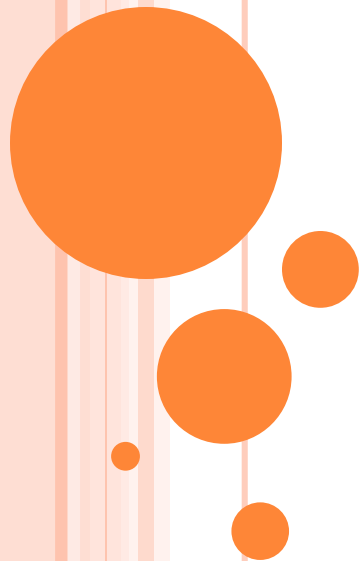


La turbolenza

Lezioni d'Autore
di Claudio Cigognetti



INTRODUZIONE (I)



VIDEO



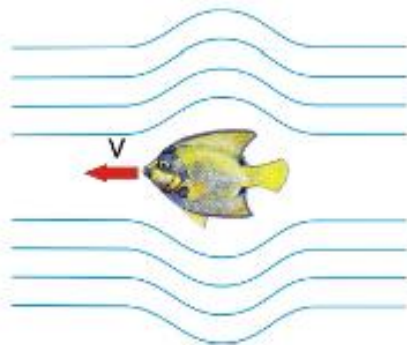
INTRODUZIONE (II)

- La fluidodinamica è un esempio di problema della meccanica classica ottocentesca irrisolto. Nel maggio 2000 l'Istituto di matematica statunitense *Clay* (Cambridge, Massachusetts), tra i sette premi da un milione di dollari finalizzati alla risoluzione dei più importanti problemi matematici attuali, ha posto la dimostrazione dell'esistenza della soluzione dell'equazione di Navier-Stokes in tre dimensioni.
- Ancora oggi, nonostante i successi nella trattazione piana, la soluzione generale dell'equazione è uno dei sei quesiti aperti del "*Millenium pure problems*". Le difficoltà della dinamica dei fluidi nascono principalmente nel passaggio tra due situazioni: una regolare e l'altra caotica.

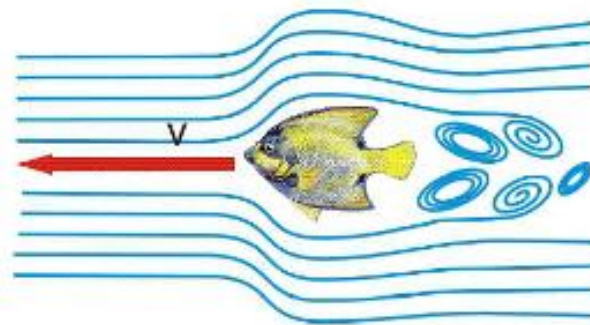


INTRODUZIONE (III)

- Osservata e disegnata da secoli, la turbolenza, una volta fissate le condizioni al contorno, si innesca per grandi valori del cosiddetto numero di Reynolds, R : sotto una certa soglia, il moto del fluido è laminare; al di sopra, le strutture spaziali diventano sempre più complesse, caotiche nel senso dell'impossibilità di determinare esattamente lo stato del sistema da determinate condizioni iniziali.



Moto laminare



Moto turbolento



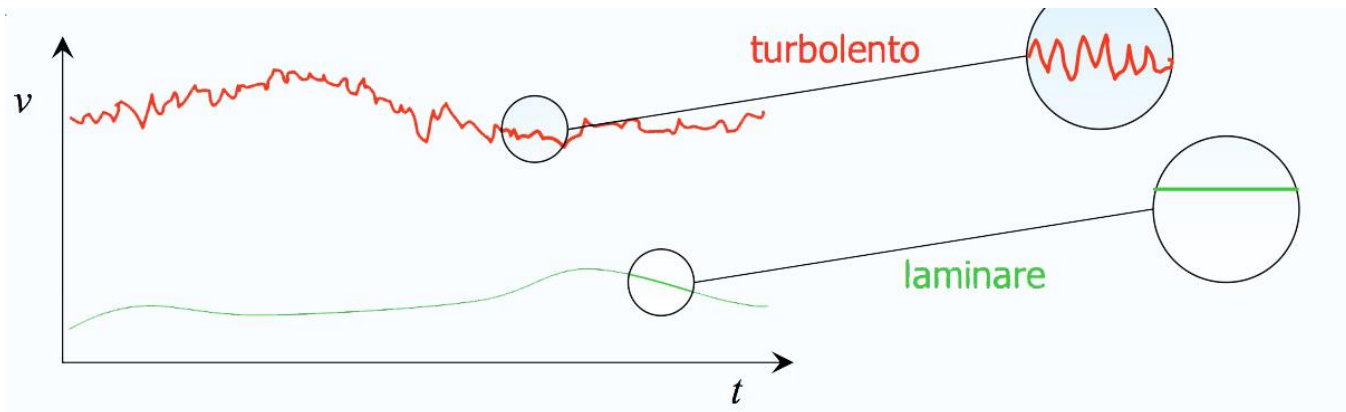
INTRODUZIONE (IV)

- Ciò non ha impedito di sviluppare negli ultimi anni una teoria statistica della turbolenza.
- Le simulazioni con *supercomputer* e le modellizzazioni si sono incentrate nella fase di passaggio tra moto laminare e turbolento, ma anche nella trattazione di fluidi con turbolenza pienamente sviluppata (altissimi valori del numero di Reynolds).
- L'importanza pratica di quest'ultima situazione è evidente perché la turbolenza favorisce la diffusione di impurità -piccole particelle e molecole- superiore a quella dovuta alla sola agitazione termica: le applicazioni industriali, mediche, negli studi di inquinamento atmosferico, oceanico, sono perciò notevoli.



INTRODUZIONE (v)

- Nella diffusione turbolenta le grandezze locali (velocità, pressione, temperatura) variano in modo caotico a frequenza elevata e si possono pensare come composte da due termini: uno medio che cambia molto lentamente e uno più piccolo, statistico, a valore medio nullo.



INTRODUZIONE (VI)

- Dal punto di vista spaziale si osservano dei vortici di varie dimensioni. Quelli più piccoli trasformano l'energia cinetica in termica a causa della viscosità (dispersione viscosa), i vortici più grandi tendono a mantenere il loro moto per lunghi periodi (v. fig.).
- La turbolenza secondo questo schema comporta un trasferimento di energia cinetica dalle strutture più grandi a quelle intermedie a quelle più piccole. Sviluppi recenti hanno mostrato che la dissipazione energetica avviene su strutture quasi filiformi di tipo frattale.



IL NUMERO DI REYNOLDS (I)

- Se si cerca di far cadere del miele inclinando il cucchiaino che lo contiene, si osserva la difficoltà dell'operazione a causa dell'elevata viscosità. Un filo di fluido si muove lentamente verso il basso. Lo scorrimento degli strati adiacenti è schematizzato secondo un'immagine che richiama sottili fili o lamine ed è per questo detto laminare.



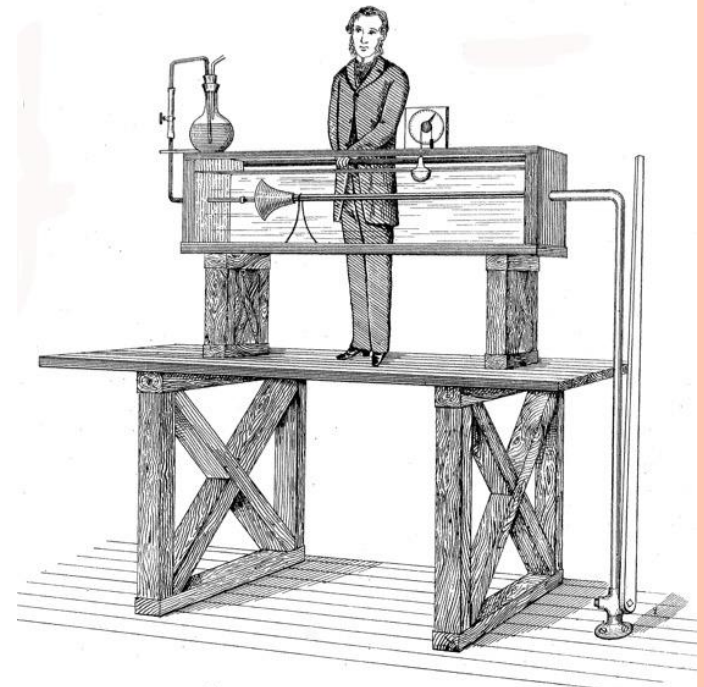
IL NUMERO DI REYNOLDS (II)

- Il passaggio dal movimento laminare a quello disordinato caratterizzato da vortici è ben rappresentato nell'arte sia per l'acqua che per l'aria.
- Così, nel disegno di Leonardo del 1509, sottili rivoli d'acqua, curvi sotto l'azione della gravità, provenienti da una condotta, raggiungono una pozza piana; infrangendosi su di essa, si frantumano in un caotico aggrovigliamento con alcuni riccioli regolari.



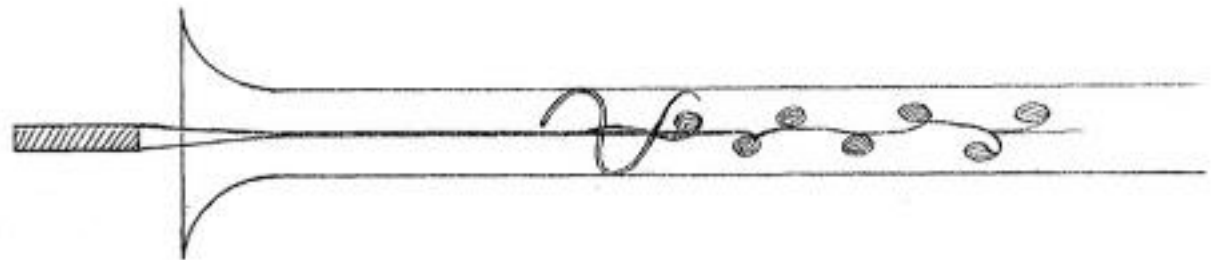
IL NUMERO DI REYNOLDS (III)

- Pur comparso nei testi di Leonardo già nel Cinquecento la turbolenza venne trattata in modo sistematico solo negli ultimi anni dell'Ottocento: Osborne Reynolds fu il primo a realizzare esperimenti quantitativi che portavano alla transizione dal moto laminare a quello turbolento.
- Il disegno del 1883 dell'apparato sperimentale con l'assistente di Reynolds mostra una vasca trasparente riempita d'acqua. Al suo interno, una sorta d'imbuto convogliava l'acqua in un tubo orizzontale, terminante con un tratto verticale.



IL NUMERO DI REYNOLDS (IV)

- Un liquido colorato, contenuto in un piccolo recipiente sostenuto dalla teca in vetro, sotto l'azione della gravità scorreva in un piccolo tubicino terminante con un beccuccio al centro dell'imbuto.
- Il sottile filo colorato, al variare della velocità del liquido, poteva rimanere pressoché orizzontale oppure mostrare vortici o altri movimenti rapidamente variabili.



IL NUMERO DI REYNOLDS (V)

- Quello di Osborne Reynolds fu il primo tentativo di visualizzazione delle linee di flusso di un fluido accompagnato dall'analisi dei parametri necessari per tali cambiamenti.
- Egli comprese inoltre che, al variare della velocità media del fluido v , della viscosità η , di una distanza caratteristica d dell'esperienza e della densità r , gli effetti del regime laminare rimanevano invariati se la quantità adimensionale: rvd/η , era mantenuta costante.
- *Oggi il numero puro caratteristico del flusso è chiamato numero di Reynolds, R .*



IL NUMERO DI REYNOLDS (VI)

- Le leggi della dinamica dei fluidi viscosi rimangono invariate se questo parametro non cambia (d , lo ripetiamo è una lunghezza di scala).
- Ciò è vero solo se le velocità del fluido sono piccole rispetto alle velocità di propagazione del suono in quel mezzo. Per valori prossimi o superiori alla velocità del suono bisogna introdurre una seconda quantità adimensionale (il numero di Mach).



IL NUMERO DI REYNOLDS (VII)

- L'importanza pratica di queste condizioni permette lo studio aerodinamico di un velivolo o il comportamento di un grattacielo alle sollecitazioni semplicemente utilizzando una galleria del vento e modelli in scala.



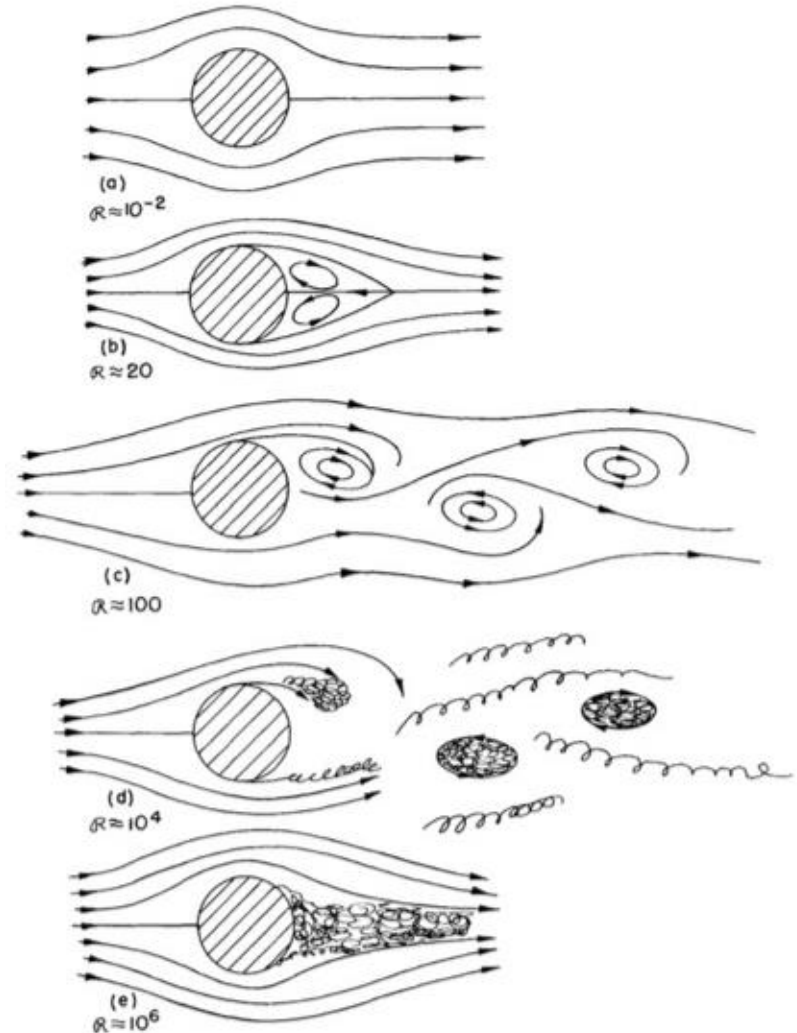
IL NUMERO DI REYNOLDS (VIII)

- Ritornando al passaggio dal regime laminare a quello turbolento, la legge di Poiseuille (proporzionalità tra velocità del fluido e gradiente di pressione) per alti valori di R non è più valida.
- Nel regime turbolento si evidenzia una brusca caduta della portata del fluido e quindi della velocità media dello stesso.



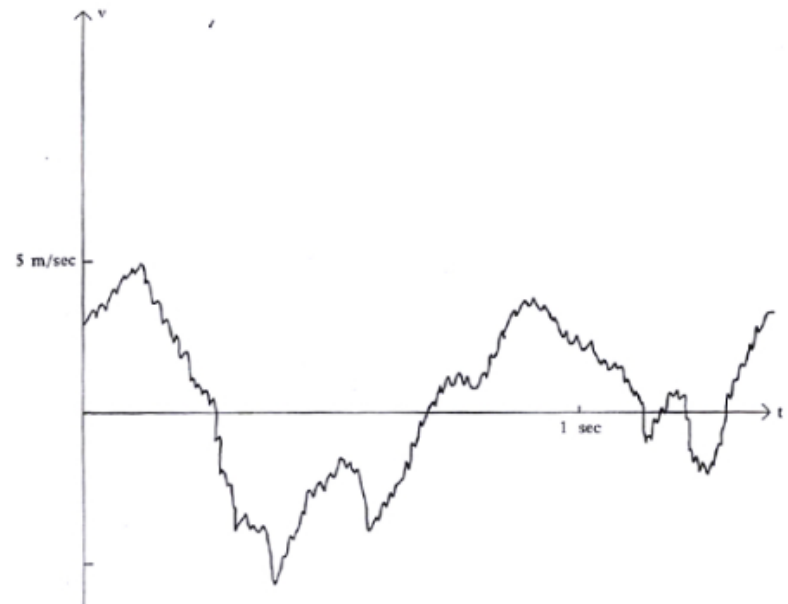
LA TURBOLENZA PIENAMENTE SVILUPPATA (I)

- Creando un flusso contro un ostacolo che per semplicità ha nel piano una sezione circolare (cilindro o sfera), le linee di flusso per bassi valori di R non presentano vortici, al crescere del parametro si formano circoli di diverse dimensioni fino a raggiungere una turbolenza pienamente sviluppata per altissimi valori del numero di Reynolds.



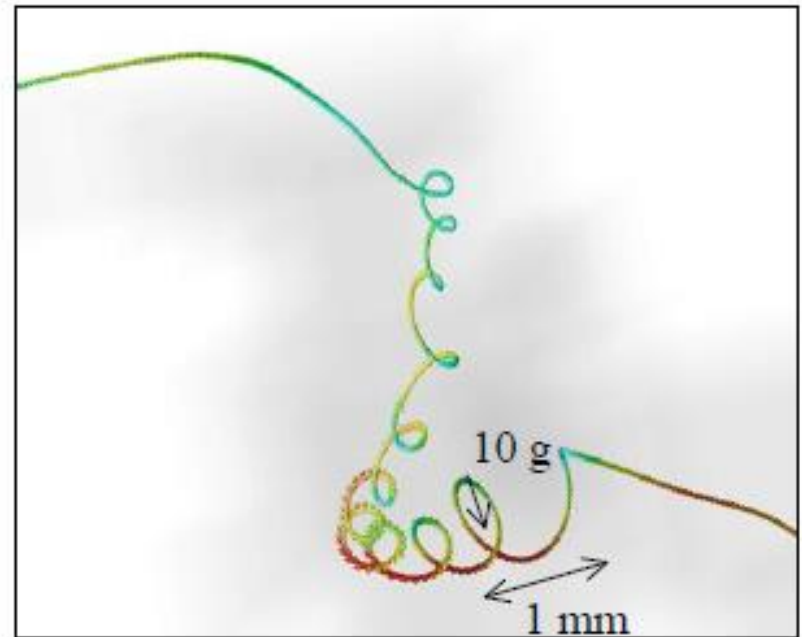
LA TURBOLENZA PIENAMENTE SVILUPPATA (II)

- Il passaggio dal regime deterministico a quello statistico nei fluidi è segnato dallo sviluppo di vortici di varie dimensioni.
- Analizzando nel tempo la velocità di una piccola porzione di fluido (nelle simulazioni numeriche si considerano regioni di pochi millimetri cubi) si osserva una irregolarità che ricorda qualitativamente l'andamento di una particella browniana.
- Le fluttuazioni caotiche delle grandezze richiamano immediatamente la necessità della statistica.



LA TURBOLENZA PIENAMENTE SVILUPPATA (III)

- Già nel 1926 il meteorologo Lewis Fry Richardson scoprì la rapidità della diffusione dovuta alla turbolenza di un fluido. La capacità di dispersione delle particelle nelle simulazioni porta oggi a valutare che ad esempio alcune molecole contenute in un volumetto di un millimetro cubo percorrano, in pochi secondi, distanze dell'ordine del metro.
- Del resto è esperienza comune sentire a grandi distanze dalla cucina gli odori del cibo preparato.
- I computer negli ultimi anni hanno portato tra l'altro all'individuazione di micro cicloni (filamenti di vortici) che possono accelerare piccole particelle a valori incredibili (dieci volte l'accelerazione di gravità) in una normale giornata di vento.



LA TURBOLENZA PIENAMENTE SVILUPPATA (IV)

- L'impiego dei supercalcolatori per studiare il moto di particelle in un fluido è esperienza abbastanza recente a causa dell'impressionante potenza di calcolo necessaria per le simulazioni delle equazioni della fluidodinamica.
- Le prime teorie sulla turbolenza hanno però preceduto questa pratica. Lewis F. Richardson e soprattutto Andrei N. Kolmogorov furono i pionieri della trattazione della turbolenza per alti numeri di Reynolds con l'ipotesi che le proprietà statistiche dei fluidi in tali condizioni fossero indipendenti dai meccanismi che producono la turbolenza.



LA TURBOLENZA PIENAMENTE SVILUPPATA (V)

- Il quadro teorico della turbolenza pienamente sviluppata è stato modificato in tempi recenti considerando che alle scale più piccole la dissipazione non avvenga in modo uniforme, ma si concentri su strutture filiformi di tipo frattale.
- Nonostante i successi, la trattazione statistica si è scontrata con l'impostazione meccanicistica del fenomeno. Oggi moltissimi aspetti della turbolenza rimangono oscuri e il tema rappresenta ancora un problema fisico lontano dalla soluzione.



FINE

