

WOLFGANG STROBL

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTA-
RIEDAD Y SU SIGNIFICACION
CIENTIFICO-FILOSOFICA

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD Y SU SIGNIFICACION CIENTIFICO-FILOSOFICA

El «padre de la gran familia mundial de los físicos cuánticos»¹ —el danés Niels BOHR— fue, sin duda, uno de los investigadores más fecundos en lo que va de siglo. Sobre todo, entra en la historia de las ciencias como el pensador de la complementariedad.

A fines del año 1966 —dos años después de la muerte de BOHR y en pleno desarrollo de la física de las partículas elementales²— se puede decir que el principio de complementa-

1. Así llama a Niels BOHR su discípulo y amigo Pascual JORDAN (catedrático de Física en la Universidad de Hamburgo y uno de los primeros creadores de la mecánica cuántica) en su necrología en «Physikalische Blätter» 19 (1963) 60-63. Niels BOHR murió el 18 de noviembre de 1962, con 77 años de edad. Entre sus muchas hazañas científicas, recordemos tan sólo: sus teorías del átomo de hidrógeno, de los espectros y del sistema periódico; los principios de correspondencia y de complementariedad; la teoría de los núcleos atómicos.

2. Además de los capítulos correspondientes, con la literatura especial, en: Wolfgang STROBL, *Introducción a la Filosofía de las Ciencias* (Madrid, 1963, cap. 5 y 8) y *La realidad científica y su crítica filosófica* (Universidad de Navarra, 1966, cap. 4 y 5), hay que mencionar dos artículos interesantes que se han publicado en los últimos meses: M. E. OMELJANOWSKI y G. B. RUMER: *El problema del carácter elemental de las partículas*, en: «Physikalische Blätter» 22 (1966) 337-346; y G. LÜDERS (Catedrático de Física en Gotinga, premio Max PLANCK de 1966): *Propiedades de simetría de las partículas elementales y el teorema TCP*, en: «Physikalische Blätter» 22 (1966) 414-422 (septiembre 1966). Si en mi *Introducción a la Filosofía de las Ciencias* todavía podía hablar de «las treinta o más diferentes especies de partículas elementales» (pág. 79), hoy día, con el descubrimiento de los «pleyadas», las «resonancias» o «estados excitados», el número de las

riedad alcanza una significación cada vez más trascendental para todas las ciencias, y esto precisamente en dos sentidos:

1. En un sentido objetivo: Atraviesa todas las ciencias y confiere, por tanto, a la realidad científica su *unidad interna*.

2. En un sentido subjetivo: Crea un *nuevo estilo del pensar*, muy flexible, meditativo y conciliador, que exige el diálogo, el trabajo en equipo y en departamento y, por fin, requiere la colaboración internacional.

Intento desarrollar el tema en dos pasos sucesivos:

Primero: El significado del principio de complementariedad en la *física*, donde fue descubierto en primer lugar. Es interesante observar que las recientes investigaciones acerca de las llamadas «partículas y antipartículas» —en realidad, se trata de partículas *complementarias*— y las estructuras nucleares abren nuevos campos de pruebas para aplicar este principio de BOHR.

Segundo: Será preciso buscar el *sentido noético y real de la complementariedad*; con una palabra: su significación científico-filosófica. Porque sin tener una idea clara y precisa de ésta es imposible comprender su envergadura en otros ramos del saber y de las correspondientes realidades.

PRIMERA PARTE:

LA COMPLEMENTARIEDAD EN LA FÍSICA.

Como es sabido, Niels BOHR estableció su idea de complementariedad (en los años 1927-30³⁾ partiendo de las relaciones

clases de partículas elementales que conocemos se amontona hacia doscientas; y la mayoría de los investigadores piensan que con estas 200 y más partículas elementales todavía no se ha alcanzado un límite.

3. N. BOHR: *Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik*, en: «Naturwissenschaften» 16 (1928) 245-257; *Wirkungsquantum und Naturbeschreibung*, ib. 17 (1929) 483; *Die Atomtheorie und die Prinzipien der Naturbeschreibung*, ib. 18 (1930) 73-78; *Atom-*

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD

de HEISENBERG⁴. Estas últimas suelen llamarse con el nombre de «relaciones de incertidumbre» e incluso «de indeterminación»; una denominación que me parece poco feliz y hasta equívoca. Veremos en seguida que sería preferible hablar de «relaciones canónicamente conjugadas» o, más exactamente todavía, del «*principio microfísico de complementariedad*».

Para poder penetrar en el sentido universal de la complementariedad, es indispensable averiguar antes los presupuestos y el contenido de su expresión microfísica. Por tanto, lo explicaré brevemente, revistiéndolo de un lenguaje inteligible también para no-matemáticos y no-físicos⁵.

Los presupuestos que entran en el principio de HEISENBERG son los dos siguientes:

1.º El *quantum de acción* h , que Max PLANCK descubrió en el año 1900⁶. La constante h expresa, ya por su dimensión: $\text{cm}^2\text{g}\cdot\text{sec}^{-1}$, la vinculación interna o complementariedad entre los parámetros dinámico-energéticos y los espacio-temporales. La energía E de un sistema microfísico y el número de oscilaciones en un segundo o la frecuencia ν se relacionan como sigue:

$$E = h\nu \quad \dots (1)$$

2.º El principio que Prince Louis de BROGLIE estableció en 1923-24⁷, y según el cual al movimiento de cada partícula microfísica, le corresponde una oscilación ondulatoria, con una frecuencia ν y una longitud de onda $\lambda = v/\nu$. La cantidad de

theorie und Naturbeschreibung, Berlin 1931 (traducción de: *Atomteori og Naturbeskrivelse*, Copenhagen 1929); *Kausalität und Komplementarität*, en: «*Erkenntnis*» 6 (1936) 293; *Die Atome und die menschliche Erkenntnis* (colección «*Die Wissenschaft*»), Braunschweig, 1958.

4. W. HEISENBERG: *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, en: «*Zeitschrift für Physik*» 43 (1927) 172; *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, Leipzig 1930, 4.ª ed. 1944, págs. 9-14.

5. Las derivaciones de HEISENBERG, citadas en la nota 4, presuponen el conocimiento del cálculo de matrices y del espacio vectorial de HILBERT (con infinitas dimensiones).

6. M. PLANCK en: «*Sitzungsberichte der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*» 2, pág. 202 (19 octubre 1900) y 2, pág. 237 (14 diciembre 1900).

7. L. DE BROGLIE en: «*Annales de physique*» (París) 10, 2 (1925).

movimiento (el momento, el impulso) $p = m \cdot v$ de la partícula está en la siguiente relación con la longitud de onda:

$$\lambda \cdot p = h \quad \dots (2)$$

Esto supuesto, la argumentación de HEISENBERG fue la siguiente:

«El hecho de conocer, con una cierta precisión Δq , la posición de un electrón en el espacio, permite describirlo en el lenguaje ondulatorio mediante una función de onda, cuya amplitud sólo es perceptiblemente distinta de cero en un pequeño entorno Δq . Una función construida de esta manera puede pensarse formada por la reunión de ondas parciales (un «paquete de ondas»), las cuales interfieren entre sí de tal modo que en el pequeño entorno espacial Δq se refuerzan mutuamente, mientras que fuera de él se extinguen»⁸.

Supongamos, pues, que las ondas que se superponen tengan longitudes de onda entre $\lambda = \frac{\Delta q}{n}$ y $\lambda' \leq \frac{\Delta q}{n+1}$ (donde n significa el número de ondas que llegan al intervalo de posición Δq). Podemos escribir entonces:

$$n = \frac{\Delta q}{\lambda} \quad \dots (3)$$

$$n + 1 \leq \frac{\Delta q}{\lambda'} \quad \dots (4)$$

Restando ... (3) de ... (4) resulta:

$$n + 1 - n \leq \frac{\Delta q}{\lambda'} - \frac{\Delta q}{\lambda} \quad \dots (5)$$

$$\Delta q \cdot \left(\frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda} \right) = \Delta q \cdot \Delta \frac{1}{\lambda} \geq 1$$

De la relación de BROGLIE ... (2) se sigue: $\frac{1}{\lambda} = \frac{p}{h}$; y sustituyéndolo en ... (5), llegamos a la desigualdad:

$$\Delta q \cdot \Delta \frac{p}{h} \geq 1; \quad \dots (6)$$

8. W. HEISENBERG: *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, 4.^a ed., Leipzig, 1944, pág. 9.

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD

y como el *quantum de acción* h es una constante, se puede escribir finalmente:

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq h \quad \dots (7)$$

Esta es la relación de complementariedad entre los parámetros «canónicamente conjugados» de la posición o actualización espacial de una partícula elemental y su cantidad de movimiento, cuyo producto no puede ser menos que la constante de PLANCK.

Se ve fácilmente que, mediante un razonamiento análogo, se puede llegar a establecer la relación correspondiente a los parámetros, igualmente «canónicamente conjugados», del estado energético y la duración del tiempo en que se realiza:

Sea n el número de oscilaciones en Δt segundos. Entonces se deduce que $\nu \cdot \Delta t = n$, o bien: $\nu \cdot \Delta t \geq n + 1$. La diferencia de ambas ecuaciones conduce a la relación: $\Delta \nu \cdot \Delta t \geq 1$; y sustituyendo la fórmula de PLANCK-EINSTEIN ... (1): $\nu = \frac{E}{h}$, resulta:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h \quad \dots (8)$$

Esto significa que «un átomo sólo puede tener un valor de energía definido con la precisión ΔE , si tiene a su disposición un intervalo de tiempo $\Delta t \geq h / \Delta E$ ». (Pascual JORDAN⁹).

Me he detenido, con algún empeño, en estas deducciones facilísimas, que pueden entenderse ya con los conocimientos de la Enseñanza Media, para demostrar que, en verdad, en el sentido real del principio microfísico de complementariedad no entra nada de incertidumbre, nada de indeterminación, nada de medidas humanas o de alteración de los «hechos objetivos» por las mediciones, sino que se trata de relaciones perfectamente

9. P. JORDAN: *Anschauliche Quantentheorie*, Berlín, 1936, pág. 130.

Un ejemplo muy instructivo y sugestivo de dicha relación, lo enseña D. Carlos SÁNCHEZ DEL RÍO en su magnífica obra: *Fundamentos teóricos de la física atómica y nuclear* (Junta de Energía Nuclear, Madrid, 1960). Escribe: «La fórmula muestra la imposibilidad de tener una frecuencia de oscilación definida en un intervalo de tiempo comparable con el período de oscilación, hecho bien conocido de los organistas que evitan los «staccatos» en las notas bajas para que éstas suenen en toda su pureza». (O. c., pág. 23).

objetivas, del conocimiento de una profunda *ley elemental* de la naturaleza. Esto no es tan sólo mi opinión personal, sino una realidad científica. Por ejemplo, Pascual JORDAN —quien ideó, junto con Max BORN y HEISENBERG, los fundamentos de la mecánica cuántica¹⁰— escribió que las relaciones de HEISENBERG no deben interpretarse en sentido «negativo» (es decir, que es imposible medir la posición y el impulso de una partícula, al mismo tiempo y con absoluta exactitud), «sino que es preciso considerar el contenido *positivo* de este principio; a saber: Dentro de un volumen del orden de magnitud de $\Delta q = h / \Delta p$, la partícula es *capaz de acción* y susceptible de manifestarse como un agente físico distendido a través de toda esta extensión espacial»¹¹.

El primero en comprender dicho sentido *positivo y real* —con toda su amplitud, envergadura y profundidad— fue el maestro de HEISENBERG y JORDAN: el inolvidable Niels BOHR. Quisiera citar, a propósito, una definición que dio de su principio, en la madurez de su vida, a 70 años de edad: «La eliminación de toda aparente contradicción es todo lo que podemos postular en un nuevo ámbito de experiencias. Por grandes que sean las contraposiciones que presenta una comparación entre las experiencias de objetos atómicos, que se han realizado en distintas condiciones de experimentos, es preciso considerar tales fenómenos como *complementarios* en el sentido de que cada uno queda bien definido y que tan sólo *todos juntos* agotan todo conocimiento definible de los objetos relativos. El formalismo de la mecánica cuántica, que tiende inmediatamente a abarcar las observaciones hechas bajo condiciones experimentales descritas con conceptos de la física elemental, da una descripción *complementaria y exhaustiva* acerca de un ámbito muy amplio de experiencia»¹².

El genio de Niels BOHR vio, con su intuición siempre tan

10. Cfr. BORN - HEISENBERG - JORDAN: *Zur Quantenmechanik*, en: «Zeitschrift für Physik» 34 (1925) 858; 35 (1926) 557.

11. P. JORDAN: *Das Bild der modernen Physik*, Hamburg, 1947, pág. 35.

12. Conferencia de BOHR en la Academia Real de Ciencias de Copenhague, en octubre de 1955; cita según: «Physikalische Blätter» 19 (1963) 66.

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD

clara como profunda, que las relaciones de HEISENBERG tan sólo representan un caso especial de un principio más envolvente y universal. Desde esta idea de BOHR, queda una tarea permanente de las ciencias descubrir cada vez más ejemplos que cumplan la ley de la complementariedad, y al mismo tiempo averiguar mejor su sentido real y significación científica. Sobre todo, fue el premio Nobel francés Louis de BROGLIE quien no se cansó en aportar nuevos aspectos de complementariedad¹³. Además de los parámetros «canónicamente conjugados» como: localización espacial y cantidad de movimiento, duración temporal y estado energético, son conceptos complementarios en la microfísica:

Carácter corpuscular y carácter ondulatorio, individualidad e interacción, física de «puntos» y física de «campos» (de BROGLIE); más generalmente: discreción y continuidad, actos de realización y «leyes de cuadro», espontaneidad y determinación, elementos estructurales y estructuras energéticas. (La lista podría completarse).

Se pueden aducir también ejemplos tomados de la experiencia cotidiana: Cuanto más sensibilizada a la luz es una película fotográfica, tanto menos tiene capacidad de disolución (y, por tanto, posibilidad de ampliación). Cuanto más selectivo es un receptor de radio, tanto menos tiene de sonoridad. Y viceversa, en los dos casos. Son relaciones complementarias, sin duda. En su estructura formal, son isomorfas a las relaciones de HEISENBERG, prototipo de la complementariedad física: Cuanto más está en movimiento una partícula elemental (o, por lo general, un sistema de ellas), tanto menos puede ser localizada fijamente; porque ya lógicamente el concepto del movimiento exige, por lo menos, dos estados distintos de posición espacial. Cuanto más se concentra, por otra parte, una partícula en una actualización local, tanto menos espacio de movimiento puede cubrir. Análogos razonamientos pueden aducirse en lo que atañe a la relación energía-tiempo. Otro ejemplo muy instructivo es la complementariedad entre individuo e interac-

13. L. DE BROGLIE: *Matière et lumière*, cap. V; *Continu et discontinu en physique moderne*, cap. III; *Physique et Microphysique*, cap. IX (París, 1947).

ción: cuanto más una partícula se integra en un sistema (nuclear, atómico, molecular, cristalino), tanto más pierde su individualidad, y al revés¹⁴. Tal vinculación interna imposibilita los «casos puros» o aislamientos abstractivos: Como no hay un sistema «puro» que no abarque elementos relativamente individuales, tampoco puede existir una partícula totalmente separada. *Todo está en relación en la naturaleza*¹⁵.

La ley de complementariedad representa, pues, un principio no sólo de vinculación y complemento mutuo, sino también de *limitación*: La constante de PLANCK, el quantum de acción h , marca el límite interno de todas las posibles actualizaciones e intercambios energéticos que suceden en la naturaleza. Cierto es que se trata de un límite muy fino y menudo; según las mediciones recentísimas: $h = (6,62517 \pm 0,00023) \cdot 10^{-27}$ erg.sec.¹⁶. Porque es evidente que existe también un límite superior de toda posible velocidad —hablar de una velocidad «infinita» sería una contradicción en los términos (la mayor que conocemos es la velocidad de la luz en el vacío)—, de la relación ... (7) se deduce fácilmente que debe existir también un límite interior de cada posible realización local. Desde luego, su valor cuantitativo puede apreciarse tan sólo empíricamente; el orden de magnitud de la «longitud mínima» con la que cuenta la física hoy es aproximadamente $l_0 \sim 10^{-13}$ cm. El correspondiente «tiempo elemental» es, por consiguiente, $l_0 \cdot c^{-1} \sim 10^{-23}$ sec.

Estos resultados de la microfísica encajan perfectamente con la necesidad lógica de pensar que una partícula elemental precisa un mínimum de espacio y de tiempo para manifestarse; hablar de un volumen o intervalo «infinitamente pequeño» sería absurdo. (La lógica del criterio de convergencia de CAUCHY vale tan sólo en las matemáticas puras; en la física, en cambio,

14. Esta relación física individuo-interacción no puede trasladarse, sin más, a las relaciones humanas y sociales.

15. Por esta razón, el pensamiento correlacional de Angel AMOR RUIBAL tiene mucho interés para una Filosofía de las Ciencias.

16. Es decir, escrito en forma de una fracción decimal: 0,000 000 000 000 000 000 000 000 006 625 erg. sec. Hasta tal exactitud y precisión —nunca alcanzadas en la física clásica— mide y cuenta la física cuántica.

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD

como ciencia de la realidad, no podemos contentarnos con sucesiones de intervalos *posibles*, cada vez más pequeños, *in infinitum*, sino que debemos postular la existencia de elementos *mínimos reales*, los que poseen un bien definido radio mínimo de acción).

Como se ve claramente, resucitan con tales consideraciones las antinomias entrevistas ya por los antiguos pensadores eleatas¹⁷ y formuladas, en un estilo clásico, por Immanuel KANT en sus famosas antinomias de la Razón pura, sobre todo en la segunda de ellas¹⁸. De la argumentación de KANT puede desprenderse ya que, en un último sentido, estas paradojas y antinomias se derivan de la vinculación de nuestro pensamiento con las imaginaciones espacio-temporales. Una vez más, fue Niels BOHR quien penetró estas dificultades con la agudeza de su meditación.*

Niels BOHR conoció, ya a partir de 1927 y antes, que las mencionadas relaciones tienen su raíz fundamental en la complementariedad entre el «macrocosmos» y el «microcosmos», el universo de nuestras experiencias diarias y sus orígenes elementales que inferimos a partir de estas. El esquema que dibujó en las obras citadas es el siguiente:

<i>Teoría clásica</i>	<i>Teoría cuántica</i>
Descripción espacio-temporal	O descripción espacio-temporal y relaciones de «incertidumbre»
Causalidad	O esquema temático no en espacio y tiempo y causalidad
	Correlaciones estadísticas

* Las notas 17 y 18 siguen en página 194.

17. Me refiero sobre todo a las paradojas que se adscriben a ZENÓN DE ELEA (de la flecha que se mueve y no se mueve; de la

SEGUNDA PARTE

SIGNIFICACIÓN CIENTÍFICO-FILOSÓFICA DE LA
COMPLEMENTARIEDAD

En su obra principal sobre los principios físicos de la teoría de los *quanta*, Werner HEISENBERG pone de relieve que «existe un esquema matemático de la teoría cuántica, pero que este esquema no puede ser interpretado como una sencilla relación de cosas en espacio y tiempo»¹⁹. Y concluye el capítulo acerca del concepto de complementariedad de BOHR como sigue: «Tan sólo al tratar de adoptar esta complementariedad fundamental entre la descripción espacio-temporal y la causalidad²⁰ y formar los conceptos adecuados, se puede juzgar de la no-contradicción de los métodos que emplea la teoría cuántica (especialmente la interpretación de la teoría de las transformaciones). Sin embargo, la adaptación que puede reunir nuestro pensamiento y nuestro lenguaje con las experiencias de la física atómica se encuentra con grandes dificultades, del mismo modo como sucedió antes con la teoría de la relatividad. En cuan-

carrera de Aquiles y la tortuga). Las antinomias surgen si se trata de aplicar el análisis matemático del continuo al tiempo real que no se compone de momentos «infinitamente pequeños» (un concepto absurdo, eliminado de la lógica matemática por el criterio de CAUCHY), sino que consiste en «tiempos de presencia» que suceden. (Los textos en: HERMANN DIELS, *Fragmente der Vorsokratiker*, 29 [19]; cfr. ARISTÓTELES, *Física*, lib. Z, cap. 9, pág. 239).

18. Tesis: Cada sustancia compuesta en el mundo se constituye de partes sencillas. Antítesis: No hay elementos sencillos. (Primera edición: págs. 434-443; segunda edición: págs. 462-471).

19. W. HEISENBERG: *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, Leipzig, 4.ª ed. 1944, pág. 48.

20. Por la precisión conceptual que exige nuestra discusión, propondría sustituir la expresión «causalidad» aquí por el término «determinación estructural», porque la determinación por causas y por leyes estructurales no debe confundirse. (Vid. Wolfgang STROBL: *Die naturphilosophische Grundlagenproblematik und die ontologische Bedeutung der neuen Physik*, Dis. Munich, 1952, tomo I, págs. 256-354; *Introducción a la Filosofía de las Ciencias*, Madrid, 1963, *passim*).

to a esta última, la adaptación necesitada fue favorecida por las anteriores discusiones filosóficas acerca de los problemas de espacio y tiempo. De un modo semejante, en la física atómica se pueden aprovechar las discusiones fundamentales para toda teoría del conocimiento que versaron sobre las dificultades originadas por la separación del mundo en sujeto y objeto. Muchas de las abstracciones características para la moderna física teórica se hallan ya discutidas en la filosofía de los siglos pasados. Mientras que estas abstracciones fueron rechazadas por los científicos meramente ansiosos de hechos, hoy día el refinado arte experimental de la nueva física nos obliga a discutirlas con todo rigor»²¹.

Aludiendo a la relación entre sujeto y objeto de conocimiento, HEISENBERG toca el núcleo del problema. Las mediciones y sus inevitables «márgenes de incertidumbre» fueron no más que el andamiaje a través del cual los físicos se acercaron a la ley de complementariedad. Esta ley misma determina la realidad independientemente de todos los experimentos y todas las observaciones que realizan los hombres; porque hasta ahora no tenemos ningún motivo para abandonar el principio de la unidad y validez de las mismas leyes de naturaleza en todo el universo; y por tanto podemos suponer que los mismos procesos microfísicos, dirigidos por la misma ley de complementariedad, se actualizan también en la inmensidad del cosmos, a donde nunca llegará la mano de un hombre (por ejemplo, en una nebulosa a una distancia de mil millones de años de luz)²².

21. W. HEISENBERG, o. c., pág. 49. — —

22. El descubridor del *quantum de acción*, Max PLANCK escribió, a propósito de la *objetividad* de las relaciones de HEISENBERG, que «éstas surgen del razonamiento que los elementos del nuevo mundo microfísico no son corpúsculos materiales, sino ondas periódicas que corresponden a las realizaciones físicas, y que —según un teorema matemático— no es posible definir un determinado punto con un determinado impulso por superposición de ondas periódicas con longitud finita. Este teorema no tiene nada que ver con mediciones. Las ondas materiales, por su parte, están inequívocamente determinadas por el correspondiente problema de valores marginales. No hay que pensar en indeterminismo». (M. PLANCK: *Vorträge und Erinnerungen*, Stuttgart, 1949, pág. 223).

En otro lugar escribe: «Precisamente la existencia de tal *limitación*

Nuestro problema se concentra, pues, en la sencilla pregunta: ¿Cómo puede ser *pensado* (parte *subjetiva*) el funcionamiento *real* (parte *objetiva* de la relación) del microcosmos, del cual suponemos que es la base interior del macrocosmos que percibimos con nuestros sentidos? En esta pregunta, el hombre no entra como actor o experimentador, sino tan sólo como pensador; y el único presupuesto es el principio de la *inteligibilidad del ente*, que es el fundamento de todas las ciencias y dice que las estructuras reales corresponden a las estructuras del pensamiento justo y evidente.

Ahora bien: El «macrocosmos» espacio-temporal —por más claridad, lo llamaré *antropocosmos*²³, es decir, mundo del hombre— nos parece natural, según la habituación de nuestras vivencias: Tenemos una cierta imaginación o intuición de un movimiento continuo en espacio y tiempo²⁴. Pero desde el momento en que el hombre empieza a pensar, cae en la cuenta de que su *antropocosmos* espacio-temporal no es compatible con las exigencias lógicas; por ejemplo, que los conceptos de localización y movimiento o —más general y profundamente— las nociones de ser y de tiempo se contradicen *con respecto al mismo modo de ser y nivel del ente*²⁵.

objetiva que es el *quantum de acción* elemental debe considerarse como una señal de la vigencia de una cierta nueva forma de leyes naturales que, por su parte, seguramente no pueden reducirse a una mera estadística». (M. PLANCK: o. c., pág. 293).

Desde los famosos experimentos de DAVISSON y GERMER («Physical Review» 30, 705 —1927—) que demostraron la difracción e interferencia de rayos de electrones, lo que sólo puede explicarse por superposiciones ondulatorias, la existencia de las ondas materiales que postuló de BROGLIE es una realidad físicamente comprobada; y su consecuencia lógico-matemática son las relaciones de complementariedad. Pero ni siquiera es necesario recurrir al aspecto ondulatorio de las partículas elementales. HEISENBERG dedujo sus relaciones inmediatamente del esquema matemático de la teoría cuántica («Zeitschrift für Physik», 43, 172, y 44, 326 —1927—); cfr. Fritz BOPP - Oswald RIEDEL: *Die physikalische Entwicklung der Quantentheorie*, Stuttgart, 1950, cap. XIII: *Dualismo y complementariedad*, págs. 105-115).

23. El término técnico «*Anthropocosmos*» fue acuñado por Hermann FRIEDMANN (*Epilegomena*, Munich, 1953).

24. La intuición de la continuidad del movimiento es el gran tema del pensamiento de Henri BERGSON.

25. Desde las paradojas de ZENÓN DE ELEA hasta las antinomias de la dialéctica trascendental de KANT (cfr. notas 17 y 18).

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD

La última condición —que conoció ya ARISTÓTELES en su famosa definición del principio de contradicción²⁶— es el punto álgido del problema: Porque nada más evidente que la posibilidad de eludir las aparentes contradicciones que se dan en el *antropocosmos*, distribuyendo los términos de las oposiciones o polaridades *a distintos modos de ser o niveles del ente*. Entonces los contrastes que parecen excluirse y contradecirse *en el mismo nivel*, a saber, en el *antropocosmos* espacio-temporal de nuestras vivencias corporeo-sensoriales, desaparecen y *se complementan en un nivel superior*, y concretamente en el mundo de las determinaciones estructurales —y, por tanto, expresables en formas matemáticas— que es el mundo de las leyes de la naturaleza, el tema especial de las ciencias. A distinción del *antropocosmos* de los sentidos, quisiera llamarlo el *logocosmos* del pensamiento científico.

Ahora nada impide pensar que los fenómenos constatados experimentalmente —por ejemplo, en una cámara de burbujas (*bubble chamber*)— están originados por cadenas discontinuas de *eventos microfísicos*, y que estas realizaciones elementales, en su aspecto complementario, son determinadas por *estructuras energéticas*²⁷ no materiales, que pueden expresarse (como «funciones de ondas» continuas) en un «esquema matemático no espacio-temporal» (según BOHR y HEISENBERG³⁻¹⁹⁻²¹).

Esta solución complementaria que atribuye el «movimiento» continuo a la determinación estructural (y, por tanto, no espacio-temporal), mientras que las actualizaciones elementales en espacio y tiempo suceden como eventos indivisibles y discontinuos, no puede estar nunca en un conflicto con las experiencias sensoriales; porque sabemos de muchos ejemplos cómo un aparente continuo puede surgir de una multitud de eventos o acontecimientos discontinuos (por ejemplo, en la pantalla del cinema, o en la vía láctea de la galaxia).

26. «Es imposible que lo mismo exista y no exista al mismo tiempo en la misma cosa y *en el mismo modo*» (ARISTÓTELES, *Metafisik*, libro IV, pág. 1005 b 19).

27. La expresión «estructuras energéticas» fue introducida por el químico Hans Georg GRIMM. Cfr. Wolfgang STROBL: *Introducción a la Filosofía de las Ciencias*, Madrid, 1963, cap. 5: Estructuras reales y posibles, físicas y matemáticas.

Por las razones expuestas, Aloys WENZL²⁸ (ex-rector de la Universidad de Munich) propuso ya desde hace más de treinta años atribuir al aspecto corpuscular de las partículas elementales el modo del ser actual, como son actos de realización, mientras que las funciones de ondas que determinan las probabilidades de sus apariciones o manifestaciones representan la potencialidad (en el sentido aristotélico). Sólo a quienes no conocen la íntima relación entre la física moderna y el pensamiento filosófico les podría sorprender el hecho de que Werner HEISENBERG reanudó esta interpretación complementaria en distintos niveles (con ocasión de sus «Gifford-Lectures» 1955-56²⁹).

Otro ejemplo de complementariedad en la microfísica lo representa la llamada «antimateria». Una vez más, la denominación no es exacta; porque en lugar de hablar de «partículas» y «antipartículas», sería mejor decir «partículas complementarias». No se trata, en modo alguno, de algo adversativo u opuesto, ni mucho menos contradictorio, antitético o dialéctico, sino que son partículas que se complementan en sus propiedades de tal modo que nacen y mueren siempre como parejas, nunca aisladas. Un principio meramente estructural —a saber, la conservación del número bariónico (o de la «carga nucleónica») — impide la generación o aniquilación de bariones (nu-

28. A. WENZL: *Metaphysik der Physik von heute*, Leipzig, 1935; *Wissenschaft und Weltanschauung*, Leipzig, 1935, 2.^a ed. 1949; *Philosophie als Weg von den Grenzen der Wissenschaft an die Grenzen der Religion*, Leipzig, 1939; *Philosophie der Freiheit*, München, 1949.

29. W. HEISENBERG: *Physics and Philosophy* (Gifford-Lectures en la Universidad de St. Andrews, Escocia, 1955-56), «World Perspectives», vol. II; edición alemana: *Physik und Philosophie*, Ullstein, Frankfurt-Berlín, 1961; traducción española: *Física y Filosofía*, ed. La Isla, Buenos Aires, 1959.

Heisenberg dijo a propósito: «La onda de probabilidades que introdujeron BOHR, KRAMERS y SLATER tiene un sentido más profundo. Significa algo como una tendencia a un acontecimiento determinado. Significa la aprehensión cuantitativa del concepto de potencia en la filosofía de ARISTÓTELES. Implanta una realidad física extraña, algo intermedio entre posibilidad y realidad». (O. c., ed. alemana —1961—, pág. 25; la traducción es mía). Y en otro lugar (novena lección) dice: «Al comparar nuestra situación con los conceptos de materia y forma en ARISTÓTELES, se puede decir que la materia de Aristóteles, que esencialmente es "potencia", es decir, posibilidad, debería compararse con nuestro concepto de energía: la energía aparece como realidad material en forma de generación de partículas elementales». (O. c., pág. 132, arriba).

cleones e hiperones) sencillos, es decir, no-complementarios, y garantiza así la estabilidad del mundo³⁰. El hecho de que nuestro sistema solar y, a nuestro saber, también la galaxia se constituye casi exclusivamente de «partículas» (o de «materia»), y que la generación de parejas «partículas-antipartículas» es muy escasa, ha conducido a algunos destacados físicos a suponer que podrían existir también «antimundos» compuestos en su mayoría por «antipartículas» o «antimateria»; e incluso hay unas posibilidades para decidirlo experimentalmente (a base de la irradiación de neutrinos o antineutrinos)³¹.

Teniendo en cuenta estos resultados experimentales de los últimos años, se podría formular la complementariedad entre partículas y antipartículas del modo siguiente: Cuánto más un sistema o mundo está constituido de partículas, tanto menos hay antipartículas en él; y viceversa. Tan sólo el «caso puro» de una equivalencia total entre «materia» y «antimateria» parece imposible (el caso análogo a la absoluta equivalencia de exactitud de localización y cantidad de movimiento), porque —según la ley de la probabilidad y del gran número— entonces los procesos de irradiación de parejas irían a destruir paulatinamente el sistema total³⁰.

Por fin, estoy convencido de que también los *magic numbers* de Lise MEITNER —cuya explicación teórica valió el premio Nobel de 1963 a los profesores Hans JENSEN (Heidelberg) y Eugen WIGNER (Princeton) y a la doctora María GOEPPERT-MAYER

30. D. Carlos SÁNCHEZ DEL RÍO escribe en su obra *Fundamentos teóricos de la Física atómica y nuclear* (Madrid, 1960):

«También se conserva el número bariónico, entendiéndose por tal una nueva magnitud que para los bariones vale + 1, para los antibariones vale - 1 y para las demás partículas es nula... Y es lógico que así sea, porque este principio es la garantía teórica de la bien probada estabilidad de los núcleos; si no se cumpliera, los nucleones podrían desintegrarse en partículas ligeras (eventualmente a través de procesos virtuales) y todo el Universo se vaporizaría en mesones, leptones y fotones en un breve intervalo de tiempo». (O. c., pág. 146).

31. La existencia de estrellas compuestas por positrones y protones negativos, fue prevista ya por P. A. M. DIRAC, en la conferencia que dio en Estocolmo, con ocasión de la concesión del premio Nobel, en el año 1933. Cfr. la «conferencia Nobel» de Emilio SEGRE (Berkeley), *Propiedades nucleares de anti-nucleones* («Physikalische Blätter» 16 (1960), págs. 318-319); R. HAGEDORN (CERN-Ginebra): *Antimateria*, ib. 18 (1962), págs. 255-263.

(California)— se estriban en relaciones de complementariedad³². Pero no es de este lugar entrar en más detalles físico-matemáticos.

Ya es hora de tratar de esbozar un breve resumen final para entender la significación científica del principio de complementariedad.

Partimos de la sorpresa intelectual (cuyo documento clásico queda el poema de PARMÉNIDES) que se hizo cargo de que nuestro «antropocosmos» —el mundo de nuestras percepciones espacio-temporales— parece lleno de contradicciones lógicas, que resultan incompatibles si perseveramos en el mismo nivel de la imaginación material, sensorial y espacio-temporal. Tales polaridades son, por ejemplo: continuidad y discreción, movimiento y localización, temporalidad y realización (actualización, energetización); en el fondo: tiempo y ser, finito e infinito, contingente y absoluto, no-ser y Ser. Es imposible resolver estas dificultades con el método dialéctico, antitético, es decir, permaneciendo sobre el mismo nivel del mundo material, espacio-temporal de nuestras intuiciones³³: lo que llamamos «antropocosmos». Pero el principio científico de la *inteligibilidad o logicidad* del ente nos asegura de que las aparentes contradicciones entran en el mundo únicamente por el hombre y

32. En breves palabras, se trata del hecho de que los núcleos que poseen el número de orden o la carga nuclear $Z=2, 8, 20, 50, 82$ y las mismas agrupaciones de neutrones, hasta el número $N=126$, demuestran una estabilidad especial y otras propiedades distinguidas. Según la teoría de JENSEN-HAXEL-SUESS podía predecirse otro «número mágico» de complementariedad, a saber: 28; en coincidencia con los experimentos. Vid. W. STROBL, Dis. Munich 1952, vol. I, pág. 162; vol. II, pág. 95; Julio RODRÍGUEZ MARTÍNEZ: *Introducción a la radioactividad*, Granada 1960, págs. 69-72 y 92-93; «Arbor» núm. 216, dic. 1963, págs. 425-429; «Physikalische Blätter» 20 (1964) págs. 7-10.

33. D. Luis María GARRIDO expresa la misma verdad (en su *Mecánica cuántica*, Madrid, 1963, págs. 170-171) como sigue: «Si intentamos representar los fenómenos cuánticos por medio de las imágenes que el hombre obtiene del macrocosmos, es decir, de una manera concreta y más accesible a la intuición, llegamos siempre a contradicciones. Este es el origen de la dualidad partícula-onda de los sistemas cuánticos... Llamamos principio de complementariedad al nuevo instrumento lógico que liga conceptos que se excluyen mutuamente y que no pueden, por consiguiente, ser aplicados al mismo tiempo porque son contradictorios, aunque, en verdad, ambos son necesarios para obtener una descripción completa de la realidad física».

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD

su perspectiva de él. Expresado con otras palabras: Una anti-tética o dialéctica *real* es imposible, porque las antinomias y contradicciones sobrevienen al mundo tan sólo por los hombres y sus modos de ver. Pero el mismo hombre es no sólo susceptible de percepciones sensoriales, materiales, espacio-temporales, sino también capaz de pensar y meditar; y sus pensamientos le revelan *la trascendencia del antropocosmos al logocosmos de las ciencias que completa y complementa* el primero, y en cuya complementariedad se resuelven todas las aparentes contradicciones, porque siempre un extremo de ellas pertenece al antropocosmos de las vivencias, y el otro al logocosmos del pensamiento. (Hay que añadir que esta explicación preliminar vale tan sólo en el nivel físico; en los estratos superiores del ser la situación del principio de complementariedad varía asintóticamente.

A fin de cuentas, no hay mejor aproximación al pensamiento de complementariedad que la descripción que nos da del estilo de pensar de su maestro Niels BOHR uno de sus íntimos amigos, el barón Carl Friedrich von WEIZSÄCKER: «El pensamiento de BOHR no es ni conservador ni revolucionario, sino que procura hacerse cargo de la distinción de hechos, al parecer contrarios, hasta poder unirlos *en un nivel más alto del pensamiento*»³⁴.

Para hacer sentir ya ahora la trascendencia filosófica del principio de complementariedad, quisiera citar la forma que le ha dado la espiritualidad francesa con una frase que se adscribe a LACORDAIRE: «No busques convencer a tu adversario de que yerra, sino busca encontrarte con él *en una verdad superior*».

No cabe mejor clausura de esta breve introducción al principio universal de la complementariedad que citar al mismo maestro Niels BOHR; y espero que se revelará, con esta cita, la verdad de que este principio es capaz de crear un nuevo estilo del pensar, más profundo, flexible y conciliador, para abrir

34. C. F. von WEIZSÄCKER en: *Gestalter unserer Zeit*, vol. 3 (*Forscher und Wissenschaftler im heutigen Europa*), Hamburg, 1955, págs. 73-74.

la cooperación internacional³⁵ en un trabajo extenso y amplio de equipo. Con ocasión de su setenta cumpleaños, Niels BOHR dijo ante la Real Academia Danesa de Ciencias, en Copenhague: «Con tales consideraciones desenbocamos en problemas que tocan a la comunidad humana y que determinan la multiplicidad de los medios de expresión por la imposibilidad de caracterizar el papel que juega el individuo en la sociedad con una línea precisa. Con vistas a los contrastes que las culturas humanas, crecidas bajo diferentes condiciones de vida, demuestran respecto a las tradiciones antiguas y sus formas de expresión, estas culturas pueden considerarse, en cierto sentido, como complementarias. Sin embargo, no se trata aquí de las relaciones determinadas de exclusión mutua como sucede en la descripción objetiva de los problemas generales físicos y psicológicos, sino que son diferencias en el enfoque, que pueden ser conocidas o disminuidas por un contacto cada vez más estrecho entre las naciones. En nuestro tiempo, donde el acreciente saber y poder religa, cada vez más, el destino de todos los pueblos, la colaboración internacional en todos los sectores

35. Por ejemplo, en el trabajo original que anuncia el descubrimiento del híperon «Omega menos» («Physical Review Letters» del 24 de febrero de 1964) firman no menos que treinta y tres autores —sin contar los equipos del sincrotrón para acelerar protones hasta 30.000 millones de electrón-voltios, y de la mayor cámara de burbujas que funciona en el mundo, en el *Brookhaven National Laboratory*—. Es interesante que la existencia de esta partícula fue predicha, por razón de las armonías y complementariedades de la teoría, como sucedió con el positrón (DIRAC 1930) y el pi-mesón (YUKAWA 1949). Vid. la conferencia que leyó W. HEISENBERG en Copenhague, *in memoriam* de Niels BOHR, en julio de 1963, y Hans SCHOPPER (Karlsruhe) en: «Physikalische Blätter», año 20 (1964), mayo, págs. 227-228.

Habría que decir todavía mucho sobre el principio de la complementariedad y la unidad de las ciencias. Sería tarea de una monografía especial. Para una primera orientación, puedo indicar los capítulos siguientes: Wolfgang STROBL, *Introducción a la Filosofía de las Ciencias*, edita Revista Estudios, Madrid, 1963, cap. 8: Las ciencias química, biológica, psicológica y sociológica, encaminadas al pensamiento relacional-estructural y complementario-analógico (págs. 163-182); y: Wolfgang STROBL, *La realidad científica y su crítica filosófica*, Universidad de Navarra, Pamplona, 1966; cap. 4. 13: El principio de complementariedad como método de síntesis científica; cap. 4. 16: La unidad interna de la física como fin y tarea; cap. 5. 12: Complementariedad entre el «antropo-cosmos» percibido y el «logo-cosmos» de las ciencias.

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD

de las ciencias tiene fines universales, cuya solución podría ser facilitada por el recuerdo continuo de las condiciones universales del conocimiento humano»³⁶.



36. Conclusión de la conferencia que Niels BOHR dio en octubre de 1955, en la Real Academia Danesa de Ciencias, bajo el título de «Los átomos y el conocimiento humano» (publicado en la colección «Die Wissenschaft», vol. 112, Braunschweig, 1958).