa sulla divisione dell'atomo di uranio e produce grandi quantità di scorie, la fusione nucleare fonde due o più atomi di idrogeno ad alte temperature, rilasciando molta energia in più e pochissime scorie.

A differenza della fissione, l'energia nucleare liberata dalla fusione è la stessa del Sole. L'atomo d'idrogeno custodisce dunque la fonte d'energia dell'universo. È l'energia della fusione che illumina il Sole e la volta celeste, ed è questo il segreto delle stelle. Chiunque riuscirà a padroneggiare la fusione nucleare avrà il dominio su una fonte d'energia eterna e illimitata. Inoltre, il "carburante" per le centrali a fusione sarà la comune acqua di mare. A parità di volume, la fusione rilascia dieci milioni di volte l'energia ottenuta dalla benzina. In pratica, un bicchiere d'acqua da 20 centilitri equivale all'energia contenuta in cinquecentomila barili di petrolio¹⁹.

È la fusione (non la fissione) il metodo che la natura ha scelto per alimentare l'universo. Quando si forma una stella, aggregati di gas ad alta densità d'idrogeno collassano gradualmente in virtù della gravità, finché cominciano a scaldarsi raggiungendo temperature molto elevate. Quando il gas arriva a circa a 50 milioni di gradi (valore che varia a seconda delle condizioni specifiche) i nuclei d'idrogeno contenuti nel gas entrano in collisione e si fondono creando elio. In questo processo si libera un'enorme quantità d'energia, che provoca l'infiammazione del gas. (Ad essere più precisi, la compressione deve soddisfare il cosiddetto *criterio di Lawson*, secondo cui l'idrogeno dev'essere compresso fino a raggiungere una certa densità a una certa temperatura per un determinato periodo di tempo. In presenza di queste tre condizioni d'idoneità – densità, temperatura e tempo – abbiamo la reazione di fusione, la stessa che si verifica in una bomba all'idrogeno, in una stella o in un reattore a fusione nucleare.)

Ecco dunque la chiave: scaldare e comprimere l'idrogeno fino alla fusione del nucleo, che rilascia quantità cosmiche d'energia.

Peraltro, tutti i tentativi finora compiuti sono falliti. È piuttosto difficile scaldare l'idrogeno fino a temperature di decine di milioni di gradi, e cioè fino al punto in cui i protoni fondono e creano gas elio, liberando un'enorme quantità d'energia.

Inoltre l'opinione pubblica comincia a manifestare un certo scetticismo circa i progressi del settore, perché ogni vent'anni gli scienziati più ottimisti dichiarano che arriveremo alla fusione nucleare entro i successivi venti. Tuttavia, dopo decenni di affermazioni fin troppo ottimistiche, i fisici sono sempre più convinti che ci stiamo avvicinando davvero all'obiettivo, e che dovremmo raggiungerlo nel 2030. In un momento non ancora precisato di questa metà del secolo, le centrali a fusione nucleare potrebbero quindi cominciare a comparire un po' ovunque.

Gli scettici hanno tuttavia le loro ragioni, perché in passato ci sono state molte mistificazioni, imposture e fallimenti. Già nel 1951, quando gli Stati Uniti e l'Unione Sovietica erano prese dalla frenesia della Guerra fredda e cercavano febbrilmente di realizzare la prima bomba all'idrogeno, Juan Domingo Perón, presidente dell'Argentina, annunciò con grande fanfara mediatica che gli scienziati del suo paese erano finalmente riusciti a compiere un decisivo passo avanti nel controllo dell'energia del Sole. Quell'uscita infiammò gli animi. Sembrava

incredibile, eppure era su tutte le prime pagine dei giornali, compreso il “New York Times”. Secondo Perón, l’Argentina aveva compiuto l’enorme scoperta scientifica che tutte le grandi superpotenze inseguivano invano da molto tempo. Uno sconosciuto scienziato di lingua tedesca, un certo Ronald Richter, aveva convinto Perón a finanziare il suo *thermotron*, che prometteva all’Argentina gloria ed energia eterne.

La comunità scientifica americana, che si stava ancora cimentando con i problemi della fusione, in un’agguerrita corsa contro il tempo con l’Unione Sovietica per produrre la bomba H, dichiarò che si trattava di menzogne. Lo scienziato atomico Ralph Lapp disse: «So bene quale materiale sta usando l’Argentina: le balle!»²⁰.

Al che la stampa ribattezzò subito il progetto argentino *Bomba Balla*, e quando fu chiesto allo scienziato atomico David Lilienthal se ci fosse «anche solo la minima possibilità» che l’Argentina avesse raggiunto quel risultato, lui ribatté: «Neanche meno di quella!»²¹.

Sottoposto a pressioni sempre più intense, Perón reagì impuntandosi, e lasciò intendere che le superpotenze erano semplicemente gelose del fatto che l’Argentina le avesse battute sul tempo. L’anno seguente giunse infine il momento della verità, quando gli uomini di Perón fecero visita al laboratorio di Richter. Sotto tale fuoco incrociato, lo scienziato si era fatto sempre più stravagante e imprevedibile, e quando arrivarono gli ispettori fece scoppiare la porta del laboratorio con taniche di ossigeno, poi scarabocchiò su un pezzo di carta le parole *energia atomica*. In seguito ordinò che nel suo reattore fosse introdotta polvere da sparo: era chiaramente impazzito. Quando gli ispettori posizionarono un pezzo di radio nelle vicinanze del “contatore di radiazioni” di Richter, non accadde un bel niente. La sua era una semplice truffa, e infine fu arrestato.

Ma il caso più celebre è senz’altro quello di Stanley Pons e Martin Fleischmann, due chimici di tutto rispetto dell’Università dello Utah che nel 1989 proclamarono di essere giunti alla *fusione fredda*, cioè alla fusione a temperatura ambiente. I due scienziati sostenevano che dopo avere immerso in acqua un particolare metallo, il palladio, gli atomi d’idrogeno erano magicamente collassati fino a fondersi in elio, rilasciando la stessa energia del Sole sul tavolo del loro laboratorio.

La notizia suscitò un enorme entusiasmo, e quasi tutti i quotidiani del mondo la sbatterono in prima pagina. I giornalisti cominciarono a parlare di fine della crisi energetica e dell’inizio di una nuova era in cui avremmo finalmente goduto di energia illimitata e gratuita. Tutti i media del mondo si lasciarono trasportare dalla frenesia, e l’amministrazione dello Stato dello Utah stanziò immediatamente 5 miliardi di dollari per la creazione di un *Istituto nazionale per la fusione fredda*. Anche alcuni produttori di auto giapponesi misero mano al portafogli, e donarono milioni di dollari per promuovere la ricerca in questo nuovo stimolante settore. La fusione fredda diede vita a un seguito di incrollabili “fedeli”.

A differenza di Richter, Pons e Fleischmann godevano del rispetto della comunità scientifica, e si dimostrarono felici di condividere i risultati ottenuti. Descrissero le loro attrezzature con grande cura, e resero disponibili tutti i dati in modo che il mondo li vedesse.

Ma presto le cose presero una brutta piega. Poiché l’apparecchiatura degli scienziati era di per sé estremamente semplice, varie équipes di tutto il mondo provarono subito a riprodurre gli stessi risultati. Sfortunatamente, la maggior parte di queste si ritrovò con un pugno di mosche in mano: non rilevarono alcun incremento netto d’energia, e la fusione fredda fu immediatamente

dichiarata un vicolo cieco. Tuttavia quella storia continuò a circolare, tanto che spesso saltavano fuori nuove équipes di ricercatori che affermavano di essere riusciti a riprodurre l'esperimento con successo.

Infine la comunità dei fisici intervenne con tutta la sua autorevolezza. Analizzò le equazioni di Pons e Fleischmann e le dichiarò carenti. Tanto per cominciare, se le loro dichiarazioni fossero state corrette, dal bicchiere d'acqua dell'esperimento sarebbe dovuto scaturire un violento fuoco di fila di neutroni che avrebbe ucciso i due scienziati. (In una tipica reazione di fusione, due nuclei d'idrogeno vanno a sbattere l'uno contro l'altro, e fondendo creano energia, un nucleo di elio e un neutrone.) Il fatto stesso che Pons e Fleischmann fossero sopravvissuti all'esperimento significava che non aveva funzionato. Se davvero si fosse prodotta una fusione fredda, sarebbero stati ritrovati in fin di vita a causa delle ustioni da radiazioni. In secondo luogo, quella in cui Pons e Fleischmann si erano imbattuti era con ogni probabilità una reazione chimica, anziché termonucleare. Infine, i fisici conclusero che il palladio non era un metallo in grado di legare gli atomi d'idrogeno con tale forza da provocare la loro fusione in elio. Infatti questo violerebbe le leggi della teoria quantistica.

Tuttavia la controversia non si è mai placata. Di tanto in tanto c'è ancora qualcuno che afferma di essere giunto alla fusione fredda. Il problema è che nessuno è mai stato capace di ottenerla in modo affidabile e su richiesta.

Dopotutto, a che cosa servirebbe produrre un motore per automobili se poi funziona solo occasionalmente? La scienza si basa su risultati riproducibili, dimostrabili e falsificabili che "funzionino" tutte le volte.

Fusione calda

La fusione nucleare presenta così tanti vantaggi che molti grandi scienziati hanno risposto al richiamo delle sue sirene.

Per esempio, l'inquinamento creato dalla fusione è davvero trascurabile. Si tratta di un modo relativamente pulito di produrre energia, e del resto è lo stesso con cui si alimenta l'universo. Uno dei sottoprodotti della fusione è l'elio, un gas che ha un concreto valore commerciale. Poi c'è l'acciaio radioattivo della camera di fusione, che a un certo punto dovrebbe essere sepolto, benché la sua pericolosità sia lieve e limitata a pochi decenni. Ma se confrontata a una normale centrale a fissione dell'uranio, che produce trenta tonnellate all'anno di scorie altamente radioattive e destinate a restare tali per un periodo compreso tra i mille e i dieci milioni di anni, una centrale a fusione produce una quantità di scorie nucleari del tutto insignificante.

Inoltre, con una centrale a fusione non si corre il rischio di un catastrofico scioglimento del nocciolo. Le centrali a fissione, invece, contengono nel nocciolo tonnellate di scorie altamente radioattive capaci di produrre calore volatile in grandi quantità persino dopo l'arresto del reattore. È proprio tale calore residuo che alla fine fonde l'acciaio e lo fa penetrare nelle acque freatiche, creando un'esplosione di vapore e il conseguente incubo di un incidente da sindrome cinese.

Le centrali a fusione sono intrinsecamente sicure. La semplice ipotesi di una fusione del nocciolo è una contraddizione in termini. Se per esempio dovessimo arrestare il campo magnetico di un reattore a fusione, il plasma caldo colpirebbe le pareti della camera e il processo di fusione si arresterebbe all'istante. Di conseguenza, un eventuale incidente in una centrale a fusione produrrebbe, anziché un'inarrestabile reazione a catena, il semplice blocco spontaneo dell'intero sistema.

Farrokh Najmabadi, che dirige il Center for Energy Research dell'Università della California a San Diego, ha spiegato: «Anche se dovessimo radere al suolo l'impianto mentre è in funzione, il livello di radiazioni a distanza di un chilometro dalle sue recinzioni sarebbe talmente basso da non richiedere neppure un'evacuazione»²².

Sebbene la fusione rappresenti una lunga serie di vantaggi commerciali, resta un piccolo ma fondamentale particolare: non esiste, nel senso che nessuno ha ancora realizzato e messo in funzione una centrale a fusione.

I fisici sono tuttavia cautamente ottimisti: «Soltanto dieci anni fa alcuni scienziati si domandavano se la fusione fosse davvero possibile, almeno in laboratorio. Oggi invece sappiamo che potrebbe funzionare. Tutto sta nel capire quanto sia economicamente fattibile»²³, afferma David E. Baldwin della General Atomics, che sovrintende a uno dei più grandi reattori a fusione degli Stati Uniti, il DIII-D.

NIF: la fusione laser

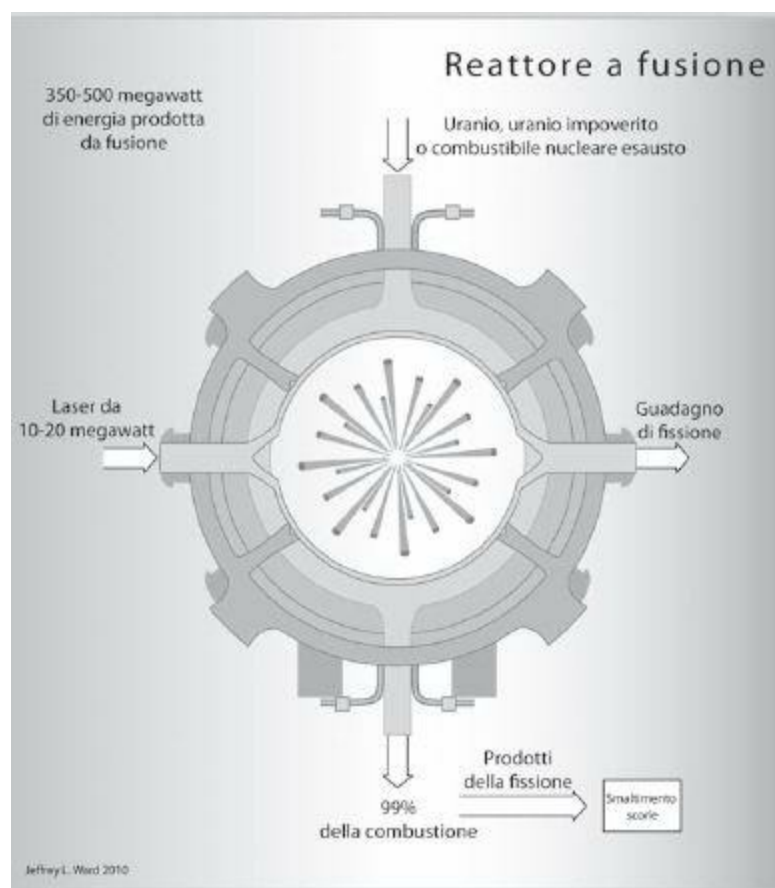
Tutto questo potrebbe cambiare drasticamente in pochi anni. Diverse strategie sono state sperimentate simultaneamente, e dopo decenni di false partenze i fisici sono convinti che riusciranno finalmente a conseguire la fusione. In Francia è stato avviato l'ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), sostenuto da molti paesi europei, dagli Stati Uniti, dal Giappone e da altri ancora, mentre negli Stati Uniti è stato creato il NIF (National Ignition Facility, ovvero la Struttura Nazionale di Ignizione).

Ho potuto visitare di persona il dispositivo per la fusione laser del NIF, ed è stata un'esperienza stupefacente. Vista la stretta connessione con le testate nucleari a idrogeno, il reattore del NIF è situato presso il Lawrence Livermore National Laboratory, in California, dove i militari progettano le bombe a idrogeno. Ovviamente, per accedere al sito ho dovuto superare una lunga serie di controlli di sicurezza, ma una volta raggiunto il reattore lo spettacolo è stato impressionante. Sono abituato a vedere gli apparecchi laser nei laboratori universitari (uno dei più grandi laboratori laser dello Stato di New York è proprio sotto il mio ufficio, alla City University), ma quello del NIF è assolutamente sbalorditivo. Si trova in un edificio alto dieci piani e grande come tre campi da calcio, e i suoi centonovantadue giganteschi raggi laser vengono "sparati" attraverso un lungo tunnel. È il più grande impianto laser al mondo, capace di liberare un'energia sessanta volte superiore al secondo impianto in classifica.

I raggi laser indirizzati nel tunnel vanno a colpire una schiera di specchi, i quali indirizzano ciascun raggio su un minuscolo bersaglio, un pellet piccolo come la punta di uno spillo, fatto di deuterio e trizio (due isotopi dell'idrogeno). È qualcosa di incredibile: un'energia laser di 500 trilioni di watt concentrata su un minuscolo pellet, appena visibile a occhio nudo, che raggiunge così la temperatura di 100 milioni di gradi centigradi, quindi superiore a quella del nucleo solare. (L'energia di questo impulso colossale e istantaneo equivale al prodotto di mezzo milione di centrali nucleari.) La superficie del minuscolo pellet si vaporizza all'istante, e l'onda d'urto che ne scaturisce fa collassare il pellet e rilascia l'energia della fusione.

Il NIF è stato completato nel 2009 e attualmente è sottoposto ai test necessari. Se tutto andrà bene, si tratterà del primo dispositivo capace di produrre la stessa quantità di energia che consuma. Sebbene non sia destinato alla produzione di energia elettrica commerciale, tale dispositivo serve a dimostrare che i raggi laser possono essere concentrati per surriscaldare materiali ricchi d'idrogeno e produrre un quantitativo netto d'energia.

Ho parlato con Edward Moses, uno dei direttori del NIF, circa i sogni e le speranze che nutre per tale progetto. Con un casco di sicurezza sulla testa, Moses sembrava più un operaio edile che uno dei maggiori fisici nucleari del più grande laboratorio laser del mondo. Ha ammesso che in passato ci sono state diverse false partenze, ma ha aggiunto che questa gli sembra la volta buona: la sua équipe è ormai prossima a una conquista epocale, di quelle che rimarranno per sempre nei libri di storia, la prima su questa Terra capace di "catturare" il potere del Sole in modo pacifico. Parlando con Moses mi sono reso conto che progetti come il NIF sono letteralmente tenuti in vita dalla passione e dall'energia di chi ci crede davvero. Moses mi ha confessato di immaginare spesso il giorno in cui potrà invitare il presidente degli Stati Uniti nel suo laboratorio per annunciargli che la Storia è stata scritta.



Fusione laser. Il laser colpisce un minuscolo pellet di materiali ricchi d'idrogeno che collassando genera l'energia della fusione. (Illustrazione Jeffrey L. Ward)

Ma non tutto è sempre andato per il verso giusto, anzi si può dire che fin dall'inizio il progetto del NIF ha dovuto superare un ostacolo dopo l'altro. (Sono persino accadute cose strane, come le dimissioni forzate di E. Michael Campbell, precedente codirettore del NIF, poiché nel 1999 si è scoperto che non aveva mai completato il dottorato a Princeton.) Per non parlare della data di completamento, originariamente fissata per il 2003. Un ritardo dopo l'altro, e i costi sono cresciuti da 1 a 4 miliardi di dollari. La struttura è stata infine conclusa nel marzo 2009, ovvero sei anni dopo le normali previsioni.

Si dice che il diavolo si annidi nei dettagli. Be', per quanto riguarda la fusione laser i 192 raggi devono colpire la superficie di un minuscolo pellet con la massima precisione, così da farla implodere in maniera uniforme. Inoltre, i raggi devono colpire quel piccolissimo bersaglio entro un trentatrillesimo di secondo l'uno dall'altro. È sufficiente il minimo errore di allineamento, o una qualche irregolarità del bersaglio, perché questo si riscaldi in modo asimmetrico e provochi un'esplosione laterale anziché un'implosione perfettamente sferica.

Se l'irregolarità del bersaglio supera i 50 nanometri (cioè circa centocinquanta atomi)²⁴, il pellet non potrà implodere uniformemente. (Possiamo pensare a questa operazione come al tentativo inverosimile di fare strike a un battitore con una palla da baseball lanciandola da una distanza di oltre 550 chilometri.) Quindi i principali problemi della fusione laser sono l'allineamento perfetto dei raggi laser e l'assoluta regolarità del bersaglio.

Ma non c'è solo il NIF. Anche l'Unione Europea sta sostenendo un suo progetto di fusione laser, l'High Power Laser Energy Research Facility (HIPER). Il reattore sarà più piccolo ma forse persino più efficace del NIF, e la sua costruzione dovrebbe iniziare nel 2015²⁵.

Sono molti a sperare nel NIF. Tuttavia, se la fusione laser non dovesse funzionare, è già stato

elaborato un altro progetto di fusione controllata ancora più avanzato, che prevede di mettere il Sole “in bottiglia”.

ITER: la fusione a confinamento magnetico

Come abbiamo visto, a Cadarache, nel sud della Francia, è stato avviato un ulteriore progetto, quello dell'ITER, che utilizzerà un enorme campo magnetico per confinare il plasma di idrogeno caldo. Invece di usare i laser per far collassare un minuscolo bersaglio fatto di materiali ricchi d'idrogeno, l'ITER sfrutterà un campo magnetico per comprimere lentamente l'idrogeno. Il congegno al cuore del progetto assomiglierà a un'enorme ciambella vuota fatta d'acciaio, con bobine magnetiche tutto intorno al "buco". Sarà infatti il campo magnetico a mantenere l'idrogeno all'interno del toroide, impedendone la fuoriuscita. Successivamente il gas verrà attraversato da una corrente elettrica, che lo riscalderà. I due effetti combinati, ovvero la compressione del gas nel campo magnetico e il surriscaldamento con la corrente elettrica, gli faranno raggiungere una temperatura di 100 milioni di gradi centigradi.

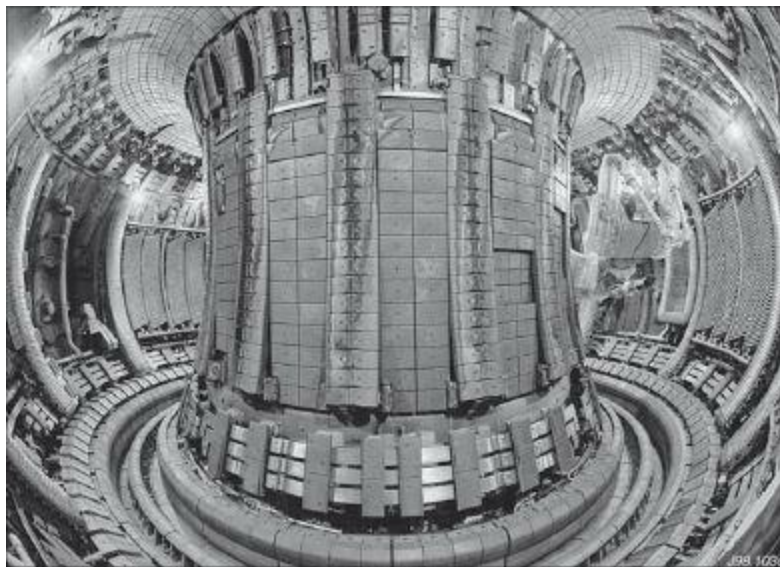
L'idea di creare una sorta di "bottiglia magnetica" per giungere alla fusione non è affatto nuova, anzi risale addirittura agli anni Cinquanta del secolo scorso. Ma perché c'è voluto così tanto tempo, e numerosi ritardi, per progettare la commercializzazione dell'energia da fusione?

Il problema è che il campo magnetico dev'essere messo a punto con assoluta precisione, in modo che il gas venga compresso in maniera uniforme, senza che ne scaturiscano protuberanze o irregolarità. Immaginiamo di tenere tra le mani un palloncino e di provare a comprimerlo in modo perfettamente uniforme: nei punti in cui le dita non riescono a esercitare la dovuta pressione si formano delle protuberanze, ed è praticamente impossibile fargli mantenere un aspetto uniforme. L'instabilità è dunque il problema fondamentale, che non è di carattere fisico ma ingegneristico.

È un fenomeno strano, poiché nelle stelle l'idrogeno collassa assai facilmente, e infatti nell'universo abbiamo miliardi di stelle che si sono formate tutte nello stesso modo. Pare quindi che per creare miliardi di stelle lassù in cielo madre natura non debba affrontare alcun problema. Allora perché ne incontriamo così tanti quaggiù sulla Terra? La risposta sta nella semplice ma profonda differenza tra gravità ed elettromagnetismo.

Come dimostrato da Newton, la gravità è una forza rigorosamente attrattiva. Ne consegue che in una stella la gravità dell'idrogeno produce una compressione uniforme, facendole assumere una forma sferica. (È proprio per tale motivo che le stelle e i pianeti sono sferici, e non cubici o triangolari.) Ma nella forza elettrica abbiamo due aspetti, positivo e negativo. Se dovessimo raccogliere una sfera di cariche negative, queste si respingerebbero tra loro, sparpagliandosi in tutte le direzioni.

Peraltro, affiancando una carica positiva e una negativa, otteniamo il cosiddetto *dipolo*, caratterizzato da un insieme complesso di linee di campo elettrico che sembrano una tela di ragno. Allo stesso modo, anche i campi magnetici formano un dipolo, quindi comprimere uniformemente un gas caldo all'interno di una camera toroidale è un compito particolarmente difficile. Infatti, per disegnare i campi magnetici ed elettrici che emanano da una semplice configurazione di elettroni ci vuole un supercomputer.



Fusione a confinamento magnetico. Il campo magnetico nel “buco della ciambella” comprime un gas contenente idrogeno. (Foto AFP/Getty Images)

In sostanza, tutto si riduce a questo fenomeno: la gravità è una forza attrattiva e può comprimere uniformemente il gas, facendogli assumere una forma sferica. Ecco perché le stelle si formano senza incontrare difficoltà. L'elettromagnetismo, dal canto suo, è contemporaneamente attrattivo e repulsivo, cosicché il gas, allorché compresso, si deforma secondo modalità complicate, rendendo incredibilmente difficile il processo di fusione. È questo il problema fondamentale che ha rallentato i fisici per cinquant'anni.

Almeno fino a oggi. Infatti, i fisici sostengono che l'ITER potrebbe finalmente risolvere gli insidiosi problemi di stabilità dovuti al confinamento magnetico.

L'ITER è uno dei più vasti progetti scientifici internazionali mai tentati. Il cuore del dispositivo è una camera metallica a forma di ciambella, e il peso complessivo della macchina raggiungerà le 23.000 tonnellate²⁶, molto di più della torre Eiffel, che pesa “solo” 7300 tonnellate.

I suoi componenti sono talmente pesanti e ingombranti che le strade su cui passerà il lungo convoglio di automezzi adibiti al loro trasporto dovranno essere appositamente modificate. L'elemento più pesante è di 900 tonnellate, mentre quello più basso ha un'altezza pari a quattro piani di un edificio. Una volta conclusa, la struttura dell'ITER sarà alta diciannove piani e poggerà su un'enorme piattaforma, grande come sessanta campi da calcio. Secondo le stime, il progetto costerà 10 miliardi di euro, e verrà finanziato da sette paesi membri: Unione Europea, Stati Uniti, Cina, Giappone, India, Corea e Russia.

Al momento dell'accensione riscaldierà l'idrogeno fino a 150 milioni di gradi centigradi, superando di gran lunga la temperatura del nucleo solare, che è di 15 milioni di gradi centigradi. Se tutto andrà per il verso giusto, l'impianto genererà 500 megawatt, ovvero dieci volte l'energia originariamente immessa nel reattore. L'attuale record energetico attraverso la fusione è di 16 megawatt, ottenuti dal reattore JET (Joint European Torus) presso il Culham Science Center, nel Regno Unito. Dopo alcuni ritardi, la tabella di marcia prevede che il primo plasma verrà generato entro la fine del 2019.

Per ora quello dell'ITER è soltanto un progetto scientifico²⁷. Non è quindi destinato a produrre energia commerciale. Tuttavia i fisici stanno già ponendo le basi per il passo successivo, ovvero immettere sul mercato l'energia ricavata dalla fusione. Farrokh Najmabadi, che è a capo

di un gruppo di lavoro che analizza progetti di impianti per la fusione a uso commerciale, ha già presentato l'idea dell'ARIES-AT, una macchina più piccola dell'ITER, che dovrebbe produrre 1 miliardo di watt al costo approssimativo di 5 centesimi di dollaro per kilowattora, cioè un prezzo decisamente competitivo rispetto a quello dei combustibili fossili. Ma persino Najmabadi, convinto sostenitore della fusione qual è, ammette che non saremo pronti a immetterla sul mercato prima della metà del secolo.

Un altro progetto commerciale è il reattore a fusione DEMO (Demonstration Power Plant), attualmente studiato in Europa. Mentre l'ITER è ideato per produrre 500 megawatt per 500 secondi, il DEMO genererà energia elettrica con continuità. Il DEMO fa anche un ulteriore passo avanti rispetto all'ITER: durante la fusione forma un neutrone supplementare che fugge immediatamente dalla camera di confinamento. Tuttavia è possibile isolare la camera con un rivestimento speciale detto *blanket*, appositamente progettato per catturare l'energia di questo neutrone. All'interno del blanket ci sono tubature d'acqua a temperatura di ebollizione, il cui vapore viene inviato alle pale di una turbina che genera elettricità.

Nella migliore delle ipotesi, il DEMO comincerà a funzionare nel 2033. Sarà all'incirca il 15 per cento più grande dell'ITER, e produrrà venticinque volte più energia di quella che consuma. Si prevede che complessivamente il DEMO possa produrre 2 miliardi di watt, il che lo renderebbe del tutto simile a una centrale elettrica convenzionale. Se l'impianto dovesse avere successo, la sua tecnologia verrebbe sicuramente commercializzata in brevissimo tempo.

Restano tuttavia molti dubbi. Per quanto concerne l'ITER, i finanziamenti sono già stati stanziati. Ma poiché il DEMO è ancora in fase progettuale, possiamo aspettarci qualche ritardo. Ad ogni modo, gli scienziati che studiano la fusione credono di essere finalmente giunti alla svolta finale. Dopo decenni di esagerazioni e fallimenti, ritengono che la fusione sia finalmente a portata di mano. Ben due progetti sono in corso di realizzazione, il NIF e l'ITER, che alla fine dei lavori potrebbero portare nelle nostre case l'energia prodotta dalla fusione. Peraltro, poiché né l'uno né l'altro stanno ancora fornendo energia elettrica commerciale, rimane spazio per altre soluzioni, per esempio la fusione "da tavolo" e la sonofusione, o fusione acustica.

Fusione da tavolo

Considerata la posta in palio, è importante conoscere ogni possibile soluzione alle problematiche della fusione, anche quelle che prendono direzioni diverse e inattese rispetto alle altre finora analizzate. Poiché la fusione è un processo ben definito, sono state avanzate alcune proposte che, pur non rientrando nella logica mainstream dei finanziamenti su larga scala, meritano tuttavia qualche considerazione. In particolare, grazie ad alcune iniziative un giorno potremmo disporre di congegni per una fusione cosiddetta *da tavolo*.

Verso la fine del film *Ritorno al futuro* lo “scienziato pazzo” Doc Brown si precipita alla ricerca di carburante per la sua macchina del tempo DeLorean, ma invece di alimentarla con benzina, fruga tra i rifiuti, prende lattine vuote e bucce di banana e infila il tutto in uno scatolotto chiamato *Mr. Fusion*. È ipotizzabile che nel giro di un centinaio d’anni un progetto pionieristico possa ridurre macchinari enormi, grandi come un campo da calcio, a congegni non più ingombranti di una macchinetta del caffè, come accade nel film?

Una delle opzioni più valide è la cosiddetta *sonofusione*, che sfrutta l’improvviso collasso di bolle per generare temperature altissime. Talvolta viene definita *fusione acustica*, o *fusione a bolle*. Tale curioso effetto è conosciuto già da decenni, per l’esattezza dal 1934, quando gli scienziati dell’Università di Colonia, facendo esperimenti con ultrasuoni e pellicole fotografiche nella speranza di accelerare il processo di sviluppo di queste ultime, si accorsero che sulle pellicole comparivano minuscoli puntini prodotti dai lampi di luce generati dagli ultrasuoni scaturiti dalle bolle che si creavano nel fluido. Successivamente i ricercatori nazisti compresero che le bolle emesse dalle pale propellenti spesso s’illuminavano, indice che all’interno delle bolle si stavano sviluppando temperature elevate.

In seguito venne dimostrato che quelle bolle manifestavano un’intensa luminescenza perché collassavano uniformemente, quindi comprimendo l’aria al loro interno fino a farle raggiungere temperature elevatissime. Come abbiamo visto in precedenza, la fusione calda deve immancabilmente fare i conti con la compressione non uniforme dell’idrogeno, dovuta al fatto che i raggi laser che colpiscono il pellet non sono bene allineati, o che il gas viene compresso in modo irregolare. Quando però una delle suddette bolle collassa, il moto delle molecole è talmente rapido che la pressione atmosferica all’interno della bolla si uniforma quasi immediatamente lungo tutte le pareti della bolla stessa. In linea di principio, se potessimo far collassare una bolla in tali condizioni ideali, otterremmo la fusione.

Gli esperimenti di sonofusione hanno permesso di raggiungere temperature di decine di migliaia di gradi. L’intensità della luce emessa dalle bolle può essere aumentata attraverso l’impiego di gas nobili. Ad ogni modo, non tutti sono convinti che le temperature raggiungibili siano sufficienti a produrre la fusione nucleare. Tale controversia scaturisce dal lavoro di Rusi Taleyarkhan, ex fisico dell’Oak Ridge National Laboratory che nel 2002 ha affermato di poter giungere alla sonofusione attraverso un congegno da lui ideato. Precisamente, Taleyarkhan ha affermato di avere rilevato un’emissione di neutroni durante un suo esperimento, chiaro segno dell’avvenuta fusione. Tuttavia, dopo anni di lavoro da parte di altri ricercatori, nessuno è in grado di riprodurre tale esperimento, cosicché il risultato ottenuto da Taleyarkhan è stato screditato.

Un’altra carta da giocare è il dispositivo per la fusione di Philo Farnsworth, misconosciuto

coinventore del televisore. Da bambino, osservando il modo in cui gli agricoltori aravano i campi, cioè solco dopo solco, Farnsworth ebbe un'intuizione semplicemente straordinaria, e a soli quattordic'anni abbozzò un progetto del suo prototipo di televisore. Farnsworth fu anche il primo ad applicare quell'idea a un congegno elettronico capace di catturare le immagini in movimento su uno schermo. Sfortunatamente non riuscì a trarre vantaggio da quella sua invenzione epocale, e andò a impantanarsi in un'interminabile e confusa guerra di brevetti con la RCA (Radio Corporation of America). Le battaglie legali lo portarono infine alla pazzia, al punto che si fece volontariamente ricoverare in manicomio. Il suo lavoro pionieristico sul televisore passò largamente inosservato.

Anni dopo Farnsworth rivolse la sua attenzione al *fusore*, un piccolo congegno da tavolo che riusciva concretamente a generare neutroni tramite fusione. Consisteva di due grandi sfere, una dentro l'altra, fatte entrambe di rete metallica. La rete esterna aveva carica positiva e quella interna negativa, quindi i protoni "iniettati" all'interno del congegno venivano respinti dalla rete esterna e attratti da quella interna, dove entravano in collisione con un pellet ricco d'idrogeno producendo fusione e un'"esplosione" di neutroni.

Era un progetto talmente semplice che persino degli studenti delle superiori avrebbero potuto ottenere ciò che Richter, Pons e Fleischmann non hanno mai ottenuto: neutroni. È tuttavia improbabile che un congegno del genere possa mai regalarci energia utilizzabile, poiché il numero di protoni accelerati è estremamente piccolo, quindi l'energia prodotta è irrilevante.

Infatti, è anche possibile giungere a una fusione usando un comune acceleratore di particelle. Si tratta di un congegno più complesso del fusore, ma si può impiegare anche per accelerare i protoni in modo da "spararli" contro un bersaglio arricchito d'idrogeno e ottenere così la fusione. Ma anche in questo caso il quantitativo di protoni fusi è talmente piccolo che il congegno risulta privo di senso pratico. Sappiamo quindi che sia il fusore sia l'acceleratore di particelle producono la fusione nucleare, ma sono inefficienti e i loro fasci troppo sottili per produrre energia utilizzabile.

La posta in palio, come abbiamo detto, è altissima, e sicuramente ci saranno altri scienziati e ingegneri intraprendenti che cercheranno di trasformare aggeggi costruiti artigianalmente in cantina in megainvenzioni che possano cambiare il nostro futuro energetico.

L'era del magnetismo

Il secolo precedente è stato quello dell'elettricità. Poiché gli elettroni possono essere maneggiati con estrema facilità, abbiamo avuto accesso a tutta una serie di nuove tecnologie, per esempio la radio, la televisione, i computer, i laser, gli scanner MRI e molto altro ancora. Ma per quanto riguarda il secolo attuale, ci sono concrete possibilità che i fisici scoprano il loro santo graal: i superconduttori a temperatura ambiente. Questo segnerebbe l'ingresso in un'era completamente nuova, quella del magnetismo.

Immaginate di guidare un'auto magnetica, che anziché starsene posata con le ruote per terra fluttua nell'aria e viaggia a diverse centinaia di chilometri orari, praticamente senza consumare carburante. Oppure pensate ai treni, o anche a singole persone, che si spostano attraversando lo spazio aereo in virtù del magnetismo.

Spesso dimentichiamo che la maggior parte della benzina consumata dalle nostre attuali automobili serve a vincere semplicemente l'attrito con la superficie. In linea di principio il quantitativo necessario d'energia per andare da San Francisco a New York è minimo, ma il motivo principale per cui compiendo tale viaggio spendiamo centinaia di dollari in benzina è dovuto all'attrito delle ruote con l'asfalto e a quello del veicolo con l'aria. Se potessimo in qualche modo compiere lo stesso tragitto su uno strato di ghiaccio, per la maggior parte del tempo procederemmo per inerzia, e cioè quasi gratuitamente. Ecco spiegato perché le sonde spaziali possono raggiungere e superare i confini del sistema solare utilizzando soltanto pochi litri di combustibile: perché non devono fare altro che procedere per inerzia nello spazio vuoto! Allo stesso modo, un'auto magnetica fluttuerebbe nell'aria e si muoverebbe con una leggera spinta.

Il fattore chiave di questo genere di tecnologia è rappresentato dai superconduttori. Già nel 1911 si scoprì che il mercurio, una volta raffreddato a 4 gradi kelvin sopra lo zero assoluto (-269,15 gradi centigradi), perdeva qualsiasi resistenza elettrica. Ciò significa che i materiali superconduttori non comportano alcuna perdita d'energia, perché la resistenza che oppongono al suo passaggio è nulla. (Il motivo per cui gli elettroni che attraversano un cavo perdono energia è la loro continua collisione con gli atomi. Ma in prossimità dello zero assoluto tali atomi sono pressoché a riposo, quindi gli elettroni possono facilmente avanzare tra loro senza perdere energia.)

I superconduttori hanno proprietà tanto bizzarre quanto meravigliose, ma presentano uno svantaggio notevole, poiché occorre raffreddarli fino quasi allo zero assoluto con idrogeno liquido, e tale processo è molto costoso.

I fisici rimasero sconvolti quando nel 1986 venne annunciata la scoperta di una nuova categoria di superconduttori che non richiedevano un raffreddamento a temperature così basse. Non si trattava più di materiali come il mercurio e il piombo, bensì di leghe ceramiche: sebbene in precedenza fossero state ritenute poco idonee allo scopo, si scoprì che invece diventavano superconduttori a 92 gradi kelvin sopra lo zero assoluto (-181,15 gradi centigradi). Era un risultato sconcertante, poiché quei materiali ceramici si trasformavano in superconduttori a una temperatura ritenuta teoricamente impossibile.

Finora il record mondiale di queste nuove leghe ceramiche superconduttrici è di 138 gradi kelvin sopra lo zero assoluto (-135,15 gradi centigradi). È un aspetto estremamente importante,

perché l'azoto liquido, che costa più o meno come il latte, si forma a 77 gradi kelvin (-196,15 gradi centigradi), quindi può essere impiegato per raffreddare queste ceramiche. Potendosi dunque permettere temperature più elevate dei loro predecessori, questi superconduttori hanno avuto immediate applicazioni pratiche.

Tuttavia i superconduttori in ceramica hanno soltanto stuzzicato l'appetito dei fisici. Rappresentano un passo gigantesco nella giusta direzione, ma non sono ancora sufficienti a ottenere i risultati sperati. Anzitutto, sebbene l'azoto liquido sia relativamente economico, per raffreddarlo è ancora necessario un apparato di refrigerazione. Inoltre, modellare i materiali ceramici per trasformarli in cavi risulta abbastanza difficile. E infine, i fisici sono ancora sconcertati dalla natura di questi materiali, tanto che dopo diversi decenni di studio non hanno ancora capito bene come funzionano. Attualmente la teoria quantistica di questi materiali è troppo complessa per poter essere spiegata, quindi nessuno sa dire con esattezza come e perché si trasformino in superconduttori. Non abbiamo indizi sufficienti, e di sicuro lo scienziato intraprendente che riuscirà a spiegarne il funzionamento si guadagnerà il suo bel premio Nobel!

Non c'è fisico che non si renda conto dell'incredibile effetto che potrebbero avere i materiali superconduttori a temperatura ambiente, se diventassero realtà. Una tale scoperta scatenerrebbe una nuova rivoluzione industriale, perché i superconduttori a temperatura ambiente non richiederebbero nessun impianto di refrigerazione, e riuscirebbero a creare campi magnetici permanenti di enorme potenza.

Per esempio, quando l'elettricità fluisce attraverso un circuito di rame, la sua energia si dissipa in una frazione di secondo a causa della resistenza del cavo. Tuttavia gli esperimenti hanno dimostrato che nei superconduttori l'elettricità si mantiene costante un anno dopo l'altro. Abbiamo prove sperimentali che dimostrano come la corrente che circola all'interno di una bobina di materiali superconduttori possa conservarsi per centomila anni. Ma secondo alcune teorie tale corrente elettrica all'interno di un superconduttore può avere un limite di vita pari a quello dello stesso universo conosciuto.

Come minimo tali superconduttori ridurrebbero lo spreco dovuto all'impiego di cavi elettrici ad alta tensione, riducendo quindi il costo dell'elettricità. Una delle ragioni per cui qualsiasi centrale elettrica deve trovarsi nelle vicinanze dei centri abitati è proprio la dispersione lungo le linee di trasferimento. Anche le centrali nucleari devono essere vicine alle città, il che comporta rischi per la salute pubblica; ed è per lo stesso motivo che gli impianti eolici non possono essere semplicemente allestiti dove il vento è più forte e costante.

La perdita di elettricità generata da una centrale nel corso della sua trasmissione arriva a un massimo del 30 per cento. L'impiego di cavi superconduttori a temperatura ambiente cambierebbe tutto questo, favorendo enormi risparmi di denaro e minore inquinamento, nonché influenzando profondamente e positivamente sul riscaldamento globale. Poiché le emissioni mondiali di anidride carbonica sono strettamente correlate ai consumi energetici, e considerato che la maggior parte dell'energia viene sprecata per vincere l'attrito, l'avvento del magnetismo ridurrebbe per sempre i consumi energetici e l'emissione generale di anidride carbonica.

Automobili e treni magnetici

Senza alcun input energetico aggiuntivo, i superconduttori a temperatura ambiente potrebbero rendere possibili supermagneti capaci di sollevare treni e auto e farli librare nell'aria.

Tale potenza può essere semplicemente dimostrata in un qualsiasi laboratorio. Io stesso l'ho fatto diverse volte per la BBC e Science Channel. Basta acquistare un piccolo pezzo di materiale ceramico superconduttore ad alta temperatura presso qualunque azienda di forniture scientifiche (si tratta di un pezzo di ceramica grigia e rigida di circa 2,5 centimetri). Poi serve un po' di azoto liquido, che si può comprare presso le aziende che lo producono per varie applicazioni industriali, tra cui anche quella alimentare. Si mette la ceramica in un piatto di plastica e le si versa sopra, delicatamente, l'azoto liquido, che subito comincia a ribollire scaldando la ceramica. Non bisogna fare altro che aspettare la fine dell'ebollizione dell'azoto, poi posizionare un piccolo magnete sopra la ceramica. Come per magia, la calamita librerà nell'aria, e sarà sufficiente darle un colpetto con le dita perché cominci a girare come una trottola. Questo potrebbe essere il futuro dei trasporti planetari.

Il motivo per cui la calamita non si posa sulla ceramica ma vi fluttua sopra è semplice: in virtù dell'effetto Meissner, le linee magnetiche di forza non possono penetrare un superconduttore. Immergendo un superconduttore in un campo magnetico si producono correnti superficiali che inducono, all'interno del superconduttore, un campo magnetico uguale e contrario a quello applicato. Tale campo indotto viene espulso dal superconduttore, creando una sorta di "cuscino" di linee di forza magnetiche che tiene il magnete separato dalla ceramica, facendolo galleggiare per aria.

I superconduttori a temperatura ambiente potrebbero condurci nell'era dei supermagneti. Come abbiamo visto, la risonanza magnetica è una tecnica estremamente utile, ma i congegni MRI richiedono grandi campi magnetici. Grazie ai superconduttori a temperatura ambiente gli scienziati potrebbero crearne di enormi a poco prezzo, e questo potrebbe facilitare la miniaturizzazione dei macchinari MRI. Usando campi magnetici non uniformi si possono già creare modelli di una trentina di centimetri, ma grazie ai superconduttori a temperatura ambiente potremmo ridurli alle dimensioni di un bottone.

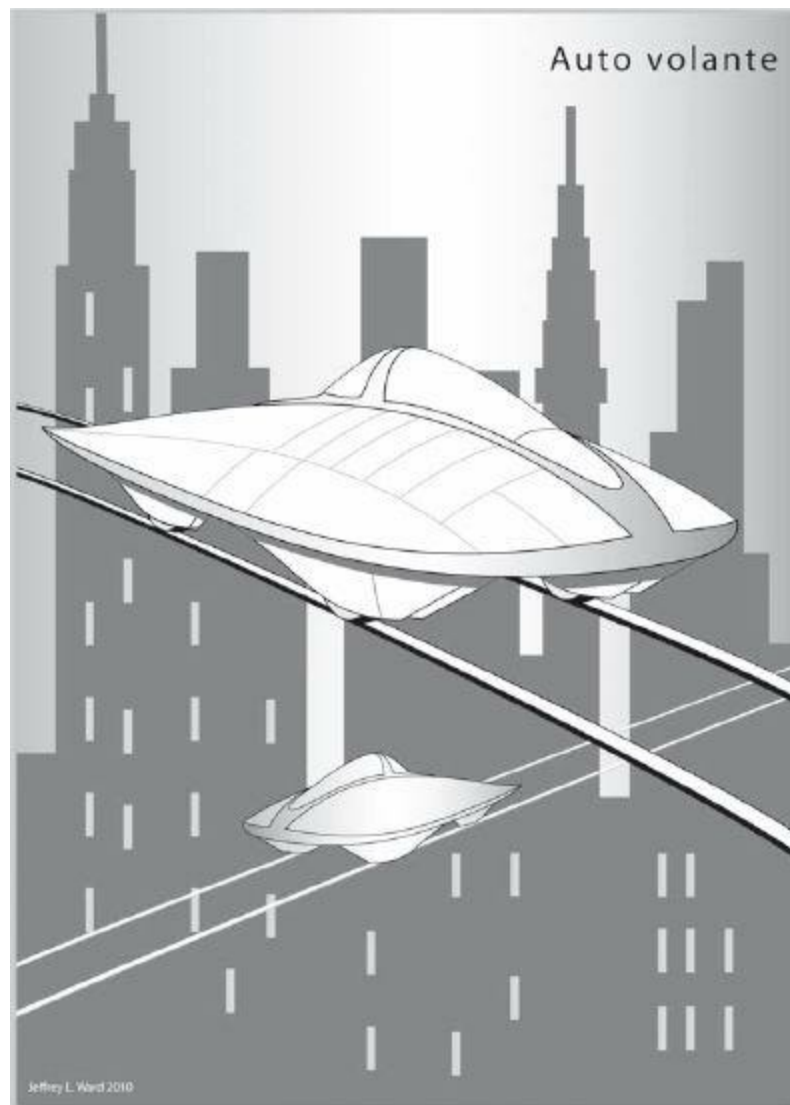
In *Ritorno al futuro parte III* Michael J. Fox se ne va in giro su un *hoverboard*, ovvero uno skateboard che scivola nell'aria, e dopo l'uscita del film i negozi di giocattoli degli Stati Uniti sono stati inondati di chiamate di ragazzini che ne volevano uno uguale. Sfortunatamente un giocattolo del genere non esiste ancora, ma i superconduttori a temperatura ambiente potrebbero permetterci di produrlo in serie.

Treni e auto a levitazione magnetica

Una delle applicazioni immediate dei superconduttori a temperatura ambiente potrebbe riguardare i trasporti, e in particolare l'introduzione di auto e treni capaci di viaggiare sospesi a mezz'aria senza incontrare alcun attrito.

Proviamo a immaginare che cosa potrebbe significare guidare un'auto che sfrutta i superconduttori a temperatura ambiente. Tanto per cominciare, le strade sarebbero ricoperte di superconduttori anziché d'asfalto. L'auto conterrebbe un magnete permanente, oppure genererebbe un campo magnetico attraverso i superconduttori di cui è a sua volta dotata, e quindi fluttuerebbe in modo tale che per spostarla sarebbe sufficiente un getto d'aria compressa. Una volta in movimento, l'auto avanzerebbe all'infinito su qualunque percorso piano. L'unica resistenza sarebbe quella dell'attrito con l'aria, quindi per superarlo l'auto dovrebbe avere anche un motore elettrico o un dispositivo di spinta ad aria compressa.

Anche se non disponiamo ancora di superconduttori a temperatura ambiente, alcuni paesi si sono già dotati dei cosiddetti *maglev trains* (*magnetic levitation trains*), ovvero i treni a levitazione magnetica, che librano su binari contenenti magneti. Poiché qualsiasi magnete ha un polo nord che respinge il polo nord di un altro magnete, quelli di treni e binari sono disposti in modo che tale repulsione consenta ai convogli di viaggiare sospesi.



Un giorno i superconduttori a temperatura ambiente potrebbero regalarci auto e treni volanti. Questi nuovi mezzi di trasporto fluttuerebbero su binari o lastricati superconduttori senza incontrare attrito. (Illustrazione Jeffrey L. Ward)

Germania, Giappone e Cina sono i leader di questa tecnologia. I treni maglev hanno persino stabilito alcuni record mondiali. Il primo di questi convogli commerciali è stato infatti il treno-navetta a velocità ridotta messo in funzione nel 1984 per collegare l'aeroporto e la stazione internazionali di Birmingham, in Inghilterra. La più alta velocità di un convoglio terrestre maglev è stata registrata in Giappone nel 2003 dal treno MLX01, che ha toccato i 581 chilometri orari. (I jet possono andare ancora più veloci, anche perché ai livelli superiori dell'atmosfera l'aria oppone meno resistenza. Poiché i treni maglev fluttuano nell'aria, la maggior parte dell'energia consumata serve a vincere l'attrito con l'aria. Peraltro, se un treno maglev potesse viaggiare in assenza d'aria, supererebbe i 6400 chilometri orari). Sfortunatamente, gli aspetti economici della levitazione magnetica ne hanno impedito la proliferazione a livello mondiale. Ma l'avvento dei superconduttori a temperatura ambiente potrebbe cambiare le cose. Potrebbe anche dare nuovo impulso al sistema ferroviario statunitense, riducendo così le emissioni di gas serra dovute agli aeroplani. Si stima infatti che il 2 per cento dei gas a effetto serra provenga dai gas di scarico degli aerei, quindi sostituirci una parte con i treni maglev ridurrebbe le emissioni inquinanti.

Energia dal cielo

Entro la fine del secolo avremo forse a disposizione un'altra fonte di energia: lo spazio. Il progetto per ricavare tale energia si chiama SSP (Space Solar Power) e prevede il lancio di centinaia di satelliti in orbita intorno alla Terra, i quali assorbiranno le radiazioni solari e invieranno l'energia così accumulata sulla Terra sotto forma di microonde. I satelliti si posizionerebbero a un'altezza di circa 35.000 chilometri dalla superficie terrestre, e sarebbero satelliti geostazionari, cioè perfettamente sincronizzati con la rotazione del nostro pianeta. Poiché l'energia solare presente nello spazio è otto volte superiore a quella che raggiunge la superficie terrestre, i vantaggi di tale progetto sono più che concreti.

Attualmente il principale ostacolo all'avvio dell'SSP è rappresentato dai costi, soprattutto quelli relativi al lancio dei collettori spaziali. Le leggi della fisica non ci impediscono di raccogliere energia solare direttamente nello spazio, ma i problemi ingegneristici ed economici sono enormi. Tuttavia, come vedremo nel prossimo capitolo, entro la fine del secolo potremmo disporre di nuovi strumenti, tali da ridurre i costi dei viaggi spaziali e rendere fattibile il progetto.

Il primo ad avanzare seriamente l'idea dell'SSP fu Peter Glaser. Nel 1968, quando era presidente dell'International Solar Energy Society, Glaser propose di inviare nello spazio satelliti grandi come una città moderna e progettati per raccogliere energia solare dallo spazio e inviarla sulla Terra. Nel 1979 gli scienziati della NASA valutarono i particolari di quella ipotesi, e stimarono che i costi sarebbero ammontati a diverse centinaia di miliardi di dollari, quindi non se ne fece nulla.

Tuttavia, considerati i costanti miglioramenti della tecnologia spaziale, dal 1995 al 2003 la NASA ha continuato a finanziare ricerche sull'SSP, sebbene su scala ridotta. I sostenitori di questo progetto dicono che ormai è solo questione di tempo, che presto la tecnologia e i costi economici permetteranno di trasformare questo sogno in realtà. «L'SSP è una soluzione realmente sostenibile, di portata globale e del tutto non inquinante»²⁸ ha dichiarato Martin Hoffert, ex fisico dell'Università di New York.

Un progetto talmente ambizioso (reale o immaginario che sia) incontra problematiche estremamente complesse. Per esempio, c'è chi teme che l'energia inviata sulla Terra possa accidentalmente colpire zone abitate, causando perdite immani. Ma si tratta di un timore esagerato. Calcolando la quantità di radiazioni che colpiscono la Terra dallo spazio, ci rendiamo conto che sono troppo deboli per rappresentare un pericolo per la salute pubblica. Quindi l'idea di un satellite fuori controllo capace di distruggere intere città con i suoi raggi "mortal" appartiene più all'immaginario hollywoodiano che alla realtà concreta.

Nel 2008 lo scrittore di fantascienza Ben Bova si è pronunciato al riguardo sul "Washington Post", mettendo in luce le sconcertanti prospettive economiche di un satellite-collettore solare²⁹. Bova ha stimato che ogni satellite genererebbe dai 5 ai 10 gigawatt, molto più di una centrale a carbone convenzionale, e che il costo per kilowattora sarebbe dagli 8 ai 10 centesimi di dollaro, quindi da questo punto di vista il progetto sarebbe competitivo. Ma poiché i satelliti sarebbero enormi, con un diametro di oltre un chilometro e mezzo, costerebbero circa 1 miliardo di dollari ciascuno, all'incirca quanto una centrale nucleare.

Per facilitare l'avvio di questo ambizioso progetto, Bova ha chiesto all'attuale governo di

lanciare un satellite dimostrativo in grado di produrre dai 10 ai 100 megawatt. Se si cominciasse a progettare subito il satellite, potrebbe ipoteticamente essere lanciato entro la fine dell'eventuale secondo mandato del presidente Obama.

Sulla scia di tali valutazioni, il governo giapponese ha annunciato un'iniziativa di primaria importanza. Nel 2009 il ministro del commercio ha infatti avviato uno studio per valutare la fattibilità di un SSP tutto giapponese. La Mitsubishi Electric e altre aziende nipponiche si unirebbero per contribuire ai costi (circa 10 miliardi di dollari) della realizzazione e del lancio di un gigantesco collettore spaziale di energia solare, capace di generare 1 miliardo di watt. Sarebbe grande quasi 4 chilometri quadrati, e interamente ricoperto di celle solari.

«Sembrerà un cartone animato o pura fantascienza, ma la produzione di energia solare nello spazio potrebbe rappresentare una fonte alternativa importante per il secolo a venire, soprattutto in vista del prossimo esaurimento dei combustibili fossili»³⁰ ha spiegato Kensuke Kanekiyo, dell'Institute of Energy Economics, ente di ricerca governativo. Vista l'ampiezza di questo progetto, il governo giapponese si è finora mantenuto cauto. Nei prossimi quattro anni un'équipe di ricercatori ne studierà la fattibilità dal punto di vista sia economico sia scientifico. Una volta ottenuto il nulla osta di questo comitato, nel 2015 il Ministero del commercio e l'Agenzia di Esplorazione Aerospaziale giapponesi prevedono di lanciare un piccolo satellite per sperimentare il trasferimento dei fasci energetici dallo spazio.

Con ogni probabilità l'ostacolo principale sarà economico, non scientifico. Hiroshi Yoshida della Excalibur KK, una società di consulenza aerospaziale di Tokyo, ha ammonito: «Le spese stimate devono essere ridotte a un centesimo di quanto finora previsto»³¹. Uno dei problemi di questi satelliti è che dovranno orbitare a circa 35.000 chilometri dalla superficie terrestre, ovvero molto oltre la normale distanza orbitale dei satelliti convenzionali, che è di 500 chilometri. E questo comporta un'esorbitante perdita d'energia nella trasmissione.

Il problema principale è però il costo dei razzi vettori. È lo stesso collo di bottiglia che ha frenato altri progetti spaziali, come il ritorno sulla Luna e l'esplorazione di Marte. Se i costi dei razzi vettori non scenderanno significativamente, anche questi progetti di energia solare moriranno silenziosamente. Mantenendo tuttavia un certo ottimismo, i giapponesi pensano che il loro piano possa diventare operativo entro la metà del secolo. Ma visti i problemi tuttora irrisolti con i razzi vettori, è più verosimile che si debba attendere la fine del secolo, allorché una nuova generazione di razzi ridurrà drasticamente i costi. E se l'ostacolo principale ai satelliti solari sono proprio i costi, la domanda che dobbiamo assolutamente porci è se sia possibile ridurre quelli dei viaggi spaziali, in modo da poter seriamente pensare di raggiungere le stelle più vicine.

Capitolo 6

Il futuro dei viaggi spaziali

Verso le stelle

Abbiamo indugiato abbastanza sulle spiagge dell'oceano cosmico. Siamo finalmente pronti a salpare verso le stelle. Carl Sagan

Gli dèi della mitologia solcavano i campi celesti del Monte Olimpo su possenti bighe. Le potenti navi vichinghe solcavano i mari del cosmo per condurre gli dèi della mitologia norrena ad Asgard. In maniera simile, entro il 2100 l'umanità approderà alle soglie di una nuova era dell'esplorazione spaziale e conquisterà le stelle. Le stelle che, così allettanti e apparentemente vicine di notte eppure così lontane, saranno il punto focale della ricerca sui viaggi spaziali nel prossimo secolo.

Ma la strada verso la costruzione di astronavi spaziali sarà irta di difficoltà. L'umanità è come un uomo che, pur allungando le braccia per raggiungere le stelle, ha i piedi impantanati nel fango. Da un lato questo secolo inaugurerà una nuova era per le missioni spaziali robotizzate: stiamo già inviando satelliti in avanscoperta alla ricerca di pianeti simili alla Terra, esploriamo le lune di Giove e possiamo addirittura fotografare i residui della luce primordiale del Big Bang. D'altro lato l'esplorazione umana dello spazio profondo, che ha affascinato generazioni di sognatori e visionari, sarà motivo di alcune delusioni.

FUTURO PROSSIMO (DA OGGI AL 2030)

I pianeti extrasolari

Una delle conquiste più strabilianti del programma spaziale è stata l'esplorazione robotizzata dello spazio, che ha permesso di espandere enormemente l'orizzonte dell'umanità.

Il fine ultimo di queste missioni, il sacro calice della scienza spaziale, è la ricerca di pianeti extrasolari simili alla Terra in grado di ospitare la vita. I telescopi al suolo hanno finora identificato circa cinquecento pianeti orbitanti in sistemi stellari lontani, e ogni una o due settimane viene tuttora scoperto un nuovo pianeta. Ma i nostri strumenti riescono a identificare solo pianeti giganti come Giove, che non sono in grado di ospitare la vita così come la conosciamo.

Il metodo usato dagli astronomi per individuare i pianeti extrasolari consiste nel cercare piccole oscillazioni nel moto delle stelle. Questi sistemi solari alieni possono essere paragonati a dei manubri le cui sfere alle due estremità ruotino l'una intorno all'altra sullo stesso asse centrale. Una delle due estremità del manubrio rappresenta la stella, chiaramente visibile al telescopio, mentre l'altra rappresenta un pianeta simile a Giove, quindi circa un miliardo di volte meno luminoso. Il moto rotatorio della stella e del pianeta attorno al centro del manubrio genera quindi delle piccole oscillazioni della stella, che possono essere osservate al telescopio. Questo metodo ha permesso di identificare con successo circa un centinaio di enormi pianeti gassosi esterni al sistema solare, ma è troppo rozzo per individuare pianeti piccoli e rocciosi simili alla Terra.

Il pianeta più piccolo scoperto da questi telescopi a terra è stato individuato nel 2010, e ha una massa pari a tre-quattro volte quella terrestre. Ma la caratteristica sorprendente di questa specie di "superpianeta" è un'altra, poiché per la prima volta è stato scoperto un pianeta orbitante nella zona abitabile del suo sole, ovvero a una distanza tale da permettere l'esistenza di acqua allo stato liquido.

Il lancio del telescopio della missione Kepler nel 2009 e quello del satellite francese COROT (*convection, rotation et transits planétaires*, convezione, rotazione stellare e transiti planetari) nel 2006 hanno cambiato notevolmente lo stato delle cose. Queste sonde spaziali sono in grado di rilevare leggerissime fluttuazioni nella luminosità delle stelle provocate da piccoli pianeti che, orbitandovi di fronte, ne eclissano di un niente la luce emessa. Attraverso l'analisi sistematica dei dati sulla luminosità di migliaia di stelle, queste sonde saranno in grado di individuare forse qualche centinaio di pianeti simili alla Terra. Una volta identificati, questi potranno essere analizzati per verificare se contengono acqua allo stato liquido, che è la "merce" più preziosa nello spazio, un solvente universale, la componente principale del brodo primordiale in cui probabilmente hanno iniziato a svilupparsi le prime forme di DNA.

La scoperta di oceani di acqua liquida sulla superficie di questi pianeti potrebbe cambiare la percezione della vita nell'universo. Come i giornalisti che inseguono scandali finanziari adottando il principio "segui il denaro", gli astronomi cercano la vita nello spazio basandosi sul dogma "segui l'acqua".

Kepler verrà a sua volta sostituito da satelliti ancora più evoluti, come il Terrestrial Planet Finder. Nonostante la sua data di lancio sia stata posticipata più volte, grazie all'utilizzo di

sistemi ottici più avanzati il Terrestrial Planet Finder è il candidato principale al posto di Keplero nella ricerca di pianeti gemelli della Terra. Anzitutto è progettato per avere uno specchio quattro volte più grande e cento volte più sensibile di quello del telescopio spaziale Hubble. Inoltre, avrà dei sensori a infrarossi in grado di ridurre il bagliore della stella di un milione di volte, permettendo quindi di rilevare la presenza di un pianeta molto meno luminoso che vi orbiti intorno.

La tecnica utilizzata per fare questo consiste nel prendere due fasci di luce infrarossa indipendenti e combinarli in modo che si annullino a vicenda, eliminando così la stella dall'immagine catturata dal sensore.

Nel prossimo futuro l'obiettivo è dunque quello di avere un'enciclopedia con i dati di migliaia di pianeti, qualche centinaio dei quali forse simili alla Terra per forma e composizione. Questo produrrà a sua volta un interesse sempre maggiore per l'invio di sonde verso questi pianeti lontani. Verrà così compiuto uno sforzo intenso per scoprire se su questi pianeti gemelli della Terra c'è acqua allo stato liquido, o se emettono onde radio provenienti da forme di vita intelligenti.

Europa: al di fuori della cintura verde

All'interno del sistema solare c'è un altro obiettivo allettante per le sonde spaziali: Europa. Per decenni abbiamo pensato che la vita all'interno del sistema solare potesse esistere solo nella cosiddetta *cintura verde*, ovvero in quella zona attorno al Sole in cui la temperatura superficiale dei pianeti non è né troppo alta né troppo bassa per ospitare la vita. L'abbondanza di acqua allo stato liquido sulla Terra è dovuta proprio al fatto che il nostro pianeta orbita alla giusta distanza dal Sole: l'acqua bollirebbe su un pianeta come Mercurio, troppo vicino al Sole, e ghiaccerebbe su Giove, che è troppo lontano. Come ho detto prima, poiché l'acqua allo stato liquido è probabilmente il fluido in cui si sono formate le prime molecole di DNA e le prime proteine, si è a lungo creduto che, all'interno del sistema solare, la vita potesse esistere solo sulla Terra, o al massimo su Marte.

Ma questa ipotesi si è rivelata sbagliata. Dopo il passaggio della sonda spaziale Voyager, è risultato evidente che esiste un altro luogo in cui la vita potrebbe prosperare: sotto il manto ghiacciato che ricopre le lune di Giove. Europa, uno dei satelliti di Giove scoperti da Galileo nel 1660, ha presto catturato l'attenzione degli astronomi. Nonostante la sua superficie sia completamente ricoperta di ghiaccio, sotto questo strato ghiacciato c'è un oceano liquido. Dal momento che la profondità dell'acqua è maggiore su Europa che sulla Terra, è stato calcolato che il volume dell'oceano di Europa sia il doppio del volume totale degli oceani terrestri.

Scoprire l'esistenza di un'abbondante sorgente d'energia all'interno del sistema solare che non fosse il Sole è stato piuttosto sconcertante. Sotto il ghiaccio la superficie di Europa viene continuamente scaldata da forze mareali. Mentre Europa orbita attorno a Giove, il campo gravitazionale del pianeta "strizza" il satellite spingendolo in diverse direzioni, e creando frizioni fin nelle profondità del suo nucleo. Queste frizioni generano calore, che a sua volta scioglie parte del ghiaccio e crea un oceano d'acqua che rimane stabilmente allo stato liquido.

Questa scoperta ci suggerisce che forse le lune dei lontani giganti gassosi sono più interessanti dei pianeti stessi. (Potrebbe essere questo il motivo che ha spinto il regista James Cameron a scegliere un satellite di un pianeta simile a Giove come ambientazione del suo recente *Avatar*.) La vita, una volta ritenuta rara, di fatto potrebbe abbondare nell'oscurità spaziale sulle lune dei giganti gassosi: il numero di luoghi in cui la vita potrebbe prosperare si è dunque moltiplicato all'improvviso.

Come conseguenza di queste scoperte, l'Europa Jupiter System Mission (EJSM) dovrebbe essere lanciata nel 2020. Il progetto prevede che la sonda orbiti attorno a Europa, e possibilmente che atterri sulla sua superficie. Tuttavia, gli scienziati sognano di esplorare Europa attraverso l'invio di sonde ancora più sofisticate. Hanno infatti studiato molteplici tecniche per cercare la vita sotto quella coltre di ghiaccio. Una possibilità è l'Europa Ice Clipper Mission¹, che dovrebbe scagliare delle sfere sulla superficie ghiacciata del pianeta satellite, alle quali dovrebbe seguire una navicella spaziale che attraversi e analizzi la nube di detriti sollevata dall'impatto. Un altro programma, ancora più ambizioso, prevede di mandare un robot sottomarino telecomandato sotto lo strato di ghiaccio.

L'interesse per Europa è stato ulteriormente alimentato da scoperte effettuate nelle profondità degli oceani terrestri. Fino agli anni Settanta la maggior parte degli scienziati era convinta che il Sole fosse l'unica sorgente d'energia in grado di permettere lo sviluppo di forme viventi.

Tuttavia, nel 1977 il sottomarino Alvin trovò le prove dell'esistenza di nuove forme di vita in luoghi considerati fino a quel momento inabitabili. Mentre scandagliava la faglia delle Galápagos, Alvin notò la presenza abbondante di vermi tubo giganti, cozze, molluschi, crostacei e altri esseri che usavano il calore e l'energia termica provenienti dai condotti dei vulcani per sopravvivere. Dove c'è energia ci può essere vita, e questi vulcani sottomarini rappresentano una fonte di energia notevole nelle oscurità dei fondali marini. Alcuni scienziati hanno infatti suggerito che le prime molecole di DNA non si siano formate nelle pozze formate dalla marea sulle coste della Terra, bensì nelle profondità oceaniche, vicino a qualche condotto vulcanico, dove sono state scoperte alcune tra le più primitive forme di DNA, forse le più antiche. Se così fosse, allora anche i condotti vulcanici su Europa potrebbero fornire energia sufficiente a innescare processi analoghi e portare alla formazione di molecole simili al DNA.

Ad ogni modo, oggi possiamo soltanto congetturare su quali forme di vita si potrebbero trovare sotto la superficie di Europa. Ammesso che esistano, saranno probabilmente creature marine che per spostarsi usano il sonar anziché la luce, e la vita sotto un "cielo" di ghiaccio limiterà parecchio la loro visione dell'universo.

LISA: prima del Big Bang

Il Laser Interferometer Space Antenna (LISA) e i suoi successori sono un altro gruppo di satelliti spaziali che potrebbe creare scompiglio nella comunità scientifica. Tali sonde potrebbero infatti essere in grado di rivelare l'impossibile: che cosa accadde prima del Big Bang.

Al momento siamo in grado di misurare la velocità con cui le galassie si allontanano da noi grazie all'effetto Doppler, un fenomeno per cui la luce di una sorgente è distorta se questa si allontana o si avvicina all'osservatore. Grazie a questo dato conosciamo la velocità di espansione dell'universo e possiamo quindi pensare di "riavvolgere il nastro dell'universo" e calcolare quando ha avuto luogo l'esplosione che l'ha generato. In pratica, è come analizzare i residui e i detriti di un'esplosione per capire quando è avvenuta. In questo modo si è stabilito che il Big Bang risale a 13,7 miliardi di anni fa. Purtroppo il satellite spaziale WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), attualmente in orbita con lo scopo di misurare il residuo della radiazione emessa durante il Big Bang, può "osservare" ciò che è avvenuto solo fino a circa quattrocentomila anni dopo l'esplosione originaria. In sostanza, i nostri satelliti possono dirci che ci fu un'esplosione, ma non fornirci informazioni sulle sue cause scatenanti o su che cosa sia esploso.

Per questo motivo LISA ha suscitato grande eccitazione nel mondo scientifico. Questa sonda è stata infatti creata per misurare un tipo di radiazione completamente diverso: le onde gravitazionali emesse durante il Big Bang.

Ogni volta che gli scienziati sono riusciti a imbrigliare un nuovo tipo di radiazione, la nostra visione del mondo è cambiata. L'astronomia moderna è nata con Galileo, che ha usato i telescopi ottici per disegnare mappe del cielo. Poco dopo la fine della Seconda guerra mondiale il perfezionamento dei radiotelescopi ha portato alla scoperta di un universo di supernove e buchi neri. Oggi la terza generazione di telescopi, nata per rivelare la radiazione gravitazionale, può condurre a una visione dell'universo ancora più strabiliante, un mondo fatto di collisioni di buchi neri, extradimensioni e concetti come il multiverso.

LISA, il cui lancio è previsto tra il 2018 e il 2020, consiste di tre satelliti che, una volta nello spazio, verranno connessi da tre raggi laser, formando così un gigantesco triangolo largo quasi 5 milioni di chilometri. Sarà il più grande strumento spaziale mai mandato in orbita. Le onde gravitazionali che si sono generate durante il Big Bang e che si stanno ancora propagando nell'universo investiranno i satelliti e li faranno vibrare leggermente. Questo genererà una perturbazione nei raggi laser, e appositi sensori ne registreranno la frequenza e altre proprietà. In questo modo gli scienziati saranno in grado di risalire fino a un bilionesimo di secondo dopo il Big Bang. (Secondo la teoria di Einstein, lo spaziotempo è paragonabile a un tessuto che possiamo allungare e piegare. Quando un evento astronomico di grandi dimensioni ha luogo, come per esempio una collisione di buchi neri o lo stesso Big Bang, si formano delle increspature – le onde gravitazionali – che possono viaggiare lungo questo tessuto, ma che sono troppo piccole per poter essere osservate con gli strumenti tradizionali. Le dimensioni e la sensibilità di LISA sono invece adatte a rilevare le vibrazioni causate da questa radiazione.)

LISA non sarà solo in grado di registrare la radiazione gravitazionale che si genera durante le collisioni di buchi neri, ma potrà anche scrutare l'epoca precedente al Big Bang, cosa che un tempo era considerata impossibile.

Oggi molte teorie sui possibili scenari precedenti al Big Bang provengono dalla teoria delle stringhe, ovvero dall'area di ricerca in cui sono specializzato. In uno di questi scenari il nostro universo è rappresentato come un'enorme bolla in continua espansione. Noi viviamo sulla superficie di questa bolla, incollati lì come una mosca sulla carta moschicida. La nostra bolla-universo è però immersa in un oceano di altre bolle-universo, che formano il cosiddetto *multiverso di universi*, praticamente una schiuma di bolle. Talvolta queste bolle possono collidere, dando origine alla cosiddetta *teoria del Big Splat*, oppure possono andare incontro a fenomeni di fissione e scindersi in bolle più piccole che si espandono a loro volta, dando origine al cosiddetto *fenomeno di eterna inflazione*.

Ciascuno di questi modelli anteriori al Big Bang predice come l'universo dovette emettere radiazione gravitazionale negli attimi successivi all'esplosione iniziale. LISA può quindi misurare le onde gravitazionali emesse subito dopo il Big Bang e confrontarle con le diverse previsioni derivanti dalla teoria delle stringhe. In questo modo potrebbe infine essere in grado di escludere alcuni di questi modelli.

Ma anche se LISA non fosse abbastanza sensibile per questo scopo, i rivelatori gravitazionali di prossima generazione, per esempio il Big Bang Observer, potrebbero essere all'altezza del compito.

In caso di successo, queste sonde spaziali potrebbero dare una risposta alla domanda che per secoli ha eluso ogni spiegazione: da dove nasce l'universo? Se riuscissimo a svelare l'origine del Big Bang, questa domanda potrebbe finalmente avere una risposta.

Missioni spaziali con equipaggio

Mentre le missioni robotizzate continueranno ad aprire nuovi orizzonti nell'esplorazione dello spazio, quelle con equipaggio umano incontreranno numerosi ostacoli. Le missioni robotizzate sono in generale più versatili ed economiche, possono esplorare zone a rischio per l'uomo e non richiedono la presenza di costosi sistemi di supporto vitale. E soprattutto, non devono tornare sulla Terra.

Nel 1969 sembrava che i nostri astronauti fossero pronti a lanciarsi nell'esplorazione del sistema solare. Neil Armstrong e Buzz Aldrin avevano da poco camminato sulla Luna, e le persone già sognavano il giorno in cui saremmo atterrati su Marte, o addirittura oltre. Sembrava che fossimo a un passo dalla conquista delle stelle, e che stesse sorgendo una nuova epoca per l'umanità.

Poi quel sogno svanì.

Come ha scritto Isaac Asimov, prima abbiamo segnato una meta, poi abbiamo preso la palla e siamo tornati a casa. Oggi i vecchi razzi Saturn stanno prendendo polvere nei musei, o stanno cadendo a pezzi in qualche discarica. Abbiamo sprecato un'intera generazione di valenti ingegneri missilistici. La spinta verso la conquista dello spazio si è dissolta lentamente, e oggi la famosa passeggiata sulla Luna viene ricordata solo nei libri di storia.

Ma che cosa è successo? Molte cose. Anzitutto la guerra in Vietnam, poi lo scandalo Watergate e altro ancora. Ad ogni modo, dopo che tutto è tornato alla normalità rimane una sola parola: *costi*.

A volte dimentichiamo che i viaggi nello spazio costano, e costano davvero tanto: per esempio, con 10.000 dollari possiamo mandare in orbita attorno alla Terra appena mezzo chilo di qualcosa. Immaginiamo John Glenn fatto d'oro zecchino e avremo un'idea del costo di un viaggio spaziale². Raggiungere la Luna richiederebbe circa 200.000 dollari al chilo, mentre per arrivare su Marte dovremmo spendere 2 milioni di dollari al chilo (più o meno l'equivalente del nostro peso corporeo in diamanti).

Tuttavia negli anni Sessanta i costi esorbitanti dei viaggi spaziali erano in qualche modo compensati dall'eccitazione dovuta alla competizione con i Russi. Le imprese spettacolari degli astronauti distoglievano l'attenzione dai reali costi delle operazioni, e le nazioni erano pronte a pagare profumatamente quando si trattava del loro onore. Ma nemmeno le superpotenze mondiali sono state in grado di continuare a sostenere tali spese per decenni.

Sono trascorsi più di trecento anni da quando sir Isaac Newton formulò le leggi del moto, e purtroppo siamo ancora impantanati su semplici calcoli matematici. Per andare in orbita attorno alla Terra, un oggetto deve essere lanciato con una velocità iniziale di circa 30.000 chilometri all'ora. Se invece vogliamo che superi il campo gravitazionale terrestre e raggiunga lo spazio profondo, dobbiamo lanciarlo a circa 40.000 chilometri orari. (Per raggiungere questa velocità, dobbiamo sfruttare la terza legge del moto di Newton: ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria. In pratica, questo significa che un razzo avanza velocemente perché emette gas rovente nella direzione opposta, come un palloncino che, dopo essere stato gonfiato e poi lasciato andare, inizia a svolazzare per tutta la stanza.)

Partendo dalla legge di Newton possiamo quindi calcolare il costo di un viaggio spaziale in maniera abbastanza semplice. Non esistono leggi della fisica o dell'ingegneria che ci

impediscono di esplorare il sistema solare, è puramente una questione di costi.

Ma non finisce qui. Il razzo deve anche trasportare il carburante necessario a farlo muovere, e questo aggiunge peso ad altro peso. Gli aeroplani riescono a rimediare parzialmente a questo problema perché possono aspirare dall'atmosfera l'ossigeno e bruciarlo nei motori. Ma poiché nello spazio non c'è aria, i razzi devono trasportare serbatoi sia d'ossigeno sia d'idrogeno.

Queste considerazioni non riguardano solo i viaggi spaziali, ma sono anche il motivo per cui non abbiamo macchine volanti o *jetpack*, gli zainetti a reazione. Gli scrittori di fantascienza (che, ricordiamolo, non sono scienziati) hanno descritto in maniera affascinante il giorno in cui tutti potremo indossare uno zainetto a razzi e volare al lavoro, o in cui potremo decollare con la nostra famiglia e fare una gita fuori porta durante il weekend. Le previsioni di questi "futurologi" non si sono mai avverate, e molte persone sono rimaste deluse (per questo proliferano libri e articoli con titoli come *Dov'è il mio jetpack?*).

Ma facendo semplicemente due conti possiamo spiegarne il perché. Gli zainetti a reazione esistono: i nazisti li hanno usati per un breve periodo durante la Seconda guerra mondiale, ma il perossido d'idrogeno che di solito questi apparecchi usano come carburante si esaurisce molto in fretta, tanto che un volo può durare al massimo pochi minuti. D'altro canto, un'automobile volante che usasse pale di elicottero per stare in aria consumerebbe una quantità di carburante enorme, rendendola decisamente troppo costosa per il pendolare medio.

La cancellazione del programma lunare

Dato l'enorme costo dei viaggi spaziali, il futuro dell'esplorazione umana dello spazio è in continua oscillazione. Durante il suo mandato il presidente George W. Bush aveva presentato un piano per il programma spaziale ben dettagliato, ma anche piuttosto ambizioso. Anzitutto, lo Space Transportation System (STS), meglio noto come Space Shuttle, sarebbe dovuto andare in pensione nel 2010 ed essere sostituito nel 2015 da un nuovo sistema di volo spaziale, nato dal programma Constellation della NASA. Inoltre, gli astronauti sarebbero dovuti tornare sulla Luna entro il 2020 per installarvi una base con equipaggio permanente. Questo avrebbe quindi aperto la strada a una futura missione su Marte.

Tuttavia, l'economia dei viaggi spaziali è cambiata notevolmente da allora, soprattutto a causa del periodo di forte recessione, che ha prosciugato i fondi destinati alle missioni. Il rapporto della commissione Augustine³, consegnato al presidente Barack Obama nel 2009, ha stabilito che il bilancio corrente rendeva i programmi precedenti economicamente insostenibili. Nel 2010 il presidente Obama ha avallato il rapporto della commissione Augustine, cancellando sia lo Space Shuttle sia il suo sostituto, che avrebbe gettato le basi per un ritorno sulla Luna. A differenza di quanto accadeva in passato, le navicelle adibite al trasporto degli astronauti nello spazio non verranno più costruite dalla NASA, che senza i mezzi necessari sarà costretta, nel breve periodo, a fare affidamento sulla Russia. Ragionando più a lungo termine, questa situazione dà l'opportunità alle aziende private di entrare in gioco con nuovi progetti a sostegno dell'esplorazione spaziale con equipaggio umano. In altre parole, si sta aprendo una nuova strada che, secondo i suoi sostenitori, inaugurerà una nuova era dei viaggi spaziali, ma che secondo i suoi detrattori farà della NASA un'“agenzia del nulla”.

Atterrare su un asteroide

Il rapporto della commissione Augustine ha introdotto il cosiddetto *metodo flessibile*, caratterizzato da una successione di obiettivi modesti che non richiedono grandi quantità di carburante. Per esempio, atterrare su un asteroide che ci sta passando vicino e che in seguito orbiterà dalle parti delle lune di Marte: tale asteroide potrebbe addirittura essere ancora fuori dalle nostre mappe del cielo, un oggetto vagante che scopriremo nel prossimo futuro.

Secondo la commissione Augustine, il problema principale è il costo del carburante: esorbitante per missioni che prevedono un atterraggio sulla Luna e ritorno, proibitivo se parliamo di Marte. Al contrario, l'intensità del campo gravitazionale sugli asteroidi e sui satelliti di Marte è piuttosto bassa, quindi il tipo di missioni descritte nel rapporto Augustine non richiederebbe grosse quantità di carburante. Nel rapporto viene anche menzionata la possibilità di sfruttare i punti di Lagrange, ovvero quei punti nello spazio in cui le forze dovute al campo gravitazionale terrestre e della Luna si bilanciano, annullandosi a vicenda.

Si suppone che questi punti costituiscano una sorta di discarica cosmica, in cui si sono raccolti antichi pezzi di rocce formati quando il sistema solare era ancora giovane: visitandoli, gli astronauti potrebbero trovare rocce interessanti, risalenti ai tempi della formazione del sistema Terra-Luna.

Atterrare su un asteroide sarebbe senza dubbio una missione a basso costo, poiché il campo gravitazionale degli asteroidi è molto debole. (Questo è anche il motivo per cui gli asteroidi non hanno una forma tondeggiante, ma sono piuttosto irregolari; i grandi corpi celesti come le stelle, i pianeti e i satelliti sono rotondi perché vengono compattati in maniera uniforme dal loro stesso campo gravitazionale: la forza di gravità comprime la crosta, "levigando" gradualmente ogni irregolarità; il campo gravitazionale di un asteroide è invece così debole da non riuscire a fargli assumere una forma sferica.)

Un possibile candidato è Apòfi, un asteroide largo circa 300 metri che nel 2029 passerà così vicino alla Terra da sfiorare alcuni nostri satelliti. In base a come la sua orbita verrà modificata da questo primo passaggio, Apòfi potrebbe tornare dalle parti della Terra nel 2036, con una probabilità di colpire il nostro pianeta di uno su centomila. Una probabilità bassissima, ma se si verificasse l'urto avrebbe un'intensità equivalente a centomila bombe di Hiroshima, cioè sufficiente a distruggere una regione grande come la Francia con tempeste infuocate, onde d'urto e detriti. (Per fare un paragone, nel 1908 un oggetto molto più piccolo, grande forse come un condominio, si schiantò a Tugunskaja, in Siberia, con la forza di mille bombe di Hiroshima.

L'impatto spazzò via 1000 metri quadrati di foresta, generando un'onda d'urto che si propagò per migliaia di chilometri generando uno strano bagliore osservabile in Asia e in Europa, tanto che gli abitanti di Londra poterono leggere il giornale di notte.)

Apòfi si sta dirigendo verso la Terra, quindi visitarlo non dovrebbe dilapidare il budget della NASA, sebbene atterrare sulla sua superficie potrebbe non essere così semplice: il suo debole campo gravitazionale potrebbe impedire un atterraggio vero e proprio, e l'unica soluzione sarebbe quindi attraccare l'astronave all'asteroide. Inoltre, è probabile che l'asteroide ruoti in maniera irregolare, tale che prima di atterrare sarebbe necessario fare calcoli molto accurati. Sarebbe anche interessante verificare la solidità di Apòfi: alcuni pensano che un asteroide sia un insieme di rocce tenute insieme in maniera sommaria da un campo gravitazionale debole,

mentre altri pensano che sia un oggetto compatto. Determinarne la consistenza potrebbe dunque rivelarsi utile, se un giorno dovessimo farne esplodere uno con una carica nucleare. Se anziché venire polverizzato un asteroide dovesse spezzarsi grossolanamente, i pezzi che si formerebbero potrebbero essere addirittura più pericolosi dell'oggetto originario. In questo caso una soluzione alternativa sarebbe spingere il corpo celeste fuori rotta ancora prima che si avvicini alla Terra.

Atterrare su una luna di Marte

Nonostante il rapporto Augustine non abbia dato il proprio sostegno a missioni umane su Marte, potremmo tuttavia pensare di mandare gli astronauti su una delle lune del pianeta rosso, Fobos o Deimos. Questi due oggetti sono molto più piccoli della Luna, quindi l'intensità del loro campo gravitazionale è molto bassa. Oltre a permetterci di risparmiare sui costi, atterrare su un satellite di Marte comporterebbe diversi vantaggi:

1. Fobos e Deimos potrebbero essere usate come basi per stazioni spaziali, dandoci così l'opportunità di studiare il pianeta rosso dallo spazio senza doverlo visitare direttamente.
2. Potrebbero garantirci una via diretta per accedere a Marte. Fobos dista meno di 10.000 chilometri dal centro del pianeta, quindi potremmo arrivare sulla sua superficie con appena qualche ora di viaggio.
3. Probabilmente su questi satelliti ci sono delle caverne, che potrebbero essere usate per costruire una stazione permanente dove l'equipaggio verrebbe protetto dalla radiazione e dai meteoriti. Il gigantesco cratere Stickney suggerisce l'eventualità che Fobos sia stato colpito da un meteorite gigante che l'ha quasi spazzato via. Tuttavia, la forza di gravità ha lentamente ricompattato i pezzi e riassembleato il satellite, ed è probabile che ci siano numerose caverne e gole, memoria della vecchia collisione.

Tornare sulla Luna

Il rapporto Augustine conteneva anche una proposta per un “primo programma lunare” che, se avessimo trovato i trenta miliardi di dollari necessari in un decennio, ci avrebbe dovuto riportare sulla Luna. Ma poiché è improbabile che riusciremo a mettere insieme tale cifra, il programma lunare è cancellato a tutti gli effetti, almeno per i prossimi anni.

I progetti per la nuova missione lunare, raggruppati sotto il nome di programma Constellation, riguardavano lo sviluppo di mezzi composti da diverse parti. Anzitutto i razzi vettore, gli Ares, il primo modello di razzi costruito dagli Stati Uniti dagli anni Settanta, quando il vecchio modello Saturn fu messo in disuso. Ares avrebbe dovuto lanciare il modulo Orion che, posizionato esattamente in cima al razzo, avrebbe potuto trasportare sei astronauti alla Stazione Spaziale Internazionale (ISS), oppure quattro direttamente sulla Luna. Infine c'era il modulo di atterraggio Altair, che sarebbe dovuto atterrare sulla superficie lunare.

Il vecchio Space Shuttle, con i razzi vettori proprio a lato di quelli della navetta, presentava una serie di problemi progettuali: per esempio, i razzi tendevano a strappare pezzi di schiuma dal rivestimento esterno. Questo ebbe conseguenze disastrose per lo Space Shuttle Columbia, che nel 2003 esplose durante la fase di rientro sulla Terra, uccidendo i sette astronauti dell'equipaggio: un pezzo di schiuma si staccò dal serbatoio principale durante il decollo e colpì la navetta bucandone una delle ali. Durante il rientro i gas roventi penetrarono nello scafo del Columbia, uccidendo chi era al suo interno e facendo esplodere la navicella. Nel Constellation il modulo dell'equipaggio sarebbe stato posto direttamente in cima al razzo di spinta, così che un episodio del genere non avrebbe causato problemi.

Il programma Constellation è stato definito dalla stampa «programma Apollo sotto steroidi», poiché somiglia molto al programma lunare degli anni Settanta. Il razzo vettore Ares I sarebbe dovuto essere alto circa 100 metri (poco meno del razzo Saturn V, di 110 metri) e avrebbe dovuto trasportare nello spazio il modulo Orion, sostituendo così il vecchio Space Shuttle. Invece, per trasportare mezzi molto pesanti la NASA avrebbe dovuto usare il razzo Ares V, alto 116 metri e capace di portare nello spazio 207 tonnellate di carico. Ares V avrebbe dovuto essere la colonna portante di ogni missione verso la Luna o verso Marte. (Nonostante Ares sia stato cancellato dal programma, si discute ugualmente sulla possibilità di preservare alcune sue componenti per le future missioni spaziali.)

Una base lunare permanente

Nonostante abbia cancellato il programma Constellation, il presidente Obama ha lasciato aperte diverse possibilità. Il modulo Orione, che avrebbe dovuto riportare gli astronauti americani sulla Luna, potrebbe essere riutilizzato come capsula di salvataggio per la Stazione Spaziale Internazionale. In futuro, se ci sarà una notevole ripresa economica, un'altra amministrazione americana potrebbe di nuovo rivolgere la sua attenzione alla Luna, e magari pensare di costruire una base permanente. Ma la costruzione di una tale struttura incontrerà parecchi ostacoli. Anzitutto i micrometeoriti: a causa dell'assenza di atmosfera, la Luna viene continuamente colpita da frammenti di roccia provenienti dallo spazio. Osservandone la superficie, vediamo infatti che è segnata da innumerevoli collisioni, alcune vecchie miliardi di anni.

Quando ero dottorando all'Università della California di Berkeley ho potuto osservare da vicino l'entità di questo pericolo. Le rocce lunari portate sulla Terra nei primi anni Settanta stavano destando scalpore nella comunità scientifica. Fui invitato in un laboratorio che stava analizzando questi frammenti al microscopio: in linea di principio le rocce lunari non sembrano molto diverse da quelle terrestri, e quella che osservai allora appariva piuttosto ordinaria. Ma quando la misi sotto il microscopio ebbi uno shock: quella roccia era piena di minuscoli crateri, dentro ai quali se ne potevano vedere di ancora più piccoli. Crateri dentro crateri dentro crateri: qualcosa che non avevo mai visto prima. Capii immediatamente che, in assenza di atmosfera, persino la particella di polvere più piccola avrebbe potuto facilmente ucciderti, se ti avesse colpito a 65.000 chilometri all'ora, o quantomeno penetrare la tuta spaziale. (Gli scienziati hanno ben chiara l'entità del danno creato da questi micrometeoriti, poiché possono simulare questo effetto in laboratorio attraverso enormi "pistole" che sparano proiettili di metallo.)

Una possibile soluzione sarebbe costruire una base lunare sotterranea. A causa dell'intensa attività vulcanica che la Luna ha avuto in passato, è possibile che gli astronauti riescano a trovare un tubo di lava che penetra nelle profondità del sottosuolo lunare. (I tubi di lava sono stati creati da antiche colate laviche, che avanzando hanno scavato nel sottosuolo strutture simili a tunnel.) Nel 2009 gli astronomi hanno scoperto un tubo di lava grande come un grattacielo, perfetto per ospitare una base spaziale permanente sulla Luna.

Queste cavità offrirebbero agli astronauti una protezione naturale (ed economica) contro le radiazioni dovute ai raggi cosmici e alle eruzioni solari. Durante un viaggio intercontinentale tra Roma e New York siamo esposti a circa un millirem di radiazione per ogni ora di viaggio (più o meno l'equivalente di una radiografia dentale). Per gli astronauti sulla Luna, le radiazioni potrebbero essere così intense da rendere necessario vivere in basi sotterranee. Senza un'atmosfera che li protegga, una pioggia mortale di raggi cosmici e radiazioni proveniente dalle eruzioni solari esporrebbe gli astronauti al rischio d'invecchiamento prematuro o addirittura di tumori.

Anche l'assenza di peso è un problema, specialmente durante le missioni più lunghe. In passato ho visitato il centro di addestramento della NASA a Cleveland, nell'Ohio, dove gli astronauti sono sottoposti a test approfonditi. Durante una prova un astronauta è stato sospeso in una speciale imbracatura, in modo che il suo corpo fosse parallelo al terreno. Dopodiché è stato fatto correre su un tapis roulant messo in verticale, così che gli scienziati della NASA potessero simulare l'assenza di peso e verificare la resistenza del soggetto in queste condizioni. Parlando

con i medici della NASA ho imparato che l'assenza di peso può essere più dannosa di quanto s'immagini. Un dottore mi ha spiegato che, dopo decenni di studi sugli effetti dell'assenza di peso prolungata su astronauti americani e russi, gli scienziati hanno capito che il corpo va incontro a cambiamenti importanti: si manifestano degradazioni muscolari, delle ossa e del sistema cardiovascolare. Al nostro corpo ci sono voluti milioni di anni di evoluzione per adattarsi al campo gravitazionale terrestre. Se stiamo in un campo gravitazionale più debole per un periodo abbastanza lungo, tutti i nostri processi biologici vengono scombinati. Gli astronauti russi che hanno trascorso circa un anno nello spazio sono tornati sulla Terra talmente indeboliti che potevano appena camminare carponi. Anche facendo esercizio fisico ogni giorno, nello spazio i muscoli si atrofizzano, le ossa perdono calcio e il sistema cardiovascolare si indebolisce. Alcuni astronauti impiegano mesi a ristabilirsi, e in alcuni casi il danno può essere permanente. Un viaggio su Marte, che potrebbe durare un paio d'anni, potrebbe prosciugare completamente le forze degli astronauti, che una volta arrivati non sarebbero in grado di completare la loro missione. (Una soluzione a questo problema potrebbe essere quella di far ruotare l'astronave in modo da creare al suo interno una gravità artificiale, come quella che non fa cadere l'acqua di un secchio quando lo facciamo ruotare velocemente sopra la testa. Ma in questo caso il costo della missione schizzerebbe alle stelle a causa dei macchinari necessari a far ruotare la navicella: ogni chilogrammo extra aggiungerebbe 10.000 dollari al costo della missione.)

Acqua sulla Luna

La scoperta di ghiaccio antico sulla Luna⁴, forse proveniente da un vecchio urto con una cometa, ha cambiato le carte in tavola. Nel 2009 la sonda LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) e il suo razzo vettore Centaur hanno colpito la Luna vicino al suo polo sud. L'impatto è avvenuto alla velocità di 9000 chilometri all'ora, creando un pennacchio di detriti alto più di un chilometro e un cratere largo circa 18 metri. Nonostante l'urto non abbia creato l'esplosione spettacolare che era stata annunciata, deludendo il pubblico che stava seguendo l'evento alla televisione, ha tuttavia permesso di raccogliere un gran numero di dati scientifici. In quel pennacchio sono stati trovati circa 90 litri d'acqua, e nel 2010 gli scienziati hanno dato la notizia sconvolgente che ben il 5 per cento dei detriti conteneva acqua: la Luna è dunque più umida di alcune parti del deserto del Sahara.

Questa scoperta potrebbe essere importante per il futuro delle missioni lunari, poiché darebbe la possibilità ai futuri astronauti di attingere ai depositi di ghiaccio sotterranei per il propellente dei razzi (estraendo l'idrogeno dall'acqua), per respirare (estraendo l'ossigeno), per proteggersi (l'acqua assorbe le radiazioni) e per bere (purificando il ghiaccio). Inoltre permetterebbe di ridurre di centinaia di milioni di dollari il budget di qualsiasi missione lunare: gli astronauti vivrebbero dei "frutti" del sottosuolo, raccogliendo ghiaccio e minerali direttamente sulla Luna per costruire e mantenere una base permanente.

METÀ DEL SECOLO (DAL 2030 AL 2070)

Missione su Marte

Nel 2010 il presidente Obama è andato in Florida per annunciare la cancellazione del programma lunare, ma in quell'occasione ha anche esposto l'idea di una possibile missione su Marte. Obama ha approvato i finanziamenti per la costruzione di un non ancora ben specificato razzo vettore pesante che un giorno potrebbe trasportare gli astronauti oltre la Luna. Si è anche auspicato di poter vedere, probabilmente a metà della decade 2030-2040, il giorno in cui gli astronauti americani cammineranno su Marte. Alcuni astronauti, tra cui Buzz Aldrin, hanno sostenuto con entusiasmo il progetto di Obama, proprio perché non è incentrato sul ritorno sulla Luna. Una volta Aldrin mi ha detto che in fondo gli Stati Uniti sono già stati sulla Luna, e che adesso la vera avventura è raggiungere Marte.

Di tutti i pianeti del sistema solare, solo Marte sembra essere così simile alla Terra da poter ospitare qualche forma di vita. Mercurio, bruciato dal Sole, ha un ambiente troppo ostile per la vita così come la conosciamo, e i giganti gassosi come Giove, Saturno, Urano e Nettuno sono troppo freddi. Venere è un gemello della Terra, ma un effetto serra fuori controllo l'ha trasformato in un abisso infernale: le temperature arrivano quasi a 500 gradi centigradi, l'atmosfera è composta principalmente di anidride carbonica ed è circa cento volte più densa della nostra, e come se non bastasse vi piove acido solforico. Se qualcuno provasse anche solo a mettere piede sul suolo di Venere morirebbe schiacciato e soffocato dalla sua atmosfera, e i suoi resti verrebbero inceneriti dal calore e dissolti dall'acido.

D'altro canto, in un passato lontano Marte è stato bagnato dall'acqua, ed esattamente come la Terra aveva oceani e fiumi, ormai scomparsi da tempo. Oggi è un deserto ghiacciato e privo di vita. Forse alcune specie di microrganismi abbondavano sul pianeta qualche miliardo di anni fa, o magari sopravvivono ancora sottoterra nei pressi di sorgenti d'acqua calda.

Gli Stati Uniti si sono impegnati ufficialmente ad andare su Marte, ma ci vorranno forse altri venti o trent'anni prima che possano completare la missione. Rispetto alla Luna, Marte rappresenta un enorme salto avanti in termini di difficoltà, e raggiungerlo sarà molto più complicato. Basti ricordare che ci vogliono solo tre giorni di viaggio per arrivare sulla Luna, mentre per raggiungere Marte bisogna viaggiare da sei mesi a un anno.

Nel luglio 2009 gli scienziati della NASA hanno cercato di stabilire realisticamente il significato e i termini economici di una missione su Marte. Gli astronauti impiegherebbero più di sei mesi per raggiungere il pianeta, vi trascorrerebbero circa diciotto mesi e poi avrebbero bisogno di altri sei mesi per il viaggio di ritorno. Complessivamente si dovrebbero spedire sul pianeta rosso circa 700 tonnellate di equipaggiamento, più di quanto è stato necessario per la stazione spaziale da 100 miliardi di dollari⁵. Per risparmiare sul cibo e sull'acqua, gli astronauti dovrebbero purificare i loro rifiuti e usarli per fertilizzare le piante durante il viaggio di andata e il soggiorno su Marte. E vista l'assenza di aria, terreno fertile o acqua, tutto dovrà essere trasportato dalla Terra. Sarebbe impossibile vivere dei frutti del terreno marziano, poiché sul pianeta rosso non ci sono né ossigeno né acqua allo stato liquido, animali o piante. L'atmosfera è formata quasi unicamente di anidride carbonica, e la pressione atmosferica è circa pari all'1 per cento di quella terrestre. Un piccolo strappo nella tuta spaziale provocherebbe una depressurizzazione, e quindi la morte immediata.

La missione sarebbe così complessa da dover essere suddivisa in diverse fasi. Poiché trasportare il propellente per il viaggio di ritorno sulla Terra sarebbe molto costoso, un altro razzo con a bordo il carburante necessario per rifornire l'astronave potrebbe essere spedito su Marte in un secondo momento. (Oppure, se fosse possibile estrarre abbastanza idrogeno e ossigeno dal sottosuolo marziano, potrebbero essere usati come propellente per il viaggio di rientro.)

Una volta giunti su Marte, potrebbero volerci mesi prima che gli astronauti si abituino alle condizioni di vita sul nuovo pianeta, dove il ciclo giorno-notte è quasi uguale a quello terrestre (il giorno marziano è di 24,6 ore), ma un anno dura circa il doppio del nostro. Le temperature marziane non salgono mai al di sopra del punto di fusione del ghiaccio, e le tempeste di sabbia sono impetuose: la sabbia ha la consistenza della polvere di talco, ed è comune che le tempeste avvolgano tutto il pianeta.

Terraformare Marte?

Supponendo che gli astronauti riescano a visitare Marte attorno alla metà di questo secolo e a stabilire un primo avamposto umano sul pianeta, potrebbero anche prendere in considerazione l'idea di terraformare il pianeta rosso, cioè trasformarlo con lo scopo di renderlo più adatto alla vita. Questo processo inizierebbe non prima della fine del XXI secolo, o più probabilmente all'inizio del XXII.

Gli scienziati hanno studiato diverse tecniche per la terraformazione di Marte. Forse il metodo più semplice sarebbe iniettare del gas metano (o un altro gas serra) nella sua atmosfera. Poiché il metano è un gas serra ancora più potente dell'anidride carbonica, potrebbe essere in grado di intrappolare la luce del Sole e innalzare la temperatura della superficie di Marte sopra il punto di fusione del ghiaccio. Oltre al metano sono stati studiati anche altri gas serra, per esempio l'ammoniaca o i clorofluorocarburi, per un loro possibile impiego in esperimenti di terraformazione.

Con l'aumento della temperatura il permafrost nel sottosuolo potrebbe iniziare a scongelarsi per la prima volta in miliardi di anni, e i letti dei fiumi inizierebbero a riempirsi d'acqua. Infine, mano a mano che l'atmosfera di Marte diventa più spessa, si potrebbero formare nuovamente oceani e laghi. Questo porterebbe al rilascio nell'atmosfera di quantità ancora maggiori di anidride carbonica, dando inizio a un *ciclo retroattivo positivo*⁶.

Nel 2009 è stato scoperto che del gas metano fuoriesce naturalmente dalla superficie marziana, ma la sua origine è tuttora un mistero. Mentre sulla Terra la maggior parte del gas metano ha origine dal decadimento di materiale organico, su Marte potrebbe essere il prodotto di processi geologici. Se riuscissimo a individuarne la fonte, potremmo provare ad aumentare la fuoriuscita del gas per alterare l'atmosfera del pianeta.

Un'altra possibilità potrebbe essere deviare una cometa verso l'atmosfera marziana. Se fosse possibile intercettarne una sufficientemente lontana, allora una piccola spinta con un motore a razzo, un urto con una sonda o anche solo lo strattone dovuto al campo gravitazionale di una nave spaziale potrebbero bastare a farle cambiare traiettoria. Le comete sono composte principalmente da ghiaccio e transitano periodicamente nel sistema solare. (La cometa di Halley, per esempio, ha un nucleo a forma di nocciolina largo circa 16 chilometri e composto principalmente da ghiaccio e roccia.) Avvicinandosi alla superficie di Marte, la cometa incontrerebbe l'attrito dell'atmosfera, iniziando a disintegrarsi e rilasciando vapore acqueo nell'atmosfera stessa.

Se non riuscissimo a trovare una cometa adatta a innescare il processo di terraformazione, allora si potrebbe provare a deviare uno dei satelliti ghiacciati di Giove, o forse un asteroide ricco di ghiaccio, per esempio Cerere, che si pensa sia composto per il 20 per cento d'acqua. (Questi satelliti sono difficili da deviare, perché di solito mantengono orbite stabili.) Invece di una cometa, un satellite o un asteroide che, orbitando lentamente nell'atmosfera di Marte, rilascino vapore acqueo, potremmo manovrare questi oggetti per generare un urto controllato sulle calotte ghiacciate del pianeta. Le regioni polari di Marte sono composte da uno strato di anidride carbonica ghiacciata, che scompare durante i mesi estivi, e ghiaccio, che costituisce la parte permanente delle calotte del pianeta. Se una cometa, un satellite o un asteroide colpissero le calotte ghiacciate, rilascerebbero una quantità di calore enorme, vaporizzando il ghiaccio

secco. Poiché l'anidride carbonica è un gas serra, questo addenserebbe l'atmosfera e contribuirebbe ad accelerare il riscaldamento globale di Marte. Si potrebbe addirittura generare un ciclo retroattivo positivo: quanta più anidride carbonica viene rilasciata dalle calotte di ghiaccio, tanto più il pianeta si riscalda; questo provocherebbe a sua volta il rilascio di ulteriori quantità di gas serra.

È stato anche suggerito di far esplodere delle bombe nucleari direttamente sulle calotte di ghiaccio, ma in questo modo l'acqua che si formerebbe avrebbe un fallout radioattivo. Un'alternativa potrebbe essere costruire un reattore a fusione tale da fondere le calotte. Gli impianti di fusione utilizzano l'acqua come carburante principale, e Marte è ricco di acqua ghiacciata.

Una volta innalzate le temperature del pianeta rosso al di sopra del punto di fusione del ghiaccio potrebbero formarsi delle pozze d'acqua, quindi potremmo introdurre alcune specie di alghe che sulla Terra prosperano in Antartide, e che potrebbero proliferare anche nell'atmosfera marziana, composta per il 95 per cento di anidride carbonica. Queste alghe, che potrebbero anche venire modificate geneticamente per massimizzare la loro crescita su Marte, accelererebbero il processo di terraformazione in diversi modi. Anzitutto convertirebbero l'anidride carbonica in ossigeno. Secondo, renderebbero più scura la superficie di Marte, che così assorbirebbe più calore dal Sole. Terzo, poiché queste colonie di alghe crescono da sé, senza alcun intervento dall'esterno, permetterebbero di cambiare l'atmosfera del pianeta in maniera abbastanza economica. Quarto, le alghe potrebbero essere raccolte e utilizzate come cibo. Infine, questi laghi di alghe creerebbero un terreno fertile di nutrienti per la crescita di altre piante, che a loro volta produrrebbero ulteriori quantità di ossigeno.

Gli scienziati hanno anche preso in considerazione la possibilità di costruire dei satelliti solari attorno a Marte, in modo che vi riflettano la luce del Sole. Gli stessi satelliti solari potrebbero essere in grado di scaldare e scongelare la superficie del pianeta, e una volta sciolto il permafrost, Marte continuerebbe a scaldarsi da solo in maniera naturale.

Benefici economici

Non dobbiamo illuderci che colonizzare la Luna e Marte possa procurarci ricchezza e benefici immediati. Quando nel 1492 salpò verso il Nuovo mondo, Cristoforo Colombo aprì le porte a un boom economico di proporzioni storiche. Presto i conquistatori iniziarono a spedire nel Vecchio mondo enormi quantità d'oro che ottenevano depredando i nativi americani, e i coloni spedivano indietro prodotti di coltura e materie grezze di grande valore. Gli enormi guadagni derivanti dalle missioni verso il Nuovo mondo compensavano di gran lunga il costo delle spedizioni. Ma le colonie sulla Luna o su Marte sarebbero qualcosa di molto diverso. Lassù non ci sono aria, acqua e terreno fertile, quindi tutto dovrebbe essere trasportato con le astronavi, e quindi a costi proibitivi. Inoltre, la colonizzazione della Luna non ha un grande valore dal punto di vista militare, per lo meno a breve termine: al momento sono necessari in media tre giorni per raggiungerla dalla Terra, e lo stesso per tornare indietro, mentre una guerra nucleare combattuta con missili balistici intercontinentali potrebbe risolversi in appena un'ora e mezza. Un reparto di cavalleria spaziale di stanza sulla Luna non farebbe quindi in tempo a raggiungere la Terra per fare la differenza in un'eventuale battaglia. Anche per questo motivo il Pentagono non ha finanziato alcun programma che preveda di armare la Luna.

Questo significa che se iniziassimo operazioni di scavo di vasta scala su altri mondi lo faremmo a beneficio delle stesse colonie spaziali, e non della Terra. Trasportare materie prime da qui costerebbe troppo, quindi i coloni dovrebbero estrarre metalli e minerali per usarli in loco. Operazioni di scavo nella cintura degli asteroidi diventerebbero remunerative solo nel momento in cui avremo colonie in grado di utilizzare i materiali grezzi e di autosostenersi: ma questo non accadrà fin verso la fine di questo secolo, o addirittura più tardi.

Turismo spaziale

Quando un semplice civile potrà andare nello spazio? Alcuni visionari, come lo scomparso Gerard O'Neill dell'Università di Princeton, hanno sognato gigantesche colonie spaziali a forma di ruota, con unità abitative, impianti di purificazione dell'acqua, unità per il riciclo dell'aria e altro ancora, fondate per risolvere il problema della sovrappopolazione mondiale.

Ma nel XXI secolo l'idea che le colonie spaziali possano risolvere i problemi della popolazione del nostro pianeta è quantomeno bizzarra. Per ancora un secolo, se non di più, la Terra rimarrà l'unica casa per la maggior parte della razza umana.

Tuttavia esiste un modo con cui una persona normale, non un astronauta, può pensare realisticamente di andare nello spazio: come turista. Alcuni imprenditori, fortemente critici nei confronti dei pesanti iter burocratici della NASA, sono convinti di poter abbattere i costi dei viaggi spaziali sfruttando le leggi del mercato. Il 4 ottobre 2004 Burt Rutan ha vinto, insieme con un gruppo di investitori, i 10 milioni di dollari del premio Ansari X per avere fatto volare il suo SpaceShipOne due volte in due settimane a un'altezza di oltre 100 chilometri sul livello del mare.

Lo SpaceShipOne è stato il primo aereo-razzo costruito unicamente con fondi privati ad avere completato con successo un viaggio nello spazio. Il progetto, costato circa 25 milioni di dollari, è stato in parte finanziato da Paul Allen, il miliardario cofondatore della Microsoft.

Oggi, con lo SpaceShipTwo, lo scopo di Rutan è iniziare una serie di test che permettano di trasformare i viaggi spaziali commerciali in realtà. Il miliardario Richard Branson, fondatore della Virgin Atlantic, ha creato la Virgin Galactic, che ha uno spaziorporto nel Nuovo Messico e una lunga lista di persone disposte a sborsare 200.000 dollari per realizzare il sogno di volare nello spazio. Prima compagnia a offrire voli commerciali nello spazio, la Virgin Galactic ha già prenotato cinque SpaceShipTwo. In caso di successo, questo ridurrebbe i costi dei viaggi spaziali a un decimo del loro valore attuale.

Lo SpaceShipTwo permette di tagliare i costi sotto molteplici punti di vista. Aniché usare razzi enormi per portare la navicella in orbita, Rutan ha posizionato lo SpaceShipTwo sopra un normale aeroplano che aspira aria per la combustione, così che questo possa portare il suo carico in quota usando solamente l'ossigeno dell'atmosfera terrestre. Una volta raggiunta un'altitudine di circa 16 chilometri da terra, lo SpaceShipTwo si stacca dall'aereo e accende i suoi razzi: sebbene la navicella non abbia autonomia sufficiente per orbitare intorno alla Terra, può tuttavia trasportare carburante a sufficienza per raggiungere un'altitudine superiore ai 100 chilometri, cioè al di sopra di buona parte dell'atmosfera terrestre, così che i suoi passeggeri possano vedere il cielo virare prima al viola, poi al nero. I suoi motori sono abbastanza potenti da raggiungere velocità Mach 3, cioè tre volte la velocità del suono nell'aria (circa 3500 chilometri all'ora): certamente non abbastanza per mandare un razzo in orbita (per cui sarebbero necessari 18.000 chilometri all'ora), ma sufficienti per raggiungere le soglie dello spazio esterno all'atmosfera. Può darsi che in un futuro non troppo lontano un viaggio del genere costi più o meno come un safari in Africa. Tuttavia, un giro completo intorno alla Terra costerebbe molto più di un viaggio su una stazione spaziale. Ho domandato al miliardario della Microsoft Charles Simonyi quanto ha pagato il biglietto per la Stazione Spaziale Internazionale: i media hanno stimato un costo di circa 20 milioni di dollari, ma lui, per quanto riluttante a dirmi la cifra

esatta, ha ammesso che quanto detto dai giornali non era tanto distante dalla verità. Simonyi si è divertito al punto da voler ripetere l'esperienza: i viaggi spaziali continueranno dunque ad essere una cosa da ricchi ancora per parecchio tempo.

Nel settembre 2010 l'annuncio della Boeing Corporation circa l'intenzione di entrare nel business dei voli spaziali commerciali ha dato una boccata d'ossigeno al turismo spaziale. La compagnia statunitense ha programmato i primi voli per turisti già nel 2015, dando manforte alla decisione del presidente Obama di affidare all'industria privata lo sviluppo di missioni spaziali equipaggiate. I piani della Boeing prevedono partenze per la Stazione Spaziale Internazionale da Cape Canaveral, in Florida: per ogni lancio è previsto un equipaggio di quattro persone, il che lascerebbe fino a tre posti liberi per i turisti spaziali. Tuttavia, la compagnia è stata schietta sulla provenienza dei finanziamenti per i viaggi spaziali privati: il conto sarebbe per la maggior parte a carico dei contribuenti. Come ha affermato John Elbon, direttore del programma di trasporto commerciale della Boeing: «Questo è un mercato instabile. Considerando i fattori di rischio, se dovessimo contare unicamente sugli investimenti della Boeing non saremmo in grado di portare a termine il progetto»⁷.

Fattori di rischio

I costi proibitivi dei viaggi spaziali hanno rallentato sia il progresso scientifico sia quello commerciale, e per farli scendere abbiamo bisogno di una nuova idea, di qualcosa di rivoluzionario. Entro la metà del XXI secolo gli scienziati e gli ingegneri staranno perfezionando nuove tecniche per la propulsione dei razzi.

Il fisico Freeman Dyson ha ristretto il campo delle possibilità ad alcune nuove tecnologie ancora in fase sperimentale, ma che un giorno potrebbero aprire le porte dei cieli alle persone comuni⁸. Questi progetti, tutti ad alto rischio, contribuirebbero davvero a tagliare i costi dei viaggi spaziali in maniera drastica. Il primo è il motore a propulsione laser, che sparando un impulso laser ad alta intensità alla base del razzo genera una miniesplorazione, la cui onda d'urto spinge il razzo verso l'alto. In pratica, una serie costante di esplosioni create da raffiche di raggi laser vaporizzano l'acqua e spingono il razzo nello spazio. Il grande vantaggio di questo sistema di propulsione è che utilizza una fonte d'energia proveniente da un apparato posto a terra, poiché i razzi laser non trasportano alcun tipo di carburante (al contrario dei razzi a propulsione chimica, che consumano buona parte della loro energia per portare il carburante).

Il funzionamento della tecnologia necessaria per questo sistema di propulsione è già stato descritto in passato, e nel 1997 Leik Myrabo, del Rensselaer Polytechnic Institute di New York, ha condotto con successo i primi test su un prototipo funzionante di razzo a propulsione laser. Secondo lo stesso Myrabo, possiamo considerare questo prototipo come un modello attraverso cui spiegare il funzionamento della tecnologia chiamata *lightcraft*. Una prima versione del prototipo aveva un diametro di una quindicina di centimetri e pesava più o meno 50 grammi. Un laser da 10 kilowatt generava una serie di impulsi che, facendo un rumore simile a quello di una mitraglietta, imprimeva al razzo un'accelerazione di 2 g (cioè 19,6 metri al secondo quadrato, ovvero il doppio dell'accelerazione di gravità terrestre, che è di circa 9,81 metri al secondo quadrato). Myrabo ha costruito razzi che si sono sollevati a più di trenta metri da terra (come i primi razzi a carburante liquido costruiti da Robert Goddard negli anni Trenta).

Dyson sogna il giorno in cui i sistemi a propulsione laser potranno trasportare nello spazio carichi pesanti al costo di appena 10 dollari al chilo, cosa che rivoluzionerebbe drasticamente i viaggi spaziali. Dyson immagina un laser gigante da 1000 megawatt (la potenza generata da un impianto nucleare standard) capace di portare in orbita un razzo da 2 tonnellate. Oltre al normale carico, il razzo avrebbe sul fondo una tanica che rilascia lentamente dell'acqua attraverso pori microscopici; il carico e la tanica d'acqua peserebbero circa una tonnellata ciascuno. Nell'istante in cui il raggio laser colpisce il fondo del razzo, l'acqua vaporizzerebbe istantaneamente, creando una serie di onde d'urto tali da spingere il razzo nello spazio. Il velivolo raggiungerebbe così un'accelerazione di 3 g, e uscirebbe dal campo gravitazionale terrestre in 6 minuti.

Poiché il razzo non trasporterebbe carburante, non c'è pericolo che i razzi vettore possano esplodere. Nonostante vadano nello spazio da circa cinquant'anni, i razzi a propellente chimico hanno ancora un tasso di fallimento pari all'1 per cento, generando in questi casi esplosioni spettacolari, con l'idrogeno e l'ossigeno che, essendo volatili, creano palle di fuoco enormi e una conseguente pioggia di detriti che inonda il sito di lancio. Al contrario, questo nuovo sistema è semplice e sicuro, e poiché utilizza solo acqua e raggi laser può essere usato

ripetutamente, con brevissimi tempi d'attesa tra un lancio e l'altro.

Inoltre, il sistema a propulsione laser potrebbe ripagarsi velocemente: stimando un mezzo milione di lanci all'anno, solo il costo dei biglietti acquistati dai potenziali turisti spaziali potrebbe facilmente ripagare sia i costi operativi sia quelli di sviluppo. Ad ogni modo Dyson è consapevole che questo sogno guarda a un futuro lontano diversi decenni. La ricerca di base necessaria a sviluppare laser così potenti richiede finanziamenti che vanno ben oltre quelli garantiti dalle università, e a meno che non trovi il supporto di grandi corporazioni o del governo stesso, il sistema a propulsione laser non vedrà mai la luce.

Ed è qui che il premio Ansari X potrebbe essere d'aiuto. Peter Diamandis, che ha creato il premio X nel 1996, è consapevole dei limiti dei razzi a propulsione chimica. Quando ho parlato con lui ha ammesso che anche lo SpaceShipTwo ha dovuto affrontare il solito problema: i carburanti chimici sono un mezzo piuttosto caro per superare l'attrazione gravitazionale terrestre. Di conseguenza, un futuro premio X sarà consegnato a chi progetterà un razzo alimentato da un fascio d'energia. (Invece di un raggio laser, dovrà però essere una sorgente di energia elettromagnetica, un fascio di microonde.) Sia la pubblicità conseguente all'assegnazione del premio X sia l'interesse a vincere un premio multimiliardario potrebbero accendere l'iniziativa di imprenditori e inventori e spingerli a creare razzi non chimici, per esempio a microonde.

Esistono altri progetti sperimentali di razzi, ma ciascuno comporta rischi differenti. Una possibilità è la pistola a gas, che spara proiettili da una canna enorme, più o meno come il razzo di *Dalla Terra alla Luna*, il romanzo di Jules Verne. Tuttavia, oggi sappiamo che il razzo di Verne non potrebbe mai volare nello spazio, poiché la polvere da sparo non può lanciare un proiettile a 40.000 chilometri all'ora, velocità necessaria per sfuggire al campo gravitazionale terrestre. Al contrario, la pistola a gas spara proiettili ad alta velocità utilizzando del gas ad alta pressione in un lungo tubo. Un prototipo lungo circa 10 metri e con un diametro di 10 centimetri è stato costruito da Abraham Hertzberg all'Università di Washington a Seattle. Il gas all'interno della pistola era un misto di metano e aria compressi a circa venticinque volte la pressione atmosferica terrestre. Una volta incendiato il gas, il carico veniva scagliato via con un'accelerazione stupefacente, così forte da schiacciare qualunque oggetto metallico: 30.000 g.

Hertzberg ha dimostrato che in linea di principio la pistola a gas può funzionare, ma per lanciare un carico nello spazio il tubo dovrebbe essere molto più lungo del suo prototipo, cioè almeno 230 metri, e dovrebbe usare diversi tipi di gas lungo la traiettoria: per lanciare un carico alla velocità di fuga sono necessarie fino a cinque fasi di lancio diverse, ciascuna basata su un gas differente.

I costi di lancio con la pistola a gas potrebbero essere addirittura inferiori a quelli del sistema a propulsione laser. Tuttavia questa tecnica è troppo pericolosa per gli esseri umani, e quindi adatta a lanciare soltanto carichi solidi in grado di sopportare un'accelerazione così intensa.

Un terzo progetto sperimentale è il cosiddetto *slingatron*, uno strumento che accelera i carichi facendoli ruotare velocemente e poi li lancia in aria come un sasso in una fionda.

Derek Tidman ha costruito un prototipo di *slingatron*, un modellino da tavolo in grado di accelerare un oggetto in pochi secondi e lanciarlo a una velocità di 90 metri al secondo. Lo *slingatron* di Tidman è formato da un tubo arrotolato in modo da formare una sorta di ciambella

con un diametro di circa un metro. Il tubo in sé ha invece un diametro di circa 2,5 centimetri e contiene una piccola sfera d'acciaio che, mano a mano che circola nel tubo, piccoli motori la spingono a velocità sempre più elevate.

Un vero slingatron che possa lanciare un carico nello spazio dovrà ovviamente essere molto più grande, con un diametro di almeno diverse decine, se non qualche centinaio di metri, e dovrà essere in grado di dare all'oggetto al suo interno una spinta tale da fargli raggiungere la velocità di 11 chilometri al secondo. L'oggetto si staccerebbe così dallo slingatron con un'accelerazione pari a circa 1000 g, abbastanza per comprimere qualsiasi cosa venga lanciata. Ci sono ancora molti problemi ingegneristici da risolvere, primo tra tutti la riduzione dell'attrito tra sfera e tubo.

Ci vorranno decenni per perfezionare ciascuno di questi tre progetti, ma questo avverrà solo se il governo americano o i privati decideranno di finanziare la ricerca. Altrimenti questi prototipi sono destinati a rimanere poco più che schizzi su una lavagna.

FUTURO REMOTO (DAL 2070 AL 2100)

L'ascensore spaziale

Entro la fine di questo secolo le nanotecnologie potrebbero addirittura permetterci di costruire il leggendario ascensore spaziale. Allora potremo fare come il piccolo Jack della fiaba *Jack e il fagiolo magico*, che grazie al suo piccolo fagiolo riesce ad arrampicarsi al di sopra delle nuvole. Entreremo in un ascensore, e premendo un bottone inizieremo a salire lungo un cavo in fibra di nanotubi di carbonio lungo migliaia di chilometri. Un'invenzione del genere potrebbe rivoluzionare completamente i viaggi spaziali in termini economici.

Nel 1895 il fisico russo Konstantin Tsiolkovsky fu ispirato dalla costruzione della Torre Eiffel (allora l'edificio più alto del mondo) e si domandò: perché non possiamo costruire una Torre Eiffel che raggiunga lo spazio? Tsiolkovsky calcolò che secondo le leggi della fisica una costruzione del genere non sarebbe mai potuta cadere, se fosse stata sufficientemente alta, e la chiamò *castello celeste*.

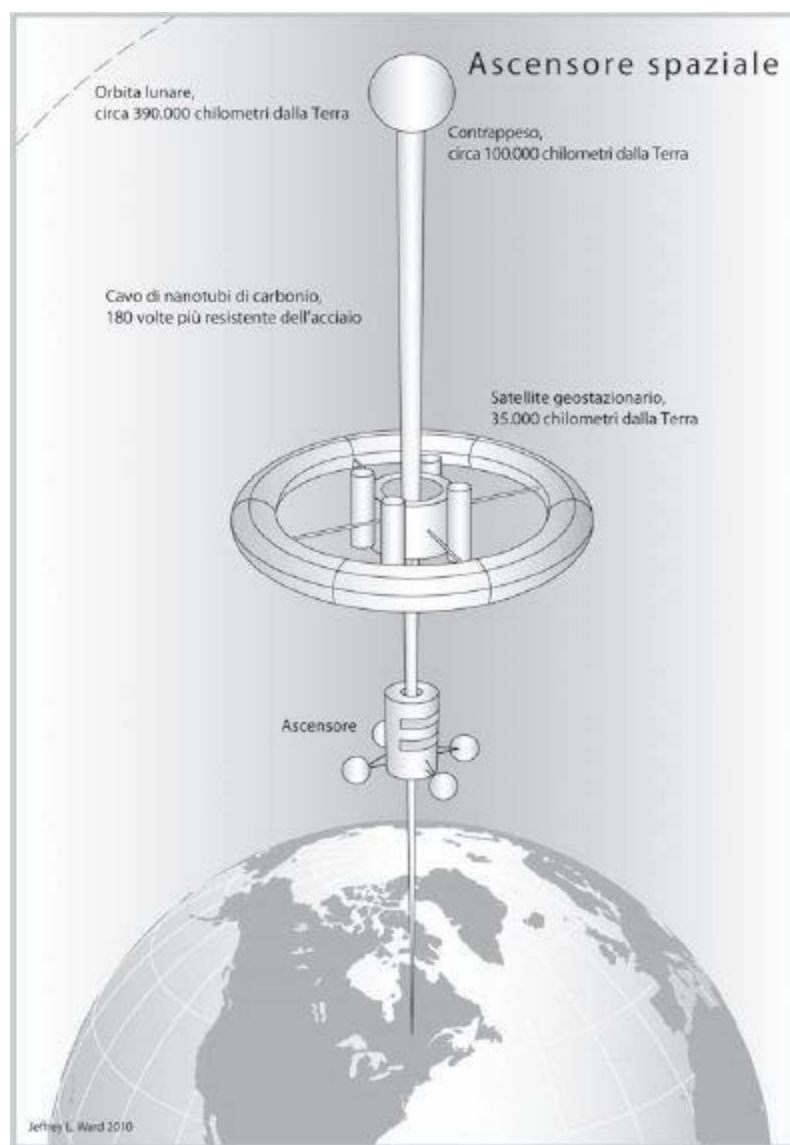
Per capire come funziona l'ascensore spaziale è sufficiente pensare a una palla fissata all'estremità di una corda. Se la facciamo ruotare vorticosamente, la forza centrifuga tiene la corda tesa e la palla non cade. Allo stesso modo, se il cavo dell'ascensore spaziale è sufficientemente lungo, la forza centrifuga esercitata sul cavo dalla rotazione terrestre è sufficiente a mantenerlo teso verso l'alto e impedirgli di ricadere a terra. Una volta teso completamente verso il cielo, una qualsiasi cabina in grado di viaggiare su e giù lungo il cavo potrebbe arrivare fino allo spazio.

Sulla carta tutto sembra funzionare alla perfezione, ma se calcoliamo la tensione del cavo con le leggi del moto di Newton, notiamo che questa è maggiore della resistenza alla trazione dell'acciaio: il cavo dell'ascensore spaziale è destinato a spezzarsi, rendendo quindi impossibile l'impresa.

L'idea dell'ascensore spaziale è tornata in auge in diverse occasioni nel corso dei decenni, e ogni volta è stata scartata per questo motivo. Nel 1957 lo scienziato russo Yuri Artsutanov propose di costruirlo "dall'alto verso il basso" anziché "dal basso verso l'alto": mandando prima un'astronave in orbita, sarebbe stato possibile calare un cavo da ancorare a terra. Inoltre, alcuni scrittori di fantascienza hanno diffuso il concetto dell'ascensore spaziale al grande pubblico: basti pensare a *Le fontane del paradiso*, il romanzo di Arthur C. Clarke del 1979, o a *Operazione domani*, quello di Robert Heinlein del 1982.

I nanotubi di carbonio hanno contribuito a rilanciare questa idea. Come abbiamo visto, la resistenza alla trazione di questi nanotubi è maggiore di quella di qualunque altro materiale: sono persino più resistenti dell'acciaio, e in linea di principio sono in grado di resistere all'enorme tensione che si genera in un ascensore spaziale.

Tuttavia, costruire un cavo di nanotubi di carbonio puri lungo 80.000 chilometri è piuttosto problematico, anzi è un ostacolo enorme, se teniamo conto del fatto che finora gli scienziati sono riusciti a creare strutture di nanotubi di carbonio puri lunghe solo pochi centimetri. È possibile intrecciare miliardi di fili per costruire cavi o fogli, ma in questo caso le fibre non sono pure, poiché sono state pressate nel processo di tessitura. La sfida è costruire un nanotubo di carbonio in cui ogni atomo è nella posizione corretta.



Un giorno l'ascensore spaziale potrebbe drasticamente ridurre i costi dei viaggi spaziali. Il segreto di tale invenzione potrebbe essere la nanotecnologia. (Illustrazione Jeffrey L. Ward)

Nel 2009 gli scienziati della Rice University hanno annunciato di essere a una svolta: hanno creato fibre composite ma non pure (quindi non adatte per un ascensore spaziale), però usando una tecnica abbastanza versatile da permettere di produrre fibre di nanotubi di carbonio di qualsiasi lunghezza. Provando e riprovando hanno scoperto che questi nanotubi possono essere sciolti in una soluzione di acido clorosolfonico e poi “spruzzati” con un aggeggio simile a una doccia. Con questo metodo si possono produrre fibre di nanotubi di carbonio spesse 50 micrometri e lunghe centinaia di metri.

Queste fibre potrebbero trovare applicazione commerciale come linee elettriche, poiché conducono l'elettricità meglio del rame, sono più leggere e si rompono più raramente. Tuttavia il professor Matteo Pasquali, ingegnere della Rice University, ha detto: «Per le linee di trasmissione ne servirebbero a tonnellate, e al momento non esistono tecniche per produrne in tali quantità. Ci vorrebbe un piccolo miracolo»⁹.

Tuttavia, anche assumendo che un giorno saremo capaci di costruire lunghi filamenti di nanotubi di carbonio capaci di portarci “in cielo”, dovremo affrontare e risolvere alcuni problemi di ordine pratico. Anzitutto, il cavo dell'ascensore si estenderebbe ben oltre l'orbita della maggior parte dei satelliti, che dopo diverse rotazioni attorno alla Terra potrebbero ritrovarselo sulla propria traiettoria, rischiando così di andarci a sbattere contro. Poiché i

satelliti si muovono a circa 29.000 chilometri all'ora, un eventuale impatto sarebbe catastrofico. Per ovviare a questo problema, l'ascensore spaziale dovrebbe essere equipaggiato con speciali razzi in grado di spostare il cavo dalla traiettoria dei satelliti.

Anche situazioni atmosferiche particolarmente turbolente come tornado, uragani o tempeste potrebbero causare problemi. L'ascensore spaziale dovrebbe quindi essere ancorato a terra, probabilmente su una portaerei o su una piattaforma petrolifera nell'oceano Pacifico, e abbastanza flessibile da non subire danni quando le forze della natura si scatenano. Dovrebbe anche essere previsto un bottone antipanico e, nel caso in cui il cavo si spezzi, una capsula di salvataggio. Se qualcosa colpisse il cavo tagliandolo, la cabina dell'ascensore dovrebbe essere in grado di planare o scendere fino a terra con dei paracadute, portando in salvo i suoi passeggeri.

Per dare un impulso alla ricerca sugli ascensori spaziali, la NASA sta finanziando diverse competizioni chiamate Space Elevator Games, per le quali ha messo in palio premi per un totale di 2 milioni di dollari. Secondo le regole stabilite dalla stessa NASA, i vincitori del Beam Power Challenge dovranno costruire un congegno non più pesante di 50 chilogrammi e in grado di arrampicarsi lungo un cavo per almeno 1 chilometro alla velocità di 2 metri al secondo. Ciò che rende questa sfida particolarmente difficile è che il sistema non dovrà servirsi di batterie, cavi elettrici o combustibile. L'energia necessaria per farlo funzionare dovrà essere convogliata al dispositivo dall'esterno.

Ho potuto tastare di persona l'entusiasmo e l'energia di alcune persone che lavorano all'ascensore spaziale e sperano di vincere il premio. A Seattle ho incontrato un collettivo di giovani e intraprendenti ingegneri chiamato *LaserMotive* che, ammaliato dal richiamo della competizione promossa dalla NASA, ha iniziato a costruire prototipi da cui forse un giorno prenderà vita l'ascensore spaziale.

Gli ingegneri mi hanno portato in un enorme magazzino che hanno affittato per testare alcune loro idee. Su un lato avevano piazzato un potente laser in grado di sparare un raggio d'energia molto intenso; sull'altro lato c'era invece il loro ascensore spaziale, una scatola larga circa un metro e dotata di un grande specchio. Il loro progetto prevedeva che il raggio laser colpisse lo specchio e venisse deviato verso una serie di celle solari, le quali avrebbero convertito l'energia del laser in energia elettrica. Questa avrebbe attivato un motore che, poco per volta, avrebbe fatto salire la cabina dell'ascensore lungo un cavo, e in questo modo non ci sarebbe stato bisogno di cavi elettrici penzolanti qua e là per alimentare l'ascensore: sarebbe quindi stato sufficiente sparare un raggio laser da terra, e la cabina avrebbe iniziato ad arrampicarsi lungo il cavo.

Il laser usato in quell'esperimento era così potente che abbiamo dovuto indossare speciali occhiali protettivi. Dopo numerosi tentativi i ragazzi sono riusciti ad attivare l'ascensore con il laser e a farlo salire: almeno in teoria, uno dei problemi dell'ascensore spaziale era stato risolto.

Far muovere l'ascensore sfruttando solo fonti d'energia esterne è stato così complicato che all'inizio il premio non fu assegnato a nessuno¹⁰. Poi nel 2009 il collettivo LaserMotive si è fatto avanti per rivendicarlo. La dimostrazione ha avuto luogo alla Edward Air Force Base, nel deserto del Mojave, in California. Il cavo era sostenuto da un elicottero in volo sopra il deserto, e in due giorni gli ingegneri del LaserMotive sono riusciti a far salire l'ascensore lungo il cavo per quattro volte, segnando il miglior tempo di 3 minuti e 48 secondi. Alla fine i giovani ingegneri sono stati premiati per tutto il duro lavoro cui avevo assistito.

Astronavi

Nonostante i recenti tagli ai fondi per la ricerca sulle missioni spaziali con equipaggio, è probabile che entro la fine del secolo gli scienziati riescano a stabilire un avamposto su Marte, e forse anche nella cintura degli asteroidi. Dopodiché volgeranno il loro sguardo alle stelle. L'invio di una sonda interstellare, che attualmente è un sogno irraggiungibile, potrebbe diventare realtà entro un centinaio d'anni.

La prima sfida che dobbiamo affrontare è trovare un nuovo sistema di propulsione. Un normale razzo a propulsione chimica impiegherebbe settantamila anni per raggiungere la stella più vicina. Per esempio, le due sonde Voyager lanciate nel 1977 hanno stabilito il record della distanza mai raggiunta da un oggetto lanciato nello spazio: pur trovandosi a 16 miliardi di chilometri da noi, hanno percorso solo una piccolissima frazione della distanza che ci separa dalle stelle.

Sono stati proposti diversi progetti e sistemi di propulsione per un'astronave interstellare:

- Le vele solari;
- I razzi a propulsione nucleare;
- I *ramjet* a fusione;
- Le nanoastronavi.

Ho avuto occasione di incontrare uno degli ideatori delle vele solari quando ho visitato la Plum Brook Station della NASA a Sandusky, nell'Ohio, dove per testare i satelliti da inviare nello spazio gli ingegneri hanno costruito la camera a vuoto più grande del mondo, larga 30 metri e alta 37. Era così enorme da potervi collaudare satelliti e parti di razzo in un vuoto simile a quello dello spazio. La vastità del progetto mi ha come sopraffatto, e mi sono sentito subito privilegiato, poiché stavo camminando esattamente nel luogo in cui sono stati collaudati alcuni tra i più importanti satelliti, sonde e razzi degli Stati Uniti.

Alla Plum Brook Station ho conosciuto lo scienziato della NASA Les Johnson, uno dei maggiori paladini delle vele solari, il quale mi ha raccontato che costruire razzi capaci di raggiungere le stelle è stato il suo sogno fin da quando era bambino e leggeva racconti di fantascienza. Johnson ha scritto il libro di testo base sulle vele solari, e sebbene pensi che entro pochi decenni dovremmo essere in grado di costruirle, è rassegnato al fatto che una nave stellare vera e propria vedrà la luce ben dopo la sua morte. Come gli artigiani che hanno costruito le grandi cattedrali medievali, Johnson è consapevole che solo il lavoro di diverse generazioni permetterà di costruire un'astronave in grado di raggiungere le stelle.

Il funzionamento delle vele solari si basa sul fatto che, nonostante la luce non abbia massa, ha però momento, quindi può esercitare pressione. Sebbene la pressione della radiazione esercitata dal Sole sia molto debole e troppo leggera perché possa, per esempio, essere percepita sulle nostre mani, può tuttavia muovere un'astronave, se ha vele sufficientemente grandi e molto tempo a disposizione. (La luce del Sole nello spazio è otto volte più intensa che sulla superficie terrestre.)

L'obiettivo di Johnson è costruire direttamente nello spazio una vela solare gigantesca, larga diversi chilometri e fatta di plastica molto fine ma resistente ed elastica. Una volta assemblata,

la vela inizierebbe a ruotare lentamente intorno al Sole, guadagnando velocità ad ogni giro. Dopo avere orbitato intorno al Sole per diversi anni, la vela inizierebbe a muoversi lungo una spirale fino a uscire dal sistema solare, iniziando così il suo viaggio verso le stelle. Una vela del genere potrebbe spingere una sonda a una velocità pari allo 0,1 per cento della velocità della luce, e forse raggiungere la stella più vicina al sistema solare in quattrocento anni.

Per ridurre il tempo necessario a raggiungere le stelle, Johnson ha cercato di capire come dare un'ulteriore spinta alla vela solare. Una soluzione potrebbe essere installare su una luna un'enorme batteria laser, i cui raggi colpirebbero la vela dopo che è uscita dal sistema solare, aumentandone quindi la velocità.

Ma uno dei problemi cruciali delle astronavi a vele solari è fermarle e invertirne la direzione di marcia, poiché la luce viaggia dal Sole verso l'esterno del sistema solare. Una soluzione potrebbe essere invertire la direzione della vela e usare la pressione esercitata dalla luce proveniente dalla stella di destinazione per rallentare la nave stellare. Oppure la navicella potrebbe circumnavigare la stella lontana sfruttandone l'attrazione gravitazionale per creare l'effetto fionda che le permetterebbe di iniziare il viaggio di ritorno. Un'altra possibilità ancora potrebbe essere atterrare su un satellite e costruirvi delle batterie laser che, insieme alla luce della stella, potrebbero fornire all'astronave la spinta necessaria per il viaggio di ritorno.

Nonostante i suoi sogni stellari, Johnson è consapevole che la realtà è ben più modesta. Nel 1993 i russi hanno dispiegato nello spazio un riflettore in Mylar (polietilene tereftalato) da 20 metri dalla stazione spaziale Mir, ma lo scopo dell'esperimento era solo mostrarne lo spiegamento. Un secondo tentativo è invece fallito. Nel 2004 i giapponesi hanno lanciato con successo due prototipi di vele solari, ma anche loro per testarne soltanto il dispiegamento, non la propulsione. Nel 2005 un ambizioso progetto della Planetary Society, dei Cosmos Studios e dell'Accademia Russa delle Scienze avrebbe dovuto lanciare in orbita una vera vela solare: la Cosmos 1 è stata infatti lanciata da un sottomarino russo, ma non è riuscita ad andare in orbita perché il razzo Volna si è inceppato. Nel 2008 un team della NASA ha provato a lanciare una vela solare chiamata *NanoSail-D*, che però è andata perduta a causa del malfunzionamento del razzo Falcon 1.

Infine, nel 2010 l'Agenzia Giapponese per l'Esplorazione dello Spazio ha lanciato con successo IKAROS¹¹, la prima navicella spaziale che usa la tecnologia delle vele solari per la navigazione nello spazio interplanetario. IKAROS ha una vela quadrata con la diagonale di 20 metri, e raggiungerà Venere usando la propulsione solare. Gli scienziati giapponesi sperano di riuscire a lanciare un'altra navicella a vele solari che riesca a raggiungere Giove.

Razzi a propulsione nucleare

Gli scienziati hanno anche vagliato l'ipotesi di usare l'energia nucleare per far muovere un'astronave. Fin dal 1953, con il progetto Rover, la Atomic Energy Commission ha iniziato a considerare seriamente la possibilità di installare un reattore atomico sui razzi. Negli anni Cinquanta e Sessanta la maggior parte degli esperimenti condotti fallì: i razzi a propulsione nucleare erano troppo instabili e complessi da manovrare. Inoltre, si può dimostrare facilmente che un ordinario reattore a fissione non è in grado di produrre abbastanza energia da muovere un'astronave. Tipicamente un impianto nucleare produce circa un miliardo di watt di potenza: non abbastanza per raggiungere le stelle.

Negli anni Cinquanta gli scienziati proposero di usare bombe atomiche e all'idrogeno invece dei reattori nucleari. Per esempio, nel progetto Orione era previsto un razzo attivato grazie all'onda d'urto generata da una serie di bombe atomiche espulse dal retro della navicella e fatte esplodere in successione. Nel 1959 i fisici della General Atomics stimarono che una possibile evoluzione del razzo del progetto Orione avrebbe avuto un diametro di 400 metri e un peso di 8 milioni di tonnellate, e che ci sarebbero volute mille bombe all'idrogeno per generare la propulsione necessaria a mettere in moto la navicella.

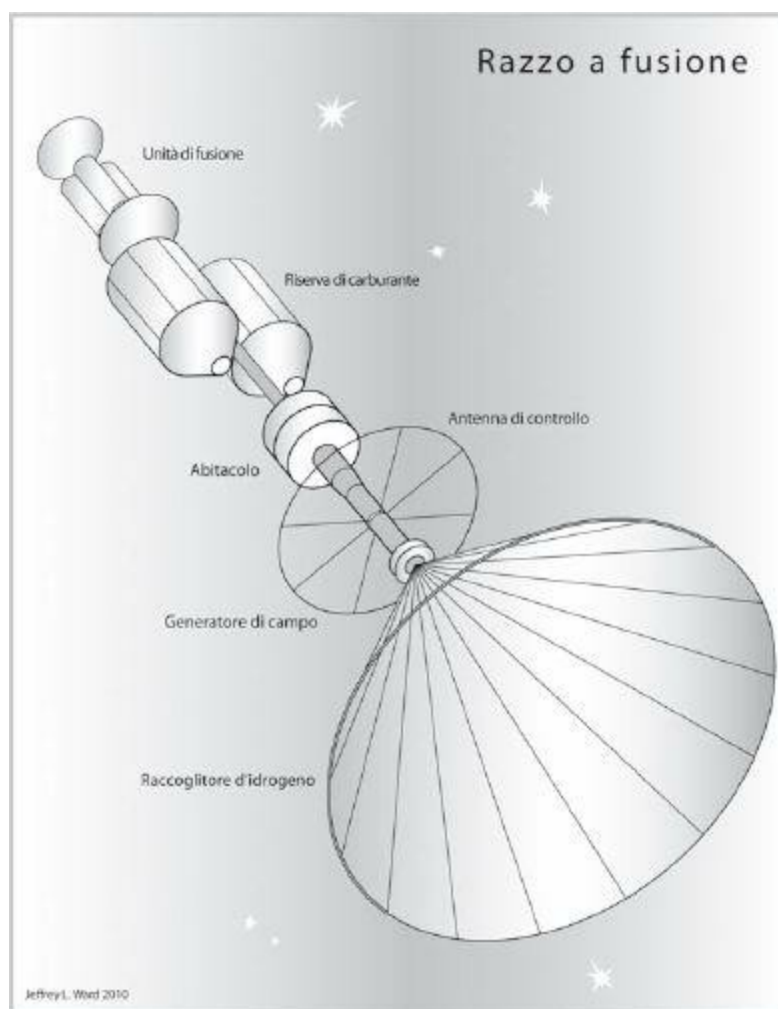
Il fisico Freeman Dyson è stato uno degli entusiasti ideatori del progetto Orione. Di recente Dyson ha detto: «Per me Orione significava aprire le porte del sistema solare. Avrebbe cambiato la storia». Inoltre ha sottolineato che Orione sarebbe stato un modo conveniente per eliminare gli ordigni atomici: «In un solo viaggio ci saremmo sbarazzati di duemila bombe».

Ma ciò che ha decretato la fine del progetto Orione è stato il Nuclear Test Ban Treaty del 1963, che ha proibito i test nucleari nell'atmosfera: senza test, infatti, i fisici non hanno potuto completare il disegno del razzo e l'idea è morta.

Ramjet a fusione

Nel 1960 Robert W. Bussard ha proposto un altro tipo di razzo a propulsione nucleare, con un motore a fusione simile a un ordinario motore a getto. Il normale ramjet risucchia l'aria dalla parte anteriore e la mescola con il carburante all'interno del motore stesso, e l'esplosione chimica che avviene accendendo questa miscela di carburante e aria genera la spinta necessaria a far muovere il razzo. Bussard ha invece immaginato di applicare gli stessi principi a un motore a fusione: anziché risucchiare aria, il motore ramjet a fusione aspirerebbe idrogeno in forma gassosa, presente in abbondanza nello spazio interstellare. L'idrogeno verrebbe poi "strizzato" e scaldato da campi elettrici e magnetici finché inizia a fondersi, formando molecole di Elio e rilasciando una quantità enorme di energia durante il processo. L'esplosione che ne scaturirebbe darebbe quindi la spinta al razzo. Poiché le scorte di idrogeno nello spazio sono pressoché infinite, è plausibile che un motore ramjet a fusione possa funzionare per sempre.

Nei disegni che lo rappresentano, il razzo ramjet a fusione ricorda un cono gelato. Il raccoglitore intrappola l'idrogeno, che viene mandato al motore, dove viene riscaldato e fuso con altri atomi d'idrogeno. Bussard ha calcolato che se un motore ramjet a fusione da 1000 tonnellate riuscisse a mantenere un'accelerazione di 9,8 metri al secondo quadrato (ovvero pari all'accelerazione di gravità sulla superficie terrestre), impiegherebbe appena un anno per raggiungere una velocità uguale al 77 per cento della velocità della luce. Poiché il motore ramjet può funzionare all'infinito, in teoria potrebbe addirittura lasciare la nostra galassia e raggiungere quella di Andromeda (che dista dalla Terra due milioni di anni luce) in appena ventitré anni, secondo il tempo misurato dagli astronauti sulla nave stellare. (La teoria della relatività di Einstein ci dice infatti che all'interno di un razzo che viaggia ad altissima velocità il tempo rallenta: anche se sulla Terra fossero passati milioni di anni, gli astronauti sull'astronave verso Andromeda sarebbero invecchiati solo di ventitré anni.)



Un motore ramjet a fusione potrebbe teoricamente funzionare all'infinito, poiché raccoglie l'idrogeno dallo spazio interstellare. (Illustrazione Jeffrey L. Ward)

Prima di poter costruire un motore ramjet a fusione bisogna risolvere diversi problemi tecnici. Anzitutto, nello spazio interstellare troveremo principalmente protoni, quindi è necessario che il motore a fusione bruci idrogeno puro, il che non produce energia in grandi quantità. (Esistono diversi processi di fusione dell'idrogeno: sulla Terra tipicamente si fondono deuterio e trizio attraverso una reazione che comporta il rilascio di una grande quantità d'energia. Ma nello spazio la molecola d'idrogeno esiste solo sotto forma di singolo protone, quindi i ramjet possono soltanto fondere protone con protone, reazione che non produce energia come quella deuterio-trizio.) Tuttavia, Bussard ha mostrato che modificando la miscela del carburante con l'aggiunta di carbone, questo agirebbe da catalizzatore nella reazione, creando la potenza necessaria per muovere l'astronave.

Inoltre, per essere in grado di raccogliere abbastanza idrogeno le prese d'aria dovrebbero essere enormi, con un diametro dell'ordine di 160 chilometri, quindi dovrebbero essere costruite direttamente nello spazio.

Oltre a questi aspetti, un terzo problema non ha ancora trovato soluzione: nel 1985 gli ingegneri Robert Zubrin e Dana Andrews hanno mostrato che, muovendosi in un mare di atomi d'idrogeno, un'astronave a ramjet incontrerebbe una resistenza così elevata da impedirgli di raggiungere una velocità prossima a quella della luce. Tuttavia i calcoli dei due scienziati sono basati su alcune ipotesi che potrebbero non essere più valide per i ramjet di prossima generazione.

Fino a quando non capiremo meglio sia il processo di fusione sia gli effetti di trascinamento

degli ioni nello spazio, non sarà possibile assumere una posizione definitiva sui motori ramjet a fusione. Ma se potessimo risolvere questi problemi tecnici, la costruzione di un razzo ramjet diventerebbe prioritaria.

Razzi ad antimateria

Potremmo poi pensare di alimentare un'astronave con la maggiore fonte di energia presente nell'universo: l'antimateria, che è l'opposto della materia, perché ha carica inversa. Per esempio, un elettrone ha carica negativa, ma l'antielettrone (il positrone) ha carica positiva. L'antimateria è annichilita dal contatto con la materia ordinaria: un cucchiaino di antimateria avrebbe infatti energia sufficiente per distruggere la città di New York.

Nel romanzo *Angeli e demoni*, scritto da Dan Brown, i cattivi costruiscono una bomba per far saltare in aria il Vaticano usando antimateria rubata al CERN di Ginevra. Al contrario della bomba all'idrogeno, che ha solo un'efficienza dell'1 per cento, una bomba ad antimateria avrebbe un'efficienza del 100 per cento, poiché potrebbe convertire tutta la sua massa in energia, secondo l'equazione di Einstein $E = mc^2$.

In linea di principio l'antimateria è il carburante ideale per i razzi di un'astronave, poiché a parità di peso rilascia un miliardo di volte più energia del normale carburante per razzi. Gerald Smith, dell'Università Statale della Pennsylvania, ha stimato che potremmo raggiungere Marte con appena 4 milligrammi di antimateria, e forse un centinaio di grammi ci potrebbero portare nei pressi della stella più vicina. Il funzionamento di un motore ad antimateria è piuttosto semplice: sarebbe sufficiente far cadere un flusso costante di particelle di antimateria nella camera di combustione del razzo, dove si combinerebbe con la materia ordinaria generando un'esplosione di proporzioni titaniche. Il gas esplosivo si sprigionerebbe all'esterno della camera, dando all'astronave la spinta necessaria per metterla in movimento.

Siamo ancora lontani dalla realizzazione di questo sogno. Al momento i fisici sono in grado di creare antiprotoni e antielettroni, così come atomi di antidrogeno, con antielettroni che si muovono intorno ad antiprotoni. Tutto questo è stato fatto sia al CERN sia all'acceleratore Tevatron del Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) di Chicago. Il Tevatron è il secondo acceleratore di particelle più grande del mondo dopo il Large Hadron Collider (LHC) del CERN. Inviando un fascio di particelle ad alta energia verso un bersaglio fisso, i fisici di entrambi i laboratori hanno generato un getto di frammenti che conteneva anche antiprotoni. Potenti magneti sono stati poi utilizzati per separare l'antimateria dalla materia ordinaria. Questi antiprotoni venivano poi rallentati e mescolati con antielettroni, sino a formare atomi di antidrogeno.

Dave McGinnis, un fisico del Fermilab, ha pensato a lungo a possibili applicazioni pratiche dell'antimateria. Durante una visita al Tevatron mi ha descritto l'economia scoraggiante della produzione di antimateria: l'unico modo conosciuto per produrla in maniera costante è utilizzare un acceleratore di particelle come il Tevatron; queste macchine sono estremamente costose e la quantità di antimateria che producono è tutto sommato minima. Per esempio, nel 2004 il CERN ha prodotto diversi trilionesimi di grammo di antimateria per un costo totale di 20 milioni di dollari: di questo passo produrre abbastanza antimateria per alimentare un'astronave manderebbe in bancarotta l'intera economia mondiale. McGinnis ha sottolineato che i motori ad antimateria non sono qualcosa di inverosimile, poiché il loro funzionamento è perfettamente compatibile con le leggi della fisica, ma costruirne uno, almeno nel prossimo futuro, costerebbe davvero una fortuna.

Gli acceleratori per produrre antimateria sono notoriamente molto costosi, e questo è un

motivo per cui l'antimateria è così maledettamente cara. Tuttavia si tratta macchine multifunzione, progettate principalmente per produrre strane particelle subatomiche, e non particelle di antimateria, che sono decisamente più comuni. Sono strumenti di ricerca, non macchine commerciali. I costi di produzione si abbasseranno soltanto nel momento in cui verrà costruito un nuovo tipo di acceleratore, appositamente progettato per la produzione di grandi quantità di antimateria. E fabbricando tali macchine in serie, la quantità di antimateria che si potrebbe ottenere sarebbe notevole. Harrold Gerris della NASA è convinto che in questo modo il costo dell'antimateria possa scendere fino a 5000 dollari al microgrammo.

Un'altra soluzione consiste nel trovare un meteorite di antimateria nello spazio profondo. Un oggetto del genere potrebbe fornire energia sufficiente ad alimentare un'astronave. Il satellite europeo PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-Nuclei Astrophysics) è stato lanciato nel 2006 con il preciso scopo di cercare antimateria nello spazio, dove è presente naturalmente. Se trovata in grandi quantità, l'antimateria potrebbe venire raccolta usando una grande rete elettromagnetica.

Ma sebbene le navi interstellari ad antimateria siano perfettamente compatibili con le leggi della fisica, dovremo forse aspettare la fine del secolo per abbassarne i costi di produzione. Tuttavia, una volta raggiunto questo obiettivo i razzi ad antimateria entrerebbero immediatamente nella rosa dei candidati a nave stellare.

Nanoastronavi

Quando pensiamo agli effetti speciali di *Guerre stellari* o *Star Trek* immaginiamo subito un'astronave futuristica ed enorme, brulicante di gadget tecnologici di ultima generazione. Un'altra possibilità di volare nello spazio è invece rappresentata dalle nanotecnologie, con cui potremmo creare un'astronave microscopica, non più grande di un ditale per cucire o di uno spillo, e forse anche più piccola.

Di solito pensiamo che un'astronave debba necessariamente essere grandissima, per esempio come l'*Enterprise* di *Star Trek*, cioè abbastanza capace da contenere un intero equipaggio di astronauti. Ma grazie alle nanotecnologie è letteralmente possibile miniaturizzare le funzioni essenziali di una nave stellare, così che milioni di nanoastronavi microscopiche potrebbero venire lanciate verso le stelle vicine, sperando che almeno una parte di queste giunga a destinazione. Una volta atterrate su una luna vicina, queste navi potrebbero addirittura costruire una fabbrica e cominciare a replicarsi all'infinito.

Vint Cerf, uno dei padri di internet, immagina nanoastronavi piccolissime, che possano esplorare non solo il sistema solare ma addirittura le stesse stelle: «L'esplorazione del sistema solare sarà resa più efficace attraverso la costruzione di dispositivi su scala nanometrica, facili da trasportare sia sopra sia sotto la superficie dei pianeti e dei satelliti vicini a noi, nonché nella loro atmosfera. [...] Potremmo addirittura applicare queste idee all'esplorazione interstellare»¹².

In natura i mammiferi mettono alla luce solo pochi cuccioli, facendo bene attenzione che tutti sopravvivano. Gli insetti, invece, generano un numero enorme di piccoli, di cui solo una minima parte sopravvive. Entrambe queste strategie hanno permesso di mantenere in vita le specie per milioni di anni. Allo stesso modo, anziché lanciare verso le stelle un'unica e costosa astronave, potremmo inviare milioni di astronavi microscopiche, ciascuna del valore di appena un centesimo e in grado di consumare pochissimo carburante.

Questo concetto si basa su una strategia efficace che osserviamo in natura: la formazione degli sciame. Gli uccelli, le api e altri esseri volanti formano stormi o sciame, e questo non solo perché l'unione fa la forza, ma anche perché lo sciame può agire come sistema di preallarme: se in un punto dello sciame si presenta un pericolo, per esempio l'attacco di un predatore, l'informazione viene trasmessa velocemente al resto del gruppo. Gli stormi sono anche molto efficaci dal punto di vista energetico: quando gli uccelli volano nella caratteristica formazione a V, la scia e il movimento d'aria generati dal loro spiegamento riducono l'energia che ciascun animale deve spendere per rimanere in volo.

Gli scienziati vedono lo sciame come un "superorganismo" con una propria intelligenza, indipendente dalle abilità dei singoli individui. Per esempio, le formiche hanno un sistema nervoso estremamente semplice e un cervello microscopico, ma insieme possono costruire formicai dalla struttura complessa. Gli scienziati sperano di poter incorporare nella teoria dei viaggi spaziali alcune di queste lezioni che la natura impartisce, costruendo "robosciame" che possano viaggiare verso altri pianeti e verso le stelle.

Tali idee sono in qualche modo simili a quelle del Pentagono, che vorrebbe creare una "polvere intelligente": miliardi di particelle da diffondere nell'aria, ciascuna dotata di un piccolo sensore e quindi in grado di fare una ricognizione. I singoli sensori non sono

particolarmente intelligenti, ma insieme possono trasmettere una montagna di informazioni. L'agenzia DARPA del Pentagono ha finanziato questo progetto di ricerca per le sue possibili applicazioni in campo militare, per esempio per monitorare le postazioni nemiche in un campo di battaglia. Nel 2007 e nel 2009 l'aeronautica militare statunitense ha comunicato ufficialmente i suoi piani per i prossimi decenni¹³, descrivendo nei particolari ogni tipo di progetto, a partire da una versione avanzata del Predator (che oggi costa 4,5 milioni di dollari al pezzo) fino a sciami di sensori microscopici, più piccoli di una farfalla, che costano solo qualche centesimo.

Anche gli scienziati sono interessati a questo progetto, con cui potrebbero diffondere polvere intelligente per monitorare in tempo reale migliaia di punti diversi dello spazio durante uragani, tempeste, eruzioni vulcaniche, terremoti, inondazioni, incendi forestali e altri fenomeni naturali. Nel film *Twister*, per esempio, una banda di coraggiosi cacciatori di uragani rischia la vita per piazzare dei sensori all'interno di un tornado: una tecnica non particolarmente efficiente. Aniché avere un manipolo di scienziati che piazza alcuni sensori durante un'eruzione vulcanica o un tornado per misurare temperatura, umidità o velocità dei venti, con la polvere intelligente potremmo raccogliere dati nello stesso istante da migliaia di postazioni diverse sparse per centinaia di chilometri. Una volta inseriti in un computer, tali dati potrebbero fornire informazioni tridimensionali e in tempo reale sull'evoluzione di un uragano o di un'eruzione vulcanica. Esistono già iniziative commerciali nate con lo scopo di distribuire sul mercato questi piccoli sensori, alcuni non più grandi della capocchia di uno spillo.

La quantità infinitesimale di carburante necessaria per mandare una nanoastronave nello spazio è un altro punto di forza di questa tecnologia. Al contrario di quanto accade per i giganteschi razzi vettori, che possono raggiungere solo i 40.000 chilometri all'ora, mandare nello spazio questi piccolissimi oggetti a velocità incalcolabili è relativamente semplice. Pensiamo soltanto alla facilità con cui possiamo accelerare le particelle elementari a una velocità prossima a quella della luce utilizzando un semplice campo elettrico: allo stesso modo, queste nanoparticelle hanno una piccola carica elettrica, quindi possono essere accelerate facilmente con i campi elettrici.

Aniché usare risorse enormi per mandare una sonda su un altro pianeta o su un satellite, una singola nanosonda potrebbe avere la capacità di autoreplicarsi, e quindi di costruire un'intera fabbrica o addirittura una base lunare. Queste sonde autoreplicanti potrebbero poi andare in esplorazione in altri mondi. (Il problema è costruire la prima nanosonda capace di riprodursi, un obiettivo ancora lontano.)

La NASA ha preso molto seriamente in considerazione l'ipotesi di inviare sonde robotizzate autoreplicanti, al punto che nel 1980 ha riunito all'Università di Santa Clara una commissione di studio speciale chiamata Advanced Automation for Space Missions. Gli scienziati della NASA coinvolti in questo studio si sono concentrati su diverse possibilità, tra cui l'invio sulla Luna di piccole sonde autoreplicanti. Una volta giunti a destinazione, questi robot avrebbero dovuto usare il suolo lunare per creare un numero illimitato di copie di se stessi.

Nel rapporto della commissione fu dedicato ampio spazio a una descrizione dettagliata della costruzione di un impianto chimico in grado di trasformare le rocce lunari (i cosiddetti *regoliti*). Per esempio, una volta giunto sulla Luna il robot avrebbe potuto smontarsi e riassemblare i propri pezzi così da creare una nuova fabbrica, più o meno come fanno i Transformers. Nello specifico, avrebbe potuto costruire un grande specchio parabolico in grado di concentrare la luce solare e fondere i regoliti. Successivamente, usando dell'acido fluoridrico, avrebbe trattato i regoliti per estrarne metalli e minerali utilizzabili per costruire una base lunare. Infine avrebbe

costruito un piccolo impianto lunare con cui riprodursi.

Basandosi su questo rapporto, nel 2002 l'Institute for Advanced Concepts della NASA ha iniziato a finanziare una serie di progetti incentrati su questi robot autoreplicanti. Mason Peck, della Cornell University, è uno degli scienziati che hanno preso seriamente in considerazione l'idea di un'astronave costruita su un chip. Ho avuto la possibilità di vederlo all'opera nel suo laboratorio, dove ho potuto osservare il suo banco da lavoro carico di componenti che un giorno forse potranno essere mandati in orbita. Proprio a fianco del banco c'era una stanza piccola e vuota, con i muri tappezzati di plastica, in cui venivano assemblati i delicati componenti dei satelliti.

La sua idea di viaggio spaziale è piuttosto diversa da quella che ci viene trasmessa dai film di Hollywood: Peck immagina un microchip da un centimetro e un grammo che possa essere accelerato a una velocità compresa tra l'1 e il 10 per cento della velocità della luce. Per questo scopo lo scienziato vorrebbe servirsi dell'effetto fionda già usato dalla NASA per lanciare alcune navicelle spaziali a una velocità altissima. Questa manovra "sfrutta gravità" consiste nel lanciare l'astronave verso un pianeta, proprio come un sasso con una fionda, e poi usare il campo gravitazionale del pianeta per aumentare la velocità del velivolo. Ma al posto della gravità Peck vuole usare forze magnetiche: una sonda microchip lanciata verso Giove potrebbe sfruttare il campo magnetico del pianeta (ventimila volte più grande di quello terrestre) per ricevere una vera e propria sferzata. In pratica Peck vorrebbe far accelerare le sue nanoastronavi usando le forze magnetiche nello stesso modo in cui vengono utilizzate negli acceleratori per lanciare le particelle subatomiche a trilioni di elettronvolt.

Il modello di chip che Peck mi ha mostrato, e che spera un giorno possa essere lanciato verso Giove, era un quadratino che poteva stare sulla punta di un dito, ma pieno zeppo di circuiti scientifici. L'astronave di Peck sarebbe piuttosto semplice: da un lato del chip c'è un pannello solare per fornire energia ai sistemi di comunicazione, dall'altro ci sono un trasmettitore radio, una videocamera e qualche altro sensore. Il suo dispositivo non ha motore, poiché sarebbe unicamente il campo magnetico di Giove a metterlo in moto. (Sfortunatamente, l'Institute for Advanced Concepts della NASA, che a partire dal 1998 ha finanziato questo e altri progetti innovativi nell'ambito del programma spaziale, è stato chiuso nel 2007 in seguito ai tagli nel bilancio dell'agenzia spaziale.)

Il concetto di nave spaziale di Peck è quindi decisamente lontano da quello che troviamo nei racconti e nei film di fantascienza, dove navi enormi pilotate da un equipaggio di astronauti coraggiosi fluttuano nello spazio. Per esempio, se fosse possibile costruire una base su un satellite di Giove, decine e decine di questi microchip potrebbero essere sparati in orbita intorno al pianeta gigante; e se fosse anche possibile costruire sul satellite una batteria di cannoni laser, potremmo pensare di usare i loro raggi per colpire queste sonde e farle accelerare ulteriormente, fino a portarle a una frazione della velocità della luce.

A quel punto ho chiesto a Peck se pensava fosse possibile usare le nanotecnologie per ridurre il suo chip alle dimensioni di una molecola. Invece di usare il campo magnetico di Giove, in questo modo si potrebbe pensare di portare questi microchip a velocità prossime a quella della luce usando acceleratori di particelle costruiti sulla nostra stessa Luna. Peck ha ammesso che questo sarebbe possibile, ma ha anche confessato di non averci mai lavorato seriamente. Allora abbiamo tirato fuori un pezzo di carta e insieme abbiamo iniziato a sfornare le equazioni necessarie per studiare questo problema. (È così che noi scienziati interagiamo: ci mettiamo davanti alla lavagna o tiriamo fuori un pezzo di carta e cerchiamo di risolvere un problema

studiando le equazioni che lo descrivono.) Abbiamo scritto l'equazione della forza di Lorentz, quella che Peck usa per accelerare i suoi chip attorno a Giove, riducendo però le dimensioni del chip a quelle di una molecola e piazzandolo in un ipotetico acceleratore simile all'LHC del CERN. Abbiamo subito visto che, secondo le equazioni, è possibile accelerare la nanoastronave fino quasi alla velocità della luce, e questo usando solamente un convenzionale acceleratore situato sulla Luna. In pratica, ridurre le dimensioni dell'astronave – un chip che diventa una molecola – ci ha permesso di miniaturizzare anche il nostro acceleratore, non più grande come Giove ma come un tipico acceleratore di atomi. Realizzare quest'idea ci è dunque sembrato possibile.

Ma dopo avere analizzato le equazioni, entrambi ci siamo resi conto che l'unico problema sarebbe stato la stabilità di queste delicate nanoastronavi. C'era infatti il rischio che l'accelerazione potesse ridurle in pezzi. Mano a mano che la velocità di tali molecole sale fino a raggiungere quasi quella della luce, queste verrebbero sottoposte all'azione di forze centrifughe, esattamente come accade a una sfera che facciamo ruotare dopo averla legata all'estremità di una corda. Inoltre, queste nanoastronavi sarebbero cariche elettricamente, e verrebbero fatte a pezzi dalle stesse forze elettriche. Insomma, abbiamo entrambi capito che le nanoastronavi sono sì una possibilità, ma potrebbero essere necessari decenni di ricerca prima di riuscire a ridurre i chip di Peck alle dimensioni di una molecola, e allo stesso tempo a rafforzarne la struttura in modo che non si disintegrino nel momento in cui vengono accelerate a una velocità prossima a quella della luce. Il sogno di Peck è mandare uno sciame di chip verso la stella più vicina, sperando che almeno alcuni sopravvivano al viaggio nello spazio interstellare. Ma che cosa potrebbero fare queste sonde una volta giunte a destinazione?

Il lavoro di Pei Zhang della Carnegie Mellon University vuole proprio rispondere a questa domanda. Zhang ha creato una flotta di minielicotteri che un giorno potrebbero alzarsi in volo su un altro pianeta, e mi ha mostrato con orgoglio gli elementi del suo robosciami, una specie di flotta di elicotteri giocattolo. Ma le apparenze ingannano, poiché all'interno di ciascuno era ben visibile un chip pieno di sofisticati circuiti. Premendo un semplice bottone, Zhang ha liberato nella stanza quattro di questi minielicotteri, che sono immediatamente volati in quattro direzioni diverse e hanno cominciato a inviare informazioni.

Zhang mi ha spiegato che lo scopo di questi sciami di robot è fornire assistenza durante alcuni tipi di emergenze, per esempio gli incendi o le esplosioni, situazioni in cui potrebbero compiere missioni di ricognizione e sorveglianza. Si potrebbe addirittura pensare di montare su questi minirobot delle telecamere o dei sensori di temperatura, pressione, direzione dei venti e così via, tutte informazioni cruciali durante una situazione d'emergenza. Robosciami da migliaia di unità potrebbero venire lanciati su un campo di battaglia, nei pressi di un incendio o persino su una superficie extraterrestre. Le unità sarebbero in grado di comunicare le une con le altre, e nel caso in cui una incontrasse un ostacolo, potrebbe radiotrasmettere l'informazione al resto del robosciami.

Fondendo insieme le idee dei due progetti, quello di Peck e quello di Zhang, potremmo dunque immaginare un viaggio di esplorazione spaziale come il volo di migliaia di chip economici e “a perdere” (quelli creati da Peck) verso una stella vicina a una velocità prossima a quella della luce. Una manciata di questi arriverebbero a destinazione, e una volta vicini alla stella comincerebbero a trasformarsi, facendosi spuntare ali o pale simili a quelle di un elicottero, e

dando vita un robosciami simile alla flotta di Pei Zhang, la quale inizierebbe a mandare informazioni sulla Terra. Dopo avere trovato un pianeta dall'aspetto promettente, si potrebbe inviare una seconda generazione di robosciami con il compito di costruire fabbriche in cui i robot possano riprodursi. Le nuove copie potrebbero quindi spiccare il volo verso la prossima stella e così via, generando un processo che potrebbe durare all'infinito.

Esodo dalla Terra?

È probabile che entro il 2100 saremo riusciti a mandare astronauti sia su Marte sia nella fascia degli asteroidi, e che avremo esplorato le lune di Giove e mosso i primi passi per mandare una sonda verso le stelle. Ma che cosa possiamo dire sul destino dell'umanità? Avremo costruito colonie spaziali che ci permetteranno di alleggerire il carico della popolazione terrestre? La razza umana inizierà a lasciare la Terra entro il 2100?

Direi di no. Considerati i costi, è improbabile che la maggior parte dell'umanità possa salire su un'astronave ed esplorare altri pianeti, nemmeno *dopo* il 2100. Un manipolo di astronauti avrà eretto piccoli avamposti su altri pianeti, ma l'umanità sarà ancora "bloccata" sulla Terra.

La Terra sarà la casa dell'uomo per i secoli a venire, quindi è naturale chiedersi come evolverà la nostra civiltà. In che modo la scienza influenzerà il nostro stile di vita, il nostro lavoro e la nostra società? Se la scienza è il motore della prosperità, come plasmerà le condizioni di vita e il benessere nel futuro?

Capitolo 7

Il futuro della ricchezza

Vincitori e vinti

Tecnologia e ideologia stanno scuotendo le fondamenta del capitalismo del XXI secolo. La tecnologia sta facendo delle capacità e della conoscenza le uniche fonti di progresso sostenibile. Lester Thurow

Nella mitologia l'ascesa o la caduta dei grandi imperi era legata alla forza e alla scaltrezza degli eserciti. Prima di una campagna militare importante i generali dell'impero romano andavano a pregare al tempio di Marte, il dio della guerra. Le gesta leggendarie di Thor erano fonte d'ispirazione per i vichinghi durante le loro eroiche battaglie. E gli antichi erano soliti costruire templi enormi dedicati agli dèi per commemorare le vittorie nelle battaglie contro i nemici.

Se invece analizziamo l'ascesa e il declino delle grandi civiltà del passato da un punto di vista prettamente storico, scopriamo una vicenda del tutto diversa. Immaginiamo un marziano che, arrivato sulla Terra nell'anno 1500, avesse iniziato a osservare le grandi civiltà dell'epoca e si fosse domandato quale, un giorno, avrebbe potuto dominare su tutte le altre. La risposta non sarebbe stata difficile: una qualunque, ma certo non quella europea.

A est avrebbe notato il grande impero cinese, florido da millenni. La lunga lista di invenzioni introdotte dai cinesi non ha eguali: la carta, la stampa, la polvere da sparo, la bussola e molto altro. I suoi scienziati sono indubbiamente i migliori del pianeta.

A sud avrebbe trovato l'impero ottomano, arrivato a un passo dal governare su tutta l'Europa. La grande civiltà musulmana ha inventato l'algebra e ha registrato grandi progressi nel campo dell'ottica, della fisica e dell'astronomia. Presso tale civiltà l'arte e la scienza fioriscono, e niente può opporsi all'avanzata dei suoi eserciti. Istanbul è una delle capitali mondiali del sapere scientifico.

Poi avrebbe visto i poveri paesi europei, tormentati dal fondamentalismo religioso, dalla caccia alle streghe e dall'Inquisizione.

L'Europa occidentale era in fase di declino fin dalla caduta dell'impero romano, avvenuta un migliaio di anni prima, e in quel buco nero della scienza che è stato il Medioevo era rimasta indietro al punto da dover importare la tecnologia. Molte delle conoscenze acquisite durante l'ascesa dell'impero romano erano andate perse e sostituite da rigidi dogmi religiosi, e chi cercava di opporvisi andava incontro alla tortura, se non a qualcosa di peggiore. Come se non bastasse, le città-Stato europee erano continuamente in guerra le une contro le altre. Poi è successo qualcosa. Ma che cosa?

Sia l'impero ottomano sia quello cinese stavano entrando in una fase di stagnazione

tecnologica che sarebbe durata ben cinquecento anni, mentre l'Europa stava abbracciando la scienza e la tecnologia come mai aveva fatto in passato.

Volendo esplorare il mondo, nel 1405 l'imperatore cinese Yongle ordinò la costruzione di una flotta navale enorme, la più grande mai concepita. (Le tre minuscole navi di Cristoforo Colombo avrebbero potuto tranquillamente "parcheggiare" sul ponte di una di quelle colossali imbarcazioni.) Si susseguirono sette spedizioni, ciascuna più maestosa della precedente, durante le quali le flotte navigarono lungo le coste del sud-est asiatico, raggiungendo l'Africa, il Madagascar e probabilmente proseguendo addirittura oltre. Una volta tornate in Cina, le navi portarono in patria un ricco bottino di beni, cibo e animali esotici provenienti dagli angoli più remoti della Terra. (Sculpte antiche e pregiate che raffigurano giraffe dell'Africa sono tuttora in mostra allo zoo della dinastia Ming.)

Tuttavia, i governatori cinesi erano scontenti: "Tutto lì?" pensavano. Davvero il resto del mondo poteva offrire solo cibo esotico e strani animali? Dov'erano i grandi eserciti che avrebbero potuto competere con quello cinese? Fu così che l'interesse dei governatori per le esplorazioni svanì, e la grande flotta cinese, abbandonata a se stessa, andò in rovina e fu bruciata. La civiltà cinese, isolandosi dalle altre, cominciò dunque a ristagnare, e proprio mentre il resto del mondo aveva iniziato a progredire rapidamente.

Anche l'impero ottomano andò incontro a un destino simile. Dopo avere conquistato la maggior parte del mondo allora conosciuto, gli ottomani cambiarono direzione, rifondando la propria società sui dettami del fondamentalismo religioso e dando inizio a un periodo di stasi che sarebbe durata secoli. Mahathir Mohamad, primo ministro della Malesia dal 1981 al 2003, ha dichiarato: «Il declino delle grandi civiltà islamiche ebbe inizio quando gli accademici musulmani iniziarono a interpretare il concetto di acquisizione della conoscenza, così com'era espresso nel Corano, come unicamente riferito alla conoscenza della religione, e a credere che tutto il resto della conoscenza fosse antislamico. Questo cambiamento portò i musulmani a interrompere lo studio delle scienze, della matematica, della medicina e di tutte quelle discipline cosiddette *mondane*. Iniziarono così a trascorrere la maggior parte del tempo a dibattere sulle interpretazioni e sull'insegnamento dell'Islam, sulla legge e sulle pratiche islamiche, il che condusse alla frattura dell'Ummah e alla fondazione di numerose scuole, culti e sette»¹.

Nel frattempo in Europa stava iniziando il grande risveglio. Gli scambi commerciali portavano idee nuove, fresche e rivoluzionarie, la cui diffusione fu accelerata dall'invenzione della stampa da parte di Gutenberg. Dopo un millennio di dominio, il potere della Chiesa cominciò a indebolirsi. Le università iniziarono lentamente a spostare la propria attenzione dall'interpretazione di oscuri passaggi della Bibbia allo studio della fisica di Newton e della chimica di Dalton. Paul Kennedy, storico dell'Università di Yale, ha notato come anche un altro elemento abbia contribuito all'ascesa fulminea dell'Europa: il costante stato di guerra tra le varie potenze europee che, troppo simili le une alle altre, non sono mai state in grado di estendere il proprio dominio a tutto il continente. I sovrani dell'epoca, perennemente in conflitto tra loro, finanziarono la scienza e l'ingegneria per favorire le proprie ambizioni e la conquista di nuovi territori. La scienza non era solo puro esercizio accademico, ma uno strumento per creare nuove armi e nuovi canali attraverso i quali la ricchezza potesse crescere e diffondersi.

Presto i progressi in campo scientifico e tecnologico cominciarono a indebolire lo strapotere della Cina e dell'impero ottomano. La civiltà islamica, che aveva prosperato per secoli, perse il suo ruolo di ponte commerciale tra Oriente e Occidente quando i navigatori europei iniziarono a

tracciare nuove rotte commerciali verso il Nuovo mondo e verso est, dove cominciarono ad approdare circumnavigando l’Africa e tagliando fuori il Medio Oriente. La Cina diventò bersaglio delle navi da guerra europee che, ironicamente, sfruttavano le due maggiori invenzioni cinesi: la bussola e la polvere da sparo.

La risposta alla nostra domanda – cos’è successo? – è quindi chiara. La scienza e la tecnologia hanno bussato alla porta, e come sappiamo scienza e tecnologia generano prosperità. Ovviamente siamo liberi di ignorarle, ma va tutto a nostro rischio e pericolo. Il mondo non si ferma solo perché siamo impegnati a leggere un testo religioso, e se non ci interessiamo alle ultime novità nel campo della scienza e della tecnologia, sicuramente lo faranno i nostri avversari.

Dominare le quattro forze fondamentali

Precisamente com'è successo che l'Europa, ultima della classe, dopo secoli di ignoranza abbia superato all'improvviso la Cina e il mondo islamico? A questo risultato inaspettato hanno contribuito fattori sia sociali sia tecnologici.

Studiando la storia del mondo dopo il 1500 possiamo notare come l'Europa, caratterizzata dal declino del feudalesimo, dall'ascesa della borghesia e scossa dai venti del Rinascimento, fosse pronta a fare un salto in avanti. Fisici e scienziati vedono tali cambiamenti attraverso la lente delle quattro forze che regolano l'universo, con cui possiamo spiegare tutto ciò che ci circonda, dalle macchine ai razzi, alle bombe, alle stelle e allo stesso universo. I cambiamenti della società hanno allestito il palcoscenico della grande transizione che ha portato l'Europa al primo posto tra le potenze mondiali, ma sono state prima la comprensione e poi la padronanza di queste forze ad averla davvero innescata.

La prima è la forza di gravità, quella che ci tiene ancorati al terreno, fa sì che il Sole non esploda e tiene insieme il sistema solare. La seconda è la forza elettromagnetica, che illumina le nostre città e dà potenza ai nostri laser e ai nostri computer. Infine, la terza e la quarta sono le forze nucleari deboli e forti, che tengono uniti i nuclei atomici, generano la luce delle stelle e danno origine alle reazioni nucleari all'interno del Sole. In Europa sono stati svelati i misteri di ciascuna di queste quattro forze.

Ogni volta che i fisici hanno compreso il funzionamento di una di queste regole, la storia dell'umanità è andata incontro a grandi cambiamenti, e l'Europa è sempre stata un terreno particolarmente adatto a sfruttare queste nuove conoscenze. Quando Isaac Newton vide una mela cadere da un albero e poi posò il suo sguardo sulla Luna, si fece una domanda che avrebbe cambiato per sempre la storia del mondo: "Se una mela cade a terra, allora anche la Luna può cadere?". Con un lampo di genio, ad appena ventitré anni Newton capì che la forza che attira la mela a terra è la stessa che agisce sui pianeti e sulle comete nello spazio. Questo gli permise di mettere in pratica la disciplina matematica che aveva appena inventato, il calcolo, per tracciare le traiettorie dei pianeti e dei satelliti e quindi, per la prima volta, descrivere il moto delle sfere celesti. Nel 1687 Newton pubblicò il suo capolavoro, i *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (I principi matematici della filosofia naturale), senza dubbio il più importante libro di scienza mai scritto, nonché tra i più influenti della storia dell'uomo.

Soprattutto, Newton introdusse un nuovo modo di pensare, basato sulla comprensione del moto degli oggetti attraverso l'azione di forze. Da allora non siamo più stati in balia di spiriti, demoni e fantasmi: al contrario, gli oggetti si muovono a causa di forze precise, che siamo perfettamente in grado di definire e misurare. Da qui è nata la meccanica newtoniana, che ha permesso agli scienziati di predire con esattezza il comportamento delle macchine, poi si è arrivati alla nascita del motore a vapore e della locomotiva. Le leggi di Newton permettevano di scomporre sistematicamente l'intricata dinamica delle complesse macchine a vapore bullone per bullone, leva per leva: in pratica, la descrizione di Newton della forza di gravità aprì la strada alla rivoluzione industriale in Europa.

Sempre in Europa, nel XIX secolo Michael Faraday, James Clerk Maxwell e altri scienziati introdussero una rigorosa formulazione matematica per descrivere i principi alla base dei fenomeni regolati dalla seconda grande forza, l'elettromagnetismo, dando così inizio a un'altra

grande rivoluzione. Quando Thomas Edison costruì i generatori alla stazione di Pearl Street in Lower Manhattan, dando per la prima volta corrente a un'intera strada, aprì le porte all'elettrificazione di tutto il pianeta.

Oggi quando scende la notte riusciamo a vedere la Terra dallo spazio, con i continenti interamente illuminati, e un alieno che ci osservasse dall'alto capirebbe immediatamente che noi terrestri abbiamo pieno controllo dell'elettromagnetismo. Ogni volta che c'è un black-out capiamo fino a che punto ne siamo dipendenti: in un istante veniamo catapultati indietro nel tempo di un secolo, senza carte di credito, computer, luci, ascensori, televisori, radio, internet, motori e molto altro.

Gli scienziati europei, infine, hanno compreso e spiegato i processi governati dalle forze nucleari, dando il via a una serie di cambiamenti che hanno influenzato ogni aspetto della nostra vita. Oggi non solo siamo in grado di svelare i segreti dell'universo che ci circonda descrivendo, per esempio, la fonte di energia che alimenta le stelle, ma possiamo addirittura applicare queste nuove conoscenze alla medicina sia per svelare i segreti del nostro "universo interiore", attraverso la risonanza magnetica, la TAC o la PET (*positron emission tomography*, tomografia a emissione di positroni) sia per trarre giovamento, più in generale, dallo sviluppo della medicina nucleare. Le forze nucleari regolano l'immenso potere confinato all'interno dell'atomo, e possono in qualche modo decidere il destino dell'umanità: saremo in grado di comprendere e gestire il potere illimitato della fusione dei nuclei? O siamo piuttosto destinati a perire in un inferno nucleare?

FUTURO PROSSIMO (DA OGGI AL 2030)

I quattro stadi della tecnologia

I cambiamenti della società, insieme alla padronanza delle quattro forze fondamentali, hanno portato l'Europa più avanti rispetto al resto del mondo. Ma le tecnologie sono qualcosa di dinamico, che cambia continuamente: nascono, evolvono, assumono importanza e infine vengono abbandonate in favore di qualcosa di nuovo. E per capire come cambieranno nel prossimo futuro è utile comprendere le precise leggi evolutive a cui obbediscono.

L'uso della carta, lo sviluppo della distribuzione dell'acqua e dell'elettricità e l'avvento dei computer ci hanno mostrato come di solito le tecnologie di massa evolvono lungo quattro fasi fondamentali. Nella prima fase i prodotti della nuova tecnologia sono considerati qualcosa di estremamente prezioso e vengono custoditi gelosamente. Pensiamo per esempio alla carta: quando gli antichi egizi introdussero i papiri, o quando fu inventata dai cinesi, migliaia di anni fa, la carta era così preziosa che un singolo rotolo di papiro era custodito da schiere di sacerdoti. Questa tecnologia all'apparenza così umile è stata uno dei motori trainanti delle antiche civiltà.

La carta entrò nella seconda fase attorno al 1450, con Gutenberg e l'invenzione della stampa a caratteri mobili che rese possibile la diffusione dei "libri personali", cioè di proprietà di una singola persona, che poteva così avere accesso a conoscenze prima contenute in centinaia di manoscritti. Prima di Gutenberg in tutta Europa c'erano solo trentamila libri. Questo numero salì a nove milioni intorno al 1500, alimentando il fermento intellettuale e favorendo l'ingresso dell'Europa nel Rinascimento.

Nel 1930 il costo della carta scese a circa un centesimo di dollaro a foglio, facendole così raggiungere la terza fase, caratterizzata dalla nascita delle "biblioteche personali": centinaia di libri posseduti da un singolo individuo. Da quel momento la carta è diventata un bene comune. Venduta a tonnellate, è ovunque e in nessun luogo, invisibile eppure onnipresente. Oggi siamo nell'ultima fase, la quarta, in cui la carta in sé è una dichiarazione di stile, usata in diversi formati, colori e dimensioni per decorare il mondo. E la maggior parte dei rifiuti urbani è composta proprio di carta, che da bene prezioso custodito gelosamente è diventata spazzatura.

Lo stesso vale per la distribuzione dell'acqua. Nei tempi antichi, durante la prima fase, l'acqua era così preziosa che un singolo pozzo riforniva un villaggio intero, condizione che durò fino ai primi anni del Novecento, quando la diffusione degli impianti idraulici nelle singole case diede inizio alla seconda fase. Dopo la Seconda guerra mondiale l'acqua corrente è diventata economica, un bene a disposizione della classe media in espansione. Oggi la distribuzione dell'acqua ha raggiunto la quarta fase, dettando persino la moda, poiché si propone in diversi formati e in ambiti differenti. Inoltre la usiamo per decorare e abbellire il mondo, costruendo fontane e installazioni con giochi d'acqua.

Anche l'elettricità ha seguito queste quattro fasi. I lavori di Thomas Edison e di altri scienziati dell'epoca aprirono la strada alla prima fase, quando le fabbriche che potevano fare affidamento su una fornitura elettrica erano dotate al massimo di un'unica lampadina e di un motore elettrico. Dopo la Seconda guerra mondiale siamo entrati nella seconda fase, in cui l'elettricità e le forniture elettriche sono diventate qualcosa di personale. Oggi possiamo quasi dire che l'elettricità stia scomparendo. La parola *elettricità* è usata sempre meno nel linguaggio comune, poiché sostituita da altre come *luce*: a Natale, per esempio, decoriamo le nostre case

con centinaia di *luci* lampeggianti. Sappiamo che l'elettricità c'è, è onnipresente, ma è qualcosa che si nasconde nel muro, celata ai nostri occhi. Anche l'elettricità che illumina le strade e decora il mondo è diventata, in un certo senso, una dichiarazione di stile.

Nella quarta fase sia l'elettricità sia l'acqua corrente sono diventate di pubblica utilità. Sono così economiche e ne consumiamo in quantità tali da rendere necessario un contatore in ciascuna casa.

La diffusione dei computer ha seguito lo stesso schema. Alcune aziende l'hanno intuito e hanno saputo trarne profitto, mentre quelle che non hanno saputo approfittarne hanno rischiato la bancarotta. L'IBM, che negli anni Cinquanta ha prodotto i primi elaboratori mainframe, ha dominato la prima fase. Un computer mainframe era molto prezioso, e veniva condiviso da decine di scienziati e ingegneri. Tuttavia i dirigenti dell'IBM non hanno dato la giusta importanza alla legge di Moore, e negli anni Ottanta, quando l'avvento del personal computer ha decretato l'inizio della seconda fase, l'azienda ha rischiato la bancarotta.

Ma anche i produttori di personal computer, compiaciuti del proprio successo, non hanno saputo valutare la portata dell'evoluzione delle loro macchine. Fermi all'idea di un mondo con un personal computer su ogni scrivania, sono stati colti di sorpresa dall'avvento della terza fase e della rete di computer collegati via internet, attraverso cui il singolo utente può interagire con milioni di altre macchine nel mondo. Oggi i computer indipendenti e selgati dalla rete sono solo quelli in mostra nei musei.

E anche i computer sono destinati a entrare nella quarta fase, in cui smetteranno di esistere solo come tali e rinasceranno come "sfoggio di stile", poiché li useremo per arredare le nostre case e i nostri uffici. La stessa parola *computer* cadrà lentamente in disuso. In futuro la maggior parte dei rifiuti urbani non sarà più costituita dalla carta, ma dai microchip. I computer sono destinati a morire e a rinascere come beni di pubblica utilità, com'è successo con l'elettricità e con l'acqua, e gli stessi chip dei personal computer scompariranno presto, poiché ogni computazione avverrà "sulla nuvola". Insomma, l'evoluzione dei computer non è qualcosa di sconosciuto e misterioso, poiché segue una strada ben definita, già tracciata in passato dall'acqua, dalla corrente elettrica e dalla carta.

Ma i computer e internet sono ancora in evoluzione. Quando gli hanno domandato se questa rivoluzione stesse per finire, l'economista John Steele Gordon ha risposto: «Santo cielo, no! Com'è successo in passato per il motore a vapore, ci vorrà ancora un centinaio d'anni prima che faccia completamente il suo corso. Per quanto riguarda internet, siamo allo stesso punto in cui eravamo con le ferrovie nel 1850, cioè appena all'inizio»².

È importante sottolineare che non tutte le tecnologie entrano nelle fasi terza e quarta. La locomotiva ne è un chiaro esempio. Per i trasporti meccanici la prima fase iniziò nei primi anni del XIX secolo con l'avvento della locomotiva a vapore, che permise a un centinaio di persone di condividere lo stesso mezzo. Nei primi anni del XX secolo è subentrata la seconda fase, caratterizzata dall'ingresso in scena della "locomotiva personalizzata", ovvero l'automobile. Ma sia la locomotiva sia l'automobile – in pratica, due scatole che si muovono rispettivamente su rotaia e su ruote – non sono cambiate molto negli ultimi decenni. I motori sono molto più potenti ed efficienti, e lo stesso vale per i sistemi di controllo, ma queste sono solo migliorie, rifiniture.

Quindi le tecnologie che non riescono a entrare nelle fasi terza e quarta vengono semplicemente abbellite: pensiamo per esempio ai chip installati nei mezzi di trasporto per

renderli più “intelligenti”. Alcune tecnologie, come l’elettricità, i computer, la carta o l’acqua corrente, riescono ad arrivare fino alla quarta fase, altre invece si bloccano in una fase intermedia, ma non per questo smettono di evolvere: migliorano progressivamente aumentando la propria efficienza, per esempio attraverso l’aggiunta di componenti elettroniche.

Bolle e crac finanziari: perché avvengono?

Oggi, sulla scia della grande recessione del 2008, capita spesso di sentire alcune voci affermare che il progresso è stato soltanto un'illusione, che dobbiamo ritornare alla semplicità del passato e che il sistema ha intrinsecamente qualcosa di sbagliato.

Guardando alla storia, possiamo individuare i momenti in cui è accaduto l'inatteso, ovvero quando sono apparse bolle finanziarie colossali, poi scoppiate all'improvviso e apparentemente senza motivo. Eventi che sembrano casuali, conseguenza della follia dell'uomo e della volubilità del destino. Storici ed economisti hanno scritto pagine e pagine sulle possibili cause della crisi del 2008, cercando di razionalizzarla imputandola di volta in volta alla natura umana, alla bramosia di denaro, alla corruzione, alla scarsa regolamentazione del mercato e alla debole sorveglianza sulle transazioni finanziarie.

Personalmente, preferisco guardare alla crisi da un punto di vista diverso, analizzandola attraverso la lente della scienza. Nel lungo periodo è infatti la scienza che gioca il ruolo di motore della ricchezza. Come si legge nell'*Oxford Encyclopedia of Economic History*, esistono studi che «attribuiscono il 90 per cento dell'aumento delle entrate in Inghilterra e negli Stati Uniti dopo il 1780 all'innovazione tecnologica, non al semplice accumulo di capitali»³.

Senza scienza saremmo catapultati indietro di millenni, in un passato oscuro. Tuttavia il progresso scientifico non avviene in maniera uniforme, bensì a ondate. Spesso ogni scoperta epocale (per esempio il motore a vapore, la lampadina, il transistor) provoca una cascata di invenzioni secondarie che a loro volta, come un effetto valanga, generano progresso e innovazione. Queste ondate creano una ricchezza notevole, con conseguenze che interessano anche il sistema economico.

La prima grande ondata ha avuto origine con il motore a vapore e l'invenzione della locomotiva. L'energia a vapore è stata alla base della rivoluzione industriale, che di lì a poco avrebbe messo la società completamente a soqquadro, generando ricchezze enormi. Tuttavia nelle società capitalistiche la ricchezza non è mai qualcosa di stagnante, è sempre in movimento: i capitalisti sono costantemente alla ricerca di un cambiamento, di una novità su cui puntare, e in qualunque momento sono pronti a spostare i propri averi su una nuova forma di speculazione finanziaria, talvolta con esiti disastrosi.

Nei primi anni del XIX secolo buona parte della ricchezza accumulata grazie all'invenzione del motore a vapore e alla rivoluzione industriale fu investita nella Borsa di Londra per acquistare titoli di aziende coinvolte nella produzione di locomotive. Dozzine di società legate a questo nuovo mercato fecero il loro ingresso in Borsa, e così si produsse una bolla finanziaria. Virginia Postrel del "New York Times" ha scritto che «un secolo fa le compagnie ferroviarie rappresentavano la metà dei titoli quotati alla Borsa di New York»⁴. Ma la locomotiva era un'invenzione ancora giovane, cosa che rese tale bolla finanziaria non particolarmente stabile. Infatti alla fine scoppiò, generando il famoso crac del 1850, uno dei maggiori collassi finanziari nella storia del capitalismo. A questo seguì una serie di altri minicrac, circa uno per ogni decennio, conseguenza dell'eccesso di ricchezza dovuto alla rivoluzione industriale.

C'è dell'ironia in tutto questo, poiché il periodo d'oro delle ferrovie inizierà solo negli anni Ottanta e Novanta dell'Ottocento. Quindi il crac del 1850 fu causato dalla febbre speculativa conseguente alla ricchezza nata dalle nuove scoperte scientifiche, mentre ci vollero ancora

alcuni decenni prima di assistere al boom di lavoro per la costruzione di reti ferroviarie in tutto il mondo. Come ha scritto Thomas Friedman: «L'America del XIX secolo ha assistito al boom ferroviario, alla relativa bolla finanziaria e al successivo crac. [...] Ma anche quando la bolla è scoppiata, all'America è rimasta una rete di ferrovie che ha permesso viaggi e spedizioni transcontinentali molto più efficienti ed economiche»⁵.

Tuttavia i capitalisti non impararono granché la lezione, e poco tempo dopo diedero nuovamente il via allo stesso ciclo. La rivoluzione elettrica e quella automobilistica, nate rispettivamente dai lavori di Edison e di Ford, generarono una seconda, nuova grande ondata di tecnologia. Sia l'elettrificazione di fabbriche e case sia la diffusione della Ford Model T crearono una notevole ricchezza che doveva essere convogliata da qualche parte. In questo caso confluì nella Borsa degli Stati Uniti e portò alla nascita di una nuova bolla dei titoli automobilistici e delle aziende di servizio pubblico. La gente ignorò la lezione del crac del 1850, che in fondo era avvenuto ottant'anni prima, evidentemente un passato ormai lontano e dimenticato.

Tra il 1900 e il 1925 nacquero ben tremila nuove aziende auto-mobilistiche⁶, un numero che il mercato non era semplicemente in grado di reggere. Proprio com'era avvenuto qualche decennio prima, tale bolla speculativa divenne insostenibile, e per questa e per altre ragioni nel 1929 scoppiò, dando inizio alla Grande depressione. La cosa buffa, in questo caso, è che sia l'elettrificazione dell'America e dell'Europa sia la costruzione di una rete stradale vera e propria avvennero solo negli anni Cinquanta e Sessanta, molto dopo il crac finanziario.

Recentemente abbiamo avuto una terza, grande ondata di progresso scientifico, caratterizzata dall'avvento di high-tech, computer, laser, satelliti, internet e dalla diffusione dell'elettronica. Dovendo incanalarsi da qualche parte, l'incredibile ricchezza generata dalla diffusione delle nuove tecnologie ha trovato sfogo in campo immobiliare, creando una bolla finanziaria enorme. Con il valore degli immobili schizzato alle stelle, le persone hanno cominciato a chiedere prestiti usando la casa come garanzia collaterale, facendone in pratica un vero e proprio salvadanaio. Questo ha accelerato la crescita della bolla, ulteriormente alimentata da banchieri senza scrupoli che hanno iniziato a concedere mutui con estrema facilità. Ancora una volta, le persone hanno ignorato le lezioni dei crac del 1850 e del 1929. Alla fine anche questa bolla speculativa non ha trovato sostegno e ha causato il crac del 2008, nonché il successivo periodo di recessione finanziaria.

Come ha scritto Thomas Friedman: «All'inizio del XXI secolo abbiamo assistito a un boom, a una bolla, e ora al fallimento di questi servizi finanziari. Ma tutto ciò che ne resterà sarà un gruppo di condomini in Florida che non sarebbero mai dovuti essere costruiti e alcuni jet privati che gli ex ricchi non potranno più permettersi, nella speranza che questo segni la fine dell'epoca degli incomprensibili titoli derivati»⁷.

Nonostante l'idiozia collettiva che ha accompagnato il recente crac, anche qui è ironico osservare che il cablaggio e la costruzione di una rete mondiale sono cominciati ben dopo la crisi del 2008. Infatti il culmine della rivoluzione informatica deve ancora arrivare.

Questo ci porta alla prossima domanda: quale sarà la quarta ondata di progresso scientifico e tecnologico? Nessuno può saperlo con certezza. Potrebbe essere una combinazione di intelligenza artificiale, nanotecnologie, telecomunicazioni e biotecnologie. Proprio come nei casi precedenti, potrebbe volerci un'altra ottantina d'anni prima che queste tecnologie siano in grado di produrre una megaondata di ricchezza. E se tutto andrà bene, nel 2090 ci ricorderemo

della lezione imparata ottant'anni prima.

METÀ DEL SECOLO (DAL 2030 AL 2070)

Vincitori e vinti: il mercato del lavoro

L'evoluzione della tecnologia genera cambiamenti drammatici nell'economia, i quali possono portare a vere e proprie fratture sociali. Ogni rivoluzione ha sia vincitori sia vinti, e questa divisione diventerà particolarmente evidente verso la metà di questo secolo. È vero che oggi non troviamo più la figura del maniscalco o dell'arrotino in ogni paese, ma non piangiamo nemmeno troppo la scomparsa di questi mestieri. Possiamo tuttavia chiederci quali attività lavorative prolifereranno verso la metà del secolo, ovvero come il nostro modo di lavorare cambierà con l'evoluzione delle tecnologie.

Per dare una risposta almeno parziale a questa domanda dobbiamo riflettere sui limiti dei robot. Come abbiamo visto, ci sono almeno due grossi ostacoli allo sviluppo dell'intelligenza artificiale: il riconoscimento delle forme e il buon senso. Possiamo quindi dedurre che a sopravvivere saranno principalmente i mestieri che richiedono queste due abilità, e che quindi saranno preclusi ai robot.

Tra i colletti blu, quelli che svolgono mansioni puramente ripetitive, per esempio alle catene di montaggio delle fabbriche automobilistiche, sono destinati a venire rimpiazzati dai robot, che sono perfetti per questo genere di lavori. I computer danno l'impressione di essere macchine intelligenti, ma solo perché sono in grado di far di conto milioni di volte più velocemente di noi. Talvolta dimentichiamo che i computer non sono altro che sofisticatissimi calcolatori, adatti soltanto a svolgere compiti ripetitivi; per questo gli operai delle catene di montaggio sono stati i primi a perderci con la rivoluzione informatica. In sostanza, ogni lavoro manuale che può essere ridotto a una mera successione di istruzioni codificate in un programma è destinato a scomparire.

Tuttavia c'è un'ampia classe di lavori manuali che non solo sopravviveranno alla rivoluzione informatica, ma anzi prospereranno. Mi riferisco a tutte quelle figure professionali il cui lavoro non è meccanicamente ripetitivo e prevede il riconoscimento delle forme: gli operatori ecologici, i poliziotti, i muratori, i giardinieri e gli idraulici, per dirne soltanto alcuni. Tutti questi continueranno ad avere un lavoro. Per poter raccogliere la spazzatura in case e appartamenti diversi, un operatore ecologico dev'essere in grado di riconoscere i sacchi dell'immondizia, buttarli nel camion della raccolta rifiuti e portare il tutto alla discarica, tenendo a mente che diversi tipi di spazzatura richiedono diverse tecniche di smaltimento. Per il muratore, ogni costruzione è diversa dalla precedente, poiché basata su progetti e istruzioni diverse, che di volta in volta richiedono l'utilizzo di strumenti differenti, poiché due cantieri identici semplicemente non esistono. Gli ufficiali di polizia devono analizzare una varietà di crimini commessi in situazioni diverse, e per fare questo hanno bisogno di capire sia il movente di un crimine sia le tecniche usate dal criminale di turno, cosa che va ben oltre le capacità di un computer. Allo stesso modo, un idraulico dovrà avere abilità e strumenti diversi, da sfruttare a seconda del tipo di intervento che deve compiere.

Tra i colletti bianchi, a rimetterci saranno soprattutto gli impiegati che si occupano degli inventari o di "contare i fagioli". I lavori come quelli svolti da agenti finanziari di livello più basso, intermediari, cassieri, contabili e altre figure professionali simili saranno sempre più a rischio: questi mestieri, che secondo alcuni rappresentano "l'attrito del capitalismo", sono

inesorabilmente destinati a scomparire. Pensiamo soltanto a come già oggi sia normale bypassare la figura dell'agente di viaggio e comprare un biglietto aereo via internet, peraltro confrontando diverse opzioni e scegliendo il prezzo più favorevole.

Prendiamo la Merrill Lynch, una delle maggiori banche d'investimento americane. Una volta ha affermato che avrebbe sempre effettuato la compravendita di titoli in maniera tradizionale, senza affidarsi a servizi online. Lo stesso John Steffens, capo intermediario della Merrill, ha detto che «i modelli d'investimento fai da te, incentrati sull'internet trading, dovrebbero essere considerati una seria minaccia per le finanze americane»⁸. Con queste premesse, dev'essere stato piuttosto umiliante per la banca vedersi costretta dalle leggi di mercato ad adottare, nel 1999, l'online trading. Charles Gasparino, giornalista di "ZDNet", ha commentato la notizia facendo notare come «raramente nella storia il leader di un'azienda si è visto obbligato a passare a un nuovo modello di business praticamente da un giorno all'altro»⁹.

Questo significa che anche le piramidi aziendali verranno accorciate, com'è già successo quando la computerizzazione degli uffici ha "fatto fuori" molte figure professionali intermedie: i vertici della piramide potevano trasmettere gli ordini direttamente alla forza vendita e ai rappresentanti sul campo, senza doversi affidare a qualcuno che lo facesse per loro.

L'unica possibilità di sopravvivenza per queste figure intermedie è aggiungere valore al proprio lavoro, mettendo a disposizione uno di quei "beni" che i computer non sono in grado di fornire: il buon senso. Per esempio, è piuttosto probabile che in futuro avremo la possibilità di comprare persino una casa via internet, usando l'orologio, il telefono o le lenti a contatto, ma nessuno deciderà di farlo davvero, poiché comprare casa è una delle operazioni finanziarie più importanti nella vita di una persona. Per gli acquisti importanti vorremo sempre avere la possibilità di parlare con qualcuno che ci possa dire, nel caso di un immobile, se la zona in cui si trova è sicura, se ci sono buone scuole nelle vicinanze, come funziona il sistema fognario e tante altre cose. Insomma, vorremo sempre parlare con un agente qualificato, la cui esperienza e capacità aggiungono valore all'acquisto.

Allo stesso modo, gli agenti di cambio di livello più basso tendono ormai ad essere rimpiazzati dai sistemi di online trading, tuttavia le persone continueranno ad avere bisogno di consigli su come investire il proprio denaro. Quindi anche per gli intermediari di Borsa l'unico modo per non perdere il lavoro è aggiungere valore ai loro servizi, mettendo a disposizione degli investitori la conoscenza diretta del sistema e la saggezza dei migliori economisti e analisti di mercato. In un'epoca in cui l'online trading sta inesorabilmente abbattendo i costi delle transazioni finanziarie, la figura professionale del mediatore sopravviverà solo se sarà in grado di vendere anche le sue qualità impalpabili, come l'esperienza, la conoscenza e la capacità di analisi.

Tra i colletti bianchi, i vincitori saranno dunque quelli capaci di offrire il proprio buon senso, in pratica tutti quelli il cui lavoro implichi in qualche modo un processo creativo. Questo include ogni forma di creatività: creare un'opera d'arte, recitare o raccontare barzellette, ma anche scrivere software, dirigere, analizzare o lavorare in campo scientifico. In altre parole, si tratta di sfruttare tutte quelle qualità che "ci rendono umani".

Gli artisti, infatti, continueranno ad avere un lavoro, poiché internet ha un appetito insaziabile di creatività. I computer vanno bene per replicare le opere d'arte, e possono aiutare gli artisti a migliorare il proprio lavoro, ma non sono assolutamente in grado di ideare nuove opere o forme d'arte. L'arte che ispira, affascina, suscita emozioni ed entusiasmo è qualcosa di irraggiungibile per un computer, poiché queste sono tutte reazioni basate sul buon senso.

Anche scrittori, sceneggiatori e commediografi continueranno ad avere un lavoro. Queste persone devono saper descrivere scene realistiche e credibili, rappresentare i conflitti umani, le vittorie e le sconfitte dell'uomo. Per modellare la natura umana un computer dovrebbe prima poter comprendere le motivazioni e le intenzioni alla base delle sue azioni, e questo non è tra le capacità di una macchina. I computer non piangono e non ridono, non capiscono cosa è divertente e cosa invece è triste, poiché non sono in grado di distinguere le nostre emozioni.

I professionisti coinvolti nelle relazioni umane, per esempio gli avvocati, continueranno ad avere un lavoro. Un avvocato-robot potrebbe rispondere a domande elementari sulle leggi, ma non potrebbe seguire l'evoluzione della legge stessa, che cambia continuamente in base agli slittamenti degli standard sociali e dei costumi. In definitiva, l'interpretazione della legge si riduce all'espressione di un giudizio sui principi e sui valori dell'uomo, cosa per cui i robot sono inadeguati. Se le leggi fossero qualcosa di prestabilito, con un'interpretazione netta, non avremmo bisogno di corti, giudici e giurie.

Un robot non può sostituire una giuria, poiché questa deve rappresentare le idee di un gruppo specifico. Ma tali idee cambiano in continuazione. Per esempio, quando il giudice della Corte Suprema Potter Stewart fu chiamato a definire che cosa fosse la pornografia, non fu in grado di farlo in maniera precisa, e concluse dicendo: «Quando la vedo, la riconosco».

Inoltre, sarebbe probabilmente illegale sostituire il sistema giudiziario attuale con uno basato sui robot. La nostra legge poggia sul principio fondamentale che le giurie siano costituite da nostri pari, e i robot non possono essere considerati nostri pari.

A prima vista le leggi possono sembrare qualcosa di rigoroso e ben definito, con una formulazione netta e precisa e termini dal suono un po' arcaico. Ma è solo apparenza: l'interpretazione di queste definizioni muta in continuazione. Pensiamo per esempio alla Costituzione degli Stati Uniti. Nonostante questo documento sia in linea di principio ben definito, la Corte Suprema è costantemente divisa su questioni controverse, e occupata a reinterpretarne ogni frase o parola. Basta osservare la storia per notare come i valori dell'umanità cambino per loro stessa natura: per esempio, nel 1857 la Corte Suprema degli Stati Uniti stabilì che gli schiavi non sarebbero mai potuti diventare cittadini americani, e ci vollero una guerra civile e la morte di migliaia di persone per revocare quella decisione.

Anche le doti di leadership saranno considerate preziose in futuro. Dirigere significa saper valutare correttamente tutte le informazioni a disposizione, ascoltare diversi punti di vista e soppesare le varie opzioni disponibili, poi scegliere quelle più appropriate per raggiungere determinati obiettivi. Dirigere è complicato di per sé, poiché bisogna saper ispirare e guidare un gruppo di persone, ciascuna con i propri punti di forza e le proprie debolezze. Tutti questi fattori richiedono una comprensione profonda sia della natura umana sia delle forze che regolano il mercato. E questo va decisamente oltre le capacità di qualunque computer.

Il futuro dell'intrattenimento

Interi settori industriali sono profondamente in subbuglio, anche quello dell'intrattenimento. Per esempio, l'industria della musica era da sempre fatta di musicisti che apparivano di fronte al loro pubblico, spostandosi di città in città. Anche teatranti e intrattenitori erano costantemente "on the road". Un giorno mettevano in piedi il loro spettacolo in un posto, e quello successivo lo ripetevano in un altro, spesso nel villaggio vicino: una vita dura con guadagni piuttosto miseri. Questo vecchio schema cambiò rapidamente con l'avvento del grammofono. L'invenzione di Thomas Edison cambiò per sempre il modo di fare musica. All'improvviso un cantante o un musicista poteva registrare le sue opere e venderne milioni di copie, moltiplicando i profitti a livelli prima inimmaginabili. E presto cantanti e musicisti pop sarebbero diventati i nuovi ricchi della società. I giovani iniziarono a idolatrare le pop star, persone che solo una generazione prima avrebbero potuto vivere soltanto come umili camerieri.

Purtroppo l'industria della musica ha ignorato le previsioni degli scienziati, che avevano immaginato il giorno in cui la musica si sarebbe potuta ascoltare e trasmettere facilmente via internet. Anziché gettare le basi per un futuro commercio online, le case discografiche hanno preferito fare causa alle nuove aziende che offrivano musica a un costo minimo rispetto a quello di un CD. Questo atteggiamento è la causa principale dell'attuale tumulto nell'industria musicale. (L'aspetto positivo di tutto questo è che ora artisti semiconosciuti possono balzare al top delle classifiche senza dover affrontare la censura di fatto praticata dalle grandi case discografiche. In passato i magnati dell'industria musicale potevano scegliere chi sarebbe diventato la prossima pop star, ma ora, e tanto più in futuro, le stelle della musica vengono scelte in maniera più democratica, attraverso processi selettivi aperti e guidati sia dalle forze di mercato sia dalle nuove tecnologie.)

Anche il giornalismo sta affrontando lo stesso problema. Di solito le inserzioni pubblicitarie garantivano ai giornali un flusso costante di entrate. La parte maggiore dei guadagni di un quotidiano o di una rivista non proveniva dalla vendita delle copie, ma dagli introiti della pubblicità stampata su quelle stesse pagine. Oggi però possiamo leggere le principali notizie del giorno gratuitamente online e in tempo reale, e allo stesso modo gli annunci economici possono essere pubblicati su scala nazionale su una varietà di siti web. Di conseguenza, i giornali in circolazione stanno subendo tagli drastici in termini sia di formato sia di tiratura.

Ma questo processo non è destinato a durare ancora per molto. Internet è un luogo estremamente "rumoroso", con folle di aspiranti profeti che arringano quotidianamente le loro platee e di megalomani che cercano di promuovere idee decisamente bizzarre. E alla fine questo frastuono spingerà le persone a desiderare qualcosa di nuovo e diverso: la saggezza. Le sparate casuali di blogger deliranti non hanno niente a che vedere con la saggezza, e in futuro le persone, stanche di certi sproloqui, cominceranno a frequentare solo quei pochi siti rispettabili che offriranno loro questo bene prezioso.

Come ha detto l'economista Hamish McRae: «La maggior parte di questa "informazione" è spazzatura, la controparte intellettuale dello spam»¹⁰. Poi ha aggiunto: «La capacità di giudizio continuerà ad essere una merce preziosa, e gli analisti finanziari di successo sono e saranno i ricercatori meglio pagati al mondo».

Matrix

E gli attori di Hollywood? Saranno sempre celebrità internazionali, perennemente sulla bocca di tutti, o si ritroveranno in coda all'ufficio di collocamento? L'animazione computerizzata ha fatto passi da gigante, e ora i personaggi digitali appaiono perfettamente tridimensionali, quasi reali. Ma questo non implica necessariamente che attori e attrici in carne e ossa debbano presto scomparire. Modellare il volto di una persona al computer comporta ancora notevoli difficoltà. Con l'evoluzione gli esseri umani hanno sviluppato la straordinaria capacità di distinguere un volto da un altro. In passato la nostra sopravvivenza dipendeva da questo, poiché in un attimo dovevamo essere in grado di distinguere un amico da un nemico, l'età, il sesso e la forza fisica di una persona, e anche le sue emozioni. Chi non ci riusciva, semplicemente non sopravviveva, quindi non trasmetteva i suoi geni alle generazioni successive. Di conseguenza, il cervello umano è ben allenato a "leggere" le facce altrui.

Per buona parte della nostra storia evolutiva, prima ancora dell'invenzione del linguaggio parlato, noi umani abbiamo comunicato usando il linguaggio del corpo, dedicando buona parte della nostra capacità intellettuale a interpretare le sottili sfumature delle espressioni facciali. Al contrario, i computer hanno seri problemi a elaborare un'animazione realistica del volto umano: basti pensare a quanto è difficile per loro riconoscere dei semplici oggetti. Persino i bambini capiscono immediatamente se la faccia che stanno vedendo sullo schermo è reale o creata al computer. (Questo fenomeno ha origine nel già citato principio dell'uomo delle caverne: se dobbiamo scegliere che cosa guardare, se un film d'azione di successo in cui recita il nostro attore preferito o un cartone animato con grafica digitale, preferiamo il primo.)

Al contrario, modellare il corpo umano al computer è molto più semplice. Di solito a Hollywood si usa una scorciatoia per creare personaggi fantastici o mostri dall'aspetto realistico: un attore indossa una tuta aderente con dei sensori al livello delle articolazioni, e mentre si muove i sensori inviano segnali a un computer, che li usa per creare un personaggio animato che esegua gli stessi movimenti. Tra gli altri, questa tecnica è stata usata nel film *Avatar*.

Una volta ho partecipato a una conferenza sponsorizzata dal Lawrence Livermore National Laboratory, quello in cui vengono progettate le armi nucleari, e durante una cena mi sono ritrovato seduto accanto a uno che aveva lavorato al film *Matrix*. Questa persona mi ha parlato dell'enorme potenza di calcolo che era stata necessaria per creare gli effetti speciali del film, dicendomi che per una delle scene più difficili avevano dovuto ricreare una città immaginaria sullo sfondo di un elicottero in volo. Sebbene con una sufficiente potenza di calcolo si possa ricostruire anche un'intera città, ricreare un volto umano è invece qualcosa che va oltre le capacità di una macchina, mi ha confessato. Quando un viso viene colpito da un raggio di luce, la struttura della pelle fa in modo che questo venga riflesso in tutte le direzioni. Un computer dovrebbe quindi essere in grado di seguire la traiettoria di ogni singola particella di luce; in pratica, ogni punto della pelle del volto di una persona dovrebbe essere descritto attraverso una funzione matematica estremamente complessa: un vero grattacapo per qualunque programmatore.

Allora ho fatto notare a questa persona che quella situazione ricordava molto da vicino le tecniche usate nel mio campo di ricerca, la fisica delle alte energie. In un acceleratore di particelle, infatti, creiamo un fascio di protoni ad altissima energia che, colpendo un bersaglio,

genera una pioggia di detriti che si propaga in tutte le direzioni. Per descrivere tutte le particelle prodotte in questo processo è necessario introdurre una funzione matematica detta *fattore di forma*. Così, un po' scherzando e un po' no, ho domandato al mio interlocutore se ci fosse una relazione tra il modellamento digitale del volto umano e la fisica delle particelle ad alte energie, e lui mi ha risposto che per creare le facce animate che vediamo al cinema si usano le stesse tecniche utilizzate dai fisici! Non mi ero mai reso conto che un giorno le formule arcane usate dai fisici teorici avrebbero potuto risolvere il problema del volto umano digitale. In sostanza, il modo in cui riconosciamo un volto umano è simile alle tecniche usate dai fisici per analizzare le particelle subatomiche!

FUTURO REMOTO (DAL 2070 AL 2100)

Effetti sul capitalismo

Le nuove tecnologie di cui abbiamo parlato finora sono così potenti che entro la fine del secolo avranno un effetto su tutto il sistema capitalistico. Pur essendo basato sulle leggi della domanda e dell'offerta, lo sviluppo della scienza e della tecnologia ha influenzato il capitalismo di Adam Smith sotto diversi aspetti, dalla distribuzione dei beni alla natura stessa della ricchezza. Ecco alcune modalità secondo cui tale influenza si è manifestata.

Il capitalismo perfetto

Il capitalismo di Adam Smith è basato sulle leggi della domanda e dell'offerta, che stabiliscono il prezzo di un bene. Per esempio, se un oggetto è molto richiesto ma scarseggia sul mercato, allora il suo prezzo aumenta. Tuttavia, produttori e consumatori hanno una conoscenza imprecisa e incompleta di tali leggi, tanto che i prezzi possono variare ampiamente da zona a zona. Il capitalismo di Adam Smith era dunque imperfetto, ma in futuro questa situazione cambierà gradualmente.

Il "capitalismo perfetto" si avrà quando sia il produttore sia il consumatore avranno una conoscenza approfondita del mercato, tale che i prezzi verranno determinati "perfettamente". In futuro, per esempio, attraverso le proprie lenti a contatto i consumatori potranno subito accedere a internet e cercare informazioni sul costo e sulle caratteristiche dei prodotti che intendono acquistare. Già oggi siamo abituati a esplorare il web per confrontare i prezzi dei prodotti prima di decidere dove e come comprarli. Attraverso occhiali speciali, schermi o telefoni cellulari, i consumatori del futuro conosceranno tutto di ciascun prodotto. Per esempio, andando a fare la spesa potranno esaminare le merci esposte, e connettendosi a internet con gli occhiali o le lenti a contatto potranno valutare sul momento se i prezzi di quel supermercato sono buoni oppure no.

Tutto andrà a vantaggio del consumatore, che sarà in grado di conoscere all'istante tutte le caratteristiche di un prodotto: provenienza, qualità, convenienza, resistenza e affidabilità.

Anche il produttore avrà un asso nella manica: potrà analizzare i dati di mercato per intercettare i bisogni del consumatore, o fissare il prezzo di una merce in base alle informazioni reperibili su internet, eliminando così ogni possibile errore di approssimazione da parte dei rivenditori. Ma il vantaggio maggiore del "capitalismo perfetto" ricadrà sempre sul consumatore, e il produttore dovrà in qualche modo reagire alla variazione continua della domanda.

Dalla produzione di massa alla personalizzazione di massa

Nel sistema attuale i beni vengono prodotti secondo criteri di massa. Henry Ford una volta ha detto che ogni acquirente avrebbe potuto avere una Model T del colore che preferiva, purché questo fosse stato il nero. La produzione di massa ha fatto scendere drasticamente i prezzi, tanto che il vecchio e inefficiente sistema delle corporazioni e dei prodotti fabbricati a mano è scomparso. Ma la rivoluzione informatica cambierà nuovamente tutto.

Oggi se in un negozio vediamo un vestito di un colore o uno stile che ci piacciono ma della taglia sbagliata, ovviamente non lo compriamo. In futuro, invece, le misure tridimensionali del nostro corpo saranno memorizzate sulla nostra carta di credito o sul telefonino, quindi se troveremo il vestito perfetto ma della taglia sbagliata potremo inviare le nostre misure alla fabbrica di produzione e riceverne uno su misura in pochissimo tempo. In futuro tutto “calzerà a pennello”, perché fatto su misura.

Oggi la personalizzazione di massa non è praticabile, perché i costi di produzione sono ancora così alti da non permettere la creazione di un prodotto diverso per ogni consumatore. Ma quando tutti saranno costantemente connessi a internet – non solo i consumatori ma anche i distributori e i produttori – gli articoli su misura potranno essere fabbricati allo stesso prezzo di quelli prodotti secondo logiche di massa.

La tecnologia di massa come bene di pubblica utilità

Quando una nuova tecnologia si diffonde in maniera capillare, com'è successo con l'acqua corrente o con l'elettricità, è destinata a diventare di pubblica utilità, e soprattutto ad essere venduta come tale. Con il capitalismo che incrementa la competitività e abbassa i prezzi, non saremo più interessati alla provenienza di tale bene o servizio, come invece lo saremo di altri meno diffusi e necessari, ma lo comprenderemo semplicemente perché ne avremo bisogno. Lo stesso ragionamento vale per i sistemi di calcolo. Il *cloud computing*, che si fonda interamente sulla rete, guadagnerà gradualmente popolarità e renderà l'accesso alle risorse informatiche un servizio di pubblica utilità, qualcosa per cui pagheremo solo nel momento in cui ne avremo bisogno, e a cui non baderemo se non ci servirà.

Ma la situazione odierna è assai diversa. La maggior parte di noi lavora, scrive o disegna sul proprio computer da scrivania o portatile, e si collega a internet quando ha bisogno di cercare informazioni. In futuro potremo eliminare gradualmente i computer e accedere ai nostri documenti direttamente su internet, pagando a consumo sia l'accesso sia le risorse informatiche, esattamente come accade per l'acqua o per l'elettricità. Vivremo in un mondo in cui ogni apparecchio, complemento d'arredo o capo d'abbigliamento sarà "intelligente", tanto che potremo rivolgergli letteralmente la parola ogni volta che avremo bisogno di servizi specifici. Schermi e interfacce per navigare in rete saranno ovunque, e mouse e tastiere si materializzeranno all'istante. La funzione sostituirà l'oggetto, e paradossalmente la rivoluzione informatica farà volatilizzare i computer, che andranno "sulla nuvola".

Individuare i potenziali clienti

Da sempre le aziende comprano spazi pubblicitari sui giornali, alla radio o alla televisione senza avere la più pallida idea dell'effetto che le loro inserzioni hanno sulle persone. Possono verificare l'efficacia di una campagna pubblicitaria solo in un secondo momento, osservando un eventuale aumento delle vendite. Al contrario, in futuro le aziende sapranno in tempo reale quante persone avranno visto o sentito parlare dei loro prodotti. Immaginiamo che qualcuno venga intervistato a una stazione radio che trasmette su internet: in questo caso è possibile determinare con precisione quante persone hanno ascoltato la trasmissione, e questo permette alle aziende di creare pubblicità su misura per quel determinato pubblico.

Questo solleva qualche interrogativo legato alla privacy, un tema destinato ad essere sempre più controverso. In passato si temeva che l'avvento del computer potesse rendere possibile il Grande Fratello di orwelliana memoria. Nel suo 1984 George Orwell immagina un regime totalitario che domina su gran parte della Terra, prospettando un futuro infernale in cui chiunque può essere una spia, non esistono più libertà e la vita è una serie infinita di umiliazioni. A un certo punto internet sarebbe potuta diventare un invadente strumento di spionaggio, ma nel 1989, dopo la caduta del blocco sovietico, la National Science Foundation¹¹ ha reso pubblico il progetto, trasformandolo da strumento puramente militare in una rete di università e aziende che ha aperto la strada, negli anni Novanta, all'internet che conosciamo oggi. Gli scenari da Grande Fratello non sono oggi plausibili. Il vero problema è piuttosto il "piccolo fratello", ovvero l'insieme di ficcanaso, squallidi criminali, giornali scandalistici o addirittura corporazioni che usano il *data mining*¹² per scoprire quali sono le nostre preferenze. Come vedremo nel prossimo capitolo, questo è un problema destinato a evolvere nel tempo, ma che non svanirà mai. Quasi certamente, le aziende che creano software per proteggere la nostra privacy e quelle che al contrario cercano di violarla saranno destinate ad azzuffarsi in eterno come cane e gatto.

Dal capitalismo materiale al capitalismo intellettuale

Finora abbiamo discusso solo di come l'innovazione tecnologica cambierà le regole del capitalismo. Possiamo però prevedere che i tumulti conseguenti all'avvento delle nuove tecnologie avranno effetto sulla natura stessa del capitalismo. Le ripercussioni di questa rivoluzione tecnologica si possono riassumere in un concetto: transizione dal capitalismo materiale al capitalismo intellettuale.

Ai tempi di Adam Smith la ricchezza era misurata attraverso il possesso di beni materiali. I prezzi delle merci sono in continua oscillazione, ma negli ultimi centocinquant'anni sono mediamente scesi in maniera stabile. Oggi a colazione mangiamo cibi che solo un centinaio d'anni fa nemmeno il re d'Inghilterra si sarebbe potuto permettere, e frutti e primizie esotiche sono disponibili in ogni supermercato.

La caduta dei prezzi delle merci è dovuta a diversi fattori: migliori tecniche di produzione, di conservazione, di spedizione, di comunicazione e una maggiore competizione sul mercato. A questo proposito pensiamo a Cristoforo Colombo, che ha rischiato la vita per trovare una via più veloce per commerciare le spezie con l'Oriente. Ai suoi tempi le spezie erano estremamente costose, e poiché i frigoriferi non esistevano venivano usate per mascherare il sapore del cibo avariato, allora comune persino sulle tavole di re e imperatori. E non esistevano nemmeno i camion-frigo o i container refrigerati che permettessero di trasportarle in sicurezza per lunghi viaggi attraverso gli oceani. Per questo le spezie, oggi vendute a un prezzo quasi irrisorio, allora valevano così tanto da spingere Colombo a scommettere sulla propria vita, pur di trovare una via più semplice per procurarsele.

Oggi il capitalismo basato sui beni materiali sta per essere sostituito dal capitalismo intellettuale. La ricchezza del futuro sarà costituita da ciò che i robot e l'intelligenza artificiale non potranno mai darci: il riconoscimento delle forme e il buon senso.

Lester Thurow, economista del MIT, ha scritto: «Oggi le conoscenze e la qualificazione professionale restano l'unica fonte di vantaggio comparato. Sono diventate un elemento chiave nel determinare la collocazione delle attività economiche alla fine del xx secolo. Silicon Valley e Route 128 sono dove sono semplicemente perché è lì che si trovano le energie intellettuali necessarie. Non hanno nessun altro merito particolare»¹³.

Perché questo periodo di transizione sta scuotendo le fondamenta del capitalismo? Semplicemente perché il cervello dell'uomo non potrà mai essere prodotto in massa. Al contrario dell'hardware, prodotto in grandi quantità e venduto a tonnellate, le nostre capacità non si possono "produrre" secondo logiche industriali, quindi il buon senso è destinato a diventare la valuta aurea del futuro. A differenza del capitale materiale, per creare un capitale intellettuale è necessario investire sulla persona, aiutarla a crescere, educarla e coltivare i suoi talenti, tutte cose che richiedono decenni di impegno e di sforzi individuali.

Come ha scritto ancora Thurow: «Ora che tutte le variabili relative alla formula della competitività sono state eliminate, l'unica fonte rimasta di vantaggio competitivo utilizzabile nel lungo periodo sono le conoscenze, che tuttavia possono essere utilizzate solo attraverso le capacità professionali dei singoli»¹⁴.

Per esempio, il software sarà sempre più importante dell'hardware. Mentre il prezzo dei chip continuerà a scendere, poiché ne verranno prodotti e venduti a tonnellate, i programmi dovranno

sempre essere scritti “alla vecchia maniera”, cioè da una persona che, seduta alla scrivania, li scrive con “carta e penna”. Il valore di un portatile è di qualche centinaio di euro, ma i file che contiene sull’hard disk, cioè dati, progetti e manoscritti, possono valere anche decine di volte di più. Naturalmente, un software può essere facilmente copiato e riprodotto in serie, ma crearne uno nuovo richiederà sempre il lavoro intellettuale di un essere umano.

Secondo l’economista inglese Hamish McRae: «Nel 1991 la Gran Bretagna è diventata il primo paese a guadagnare più dall’esportazione di beni immateriali (servizi) che da quella di beni materiali»¹⁵.

Mentre gli introiti dell’industria manifatturiera americana sono scesi drammaticamente negli ultimi decenni, quelli del settore legato alle attività intellettuali (Hollywood, l’industria della musica, dei videogames, dei computer, delle telecomunicazioni e così via) sono balzati alle stelle. La transizione dal capitalismo materiale a quello intellettuale sta avvenendo per gradi: è iniziata nel secolo scorso, ma accelera decennio dopo decennio. Thurow ha scritto: «I prezzi delle risorse naturali, al netto dell’inflazione generale, dalla metà degli anni Settanta alla metà degli anni Novanta sono caduti quasi del 60 per cento»¹⁶.

Alcune nazioni hanno compreso più velocemente la portata di questo cambiamento. Pensiamo per esempio al Giappone dell’era postbellica: pur senza grandi risorse naturali, è ora una delle maggiori potenze economiche mondiali. L’attuale benessere del Giappone non è prova di chissà quali ricchezze delle sue terre, ma dell’unità e della laboriosità del suo popolo. Sfortunatamente, molte nazioni non hanno compreso questo dato essenziale, e continuando a basare la propria economia sull’accumulo di beni materiali non stanno preparando i loro cittadini ai cambiamenti che porterà il futuro. Ciò significa che sebbene questi Stati siano ricchi di risorse naturali, la loro l’economia potrebbe presto affondare.

Digital divide?

Alcune persone screditano la rivoluzione informatica affermando che allargherà soltanto il divario tra “digitalmente ricchi” e “digitalmente poveri”, cioè tra quelli che avranno accesso ai computer e alla potenza di calcolo e quelli che invece ne resteranno tagliati fuori. Questa rivoluzione, sostengono i suoi detrattori, inasprirà le fratture della società e produrrà disuguaglianze che potrebbero minarne le fondamenta.

Queste affermazioni nascono però da una visione piuttosto ristretta di un problema reale. Come abbiamo visto, la potenza dei computer in commercio raddoppia ogni anno e mezzo circa, e sia la naturale diminuzione dei prezzi sia lo spirito di emulazione stanno incoraggiando l'uso di internet e dei computer anche tra i bambini più poveri che riescono ad accedervi. Un progetto sperimentale ha usufruito di un fondo speciale per dotare ogni classe di un computer portatile. Purtroppo, nonostante le buone intenzioni, questo esperimento è stato un semifallimento: da un lato, spesso il computer rimaneva inutilizzato in un angolo dell'aula perché lo stesso insegnante non era in grado di usarlo, dall'altro gli studenti avevano già accesso a internet a casa di amici, quindi ignoravano tranquillamente il computer della scuola.

Il problema, quindi, non è l'accesso alle risorse informatiche ma il mercato del lavoro, che sta andando incontro a un cambiamento epocale. In futuro solo le nazioni che sapranno approfittare di questo cambiamento riusciranno a prosperare.

I paesi in via di sviluppo potrebbero usare i beni materiali per costruire una solida base che funzioni da rampa di lancio per la transizione verso il capitalismo intellettuale. La Cina ha già adottato questa strategia con successo: da un lato produce merci distribuite sui mercati di tutto il mondo, ma i proventi di questa attività li investe nella costruzione di un settore basato sul capitalismo intellettuale. Negli Stati Uniti il 50 per cento degli studenti di dottorato in fisica è costituito da stranieri (in buona parte perché il sistema scolastico statunitense non produce un numero sufficiente di studenti qualificati): la maggior parte di loro arriva dall'India e dalla Cina. Dopo avere terminato gli studi, alcuni di questi studenti ritornano in patria, dove fondano nuove imprese.

Lavori di basso livello

La manovalanza di basso livello sarà la prima a risentire della transizione verso il capitalismo intellettuale. Ogni secolo ha assistito alla nascita di nuove tecnologie che hanno dissestato l'economia e la vita delle persone. Per esempio, nel 1850 il 65 per cento della forza lavoro americana era impiegata nell'agricoltura, mentre oggi lo è solo il 2,4 per cento. E in questo secolo accadrà qualcosa di simile in molti altri settori.

Nel XIX secolo l'economia degli Stati Uniti è cresciuta abbastanza in fretta da riuscire ad assorbire la forza lavoro proveniente dai nuovi e abbondanti flussi migratori. A New York, per esempio, gli immigrati potevano trovare lavoro nel settore tessile o nell'industria leggera. L'economia in espansione permetteva a chiunque di avere un lavoro onesto, a prescindere dal livello di istruzione. Era come un nastro trasportatore che prelevava gli immigrati dai ghetti dai bassifondi delle città europee e li catapultava nella prospera classe media americana.

L'economista James Grant ha detto: «La prolungata migrazione di mani e cervelli dai campi alle industrie, agli uffici e alle scuole significa crescita della produttività. [...] Il progresso tecnologico è il baluardo dell'economia moderna. D'altra parte, è stato così negli ultimi duecento anni»¹⁷. Oggi la maggior parte di questi lavori di basso livello è scomparsa. La natura dell'economia è cambiata, e spesso le grandi industrie in cerca di manodopera a basso costo trasferiscono i loro impianti di produzione in altre zone del mondo, dove costa effettivamente meno. I vecchi lavori manuali nelle fabbriche sono ormai praticamente scomparsi.

Ma ci sono vari aspetti da considerare in tutto questo. Per anni le persone hanno chiesto un mercato del lavoro più equo, che non facesse favoritismi o discriminazioni, ma adesso il lavoro può essere delocalizzato facilmente, quindi il principio di equità deve estendersi, per esempio, anche alla Cina e all'India. Infatti, quei lavori di basso livello da cui è nata la classe media americana oggi vengono svolti altrove. Questo è un vantaggio per i lavoratori d'oltreoceano, che possono approfittare di un mercato del lavoro paritario, ma negli Stati Uniti può anche causare la scomparsa di intere città.

Naturalmente, anche i consumatori traggono beneficio da questo trend, poiché la competizione a livello globale ha reso la produzione e la distribuzione di beni e servizi più economiche ed efficienti. Cercare di tenere in piedi attività obsolete e lavori pagati più del dovuto crea solo compiacimento, sprechi e inefficienza. Allo stesso modo, sovvenzionare industrie sull'orlo del fallimento serve soltanto a rimandare l'inevitabile, e probabilmente a rendere il crollo ancora più doloroso.

Ma c'è un altro aspetto curioso. Negli Stati Uniti capita spesso, infatti, che nel settore dei servizi manchino candidati qualificati per lavori di più alto livello e ben pagati. A volte è colpa del sistema educativo, che non è in grado di produrre un numero sufficiente di lavoratori con le conoscenze necessarie a ricoprire incarichi di rilievo, quindi le aziende devono accontentarsi di una forza lavoro non adeguatamente istruita. La scuola non è in grado di far fronte alla richiesta di lavoratori qualificati da parte delle grandi società, e paradossalmente questi posti rimangono vacanti anche in periodi di recessione economica.

Una cosa però è chiara: l'economia postindustriale ha decretato la fine della maggior parte dei vecchi lavori manuali svolti dai colletti blu. Per anni gli economisti hanno giocato con l'idea di "reindustrializzare l'America", poi hanno capito che non è possibile viaggiare indietro

nel tempo riavvolgendo il nastro della storia. Ormai da decenni sia gli Stati Uniti sia l'Europa sono passati da un'economia basata sull'industria a una basata sui servizi. Il culmine dell'industrializzazione è stato raggiunto tempo fa, e quel momento se n'è andato per sempre.

È invece necessario investire forze e capitali in quei settori che alimentano il capitalismo intellettuale. Sarà il compito più complicato che i governi del XXI secolo dovranno affrontare, e non esistono ricette semplici per portarlo a termine. Anzitutto richiede una ristrutturazione del sistema scolastico, sia per consentire ai lavoratori di aggiornarsi e riqualificarsi sia per fare in modo che i neolaureati non finiscano subito a ingrossare le fila dei disoccupati.

Il capitale intellettuale non è costituito solo dai programmatori di software o dagli scienziati, ma è molto più ampio, poiché include tutte quelle attività che richiedono creatività, sensibilità artistica, capacità d'innovazione e di analisi e predisposizione al comando: in breve, buon senso. La nuova forza lavoro dovrà essere istruita ad affrontare, e non a schivare, le sfide che il XXI secolo ci metterà di fronte. In particolare, sarà necessario rinnovare i programmi di studio scientifici e riqualificare gli insegnanti per permettere loro di avere una parte importante nella futura società tecnologica. (Negli Stati Uniti esiste un vecchio modo di dire: «Chi sa, fa. Chi non sa, insegna».)

Come ha affermato l'economista Lester Thurow: «Il successo o il fallimento dipendono dalla capacità da parte di un paese di realizzare adeguatamente la transizione alle industrie ad alto contenuto di energie intellettuali umane del futuro, e non dalle dimensioni di un particolare settore»¹⁸.

Questo significa dare vita a una nuova generazione di imprenditori all'avanguardia che sappiano sfruttare le innovazioni della tecnologia per creare nuove industrie, e quindi nuova ricchezza. È importante liberare l'energia e la vitalità di queste persone, poiché bisogna permettere loro di “iniettare” nuove dinamiche di leadership nel mercato.

Vincitori e vinti: le nazioni

Ad ogni modo, molte nazioni ignorano questa nuova strada delle risorse creative e intellettuali e continuano ad affidarsi al capitalismo dei beni. Ma poiché negli ultimi centocinquant'anni il prezzo medio delle materie prime è inesorabilmente sceso, questi Stati sono destinati a subire una flessione della propria economia e a venire sorpassati dal resto del mondo.

Tuttavia è possibile evitare tale declino. Pensiamo per esempio alla Germania e al Giappone nel periodo postbellico: nazioni senza un governo, con una popolazione ridotta quasi alla fame e le città a un cumulo di macerie, che nell'arco di una generazione sono state capaci di riconquistare una posizione di rilievo nell'economia mondiale. Oppure pensiamo alla Cina odierna e al suo tasso di crescita, che oscilla tra l'8 e il 10 per cento. La sua crescita galoppante ha ribaltato cinquecento anni di declino economico, trasformandola da "moribonda dell'Asia" a nazione che nell'arco di una generazione raggiungerà le maggiori potenze mondiali.

Le società di Cina, Germania e Giappone sono caratterizzate da una popolazione unita e coesa, che ha lavorato sodo per produrre beni che il resto del mondo acquista in massa. Queste nazioni hanno valorizzato l'istruzione, l'unità nazionale e lo sviluppo economico.

Come ha scritto l'economista e giornalista inglese Hamish McRae: «I vecchi motori della crescita – terra, capitale, risorse naturali – non contano più. La terra conta poco perché l'aumento dei raccolti ha permesso di produrre molto più cibo di quanto necessario al mondo industrializzato. Il capitale non conta più perché pagandolo molto caro è quasi infinitamente disponibile grazie agli schemi di guadagno dei mercati internazionali. [...] Questi beni quantitativi, che da sempre hanno reso ricche le nazioni, vengono lentamente sostituiti da una serie di parametri qualitativi che possiamo ricondurre a organizzazione, motivazione e autodisciplina dei loro cittadini. Ne abbiamo conferma osservando come il livello di abilità degli uomini stia diventando sempre più importante nell'industria, nei servizi privati e in quelli pubblici»¹⁹.

Ma non tutte le nazioni sono sulla strada giusta. Alcune sono guidate da leader incompetenti e frammentate sia culturalmente sia etnicamente, al punto da essere disfunzionali e incapaci di produrre merci appetibili per i mercati internazionali. Anziché nell'istruzione, questi leader investono in esercito e armamenti, sperando che terrorizzare la popolazione li aiuti a conservare i loro privilegi. E invece di investire in progetti volti a migliorare le infrastrutture e a dare una spinta all'industrializzazione del loro paese, si abbandonano alla corruzione e impiegano tempo e risorse per mantenere il potere, promuovendo la cleptocrazia a discapito della meritocrazia.

Purtroppo questi governi corrotti hanno dilapidato gli aiuti ricevuti dalle nazioni occidentali, per pochi che fossero. I futurologi Alfred e Heidi Toffler hanno segnalato che tra il 1950 e il 2000 le nazioni ricche hanno donato aiuti ai paesi poveri per un trilione di dollari, sottolineando però che «la Banca Mondiale ha rilevato che circa 2,8 miliardi di persone, quasi la metà della popolazione mondiale, vive ancora con l'equivalente di 2 dollari al giorno, o addirittura meno. Di questi, circa 1,1 miliardi hanno a disposizione meno di un dollaro al giorno e sopravvivono in condizioni di estrema e totale povertà»²⁰.

Naturalmente, anziché fare solo promesse, i paesi industrializzati dovrebbero lavorare più concretamente per cercare di alleviare le piaghe dei paesi in via di sviluppo. Ma a giochi fatti sono i governi di quelle stesse nazioni a doversi assumere la responsabilità di promuovere lo

sviluppo economico. Tutto si riconduce al vecchio detto: «Dammi un pesce e mangerò per un giorno. Insegnami a pescare e mangerò per tutta la vita». Infatti, anziché dare semplicemente aiuti ai paesi in via di sviluppo, bisognerebbe insistere sull'educazione e aiutarli a far nascere e crescere nuove industrie in modo che possano diventare autosufficienti.

Trarre vantaggio dalla scienza

La rivoluzione informatica potrebbe aiutare i paesi in via di sviluppo, che in certi settori potrebbero persino superare quelli industrializzati. Pensiamo per esempio alle compagnie telefoniche, che in passato nei paesi sviluppati hanno dovuto investire risorse enormi per cablare tutte le abitazioni, anche quelle più isolate. Al contrario, non sarà necessario cablare l'intero territorio di una nazione in via di sviluppo: le compagnie telefoniche potrebbero concentrarsi sulla rete mobile, garantendo in maniera semplice la copertura anche alle aree rurali più remote, dove mancano strade e infrastrutture.

Inoltre questi paesi non devono investire per ricostruire infrastrutture ormai vecchie. Pensiamo alle metropolitane di Londra e di New York, che hanno più di un secolo di vita e un gran bisogno di essere ristrutturare. Oggi rinnovare quelle reti ferroviarie costerebbe più che ricostruirle daccapo. Un paese in via di sviluppo potrebbe invece decidere di trarre vantaggio dai recenti progressi dell'ingegneria metallurgica e civile e dalla recente innovazione tecnologica per costruire un sistema ferroviario metropolitano nuovo di zecca, spendendo in proporzione molto meno di quanto sarebbe costato costruire un sistema simile un secolo fa.

Per esempio, quando la Cina ha dovuto costruire una città dalle fondamenta ha imparato la lezione dalle nazioni occidentali, e non ha ripetuto gli stessi errori. Pechino e Shanghai, infatti, sono state costruite spendendo solo una frazione di quanto si è speso per grandi città occidentali. A Pechino è ancora in costruzione una delle reti metropolitane più grandi e tecnicamente avanzate del mondo, poiché la Cina ha saputo trarre beneficio dallo sviluppo della tecnologia informatica occidentale mettendola al servizio della sua popolazione urbana, in continua espansione.

Anche Internet può diventare per questi paesi una scorciatoia verso il futuro, poiché li aiuterebbe a evitare tutti gli errori dell'Occidente, specialmente nel campo della scienza. In passato gli scienziati dei paesi in via di sviluppo dovevano fare affidamento su una rete postale "primitiva" che non facilitava la corretta e veloce distribuzione dei periodici scientifici, che nel migliore dei casi arrivavano mesi, se non un anno, dopo la pubblicazione, e a volte non arrivavano proprio. Inoltre, le riviste scientifiche erano altamente specializzate e costose, tanto che solo le maggiori biblioteche potevano permettersene. E collaborare con uno scienziato occidentale era praticamente impossibile: solo chi proveniva da una famiglia benestante o era estremamente ambizioso poteva sperare di trovare un posto in una università occidentale e lavorare con uno scienziato famoso. Oggi, invece, qualsiasi ricercatore semiconosciuto che viva in qualunque angolo della Terra può leggere un articolo sul web gratuitamente e "in tempo reale", un secondo dopo la sua pubblicazione. E ancora grazie a internet può facilmente collaborare con i colleghi delle università americane o europee senza doverli per forza incontrare di persona.

Il futuro a portata di mano

Il futuro è un libro ancora da scrivere. Come abbiamo accennato, nei prossimi decenni l'era del silicio potrebbe concludersi e il testimone dell'innovazione potrebbe passare a nuove tecnologie, trasformando la Silicon Valley in una nuova Rust Belt. Quali paesi domineranno negli anni a venire? Ai tempi della Guerra fredda le superpotenze erano gli Stati in grado di esercitare un'influenza di carattere militare sul resto del mondo. Il crollo dell'Unione Sovietica ha però mostrato che le uniche nazioni che potranno prevalere sulle altre saranno quelle che, investendo nella scienza e nella tecnologia, riusciranno a costruirsi un'economia solida.

Le nazioni leader di domani saranno quelle che sapranno fare proprie queste considerazioni. Gli Stati Uniti hanno continuato a dominare nella ricerca scientifica e tecnologica nonostante gli studenti americani siano spesso agli ultimi posti nelle graduatorie internazionali delle competenze scientifico-matematiche. Per esempio, nel 1991 gli studenti americani di tredic'anni si sono piazzati quindicesimi in matematica e quattordicesimi in scienze, appena al di sopra degli studenti della Giordania, che si sono piazzati al diciottesimo posto in entrambe le classifiche. Da allora, ogni anno i test non fanno che confermare questi numeri deprimenti. (Dobbiamo però sottolineare che queste posizioni in graduatoria corrispondono più o meno ai giorni passati sui banchi di scuola. Al primo posto c'è la Cina, dove gli studenti trascorrono a scuola mediamente 251 giorni all'anno, mentre negli Stati Uniti appena 178).

Malgrado questi pessimi numeri, "misteriosamente" i risultati della ricerca scientifica e tecnologica statunitense continuano a primeggiare in campo internazionale. Ma il mistero svanisce appena notiamo che la maggior parte del potenziale scientifico degli Stati Uniti arriva da oltremare, attraverso la cosiddetta *fuga dei cervelli*. Gli Stati Uniti hanno un'arma segreta: il visto H1B, anche chiamato *visto del genio*. Se una persona può dimostrare di avere un talento particolare, delle risorse o un'ottima conoscenza scientifica può balzare in cima alle graduatorie per i visti e ottenere un H1B. È così che gli Stati Uniti hanno rinfoltito le fila dei propri scienziati. Per esempio, il 50 per cento di quelli che lavorano nella Silicon Valley sono nati all'estero, principalmente a Taiwan e in India. Nell'università in cui insegno, la City University di New York, la percentuale di stranieri sfiora il 100 per cento.

Alcuni membri del Congresso hanno cercato di eliminare il visto H1B, perché secondo loro è un modo per togliere lavoro agli americani. Ma queste persone non si rendono conto di quanto sia importante questo visto. Non sanno che non ci sono abbastanza candidati nativi statunitensi qualificati per i posti di lavoro di alto livello nella Silicon Valley, che spesso rimangono vacanti. Una situazione analoga si è presentata in Germania quando il cancelliere Gerhard Schröder ha cercato di far approvare una legge sull'immigrazione che prevedeva un visto simile all'H1B, ma la misura non è stata approvata a causa di quelli che si sono opposti dicendo che questo tipo di provvedimento avrebbe tolto lavoro ai tedeschi. Gli immigrati con visto H1B non tolgono il lavoro a nessuno, ma creano industrie interamente nuove da zero.

Tuttavia, l'H1B è solo un tappabuchi. Gli Stati Uniti non possono continuare a vivere di scienziati stranieri, molti dei quali hanno iniziato a tornare in Cina e in India, specie da quando l'economia di questi paesi ha iniziato a crescere. La fuga dei cervelli non è una risorsa sostenibile. Prima o poi l'America dovrà ristrutturare il suo sistema educativo arcaico e sclerotico, che continua a sfornare e a immettere sul mercato del lavoro studenti poco preparati.

I datori di lavoro lamentano che occorre almeno un anno di tirocinio per portare “a regime” i neolaureati assunti, mentre le università sono sovraccariche di lavoro perché devono organizzare molti corsi di recupero per rimediare alle lacune del sistema di istruzione superiore, da cui le nuove matricole provengono.

Le nostre università e aziende fanno quindi un lavoro notevole per riparare i danni della scuola, ma questo comporta uno spreco sia di tempo sia di talento. Per rimanere competitivi anche in futuro, gli Stati Uniti dovranno apportare cambiamenti radicali al sistema scolastico di base e superiore.

Ma dobbiamo essere onesti: vivere negli Stati Uniti comporta vantaggi significativi. Una volta sono stato a un ricevimento al Museo di Storia Naturale di New York, dove ho conosciuto un imprenditore nel campo delle biotecnologie di origine belga. Gli ho domandato come mai se ne fosse andato dal suo paese, visto che l'industria biotecnologica belga è forte e vigorosa, e lui mi ha risposto che in Europa spesso non esiste una seconda opportunità. Mi ha spiegato che la gente conosce te e la tua famiglia, e se fai un errore rischi di essere finito. Non importa dove andrai, i tuoi errori ti seguiranno per sempre. Invece, mi ha detto, negli Stati Uniti una persona può reinventarsi continuamente. Alla gente non importa da dove vieni, a loro interessa solo chi sei e che cosa fai oggi, adesso. Mi ha spiegato che questo è molto incoraggiante, ed il motivo per cui altri scienziati europei si sono trasferiti negli Stati Uniti.

La lezione di Singapore

In Occidente si dice: «La ruota che cigola viene ingrassata». Ma in Oriente si dice: «Il chiodo che sporge viene battuto con il martello». Questi due modi di dire, dal significato diametralmente opposto, riassumono con precisione alcune caratteristiche fondamentali del pensiero occidentale e orientale.

Spesso gli esiti scolastici degli studenti asiatici sono più alti di quelli della loro controparte occidentale. Tuttavia, la maggior parte della conoscenza di questi ragazzi è frutto di un duro lavoro mnemonico sui libri, che non porta molto lontano. Per eccellere nella scienza e nella tecnologia sono necessarie creatività, innovazione e immaginazione, cioè qualità di cui il sistema educativo orientale non si prende cura.

Quindi, sebbene la Cina possa competere con l'Occidente quando si tratta di produrre in serie copie economiche di beni già progettati negli Stati Uniti o in Europa, continuerà a rimanere indietro di decenni nelle attività che richiedono un processo creativo, per esempio l'ideazione di nuovi prodotti e strategie.

Qualche anno fa sono intervenuto in una conferenza in Arabia Saudita a cui ha partecipato anche Lee Kuan Yew, primo ministro di Singapore dal 1959 al 1990 e “rock star” delle nazioni in via di sviluppo, poiché ha contribuito a fondare la moderna Repubblica di Singapore, oggi uno degli Stati più evoluti dal punto di vista della ricerca scientifica. (Se consideriamo il PIL pro capite, Singapore è la quinta nazione più ricca del mondo.) Il pubblico della conferenza ascoltava con estrema attenzione ogni parola pronunciata da questa figura leggendaria.

Lee Kuan Yew ha ricordato i primi giorni dopo la guerra, quando Singapore aveva la reputazione di porto malfamato, conosciuto principalmente per la pirateria, il contrabbando, i marinai ubriachi e altre attività “ripugnanti”. Ma insieme a un gruppo di suoi fedeli Lee Kuan Yew sognava il giorno in cui quel porticciolo avrebbe potuto competere con l'Occidente. Singapore non aveva risorse naturali importanti, ma aveva la sua popolazione, fatta di grandi lavoratori e manovali qualificati. Lee Kuan Yew e compagni s'imbarcarono allora in un viaggio notevole, prendendo quella nazione sperduta e sonnolenta e trasformandola, nel giro di una generazione, in un vulcano di scienza e tecnologia. La trasformazione di Singapore è stata probabilmente uno dei casi di ingegneria sociale più interessanti della storia.

Con il suo partito Lee Kuan Yew avviò una rivoluzione sistematica dell'intera nazione, insistendo sull'importanza della scienza e dell'istruzione e concentrandosi sull'industria tecnologica d'avanguardia. In pochi decenni Singapore riuscì a sfornare una serie di tecnici specializzati che ha permesso alla nazione di diventare uno dei maggiori esportatori di elettronica, prodotti chimici e attrezzature biomediche. Per esempio, nel 2006 il 10 per cento della produzione mondiale di wafer di silicio per i computer è stato prodotto proprio a Singapore.

Lee Kuan Yew ha tuttavia confessato che la modernizzazione di Singapore ha comportato diversi problemi. Per far rispettare l'ordine sociale il governo ha dovuto imporre leggi draconiane, dichiarando illegale ogni cosa che andasse dallo sputare per strada (punibile con le frustate) allo spaccio di droga (punibile con la morte). Questo ha però permesso che i migliori scienziati visitassero Singapore con entusiasmo, cosa che si è rivelata importante per la crescita

del paese, sebbene solo una manciata di loro abbiano deciso di rimanervi. In seguito Lee Kuan Yew ha compreso il motivo di tale fuga: a Singapore non c'erano attrazioni culturali che rendessero il paese stimolante ai loro occhi.

Questo lo portò alla fase successiva, ovvero a finanziare deliberatamente i settori culturali di una nazione moderna (le compagnie di balletto, le orchestre sinfoniche e così via), in modo che i maggiori scienziati fossero invogliati a mettere radici a Singapore. Praticamente da un giorno all'altro sorsero organizzazioni ed eventi culturali, nella speranza di mantenere l'élite scientifica internazionale ancorata al paese.

Kuan Yew si rese anche conto che i figli di Singapore non facevano altro che ripetere le parole dei loro insegnanti, non sfidavano la saggezza convenzionale e quindi non producevano nuove idee. In altre parole, capì che fino a quando i suoi scienziati avessero continuato a copiare gli altri, l'Oriente sarebbe sempre stato il fanalino di coda dell'Occidente. Allora Kuan Yew avviò una rivoluzione del sistema scolastico secondo cui agli studenti creativi sarebbe stato permesso di inseguire i propri sogni al ritmo adatto per loro. Intuendo che un potenziale Bill Gates o Steve Jobs sarebbe stato "soffocato" dal sistema scolastico di Singapore, chiese agli insegnanti di identificare sistematicamente i migliori, "i geni del futuro" che avrebbero potuto rivitalizzare l'economia con la loro immaginazione scientifica.

Ma la lezione di Singapore non è per tutti. Si tratta di una piccola città-Stato, dove un gruppo di visionari ha potuto attuare uno sviluppo controllato della nazione. Altrove non tutti accetterebbero di essere frustati per avere sputato in strada. Tuttavia, mostra che cosa dovremmo fare se volessimo sistematicamente balzare in prima fila nella rivoluzione informatica.

La sfida del futuro

Una volta ho passato un po' di tempo all'Institute for Advanced Study di Princeton, e un giorno ho pranzato con Freeman Dyson. Abbandonandosi ai ricordi, Dyson mi ha raccontato della sua lunga carriera scientifica, e ha accennato a un fatto inquietante. Prima della Seconda guerra mondiale, quando era un giovane studente universitario in Inghilterra, aveva notato che le migliori menti inglesi stavano lentamente abbandonando le scienze "dure e pure" come la fisica e la chimica a favore di discipline che garantissero un immediato ritorno economico in campo bancario o finanziario. Mentre la generazione precedente aveva creato ricchezza sotto forma di impianti elettrici e chimici e inventando nuovi macchinari elettromeccanici, le nuove generazioni aspiravano a maneggiare e gestire il denaro della gente. Secondo Dyson era un segno del declino dell'impero britannico, poiché con una base scientifica vacillante non avrebbe potuto continuare ad essere una potenza mondiale.

Poi Dyson ha detto qualcosa che ha catturato la mia attenzione. Ha affermato che, per la seconda volta nella sua vita, stava assistendo allo stesso fenomeno. Le menti più brillanti di Princeton non stavano più affrontando insidiosi problemi di fisica e matematica, ma erano attratti dalle carriere remunerative nel settore bancario. Secondo Dyson, questo era di nuovo un segno di decadimento della società, i cui leader non erano più in grado di supportare le innovazioni tecnologiche che l'hanno resa grande.

Questa è la nostra vera sfida per il futuro.

Capitolo 8

Il futuro dell'umanità

Una civiltà planetaria

Oggi le persone vivono nel mezzo di quelli che possono essere considerati i tre o quattro secoli più straordinari della storia dell'umanità. Julian Simon

Senza la rivelazione il popolo diventa sfrenato.
Proverbi 29,18

Gli dèi della mitologia vivevano nello splendore divino del cielo, lontano dagli affari dei comuni mortali. Quelli della mitologia greca se la spassavano nei campi celesti del Monte Olimpo, e quelli della mitologia norrena, dopo avere combattuto per l'onore e la gloria eterni, banchettavano insieme agli spiriti dei guerrieri caduti in battaglia nelle sacre stanze del Valhalla. E noi? Se siamo destinati a raggiungere un potere pari a quello degli dèi entro la fine del secolo, che aspetto avrà la nostra civiltà nel 2100? Dove ci stanno portando tutte queste innovazioni tecnologiche?

Tutte le rivoluzioni fin qui descritte ci porteranno a quella che forse possiamo considerare la transizione più importante della storia dell'uomo: la creazione di una civiltà planetaria. Le persone che oggi popolano la Terra sono infatti le più importanti che abbiano mai vissuto sul nostro pianeta, poiché saranno loro a determinare se potremo raggiungere tale obiettivo o se l'umanità dovrà sprofondare nel caos.

Da quando la razza umana ha fatto la sua comparsa sulla Terra, circa cinquemila generazioni di uomini hanno camminato sulla superficie terrestre. Di tutte queste, quella ora in vita deciderà il nostro destino. A meno che a un certo punto non si verifichi una calamità naturale o una catastrofe dettata dalla follia di qualcuno, entreremo inevitabilmente in una nuova fase della nostra storia collettiva. Questo è ancora più evidente se analizziamo l'evoluzione della nostra civiltà dal punto di vista energetico.

Classificare le civiltà

Gli storici analizzano e descrivono la storia attraverso la lente delle esperienze e delle folli gesta dell'uomo, ovvero considerando gli exploit di re e regine, l'ascesa dei movimenti sociali e la proliferazione delle idee.

I fisici, invece, osservano la storia da un punto di vista diverso. Classificano qualsiasi cosa, talvolta anche una civiltà, in base alla quantità di energia che consuma. Applicando questo concetto alla storia dell'uomo, possiamo notare che per millenni il nostro consumo di energia si è limitato a circa un quinto di cavallo vapore, ovvero alla semplice potenza delle nostre mani nude. Per molto tempo abbiamo infatti condotto una vita nomade, raggruppati in piccole tribù itineranti e raccattando il cibo in un ambiente duro e ostile, secondo uno stile di vita pressoché identico a quello dei lupi. A quei tempi non c'erano racconti scritti, ma solo storie tramandate oralmente di generazione in generazione intorno ai fuochi degli accampamenti. La vita era breve e brutale, e raramente si superavano i vent'anni di età. La nostra ricchezza era costituita da ciò che riuscivamo a trasportare durante gli spostamenti. I lancinanti morsi della fame ci assalivano per la maggior parte del tempo, e dopo la nostra morte non rimanevano tracce di quello che avevamo fatto in vita.

Ma diecimila anni fa un evento meraviglioso mise in moto lo sviluppo della civiltà: la fine dell'era glaciale. Non abbiamo ancora compreso del tutto le cause per cui millenni di glaciazioni terminarono quasi all'improvviso, aprendo la strada allo sviluppo dell'agricoltura. Presto fummo capaci di addomesticare cavalli e buoi, aumentando la nostra energia a un cavallo vapore. A quel punto una singola persona aveva a disposizione l'energia sufficiente per coltivare svariati ettari di terreno, e quindi per fornire il surplus di energia necessario per sostenere la popolazione in rapida crescita. Con l'addomesticamento degli animali, gli uomini non dipendevano più dalla caccia, e i primi agglomerati urbani stabili cominciarono a sorgere un po' ovunque.

La ricchezza in eccesso creata dalla rivoluzione agricola generò nuove e ingegnose tecniche per autosostenersi e aumentare il benessere. L'uomo inventò la matematica e la scrittura per tenere il conto di questa ricchezza, e il calendario per stabilire esattamente quando seminare e quando raccogliere. E per conteggiare questo surplus di denaro e tassarlo, apparvero le figure degli scribi e dei contabili. Una situazione che portò alla nascita di regni, eserciti, imperi e schiavitù, cioè delle civiltà del passato.

La transizione successiva ebbe luogo circa trecento anni fa con l'avvento della rivoluzione industriale. All'improvviso la ricchezza accumulata da un individuo non derivava più unicamente dal lavoro delle sue mani o del suo bestiame, bensì dalle macchine, che adesso erano in grado di generare enormi guadagni attraverso la produzione di massa dei beni.

Il motore a vapore poteva muovere potenti macchinari e locomotive, cosicché i campi non furono più l'unica fonte di ricchezza, ma vennero affiancati da stabilimenti industriali, fabbriche e miniere. Gli agricoltori, stanchi delle periodiche carestie e di spezzarsi la schiena lavorando la terra, cominciarono a convergere verso le città, dando origine alla classe operaia. Le tipiche figure del maniscalco e del costruttore di carrozze lasciarono il posto ai lavoratori dell'industria automobilistica. Con l'avvento del motore a combustione interna, una singola persona aveva ora a disposizione centinaia di cavalli vapore di energia. L'aspettativa di vita

negli Stati Uniti cominciò ad aumentare, raggiungendo i quarantanove anni nel 1900.

Infine abbiamo raggiunto una terza fase evolutiva, in cui la ricchezza è prodotta dall'informazione. Oggi il benessere di una nazione si misura sugli elettroni che circolano nel mondo attraverso cavi a fibre ottiche e satelliti, per poi apparire sugli schermi dei computer di Wall Street e delle altre capitali mondiali della finanza. La scienza, il commercio e l'intrattenimento viaggiano alla velocità della luce, dandoci accesso in ogni luogo e in ogni momento a una quantità pressoché illimitata di informazioni.

Civiltà di tipo I, II e III

In che modo quest'ascesa esponenziale del consumo energetico continuerà nei secoli e millenni a venire? L'analisi delle civiltà e la loro classificazione in base all'energia che consumano fu introdotta per la prima volta nel 1964 dall'astrofisico russo Nikolai Kardashev, che era interessato a scandagliare il cielo notturno alla ricerca di segnali inviati da civiltà aliene tecnologicamente avanzate.

Non soddisfatto del nebuloso e indefinito concetto di *civiltà extraterrestre*, Kardashev ha introdotto una scala quantitativa per guidare il lavoro degli astronomi. L'astrofisico ha compreso che, se da un lato le civiltà extraterrestri potevano differire tra loro per cultura, società e governo, dall'altro una cosa le accomunava: le leggi della fisica. E dalla Terra l'unica cosa che potevamo osservare e misurare ai fini di una classificazione di tali civiltà era il loro consumo energetico.

Kardashev propose dunque un modello teorico costituito da tre tipi di civiltà: le civiltà di tipo I, cioè quelle planetarie, che consumano solo le frange della luce solare che colpisce il loro pianeta, un'energia pari a circa 10^{17} watt; le civiltà di tipo II, quelle stellari, che consumano tutta l'energia emessa dal loro sole, ovvero circa 10^{27} watt; infine, le civiltà di tipo III, ovvero quelle galattiche, che consumano l'energia di miliardi di stelle, pari a circa 10^{37} watt.

Questa classificazione ci permette di quantificare in maniera definita il potere di ogni civiltà, evitando generalizzazioni imprecise e bizzarre. Poiché conosciamo l'output energetico degli oggetti celesti, scrutando il cielo possiamo applicare a ciascuno vincoli numerici ben precisi.

I tre tipi di civiltà si distinguono per un fattore pari a 10 miliardi: quella di tipo III consuma 10 miliardi di volte più energia di quella di tipo II (poiché in una galassia ci sono circa 10 miliardi di stelle), che a sua volta consuma 10 miliardi di volte più energia di quella di tipo I. Secondo questi parametri, la nostra civiltà attuale non rientra nemmeno in tale scala. Infatti, la nostra è una civiltà di tipo 0, poiché prendiamo energia da cose morte, cioè petrolio e carbone. (Carl Sagan ha generalizzato questa classificazione e ha stimato in maniera più precisa la nostra posizione nella scala cosmica: i suoi calcoli hanno mostrato che in realtà siamo una civiltà di tipo 0,7.)

Possiamo anche usare questa scala per classificare le civiltà protagoniste della fantascienza. Per esempio, due tipiche civiltà di tipo I sono quelle di Buck Roger e di Flash Gordon, in cui tutte le risorse energetiche del pianeta sono state sfruttate, e dove è possibile controllare e modificare il tempo atmosferico, imbrigliare il potere degli uragani e costruire città sugli oceani. Sebbene i loro membri possano viaggiare nello spazio con i razzi, le loro risorse e il loro output energetico sono destinati a soddisfare le esigenze del pianeta.

Una civiltà di tipo II potrebbe includere la Federazione dei Pianeti Uniti di *Star Trek* (escludendo però la propulsione a curvatura), capace di colonizzare un centinaio di stelle vicine. La loro tecnologia è a malapena in grado di controllare l'energia totale emessa da una singola stella.

L'impero della saga di *Guerre stellari* potrebbe invece essere una civiltà di tipo III, e forse anche i borg di *Star Trek*: entrambi hanno colonizzato vaste porzioni di una galassia, tanto da comprendere miliardi di sistemi stellari. Inoltre possono tranquillamente viaggiare lungo le

“autostrade” spaziali.

Nonostante scala di Kardashev sia basata su pianeti, stelle e galassie, dobbiamo menzionare anche la possibile esistenza di una civiltà di tipo IV, capace di trarre energia da fonti extragalattiche. L'unica fonte di energia nota al di fuori della nostra galassia è quella oscura, che costituisce circa il 73 per cento dell'energia e della materia totali dell'universo conosciuto, mentre l'insieme di stelle, galassie e pianeti è pari solo al 4 per cento dell'universo. Un possibile candidato a civiltà di tipo IV è rappresentato dai Q di *Star Trek*, entità simili a dèi il cui potere ha origini extragalattiche.

Possiamo perfino usare questa classificazione per calcolare quando anche noi potremo evolvere in ciascuno di questi tipi di civiltà. Basandoci su una crescita del prodotto interno lordo mondiale pari all'1 per cento – una media ragionevole, se ci rifacciamo ai secoli passati –, sono necessari circa duemilacinquecento anni per evolvere da un tipo a quello successivo. Un tasso di crescita del 2 per cento significherebbe invece un periodo evolutivo dimezzato, cioè circa milleduecento anni.

Ma possiamo anche calcolare in quanto tempo il nostro pianeta diventerà di tipo I. Malgrado i periodi di recessione e di boom, considerando un tasso di crescita economica medio possiamo stimare matematicamente che raggiungeremo la posizione di civiltà di tipo I entro un centinaio d'anni circa.

Dal tipo 0 al tipo I

Ogni volta che apriamo un giornale abbiamo le prove dell'evoluzione da civiltà di tipo 0 a civiltà di tipo I. Spesso i titoli che leggiamo raccontano il travaglio di una società di tipo I che sta nascendo proprio di fronte ai nostri occhi.

- Internet è il primo passo verso la costruzione di un sistema telefonico planetario di tipo I. Per la prima volta nella storia possiamo scambiare in tempo reale una quantità illimitata di informazioni con qualcuno che si trova in un altro continente. Alcuni si sentono persino più vicini a una persona che vive all'altro capo del mondo piuttosto che al proprio vicino di casa. Questo fenomeno è destinato a crescere mano a mano che le nazioni lanceranno nuovi satelliti per le telecomunicazioni e installeranno nuovi collegamenti a fibra ottica. Tale processo è anche impossibile da fermare: per esempio, se il presidente degli Stati Uniti proibisse l'uso di internet verrebbe soltanto deriso. Oggi nel mondo c'è più o meno un miliardo di computer, e circa un quarto dell'umanità ha navigato su internet almeno una volta nella vita.
- Una manciata di lingue sta emergendo (prima tra tutte l'inglese, seguita dal cinese), e saranno le future lingue di tipo I. Il 29 per cento dei navigatori del web si collega a siti in inglese, seguito da un 22 per cento che si collega a quelli in cinese, l'8 per cento a quelli in spagnolo, il 6 per cento a quelli in giapponese, il 5 per cento a quelli in francese. Di fatto l'inglese è già la lingua mondiale della scienza, della finanza, degli affari e dell'intrattenimento, e inoltre è la seconda lingua parlata dalle persone di tutto il pianeta. L'inglese è lingua franca ovunque: in Asia, per esempio, in un'ipotetica riunione tra vietnamiti, cinesi e giapponesi si parlerebbe inglese. Secondo Michael E. Krauss, che in passato ha lavorato al Native Language Center dell'Università dell'Alaska, il 90 per cento delle circa seimila lingue parlate oggi sulla Terra è destinato a estinguersi nei prossimi decenni. La rivoluzione delle telecomunicazioni sta accelerando questo processo, poiché ora anche le persone che vivono negli angoli più remoti del pianeta sono esposte all'inglese. Tale processo sta anche migliorando lo standard di vita e incrementando le attività economiche di queste società, che grazie a una maggiore integrazione nell'economia mondiale stanno accelerando il proprio sviluppo. Alcuni denunciano che le lingue di origine antica non verranno più parlate, ma la stessa rivoluzione informatica ci garantisce che invece non verranno dimenticate: i suoi parlanti potranno infatti registrare su internet la propria lingua e gli aspetti della propria cultura in forma scritta e orale, in modo che possano essere ricordate per sempre.
- Siamo testimoni della nascita di un'economia planetaria. La crescita dell'Unione Europea e di altri blocchi commerciali ci sta infatti mostrando la nascita di un'economia globale di tipo I. Storicamente, per migliaia di anni le popolazioni europee hanno combattuto contro i loro vicini in faide sanguinarie. Queste tribù hanno continuato a scontrarsi e a sottomettersi le une con le altre anche dopo la caduta dell'impero romano, dando infine vita alle nazioni europee. Solo negli ultimi decenni la competizione con quel bestione economico che è il NAFTA (North American Free Trade Agreement, Trattato Nordamericano per il Libero Commercio) ha costretto gli Stati europei a mettere da parte le antiche rivalità e a riunirsi sotto forma di Unione Europea. Con il tempo sempre più paesi si accorgeranno che l'unico modo per avere un ruolo competitivo nei mercati mondiali è entrare a far parte dei grandi blocchi economici.

Una prova di questo trend verso un'economia globale è la grande recessione del 2008, quando nel giro di pochi giorni l'onda d'urto generata da Wall Street si è propagata fino ai templi della finanza di Londra, Tokyo, Hong Kong e Singapore. Oggi non è possibile capire l'economia di una singola nazione senza considerare le tendenze dell'economia mondiale.

- La nascita di un nuovo ceto medio planetario – milioni di persone in Cina, India e altre nazioni – sta probabilmente dando vita al maggiore sconvolgimento sociale dell'ultimo mezzo secolo. Questa ampia fascia di popolazione è consapevole delle tendenze economiche, culturali ed educative che influenzano il pianeta, e piuttosto che a guerre, religioni o codici morali, le persone che vi fanno parte sono interessate alla stabilità politica e sociale del pianeta, nonché ai beni di consumo. Le passioni di carattere ideologico e tribale, tanto importanti per i loro predecessori, ora significano poco o nulla per loro, che ora vorrebbero soltanto possedere una bella casa in periferia e un paio di automobili. Mentre i loro antenati celebravano il giorno in cui i loro figli partivano per la guerra, oggi una delle loro maggiori preoccupazioni è garantire ai ragazzi l'iscrizione a una buona università. E alcuni osservano con invidia l'ascesa di altri, domandandosi quando verrà il loro momento. Kenichi Ohmae, ex partner della McKinsey & Company, ha scritto: «Le persone cominceranno inevitabilmente a guardarsi intorno e a chiedersi perché non possono avere quello che hanno gli altri. Allo stesso modo, si domanderanno perché non hanno potuto averlo in passato»¹.
- L'economia si è sostituita agli armamenti come parametro di superpotenza. L'ascesa dell'Unione Europea e del NAFTA mostrano come, dopo la fine della Guerra fredda, il potere economico sia l'unico mezzo che permette a una nazione di mantenere una posizione dominante. Una guerra nucleare sarebbe troppo rischiosa per tutte le parti in gioco, quindi è attraverso il potere economico che si deciderà il destino delle nazioni. Uno dei fattori che hanno determinato la caduta dell'Unione Sovietica è stato proprio lo stress economico dovuto alla competizione in campo militare con gli Stati Uniti. (Come hanno osservato i consiglieri del presidente Ronald Reagan, la strategia degli Stati Uniti prevedeva di causare una crisi economica in Russia: gli americani hanno quindi aumentato le spese militari e i russi, la cui ricchezza economica era circa la metà di quella statunitense, dovettero affamare la popolazione per riuscire a stare al passo.) È chiaro che in futuro una nazione potrà mantenere il suo status di superpotenza solo attraverso il potere economico, che a sua volta nasce dallo sviluppo scientifico e tecnologico.
- Sta emergendo un nuovo tipo di cultura planetaria basata su quella giovanile (rock 'n' roll e moda giovane), sui film (block-buster di Hollywood), sull'alta moda (beni di lusso) e sul cibo (catene di fast food presenti ovunque). In qualunque parte del mondo ci troviamo, siamo sempre circondati dalle stesse tendenze culturali nel campo della musica, dell'arte e della moda. Per esempio, quando Hollywood deve valutare se un suo prodotto avrà successo o meno, è sempre molto attenta a considerarne gli effetti a livello mondiale. In particolare, le pellicole che trattano temi trasversali (film d'azione o romantici), in cui recitano attori di fama internazionale e sono fonte di guadagni enormi, sono la prova della nascita di una cultura condivisa a livello planetario.

Questo fenomeno è iniziato dopo la Seconda guerra mondiale, quando per la prima volta nella storia dell'umanità un'intera generazione di giovani aveva a disposizione entrate economiche sufficienti a innescare un cambiamento nella cultura dominante. Prima i bambini venivano mandati a sgobbare nei campi con i genitori appena entravano nella pubertà (questo è all'origine dei tre mesi di vacanze estive: durante il medioevo i bambini dovevano andare a

spaccarsi la schiena nei campi appena avevano l'età giusta per farlo), ma con la crescita e il benessere la generazione nata dopo la guerra ha abbandonato i campi e ha imboccato le strade verso le città. Oggi lo stesso fenomeno si ripresenta, nazione dopo nazione, ogni volta che l'economia di un paese mette nelle tasche dei giovani denaro da spendere nell'intrattenimento, nella moda e così via. Questa cultura giovanile planetaria è destinata a perpetuarsi con la crescita della classe media mondiale, poiché i guadagni dei padri filtreranno naturalmente verso i figli. La musica e il cinema di Hollywood sono i primi esempi di come il capitalismo intellettuale stia sostituendo quello materiale. Nei decenni a venire i robot e i computer continueranno ad essere incapaci a comporre musica o girare film di successo internazionale.

Questo fenomeno interessa anche il mondo della moda, in cui una manciata di marchi si sta diffondendo su scala mondiale. Un tempo appannaggio dell'aristocrazia e delle persone estremamente ricche, l'alta moda sta ora proliferando in tutto il mondo, poiché sempre più persone che entrano nel ceto medio vogliono provare, almeno in parte, il fascino del lusso e della ricchezza. L'alta moda, dunque, non è più riservata a un'élite privilegiata.

Tuttavia, questo non significa che le culture e le abitudini locali siano destinate a scomparire. Al contrario, le persone avranno una doppia cultura: da un lato manterranno vive le loro tradizioni indigene (la stessa internet ne garantisce la sopravvivenza e la diffusione), dall'altro si muoveranno con agio tra i cambi di tendenza della cultura globale. In futuro la ricca diversità culturale presente nel mondo continuerà a prosperare, e persino alcune oscure e circoscritte tradizioni locali potranno circolare nel mondo grazie alla rete. Ma allo stesso tempo le persone con un diverso retaggio culturale comunicheranno tra loro attraverso la cosiddetta *cultura globale*. Tale fenomeno è già ampiamente diffuso tra le diverse élite del pianeta: molti parlano la lingua del luogo in cui vivono e agiscono secondo usanze proprie, ma quando devono interagire con persone di altri paesi sanno comunicare in inglese e adattarsi ai costumi internazionali. Queste persone sono il modello della nascente civiltà di tipo I.

- L'informazione sta diventando globale. Le televisioni via satellite, gli smartphone e internet impediscono ormai a qualunque nazione di filtrare e controllare completamente le notizie. Sempre più spesso riprese amatoriali riescono a eludere le maglie della censura, e quando in un paese scoppia una rivoluzione o una guerra immagini nude e crude vengono trasmesse in tutto il mondo praticamente in tempo reale. Le grandi potenze del XIX secolo non incontravano particolari difficoltà quando dovevano imporre il loro volere e manipolare le notizie, ma oggi, grazie ai progressi della tecnologia, questo è possibile solo su scala ristretta. Inoltre, il maggiore livello d'istruzione generale ha portato un numero crescente di persone a interessarsi di notizie e fatti accaduti in tutto il pianeta. Quando pensano alle possibili conseguenze delle proprie azioni, i politici di oggi devono dunque tenere conto di un'opinione pubblica sempre più informata.
- Lo sport, un tempo fondamentale per forgiare prima lo spirito tribale, poi quello nazionale, sta ora contribuendo a far nascere un'identità globale. In particolare, il calcio e gli sport olimpici hanno una parte sempre più importante a livello mondiale. Le olimpiadi del 2008, per esempio, sono state accolte un po' ovunque come la grande occasione dei cinesi, che potevano debuttare sul palcoscenico internazionale e affermare la propria posizione culturale nel mondo dopo secoli di isolamento. Anche questo è un caso esemplare del principio dell'uomo delle caverne, poiché gli sport coinvolgono la dimensione emotiva della persona,

ma cominciano a fare sempre più uso di tecnologie avanzate.

- Le minacce ambientali sono analizzate e discusse su scala globale. Le nazioni hanno capito che l'inquinamento del proprio territorio ha effetti che vanno ben oltre i problemi locali, poiché contribuiscono alla crisi ambientale dell'intero pianeta. Per esempio, abbiamo osservato questo fenomeno quando si è aperto un gigantesco buco nello strato di ozono dell'atmosfera in corrispondenza del Polo Sud. Poiché lo strato di ozono limita le quantità di radiazioni X e UV, pericolose per l'uomo, che dal Sole giungono sulla superficie terrestre, i governi hanno deciso di limitare la produzione e il consumo di clorofluorocarburi usati sia nei sistemi di refrigerazione sia nell'industria.

Nel 1987 è stato firmato il protocollo di Montreal, e l'uso di sostanze chimiche pericolose per l'ozono è diminuito negli anni successivi. Dopo questo successo internazionale, per affrontare il problema del riscaldamento globale – minaccia ben più seria per l'ambiente – nel 1997 molti paesi hanno sottoscritto il Protocollo di Kyoto.

- Il turismo è uno dei settori oggi in rapida crescita. Ripercorrendo a ritroso la storia dell'uomo, per molto tempo le persone hanno vissuto la maggior parte della propria vita nell'arco di pochi chilometri, nel luogo in cui sono nati. Le persone non entravano quasi mai in contatto con altre realtà, quindi erano facilmente manipolabili da governanti senza scrupoli. Oggi invece è possibile andare dall'altra parte del mondo senza spendere cifre eccessive. I leader di domani saranno probabilmente i giovani che oggi viaggiano con lo zaino in spalla e dormono negli ostelli della gioventù. Alcuni lamentano che i turisti hanno solo una conoscenza superficiale della cultura, della storia e della politica del paese che visitano. Ma dobbiamo considerare questo aspetto alla luce di quanto accadeva in passato, quando i contatti tra culture anche vicine erano pressoché inesistenti, a parte ovviamente durante i periodi di guerra.
- Allo stesso modo, il calo dei prezzi dei voli intercontinentali sta aumentando i contatti tra persone appartenenti a culture diverse, quindi sta contribuendo a diffondere la democrazia e a ostacolare le guerre. L'incomprensione tra i popoli era una delle cause principali dello scontro violento tra nazioni, poiché in generale è difficile dichiarare guerra a uno Stato se conosciamo profondamente la sua gente.
- Questa nuova realtà sta cambiando anche la natura stessa della guerra. La storia dimostra che raramente due democrazie si sono dichiarate guerra. Quasi tutte le guerre del passato scoppiavano tra Stati non democratici, o tra una democrazia e uno Stato non democratico. In generale, i demagoghi che demonizzano il nemico possono facilmente aizzare i fuochi della guerra, ma questo non avviene in una democrazia che abbia organi di stampa attenti e reattivi, partiti d'opposizione e una classe media che in una guerra ha tutto da perdere. Insomma, è difficile coltivare la febbre della guerra quando ci sono sia una stampa scettica sia madri che vogliono sapere perché i loro figli dovrebbero andare in battaglia. Tuttavia, in futuro scoppieranno altre guerre. Come ha scritto il teorico militare prussiano Carl von Clausewitz nel suo *Della guerra*: «La guerra non è che la continuazione della politica con altri mezzi». Assisteremo ancora alle guerre, ma la diffusione della democrazia ne sta modificando la natura.

(C'è un altro motivo per cui oggi, con un mondo sempre più ricco e persone che hanno molto da perdere, dichiarare guerra è ogni giorno più complicato. Il teorico della politica Edward Luttwak ha scritto che questo è dovuto al fatto che oggi le famiglie sono più piccole rispetto al passato. Una volta ogni famiglia aveva in media una decina di figli: il più vecchio

ereditava i possedimenti paterni, mentre i fratelli più giovani diventavano membri della Chiesa, militari o cercavano fortuna altrove. Oggi, con una media di un figlio e mezzo per famiglia, non c'è più quell'eccesso di bambini che un tempo permetteva di rinforzare le fila dell'esercito o del clero. Questo è vero soprattutto se pensiamo a un ipotetico conflitto tra un paese democratico e i movimenti di guerriglia dei paesi del terzo mondo.)

- Le nazioni s'indeboliranno, ma nel 2100 esisteranno ancora. Saranno sempre necessarie per promulgare le leggi o risolvere i problemi locali, ma quando i motori della crescita economica evolveranno da nazionali a continentali e poi a globali, il loro potere e la loro influenza saranno inesorabilmente destinati a diminuire. Per esempio, verso la fine del XVIII secolo e i primi anni del XIX l'ascesa del capitalismo indusse le nazioni a imporre sul proprio territorio una valuta e una lingua comuni, leggi fiscali condivise e una disciplina per il commercio e l'assegnazione dei brevetti. Le leggi e le tradizioni feudali intralciavano lo sviluppo del libero scambio, del commercio e della finanza, quindi furono abolite dai governi nazionali.

Questo processo, che in condizioni normali sarebbe durato almeno un secolo, subì un'impennata grazie a Otto von Bismark, il *cancelliere di ferro*, che nel 1871 creò la Germania moderna. Allo stesso modo, la nostra marcia verso una civiltà di tipo I sta cambiando la natura del capitalismo stesso, con il potere economico che passa gradualmente dai governi nazionali alle potenze e ai blocchi economici continentali.

L'evoluzione verso una civiltà planetaria non comporta necessariamente la nascita di un governo mondiale. Ovviamente, alcuni governi nazionali perderanno potere rispetto ad altri, ma non è ancora chiaro che cosa andrà a riempire questo vuoto. Non è facile dire a priori quali saranno le caratteristiche e la struttura di questa nuova civiltà mondiale, poiché dipenderanno dal comportamento e dagli orientamenti storico-culturali delle singole nazioni, che sono difficili da prevedere.

- La diffusione delle malattie dovrà essere monitorata a livello planetario. In passato la popolazione mondiale non era così numerosa, e questo limitava il propagarsi delle epidemie. Pensiamo per esempio al virus dell'ebola, una malattia incurabile e antichissima che nell'arco di migliaia di anni ha colpito solo pochi villaggi. Ma con il rapido aumento della popolazione in zone prima disabitate e la nascita di nuove città, in futuro la diffusione di questa malattia dovrà essere controllata molto attentamente.

Le malattie si possono diffondere molto velocemente nelle città con centinaia di migliaia o milioni di abitanti, scatenando vere e proprie epidemie. Ironicamente, il fatto che la peste nera abbia ucciso circa la metà della popolazione europea va considerato come un indice di progresso, poiché significa che in quel periodo la popolazione aveva raggiunto una massa critica per la diffusione delle epidemie, e che i commerci collegavano le antiche città del mondo.

Anche la recente epidemia di influenza H1N1 è indice di progresso. Probabilmente la malattia ha avuto origine a Città del Messico, per poi diffondersi rapidamente in tutto il mondo grazie alla frequenza dei voli intercontinentali. Ma per fortuna ci sono voluti solo pochi mesi per sequenziare il DNA del virus e creare un vaccino per decine di milioni di persone.

Terrorismo e dittature

Ci sono gruppi di persone che istintivamente si oppongono all'evoluzione verso una civiltà planetaria di tipo I, poiché sanno che sarebbe caratterizzata da una società progressista, libera, prospera e fondata sulla scienza e sull'istruzione. Si tratta di forze non necessariamente consapevoli di tutto questo, e tantomeno capaci di articolare il loro malcontento, ma stanno effettivamente combattendo contro questa tendenza dell'umanità verso una civiltà di tipo I. In particolare, tali forze sono:

- I terroristi islamici, che anziché vivere nel XXI secolo preferirebbero che la società regredisse di un millennio. Loro non formulano il proprio scontento in questa maniera, ma dalle loro dichiarazioni possiamo intuire che preferirebbero vivere in una teocrazia in cui la scienza, le relazioni interpersonali e la politica siano regolate da rigidi editti religiosi. (Queste persone dimenticano che storicamente la grandezza e il potere scientifico e tecnologico della civiltà islamica erano secondi solo alla sua tolleranza verso le nuove idee, e non conoscono la vera origine del glorioso passato dell'Islam.)
- Le dittature che alimentano il proprio potere nascondendo alla popolazione il benessere e il progresso del mondo esterno. La rivolta scoppiata in Iran nel 2009 è stata un esempio lampante di tale comportamento. Il governo ha provato a sopprimere le idee dei dimostranti, che invece usavano i social network per far conoscere al mondo le ragioni e l'evolversi della loro protesta.

In passato si diceva che ne uccidesse più la penna che la spada. E in futuro il chip sarà la nostra penna.

Consideriamo per esempio i cittadini della Corea del Nord, una nazione orribilmente povera, e domandiamoci quali siano le cause della loro mancata ribellione. A queste persone è negato qualsiasi contatto con il resto del mondo, che pensano sia ridotto alla fame come loro. I nordcoreani sopportano condizioni di vita durissime, e non sanno che non sono costretti ad accettare tale destino.

Civiltà di tipo II

Il giorno in cui una società raggiungerà lo status di tipo II, tra migliaia di anni avanti nel futuro, sarà praticamente immortale. Nessun fenomeno descritto dalla scienza potrà distruggere una civiltà di tipo II. I suoi membri avranno da tempo assunto il controllo totale sulle condizioni atmosferiche, quindi potranno bloccare l'avanzata delle glaciazioni, deviare comete e meteore, e anche se il loro sole diventasse una supernova, potrebbero emigrare verso un altro sistema stellare, o forse addirittura bloccare l'esplosione della loro stella. (Per esempio, se il loro sole diventasse un gigante rosso, potrebbero provare a lanciare degli asteroidi in modo che compiano una semiorbita attorno al loro pianeta, poi sfruttare l'effetto fionda per tentare di spostarlo lontano dalla stella in fase esplosiva.)

Per utilizzare tutta l'energia emessa dal suo sole, una civiltà di tipo II potrebbe costruire la cosiddetta *sfera di Dyson*, ovvero una struttura sferica gigantesca che circonda completamente la stella e sia in grado di assorbire tutta la radiazione che emette.

Probabilmente, una civiltà di tipo II vivrà in pace con se stessa. Poiché i viaggi nello spazio sono molto difficili, sarà dovuta rimanere di tipo I per secoli, o comunque il tempo necessario per appianare tutte le divisioni interne alla sua società. Ma quando raggiungerà lo status di tipo II avrà ormai colonizzato non solo l'intero sistema solare, ma anche i sistemi stellari esistenti nel raggio di qualche centinaio di anni luce. (Ma non molto di più, poiché anche tale civiltà dovrà limitarsi alla velocità della luce.)

Civiltà di tipo III

Quando sarà diventata di tipo III, una civiltà avrà esplorato la maggior parte della sua galassia. Il modo più conveniente per visitare centinaia di milioni di pianeti è lanciare nello spazio sonde-robot autoreplicanti, per esempio le sonde di Von Neumann, capaci di costruire infinite copie di se stesse. Una di queste potrebbe atterrare su un satellite (quindi in un luogo dove non correrebbe il rischio di arrugginire o di venire erosa dagli agenti atmosferici) e costruirvi un impianto per fabbricare un migliaio di copie di se stessa. Ciascuno di questi autoreplicanti potrebbe poi ripartire e andare in cerca di un sistema stellare ancora più lontano, dove autoreplicarsi nuovamente migliaia di volte.

Da una singola sonda saremmo dunque in grado di creare trilioni di robot autoreplicanti capaci di espandersi nella galassia a una velocità prossima a quella della luce, nonché di mappare l'intera Via Lattea in appena centomila anni. Poiché si stima che l'universo abbia 13,7 miliardi di anni, possiamo dire con certezza che una civiltà di questo tipo avrebbe avuto il tempo sufficiente per sorgere (e cadere). (Questo meccanismo di crescita rapida ed esponenziale è lo stesso usato dai virus per diffondersi nel corpo umano.)

Tuttavia, esiste un'altra possibilità. Una civiltà che raggiungesse lo status di tipo III avrebbe risorse energetiche sufficienti a testare la cosiddetta *energia di Planck*, pari a 10^{19} miliardi di elettronvolt, ovvero l'energia a cui lo stesso spaziotempo diventa instabile. (L'energia di Planck, un quadrilione di volte maggiore di quella prodotta dall'LHC di Ginevra, rappresenta il "punto di rottura" della teoria della gravità di Einstein, che smette di essere valida: si teorizza che a quei livelli di energia la struttura dello spaziotempo si frammenti, creando dei miniportali che ci permetterebbero di visitare altri universi o altri punti dello spaziotempo.)

Domare un'energia così vasta richiederebbe macchine colossali, con potenza e dimensioni inimmaginabili, ma se ci riuscissero ci permetterebbero di imboccare scorciatoie nella trama dello spaziotempo, sia comprimendo lo spazio sia attraversando i cosiddetti *wormhole*². Ipotizzando che siano capaci di superare un numero inimmaginabile di ostacoli teorici e pratici (per esempio, usare enormi quantità di energia sia positiva sia negativa e rimuovere le instabilità), i membri di questa civiltà avrebbero tutte le carte in regola per colonizzare l'intera galassia.

Tali considerazioni hanno spinto molte persone a domandarsi perché queste civiltà non ci abbiano ancora fatto visita. "Dove sono?" si chiedono in molti.

Magari sono già state da noi, ma la nostra arretratezza ci ha impedito di accorgercene. Le sonde autoreplicanti di Von Neumann, il metodo più pratico per esplorare la galassia, non devono essere necessariamente grandi. Anzi, grazie agli enormi progressi delle nanotecnologie potrebbero essere lunghe solo pochi centimetri. Quindi potrebbero essere ovunque, davanti ai nostri occhi, ma noi non ce ne accorgeremmo perché ci aspettiamo che dallo spazio arrivi un'astronave gigante brulicante di alieni. In breve, stiamo "guardando" la cosa sbagliata. Molto probabilmente la sonda sarà completamente automatizzata, con componenti sia organiche sia elettroniche, e non ospiterà alcun organismo extraterrestre.

Infine, l'incontro con questi alieni provenienti dallo spazio potrebbe rivelarsi una sorpresa più grande di quanto ci aspettiamo, poiché potrebbero avere usato la robotica, le nanotecnologie

o le biotecnologie per modificare la loro biologia, e quindi il loro aspetto.

Un'altra possibilità è che queste civiltà si siano autodistrutte. Come abbiamo detto, la transizione da tipo 0 a tipo I è la più pericolosa, poiché in questa fase tutte le barbarie e gli aspetti negativi del passato, i fondamentalismi e il razzismo sono ancora presenti. Magari un giorno, quando visiteremo le stelle, troveremo le prove dell'esistenza di vecchie civiltà di tipo 0 che non sono riuscite a evolvere in tipo I: per esempio, la loro atmosfera potrebbe essere diventata troppo calda o troppo radioattiva per poter ospitare la vita.

SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence)

Al momento gli abitanti della Terra non possono rendersi conto di stare progredendo verso una civiltà planetaria di tipo I, poiché non esiste una consapevolezza collettiva di questa storica transizione. Un sondaggio tra la popolazione terrestre ci direbbe che alcune persone sono vagamente consapevoli che un processo di globalizzazione sta avendo luogo, ma a parte questo nessuno mostrerebbe consapevolezza del fatto che stiamo andando in una direzione specifica.

Questa situazione cambierebbe all'improvviso qualora trovassimo le prove dell'esistenza di una vita intelligente nello spazio, poiché ci renderemmo subito conto dell'arretratezza della nostra tecnologia rispetto a quella di tale civiltà aliena. I nostri scienziati sarebbero ansiosi di scoprire quali tecniche e metodologie gli alieni sono stati in grado di sviluppare.

Non possiamo dirlo con certezza, ma grazie ai rapidi progressi in campo scientifico e tecnologico è possibile che entro la fine di questo secolo saremo già in grado di rilevare nello spazio segnali provenienti da una civiltà avanzata.

A tale successo avranno contribuito due fattori fondamentali. Anzitutto il lancio di satelliti come COROT e Kepler, appositamente progettati per trovare pianeti extrasolari piccoli e rocciosi. Secondo le previsioni, Kepler dovrebbe riuscire a identificare fino a seicento piccoli corpi celesti simili alla Terra. Una volta raggiunto questo obiettivo, il passo successivo sarà individuare segnali di vita intelligente provenienti da questi pianeti.

Dal 2001 a oggi Paul Allen, miliardario cofondatore della Microsoft, ha donato circa 30 milioni di dollari per rilanciare il progetto SETI, prima in fase di stallo. Questo permetterà di aumentare il numero di elementi dell'Allen Telescope Array presso l'Hat Creek Radio Observatory, a 470 chilometri a nord di San Francisco. Con trecentocinquanta telescopi operativi, l'Allen Telescope Array diventerà così la più avanzata installazione di radiotelescopi sulla Terra, e consentirà agli astronomi in cerca di vita intelligente di scandagliare fino a un milione di stelle, contro il migliaio che attualmente è possibile esaminare.

I recenti sviluppi hanno dato una spinta notevole al programma SETI, che negli ultimi cinquant'anni ha impegnato invano gli scienziati nella ricerca di segnali provenienti da civiltà extraterrestri avanzate. Molti astronomi pensano che durante questo periodo non siano stati compiuti sforzi sufficienti, e in particolare che non siano stati investiti abbastanza fondi per far decollare il progetto. Oggi il flusso di nuove risorse e di nuovi dati sta trasformando il programma SETI in un vero progetto scientifico.

Possiamo ragionevolmente ipotizzare che entro la fine di questo secolo riusciremo a captare i segnali di una civiltà intelligente nello spazio, e quando accadrà avremo posato una pietra miliare nella storia dell'umanità. (Seth Shostak, il direttore del SETI Institute nella Bay Area, mi ha confessato di aspettarsi un contatto di questo tipo entro una ventina d'anni. Indubbiamente Shostak è molto ottimista, tuttavia possiamo dire che sarebbe piuttosto strano se non riuscissimo a captare un segnale dallo spazio entro la fine di questo secolo.)

I registi di Hollywood amano rappresentare in maniera drammatica il caos che un contatto alieno provocherebbe: profeti che annunciano la fine imminente, sette religiose che iniziano a fare gli straordinari e altre cose simili. Ma la realtà sarebbe decisamente più banale. Probabilmente gli alieni non saprebbero nemmeno che li stiamo origliando, quindi il panico non

sarebbe giustificato. E se anche lo sapessero, le grandi distanze che ci separano renderebbero impossibile avviare una sorta di conversazione. Anzitutto ci vorrebbero mesi per decifrare completamente il messaggio di questa civiltà, e quindi per capire fino a che punto si è sviluppata la sua tecnologia e se rientra in qualche modo nella scala di Kardashev. In pratica, piuttosto che instaurare un qualche tipo di comunicazione, saremo soltanto in grado di osservare questa civiltà lontana, nonostante gli sforzi che faremo per costruire radiotrasmittenti capaci di inviare loro un messaggio.

Nuove classificazioni

La classificazione di Kardashev fu introdotta nel 1960, in un periodo in cui i fisici erano interessati ai metodi di produzione dell'energia. In seguito, con la diffusione dei computer l'attenzione si è spostata sulla rivoluzione informatica, e precisamente sulla quantità di informazioni (bit) che una civiltà è in grado di processare, aspetto divenuto importante almeno quanto la sua produzione energetica.

Immaginiamo per esempio una civiltà aliena su un pianeta la cui atmosfera conduca l'elettricità: ogni strumento elettrico, per esempio un computer o una dinamo di grandi dimensioni, inizierebbe a fare scintille e andrebbe immediatamente in corto circuito, così che solo le forme più primitive di applicazioni elettriche potrebbero essere possibili, poiché non brucerebbero all'istante.

Probabilmente una civiltà del genere sarebbe capace di sfruttare il carburante fossile e l'energia nucleare, ma se non sapesse processare grandi quantità di informazioni non potrebbe costruire l'equivalente di internet o un altro sistema di telecomunicazioni planetario, limitando parecchio il suo progresso scientifico ed economico. Progredire nella scala di Kardashev senza l'ausilio dei computer è possibile, ma sarebbe un processo lento e penoso.

A partire da questi presupposti, Carl Sagan introdusse una nuova scala, basata sulla capacità di elaborazione dei dati. Nel suo sistema ogni lettera dell'alfabeto, dalla A alla Z, corrisponde a una quantità d'informazione processata. Una civiltà di tipo A è capace di processare solo un milione di unità d'informazione, ovvero è una civiltà che ha sviluppato un linguaggio orale, ma non uno scritto. La civiltà dell'antica Grecia, con la sua fiorente letteratura scritta, era in grado di elaborare l'equivalente di un miliardo di unità d'informazione, cosa che ne fa una civiltà di tipo C. Salendo nella scala e cercando di stimare la quantità di dati che la nostra attuale civiltà è in grado di gestire e analizzare, possiamo ragionevolmente definirci una civiltà di tipo H. Quindi, unendo la stima energetica a quella basata sull'informazione, possiamo classificarci come una civiltà di tipo $0,7 H$.

Tuttavia, negli ultimi anni altri due fattori hanno assunto una certa importanza: la dispersione e l'inquinamento. Energia e informazione da sole non bastano per stimare quanto una civiltà sia evoluta: infatti, quanto più consuma energia e "macina" dati, tanto maggiori sono l'inquinamento e la dispersione che produce. Non si tratta di un esercizio accademico, poiché gli scarti prodotti da una civiltà di tipo I o II potrebbero essere sufficienti a distruggerla.

Consideriamo per esempio una civiltà di tipo II, che consuma tutta l'energia prodotta da una stella, e supponiamo che i suoi motori abbiano un'efficienza del 50 per cento. Questo vuol dire che metà della sua dispersione viene emessa sotto forma di calore, dando vita a una situazione potenzialmente disastrosa, poiché significa che la temperatura del pianeta salirà fino a farla fondere! Miliardi di impianti a carbone su questo pianeta immetterebbero gas e calore nell'atmosfera, innalzandone la temperatura fino a rendere impossibile la vita.

Una volta Freeman Dyson ha provato a individuare una civiltà di tipo II nello spazio cercando oggetti che emettessero principalmente radiazione infrarossa, piuttosto che luce visibile o raggi X. Infatti, anche volendo nascondere la propria esistenza avvolgendosi in una sfera protettiva, tale civiltà produrrebbe una dispersione così elevata che brillerebbe di radiazione infrarossa. Questo ragionamento ha spinto Dyson a suggerire agli astronomi di cercare sistemi stellari che

emettessero radiazioni in questa regione dello spettro. (Ad ogni modo, non è stato trovato nulla.)

Tutto questo ci porta a un unico punto, e cioè che ogni civiltà incapace di controllare la sua produzione energetica è destinata al suicidio. Questo significa, in definitiva, che energia e informazione non sono sufficienti a garantire la sopravvivenza di una civiltà mentre sale nella classifica evolutiva. Abbiamo bisogno di una nuova scala che includa contemporaneamente efficienza, calore disperso e inquinamento. Una nuova classificazione basata su un altro concetto: l'entropia.

Classificare le civiltà in base all'entropia

La civiltà ideale è quella capace di crescere in termini di energia e informazione in maniera saggia, cioè senza lasciare che il suo pianeta diventi insopportabilmente caldo o ricoperto di spazzatura.

Il film *Wall-E* ha rappresentato magistralmente questa eventualità: in un futuro lontano l'uomo avrà inquinato e degradato la Terra al punto che si lascerà tale disastro alle spalle per andare a condurre una vita autoindulgente su lussuose astronavi da crociera in costante viaggio nello spazio.

Ma qui entrano in gioco le leggi della termodinamica. La prima legge dice semplicemente che non possiamo ottenere qualcosa in cambio di niente, cioè che nessun pasto è davvero gratis. In altre parole, la quantità totale di energia e di materia nell'universo è costante. Ma come abbiamo visto nel Capitolo 3, la seconda legge della termodinamica è quella più interessante, poiché è in grado di determinare il destino di una civiltà evoluta. In sostanza, la seconda legge dice che la quantità totale di entropia di un sistema (disordine o caos) aumenta sempre. Questo significa che tutto deve deperire: gli oggetti devono decomporsi, marcire, arrugginire, invecchiare o semplicemente cadere a pezzi. (Non capita mai di osservare una diminuzione dell'entropia: per esempio, non vediamo mai le uova fritte saltare via dalla padella e tornare nel guscio, né i cristalli di zucchero separarsi dal caffè nella tazza e balzare nel cucchiaino.)

Quindi se evolvendo da tipo I a tipo II o III le civiltà del futuro produrranno energia senza cognizione di causa, disperderanno così tanto calore che il loro pianeta diventerà inabitabile e saranno distrutte dall'entropia, che si manifesterà come surriscaldamento del pianeta, inquinamento e caos. Allo stesso modo, se le persone produrranno informazione abbattendo intere foreste e producendo montagne di carta, la civiltà verrà seppellita dai suoi stessi rifiuti.

Dobbiamo quindi introdurre un'altra scala per classificare le civiltà e suddividerle in due tipi. Il primo tipo è rappresentato dalle civiltà "conserva entropia", ovvero quelle che sfruttano tutti i mezzi a loro disposizione per tenere sotto controllo l'eccesso di calore e di scarto. Mentre il loro fabbisogno energetico cresce esponenzialmente, queste civiltà sono consapevoli che la crescita dei consumi energetici potrebbe alterare l'ambiente del loro pianeta e renderlo invivibile. È inevitabile che il disordine totale o l'entropia da loro prodotti continuino a crescere, tuttavia l'uso delle nanotecnologie e delle energie rinnovabili può evitare spreco e inefficienze, facendo diminuire l'entropia locale.

Il secondo tipo di civiltà è quello "spreca entropia", cioè che evolve lasciando che il proprio consumo energetico aumenti senza limiti. Se il pianeta nativo di questa civiltà diventasse inabitabile, potrebbe lasciarsi alle spalle i propri eccessi fuggendo verso altri pianeti. In questo caso, però, la fuga si scontrerebbe con i costi di insediamento di colonie nello spazio, limitandone così l'espansione, e se l'entropia crescesse più velocemente della capacità di spostarsi su altri pianeti, il destino di questa civiltà sarebbe disastroso.

Dal controllo alla conservazione della natura

Come abbiamo visto, un tempo eravamo semplici osservatori della danza della natura, poiché guardavamo estasiati le sue meraviglie. Oggi invece siamo più coreografi della natura, poiché possiamo indebolirne le forze un po' qua e un po' là. Ed entro il 2100 avremo imparato a dominarla totalmente: saremo capaci di spostare gli oggetti con la forza del pensiero, di controllare la vita e la morte e di raggiungere le stelle.

Tuttavia, oltre a dominare la natura è nostro dovere imparare a conservarla. Se permetteremo che l'entropia aumenti in maniera incontrollata, secondo le leggi della termodinamica saremo destinati a estinguerci. In una civiltà di tipo II, che consuma tutta l'energia prodotta da una stella, l'entropia fuori controllo farebbe schizzare la temperatura superficiale del pianeta a livelli inimmaginabili. Ma esistono vari modi per tenere sotto controllo la crescita dell'entropia.

Pensiamo per esempio a quanto fossero inefficienti i giganteschi motori a vapore del XIX secolo. Con le loro caldaie enormi e i carichi di carbone, sprecaivano enormi quantità di energia, inquinavano e producevano calore. Se li paragoniamo ai treni elettrici, rapidi e silenziosi, ci rendiamo immediatamente conto che oggi usiamo l'energia in maniera parecchio più efficiente. Allo stesso modo, l'evoluzione tecnologica e l'uso di energie rinnovabili ci permetteranno di rendere più piccoli, e soprattutto più efficienti, gli apparecchi elettrici presenti nelle nostre case, e di conseguenza non avremo più bisogno di quelle enormi centrali a combustibili fossili che inquinano e disperdono un'enorme quantità di calore. Questo processo toccherà il suo apice quando l'evoluzione delle nanotecnologie ci permetterà di costruire macchine e dispositivi su scala atomica.

Inoltre, l'eventuale scoperta di materiali superconduttori a temperatura ambiente rivoluzionerebbe completamente il nostro fabbisogno energetico. Anzitutto aumenterebbe l'efficienza delle macchine, poiché tali materiali ridurrebbero notevolmente il calore disperso nell'ambiente sotto forma di attrito. Come abbiamo visto, infatti, la maggior parte dell'energia che consumiamo viene spesa per contrastare una qualche forma di attrito. Questo è particolarmente vero nel caso dei trasporti: oggi siamo costretti a riempire di benzina i serbatoi delle nostre auto, ma se fosse possibile viaggiare in assenza di attrito gli spostamenti costerebbero pochissimo.

Possiamo dunque immaginare che una civiltà evoluta userà molta meno energia di quella che consumiamo oggi. In definitiva, questo significa che potremmo essere in grado di porre un limite preciso alla quantità di entropia che tale civiltà produrrebbe.

La transizione più pericolosa

La transizione della nostra civiltà da tipo 0 a tipo I è forse la più importante della storia. In pratica stabilirà se la nostra società continuerà a progredire e prosperare oppure se, guidati dalla nostra stessa follia, ci autodistruggeremo. Questa transizione è estremamente pericolosa, poiché la società è ancora permeata dalle barbarie che hanno caratterizzato il nostro passato: sotto la sua superficie, infatti, ribollono ancora fondamentalismi, settarismo, razzismo e intolleranza. Negli ultimi diecimila anni la natura umana non è cambiata granché. L'unica differenza è che adesso abbiamo a disposizione armi nucleari, chimiche e batteriologiche con cui pareggiare vecchi conti in sospeso.

Tuttavia, una volta diventati civiltà di tipo I avremmo a disposizione secoli per appianare le nostre incongruenze. Come abbiamo visto nei capitoli precedenti, i costi di insediamento di colonie spaziali non scenderanno granché nei prossimi cento anni, quindi è improbabile che entro la fine di questo secolo una parte significativa della popolazione mondiale possa trasferirsi su Marte o nella cintura degli asteroidi. Fino a quando non progetteremo razzi che riducano notevolmente i costi dei viaggi spaziali, o finché non costruiremo l'ascensore spaziale, i viaggi nello spazio continueranno ad essere appannaggio di una cerchia ristrettissima di persone. La maggior parte della popolazione terrestre resterà dunque confinata sul pianeta finché la transizione a civiltà di tipo I sarà completata.

La ricerca della saggezza

Viviamo in un'epoca emozionante, in cui la scienza e la tecnologia hanno dischiuso mondi che prima potevamo solo sognare. Quando penso al futuro della scienza, alle sue sfide e ai suoi pericoli, sono davvero speranzoso, poiché nei prossimi decenni comprenderemo la natura e i suoi fenomeni molto di più di quanto l'abbiamo capita in tutta la storia dell'umanità.

Ma non è sempre stato così.

Nel 1780 Benjamin Franklin, l'ultimo dei grandi scienziati e politici americani, tentò di fare una previsione sull'evoluzione dell'uomo non nel secolo, ma nel millennio successivo. Notò che spesso gli uomini si scagliavano gli uni contro gli altri come lupi, soprattutto a causa dell'aspra lotta per la sopravvivenza in un mondo così duro.

È impossibile immaginare a quali altezze arriverà il controllo dell'uomo sulla materia nei prossimi mille anni. Forse impareremo a privare le grandi masse della loro gravità, conferendogli levità per il bene dei trasporti. L'agricoltura potrebbe richiedere metà del lavoro e duplicare i raccolti; potremmo avere mezzi sicuri per prevenire e curare ogni malattia, compresa la stessa vecchiaia, e quindi allungare la nostra vita a piacere, ben oltre gli standard antediluviani³.

Queste parole sono state scritte in un'epoca in cui i contadini conducevano una vita misera fatta di duro lavoro nei campi, in cui gli scarsi raccolti venivano portati ai mercati sui carri trainati dai buoi e in cui le carestie e le epidemie erano semplicemente un dato di fatto, tanto che solo pochi fortunati vivevano fino ai quarant'anni. (Nella Londra del 1750 due terzi dei bambini morivano prima dei cinque anni.) Franklin viveva in un'epoca talmente crudele che appariva impossibile pensare al giorno in cui i problemi della vecchiaia sarebbero stati risolti. Come scrisse Thomas Hobbes nel 1651, la vita era «solitaria, povera, sgradevole, brutale e breve».

Tuttavia oggi, ben prima dei mille anni immaginati da Franklin, le sue previsioni si stanno avverando.

Possiamo trovare traccia della fede che un giorno la ragione e la scienza avrebbero liberato l'uomo dall'oppressione del passato anche in un'opera postuma (1795) del marchese di Condorcet, *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain* (Abbozzo di un ritratto storico dei progressi dello spirito umano), che secondo alcuni è la previsione del futuro più accurata che sia mai stata scritta. Il marchese fece un'ampia varietà di previsioni, e anche piuttosto eretiche, ma tutte si sono avverate. Per esempio, predisse che a un certo punto le colonie del Nuovo mondo avrebbero guadagnato l'indipendenza dall'Europa, traendo beneficio dalle tecnologie importate dal Vecchio mondo per progredire rapidamente. Inoltre, predisse la fine della schiavitù. Disse che le fattorie avrebbero aumentato notevolmente la quantità e la qualità del cibo prodotto per acro di terreno, che la scienza avrebbe iniziato a progredire rapidamente e che l'umanità ne avrebbe tratto beneficio. Predisse anche che la qualità della vita sarebbe migliorata, che ci saremmo liberati dalla schiavitù della quotidianità e che avremmo avuto più tempo libero. Disse persino che un giorno avremmo praticato diffusamente il controllo delle nascite.

Nel 1795 sembrava impossibile che queste previsioni si potessero avverare.

Sia Benjamin Franklin sia il marchese di Condorcet sono vissuti agli albori della scienza, quando le condizioni di vita erano pessime e la vita stessa era breve. Rileggendo oggi le loro previsioni, possiamo effettivamente riconoscere che i rapidi progressi della scienza e della tecnologia hanno creato ricchezza e benessere sufficienti a uscire dalla crudeltà del nostro passato. E possiamo anche essere grati del fatto che il pensiero scientifico sia stato finora la più importante invenzione dell'uomo. Dalle profondità delle paludi, la scienza ci ha innalzato alla soglia delle stelle.

La scienza non è immobile. Come abbiamo detto, entro il 2100 avremo un potere simile a quello degli dèi della mitologia che un tempo temevamo e a cui rivolgevamo le nostre preghiere. In particolare, la rivoluzione informatica dovrebbe portarci al punto in cui riusciremo a controllare la materia con la sola forza del pensiero, la rivoluzione biotecnologica dovrebbe permetterci di generare la vita, nonché di estenderne la durata, mentre la rivoluzione delle nanotecnologie dovrebbe renderci capaci di cambiare la forma degli oggetti, o addirittura di crearli dal nulla. Una serie di passi che alla fine potrebbe sfociare nella creazione di una civiltà planetaria di tipo I. E sarà la generazione di persone ora in vita a determinare se raggiungeremo questo obiettivo o se invece precipiteremo negli abissi, poiché è senz'ombra di dubbio la più importante che abbia mai calpestato la superficie terrestre.

La scienza è anche moralmente neutra. È come una spada a doppio taglio: se da un lato può sconfiggere la povertà, le malattie e l'ignoranza, dall'altro può colpire le persone. Sta alla saggezza di chi la manovra decidere come brandirla.

Come ha affermato Einstein: «La scienza può solo determinare ciò che è, ma non ciò che dovrebbe essere, e al di fuori del suo ambito restano necessari i giudizi di valore». La scienza risolve problemi, ma solo per crearne altri a un livello superiore.

Conosciamo il lato oscuro, distruttivo della scienza, venuto fuori durante la Prima e la Seconda guerra mondiale. I gas velenosi, le mitragliatrici, il bombardamento di città intere e la bomba atomica hanno mostrato al mondo il livello di rovina e devastazione a cui la scienza può portare. La prima metà del XX secolo ha sfogato tutta la sua brutalità con una violenza di proporzioni inaudite.

Ma la scienza ha anche permesso all'umanità di rinascere dalle rovine della guerra, creando un mondo di pace e prosperità per miliardi di persone. La sua grandezza è insita nel potere che dà, nelle possibilità che ci mette davanti. La scienza amplifica sia lo spirito creativo, innovativo ed eterno dell'umanità, sia le nostre peggiori debolezze.

Saggezza: la chiave per il futuro

La soluzione consiste dunque nel trovare la saggezza necessaria per brandire la spada della scienza. Come ha affermato Immanuel Kant: «La scienza è conoscenza organizzata. La saggezza è vita organizzata». Secondo me la saggezza è la capacità di individuare i problemi fondamentali della nostra epoca, di analizzarli secondo punti di vista e prospettive differenti, e poi scegliere quello che conduce a obiettivi e principi nobili.

Nella nostra società la saggezza è un bene raro. Come ha detto Isaac Asimov: «L'aspetto più triste della società attuale è che la scienza acquisisce nuove conoscenze più velocemente di quanto la società acquisisca saggezza». Al contrario di quanto accade con l'informazione, non è possibile dispensare saggezza attraverso blog, chat o social network. Poiché anneghiamo in un oceano d'informazioni, la saggezza è il bene più prezioso della società odierna, senza la quale andremmo alla deriva, senza obiettivi, come svuotati dopo l'ebbrezza della novità dell'informazione infinita.

Ma da dove nasce la saggezza? In parte dal confronto democratico di idee contrapposte, cioè da un confronto ragionato e informato. Se questo avviene, anche dal frastuono dei dibattiti più accessi e turbolenti nasceranno autentiche intuizioni. Nella nostra società tali “faccia a faccia” prendono vita in forma di democrazia. Come ha osservato Winston Churchill: «La democrazia è la peggiore forma di governo, ad eccezione di tutte quelle sperimentate finora».

La democrazia non è cosa semplice, bisogna lavorarci su. George Bernard Shaw ha detto che «la democrazia è un mezzo che ci assicura di essere governati non meglio di quanto meritiamo».

Oggi internet, con tutte le sue colpe e i suoi eccessi, si sta rivelando un guardiano delle libertà democratiche. Pensiamo per esempio a tutte quelle questioni che un tempo venivano discusse unicamente a porte chiuse, ma che oggi vengono condivise e commentate sul web. I dittatori dei nostri tempi vivono nel costante *ti-more* di internet e della gente che vi accede, poiché si è trasformata da immaginario strumento di terrore a “megafono” di democrazia. Oggi l'incubo *1984* è passato.

Dalla cacofonia di tali discussioni emerge dunque la saggezza. Ma per assicurarci che s'instauri un dibattito democratico occorre istruzione. Solo un elettorato istruito potrà prendere decisioni sull'uso di tecnologie che determineranno il destino della nostra civiltà. In definitiva, le persone dovranno decidere per loro stesse in quale direzione e quanto lontano spingere lo sviluppo delle nuove tecnologie, ma solo un elettorato istruito e informato potrà esercitare questo diritto (e dovere) in maniera saggia e consapevole.

Purtroppo, molte persone ignorano completamente le grandi sfide che ci aspettano. Come far nascere nuove industrie che sostituiscano quelle vecchie? Come preparare i giovani ad affrontare il futuro mercato del lavoro? Fino a che punto spingere l'ingegneria genetica applicata all'uomo? Come rinnovare un sistema scolastico vecchio e disfunzionale e adattarlo alle sfide del futuro? Come comportarsi nei confronti del riscaldamento globale e della proliferazione del nucleare?

La chiave della democrazia è dunque un elettorato istruito e informato che possa discutere tali questioni razionalmente e con obiettività. Lo scopo di questo libro, infatti, è anche quello di contribuire al dibattito che determinerà l'evolversi di questo secolo.

Il futuro è come un treno merci

Riassumendo, niente è predeterminato, siamo noi a creare il nostro futuro. Come ha scritto Shakespeare nel *Giulio Cesare*: «La colpa, Bruto, non è nelle nostre stelle ma in noi»⁴. O come ha detto Henry Ford in modo meno eloquente: «La storia è un mucchio di sciocchezze. È tradizione. Noi non vogliamo la tradizione. Vogliamo vivere il presente, e la sola storia che valga qualcosa è la storia che facciamo oggi»⁵.

Il futuro è dunque un enorme treno merci che sfreccia verso di noi, spinto dal sudore e dalla fatica di migliaia di scienziati al lavoro nei loro laboratori. Possiamo sentire il suo fischio sussurrarci: “Biotecnologie, intelligenza artificiale, nanotecnologie, telecomunicazioni...”. Alcuni pensano di non esserne all'altezza, e dicono: «Sono troppo vecchio per imparare queste cose. Mi sdraierò per terra e lascerò che il treno mi investa». Al contrario, i giovani e le persone ambiziose e piene d'energia dicono: «Fatemi salire su quel treno! È il mio futuro, il mio destino. Lasciatemelo guidare!».

Speriamo allora che la gente di questo secolo usi la spada della scienza con saggezza e compassione.

Infine, per capire meglio come cambierebbe la nostra vita in una civiltà di tipo planetario, potrebbe essere utile fare un esercizio: immaginiamo di vivere una giornata nell'anno 2100, per vedere come le nuove tecnologie influenzeranno il nostro quotidiano, la nostra carriera, le nostre speranze e i nostri sogni.

Capitolo 9

Un giorno del 2100

Da Aristotele a Tommaso d'Aquino, perfezione significava saggezza maturata dall'esperienza, così come l'esempio insegnava a condurre una vita morale. La nostra perfezione non sta nel potenziamento dei geni, ma in quello del nostro carattere. Steven Post

1° gennaio 2100, ore 6:15

Dopo una notte di festeggiamenti per il capodanno, sei scivolato in un sonno profondo. D'un tratto lo schermo a muro si accende e appare il viso amichevole e familiare di Molly, il software che hai comprato di recente. La sua voce ti annuncia allegramente: «John, svegliati. Devi andare in ufficio, c'è bisogno di te. È importante».

«Eddai, Molly, ancora un attimo...».

Non è un bel risveglio. «È uno scherzo, vero? È capodanno e ieri mi sono preso una sbronza colossale! E poi cosa potrà mai esserci di così importante?».

Lentamente sgusci fuori dal letto, ti trascini in bagno e ti sciacqui la faccia, mentre alcune centinaia di sensori delle proteine e del DNA, sparsi un po' ovunque nello specchio, nel lavandino e nel water, si attivano e cominciano ad analizzare le molecole espulse dal tuo corpo, cercando tracce di eventuali anomalie e controllando che non ti stia ammalando.

Uscendo dal bagno ti avvolgi la testa con i cavi per il controllo telepatico della casa: meglio alzare un po' la temperatura dell'appartamento e mettere su della musica rilassante. Basta il pensiero, ed è fatto. Poi ordini mentalmente al cuoco-robot in cucina di preparare il caffè e la colazione, e all'auto magnetica di uscire dal garage e prepararsi a partire. Entrando in cucina, le braccia meccaniche del "cuoco" stanno preparando le uova proprio come piacciono a te.

Indossi subito le lenti a contatto, e in un attimo sei in rete. Sbattendo semplicemente le palpebre, le immagini ti vengono proiettate sulla retina, e sorseggiando il tuo caffè dai un'occhiata alle notizie:

- L'avamposto su Marte chiede maggiori rifornimenti. L'inverno marziano avanza rapidamente, e per completare la prossima fase della colonizzazione del pianeta i coloni hanno bisogno di nuove risorse dalla Terra. I piani prevedono l'avvio della prima fase della terraformazione del pianeta rosso innalzando la sua temperatura superficiale.
- Le prime navi stellari sono pronte a partire. Dalla base lunare verranno lanciati milioni di nanobot, ciascuno grande come la punta di uno spillo, che entreranno nel campo magnetico di Giove per prendere velocità e continuare verso una stella vicina. Ci vorranno anni prima che una manciata di questi nanobot riesca a giungere a destinazione.
- Allo zoo locale sta arrivando un altro animale estinto. Questa volta è la tigre dai denti a sciabola, riportata in vita grazie ai frammenti di DNA congelato trovati nella tundra. Sono sempre più numerose le specie animali estinte riportate in vita attraverso i campioni di DNA recuperati dopo l'innalzamento della temperatura terrestre.
- Dopo anni in cui è stato adibito unicamente al trasporto merci, l'ascensore spaziale è pronto a portare nello spazio un primo gruppo di turisti. Negli ultimi anni il costo dei viaggi spaziali è precipitato del 50 per cento rispetto al giorno in cui l'ascensore fu inaugurato.
- I più vecchi impianti di fusione costruiti sulla Terra hanno ormai cinquant'anni, e sono pronti per andare in pensione. È venuto il momento di smantellarli e costruirne di nuovi.
- Gli scienziati stanno monitorando il nuovo virus letale recentemente rilevato in Amazzonia. Al momento la sua diffusione è limitata a un'area circoscritta, ma ancora non si conosce una cura. Gruppi di scienziati stanno lavorando attivamente per sequenziare il DNA del virus e

trovarne un punto debole.

Poi una notizia in particolare attira la tua attenzione:

- È stata individuata una grossa perdita nelle dighe di contenimento che circondano Manhattan. La falla dovrà essere riparata tempestivamente, altrimenti la metropoli verrà sommersa dall'acqua, come è già successo per altre città in passato.

“Oh-oh” sussurri a te stesso. “Ecco perché l'ufficio mi ha svegliato”.

Lasci perdere la colazione, ti vesti e schizzi fuori. L'automobile, che nel frattempo è uscita dal garage, è lì ad aspettarti. Basta pensarlo, ordinarglielo telepaticamente, e l'auto decolla in silenzio, fluttuando sul cuscino magnetico generato dal pavimento superconduttore. Il veicolo è sempre connesso a internet, alla rete GPS e a milioni di chip nascosti nella strada che monitorano costantemente il traffico. All'improvviso la faccia di Molly appare sul parabrezza: «John, l'ultimo messaggio che hai ricevuto dall'ufficio dice che troverai tutti in sala riunioni. Hai anche un videomessaggio da parte di tua sorella».

L'auto ha il pilota automatico, così hai il tempo di guardare il messaggio di tua sorella. La sua immagine compare sul tuo orologio da polso: «John, ricorda che questo weekend abbiamo la festa di compleanno di Kevin, che compie sei anni. Hai promesso di regalargli l'ultimo modello di cane-robot. Ah senti, per caso ti vedi con qualcuno? Sai, giocando a bridge su internet ho conosciuto una persona che potrebbe interessarti...».

“Oh-oh” è l'unica cosa a cui riesci a pensare.

Adori spostarti con la tua auto magnetica, viaggiare sospeso sulla strada senza dover pensare a dossi o buche nell'asfalto. E soprattutto, senza attrito il carburante dura tantissimo! (Eppure all'inizio del secolo c'era stata una crisi energetica, perché la maggior parte dell'energia veniva utilizzata proprio per vincere l'attrito.)

Ripensi a quando è stata aperta la prima autostrada a superconduttori. I media lamentavano il fatto che l'era dell'elettricità stesse per concludersi lasciando il posto alla nuova era del magnetismo. Personalmente, non rimpiangi neanche un po' i tempi dell'elettricità. Guardi fuori dal finestrino e vedi automobili lucenti, camion e treni che ti sfrecciano accanto, e capisci che il magnetismo è la cosa giusta, la migliore dal punto di vista dei consumi.

Quando l'automobile magnetica passa accanto alla discarica comunale, noti che la maggior parte dei rifiuti è costituita da computer e parti di robot. Ormai i chip non costano niente, addirittura meno dell'acqua, e quando diventano obsoleti si accumulano nelle discariche cittadine in giro per il mondo. C'è addirittura chi propone di interrarli.

L'ufficio

Infine arrivi in ufficio, nel quartier generale di una grande impresa di costruzioni. Avvicinandoti all'ingresso noti appena un laser che, senza fare alcun rumore, ti scansiona la retina e identifica il tuo volto. Non c'è più bisogno di tessere identificative: il tuo corpo è la tua carta d'identità.

La sala conferenze è quasi deserta, solo qualche collega seduto qua e là attorno al tavolo. Ma un attimo dopo il tuo ingresso le lenti a contatto cominciano a mostrarti le immagini tridimensionali degli altri partecipanti alla riunione, tutti al loro posto sulle sedie vuote: non sono riusciti a venire fisicamente, ma sono presenti lo stesso come ologrammi.

Ti guardi intorno. Le lenti identificano tutti i presenti, mostrandoti le loro biografie e i loro background. Noti che ci sono anche diversi pezzi grossi, e cerchi di memorizzare i loro nomi.

Poi l'immagine del tuo capo si materializza sulla sua sedia. «Signori» annuncia «come avrete probabilmente sentito, la diga intorno a Manhattan ha iniziato improvvisamente a perdere. Il problema è serio, ma l'abbiamo individuato in tempo, e non c'è pericolo che la struttura collassi. Tuttavia, sfortunatamente i robot che abbiamo mandato sul campo a riparare il danno hanno fallito».

In un attimo le luci si abbassano e ti ritrovi circondato dall'immagine tridimensionale dell'interno della diga. Sei completamente immerso nell'acqua, e mentre l'immagine ruota puoi vedere esattamente la perdita. Uno strano, grosso squarcio che cattura la tua attenzione.

Nel frattempo il tuo capo continua a parlare. «I robot non bastano, poiché non sono stati programmati per compiere questo tipo di interventi. Dobbiamo mandare là sotto personale con esperienza, qualcuno che possa valutare la situazione e, se necessario, anche improvvisare. Ovviamente, non credo sia necessario ricordarvi che se dovessimo fallire di nuovo New York potrebbe subire il destino di tante altre grandi città».

Un brivido attraversa la sala. Tutti conoscono le metropoli che sono state evacuate mentre il livello del mare saliva. Sebbene i combustibili fossili non siano più la principale fonte di energia del pianeta, sostituiti già da qualche decennio dalle fonti rinnovabili e dalla fusione nucleare, l'umanità sta ancora subendo gli effetti del diossido di carbonio rilasciato nell'atmosfera all'inizio del secolo.

Dopo molte discussioni, si decide di mandare la squadra di riparazione dei robot teleguidati. E qui entri in gioco tu, che hai contribuito a progettare queste macchine. Lavoratori addestrati siedono dentro delle capsule, e con vari elettrodi piazzati tutto intorno alla testa controllano telepaticamente i robot. Da dentro le capsule gli esperti possono vedere e sentire ciò che vedono e sentono i robot: è un po' come essere lì di persona, ma in un corpo nuovo e superumano.

È giusto che tu sia orgoglioso del tuo lavoro, perché questi robot controllati attraverso la telepatia hanno dimostrato quanto valgono in diverse occasioni. La base lunare, per esempio, è ampiamente controllata da esseri umani che siedono in tutta sicurezza e comodità nelle loro capsule sulla Terra. Tuttavia, c'è un ritardo nelle comunicazioni che questi lavoratori devono essere addestrati a gestire, poiché occorre circa un secondo prima che un segnale radio raggiunga la Luna.

Ti sarebbe piaciuto usare questi robot anche per la base su Marte, ma è stato deciso che in

questo caso gestire la comunicazione con loro sarebbe risultato troppo complicato: infatti ci vogliono circa 20 minuti prima che un segnale raggiunga il pianeta rosso, più altri 20 prima che torni indietro sulla Terra. Nonostante tutti i progressi fatti finora, c'è una cosa che non hai potuto modificare: la velocità della luce¹.

Durante la riunione qualcosa continua però a turbarti.

Alla fine riesci a trovare il coraggio di interrompere il tuo capo: «Signore, non mi piace affatto quello che sto per dire, ma osservando bene la falla nella diga mi è venuto il sospetto che la crepa sia stata causata da uno dei nostri robot».

Un energico mormorio riempie immediatamente la sala, ma puoi distinguere chiaramente il coro di obiezioni e proteste dei tuoi colleghi: “I nostri robot? È impossibile, irragionevole, non è mai successo prima...”.

Il tuo capo ristabilisce la calma, e con tono solenne dice: «Temevo che qualcuno sollevasse questo problema, quindi fatemi sottolineare che la questione è molto importante, e dovrà rimanere strettamente riservata. Questa informazione non dovrà uscire da qui dentro finché non avremo emesso un comunicato stampa. Sì, la perdita è stata causata da uno dei nostri robot, di cui abbiamo perso improvvisamente il controllo».

Nella sala riunioni si scatena il pandemonio. Tutti cominciano a scuotere la testa. “Com'è possibile? *Com'è possibile?*”.

«I dati sul funzionamento dei nostri robot sono perfetti» continua il tuo capo. «Si sono sempre comportati in maniera impeccabile. Nessuno ha mai causato alcun danno, e il loro sistema di controllo in caso d'emergenza si è sempre dimostrato efficace. Di fronte a questi numeri non possiamo che levarci il cappello. Ma come ben sapete i nostri robot di ultima generazione sono basati su computer quantistici, i più potenti a disposizione, e hanno un'intelligenza prossima a quella umana. Sì, proprio a quella dell'uomo. E secondo la teoria quantistica c'è sempre una piccola probabilità che qualcosa vada storto. Nel caso specifico, uno dei nostri robot è impazzito».

Sopraffatto da queste notizie, sprofondi nella sedia.

Di nuovo a casa

È stata una lunga giornata. Prima hai dovuto organizzare la squadra di riparazione robotizzata che andrà a chiudere la falla, poi hai dovuto aiutare a disattivare tutti i robot sperimentali che usano computer quantistici, almeno fino a quando questo problema non sarà definitivamente risolto. Alla fine, quando torni a casa sei esausto. Molly appare sullo schermo proprio mentre sei comodamente seduto sul divano: «John, c'è un messaggio importante da parte del dottor Brown».

Il dottor Brown? Che cosa avrà d'importante da dirti il tuo "robodottore"?

«Mandamelo sullo schermo» rispondi a Molly. Il dottore appare sullo schermo-parete, un'immagine così realistica che a volte ti dimentichi che è solo un software.

«Mi spiace disturbarti, John, ma c'è qualcosa che ti devo dire. Ricordi l'incidente sugli sci che hai avuto l'anno scorso, quello che ti ha quasi ucciso?».

E come dimenticarlo? Ti vengono ancora i brividi quando ripensi a come ti sei schiantato contro un albero mentre sciavi su quel po' di neve rimasta sulle Alpi. Laggiù gran parte della neve si è ormai sciolta, così hai dovuto scegliere una stazione sciistica in alta quota. Non essendo abituato a quel tipo di superficie, sei ruzzolato giù lungo la discesa e ti sei schiantato a 60 chilometri all'ora!

«I miei dati riportano che dopo lo schianto sei rimasto incosciente» continua il dottor Brown. «Hai riportato una commozione cerebrale e gravi lesioni interne, ma i tuoi vestiti ti hanno salvato la vita».

Sebbene fossi incosciente, i tuoi vestiti hanno automaticamente chiamato i soccorsi, caricato in rete la tua anamnesi e fornito le coordinate precise della tua posizione. Arrivato in ospedale, i robot ti hanno operato e hanno fermato l'emorragia, ricucendo i minuscoli vasi sanguigni che si erano rotti nell'incidente e "rattoppando" gli altri danni.

«Il tuo stomaco, il fegato e l'intestino erano troppo danneggiati, e non c'era speranza di salvarli» ti ricorda il dottor Brown «ma per fortuna siamo riusciti a far crescere per te un set di nuovi organi appena in tempo».

All'improvviso ti senti come se tu stesso fossi in parte robot, visto che oggi la maggior parte del tuo corpo è composta da organi cresciuti in una "fabbrica di tessuti".

«John, i dati in mio possesso mostrano anche che avresti potuto farti sostituire il braccio distrutto con uno interamente meccanico, ma non hai voluto. Le braccia robotiche di ultima generazione hanno una potenza cinque volte maggiore di quella umana».

«Sì» rispondi «credo di essere un po' all'antica, continuo a preferire la carne all'acciaio».

«John, dobbiamo eseguire controlli periodici sui tuoi nuovi organi. Prendi il tuo scanner MRI e passalo all'altezza del tuo stomaco».

Ti alzi e vai in bagno, prendi un aggeggio piccolo come un telefono cellulare e inizi a passartelo lentamente sullo stomaco e tutto intorno alla vita. Un istante dopo sullo schermo-parete appare l'immagine tridimensionale dei tuoi organi interni.

«John, analizzeremo queste immagini per vedere come procede la guarigione. Tra l'altro, stamattina i sensori del DNA in bagno hanno rilevato una forma cancerosa che sta crescendo nel tuo pancreas».

«Cancro?». Scatti subito in piedi, sconcertato. «Pensavo che la cura per il cancro esistesse da anni. La gente non ne parla quasi più. Com'è possibile che abbia il cancro?».

«Gli scienziati non hanno mai trovato una cura contro il cancro. Diciamo che abbiamo stabilito con questa malattia una sorta di tregua. Come per il raffreddore, che teniamo semplicemente a bada e per il quale non abbiamo una cura vera e propria. Esistono troppi tipi di cancro e siamo a un punto di stallo. Ho ordinato delle nanoparticelle che possano distruggere le cellule cancerose presenti nel tuo corpo. Ce ne sono solo poche centinaia, e si tratta di un intervento di routine, ma senza il quale probabilmente moriresti nel giro di sette anni» dice il dottor Brown senza scomporsi.

«Ah, che sollievo!».

«Sì, oggi siamo in grado di individuare un cancro anni prima che si formi un tumore».

«Tumore? Di che si tratta?».

«È una parola ormai scomparsa dal linguaggio comune. Una volta veniva usata per descrivere un cancro in uno stadio avanzato. Per fortuna oggi non se ne vedono più» aggiunge il dottor Brown.

D'un tratto ti rendi conto di esserti dimenticato che tua sorella ha "minacciato" di sistemarti con qualcuna. Chiami subito Molly.

«Molly, non ho niente in programma per questo weekend. Per favore mi cerchi una ragazza con cui uscire? Conosci bene il tipo di persona che mi piace».

«Sì, ho le tue preferenze in memoria. Dammi solo un minuto, cerco su internet». Dopo un minuto Molly ti mostra i profili di alcune possibili candidate, anche loro sedute di fronte al loro schermo-parete.

Dopo avere dato loro un'occhiata, ne scegli una che ti piace. Si chiama Karen, e ti sembra in qualche modo speciale. «Molly, manda a Karen un messaggio carino e chiedile se è disponibile a uscire con me questo weekend. Vorrei provare un nuovo ristorante che ha appena aperto».

Allora Molly manda a Karen un videomessaggio con il tuo profilo e la tua proposta.

Per stasera hai invitato a casa tua alcuni colleghi per una birra in compagnia davanti alla partita. I tuoi amici avrebbero potuto semplicemente proiettare le loro immagini olografiche nel tuo soggiorno, ma tifare per la squadra di casa è molto più divertente farlo insieme. E allora sorridi, pensando che forse è proprio così che migliaia di anni fa gli uomini delle caverne cominciavano a stabilire dei legami.

È stata una serata piacevole. Ora i tuoi amici se ne sono andati, ma sei ancora troppo carico per riuscire a dormire, quindi decidi che vorresti giocare una partitina a poker prima di andare a letto.

«Molly» dici «mi sento fortunato e vorrei fare una partita a poker. È tardi, lo so, ma qualcuno in Inghilterra, in Cina, in India o in Russia vorrà sicuramente farsi un paio di mani. Per favore, cercami qualcuno».

«Non c'è problema» risponde Molly. Qualche viso interessante appare sullo schermo. Le immagini tridimensionali di ciascun giocatore si materializzano nella stanza, e tu provi a immaginare chi saprà bluffare meglio. "Che strano" pensi "avere più familiarità con persone che vivono a migliaia di chilometri che con il proprio vicino di casa. Ormai i confini geografici delle nazioni non hanno più significato".

Alla fine, proprio mentre stai per lasciare il tavolo da gioco, Molly appare di nuovo sullo schermo-parete, richiamando la tua attenzione.

«Karen ha accettato il tuo invito per questo weekend. Vi prenoto un tavolo in quel nuovo

ristorante? O vuoi prima vedere il suo profilo personale? Se vuoi posso fare una verifica su internet: sai, a volte le persone mentono quando compilano il loro profilo online».

«No» dici a Molly «lasciamo che sia una sorpresa». Dopo la partita a poker ti senti di nuovo fortunato.

Il fine settimana

È arrivato il momento di fare acquisti e prendere il regalo di Kevin. «Molly, mettimi sullo schermo il centro commerciale».

In un attimo le immagini del centro commerciale appaiono sullo schermo-parete, e tu lo “visiti” muovendo braccia e mani. Fai un tour virtuale del centro commerciale, finché arrivi all’immagine del negozio di giocattoli. Perfetto, hanno proprio i cani-robot che ti interessano, allora esci di casa e ordini telepaticamente alla tua auto magnetica di portarti al centro commerciale. (Sì, avresti potuto ordinare il giocattolo online, o farti addirittura inviare via e-mail i progetti del robot – il tuo plasmatore potrebbe fabbricartelo da zero usando materiali programmabili –, ma ogni tanto è piacevole uscire e andare di persona a fare acquisti.)

È una giornata magnifica, e mentre sei nell’auto magnetica osservi le persone che passeggiano a bordo strada. Ci sono robot di tutti i tipi: robot che portano a spasso i cani, commessi-robot, camerieri-robot, receptionist-robot e persino cani-robot. Ormai ogni mansione ripetitiva, magari pericolosa o che richieda un livello minimo di interazione umana è lavoro dei robot, il nuovo grande business. La pubblicità di chi li può riparare, revisionare, aggiornare o costruire da zero è ovunque. È un giro d’affari che supera quello che nel secolo scorso ruotava intorno all’industria automobilistica. Oggi chiunque lavori nel campo della robotica ha di fronte a sé un futuro brillante. E i robot che hai davanti agli occhi sono solo una parte di quelli all’opera. Infatti la maggior parte di loro, quelli che riparano le infrastrutture della città e ne mandano avanti i servizi essenziali, è nascosta alla vista.

Nel negozio di giocattoli vieni accolto da un commesso-robot che ti domanda se puoi esserti utile.

«Sì, vorrei comprare un cane-robot».

Dai un’occhiata agli ultimi modelli, impressionato da ciò che questi cuccioli meccanici riescono a fare. Possono giocare, correre e raccogliere oggetti. Insomma, possono fare tutto quello che fa un cane vero. Be’, tutto tranne i bisogni sul tappeto. Forse è proprio per questo che i genitori li comprano per i loro bambini.

«Vorrei un cucciolo-robot per il mio nipotino di sei anni. È un bambino molto intelligente, gli piace sperimentare. Ma a volte è anche timido e silenzioso. Che tipo di cane potrebbe aiutarlo a uscire dal suo guscio?».

«Mi dispiace, signore» risponde il commesso «ma non sono stato programmato per rispondere a questo tipo di domande. Se vuole posso farle vedere un giocattolo spaziale». Per quanto versatili siano, ci vuole ancora molto prima che i robot inizino a cogliere le sfumature del comportamento umano.

Comprato il regalo per Kevin, vai verso il negozio di abbigliamento maschile. È il caso di cambiare quel vecchio vestito, se vuoi fare una buona impressione sulla ragazza con cui stai per uscire. Provi alcuni completi di marca, tutti molto eleganti, però nessuno è della tua taglia precisa. Ma visto che hai tutte le tue misure del tuo corpo memorizzate sulla carta di credito, la tiri fuori dal portafoglio e immetti i tuoi dati nel computer del negoziante, così che il completo su misura che hai scelto possa essere fabbricato e consegnato direttamente sulla porta di casa tua.

Infine vai al supermercato. Grazie alle lenti a contatto leggi tutti i chip sulle confezioni dei

prodotti, e confronti i prezzi in rete per vedere quale negozio in città ha quelli più convenienti. Non c'è più bisogno, infatti, di tirare a indovinare su chi abbia i prezzi più bassi.

L'appuntamento

Mentre ti prepari a uscire con Karen ti accorgi con sorpresa di sentirti come un ragazzino al primo appuntamento. Vorresti fare bella figura, anche nel caso in cui ci scappi un invito a casa dopo cena, quindi decidi che è davvero giunto il momento di rinnovare l'arredamento di casa tua. Per fortuna oggi la maggior parte dei mobili per cucina e soggiorno è fatta con materiali programmabili.

«Molly, l'arredamento di questa casa è così vecchio... fammi vedere i cataloghi del mobilificio con i nuovi mobili e i piani di cottura. Vorrei riprogrammarlo».

In un baleno appaiono sullo schermo le foto degli ultimi modelli.

«Scarica i progetti di questo piano di lavoro per la cucina, di quel divano e di questo tavolo qui, e poi installali, per favore».

Mentre ti prepari, Molly scarica e installa i progetti, e in un attimo il piano della cucina, il divano in salotto e il tavolo iniziano a dissolversi e a trasformarsi in una specie di creta, per poi riassumere una forma nuova. Nel giro di un'ora il tuo appartamento è completamente diverso. (Di recente, mentre davi un'occhiata alle agenzie immobiliari in rete, hai notato che le case di materiale programmabile sono sempre più di moda. Addirittura, nell'azienda per cui lavori si stanno discutendo progetti ambiziosi che prevedono di costruire un'intera città nel deserto con questi materiali. Premi un bottone e puff!, ecco una "città istantanea".)

Nonostante il nuovo mobilio, il tuo appartamento continua a sembrarti un po' scialbo, ma basta un semplice movimento delle mani perché i colori e i motivi della carta da parati cambino all'istante. È finita l'epoca delle pareti dipinte: meglio la tappezzeria intelligente!

Mentre vai all'incontro con Karen le compri un mazzo di fiori, e quando la vedi rimani piacevolmente sorpreso. Tra voi scatta qualcosa, ed entrate subito in sintonia.

Durante la cena scopri che Karen è una creativa. Lei scherza dicendo che sarebbe potuta diventare una senza un soldo, ridotta a vendere dipinti per un tozzo di pane sul ciglio della strada, e invece è una web designer di successo, ha addirittura fondato una sua agenzia. C'è una grande domanda in questo settore, sembra che tutti vogliano il design più moderno e accattivante per i loro siti web e prodotti multimediali. Karen traccia con le dita un paio di cerchi nell'aria, ed ecco apparire alcune delle sue creazioni: «Ti faccio vedere alcuni dei miei ultimi lavori» spiega orgogliosa.

«Io sono un ingegnere» le rispondi. «Lavoro tutto il giorno a contatto con i robot: alcuni sono parecchio avanzati, ma talvolta fanno anche cose davvero stupide. Come funziona nel tuo campo? I robot stanno iniziando a farsi strada?».

«Assolutamente no!» esclama Karen, che lavora solo con persone in carne e ossa. Nel suo campo il bene più prezioso è la creatività, cosa che manca anche ai robot più avanzati.

«Ti sembrerò un po' all'antica, ma da me i robot fanno solo noiosi lavori d'ufficio, quelli più ripetitivi. Vorrei proprio vedere il giorno in cui saranno capaci di fare qualcosa di originale, tipo raccontare una barzelletta, scrivere un romanzo o comporre musica».

«È vero, non è ancora successo, ma un giorno potrebbe accadere» pensi dentro di te.

Mentre la ascolti parlare, una domanda ti balena per la testa: «Quanti anni avrò?». Da parecchio ormai la medicina ha scoperto come rallentare l'invecchiamento, e adesso le persone

potrebbero avere quasi qualunque età. Il suo profilo in rete non riportava questo dato, e Karen sembra avere più o meno venticinque anni.

Dopo averla accompagnata a casa, inizi a sognare a occhi aperti. “Come sarebbe vivere con una persona così?”. “Mi piacerebbe trascorrere il resto della vita con lei?”. Ma qualcosa ti tormenta, un pensiero che ti ha ossessionato per tutto il giorno.

Rientrato in casa tua, vai di fronte allo schermo e chiedi a Molly di chiamarti il dottor Brown, grato del fatto che, essendo un robot, lo puoi “disturbare” a qualunque ora del giorno e della notte.

L'immagine del dottor Brown è subito sullo schermo: «C'è qualcosa che ti tormenta, figliolo?» ti chiede con tono paterno.

«Dottore, devo farle una domanda che mi frulla per la testa da un po' di tempo».

«Di che si tratta?».

«Quanto vivrò?».

«Vuoi dire qual è la tua aspettativa di vita? Be', non si può dire con certezza. La tua scheda dice che hai settantadue anni, ma biologicamente parlando i tuoi organi sono quelli di un trentenne. Sei stato tra quelli della prima generazione che ha chiesto di essere riprogrammata geneticamente per vivere più a lungo. Quando avevi circa trent'anni hai deciso di smettere d'invecchiare. Non sono ancora morte abbastanza persone della tua generazione per avere dati sufficienti a stimare quanto puoi vivere».

«Ma vivrò per sempre?».

«Come un immortale? No, non credo. C'è una bella differenza tra uno che può vivere per sempre e uno con un'aspettativa di vita così lunga che ancora non è stato possibile quantificarla».

«Ma se non invecchio» aggiungi «come posso capire quando...» e ti fermi, lasciando la frase a metà. «Il fatto è che ho conosciuto una persona... diciamo speciale, e ipotizzando che voglia pianificare il mio futuro con lei, come posso far combaciare le diverse fasi della mia vita con le sue? Se la mia generazione non ha ancora vissuto abbastanza per capire quando morirò, come posso sapere quando sarà il momento giusto per sposarsi, avere dei figli o pensare alla pensione? Capisce che cosa voglio dire, dottore? Sento il bisogno di pianificare il mio futuro, ma non so da che parte cominciare...».

«Non ho una risposta alla tua domanda» dice il dottor Brown. «Al momento l'umanità è come una specie di cavia. Mi dispiace, John, sei entrato in un territorio inesplorato».

I mesi successivi

I mesi successivi con Karen sono una piacevole sorpresa per entrambi. Un giorno la porti alla sala della realtà virtuale, tornate bambini e vi divertite un mondo vivendo vite immaginarie e impossibili. Quando entrate in una camera vuota, il software della realtà virtuale comincia a trasmettere dati alle vostre lenti a contatto, e lo scenario attorno a voi cambia immediatamente. In uno di questi programmi siete dinosauri in fuga, ma in qualunque posto scappiate un altro dinosauro sbuca fuori da un angolo e dovete ricominciare a correre. In un altro programma combattete contro astronavi aliene, o contro pirati che cercano di abbordare la vostra nave, mentre in un altro ancora decidete di cambiare forma e vi trasformate in aquile che solcano i cieli. Infine, vi trovate in un'isola romantica dei mari del sud, poi a ballare al chiaro di luna, mentre la musica fluttua dolcemente nell'aria.

Dopo un po' vi viene voglia di provare qualcosa di nuovo, di fare qualcosa nella vita reale, anziché vivere vite immaginarie. Così, quando entrambi avete un po' di tempo libero, decidete di fare un viaggio in Europa.

«Molly» dici allo schermo-parete «Karen e io vorremmo fare una vacanza in Europa, una vera vacanza. Puoi controllare i voli, gli hotel e le offerte speciali? Poi, per favore, fammi un elenco di tutti gli eventi e spettacoli che potrebbero interessarci: conosci i nostri gusti...». In pochi minuti Molly vi traccia un itinerario dettagliato.

Qualche giorno dopo vi ritrovate a passeggiare tra le rovine del foro romano, ma grazie alle vostre lenti a contatto non vedete rovine, bensì i fasti dell'impero romano. Camminando tra resti di pilastri e colonne, le lenti vi mostrano come apparivano quando l'impero era all'apice della sua gloria.

Le lenti vi aiutano in ogni momento della vacanza. Non avete bisogno né di guide né di mappe ingombranti, e persino fare shopping o contrattare sui prezzi in italiano è un piacere, poiché la traduzione di quello che vi dicono appare scritta ai piedi della persona con cui state parlando.

Quando scende la notte, mentre osservate il cielo sopra la città, le lenti vi mostrano la disposizione delle costellazioni, immagini ingrandite degli anelli di Saturno, le comete che solcano il cielo, magnifiche nebulose e spettacolari esplosioni stellari.

Finalmente un giorno Karen ti rivela un segreto: la sua vera età. Ha sessantun'anni, e per qualche motivo sapere quanti anni ha non ti sembra più così importante.

«Karen, poter vivere così a lungo ti rende felice?».

«Sì, certo!» risponde senza esitazioni. «Ai tempi di mia nonna le donne si sposavano, mettevano su famiglia, e forse in mezzo a tutto questo riuscivano anche a fare carriera. Invece ora mi sento come se mi fossi già reincarnata tre volte. Ho potuto impegnarmi in tre attività diverse senza dover mai rimpiangere nulla. All'inizio ho viaggiato in tutto il mondo facendo la guida turistica in diversi paesi. È stata una vita meravigliosa, il settore del turismo è enorme e offre un sacco di opportunità. Però dopo un po' mi sono accorta che volevo fare qualcosa di più importante, così sono diventata avvocato e ho iniziato a battermi per difendere cause che mi stavano a cuore. Poi ho deciso di dare maggiore spazio al mio lato creativo, così ho fondato la mia agenzia di web design. E sono orgogliosa di poter dire che in tutte queste attività non ho mai utilizzato dei robot. I robot non potranno mai essere guide turistiche personalizzate, vincere una battaglia legale o realizzare un'opera d'arte».

“Il tempo ce lo dirà” pensi, ma non glielo dici.

«E hai in mente di iniziare una nuova carriera?».

«Forse, se verrà fuori qualcosa di più interessante...» e ti sorride, mentre lo dice.

«Karen» le dici infine «se smettiamo di invecchiare, come possiamo capire quando è il momento giusto per... be', sposarsi, avere dei figli, mettere su famiglia... Da decenni ormai parlare di orologio biologico non ha più senso. Quindi pensavo che forse è arrivato il momento di sistemarsi e mettere su famiglia».

«Vuoi dire avere dei figli?» ti domanda un po' sorpresa. «Non c'ho mai pensato seriamente, almeno finora. Tutto dipende da se e quando si presenterà l'uomo giusto» dice, sorridendoti maliziosa.

Dopo qualche tempo tu e Karen iniziate a parlare di matrimonio, del nome che vorreste dare a vostro figlio e di quali geni vorreste che abbia.

A casa tua, vai allo schermo-parete e chiami Molly: «Puoi darmi la lista dei geni che il governo ha approvato negli ultimi anni?». Nell'elenco trovi i diversi tipi di geni che definiscono il colore dei capelli e degli occhi, l'altezza, la costituzione fisica, e addirittura qualche tratto della personalità. Ogni lista sembra ogni anno più lunga, e ciascuna è accompagnata da quella delle diverse malattie ereditarie che sono state curate. È un sollievo sapere che non ti devi più preoccupare della fibrosi cistica, che ha tormentato la tua famiglia per generazioni.

Mentre scorri la lista dei geni approvati non ti senti come un semplice genitore, ma come una specie di dio, come qualcuno che può creare un bambino a propria immagine e somiglianza.

«Esiste un programma che può analizzare il DNA del bambino e fornirti una stima ragionevole di come saranno la sua faccia, la forma del suo corpo e la sua personalità. Vuoi che te lo scarichi, per vedere come potrebbe essere l'aspetto di tuo figlio?» ti domanda Molly.

«No» le rispondi «alcune cose è meglio che rimangano una sorpresa».

Un anno dopo

Karen è incinta, ma i dottori hanno detto che non ci sono problemi se volete fare un giro sull'ascensore spaziale, che ormai ha aperto anche ai turisti.

«Sai» le dici «da bambino ho sempre sognato di fare l'astronauta e andare nello spazio, ma il mio entusiasmo ha cominciato a venire meno quando mi sono reso conto che mi sarei dovuto sedere su milioni di litri di carburante, e che sarei potuto saltare in aria con una piccola scintilla. Invece l'ascensore spaziale è un'altra cosa, è pulito e sicuro, non ci sono pericoli. È il modo migliore per visitare lo spazio».

Quando siete sull'ascensore, l'operatore preme un pulsante e cominciate a salire. Ti sembra quasi di stare nell'ascensore di un grande centro commerciale e di aspettare di scendere al piano della biancheria intima; invece stai andando nello spazio. Senti l'accelerazione della cabina mano a mano che salite: 10 chilometri, 20 chilometri, 30 chilometri...

Fuori, lo scenario cambia continuamente. Un attimo prima stavate attraversando l'atmosfera e avevate di fronte nuvole vaporose, ma ora il cielo cambia colore: prima si tinge di viola, poi diventa nero intenso, mentre le stelle vi circondano con tutto il loro splendore. Cominciate a riconoscere le costellazioni, le vedete come mai vi era capitato prima, quando brillavano lontane. Le stelle appaiono diverse rispetto a quando le si osserva dalla Terra: non luccicano, ma brillano ferme, e continuano a farlo da milioni di anni.

L'ascensore sale fino all'altezza di 150.000 chilometri dalla superficie terrestre, poi lentamente si ferma. La vista sulla Terra è meravigliosa, un'immagine che finora avevate contemplato solo in fotografia.

Guardando verso il basso, cominciate a vedere il vostro pianeta in una luce completamente nuova. Osservate gli oceani e i continenti, e le luci delle metropoli che risplendono nel buio. La Terra appare così tranquilla, e sembra impossibile che un tempo le persone abbiano versato sangue combattendo per degli stupidi confini. Le nazioni esistono ancora, ma in un'epoca in cui la comunicazione ha praticamente cancellato le distanze sono ormai qualcosa di irrilevante, qualcosa che appartiene al passato.

Mentre Karen appoggia la testa sulla tua spalla, ti rendi conto che stai assistendo alla nascita di una nuova civiltà planetaria, e che tuo figlio sarà uno dei suoi primi cittadini.

All'improvviso estrai dalla tasca un libro vecchio e logoro, e leggi le parole di un uomo morto più di cento anni fa. Queste parole ricordano le sfide che l'umanità ha dovuto affrontare prima di arrivare al giorno che stai vivendo.

Le ha scritte il Mahatma Gandhi, e dicono:

Le radici della violenza: benessere senza lavoro, piacere senza coscienza, sapere senza carattere, commercio senza moralità, scienza senza umanità, adorazione senza sacrificio, politica senza principi.

Note

Introduzione. Che cosa succederà nei prossimi cento anni?

- ¹ Richard Rhodes (a cura di), *Visions of Technology: A Century of Vital Debate About Machines, Systems, and the Human World*, Simon & Schuster, New York 1999, pp. 29-30.
- ² www.learner.org/workshops/primarysources/corporations/docs/.
- ³ James Canton, *The Extreme Future: The Top Trends That Will Reshape the World for the Next 5, 10, and 20 Years*, Dutton, New York 2006, p. 247.
- ⁴ *Ibidem*.
- ⁵ *Ibidem*.
- ⁶ Edward Cornish (a cura di), *Futuring: The Exploration of the Future*, World Future Society, Bethesda 2004, p. 149. Vedi anche *The Facts that Got Away*, in “New York Times”, 14 novembre 2001.
- ⁷ Classico del cinema di fantascienza prodotto dalla MGM nel 1956, con la regia di Fred McLeod Wilcox. Ebbe un’influenza determinante sul genere fantastico successivo. [N.d.T.]

Capitolo 1. Il futuro dei computer

- ¹ Nei primi anni dell’informatica il termine *mainframe* si riferiva ai grandi elaboratori centrali che governavano e controllavano un sistema di calcolo molto complesso, utilizzato soprattutto da grandi aziende e organizzazioni. [N.d.T.]
- ² Citato in Ray Kurzweil, *The Singularity is Near: When Humans Transcend Biology*, Viking, New York 2005, p. 56. [trad. it. *La singolarità è vicina*, Apogeo, Milano 2010, p. 55]. Vedi anche Andrew Hamilton, *Brains that Click*, in “Popular Mechanics”, marzo 1940, p. 258.
- ³ Rhodes, *Visions of Technology*, cit., p. 206.
- ⁴ Babak A. Parviz, *Augmented Reality in Contact Lens*, in “IEEE Spectrum”, settembre 2009, <http://spectrum.ieee.org/biomedical/bionics/augmented-reality-in-a-contact-lens/0>.
- ⁵ La Rust Belt (cintura della ruggine) è quella zona del nord-est degli Stati Uniti che comprende gli Stati gravemente colpiti dalla crisi dell’industria siderurgica degli anni Settanta, ovvero Illinois, Indiana, Michigan, Ohio e Pennsylvania. [N.d.T.]
- ⁶ Gary Stix, *Jacking into the Brain: Is the Brain the Ultimate Computer Interface?*, in “Scientific American”, novembre 2008, pp. 56-61.

- ⁷ Jeff Wise, *Thought Police: How Brain Scans Could Invade Your Private Life*, in “Popular Mechanics”, 15 ottobre 2007, www.popularmechanics.com/science/health/neuro-science/4226614.
- ⁸ “New Scientist”, 15 ottobre 2008, n. 2678.
- ⁹ David Baltimore, *How Biology Became an Information Science*, in Peter J. Denning (a cura di), *The Invisible Future: The Seamless Integration of Technology into Everyday Life*, McGrawHill, New York 2002, pp. 53-54.
- ¹⁰ *Ivi*, p. 54.
- ¹¹ Bernard Blümich, *The Incredible Shrinking Scanner: MRI-like Machine Becomes Portable*, in “Scientific American”, novembre 2008, p. 68.

Capitolo 2. Il futuro dell'intelligenza artificiale

- ¹ John Markoff, in “New York Times”, 25 luglio 2009, www.nytimes.com/2009/07/26/science/26robot.html?scp=1&sq=Scientists Worry Machines May Outsmart Man&st=cse.
- ² *Ibidem*.
- ³ Michio Kaku, *Visions: How Science Will Revolutionize the 21st Century*, Anchor, New York 1998, p. 75.
- ⁴ Daniel Crevier, *AI: The Tumultuous History of the Search for Artificial Intelligence*, Basic Books, New York 1993, p. 109.
- ⁵ Paul W. Abrahams, *A World Without Work*, in Peter J. Denning e Robert M. Metcalfe, *Beyond Calculation: The Next Fifty Years of Computing*, Copernicus, New York 1997, p. 136.
- ⁶ Richard Strozzi Heckler, *Somatics in Cyberspace*, in Denning, *The Invisible Future*, cit., p. 281.
- ⁷ Charles Sheffield, Marcelo Alonso e Morton A. Kaplan (a cura di), *The World of 2044: Technological Development and the Future of Society*, Paragon House, St. Paul 1994, p. 30.
- ⁸ Kurzweil, *The Singularity is Near*, cit., p. 262.
- ⁹ *World Robotics 2007*, Statistical Department dell'IFR (International Federation of Robotics), Francoforte 2007.
- ¹⁰ Fred Hapgood, *Reverse-Engineering the Brain*, in “Technology Review”, 11 luglio 2006, www.technologyreview.com/read_article.aspx?id=17111.
- ¹¹ John M. Harlow, *Passage of an Iron Rod Through the Head*, in “Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences”, 11 maggio 1999, pp. 281-283, www.neuro.psychiatryonline.org/cgi/content/full/11/2/281.
- ¹² Jonathan Fildes, *Artificial Brain '10 Years Away'*, in “BBC News”, 22 luglio 2009, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/8164060.stm>.
- ¹³ Jason Palmer, *Simulated Brain Closer to Thought*, in “BBC News”, 22 aprile 2009, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/sci/tech/8012496.stm>.
- ¹⁴ Douglas Fox, *IBM Reveals the Biggest Artificial Brain of All Time*, in “Popular Mechanics”, 18 dicembre 2009, www.popularmechanics.com/technology/engineering/extreme-machines/4337190.
- ¹⁵ Sally Adee, *Reverse-Engineering the Brain*, in “IEEE Spectrum”, giugno 2008, <http://spectrum.ieee.org/biomedical/ethics/reverse-engineering-the-brain/0>.
- ¹⁶ Vernor Vinge, *What Is the Singularity?*, relazione presentata al Vision-21 Symposium sponsorizzato dal NASA Lewis Research Center e dall'Ohio Aerospace Institute, 30-31 marzo 1993. Una versione leggermente modificata è comparsa in “Whole Earth Review”, inverno 1993, <http://mindstalk.net/vinge/vinge-sing.html>.
- ¹⁷ Tom Abate, *Smarter Than Thou? Stanford Conference Ponders a Brave New World with Machines More Powerful Than Their Creators*, in “San Francisco Chronicle”, 12 maggio 2006, http://articles.sfgate.com/2006-05-12/business/17293318_1_ray-kurzweil-machines-artificial-intelligence.
- ¹⁸ Kurzweil, *The Singularity is Near*, cit., p. 374.
- ¹⁹ <http://consc.net/mindpapers>.
- ²⁰ Sheffield et al., *The World of 2044*, cit., p. 38.

- ²¹ Kurzweil, *The Singularity is Near*, cit., p. 10.
- ²² Abate, *Smarter Than Thou?*, cit.
- ²³ Brian O’Keefe, *The Smartest (or the Nuttiest) Futurist on Earth*, in “Fortune”, 2 maggio 2007, http://money.cnn.com/magazines/fortune/fortune_archive/2007/05/14/100008848/.
- ²⁴ Greg Ross, *An Interview with Douglas R. Hofstadter*, in “American Scientist”, gennaio 2007, www.americanscientist.org/bookshelf/pub/douglas-r-hofstadter.
- ²⁵ P.W. Singer, *Gaming the Robot Revolution*, in “Slate”, 21 maggio 2009, www.slate.com/id/2218834/.
- ²⁶ Rodney A. Brooks, *Making Living Systems*, in John Brockman, (a cura di), *Science at the Edge: Conversations with the Leading Scientific Thinkers of Today*, Sterling, New York 2008, p. 250.
- ²⁷ Rodney A. Brooks, *Flesh and Machines*, in Denning, *The Invisible Future*, cit., p. 63.
- ²⁸ Contrazione di *wet + software*. Si usa per descrivere il cervello umano (*wet*), o l’uomo tutto, in rapporto alle sue capacità logiche e computazionali (*software*). [N.d.T.]
- ²⁹ Pam Belluck, *Burst of Technology Helps Blind to See*, in “New York Times”, 27 settembre 2009, p. A1, www.nytimes.com/2009/09/27/health/research/27eye.html?_r=1&scp=1&sq=“burst of technology”&st=cse.
- ³⁰ BBC-TV, 18 ottobre 2009.
- ³¹ Rodney A. Brooks, *The Merger of Flesh and Machines*, in John Brockman, *The Next Fifty Years*, Vintage, New York 2002, p. 189 [trad. it. *L’unione di carne e macchine*, in *I prossimi cinquant’anni: i grandi scienziati contemporanei riflettono sul futuro*, Mondadori, Milano 2002, p. 161].
- ³² *Ivi*, pp. 162-163.
- ³³ Gregory Stock, *Redesigning Humans: Choosing Our Genes, Changing Our Future*, Houghton Mifflin, Boston 2003, p. 23 [trad. it. *Riprogettare gli esseri umani: l’impatto dell’ingegneria genetica sul destino biologico della nostra specie*, Orme, Milano 2005].

Capitolo 3. Il futuro della medicina

- ¹ Baltimore, *How Biology Became an Information Science*, cit., p. 43.
- ² Nicholas Wade, *Cost of Decoding a Genome Is Lowered*, in “New York Times”, 10 agosto 2009, p. D3, www.nytimes.com/2009/08/11/science/11gene.html.
- ³ Jeanne Lenzer, *Have We Entered the Stem Cell Era?*, in “Discover”, novembre 2009, p. 33, <http://discovermagazine.com/2009/nov/14-have-we-entered-the-stem-cell-era>.
- ⁴ *Ibidem*.
- ⁵ Stock, *Redesigning Humans*, cit., p. 5.
- ⁶ *Ivi*, p. 36.
- ⁷ Kate Kelland, *Gene Maps to Transform Scientists’ Work on Cancer*, in “Reuters”, 18 dicembre 2009, <http://www.reuters.com/article/2009/12/16/us-cancer-genes-idUSTRE5BF42O20091216>.
- ⁸ Baltimore, *How Biology Became an Information Science*, cit., p. 54.
- ⁹ Kurzweil, *The Singularity is Near*, cit., p. 188.
- ¹⁰ Dal titolo della serie televisiva statunitense *Doogie Howser, M.D.*, in cui un ragazzo prodigio di sedici anni, Douglas Howser detto Doogie, esercita la professione di medico. [N.d.T.]
- ¹¹ Stock, *Redesigning Humans*, cit., p. 108.
- ¹² Jonah Lehrer, *Small, Furry ...and Smart?*, in “Nature”, 461, ottobre 2009, p. 864, <http://www.nature.com/news/2009/091014/full/461862a.html>.
- ¹³ *Ibidem*.

- ¹⁴ Jonah Lehrer, *Smart Mice*, in “The Frontal Cortex”, 15 ottobre 2009, http://scienceblogs.com/cortex/2009/10/smart_mice.php.
- ¹⁵ Sheffield *et al.*, *The World of 2044*, cit., p. 107.
- ¹⁶ Kurzweil, *The Singularity is Near*, cit., p. 317.
- ¹⁷ Kaku, *Visions*, cit., p. 211.
- ¹⁸ Nicholas Wade, *Tests Begin on Drugs That May Slow Aging*, in “New York Times”, 17 agosto 2009, p. D4, www.nytimes.com/2009/08/18/science/18aging.html?ref=caloric_restriction.
- ¹⁹ Nicholas Wade, *Quest for a Long Life Gains Scientific Respect*, in “New York Times”, 29 settembre 2009, p. D4, www.nytimes.com/2009/09/29/science/29aging.html?ref=caloric_restriction.
- ²⁰ Nicholas Wade, *Scientists Find Clues to Aging in a Red Wine Ingredient's Role in Activating a Protein*, in “New York Times”, 26 novembre 2008, p. A30, www.nytimes.com/2008/11/27/health/27aging.html?scp=6&sq=sinclair%20resveratrol&st=cse.
- ²¹ Wade, *Quest for a Long Life Gains Scientific Respect*, cit., p. D4, www.nytimes.com/2009/09/29/science/29aging.html?ref=caloric_restriction.
- ²² Kurzweil, *The Singularity is Near*, cit., p. 247.
- ²³ Stock, *Redesigning Humans*, cit., p. 88.
- ²⁴ Ciara Curtin, *Fact or Fiction?: Living People Outnumber the Dead*, in “Scientific American”, marzo 2007.
- ²⁵ Lester Brown, *Plan B 4.0: Mobilizing to Save Civilization*, Norton, New York 2009, p. 5 [trad. it. *Piano B 4.0: mobilitarsi per salvare la civiltà*, Edizioni Ambiente, Milano 2010, p. 43].
- ²⁶ Richard Dawkins, *A Devil's Chaplain: Reflections on Hope, Lies, Science, and Love*, Houghton Mifflin Mariner, New York 2004, p. 113 [trad. it. *Il cappellano del diavolo*, Raffaello Cortina, Milano 2004].
- ²⁷ Katherine S. Pollard, *What Makes Us Human?*, in “Scientific American”, maggio 2009, p. 44.
- ²⁸ Nicholas Wade, *Scientists in Germany Draft Neanderthal Genome*, in “New York Times”, 12 febbraio 2009, p. A12, www.nytimes.com/2009/02/13/science/13neanderthal.html?scp=3&sq=Neanderthal&st=cse.
- ²⁹ *Ibidem*.
- ³⁰ Dawkins, *A Devil's Chaplain*, cit., p. 114.
- ³¹ Kate Wong, *Scientists Sequence Half the Woolly Mammoth's Genome*, in “Scientific American”, 26 gennaio 2009, p. 26, <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=woolly-mammoth-genome-sequenced>.
- ³² Stock, *Redesigning Humans*, cit., p. 183.

Capitolo 4. Nanotecnologia

- ¹ Carl T. Hall, *Brave New Nano-World Lies Ahead*, in “San Francisco Chronicle”, 19 luglio 1999, http://articles.sfgate.com/1999-07-19/news/17694442_1_atom-molecules-nanotech.
- ² *Ibidem*.
- ³ Citato in Kurzweil, *The Singularity is Near*, cit., p. 220.
- ⁴ James R. Heath, Mark E. Davis e Leroy Hood, *Nanomedicine: Revolutionizing the Fight Against Cancer*, in “Scientific American”, febbraio 2009, p. 44.
- ⁵ Emily Singer, *Stealthy Nanoparticles Attack Cancer Cells*, in “Technology Review”, 4 novembre 2009, www.technologyreview.com/business/23855/.
- ⁶ *Special Gold Nanoparticles Show Promise for “Cooking” Cancer Cells*, http://www.eurekalert.org/pub_releases/2009-03/acs-sgn030909.php.
- ⁷ Thomas E. Mallouk e Ayusman Sen, *How to Build Nanotech Motors*, in “Scientific American”, maggio 2009, p. 72.

- ⁸ Katherine Harmon, *Could a Microchip Help to Diagnose Cancer in Minutes*, in “Scientific American”, post del blog “Observations”, 28 settembre 2009, <http://blogs.scientificamerican.com/observations/2009/09/28/could-a-microchip-help-to-diagnose-cancer-in-minutes/>.
- ⁹ “Electronic News”, 18 settembre 2007, http://www.edn.com/article/462041-Gordon_Moore_on_Moore_s_Law.php.
- ¹⁰ “Electronic News”, 13 luglio 2004, http://www.edn.com/article/480545-Intel_Moore_s_Law_Here_to_Stay.php. Vedi anche Kurzweil, *The Singularity is Near*, cit., p. 104, e http://www.nanotech-now.com/news.cgi?story_id=04803.
- ¹¹ Alexis Madrigal, *Scientist Builds World’s Smallest Transistor, Gordon Moore Sighs with Relief*, in “Wired”, <http://www.wired.com/wiredscience/2008/04/scientists-buil/>.
- ¹² *Ibidem*.
- ¹³ Vint Cerf, *One Is Glad to Be of Service*, in Denning, *The Invisible Future*, cit., p. 229.
- ¹⁴ Da *claytronics* (*clay electronics*), ovvero “elettronica d’argilla”, una scienza applicata che combina nanotecnologia e informatica per creare nanocomputer in scala chiamati, appunto, catomi, in modo che possano interagire tra loro per dare forma a oggetti tridimensionali e interattivi. [N.d.T.]
- ¹⁵ Sharon Gaudin, *Intel Sees Future with Shapeshifting Robots, Wireless Power*, in “Computerworld”, 22 agosto 2008, http://www.computerworld.com/s/article/9113301/Intel_sees_future_with_shape_shifting_robots_wireless_power?taxonomyId=12&pageNumber=2.
- ¹⁶ *Ibidem*.
- ¹⁷ *Ibidem*.
- ¹⁸ Richard E. Smalley, *Of Chemistry, Love, and Nanobots*, in “Scientific American”, 285, settembre 2001, pp. 76-77, <http://bit.ly/thI23G>.
- ¹⁹ Rudy Baum, *Nanotechnology: Drexler and Smalley Make the Case for and Against “Molecular Assemblers”*, in “Chemical and Engineering News”, 81, 1° dicembre 2003, pp. 37-42, <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>.
- ²⁰ Bill Joy, *Why the Future Doesn’t Need Us*, in “Wired”, 8, aprile 2000, <http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy.html>; una traduzione in italiano dell’articolo è disponibile all’indirizzo <http://www.tmcrew.org/eco/nanotecnologia/billjoy.htm>.
- ²¹ BBC-Discovery Channel, *Visions of the Future*, parte II, 2007.
- ²² Marco 10,25.
- ²³ Brooks, *Flesh and Machines*, in Denning, *The Invisible Future*, cit., p. 63.

Capitolo 5. Il futuro dell’energia

- ¹ Kurzweil, *The Singularity is Near*, cit., p. 236.
- ² www.mkinghubbert.com/speech/prediction.
- ³ Più di 4 dollari al gallone alla pompa di benzina (1 gallone = 3,78 litri). Al cambio dell’epoca, più di 70 centesimi di euro al litro, che per gli Stati Uniti è tanto. [N.d.R.]
- ⁴ Sheffield *et. al.*, *The World of 2044*, cit., p. 179.
- ⁵ www.gwec.net/index.php?id=125.
- ⁶ Tad Friend, *Plugged In*, in “The New Yorker”, 24 agosto 2009, pp. 50-59.
- ⁷ *GM Convinced the Future Is in FuelCells*, in CBS News, 11 settembre 2009, www.cbsnews.com/stories/2009/09/11/tech/main5302610.shtml?tag=mncol;lst;6.
- ⁸ I fatti di Fukushima e le conseguenti decisioni di alcuni governi riguardo al nucleare sono successivi alla pubblicazione di questo libro negli Stati Uniti. Dopo l’incidente alla centrale di Fukushima la Germania ha infatti annunciato di voler abbandonare la produzione di energia elettrica da fonte nucleare entro il 2022. [N.d.R.]

- ⁹ www.swampfox.ws/node/26502.
- ¹⁰ Brown, *Plan B 4.0*, cit., p. 106.
- ¹¹ Ivi, p. 107.
- ¹² Ivi, p. 108.
- ¹³ Ivi, p. 98.
- ¹⁴ Peter Schwartz e Doug Randall, *An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security*, Global Business Network, ottobre 2003, p. 18, http://www.gbn.com/consulting/article_details.php?id=53.
- ¹⁵ Cornelia Dean, *Experts Ponder the Hazards of Using Technology to Save the Planet*, in “New York Times”, 12 agosto 2008, <http://www.nytimes.com/2008/08/12/health/12iht-ethics.3.15212327.html?pagewanted=all>.
- ¹⁶ Matthew L. Wald, *Refitted to Bury Emissions, Plant Draws Attention*, in “New York Times”, 29 settembre 2009, p. A19, www.nytimes.com/2009/09/22/science/earth/22coal.html?ref=american_electric_power_company.
- ¹⁷ John Craig Venter, citato in *Oil and the Future of Energy: Climate Repair; Nuclear Fuel, Renewable and Green Sources, Energy Efficiency*, redazione di “Scientific American”, Lyon Press, Guilford 2007, pp. 220-221. Dalla presentazione della Synthetic Genomics che Venter ha fatto alla Conference on Synthetic Biology 2.0 di Berkeley, in California, il 20 maggio 2006.
- ¹⁸ Freeman J. Dyson, *Can We Control the Carbon Dioxide in the Atmosphere?*, in “Energy”, 2, 3, 1977, pp. 287-291.
- ¹⁹ Sheffield *et al.*, *The World of 2044*, cit., p. 158.
- ²⁰ Ralph Lapp, citato in *Perón's Atom*, in “Time”, 2 aprile 1951, www.time.com/time/magazine/article/0,9171,814503,00.html.
- ²¹ Charles Seife, *Sun in a Bottle: The Strange History of Fusion and the Science of Wishful Thinking*, Viking Penguin, New York 2008, p. 76.
- ²² W. Wayt Gibbs, *Plan B for Energy: 8 Revolutionary Energy Sources*, in “Scientific American”, settembre 2006 e 2 aprile 2009, <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=plan-b-for-energy-8-ideas>.
- ²³ *Ibidem*.
- ²⁴ Seife, *Sun in a Bottle*, cit., p. 111.
- ²⁵ <http://www.hiper-laser.org/index.asp>.
- ²⁶ <http://www.iter.org/factsfigures>.
- ²⁷ Gibbs, *Plan B for Energy*, cit.
- ²⁸ *Oil and the Future of Energy*, cit., p. 217.
- ²⁹ Ben Bova, *To the Next President*, in “Washington Post”, 12 ottobre 2008, www.nss.org/settlement/ssp/bova.htm.
- ³⁰ “International Herald Tribune”, 2 settembre 2009, p. 14. Vedi anche Shigeru Sato e Yuji Okada, *Mitsubishi, IHI to Join \$21 Bln Space Solar Project*, 31 agosto 2009, www.bloomberg.com/apps/news?pid=newsarchive&sid=aJ529lsdk9HI.
- ³¹ *Ibidem*.

Capitolo 6. Il futuro dei viaggi spaziali

- ¹ http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/1999/ast02feb99_1/.
- ² John Glenn, astronauta, aviatore e politico statunitense, è stato il primo americano ad avere percorso un'orbita completa attorno alla Terra. [N.d.T.]
- ³ La commissione Augustine, costituita da un gruppo di esperti guidati da Norman Augustine, è stata istituita nel 2009 dal presidente Barack Obama allo scopo di revisionare i programmi statunitensi di esplorazione spaziale. [N.d.T.]
- ⁴ <http://lcross.arc.nasa.gov>.
- ⁵ Si tratta della Stazione Spaziale Internazionale (ISS), un progetto congiunto di cinque diverse agenzie spaziali. La ISS, ancora in

fase di completamento, è abitata continuamente da almeno due astronauti dal novembre 2000. [N.d.T.]

- 6 In climatologia, un fenomeno retroattivo è definito *positivo* quando una tendenza al riscaldamento provoca effetti che inducono un riscaldamento ulteriore. [N.d.T.]
- 7 John Elbon, in “New York Times”, 16 Settembre 2010, p. A3.
- 8 Freeman J. Dyson, *The Sun, the Genome and the Internet: Tools of Scientific Revolution*, Oxford University Press, New York 1999, pp. 88-99 [trad. it. *Il Sole, il genoma e Internet: strumenti delle rivoluzioni scientifiche*, Bollati Boringhieri, Torino 2000, pp. 111-124].
- 9 Katherine Bourzac, *Making Carbon Nanotubes into Long Fibers*, in “Technology Review”, 10 novembre 2009, www.technologyreview.com/energy/23921/.
- 10 BBC-TV, 5 novembre 2009.
- 11 <http://en.wikipedia.org/wiki/Ikaros>.
- 12 Vint Cerf, *One is Glad to Be of Service*, in Denning, *The Invisible Future*, cit., pp. 229-230.
- 13 Scott A. Dickson, *Enabling Battlespace Persistent Surveillance: The Form, Function and Future of Smart Dust*, Blue Horizon Paper, Center for Strategy and Technology, Air War College, aprile 2007.

Capitolo 7. Il futuro della ricchezza

- 1 Umi Hani Sharani, *Muslims Almost Totally Dependent on Others, Says Mahatir*, 23 marzo 2006, http://www.irfi.org/articles/articles_501_550/muslims_almost_totally_dependent.htm.
- 2 William J. Holstein, *To Gauge the Internet, Listen to the Steam Engine*, in “New York Times”, 26 agosto 2001, <http://www.nytimes.com/2001/08/26/business/26SVAL.html?scp=1&sq=%22to%20gauge%20the%20internet%22&st=cse>.
- 3 Virginia Postrel, *What Separates Rich Nations from Poor Nations? History Can Provide Some Answers*, in “New York Times”, 1° gennaio 2004, <http://www.nytimes.com/2004/01/01/business/01scene.html>.
- 4 *Ibidem*.
- 5 Thomas L. Friedman, *Green the Bailout*, in “New York Times”, 28 settembre 2008, p. WK11, <http://www.nytimes.com/2008/09/28/opinion/28friedman.html>.
- 6 Steve Lohr, *New Economy; Despite its Epochal Name, the Clicks-and-Mortar Age May Be Quietly Assimilated*, in “New York Times”, 8 ottobre 2001, <http://www.nytimes.com/2001/10/08/business/new-economy-despite-its-epochal-name-clicks-mortar-age-may-be-quietly.html?scp=30&sq=automobile&st=nyt>.
- 7 Friedman, *Green the Bailout*, cit.
- 8 Charles Gasparino, *Merrill Lynch to Offer Online Trading*, in “ZDNet News”, 1° giugno 1999, <http://www.zdnet.com/news/merrill-lynch-to-offer-online-trading/95883>.
- 9 *Ibidem*.
- 10 Hamish McRae, *The World in 2020: Power, Culture and Prosperity*, Harvard Business School, Cambridge 1995, p. 175.
- 11 Agenzia governativa americana che sostiene la ricerca e la formazione di base in tutti i campi non medici della scienza e dell'ingegneria, e che alla fine degli anni Ottanta ha creato la prima rete accademica degli Stati Uniti. [N.d.T.]
- 12 “Estrazione dati”, tecnica utilizzata per estrarre informazioni attraverso l'analisi automatica o semiautomatica di una grande quantità di dati. [N.d.T.]
- 13 Lester C. Thurow, *The Future of Capitalism: How Today's Economic Forces Shape Tomorrow's World*, William Morrow, New York 1996, p. 68 [trad. it. *Il futuro del capitalismo: regole, strategie e protagonisti dell'economia di domani*, Mondadori, Milano 1997, p. 74.
- 14 *Ivi*, p. 81.
- 15 McRae, *The World in 2020*, cit., p. 12.

¹⁶ Thurow, *The Future of Capitalism*, cit., p. 73.

¹⁷ James Grant, *Sometimes the Economy Needs a Setback*, in “New York Times”, 9 settembre 2001, <http://www.nytimes.com/2001/09/09/opinion/sometimes-the-economy-needs-a-setback.html>.

¹⁸ Thurow, *The Future of Capitalism*, cit., pp. 78-79.

¹⁹ McRae, *The World in 2020*, cit., pp. 12-13.

²⁰ Alvin Toffler e Heidi Toffler, *Revolutionary Wealth*, Knopf, New York 2006, p. 288 [trad. it. *La rivoluzione del benessere*, Casini, Roma 2010].

Capitolo 8 Il futuro dell’umanità

¹ Kenichi Ohmae, *The End of the Nation State: The Rise of Regional Economies*, Free Press, New York 1995, p. 45.

² I *wormhole* (letteralmente, “buchi di verme”) sono ipotetiche scorciatoie nello spaziotempo, una sorta di cunicoli che collegano punti diversi dell’universo. [N.d.T.]

³ Da una lettera a Joseph Priestley, citata in Edward Cornish (a cura di), *Futuring: The Exploration of the Future*, World Future Society, Bethesda 2004, p.173.

⁴ William Shakespeare, *Giulio Cesare*, Feltrinelli, Milano 2009, I, 2, 139, p. 35.

⁵ Citato in Rhodes, *Visions of Technology*, cit., p. 61.

Capitolo 9. Un giorno del 2100

¹ Come già specificato nel Capitolo 1, la recente scoperta sulla velocità dei neutrini da parte del CERN di Ginevra è ancora sottoposta a verifiche presso gli acceleratori di Stati Uniti e Giappone, ma soprattutto è successiva alla stesura di questo libro da parte dell’autore. [N.d.R.]

Bibliografia

- Archer, David, *The Long Thaw: How Humans Are Changing the Next 100.000 Years of Earth's Climate*, Princeton University Press, Princeton 2009.
- Bezold, Clement (a cura di), *2020 Visions: Health Care Informaton, Standards and Technologies*, United States Pharmacopeial Convention, Rockville 1993.
- Brockman, John (a cura di), *Science at the Edge: Conversations with the Leading Scientific Thinkers of Today*, Sterling, New York 2008.
- Id. (a cura di), *The Next Fifty Years*, Vintage, New York 2002 [trad. it. *I prossimi cinquant'anni: i grandi scienziati contemporanei riflettono sul futuro*, Mondadori, Milano 2002].
- Brockman, Max (a cura di), *What's Next? Dispatches on the Future of Science*, Vintage, New York 2009 [trad. it. *Scienza, next generation: diciotto giovani scienziati ci parlano del futuro*, Il Saggiatore, Milano 2009].
- Broderick, Damien, *The Spike: How Our Lives Are Being Transformed by Rapidly Advancing Technologies*, Forge, New York 2001.
- Id. (a cura di), *Year Million: Science at the Far Edge of Knowledge*, Atlas, New York 2008.
- Brooks, Rodney A., *Flesh and Machines: How Robots Will Change Us*, Vintage, New York 2003.
- Brown, Lester, *Plan B 4.0: Mobilizing to Save Civilization*, Norton, New York 2009 [trad. it. *Piano B 4.0: mobilitarsi per salvare la civiltà*, Edizioni Ambiente, Milano 2010].
- Canton, James, *The Extreme Future: The Top Trends That Will Reshape the World for the Next 5, 10, and 20 Years*, Dutton, New York 2006.
- Coates, Joseph F., John B. Mahaffie e Andy Hines, *2025: Scenarios of U.S. and Global Society Reshaped by Science and Technology*, Oakhill Press, Greensboro 1997.
- Cornish, Edward (a cura di), *Futuring: The Exploration of the Future*, World Future Society, Bethesda 2004.
- Crevier, Daniel, *AI: The Tumultuous History of the Search for Artificial Intelligence*, Basic Books, New York 1993.
- Davies, Paul, *The Eerie Silence: Renewing Our Search for Alien Intelligence*, Houghton Mifflin Harcourt, Boston 2010 [trad. it. *Uno strano silenzio: siamo soli nell'universo?*, Codice Edizioni, Torino 2012].
- Dawkins, Richard, *A Devil's Chaplain: Reflections on Hope, Lies, Science, and Love*, Houghton Mifflin Mariner, New York 2004 [trad. it. *Il cappellano del diavolo*, Raffaello Cortina, Milano 2004].
- Denning, Peter J. (a cura di), *The Invisible Future: The Seamless Integration of Technology into Everyday Life*, McGrawHill, New York 2002.
- Denning, Peter J. e Robert M. Metcalfe, *Beyond Calculation: The Next Fifty Years of*

- Computing, Copernicus, New York 1997.
- Dertouzos, Michael, *What Will Be: How the New World of Information Will Change Our Lives*, Harper Collins, New York 1997.
- Didsbury, Howard F. Jr. (a cura di), *Frontiers of the 21st Century: Prelude to the New Millennium*, World Future Society, Bethesda 1999.
- Id., *21st Century Opportunities and Challenges: An Age of Destruction or and Age of Transformation*, World Future Society, Bethesda 2003.
- Dyson, Freeman J., *The Sun, the Genome and the Internet: Tools of Scientific Revolution*, Oxford University Press, New York 1999 [trad. it. *Il Sole, il genoma e Internet: strumenti delle rivoluzioni scientifiche*, Bollati Boringhieri, Torino 2000].
- Foundation for the Future, *Future of the Planet Earth: Seminar Proceedings*, Bellevue (Washington), 2009, www.future.foundation.org/publications/index.htm.
- Id., *The Next Thousand Years*, Bellevue (Washington), 2004.
- Friedman, George, *The Next 100 Years: A Forecast for the 21st Century*, Doubleday, New York 2009.
- Hanson, William, *The Edge of Medicine: The Technology That Will Change Our Lives*, Palgrave Macmillan, New York 2008.
- Kaku, Michio, *Visions: How Science Will Revolutionize the 21st Century*, Anchor, New York 1998.
- Kurzweil, Ray, *The Singularity is Near: When Humans Transcend Biology*, Viking, New York 2005 [trad. it. *La singolarità è vicina*, Apogeo, Milano 2010]. McElheny, Victor K., *Drawing the Map of Life: Inside the Humane Genome Project*, Basic Books, New York 2010.
- McRae, Hamish, *The World in 2020: Power, Culture and Prosperity*, Harvard Business School, Cambridge 1995.
- Mulhall, Douglas, *Our Molecular Future: How Nanotechnology, Robotics, Genetics, and Artificial Intelligence Will Transform Our World*, Prometheus, Amherst 2002.
- Petersen, John L., *The Road to 2015: Profiles of the Future*, Waite Group, Corte Madera 1994.
- Pickover, Clifford A. (a cura di), *Visions of the Future: Art, Technology and Computing in the 21st Century*, St. Martin's Press, New York 1994.
- Rhodes, Richard (a cura di), *Visions of Technology: A Century of Vital Debate About Machines, Systems, and the Human World*, Simon & Schuster, New York 1999.
- Ridley, Matt, *The Rational Optimist: How Prosperity Evolves*, Harper Collins, New York, 2010.
- Rose, Steven, *The Future of Brain: The Promise and Perils of Tomorrow's Neuro-science*, Oxford University Press, New York 2005.
- Seife, Charles, *Sun in a Bottle: The Strange History of Fusion and the Science of Wishful Thinking*, Viking Penguin, New York 2008.
- Sheffield, Charles, Marcelo Alonso e Morton A. Kaplan (a cura di), *The World of 2044: Technological Development and the Future of Society*, Paragon House, St. Paul 1994.
- Stock, Gregory, *Redesigning Humans: Choosing Our Genes, Changing Our Future*, Houghton Mifflin, Boston 2003 [trad. it. *Riprogettare gli esseri umani: l'impatto dell'ingegneria genetica sul destino biologico della nostra specie*, Orme, Milano 2005].
- Thurow, Lester C., *The Future of Capitalism: How Today's Economic Forces Shape Tomorrow's World*, William Morrow, New York 1996 [trad. it. *Il futuro del capitalismo*:

- regole, strategie e protagonisti dell'economia di domani*, Mondadori, Milano 1997].
- Toffler, Alvin e Heidi Toffler, *Revolutionary Wealth*, Knopf, New York 2006 [trad. it. *La rivoluzione del benessere*, Casini, Roma 2010].
- Van der Duin, Patrick, *Knowing Tomorrow? How Science Deals with the Future*, Eburon, Delft 2007.
- Vinge, Vernor, *Rainbows End*, Tor, New York 2006 [trad. it. *Alla fine dell'arcobaleno*, Mondadori, Milano 2010].
- Watson, Richard, *Future Files: The 5 Trends That Will Shape the Next 50 Years*, Nicholas Brealey, London 2008.
- Weiner, Jonathan, *Long for This World: The Strange Science of Immortality*, Harper Collins, New York 2010.

Codice edizioni

- Cristina Amoretti e Nicla Vassallo, *Piccolo trattato di epistemologia*
Anil Ananthaswamy, *Ai confini della realtà. Viaggio tra i segreti dell'universo*
Chris Anderson, *La coda lunga. Da un mercato di massa a una massa di mercati*
Brunella Antomarini, *Pensare con l'errore. Il bersaglio mobile della conoscenza*
W. Brian Arthur, *La natura della tecnologia*
Aa.vv., *Lezioni Urbinati 2003/2009*
Amedeo Balbi, *Il buio oltre le stelle. L'esplorazione dei lati oscuri dell'universo*
Enrico Bellone, *La scienza negata. Il caso italiano*
Enrico Bellone, *L'origine delle teorie*
Enrico Bellone, *Galilei e l'abisso. Un racconto*
Enrico Bellone, *Qualcosa, là fuori. Come il cervello crea la realtà*
Sergio Bellucci, Marcello Cini, *Lo spettro del capitale. Per una critica dell'economia della conoscenza*
Carlo Bernardini, *Fisica vissuta*
Alain Berthoz, *La scienza della decisione* Alain Berthoz, *La semplicità*
Nick Bilton, *Io vivo nel futuro*
Gianfranco Biondi, Olga Rickards, *Il codice darwin. Nuove contese nell'evoluzione dell'uomo e delle scimmie antropomorfe*
Luca e Alessandro Blengino, *Leonardo Loom e il mistero del teschio*
Roberto Bondì, *Come vedessero due soli. Religione, scienza, modernità*
Aldo Bonomi, *La Malaombra*
Stewart Brand, *Una cura per la Terra*
John Brockman, *Menti curiose. Come un ragazzo diventa uno scienziato*
Alan Burdick, *Lontano dall'Eden. Un'odissea ecologica*
Austin Burt, Robert Trivers, *Geni in conflitto. La biologia degli elementi genetici egoisti*
Emilio Carnevali, Pierfranco Pellizzetti, *Liberista sarà lei! L'imbroglio del liberismo di sinistra*
Sean B. Carroll, *Infinite forme bellissime. La nuova scienza dell'Evo-Devo*
Sean B. Carroll, *Al di là di ogni ragionevole dubbio. La teoria dell'evoluzione alla prova dell'esperienza*
Marco Cattaneo (a cura di), *Scienziati d'Italia. Centocinquanta anni di ricerca e innovazione*
Luigi Luca Cavalli Sforza, *L'evoluzione della cultura (edizione aggiornata 2010)*
George Charpak, Roland Omnès, *Siate saggi, diventate profeti*
Denise Chong, *La bambina nella fotografia. La storia di Kim Phuc e la guerra del Vietnam*
Felice Cimatti, *Il possibile e il reale. Il sacro dopo la morte di Dio*
Marcello Cini, *Il supermarket di Prometeo. La scienza nell'era dell'economia della conoscenza*
Gregory Clark, *Senza pietà. Breve storia economica del mondo*
Flo Conway, Jim Siegelman, *L'eroe oscuro dell'età dell'informazione. Alla ricerca di Norbert Wiener, il padre della cibernetica*
Boris Cyrulnik, *La vergogna*

Devra Davis, *La storia segreta della guerra al cancro*
Paul Davies, *Uno strano silenzio. Ripensare la ricerca di un'intelligenza aliena*
Mario De Caro, Andrea Lavazza, Giuseppe Sartori, *Siamo davvero liberi? Le neuroscienze e il mistero del libero arbitrio*
Jerry A. Coyne, *Perché l'evoluzione è vera*
Alan Dershowitz, *Rights from Wrongs*
Jared Diamond, James Robinson, *Esperimenti naturali di storia*
Thomas Dixon, *Scienza e religione*
Mara Dompè, Alessandro Blengino, *Little Darwin*
Pierluigi Dosis, Chiara Saraceno, *I nuovi poveri. Politiche sulle disuguaglianze*
Paul R. Ehrlich, *Le nature umane. Geni, culture e prospettive*
Niles Eldredge, *Darwin. Alla scoperta dell'albero della vita*
Niles Eldredge, *La vita sulla Terra. Un'enciclopedia della biodiversità, dell'ecologia e dell'evoluzione*
Richard Ellis, *Enciclopedia del mare*
Brian Fagan, *La lunga estate. Come le dinamiche climatiche hanno influenzato la civilizzazione*
Paolo Flores d'Arcais, *Albert Camus filosofo del futuro*
Richard Fortey, *Terra. Una storia intima*
David Foster Wallace, *Tutto, e di più. Storia compatta dell'infinito*
Felice Frankel, *L'incanto della scienza*
John Freeman, *La tirannia dell'e-mail*
Michael S. Gazzaniga, *La mente etica*
Neil Gershenfeld, *Fab. Dal personal computer al personal fabricator*
Mariano Giaquinta, Angelo Guerraggio, *Ipotesi sull'università*
Ann Gibbons, *Il primo uomo. L'avventura della scoperta dei nostri antenati*
Vittorio Girotto, Telmo Pievani, Giorgio Vallortigara, *Nati per credere. Perché il nostro cervello sembra predisposto a fraintendere la teoria di Darwin*
James Gleick, *Isaac Newton*
Barbara Goldsmith, *Genio ossessivo. Il mondo interiore di Marie Curie*
Rebecca Goldstein, *Incompletezza. La dimostrazione e il paradosso di Kurt Gödel*
Stephen Jay Gould, *La struttura della teoria dell'evoluzione*
Stephen Jay Gould, *L'equilibrio punteggiato*
Stephen Jay Gould, *I Have Landed. Le storie, la Storia*
Enrico Grazzini, *L'economia della conoscenza oltre il capitalismo. Crisi dei ceti medi e rivoluzione lunga*
Pietro Greco, Settimo Termini, *Contro il declino*
Pietro Greco, Nico Pitrelli, *Scienza e media ai tempi della globalizzazione*
Nancy Thorndike Greenspan, *La fine di ogni certezza. La vita e la scienza di Max Born*
Jonathan Haidt, *Felicità: un'ipotesi. Verità moderne e saggezza antica*
Michael Hanlon, *Dieci domande alle quali la scienza non può (ancora) rispondere*
Thomas P. Hughes, *Il mondo a misura d'uomo. Ripensare tecnologia e cultura*
Nicholas Humphrey, *Rosso. Uno studio sulla coscienza*
Oliver James, *Il capitalista egoista*
George Johnson, *Le stelle di Miss Leavitt. La storia mai raccontata della donna che scoprì*

come misurare l'universo
Steve Jones, *Quasi come una balena. Aggiornare "L'origine delle specie"*
Michio Kaku, *Il cosmo di Einstein. Come la visione di Einstein ha trasformato la nostra comprensione dello spazio e del tempo*
Michio Kaku, *Mondi paralleli. Un viaggio attraverso la creazione, le dimensioni superiori e il futuro del cosmo*
Michio Kaku, *Fisica dell'impossibile. Un'esplorazione scientifica nel mondo dei phaser, dei campi di forza, del teletrasporto e dei viaggi nel tempo*
Michio Kaku, *Fisica del futuro. Come la scienza cambierà il destino dell'umanità e la nostra vita quotidiana entro il 2100*
Eric R. Kandel, *Alla ricerca della memoria. La storia di una nuova scienza della mente*
Stuart Kauffman, *Reinventare il sacro*
John Kay, *Il pensiero obliquo. Perché gli obiettivi si perseguono meglio per via indiretta*
Kevin Kelly, *Quello che vuole la tecnologia*
David Khayat, *Speranza di domani. Conoscere e combattere il cancro*
Lawrence M. Krauss, *Dietro lo specchio. Il misterioso fascino delle dimensioni addizionali, da Platone alla teoria delle stringhe e oltre*
Lawrence M. Krauss, *L'uomo dei quanti. La vita e la scienza di Richard Feynman*
Rosalind Krauss, *Celibi*
George Lakoff, *La libertà di chi?*
Charles Landry, *City making. L'arte di fare la città*
Robert Laughlin, *Un universo diverso. Reinventare la fisica da cima a fondo*
Andrea Lavazza, Luca Sannicchielli, *Il delitto del cervello*
David Leavitt, *L'uomo che sapeva troppo. Alan Turing e l'invenzione del computer*
Jonah Lehrer, *Proust era un neuroscienziato*
Jonah Lehrer, *Come decidiamo*
Daniel J. Levitin, *Fatti di musica. La scienza di un'ossessione umana*
Daniel J. Levitin, *Il mondo in sei canzoni. Come il cervello musicale ha creato la natura umana*
Jean-Marc Lévy-Leblond, *La velocità dell'ombra. Ai limiti della scienza*
Ignazio Licata, *La logica aperta della mente*
Andrew Lih, *La rivoluzione di Wikipedia*
Elisabeth A. Lloyd, *Il caso dell'orgasmo femminile. Pregiudizio nella scienza dell'evoluzione*
Anna Maria Lombardi, *Keplero. Una biografia scientifica*
Claudio Magris, Stefano Levi Della Torre, *Democrazia, legge e coscienza*
Riccardo Manzotti, Vincenzo Tagliasco, *L'esperienza. Perché i neuroni non spiegano tutto*
Vittorio Marchis, *Centocinquanta (anni di) invenzioni italiane*
Gary Marcus, *La nascita della mente. Come un piccolo numero di geni crea la complessità del pensiero umano*
Gary Marcus, *Kluge. L'ingegneria approssimativa della mente umana*
Lella Mazzoli, *Network effect. Quando la rete diventa pop*
Stefano Mazzotti, *Esploratori perduti. Storie dimenticate di naturalisti italiani di fine Ottocento*
Arthur I. Miller, *L'impero delle stelle. Amicizia, ossessione e tradimento alla ricerca dei buchi neri*

Daniela Minerva, Giancarlo Sturloni, *Di cosa parliamo quando parliamo di medicina*
Steven Mithen, *Il canto degli antenati. Le origini della musica, del linguaggio, della mente e del corpo*
Evgeny Morozov, *L'ingenuità della rete*
Richard Muller, *Fisica per i presidenti del futuro. La scienza dietro i titoli dei giornali*
Gary Paul Nabhan, *A qualcuno piace piccante*
Giorgio Napolitano, Gustavo Zagrebelsky, *L'esercizio della democrazia*
Jayant Vishnu Narlikar, *Le sette meraviglie del cosmo*
Aldo Naouri, *Adulteri*
Aldo Naouri, *Piccoli tiranni (non) crescono. Manuale di educazione per i figli d'oggi*
Aryeh Neier, *Alla conquista delle libertà*
Henry Nicholls, *George il Solitario*
Martin A. Nowak, *Supercooperatori. Altruismo ed evoluzione*
Helga Nowotny, *Curiosità insaziabile. L'innovazione in un futuro fragile*
Helga Nowotny e Giuseppe Testa, *Geni a nudo. Ripensare l'uomo nel XXI secolo*
Sherwin B. Nuland, *Il morbo dei dottori. La strana storia di Ignác Semmelweis*
Robert Oerter, *La teoria del quasi tutto. Il Modello Standard: il trionfo mai celebrato della fisica moderna*
Susie Orbach, *Corpi*
Domenico Parisi, *Una nuova mente*
Antonio Pascale, Luca Rastello, *Democrazia: cosa può fare uno scrittore?*
Marta Paterlini, *Piccole visioni. La grande storia di una molecola*
Massimo Piattelli Palmarini, *Psicologia ed economia delle scelte*
Richard Posner, *Un fallimento del capitalismo. La crisi finanziaria e la seconda Grande depressione*
Norman Potter, *Cos'è un designer*
Franco Pratico, *Eva nera*
David Quammen, *L'evoluzionista riluttante. Il ritratto privato di Charles Darwin e la nascita della teoria dell'evoluzione*
Richard Reeves, *Una forza della natura. Ernest Rutherford, genio di frontiera*
Peter J. Richerson, Robert Boyd, *Non di soli geni. Come la cultura ha trasformato l'evoluzione umana*
Matt Ridley, *Francis Crick. Lo scopritore del codice genetico*
Paul Roberts, *La fine del cibo*
Steven Rose, *Il cervello del ventunesimo secolo. Spiegare, curare e manipolare la mente*
Sharman Apt Russell, *Fame. Una storia innaturale*
Paul Seabright, *In compagnia degli estranei. Una storia naturale della vita economica*
Frank Schirrmacher, *La libertà ritrovata. Come (continuare a) pensare nell'era digitale*
Clay Shirky, *Uno per uno, tutti per tutti. Il potere di organizzare senza organizzazione*
Clay Shirky, *Surplus cognitivo*
Wole Soyinka, *Clima di paura*
Tom Standage, *Una storia del mondo in sei bicchieri*
Tom Standage, *Una storia commestibile dell'umanità*
Ian Stewart, *La piccola bottega delle curiosità matematiche del professor Stewart*
Mark C. Taylor, *Il momento della complessità. L'emergere di una cultura a rete*

Sherry Turkle, *Insieme ma soli*
Neil DeGrasse Tyson, Donald Goldsmith, *Origini. Quattordici miliardi di anni di evoluzione cosmica*
Nicla Vassallo, *Donna m'apparve*
Nicla Vassallo, *Filosofia delle conoscenze*
Paolo Vineis, *Equivoci bioetici*
Paolo Vineis, *Lost in translations*
Edward O. Wilson, *Il futuro della vita*
Gabrielle Walker, *Un oceano d'aria. Perché il vento soffia e altri misteri dell'atmosfera*
Gabrielle Walker, Sir David King, *Una questione scottante. Cosa possiamo fare contro il riscaldamento globale*
Spencer Wells, *Il seme di Pandora. Le conseguenze non previste della civilizzazione*
Peter Woit, *Neanche sbagliata. Il fallimento della teoria delle stringhe e la continua sfida all'unificazione delle leggi della fisica*
Lewis Wolpert, *Sei cose impossibili prima di colazione. Le origini evolutive delle credenze*
Charles Yang, *Il dono infinito. Come i bambini imparano e disimparano le lingue del mondo*
Semir Zeki, *Splendori e miserie del cervello*

Codice edizioni Paperback

Chris Anderson, *La coda lunga*
Philip Ball, *Elementi*
Ken Binmore, *Teoria dei giochi*
Susan Blackmore, *Coscienza*
Tom Burns, *Psichiatria*
Luigi Luca Cavalli Sforza, *L'evoluzione della cultura*
Michael Freeden, *Ideologia*
John Gribbin, *Galassie*
Jonathan Haidt, *Felicità: un'ipotesi*
Leofranc Holford-Strevens, *Storia del tempo*
Leslie Iversen, *Farmaci e sostanze*
Gary Marcus, *La nascita della mente*
Mark Maslin, *Riscaldamento globale*
John Polkinghorne, *Teoria dei quanti*
Leonard A. Smith, *Caos*
Bernard Wood, *Evoluzione umana*