

#### Reseña

Erwin Schrödinger (premio Nobel de Física, 1933) no sólo ha sido uno de los científicos más relevantes del siglo XX, sino que siempre tuvo inquietudes filosóficas que le llevaron a reflexiones cuyo interés no ha decaído desde el momento en que fueron formuladas. Este libro recoge una selección de las muestras más significativas de su pensamiento, así como el texto de las conferencias del curso que impartió en Santander durante el verano de 1934, en la versión que realizó Xavier Zubiri, donde sintetiza los principales aspectos de la entonces recién descubierta teoría cuántica.

### Índice

Introducción

Reconocimientos

Bibliografía

## Cronología

- I. ¿Por qué son tan pequeños los átomos? (1933)
- II. <u>Algunas observaciones sobre las bases del conocimiento</u> científico (1935)
- III. La nueva mecánica ondulatoria (1935)
  - § 1. <u>La antigua teoría de los quanta: Planck, Rutherford,</u>
    Bohr
  - § 2. <u>La nueva teoría de los quanta</u>: <u>funciones y valores</u> <u>propios</u>: <u>funciones y valores propios</u>
  - § 3. <u>Teoría de las transformaciones</u>. <u>«Estado» de un sistema. Relaciones de indeterminación</u>
  - § 4. Representación geométrica de la nueva mecánica. Equivalencia del método de matrices y del método ondulatorio
  - § 5. <u>La causalidad y los conceptos físicos clásicos en la</u> nueva mecánica
  - § 6. <u>Física microscópica y geometría</u>. <u>El cuerpo rígido en</u> la nueva mecánica
  - § 7. Mecánica cuántica y mecánica relativista. La variable tiempo
- IV. <u>La estructura del universo en relación con la estructura</u> <u>corpuscular (1941)</u>

El autor

#### Introducción

## I. Erwin Schrödinger y la mecánica cuántica

#### 1. El trasfondo filosófico

A fines de la segunda década del siglo XX, los creadores de la mecánica cuántica se vieron implicados en las discusiones filosóficas más intrincadas que se recuerdan en la física desde el nacimiento de la ciencia moderna. No es que tal tipo de controversias haya sido inusual en el campo de la investigación natural, pero normalmente se planteaban como preludio o como corolario al trabajo teórico o experimental propiamente dicho. Esta vez sin embargo surgió toda una corte de incómodas cuestiones en los momentos más cruciales del proceso que cabría llamar convencionalmente «científico», y es justo reconocer que los físicos supieron salir del atolladero con un pragmatismo y una eficacia envidiables, aunque muchas de las cuestiones de fondo quedaron, como es natural tratándose de científicos, aparcadas a un lado. La forma en que Niels Bohr y sus más próximos colaboradores resolvieron el contencioso despertó cierto malestar —un tipo de malestar que podríamos calificar de «filosófico»— entre bastantes colegas, pero la supervivencia contra viento y marea de la llamada «Interpretación de Copenhague», tras más de 70 años de críticas acerbas, demuestra que su planteamiento no era tan naif como se presumía, y que la dificultad que de un modo tan poco convencional superaron no era ni mucho menos baladí. Lo que sí es verdad es que la formación filosófica de Bohr, Heisenberg, Pauli, etc., era bastante somera; aunque tampoco sus oponentes, empezando por el propio Albert Einstein, estaban mejor pertrechados. No creo que haya que lamentarlo demasiado, porque sospecho que el bagaje al uso, adquirido en las facultades universitarias o levendo a los clásicos, tal vez no hubiese sido de mucha ayuda: desde 1927 son incontables los filósofos y epistemólogos que han formulado sus propuestas y no parece que hayan conseguido ir mucho más lejos de lo que en un primer momento llegaron los físicos por sí solos. En todo caso, hay una excepción notable a la generalizada falta de formación específicamente filosófica en los creadores de la teoría. Erwin Schrödinger, que realizó una de las contribuciones más decisivas, no se limitó a echar mano de conocimientos filosóficos aprendidos en el bachillerato, a sazonar con consignas tomadas de la metafísica y la teología las convicciones que estaban en la base de su trabajo científico, o a improvisar juicios a partir de ideas espigadas en conversaciones, lecturas y meditaciones ocasionales, propias de los ratos de asueto. Tales pueden ser los casos de Heisenberg, Einstein o Bohr, pero desde luego, no el de Schrödinger. Por propia confesión sabemos que quiso ser poeta antes que científico, aunque desistió por la escasa rentabilidad de tal actividad: «La ciencia, en cambio, me ofreció una carrera»<sup>1</sup>.

En un esbozo autobiográfico realizado poco antes de morir confesó que en 1918, es decir, pocos años antes de los decisivos descubrimientos que le dieron fama, decidió aceptar un puesto de

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Cfr. «Interview with Prof. Schrödinger», *The Observer* 11.1.1931, reprint en: *Erwin Schrödinger Gesammelte Abhandlungen*. Band 4. *Allgemein wissenschaftliche und populäre Aufsatze*, Wien, V. O. A. W., 1984, p. 332.

profesor de física sin perspectivas de investigación, porque «tenía la intención de dedicarme, en mi vida privada, más a la filosofía (hacía poco que había conocido con gran entusiasmo a Schopenhauer y a través de él la teoría unitaria de los Upanisads)»<sup>2</sup>. La lista de los filósofos cuyo influjo ha reconocido comprende -además de Schopenhauer— Spinoza, Richard Semon, Mach y Avenarius<sup>3</sup>, lo cual concuerda con la idea de que la filosofía no era para él mero complemento de una formación cultural amplia, sino una actividad ejercida con pasión y con un grado muy fuerte de implicación personal. Esta orientación ni siquiera fue modificada por el hecho de ser distinguido con el premio Nobel. En general, las cuestiones interdisciplinares ocuparon lo mejor de su tiempo, como refleja la intensa actividad preparatoria de conferencias públicas y libros de temática amplia, incluso de una intención a primera vista —aunque en el fondo no sea así— divulgativa. Más aún: hay que decir que la actitud de Schrödinger ante la ciencia es «filosófica» en sentido explícito, como él mismo afirma en su ensayo Ciencia y humanismo: «Parece claro y evidente, pero hay que decirlo: el saber aislado, conseguido por un grupo de especialistas en un campo limitado, no tiene ningún valor, únicamente su síntesis con el resto del saber, y esto en tanto que esta síntesis contribuya realmente a responder al interrogante "¿qué somos?"»4.

# 2. La polémica sobre el determinismo y el realismo objetivista

Edición de Juan Arana

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Cfr. E. Schrödinger, *Mi vida*, en: *Mi concepción del mundo. Seguido de Mi vida*, trad. de J. Fingehut y A. Klein, Barcelona, Tusquets, 1988, p. 137.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Cfr. E. Schrödinger, Mi concepción del mundo, p. 16.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Erwin Schrödinger, Ciencia y humanismo, Barcelona, Tusquets, 1998 (e.o., 1951), p. 15.

Creo que no es necesario insistir más en el perfil filosofante de Schrödinger, así que abordaré sin más preámbulos la cuestión central de este trabajo, esto es, ¿cómo condicionó este trasfondo intelectual la postura que adoptó ante los enigmas filosóficos relacionados con la teoría cuántica? Podríamos agrupar éstos en dos grupos; primero, los que se refieren al tipo de conexión causal que se da entre los eventos naturales; segundo, los que tienen que ver con los límites de la inteligibilidad del mundo a partir de los fenómenos de la sensibilidad y los conceptos del entendimiento. En ambos casos Bohr y Einstein adoptaron posiciones opuestas: Einstein optó por el determinismo y por la tesis de que la teoría física puede y debe reflejar la realidad misma de sus objetos, mientras que Bohr pensaba que la teoría física ha de conjugar conceptos lógicamente incompatibles y que para ello es preciso renunciar al determinismo y a la pretensión de un realismo objetivista o --por emplear un adjetivo con otras connotaciones-ingenuo. A veces se ha sugerido que el determinismo y el realismo objetivista están estrechamente entrelazados entre sí, y también que las preferencias de los restantes protagonistas de la discusión corresponden a alguna solución intermedia dentro de una escala gradual en cuyos extremos aparecerían los autores mencionados. Sin embargo, al menos por lo que se refiere a Schrödinger no es así y tal es el sentido de la anécdota según la cual, cuando se le preguntó a favor de cuál de los dos estaba, repuso que a favor de ambos. No es fácil encasillar su postura ni despacharla con un par de frases; por el contrario, se suele obtener una impresión ambigua al leer los escritos que a lo largo de los años fue publicando al respecto. Con todo, cabe hacer una primera las declaraciones constatación: aunque son muy claras desaprobatorias de la interpretación de Copenhague y de sus extrapolaciones filosófico-epistemológicas, Schrödinger estaba más apegado a la teoría cuántica que Einstein. Parece lógico, puesto que en una proporción apreciable se trataba de su propia criatura; pero también Einstein había hecho aportaciones cruciales a ella, a pesar de lo cual, y sin dejar de reconocer sus méritos, acabó por convencerse de que se trataba de una construcción provisional y que el progreso de la física pasaba por la superación no sólo de sus fórmulas, sino también de sus supuestos más fundamentales. Schrödinger nunca manifestó esta clase de rechazo, porque conservó siempre la esperanza de reconciliar la teoría misma con el ideal objetivista. Es en este sentido en el que se declaraba optimista:

Un dogma ampliamente aceptado afirma que no pueda ver un cuadro o objetivo de la realidad en ninguno de los sentidos en que antes se creía. Tan sólo los optimistas que hay entre nosotros (entre los cuales me cuento yo mismo) consideran esto como una extravagancia filosófica, como una medida desesperada tomada ante una gran crisis. Esperamos que lo vacilante de los conceptos y las opiniones sólo revele un violento proceso de transformación, que

finalmente nos conducirá a algo mejor que el estéril formulismo que ha paralizado nuestra situación actual.<sup>5</sup>

Esto significa que para él sólo la interpretación de Bohr y Heisenberg constituiría una vía muerta, mientras que Einstein no estaba tan seguro de que fuese posible separarla de la formulación canónica de la teoría alcanzada en los años 1925-1927. El desarrollo posterior de los hechos ha reforzado esta segunda opinión, pero antes de sacar conclusiones conviene examinar las cosas por orden.

## 3. Schrödinger y el determinismo

Para empezar conviene advertir que Schrödinger no asimila como tantos otros el indeterminismo y la teoría cuántica, en primer lugar, porque ya era indeterminista en cierto sentido antes de que surgiera la tesis del indeterminismo cuántico y, en segundo lugar, porque la culminación de la teoría y sus propios descubrimientos dentro de ella supusieron para él una reconversión hacia el determinismo en varios aspectos relevantes. Hay que recordar que Schrödinger se formó intelectualmente en la escuela vienesa de física, que había estado sacudida por las discusiones entre Mach y Boltzmann, siendo paradójicamente deudor de ambos a la vez, del positivismo de uno y del realismo del otro<sup>6</sup>. La naturaleza y alcance de la teoría física, y su relación con las cosas mismas habían suscitado

 $<sup>^5</sup>$  Nuestro concepto de la materia. [1950], en<br/>: ¿Qué es una ley de la naturaleza?, México, Fondo de Cultura Económica, 1975, p. 139.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Cfr. Walter Moore, Erwin Schrödinger: una vida, Cambridge, C. U. P., 1996, p. 45.

profundas reflexiones por parte de las mentes más lúcidas de aquel entorno, de manera que llegó a cuestionarse el viejo dogma de que el determinismo es un presupuesto ontológico necesario para asentar el valor epistémico de las leyes científicas. La personalidad que llegó a conclusiones más claras a este respecto fue Franz Exner en 1919. Paul Forman ha estudiado esta aparente ola de «irracionalismo» que sacudió la ciencia centroeuropea inmediatamente después de la primera guerra mundial, e incluso ha llegado a ver en este indeterminismo «precuántico» un factor condicionante del que pocos años más tarde se estatuiría en la física<sup>7</sup>.

Lo cierto no obstante es que, salvando las motivaciones personales de cada cual así como la pregnancia del ambiente espiritual reinante, la crítica del determinismo de la física «clásica» descansaba en sólidas consideraciones lógicas y epistemológicas. Schrödinger se hizo eco de ellas en la lección que pronunció al tomar posesión de la cátedra de física en la Universidad de Zurich, el 9 de diciembre de 1922, titulada ¿Qué es una ley de la naturaleza?, y en la que hace referencia explícita a Exner. Comienza con un análisis muy en la línea de Hume-Mach que pone de descubierto la debilidad de la relación causal desde el punto de vista lógico, análisis que también afecta a la creencia en la necesidad de las leyes naturales. Desmontada la suposición de necesidad apriórica, queda la evidencia fáctica de los éxitos cosechados por las presunciones de vínculos legales tan frecuentadas por los científicos. Si de hecho las leyes parecen estar

<sup>7</sup> Cfr. Paul Forman, Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica 1918-1927. Adaptación de los físicos y matemáticos alemanes a un ambiente hostil, Madrid, Alianza, 1984.

\_

ahí, si día tras día se refuerza la confianza que nos merecen, nada más natural que postular un fundamento in re para tales éxitos. La creencia en vínculos causales objetivos y universalmente necesarios es el postulado más utilizado, pero un examen atento de la evolución de la ciencia en el siglo XIX arroja como resultado que no es la necesidad causalista, sino el azar acausal, la fuente más fructífera y eficaz de nuevas leyes: «la investigación física ha demostrado clara y definitivamente que el azar es, por lo menos en la abrumadora mayoría de los procesos naturales, la raíz de esa regularidad y de esa invariabilidad que nos han llevado a establecer el postulado de la causalidad universal, en vista de su estricto ajuste a las leyes»8. La paradoja se explica teniendo en cuenta que la termodinámica y la mecánica estadística fueron las más preciadas conquistas de la ciencia en el tránsito del siglo XIX al XX, y que en estos ámbitos las leyes encontradas eran de naturaleza estadística y existencia de la de distribuciones dependian azarosas, indiscriminadas, en poblaciones numerosas de casos particulares. Es verdad que tales casos particulares se suponían a su vez sometidos a mecanismos deterministas. La confusión latente provenía de pensar que era legítimo, por ejemplo, conclusiones sobre la presión ejercida por un gas, a partir de la suposición de que cada una de sus moléculas estaba regida por fuerzas mecánicas deterministas, y no de la hipótesis simplificadora según la cual hay tantas moviéndose en una determinada dirección como en cualquier otra. De modo implícito se asignaba al azar la

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> ¿Qué es una ley de la naturaleza? [1922] en: ¿Qué es una ley de la naturaleza?, p. 17.

simplificación y a la necesidad causal la legalidad resultante. Un análisis más meditado, al que se remite Schrödinger, muestra en cambio que tanto la simplificación de los términos del problema como las leyes en que desemboca su resolución *provienen de la misma fuente*, esto es, el azar, y que por lo tanto no hay que acudir a otra referencia ontológica que a él. Éste es el punto que, nobleza obliga, hay que atribuir a Exner:

Aunque hemos descubierto que las leyes físicas son de carácter estadístico, lo que no implica necesariamente la determinación estrictamente causal de los procesos moleculares individuales, sin embargo la opinión general es que, en realidad, descubriríamos que el proceso individual—por ejemplo, la colisión de dos moléculas de gas— está determinado por una rígida causalidad [...] Fue Franz Exner, un físico experimental, quien por primera vez, en 1919, con perfecta claridad filosófica, lanzó una crítica contra la manera como todo el mundo aceptaba, como algo dado por sentado, el determinismo absoluto de los procesos moleculares. Llegó a la conclusión de que aquello era ciertamente posible, pero de ninguna manera necesario y, examinado más de cerca, ni siquiera muy probable<sup>9</sup>.

Por consiguiente, las *leyes estadísticas* no son un subproducto de leyes basadas en el determinismo estricto de los casos individuales. Nada tienen que ver con una presentación resumida y poco

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> ¿Qué es una ley de la naturaleza?, pp. 21-22.

detallada de éstas; poseen su propia especificidad y en último término son irreductibles, de forma que *lo problemático* es, curiosamente, que ambos tipos sean conciliables, que pueda haber una legalidad aplicable a los casos individuales por debajo de la que rige sobre los valores promedio. La pregunta pertinente es entonces, ¿por qué motivo seguir creyendo en el determinismo, cuando la ciencia esta siendo colonizada día a día por leyes de tipo estadístico? La respuesta de Schrödinger es fiel una vez más al espíritu de Hume:

¿De dónde ha salido la difundida creencia en que la conducta de las moléculas está determinada por una causalidad absoluta, y la convicción de que lo contrario es inimaginable? Simplemente, del hábito, heredado durante miles de años, de pensar causalmente, que hace parecer totalmente disparatada, lógicamente absurda, la idea de un sucedido indeterminado, de una absoluta casualidad primaria<sup>10</sup>.

Descontado este efecto, insistir en la presencia de una duplicidad de dinamismos legales actuando simultáneamente en dos niveles sin interferencias mutuas resulta poco verosímil, y en definitiva es rechazable:

No sólo falta toda consideración que pudiera imponernos esta suposición, sino que debemos ver claramente que semejante dualidad en las leyes de la naturaleza resulta

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> ¿Qué es una ley de la naturaleza?, p. 23.

sumamente improbable. De un lado estarían las leyes intrínsecas, genuinas, absolutas, del dominio infinitesimal; del otro, esa observada regularidad macroscópica de los acontecimientos que, en sus características más esenciales no se debe a la existencia de leyes absolutas sino que, antes bien, está determinada por el concepto del número puro, la más clara y simple creación de la mente humana<sup>11</sup>.

Schrödinger no duda más y al término de su alocución apuesta por una ciencia que en un próximo futuro se libre definitivamente del espectro del determinismo riguroso:

Yo prefiero creer que, una vez libres de nuestra enraizada predilección por la causalidad absoluta, lograremos superar estas dificultades, y no que, a la inversa, la teoría atómica —casi casualmente, diríamos— venga a comprobar el dogma de la causalidad<sup>12</sup>.

La teoría atómica se estaba desarrollando febrilmente durante aquellos años, y todavía era prematuro decidir si en definitiva iba a decantarse por el modelo epistémico de las leyes deterministas o estadísticas. En este sentido, Schrödinger no tuvo que aguardar a la formulación de las relaciones de indeterminación de Heisenberg para pronunciarse. Si hubiese que encuadrarlo dentro de algún grupo en estos momentos, sin duda estaría con los más revolucionarios, puesto que la conservación del principio causal

15

 $<sup>^{11}</sup>$  ¿Qué es una ley de la naturaleza?, p. 24.

 $<sup>^{\</sup>rm 12}$  ¿Qué es una ley de la naturaleza?, p. 26.

riguroso era el punto en que se hacía fuerte la vieja guardia de la física, los Lorenz, Planck, Einstein, von Laue, etc.

#### 4. La mecánica ondulatoria

Pasó algún tiempo y en Navidad de 1925<sup>13</sup> Schrödinger descubrió la famosa ecuación que inmortalizaría su nombre y abriría paso a una segunda formulación matemática de la teoría cuántica, la mecánica serie de cuatro memorables ondulatoria. en una artículos publicados a lo largo de 192614. Dejando a un lado los detalles técnicos de esta contribución decisiva, hay varios aspectos destacables. En primer lugar es notorio que Schrödinger fue mucho más revolucionario en el fondo de las ideas que en la forma de la presentación. Ya hemos visto hasta dónde había llegado a alejarse de la filosofia característica de la física clásica. En cambio, su formación era bastante convencional. Con 38 años, no tenía mucho que ver con los imberbes que pululaban por Gotinga y Copenhague: sabía más física que ellos, pero se desenvolvía peor con los nuevos aparatos y las poco convencionales técnicas de cálculo que aquéllos manejaban —o inventaban— con tanta soltura. Como matemático era de lo más tradicional: dominaba las ecuaciones diferenciales instrumento favorito de la física de siempre—, mientras que flojeaba en álgebra y teoría de grupos, los nuevos arsenales lógicos de la física<sup>15</sup>. En consecuencia, su presentación de la teoría no tenía nada que ver con el álgebra matricial que Heisenberg se había sacado de

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Cfr. Leon Lederman, La Partícula Divina, Barcelona, Crítica, 1996, pp. 154-157.

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> «Quantisierung als Eigenwertproblem», *Annalen der Physik*, 79 (1926), pp. 361-376; pp. 489-527; 80 (1926), pp. 437-491; 81 (1926), pp. 109-140.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Cfr. Moore, Erwin Schrödinger, pp. 50-51.

la manga, sino con el pulcro y sosegado lenguaje de las ecuaciones en derivadas parciales, en perfecta simbiosis con los procesos pulidos y continuos que tanto tranquilizaban a los prohombres de la vieja escuela. Así se explica el entusiasmo que despertó en todos ellos, que pronto vieron en Schrödinger el candidato ideal para suceder a Planck en Berlín y poner de nuevo en orden las cosas en la física. Werner Heisenberg aporta una descripción del clima que se respiraba a raíz de estos descubrimientos al recordar una conferencia pronunciada por Schrödinger en la Universidad de Münich en el verano de 1926:

En la discusión que siguió propuse mis objeciones; especialmente me referí a que con la concepción de Schrödinger ni siquiera podía entenderse la ley de la radiación de Planck. Pero esta crítica mía no tuvo resultado alguno. Wilhelm Wien respondió con agudeza que él comprendía, por un lado, mi pesar de que se acabara ya con la mecánica cuántica y de que no se necesitara hablar más de contrasentidos como los saltos de "quanta" y otras cosas semejantes; pero esperaba, por otro lado, que las dificultades señaladas por mí serían, si duda, solucionadas por Schrödinger en plazo breve. Schrödinger no estuvo tan seguro en su respuesta, pero también él pensaba que sólo era cuestión de tiempo el poder aclarar en su exacto sentido los problemas planteados por mí. 16

<sup>16</sup> Werner Heisenberg, Diálogos sobre la física atómica, Madrid B. C. A., 1972, pp. 92-93.

Está claro que los miembros de la vieja generación vieron en Schrödinger un hombre que hablaba su propio idioma y tampoco hay dudas de que cifraron en él sus esperanzas de limpiar la física de las irritantes paradojas cuánticas<sup>17</sup>. El propio interesado, tal vez disimulando un poco sus heréticas concepciones filosóficas, se dejó arrastrar por el entusiasmo de sus mentores y pareció promover una interpretación de su mecánica ondulatoria que confería algún tipo de realidad física fundamental a lo que su ecuación describía como una variación continua en el espacio y en el tiempo. El tema del determinismo —en el que se había mostrado tan audaz— pasó a segundo plano, y la discusión se centró en los modelos para la comprensión de la materia. Desde medio siglo atrás éste era uno de los puntos más candentes y discutidos. La contraposición entre atomismo y continuismo, las especulaciones acerca del éter electromagnético y más tarde la confrontación entre la materia ordinaria y los campos energéticos habían dejado indiferentes a muy pocos sabios de talla. El debate revistió particular virulencia en el contexto austríaco, con la pugna entre Mach y Boltzmann a que ya me he referido y que tanto influyó en Schrödinger. Más allá de los desconcertantes descubrimientos que dieron lugar a la física cuántica, la teoría matemática que éste consiguió desarrollar y tan bien cuadraba con los hechos, le ofrecía —al menos así lo creyó en un primer momento— la oportunidad de zanjar de una vez por todas la cuestión de los modelos. Aunque pronto tuvo que desengañarse de ello, un resto de tales ilusiones perdura en su

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Véanse algunas de las entusiásticas declaraciones de Einstein y Max Planck recogidas en: Dieter Hoffmann, *Erwin Schrödinger*, Leipzig, Teubner, 1984, p. 42.

discurso de recepción del Premio Nobel en 1933, titulado La idea fundamental de la mecánica ondulatoria. Parte en ese texto de la evocación de los intentos para unificar los fenómenos de la luz y de la mecánica a partir de los principios de mínimos: el Principio de Fermat permite entender el comportamiento de la luz sobre la idea de que la luz sigue una trayectoria que le permite completar su recorrido en un tiempo mínimo. De forma hasta cierto punto análoga, Hamilton mostró cómo los movimientos reales de los cuerpos pueden entenderse bajo el precepto de que minimizan (en comparación con otros movimientos en principio posibles) no el tiempo transcurrido entre la salida y la llegada, sino una magnitud física muy particular, la acción<sup>18</sup>. Un pequeño déficit de erudición histórica impidió a Schrödinger hacer aún más brillante su alegato, porque Maupertuis, autor del siglo XVIII, pensó que el principio de Fermat y el de mínima acción eran en realidad el mismo principio, aplicado ora a la luz, ora a la materia ordinaria. Con ello tendió por primera vez un puente entre la mecánica y lo que más tarde llegaría a ser la teoría electromagnética. Por desgracia, Maupertuis creía equivocadamente que la velocidad de la luz es mayor en los medios transparentes que en el vacío. Como no es así, la analogía de los dos principios es imperfecta y hasta cabría decir opuesta. La mecánica ondulatoria fue, sin embargo, capaz de recuperar y ahondar el paralelismo al generalizar la idea de Louis de Broglie de que tanto la materia ordinaria (en la que dominaba el modelo corpuscular), como las radiaciones electromagnéticas (generalmente imaginadas como

<sup>18</sup> Cfr. La idea fundamental de la mecánica ondulatoria [1933], en: ¿Qué es una ley de la naturaleza?, pp. 115-125.

«ondas») presentaban aspectos tanto «corpusculares» como «ondulatorios». De alguna manera quedó así asegurado el estrecho parentesco entre las dos grandes provincias de la física. El hecho de que tal hermanamiento fuese a costa de una creciente escisión interna en el modo de entender cada una de ellas debió pesar en el ánimo de Schrödinger menos que la perspectiva de que todo (átomos, electrones, luz y energía radiante) fuera susceptible de una descripción uniforme, conceptualmente paradójica, pero de una limpidez sin mácula desde el punto de vista matemático.

## 5. El triunfo de la interpretación de Copenhague

El despertar del bello sueño vino cuando Niels Bohr pidió a Schrödinger que se desplazase a Copenhague para presentar allí su interpretación ante los descubridores de la «otra» versión matemática de la teoría. Como el mismo Heisenberg relata:

Las discusiones entre Bohr y Schrödinger empezaron ya en la estación de Copenhague, y se alargaron cada día desde las primeras horas de la mañana hasta muy avanzada la noche. Schrödinger vivía en casa de los Bohr, de forma que, por razones externas, apenas si había ocasión para interrumpir el diálogo. Bohr era siempre singularmente respetuoso y afable en el trato con los demás. Sin embargo, en esta ocasión se comportó, a mi juicio, como un fanático empedernido, que no estaba dispuesto a hacer concesión

alguna a su interlocutor o a permitir la más mínima falta de claridad<sup>19</sup>.

Esta confrontación constituyó un anticipo de las que más tarde tuvieron lugar entre Bohr y Einstein en los congresos Solvay de 1927 y 1930, y es probable que, aunque menos conocida, tuviese mayor alcance teórico y filosófico que las que vinieron luego. Aunque no se llegó a un acuerdo entre las dos partes, Schrödinger hubo de reconocer que no había forma de que sus «ondas» adquiriesen la consistencia necesaria para mantenerse densamente empaquetadas como requerían los aspectos corpusculares de los eventos registrados, pero seguía resistiéndose a aceptar que la discontinuidad cuántica fuera un factum incuestionable. Para sus interlocutores, el enfrentamiento supuso la prueba de fuego que les convenció de la corrección de sus postulados y constituyó el factor llamada próximo desencadenante de la «Interpretación de Copenhague». Poco tiempo después Bohr partió para las vacaciones de las que regresaría con su idea de la complementariedad, siendo recibido por un Heisenberg que acababa de encontrar las relaciones de indeterminación.

Es sobradamente conocida la historia de los acontecimientos que tuvieron lugar a continuación. Mientras Bohr y los suyos perfilaban más y más sus posiciones, la actitud de Schrödinger se desdibujó, como si fuese la variable conjugada de una magnitud cuántica que hubiera sido medida con demasiada precisión. Por estos años

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> Heisenberg, *Diálogos...*, p. 93.

publicó trabajos no muy alejados de la ortodoxia recientemente entronizada. Así ocurre en La transformación del concepto físico del mundo (1930), donde reconoce que, aunque muchos físicos han creído en la continuidad básica de los procesos naturales, no es posible seguir tomándolo como un hecho objetivo y fiable: «Y si bien ensanchamos observaciones de que ya disponemos, interpolándolas, de acuerdo con nuestras luces, si las entroncamos en continuos perennes según el curso ordenado de los acontecimientos, ya no podremos esperar a que estos continuos representen al *objeto de la* naturaleza en sí, sino que lo que representarán será la relación entre sujeto y objeto<sup>20</sup>. Da la impresión de que las dificultades invencibles para elaborar una representación veraz de la materia hayan evocado en Schrödinger las falacias del schopenhaueriano Mundo de la representación. Incluso se muestra dispuesto a entregar la trama de los fenómenos a sus competidores y asumir con una lucidez y radicalidad que sorprenden la interpretación estadística que Max Born dio a su función de ondas ψ:

Las funciones de onda no describen la naturaleza en sí, sino el conocimiento que, sobre la base de las observaciones realmente efectuadas, a veces poseemos de ella. No lo revelan los resultados de las futuras observaciones con seguridad y precisión, sino exactamente con el grado de incertidumbre y mera probabilidad causadas por los prejuicios establecidos por las observaciones realmente efectuadas. [...] Esto se debe, en

 $^{20}$  La transformación del concepto físico del mundo. [1930] en: ¿Qué es una ley de la naturaleza?, p. 36

\_

suma, a que las observaciones se estorban mutuamente: una observación que en un sentido aumenta nuestro conocimiento del objeto, en otro sentido lo reduce<sup>21</sup>.

Las modulaciones definidas por la ecuación no se refieren pues a energías, dinamismos o cualquier otro tipo de entidad compacta o enrarecida, dura o blanda, elástica o deformable. Ha sido vaciada de realidad, sometida a un proceso de transvase que va de la ontología a la gnoseología: No describe las variaciones de un ser sino de un conocer, pero, como ha surgido en el contexto de un discurso acerca del mundo, en la articulación final de una teoría científica y precisamente la que se refiere a las ultimidades de la física, cabe extraer de todo ello una conclusión escéptica, pesimista, acerca de nuestro conocimiento y de su mundo de objetos. Todo es posible, incluso cabe la posibilidad de que sea el propio hombre quien impone orden a una naturaleza de por sí caótica, como fiel ejecutor de los designios de la voluntad schopenhaueriana.

# 6. El «gato de Schrödinger»

Este episodio quizá sólo reflejara una crisis de desaliento, porque Schrödinger ya no volvió a inclinarse con tanta reverencia ante la ortodoxia bohriana. Revestido otra vez de toda la filosidad que su espíritu era capaz de mostrar, pronto se puso a revisar todas las inconsecuencias de la teoría en su interpretación dominante. La comunicación con Einstein en estos años fue determinante y el fruto

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> La transformación del concepto físico del mundo, pp. 36-37.

de todo ello quedó reflejado en el artículo La situación actual en la mecánica cuántica, publicado en tres entregas durante 1935<sup>22</sup>. Aquí aparece por primera vez el archiconocido «gato de Schrödinger», que fue sugerido por una carta de Einstein del 8 de agosto de 1935, en la que se hablaba más bien de un «barril de pólvora» inestable. Schrödinger prefirió plantear una situación más claramente ligada al azar cuántico, en la que la vida de un gato depende de la producción o no de un evento aislado, como la desintegración de un átomo radiactivo. También retomó en este trabajo el argumento «Einstein-Podolsky-Rosen»<sup>23</sup>. Dejando aparte los detalles y las anécdotas, este texto realiza un balance de lo que la función de ondas y significa de cara a la descripción de la realidad y los procesos de medida. Hasta cierto punto supone la renuncia definitiva a las aspiraciones que había abrigado anteriormente de que ψ representara de algún modo las cosas mismas, el «en sí» de una realidad que sería intrínsecamente borrosa. Por eso, el ejemplo del gato sirve fundamentalmente para descartar tal interpretación. «Tales situaciones tienen de particular que a una indeterminación limitada al dominio atómico inicialmente se asocia una indeterminación macroscópica que *eliminar* por posible es observación directa. Esto es lo que nos impide aceptar de manera ingenua que un modelo borroso pueda representar la realidad. En sí, eso no tendría nada de confuso ni contradictorio. Hay una diferencia entre una fotografía movida o desenfocada y un cliché

 $<sup>^{22}</sup>$  «Die gegenwärtigen Situation in der Quantenmechanik»,  $\it Naturwissenschaften$  23 (1935), pp. 807-812; 823-828; 844-849.

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> A. Einstein, B. Podolsky, N, Rosen, «Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?», *Physical review* 47 (1935), pp. 777-780.

representando nubes o una capa de niebla»24. El argumento, en suma, se reduce a señalar que la «borrosidad» de la ecuación de ondas —entendida como una representación que no determina, sino que define un campo de probabilidades—, no puede ser encerrada en el ámbito de los eventos minúsculos que escapan a nuestra observación directa, sino que de un modo u otro salpica al mundo macroscópico del que se supone que los sentidos dan informes inequívocos. Schrödinger, que habla de la ecuación de ondas con absoluto desapego, como si no tuviera nada que ver con su invención, señala en ella aspectos que han hecho meditar a científicos y filósofos durante decenios. Antes dije que la ecuación había sido formulada en el más vetusto y confiable lenguaje de la física matemática. Hasta cierto punto, el hábito hace al monje, y Schrödinger recuerda que w sostiene en varios respectos la comparación con las magnitudes típicas de la física clásica:

Sea como sea, se trata de una entidad del dominio del pensamiento que da cuenta del carácter borroso de todas las variables en cualquier instante de manera tan clara y exacta como el modelo clásico da cuenta de la precisión de sus valores. Y su ley de evolución, la ley que rige su evolución temporal cuando el sistema es abandonado a sí mismo, no cede en nada, en el plano de la claridad y la precisión, a las leyes de la evolución del modelo clásico<sup>25</sup>.

# 7. El colapso de la ecuación de ondas

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Die gegenwärtigen..., p. 812.

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Die gegenwärtigen..., p. 811.

En definitiva es como si el precio de conservar la sintaxis de la vieja ciencia hubiese sido cambiar sus referentes, transformar la teoría en un metalenguaje, que ya no describiría los objetos mismos, sino las mediciones a que en principio podrían ser sometidos. De ser así, debería hablarse en adelante no de las cosas sino del modo de objetivarlas. Lo que resulta más extraño es que podamos ser absolutamente precisos al hablar de la borrosidad inevitable de esas objetivaciones, y sobre todo que la evolución en el tiempo de tal borrosidad —es decir, de las expectativas de obtener medidas con tal o cual grado de imprecisión— esté sometida a una ley rigurosamente determinista que evoluciona con suavidad y sin sobresaltos, en tanto el sistema permanezca abandonado a sí mismo, esto es, en tanto nos situemos en el plano de lo «posible» y no queramos pasar al de lo «realmente efectivo». Para ello, basta con efectuar la medida o las medidas, lo cual, por un lado, confirmará las previsiones estadísticas que constituyen el significado físico de la ecuación de ondas ψ y, al mismo tiempo, matará la gallina de los huevos de oro, porque producirá el colapso de la ecuación de ondas y la pérdida de toda la información que trasportaba de un modo tan preciso y determinista:

Después de cada medida, hay que suponer que la función  $\psi$  sufre una modificación muy particular, bastante brutal, que depende del resultado suministrado por la medida y que en consecuencia es imprevisible, esto basta para poner en evidencia que este tipo de modificación de la función  $\psi$  no tiene estrictamente nada que ver con su evolución

temporal entre dos medidas. La modificación brutal inducida por la medida [...] es el punto más interesante de toda la teoría. Se trata precisamente del punto que impone la ruptura con el realismo ingenuo. Precisamente por esta razón no se puede reemplazar el modelo o la cosa real directamente por la función  $\psi^{26}$ .

Esta ruptura con el realismo se impone según Schrödinger no tanto por la discontinuidad como por el hecho de que la observación altera irreversiblemente el curso de la naturaleza. El desencanto del físico austríaco con respecto a las expectativas filosóficas que había despertado en él su gran hallazgo es evidente. Lejos están los momentos en que pensaba que la función de ondas nos aproximaba a la verdad profunda de la realidad material y que, como dijo Einstein comentando el descubrimiento de Louis de Broglie, había sido levantada «una punta del gran velo». En lugar de eso, tan sólo estamos ante una fórmula que codifica con rigor y precisión el curso de nuestras conjeturas sobre cómo se nos manifestará la naturaleza la próxima vez que interfiramos con ella. Si fuese necesario alguna otra consideración para quitar verosimilitud a la bella estructura matemática que le había hecho entrar por la puerta grande de la historia de la ciencia, el número de dimensiones en que se despliega ψ crece exponencialmente con el de elementos que integran el sistema global a que se aplica: del espacio-tiempo ordinario hemos pasado al marco abstracto de configuración del espacio de Hilbert,

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Die gegenwärtigen..., p. 824.

llevando a su paroxismo la crisis del modelo ondulatorio por el que en su momento había optado $^{27}$ .

En resumidas cuentas, la posición de Schrödinger en lo que toca al problema de la inteligibilidad del mundo, lejos de ser retrógrada en ningún sentido, resulta tan radicalmente avanzada que sucumbe al pesimismo de no encontrar una solución válida ni creer en un camino prometedor para encontrarla. No acepta el ingenuo realismo de Einstein y su campo unificado, pero tampoco el salomónico principio bohriano de complementariedad ni las evidentes pero superficiales consideraciones heisenberguerianas acerca de la interacción del sujeto y el objeto en los procesos de medición. La clave del éxito de la mecánica cuántica radica en haber tomado distancia respecto a la realidad, y esa distancia está orgánica y funcionalmente incorporada en la teoría, tanto en su interpretación como en la misma formulación matemática. Es notable haber reencontrado algo análogo a las antiguas vinculaciones causales a este nivel, esto es: la evolución determinista de las expectativas de dispersión estadística relativas a las mediciones de sistemas que evolucionan sin interferencias. Esto bastó para convertirla en el mayor éxito empírico de la física de todas las épocas, pero cortó de raíz la posibilidad de extrapolar la física cuántica en una metafísica, de edificar sobre ella una ontología, y como sabemos, para Schrödinger el verdadero valor de la ciencia dependía de su conexión con las grandes preguntas filosóficas y no con las ventajas fácticas para la manipulación del entorno.

<sup>27</sup> Cfr. Die gegenwärtigen..., pp. 848-849.

### 8. La restauración parcial del determinismo

Ahora bien, si en este ámbito las sombras dominaban a las luces, la situación era más favorable con respecto al problema de la determinación. Es paradójico y al mismo tiempo evidencia la gran originalidad de Schrödinger el hecho de que, mientras todos los demás subrayaban que la teoría cuántica había arruinado —quizá definitivamente— el determinismo de la física, él percibió lo contrario. El determinismo ya estaba a sus ojos herido de muerte antes de que los cuánticos completasen su trabajo: La presencia de leves estadísticas en las coyunturas termodinámicas del universo que a sus ojos eran las más decisivas— había convertido el determinismo en un presupuesto caduco, una excrecencia filosófica gratuita que el tiempo se encargaría de eliminar. Para que en la naturaleza se manifestase algo parecido a una predeterminación, para que su curso fuera previsible, era indispensable que entrasen en consideración poblaciones ingentes de eventos sometidos al azar, único sostén objetivo de las leyes que de verdad funcionaban, las de los grandes números. Por eso, la multiplicidad indiscriminada era condición necesaria de la inteligibilidad de los procesos: Schrödinger lo subrayó en una original conferencia titulada ¿Por qué son tan pequeños los átomos?28 La respuesta que daba es clara: sólo una gran cantidad de átomos puede dar lugar a un sistema previsible desde el punto de vista termodinámico; por eso tanto los organismos

<sup>28</sup> «Warum sin die Atome so klein?», (1933) reprint en: *Erwin Schrödinger Gesammelte Abhandlungen*. Band 4. *Allgemein wissenschaftliche und populäre Aufsatze*, Wien, V. O. A. W., 1984, p. 341.

vivientes como los cuerpos macroscópicos que les son relevantes están compuestos de una cantidad ingente de átomos, que así resultan ser, en efecto, muy pequeños, si los comparamos con las cosas que nos afectan más de cerca.

Si bien se mira, la tesis de Schrödinger equivale a una forma de principio antrópico débil avant la lettre, pero como tal tenía un defecto: valía para objetos poco estructurados, pero era muy frágil si se extendía a los seres vivos, en los que el testimonio de la química orgánica auguraba que una cantidad no muy grande de átomos ejercía funciones esenciales (como la reproducción). La física clásica era, en este sentido, demasiado poco determinista: según todo lo que enseñaba las fluctuaciones termodinámicas deberían arruinar el delicado orden viviente. En realidad, y aunque muy pocos llegaron a verlo, también en el ámbito de la química, de la teoría electromagnética y hasta de la mecánica había una cantidad enorme de leyes inexplicables para la termodinámica e inexplicadas por la mecánica. El enorme éxito de la teoría cuántica a la hora de fundamentar todas esas leyes antes puramente empíricas radicaba, como Schrödinger fue el primero en darse cuenta, en que introducía nuevos principios de constricción, nuevos determinismos que antes eran completamente desconocidos. Ya en 1926 Schrödinger había manifestado en una carta dirigida a Wilhelm Wien que precisamente sus descubrimientos en mecánica ondulatoria le habían hecho desistir del indeterminismo que anteriormente había defendido: «Pero hoy, ya no me gusta suponer, como Born, que un proceso individual de este tipo es "absolutamente casual", es decir,

completamente indeterminado. Yo no creo hoy que ese concepto (que yo defendí con tanto entusiasmo hace cuatro años) solucione mucho»<sup>29</sup>. Lo cual no quiere decir que se hubiese convertido en un férreo determinista al estilo de Planck o Einstein, sino que, literalmente, ya no creía que los procesos individuales fueran absolutamente casuales. Debe agregarse que con toda razón, ya que la probabilidad cuántica no afecta exclusivamente a poblaciones estadísticamente numerosas, sino a eventos aislados, como se muestra en el experimento de la doble rendija al debilitar arbitrariamente la fuente de radiación emitida.

Los cuánticos menos respetuosos con la tradición afirmaban la ruina del principio de causalidad determinista, pero en la práctica determinaban las cosas mucho más que sus predecesores; lo cual formidables éxitos teóricos explica sus y experimentales. Renunciaban al principio, pero potenciaban sus consecuencias. Schrödinger explicó en ensayos posteriores la aparente antítesis: aunque las relaciones de Heisenberg y la interpretación estadística de la función de ondas disipasen la idea de una determinación completa de la realidad a partir de la física, la teoría era rica en principios restrictivos que prohíban explícitamente una cantidad infinita de posibilidades que antes eran perfectamente viables: por ejemplo, la emisión de una cantidad arbitrariamente pequeña de energía, en el caso de Planck; las órbitas electrónicas no cuantificadas, en el caso de Bohr, o la duplicidad de partículas con

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Citado en Moore, *Erwin Schrödinger*, p. 203.

los mismos números cuánticos de acuerdo con el principio de exclusión de Pauli.

El resultado es que, a pesar de la falta de definición del momento y lugar del próximo evento, la teoría establece barreras, agrupa las transiciones permitidas, predetermina los estados accesibles. Todo ello da pie a leves que condicionan con fuerza los casos individuales, otorgando a la naturaleza posibilidades de orden que antes carecían de fundamento. La teoría del enlace químico, desarrollada por Heitler, y London fue uno de los mayores logros en este sentido, y no dejan de ser una coincidencia que ambos trabajasen a las órdenes de Schrödinger. Sin embargo, las mejores perspectivas de aplicación se encontraban en la bioquímica y en este punto nadie se adelantó a Schrödinger a la hora de anunciarlo. Su libro ¿Qué es la vida?, publicado por primera vez en 1944 como resultado de unas conferencias pronunciadas en Dublín, tuvo una repercusión enorme en el curso de la naciente ciencia, a pesar de tratarse de un libro de divulgación y de basarse a menudo en meras especulaciones. Los descubridores de la estructura de la molécula de ADN entre otros han reconocido la decisiva importancia que tuvieron para la naciente disciplina algunas de las sugerencias de Schrödinger para rescatar los procesos vitales del azaroso entorno termodinámico<sup>30</sup>.

# 9. Determinismo y libertad

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> Cfr. al respecto mi trabajo «Erwin Schrödinger, filósofo de la biología», en: Juan Arana (Editor), *Los filósofos y la biología*, Sevilla, Thémata, vol. 20, 1998, pp. 159-174.

Hastaن dónde llegó exactitud esta reconversión con determinismo? En un escrito de 1951 afirmaba que era una cuestión abierta y así la dejaba, aunque no sin invocar la autoridad de Einstein: «Nos enfrentamos incluso (como saben) a la afirmación de que hay vacíos o fallas en la causación estricta. Es difícil pronunciarse sobre si es o no la última palabra. Hay quienes opinan que ésta no es en absoluto una cuestión zanjada (entre ellos, por cierto, Albert Einstein)»<sup>31</sup>. Creo que conocía demasiado bien las dificultades objetivas existentes para llegar a adherirse al solitario de Princeton, pero a la vez, tenía sus propias reticencias a las otras alternativas que se ofrecían y no por motivos científicos, sino más bien filosóficos. Planteó, en efecto, la cuestión al discutir el tema del libre albedrío: ciertos notables de la cuántica, como Pascual Jordan, habían conjeturado que el margen de indeterminación presente en la teoría podría ser utilizado por el alma, el espíritu o lo que fuese para producir determinaciones libres. Schrödinger fulminó esta propuesta de forma un tanto abrupta y precipitada: «De ello se deduce que la hipótesis de Jordan —la intervención directa del libre albedrío para colmar el hueco de la indeterminación— sí implica una interferencia de las leyes de la naturaleza, incluso en su forma aceptada en la teoría cuántica. Pero a este precio, desde luego, se logra cualquier cosa. No es la solución del dilema»<sup>32</sup>. Algo bastante parecido pensaba de la existencia de complementariedad entre las nociones de necesidad y libertad, como había defendido Bohr: «Por lo tanto, en sus argumentos, Bohr aduce, al parecer, una

<sup>31</sup> Ciencia y humanismo, Barcelona, Tusquets, 1998, p. 40.

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> Ciencia y humanismo, p. 75.

impredictibilidad física del comportamiento de un cuerpo vivo, una vez más a partir de la falta de causación estricta sostenida por la teoría cuántica. Que la indeterminación física desempeñe o no un papel relevante en la vida orgánica, considero que debemos negarnos rotundamente a convertirla, por los motivos expuestos, en la contrapartida física de los actos voluntarios de los seres vivos»<sup>33</sup>. Tampoco pretendía Schrödinger negar pura y simplemente la libertad humana, como hizo Einstein de la mano del necesitarismo spinoziano, sino que se basaba en la idea de que la conducta ética no es en absoluto aleatoria y por tanto no hay una contradicción entre libertad y necesidad, de acuerdo con la opinión del filósofo Ernst Cassirer, cuyos puntos de vista suscribía<sup>34</sup>. Por mi parte, creo que ambos se encerraban aquí en una dicotomía discutible: según ellos, lo que no sea determinismo tiene que ser azar, y si hay que elegir entre esos dos términos, la libertad humana queda mejor acogida y patrocinada por la necesidad que por el azar. Otros autores, desde Epicuro hasta Jacques Monod, han hecho la elección opuesta; sin embargo, es posible que se trate de una falsa disyunción. Determinación y azar son conceptos físicos, en el sentido de que cabe definir con precisión cómo se manifiestan empíricamente y son susceptibles de tratamiento matemático. No ocurre lo mismo con la libertad, que nadie ha sido capaz de conectar con los hechos y muchos menos medir o introducir en tipo alguno de ecuación. Si es así, quien teorice sobre la libertad de la mano de la fisica debe declararse incompetente como primera

\_

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> Ciencia y humanismo, p. 81.

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> Cfr. Ciencia y humanismo, p. 76.

providencia y renunciar a buscarle un encaje «positivo» con sus principios explicativos. Otra cosa es que, como la libertad independientemente de que la consideremos como una noción ética, antropológica o metafísica— tiene implicaciones relativas a la determinación de ciertos proceros físicos (como la conducta del hombre), convenga buscar para ella un encaje «negativo» entre la necesidad y el azar, en el sentido de verificar que no hay incompatibilidad con las categorías que emplea la física para determinar sus objetos. En tales condiciones, la tesis de que el mundo está regido por la necesidad o por el azar absolutos dificilmente casa con la libertad (salvo apelando a la armonía preestablecida de Leibniz o cosas así). El encaje es en cambio lógicamente concebible, aunque siga siendo opaco desde el punto de vista teórico, si hablamos de necesidades y aleatoriedades relativas, como ocurre en la física cuántica. El modelo de un minúsculo libre buscando su camino por tortuosos vericuetos entrelazados con las imposiciones causales unívocas y las distribuciones estadísticas regidas por la onda ψ resulta ingenuo, porque reproduce dentro de un esquema espacio-temporal (y por tanto físico) un proceso o dinamismo que por definición trasciende ese marco. Pero hay una doble ingenuidad: la de los que creen que puede ser así, como Descartes, y la de los que creen que sólo podría ser así y por tanto que es imposible que sea. Aquí se encuentra, con otros muchos, nuestro hombre.

En definitiva, el viejo Schrödinger mira con nostalgia su ecuación, tan bien perfilada, tan determinista. Recuerda una vez más que cuando la descubrió tuvo por un instante al alcance de la mano la restauración en todos sus fueros de la causalidad estricta. No deja de preguntarse cómo tras este pulcro atuendo se disfrazaba el mensajero que iba anunciar el triunfo, quizá definitivo, de sus adversarios:

En este esquema de la mecánica ondulatoria no existen lagunas, ni siquiera en lo que a causación se refiere. El esquema ondular se ajusta al requisito clásico de absoluto determinismo, y el método matemático utilizado es el de ecuaciones de campo, aunque a veces se recurra a un tipo enormemente generalizado de ellas.

¿Para qué sirve, entonces, esta descripción que, como he dicho, no creemos describa hechos observables o lo que es realmente la naturaleza? Pues sencillamente porque juzgamos que nos facilita información sobre los hechos mutua dependencia. observados su Según perspectiva optimista, nos da toda la información obtenible sobre los hechos observables y su interdependencia. Pero esta visión —que puede o no ser correcta— es optimista tan sólo en tanto que satisface nuestro orgullo de contar en principio con toda la información obtenible. En otro aspecto es pesimista, epistemológicamente pesimista podríamos decir. Pues la información que obtenemos en relación con la dependencia causal de los hechos observables incompleta. (¡Por algún sitio tenía que asomar la oreja!) Las lagunas, eliminadas del esquema ondulatorio,

retrocedido hasta la conexión entre dicho esquema y los hechos observables. Éstos no están en correspondencia unívoca con aquél. Resta mucha ambigüedad y, como dije, algunos pesimistas optimistas u optimistas pesimistas creen que esa ambigüedad es intrínseca e inevitable<sup>35</sup>.

Nunca llueve a gusto de todos: el optimismo de los partidarios de la Interpretación de Copenhague es el pesimismo de Schrödinger y viceversa. En este capítulo de la controversia, el físico-filósofo austríaco se declara vencido, aunque no convencido. Mucho más beligerante se muestra hasta el final de su vida en el otro, el que afecta a la inteligibilidad del mundo y la presencia del sujeto en la teoría. Su actitud en este frente presenta una nueva paradoja, porque al fin y al cabo él es un idealista, y no tiene ninguna duda sobre la primacía del espíritu sobre la materia: «La mente ha erigido el mundo exterior objetivo del filósofo natural, extrayéndolo de su propia sustancia, 36. El suyo era un idealismo construido con retazos de Berkeley, Hume, Schopenhauer, Mach y la filosofia oriental, pero en suma desembocaba en la suprema extrañeza de que algo tan por encima de todo lo corpóreo evidenciara una dependencia casi grotesca de una estructura material tan lábil como el cerebro<sup>37</sup>. El panteísmo le ofreció una salida a esta aporía: la mente no puede ser mas que una, es algo que por fuerza ha de conjugarse en singular. Los yos individuales no son más que ventanas por las que el yo

<sup>35</sup> Ciencia y humanismo, pp. 53-54.

-

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> La mente y la materia, Madrid, Taurus, 1958, p. 52.

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> Cfr. Ciencia y humanismo, pp. 21-22.

único se asoma al espacio y al tiempo. Esto convierte a las mentes individuales en cosas tan dependientes y derivadas como la propia materia. Schrödinger, en resumidas cuentas, sólo cree en un yo puro que, al modo wittgensteiniano, da lugar al mundo excluyéndose de él. «Sin duda, en cinco palabras puede exponerse el motivo por el que nuestro yo perceptivo y pensante no aparece por ninguna parte en el cuadro universal: porque él mismo es este cuadro universal. Es idéntico al todo, y por lo tanto éste no puede contenerlo como una parte<sup>38</sup>.

La concepción no es nueva, pero tal vez sea la primera vez que un científico del máximo rango la ha tomado entre sus manos para enlazarla en cuanto cosmovisión metafísica con la problemática más candente de la investigación. El olvido del sujeto en todo el ámbito de las ciencias naturales encuentra así su más sencilla y eficaz justificación: «La mente no podría enfrentarse con esta tarea gigantesca [esto es, la creación del mundo] sino mediante el recurso simplificador de excluirse a sí misma, retirándose de su creación conceptual. De aquí que esta última no contenga a su creado.»<sup>39</sup>.

Dejemos, sin embargo, los matices de la fe panteísta de Schrödinger y volvamos a su interpretación de la física cuántica. Dado que está persuadido de la omnipresencia sustentadora de la mente tras todo lo que hay, ¿por qué se opuso con tanta insistencia al presunto subjetivismo de Copenhague? Precisamente porque su yo puro crea el mundo, pero no forma parte de él, mientras que el sujeto de la

 $<sup>^{38}</sup>$  «La singularidad de la imagen del mundo de la ciencia natural» [1947] en: ¿Qué es una ley de la naturaleza?, p. 98.

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> La mente y la materia, p. 52.

interpretación estándar se cuela dentro del laboratorio, interfiere con los aparatos y colapsa la función de ondas para desconsuelo de su descubridor. Gran parte del esfuerzo interpretativo de Schrödinger va dirigido a sacar al yo del escenario del mundo fenoménico y colocarlo otra vez en el alto trono que le tiene reservado en el palco presidencial. Los saltos cuánticos le molestan no porque rompan la continuidad determinista de la vieja fisica, sino porque amenazan con la irrupción en escena del yo empírico, espacio-temporal, que no tienen ningún papel que representar en el reparto que ha planeado. Él entiende que Bohr y los suyos pretenden lo contrario, convertir el universo en una mezcolanza inextricable de instancias objetivas y subjetivas:

Lo que quieren decir ellos es que el objeto no tiene una existencia independiente del sujeto que observa. Quieren decir que los recientes descubrimientos en física han puesto de relieve la misteriosa barrera entre sujeto y objeto y, en consecuencia, se ha visto que ésta no resulta ser una barrera del todo definida. Hay que entender que nunca observamos un objeto sin que éste se modifique o se impregne de nuestra propia actividad de observación. Hay que entender que bajo el impacto de nuestros refinados métodos de observación y de la reflexión sobre los resultados de nuestros experimentos, se ha roto esa misteriosa barrera entre sujeto y objeto<sup>40</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup> Ciencia y humanismo, p. 64.

Es obvio que para Schrödinger ese intento es inaceptable, y por eso trata de todos modos de *cosificar* el dichoso colapso de la función de ondas: le repugna pensar que los aparatos del laboratorio se entremetan en la sacrosanta relación sujeto-objeto que para él constituye el oculto manantial de toda la realidad. Reconoció que no era fácil explicar los motivos de su disidencia<sup>41</sup>, y era lógico, porque no correspondían al orden de la física, sino al de la metafísica; la ciencia era para él un espejo demasiado borroso para que en él pudiera llegar a verse reflejado el sujeto último del conocer. «Lo que para mí sigue siendo dudoso es si es adecuado emplear la palabra "sujeto" para uno de los dos sistemas de interacción física. *Como la mente del observador no es un sistema físico, no puede interactuar con ningún sistema físico*. Por lo que sería mejor reservar la palabra "sujeto" para la mente que observa»<sup>42</sup>.

En definitiva, para Schrödinger la teoría cuántica poseía mucha menos relevancia filosófica que la otorgada por Bohr y Heisenberg. Quería reservar la forma superior de conocimiento para sus místicas vivencias de la unicidad de la mente, por lo que ninguna teoría científica, ni siquiera la mecánica cuántica, sería apta para arañar los límites veritativos de la relación que vincula a los conceptos del sujeto con la manifestación sensible del objeto. Si se cree injustificada la utilización de la palabra «mística» en este contexto, debe recordarse que en los libros de Schrödinger menudean frases de este jaez: «En la contemplación de esta verdad la tesis panteísta de la unidad de la conciencia y su identificación

<sup>41</sup> Cfr. Ciencia y humanismo, p. 65.

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> Ciencia y humanismo, p. 67.

con Dios] (raramente consciente para el individuo que actúa) se encuentra la base de cada acción ética y valiosa»<sup>43</sup>. El problema radica en que el tipo de sujeto que de alguna manera asomaba en las consideraciones epistemológicas de Heisenberg y compañía no era el sujeto único, divino y más allá del tiempo y del espacio en el que Schrödinger creía. Esta creencia era la raíz de su *optimismo*, optimismo que le llevó a esperar contra toda esperanza el reencuentro de la teoría en que había intervenido tan decisivamente con una representación nítida de la realidad<sup>44</sup>, realidad que en coherencia con sus principios interpretaba en clave *idealista*. De ahí su insistencia en la pérdida de individualidad de los corpúsculos, cuya realidad negaba, frente a la opinión de Einstein y de Broglie<sup>45</sup>. La idea era disolver su identidad en la formalidad constitutiva de las ondas, entidades vacías de materialidad desde que Michelson desacreditó la noción de éter electromagnético:

podemos suponer que quizás sean formaciones más o menos pasajeras del interior del campo de ondas, pero cuya figura y multiplicidad estructural —en el sentido más general de la palabra— vuelven siempre en la misma forma, tan claramente determinadas por las leyes de las ondas que muchas cosas ocurren como si se tratara de seres duraderos y sustanciales. Hay que contar con la masa y la carga de la partícula, tan exactamente

<sup>43</sup> Mi concepción del mundo, p. 39.

41

<sup>&</sup>lt;sup>44</sup> Cfr. *Nuestro concepto de la materia*, p. 139, texto citado con anterioridad.

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> Cfr. Franco Selleri, El debate de la teoría cuántica, Madrid, Alianza, 1986, p. 92.

determinables entre los elementos de forma establecidos por las leyes de las ondas $^{46}$ .

Concluyamos. El indudable bagaje informativo y la no menos cierta preocupación intelectual que caracterizó a Schrödinger durante toda su vida condicionó en buena medida su valoración de la trascendencia ontológica y epistemológica de la mecánica cuántica. Es muy probable que la necesidad de no comprometer convicciones a las que había llegado por otras vías empañase la imparcialidad de su enfoque, aunque no cabe duda de que su profundo conocimiento de la cuestión y la sinceridad de su empeño le impidieron caer en falacias y confusiones triviales. Las reflexiones que formuló constituyen materiales que no pueden ser soslayados en cualquier discusión seria sobre la relevancia filosófica de una teoría que dio sus primeros pasos ahora hace cien años.

## II. Escritos contenidos en la presente edición

¿Por qué son tan pequeños los átomos?<sup>47</sup> es un pequeño escrito que contiene el resumen de una conferencia pronunciada el 8 de Febrero de 1933 en la Academia Prusiana de Ciencias en Berlín. Resulta interesante porque contiene un primer esbozo de la idea central desarrollada diez años después en el más popular libro de Schrödinger, ¿Qué es la vida? La restauración parcial, pero muy relevante, del determinismo por parte de la mecánica cuántica (sin perjuicio del indeterminismo esencial que introduce en un plano

<sup>&</sup>lt;sup>46</sup> Nuestro concepto de la materia, p. 163.

<sup>&</sup>lt;sup>47</sup> «Warum sind die Atome so klein?», Forschungen und Fortschritte, 9 (1933), pp. 125-126.

más fundamental) es abordada de un modo directo, sintético y brillante, revelando las mejores aptitudes del autor, tanto en lo que se refiere a la originalidad de pensamiento como a la fuerza de convicción y capacidad argumentativa.

Algunas observaciones sobre las bases del conocimiento científico48 corresponde al texto de un artículo publicado en 1935 en una lengua francesa. En él se revista de abordan cuestiones intimamente relacionadas con las preocupaciones metafísicas del físico austríaco y que a la vez están en los confines del conocimiento científico. La desestimación del *solipsismo* constituye un tópico muy frecuentado en las discusiones filosóficas y resulta fácil compartirla, pero es muy dificil fundamentarla con rigor. Schrödinger muestra que también constituye un recurso implícito de la argumentación científica, y ello le da oportunidad para acercarse a su más íntima convicción: el panteísmo idealista, del que, sin embargo se abstiene de hacer profesión de fe explícita. De todas formas, el hecho de que la ciencia propiamente dicha opere con un solo sujeto (el que está detrás de las teorías) y excluya cualquier elemento subjetivo de sus consideraciones objetivas —a pesar de su innegable presencia casa bastante bien con la tesis schrödingeriana de que «todos» los sujetos son en realidad «un único» sujeto.

La nueva mecánica ondulatoria<sup>49</sup> constituye el testimonio más relevante de la relación de Schrödinger con España. Invitado por la Universidad Internacional de Verano en Santander, impartió en

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> «Quelques remarques au sujet des bases de la connaissance scientifique», *Scientia, Revue internationale de synthèse scientifique* 57 (1935), pp. 181-191.

<sup>&</sup>lt;sup>49</sup> La nueva mecánica ondulatoria, traducción de X. Zubiri, Signo, Madrid, 1935.

1934 un curso sobre los recientes descubrimientos de la física sobre el que se ha dicho lo siguiente:

Las conferencias de Schrödinger tenían la intención de explicar las ideas fundamentales de la mecánica ondulatoria a un público no matemático pero algo filosófico. Están redactadas con un estilo desacostumbradamente informal y casi se puede escuchar al autor explicando las cuestiones más profundas con un encanto y lucidez que ningún otro físico hubiera podido igualar. Sus conferencias sobre la representación vectorial de las funciones de ondas (en el espacio de Hilbert) y sobre la equivalencia de la mecánica ondulatoria y matricial son obras maestras<sup>50</sup>.

De los textos de tales lecciones sólo se ha conservado la versión española de Xavier Zubiri<sup>51</sup> que reproduce la presente edición. Zubiri había estudiado en Berlín durante el curso 1930-1931, donde frecuentó entre otros a Einstein, Schrödinger y Planck<sup>52</sup>. Es muy probable que el filósofo español fuera responsable directo de la invitación, puesto que «ha sido un pilar importante de esa Universidad. No sólo pudo sugerir nombres acertados de grandes profesores, sino que además, como eran amigos suyos, animó a muchos a que vinieran —y alguno vino por encontrarse con él para dialogar—»<sup>53</sup>. El texto fue publicado en 1935 como primer número de la serie que recogía los Cursos de Santander.

<sup>&</sup>lt;sup>50</sup> Moore, Erwin Schrödinger, p. 272.

<sup>&</sup>lt;sup>51</sup> Que como tal figura en el cuarto volumen de la edición *Erwin Schrödinger Gesammelte Abhandlungen*, V. O. A. W., Wien, 1984, pp. 502-586.

<sup>&</sup>lt;sup>52</sup> Cfr. Carmen Castro de Zubiri, *Biografia de Xavier Zubiri*, Edinford, Málaga, 1992, p. 89.

<sup>&</sup>lt;sup>53</sup> Ibid. p. 93.

En el transcurso de esta primera visita, Schrödinger conoció y trabó amistad con el físico español Blas Cabrera y otros científicos del país<sup>54</sup>. Además quedó encantado con España, recorriéndola detenidamente durante el año siguiente. Se hicieron gestiones para ofrecerle una cátedra en la Universidad central, que contaron con su anuencia, aunque por desgracia el estallido de la guerra civil frustró tales expectativas. Schrödinger poseía un dominio más que pasable de la lengua castellana y conservó la suficiente fascinación por el mundo hispánico como para inquirir al también exiliado Cabrera sobre la posibilidad de instalarse en Sudamérica:

Pienso formalmente en América del Sud, quiero decir en los países donde se habla castellano. He pensado si, añadiendo nuestros dos nombres bien conocidos en el mundo (por lo menos en el mundo de la física), nos ofreciésemos a trasplantar la física europea a un sitio apartado, en Perú, por ejemplo, trayendo con nosotros algunos discípulos, —¿cree Vd. que se podría obtener condiciones posibles y al fin adquirir una nueva patria?<sup>55</sup>

La estructura del universo en relación con la estructura corpuscular<sup>56</sup> es el cuarto escrito incluido en la selección de trabajos de Schrödinger que se ofrecen a continuación. Fue publicado en 1941 por una revista francesa e ilustra la vertiente más especulativa de su pensamiento: la comparación de lo más grande y lo más pequeño, la búsqueda de claves perdidas para interpretar la

<sup>&</sup>lt;sup>54</sup> Cfr. José Manuel Sánchez Ron, Cincel, martillo y piedra, Taurus, Madrid, 1999, p. 315.

<sup>&</sup>lt;sup>55</sup> Carta de Schrödinger a Blas Cabrera del 24 de Febrero de 1939, recogida en Sánchez Ron, *Cincel, martillo...*, p. 318.

<sup>&</sup>lt;sup>56</sup> «La structure de l'Univers en relation avec la structure corpusculaire», *Bulletin de la Société Philomathique de Paris*, 123 (1941), pp. 26-30.

naturaleza, la mística de los números y de las relaciones formales, son aspectos tratados con brillantez y que dan pie a la propuesta de ideas que, si no siempre correctas, nunca están ayunas de genialidad y sí plenas de sugerencias. Creo que ayudará a completar una caracterización del estilo intelectual y las motivaciones de este hombre, uno de las más brillantes figuras de la ciencia de todos los tiempos.

### Reconocimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a un año sabático concedido por la Universidad de Sevilla, una ayuda para estancia de investigadores españoles en centros de investigación extranjeros del Ministerio de Educación y Cultura, y una beca de la Alexander von Humboldt Stiftug (Bonn/Bad Godesberg). He podido usar diversas instalaciones puestas a mi disposición por la Universität Berlin. e1 Internationales Technische. der Wissenschaft Berlin la Begegnungszentrum Neue Staatsbibliothek Berlin. Los profesores Andrés Rivadulla y Carmen Mataix me ofrecieron la oportunidad de presentar parte del estudio introductorio en la Universidad Complutense de Madrid. Del profesor Jacobo Muñoz proviene la idea de publicar la presente edición. El profesor Thomas Gil fue mi anfitrión en Berlín. La profesora María Caballero ha efectuado una revisión de todo el manuscrito.

Juan Arana

#### **Bibliografía**

- ARANA, J.; «Erwin Schrödinger, filósofo de la biología», en: ARANA, J. (ed.); Los filósofos y la biología, Thémata, Sevilla, vol. 20, 1998, pp. 159-174.
- BITBOL, M.; Schrödinger's Philosophy of Quantum Mechanics, Kluwer, Dordrecht, 1996.
- Dokumente, Materialen und Bilder zur 100 Wiederkehr des Geburstages von Erwin Schrödinger, Wien, Fassbaender, 1987.
- GÖTSCHL, J. (Ed.); Erwin Schrödinger's World View, Kluwer, Dordrecht, 1992.
- HOFFMANN, D.; Erwin Schrödinger, Teubner, Leipzig, 1984.
- MOORE, W.; Erwin Schrödinger: una vida, C. U. P., Cambridge, 1996.
- SÁNCHEZ RON, J. M.; «A man of many world: Schrödinger and Spain», en BITBOL, M. Y DARRIGOL, O., eds., *Erwin Schrödinger. Philosophy and the Bird of Quantum Mechanics*, E. Frontières, Paris, 1992, pp. 9-22.
- SCHRÖDINGER, E.; *La mente y la materia*, Taurus, Madrid, 1958.
- SCHRÖDINGER, E.; *La naturaleza y los griegos*, Aguilar, Madrid, 1961.
- SCHRÖDINGER, E.; ¿Qué es una ley de la naturaleza?, F. C. E., México, 1975.
- SCHRÖDINGER, E.; Erwin Schrödinger Gesammelte Abhandlungen, V. O. A. W., Wien, 1984, 4 vols.

- SCHRÖDINGER, E.; ¿Qué es la vida? El aspecto físico de la célula viva, Orbis, Barcelona, 1986.
- SCHRÖDINGER, E.; Mi concepción del mundo. Seguido de Mi vida, Tusquets, Barcelona, 1988.
- SCHRÖDINGER, E.; *Ciencia y humanismo*, Tusquets, Barcelona, 1998.
- SCOTT, W. T.; Erwin Schrödinger: An introduction to his writings, Univ. Mass. Press, Amherst, 1967.

# Cronología

1887	Nace Erwin Schrödinger el 12 de agosto en
	Viena.
1898-1906	Estudios de enseñanza secundaria en Viena.
1906-1910	Comienza los estudios universitarios en la
	Universidad de Viena. Franz Exner y Fritz
	Hasenöhrl fueron sus profesores de física;
	Wilhelm Wirtinger el de matemáticas.
1910	El 20 de mayo se doctora en física.
1910-1911	Servicio militar como voluntario en artillería.
1911-1920	Ayudante de Exner en el Instituto de Física de
	la Universidad de Viena.
1914	Se habilita para la enseñanza universitaria el 9
	de enero.
1914-1918	Participa en la I Guerra mundial como oficial
	de artillería.
1916	Estudia los trabajos de Einstein sobre la teoría
	general de la relatividad.
1918	Pierde la oportunidad de ser designado profesor
	de la Universidad de Czernowitz por la caída
	del Imperio austro-húngaro.
1919	Muere su padre el 24 de diciembre en Viena.
1920	Matrimonio con Annemarie Bertel el 24 de
	Matrimonio con Annemarie Derter et 24 de
	marzo. Nombramiento para una plaza de

Jena.

1920-1921	Profesor en Stuttgart.
1921	Profesor en Breslau.
1921-1927	Catedrático de física teórica en la Universidad
	de Zürich.
1922	Afectado por una enfermedad pulmonar, se
	repone en el sanatorio de Arosa.
1926	Aparecen sus trabajos fundamentales sobre la
	mecánica ondulatoria que contienen la famosa
	«ecuación de Schrödinger».
1927-1933	Nombramiento como sucesor de Max Planck en
	la cátedra de física teórica de la Universidad de
	Berlín.
1929	Ingreso en la Academia de Ciencias de Berlín.
1933	Exilio voluntario: profesor en el Magdalen
	College en Oxford. Concesión del premio Nobel
	de física junto a P. A. M. Dirac.
1934-1935	Viajes por España, donde imparte cursos y
	conferencias y realiza amplios circuitos
	turísticos.
1936	Regreso a Austria como catedrático de física en
	la Universidad de Graz.
1938	Tras la anexión de Austria a Alemania,
	expulsión de la universidad y fuga al
	extranjero.
1938-1939	Estancias en Italia, Suiza, Inglaterra y Bélgica.

1939	Asume la dirección del «Instituto de Estudios
	Avanzados» de Dublín.
1940-1956	Actividad investigadora en Irlanda.
1944	Publicación del libro ¿Qué es la vida?
1949	Aparición de sus <i>Poesías</i> .
1950-1951	Profesor visitante en la Universidad de
	Innsbruck.
1954	Aparición de La naturaleza y los griegos.
1956	Vuelta a Austria con una cátedra en la
	Universidad de Viena.
1957	Su actividad académica disminuye a causa de
	su delicado estado de salud.
1958	Jubilación. Traslado a Alpbach en Tirol.
1960	Redacta Mi concepción del mundo.
1961	Muere en Viena el 4 de Enero. Es enterrado en
	Alpbach.

# I. ¿Por qué son tan pequeños los átomos? (1933)

#### Traducción de Juan Arana

Cuando decimos que algo es grande o pequeño, ello tiene siempre sólo un significado relativo: grande o pequeño en comparación con alguna otra cosa. Los átomos son extraordinariamente pequeños en comparación con nuestros cuerpos, o, dicho en general, con las dimensiones de los organismos, que todos ellos se componen de una cantidad inimaginable de átomos, sobre todo los altamente organizados, que son capaces de complicadas prestaciones —como, por ejemplo, de reflexionar sobre los átomos—. La pregunta precedente no puede ser contestada en ningún otro sentido que buscando las razones por las que un organismo que funciona de un modo muy sensible y altamente diferenciado y reacciona con el entorno, tiene necesariamente que componerse de un número tan extraordinariamente grande de átomos. Para el físico es manifiesto que la razón es que los procesos físicos y químicos en los que se basa el funcionamiento de los organismos, descansan en leyes estadísticas, que sólo se cumplen con gran precisión cuando el número de átomos «intervinientes» en ellos es extraordinariamente grande. De lo contrario se observan las llamadas oscilaciones termodinámicas, de las que en todo caso tienen que ser sustraídas las funciones vitales de los organismos -más o menos como una compañía de seguros se protege mejor ante las contingencias si divide su negocio en muchos riesgos aislados pequeños, en lugar de pocos grandes—.

Se ha examinado esta situación desde el punto de vista físico e intentado aplicarla a los casos concretos: sorprende entonces ante todo el hecho, comprobado por la moderna investigación genética y celular, de que zonas relativamente minúsculas del núcleo celular («gen») son capaces de transmitir determinadas propiedades hereditarias de un modo reglado extraordinariamente preciso durante miles de millones de divisiones celulares y durante muchas generaciones, sin que las oscilaciones termodinámicas perturben el proceso, que sin embargo se completa en relativamente (!) «pocos» átomos. Una reflexión más precisa encuentra la explicación de ello en que estos grupos de átomos se asocian en (altamente complicadas) agrupaciones moleculares, y hasta cierto punto están aseguradas contra perturbaciones por las leyes cuánticas de transmisión de energía, descubiertas por Max Planck hace una generación. Las mismas leyes cuánticas, que últimamente han producido fuertes dudas sobre si la conducta del átomo aislado está rigurosamente determinada causalmente, ofrecen por otro lado el único fundamento para la comprensión de las regularidades inauditamente precisas que se muestran «a gran escala» no sólo al físico, sino también al biólogo con creciente claridad.

# II. Algunas observaciones sobre las bases del conocimiento científico (1935)

Traducción de Juan Arana

Es admitido universalmente que las llamadas ciencias exactas, tales como la química, la física o la astronomía, persiguen un fin que consiste en darnos la posesión de las verdades más ciertas y objetivas en cierto género de conocimiento, y en particular el conocimiento relativo al comportamiento de la materia en el tiempo y el espacio, tal como lo percibimos con los órganos de los sentidos. Además, se admite universalmente que la ciencia nos procura realmente esta verdad objetiva, con excepción quizá de algunas proposiciones suyas; sin embargo, abstracción hecha de algunos aspectos más o menos hipotéticos que todavía no han sido confirmados, se admite que todas las afirmaciones de la ciencia, relativas al comportamiento real de la materia —lo que generalmente se llama las leyes de la naturaleza— poseen realmente este carácter objetivo. Son producto de experiencias que pueden ser controladas cuando se quiera, es decir, proposiciones que pueden ser confirmadas por nuevas experiencias. Sólo reposan sobre nuestra experiencia exacta y precisa. Tal es la interpretación dominante.

Voy a insistir en el hecho de que en principio eso no es verdad. Las ciencias de la naturaleza no reposan únicamente en la experiencia, sino también en cierta hipótesis fundamental, hipótesis muy, muy, muy evidente, y que acepta cualquiera de nosotros, todo hombre dotado de sentido. Sin embargo, no puede ser verificada por el método científico exacto. Si esta hipótesis nos parece tan evidente, es por razones distintas de las científicas, por razones cuya fuente se encuentra más allá de la ciencia exacta. Es completamente

imposible someterla al control empírico, se puede incluso decir que cualquier experiencia concebible a este respecto está condenada al fracaso, es decir, a probar, si fuera posible, lo contrario. La ciencia no se basta por tanto a sí misma, tiene necesidad de un axioma fundamental, un axioma básico procedente de fuera. Ésta es, a mi juicio, una situación interesante y que merece atención desde el punto de vista epistemológico, y eso a pesar de nuestra convicción inquebrantable de que el axioma en cuestión está fuera de toda duda.

Podría muy bien indicar sin tardanza lo que tengo en mente. Pero el ejemplo de autores más expertos que yo que han escrito sobre temas filosóficos, me ha enseñado que es bueno guardar para sí la mayor cantidad de tiempo posible la idea principal, a fin de retardar el momento en que el lector tome por fin la resolución de no dejarse aburrir con trivialidades. Muy pronto se verá que tengo razón al temer una actitud así en el caso presente.

Más arriba he dicho que toda «ley natural» en física o en química, convenientemente establecida, que consideramos poseedora de un alcance universal, puede ser sometida a una nueva prueba en cualquier momento, si alguien pone en duda su validez. Así, una verdad científica difiere de una verdad histórica, por ejemplo, en que ésta, si reposa siempre en testimonios o tradiciones, incluso auténticas y ciertas, no puede ser verificada a voluntad, sino solamente confirmada, cuando un feliz azar aporta otro testimonio en favor de los hechos ya conocidos. La diferencia existente, desde el punto de vista de las bases del conocimiento, entre las ciencias de

la naturaleza y las llamadas ciencias morales, es universalmente reconocida y bastante importante. Pero importa igualmente no perder de vista el hecho de que, en la práctica, la distinción es menos marcada que lo que generalmente creen científicos y no científicos. No hay duda de que un físico hábil, en posesión de un laboratorio y suficiente dinero, estaría en condiciones de verificar todas las leyes naturales con la ayuda de nuevas experiencias. Al decir, en efecto, que cree en una ley, no expresa más que la convicción de que podría, si quisiera, someterla a un nuevo control. Pero lo hace muy raramente: a decir verdad no lo hace nunca, salvo cuando organiza experimentos para hacer demostraciones a sus alumnos (aunque se trata de un dominio muy restringido y los experimentos de este tipo no son suficientemente precisos para dar resultados ciertos) y salvo, claro está, los casos en que ha surgido alguna duda a propósito de la validez de una ley. Hay varias razones para esta actitud. En primer lugar, es mucho más placentero aumentar el conocimiento científico coetáneo que verificar la parte del conocimiento que se considera sólidamente establecida. Además, habría que ser a la vez un Matusalén y un Nabab para verificar todo lo que se sabe sobre la naturaleza. No siendo uno ni otro, nuestro físico se ve obligado a renunciar a la satisfacción (por atractiva que sea) de hacer reposar sobre su experiencia personal la totalidad del conocimiento exacto que forma su imagen científica del mundo. Prefiere consagrar su tiempo a completar y mejorar este conocimiento. Durante sus trabajos consulta constantemente la biblioteca, lee revistas, asiste a congresos científicos, etc., igual que

un arqueólogo o historiador que obtiene su conocimiento en los libros, documentos o examinando antiguos monumentos o inscripciones.

Incluso en el caso de un experimentador (¡por no hablar del teórico, ni que decir tiene!) la mayor parte de lo que sabe y utiliza en sus trabajos de investigación deriva no de su propia experiencia, sino de observaciones hechas por otros, de los que algunos viven aún, mientras que otros llevan mucho tiempo muertos. Considerado desde el punto de vista individual, el origen real del conocimiento científico es en una proporción de 99,9... % el mismo que el de nuestros conocimientos literarios o históricos, lo que quiere decir que está representado por documentos orales o escritos que otros nos han transmitido y que aceptamos confiadamente. Esto es evidente. Los científicos a menudo se felicitan sacando a la luz la bella armonía y coherencia de la naturaleza lo que, hablando con rigor, es una armonía entre la totalidad de los datos experimentales y las imágenes mentales que poseemos. Convengo gustosamente en ello, a pesar de la espantosa falta de armonía que (provisionalmente, espero) perturba la fisica moderna. Pero me parece importante no perder de vista el hecho siguiente: aunque el admirable edificio del pensamiento científico reposa enteramente sobre experiencias que en principio cualquiera es capaz de reproducir, el objeto del admirable encadenamiento no ha existido nunca ni existirá jamás en la forma de dato experimental real en la mente de un solo hombre: este objeto representa más bien una especie de mosaico cuyas teselas están diseminadas en las mentes de miles y miles de

investigadores, cada uno de los cuales debe fiarse para la mayor parte del «mosaico» de lo que los otros le dicen o le escriben o han escrito hace años.

Aquí rozamos el punto al que había aludido al comienzo, cuando hablé de un axioma fundamental de la ciencia que, sin embargo, no cabe probar con los métodos exactos de la propia ciencia.

Supongamos que saco de mi biblioteca un número de revista y que encuentro un artículo titulado: «La desintegración del nitrógeno», por E. Rutherford. Comienzo a leerlo y a reflexionar, porque me intereso en los resultados de las experiencias de Rutherford que conciernen a algunas investigaciones mías.

Ahora bien, ¿qué es lo que realmente tengo en la mano? Desde el punto de vista de la ciencia pura, nada más que algunas hojas de papel manchadas de forma extraña con tinta de imprenta, manchas negras que forman verdaderos «adornos». Algunos de estos adornos bastan para convencerme de que los otros, poseen un significado bien definido, habiendo relatado Lord Rutherford por medio de ellos algunas observaciones que ha hecho realmente. Algunos de los adornos siguientes despiertan en mi mente la imagen de un aparato que se compone de un vaso conteniendo gas, un disco metálico que ha sido expuesto a la emanación del radio antes del comienzo de la experiencia, un microscopio, etc. Los signos negros sobre el papel me hacen creer que todos esos objetos han existido realmente, que han sido realmente manipulados de una manera determinada, bajo el control de un hombre vivo que finalmente ha experimentado cierto número de percepciones sensibles, en relación con todos los

dispositivos y manipulaciones que se describen en el artículo. Lo que me interesa en este caso, son *esas percepciones sensibles*, y las utilizo como si yo mismo hubiese dispuesto todo ese dispositivo, como si yo mismo hubiese hecho y registrado todas las observaciones.

Estoy seguro de que nadie, salvo quizás un barullero, me reprochará proceder así, y no hace falta decir que considero que estoy por completo en mi derecho. Pero la base de mis conclusiones está más allá de la evidencia científica. Si un imbécil o un malvado, por el insano placer de ponerme en apuros, cuestionara mis inferencias, no podría contradecirle de la manera usual en la ciencia, es decir, ¡no podría refutarlo con una experiencia crucial! Consideremos provisionalmente demostradas todas las conclusiones intermedias: las manchas negras sobre el papel significan sonidos, los sonidos reunidos forman palabras que tienen para mí el significado y me procuran la convicción de que un vaso conteniendo gas, ese disco metálico, ese microscopio, etc., realmente existen. En fin, a la descripción del aparato sigue la exposición de observaciones, y con ayuda de palabras y figuras que significan una serie definida de percepciones sensibles, percepciones sensibles de otro ser humano. (No quiero decir con eso que la primera parte del artículo, la que contiene la descripción del aparato, significa otra cosa diferente, pero en la segunda parte ese hecho es quizá más evidente). Ahora bien, las percepciones sensibles de otro ser humano es algo que jamás he experimentado yo mismo. No dudo sin embargo en interpretarlas evocando el recuerdo de lo que llamo mis propias percepciones *semejantes*.

Hay aquí incontestablemente una laguna. ¿Se ha oído nunca decir a un hombre en sus cabales que dos objetos son iguales o semejantes, cuando no conoce más que un solo de esos objetos? ¿Qué son las percepciones sensibles de otros hombres? ¿Cómo sé siquiera que tiene percepciones sensibles? ¿Cómo sé que es en general capaz de sentir y de pensar cualquier cosa? ¿Quién me dice que no es un autómata? Sin duda lo sé, pero ¿dónde está la fuente de este conocimiento? ¡Intentad pues someter todo eso a una prueba científica por los métodos ordinarios! Todas las experiencias que se puedan imaginar hablan más bien en favor de un automatismo. Admito de entrada, por ejemplo, que cuando se le pellizca un dedo experimenta el mismo dolor que yo cuando me he pellizcado un dedo yo mismo. Sometamos esta anticipación a una prueba experimental con los métodos ordinarios: tomo una pinza y le pellizco su dedo. Cosa extraña: ¡eso no causa dolor! El hombre lanzará quizá un grito, pero ¿no será esa la manera en que ese autómata reacciona al pellizco?

Esta suposición suena como una broma pesada, ¿no es así? Afortunadamente, lo es. La vida sería terrible si fuera realmente posible poner en duda la cuestión de saber si mis semejantes son unidades que sienten y piensan como yo mismo. Por lo que me concierne, no me gustaría vivir en un mundo en que pudiera dudar de que mi perro siente un poco como yo mismo. (Digamos de pasada que, en cuanto a los animales, el hecho ha sido seriamente negado

en una cierta época del desarrollo del conocimiento). Ahora bien, recordemos que ciertos filósofos han formulado la teoría llamada solipsismo; es cierto que no lo han hecho seriamente, como algo que creyeran realmente; pero juzgaron útil resaltar el hecho extraño de que este punto de vista filosófico, el más *inaceptable* de todos, ¡es el único que no puede ser refutado por la experimentación científica exacta!

Para ser breve, designaré la hipótesis que se *opone* al solipsismo con la letra P («personalidad» de las criaturas que me rodean). Y, si me lo permitís, añadiré todavía a este propósito algunas observaciones suplementarias.

Creo haber mostrado claramente que no dudo de la afirmación de P y que no pido que lo haga ninguna persona en sus cabales. Pero entonces, ¿por qué tanto ruido por tan poca cosa? Si estoy absolutamente seguro de que una hipótesis es correcta, puedo edificar tranquilamente en este terreno, sin preocuparme de las razones de mi certidumbre, se me dirá. Perfectamente, convengo. Tampoco pienso que la ciencia tenga que lamentar el hecho de que uno de sus principales pilares repose en un terreno no científico. Porque así la ciencia se apega más estrechamente a otros pensamientos y fines del hombre, que si solo existiera para y por ella misma. No por ello me parece menos importante insistir en el hecho de que esta proposición P sobrepasa netamente los límites de la ciencia. Procuraré resaltar la importancia de ello con algunos ejemplos.

Si no tenéis en cuenta el origen no científico de la proposición P, podéis estar tentados a usarla en el curso de una cadena de conclusiones científicas, lo que sería un *profundo* error.

Volvamos a la pequeña «experiencia» de la que he hablado más arriba y que consistía en pellizcar con una pinza el dedo de mi vecino, a fin de ver si eso causaba dolor. No causa dolor, pero mi vecino grita. Me diréis: es absurdo, porque si grita, es porque le duele. Tenéis toda la razón, si uno se sitúa en el punto de vista de la hipótesis P. Suponed ahora que un fisiólogo hace realmente una experiencia de este género. Si se le pregunta entonces por qué grita el hombre, ¿creéis que un fisiólogo (en tanto que fisiólogo) convendrá en responder que el hombre grita porque siente un dolor? Ciertamente que no, porque al responder así, cerrará los ojos al verdadero problema científico. Esperaréis o desearéis al menos que os explique el fenómeno de la conducción nerviosa hacia el cerebro, luego la complicadísima reacción que se produce entre los diferentes centros del cerebro, a continuación la propagación a lo largo de los nervios hasta los músculos que actúan sobre la boca, la lengua, la laringe y que, en este caso particular, provocan el grito como una respuesta necesaria al pellizco. No permitiréis, al menos si compartís mi manera de ver, que el fisiólogo facilite su explicación, en no importa qué fase del proceso nervioso, intercalando una frase como la siguiente: y bien, el proceso de conducción nerviosa alcanza tal parte del cerebro, evocando allí un dolor y, como consecuencia de este dolor, se excita tal o cual proceso

nervioso, etc. ¡No permitiréis (y eso es lo que pensaréis) que se burlen de vosotros!

De hecho, esperáis que el fisiólogo trate el cuerpo vivo como un autómata, aunque sepáis perfectamente que no es un autómata. Esperáis que se dedique a comprender todo lo que pasa, manteniéndose exclusivamente en el terreno científico, es decir, sin prestar la menor atención a la hipótesis P.

Los científicos no siempre han estado de acuerdo con este punto de vista. La fisiología y la biología siempre corren, en efecto, el peligro de reintroducir clandestinamente en la explicación nuestra hipótesis P, bajo una forma más o menos disfrazada, tal como el vitalismo, la entelequia o qué se yo qué. La necesidad de evitar este peligro me parece suficiente para justificar el recuerdo reiterado del carácter no científico de la hipótesis P, lo que prohíbe usarla en el tratamiento mismo de un problema científico, *a pesar*, y quizá a causa del hecho de que la ciencia en su conjunto reposa sobre esta hipótesis.

Mi otro ejemplo tendrá como objetivo dar una fuerte impresión de la verdadera inaccesibilidad de las percepciones y sentimientos del otro. Se trata de la *visión de los colores*.

¿Alguno de vosotros se ha planteado alguna vez esta extraña cuestión: quisiera saber si todo el mundo ve el rojo de la misma manera? ¿La sensación real que todos experimentan es la misma? Inútil preguntar a un hombre cómo ve el rojo. No sabría explicarlo. El hecho de que dos personas llamen *roja* la sangre o cierta flor o cierto vestido, no prueba la identidad de sus sensaciones. Solamente prueba que las dos personas hablan español: si una de

las personas hablara italiano diría «rosso», lo que no querría decir que su sensación fuera diferente de la de un inglés que llame a su sensación «red».

El nombre, que sólo se adquiere por el uso, no significa nada, por consiguiente. Esto es lo que hace tan dificil descubrir la ceguera para los colores en la vida cotidiana. El verdadero defecto de la mayor parte de los daltonianos consiste en que no ven entre el rojo y el verde más que una diferencia de claridad y saturación, pero no de tonalidad, que para ellos es la misma. Sólo podréis descubrir esta ceguera mostrando a un daltoniano un traje escarlata y preguntándole: ¿cuál es su color?, porque os responderá siempre: es rojo. Y dirá de la hierba y las hojas, como vosotros, que son verdes. Ha aprendido a prestar atención a la diferencia de brillo y saturación, diferencia que es muy marcada para él. Pero descubriréis su ceguera constatando, por ejemplo, la dificultad que experimenta para recolectar fresas, porque, después de todo, está tarado por la ausencia de percepción para las diferencias de tonalidad.

Me han contado un hecho bastante significativo acerca de Wilhelm Röntgen, al que debemos el descubrimiento de los rayos X y cuyas cualidades de observación pueden ser consideradas muy por encima de la media. Era daltoniano, de lo que no se dio cuenta hasta el día en que, transformado en ayudante tras varios años de estudios de física, fue recriminado por su jefe, porque mezclaba constantemente las tapas y los fondos de las cajetillas que servían de receptáculos a

toda clase de pequeños objetos y que estaban pintadas con colores pálidos: rojo, azul, verde, etc.

El caso de los daltonianos muestra que la cuestión: ¿cómo ve otra persona el rojo o el verde?, es sutilmente significativa. Puesto que un daltoniano ve el rojo y el verde como colores idénticos o, más exactamente, como teniendo la misma tonalidad, es evidente que no puede ver los dos colores de la misma manera como los ve una persona que tenga la vista normal. Tengo que advertir que la expresión «la misma tonalidad» debe ser comprendida como inequívoca. Dad a un daltoniano un conjunto de veinte o treinta muestras diferentes de rojo y verde (lanas, papeles de color), comprendiendo todos los matices posibles de palidez y brillo; pedidle entonces que ordene las muestras en una sola serie, de suerte que se forme una escala en la que cada muestra esté colocada entre otras dos de la que se separe lo mínimo en una u otra dirección. Una persona que tenga la vista normal se negará a cumplir esta tarea, mientras que un daltoniano la cumplirá de forma que las muestras verdes y rojas serán interpuestas de una manera que parecerá azarosa, sobre todo en lo que concierne a las muestras débilmente coloreadas: así, un rojo brillante, tirando a blanco, será colocado entre los verdes más obscuros y saturados. Pero para él el orden no es en absoluto azaroso, porque si le hacéis repetir la misma operación, reencontrará con pocas excepciones casi exactamente el mismo orden. Además, puede ocurrir que supervisando su operación os quedéis muy intrigados, sobre todo al final, cuando hace los últimos retoques. Examinando la ordenación que ha obtenido, experimenta la necesidad de cambiar de lugar dos muestras vecinas; hecho esto, las cambia de nuevo de lugar, dudando manifiestamente y no sabiendo exactamente qué orden debe adoptar finalmente. Y si le interrogáis al respecto, os responderá que esas dos muestras son casi idénticas, mientras que para vosotros una de ellas pueda presentarse como un rojo blanquecino y la otra como un verde ligeramente más saturado y considerablemente más obscuro.

De estas experiencias se puede concluir, sin riesgo de equivocarse (¡aunque no sin hacer uso de la hipótesis P!) que vuestro hombre ve el verde y el rojo como si fuesen colores *idénticos*. Pero ¿ve *uno y otro* como vosotros veis el rojo, o ve *uno y otro* como vosotros veis el verde?

Aquí estamos en presencia de un problema que la ciencia apenas ha conseguido resolver, consistiendo el obstáculo precisamente en que la hipótesis P se encuentra más allá de sus límites o, en otros términos, en que las percepciones del otro son realmente inaccesibles. ¿No es extraño que dos hombres estén en condiciones de intercambiar sus ideas sobre filosofía, religión, política... sobre los temas más alejados y sublimes, que sean capaces (o que al menos se crean capaces) de constatar su perfecto acuerdo o desacuerdo en cuestiones muy abstractas y difíciles, pero que sean completamente incapaces de constatar su acuerdo o desacuerdo a propósito de sensaciones simples, como las de rojo y verde?

La cuestión ha sido solucionada tan solo gracias a un caso extremadamente interesante y excepcional, caso que, según mi

conocimiento, es único y, por esta razón, casi se ha convertido para nosotros en una leyenda. Casi adivináis de qué se trata. Puesto que el límite de la personalidad no puede ser franqueado en ningún caso, las dos sensaciones, la del hombre normal y la del daltoniano, deben estar presentes en la misma mente, es decir, en el mismo individuo, sin lo cual sería imposible compararlas. Ahora bien, se ha observado el caso de un joven uno de cuyos ojos tenía una visión normal, mientras que el otro era daltoniano de la manera más arriba indicada. Y bien, este joven decía que veía con el último el rojo y el verde (y el amarillo) como veía el amarillo con el ojo normal. Si ha dicho la verdad, el problema puede considerarse resuelto. No había absolutamente ninguna posibilidad de controlar su aserción, y ¡estamos obligados a fiarnos de su sinceridad! (Notemos sin embargo que existe una especie de confirmación por el hecho siguiente. Las partes periféricas de la retina normal, que también son ciegas para los colores, presentan igualmente el rojo y el verde como siendo amarillo. He aquí una analogía notable con el caso precedente, pero no hay que decir que sería insuficiente para que se saque de ella una conclusión infalible).

Se sabe que un gas rarificado se vuelve luminoso cuando se hace pasar por él una descarga eléctrica, aplicando a sus extremidades un voltaje suficientemente elevado. Con ayuda del espectroscopio, la luz emitida puede ser descompuesta en lo que se llaman las líneas espectrales, que son características del gas en cuestión. Por ejemplo: en determinadas condiciones el hidrógeno emite una línea espectral roja, una verde, una azul y una violeta. No obstante, ésta

es una forma bastante precaria de formular una ley científica, puesto que el enunciado que hemos acabado de hacer no podría ser aceptado de la misma manera por todos los observadores. Para un observador daltoniano se trataría solamente de dos líneas amarillas y dos azules. Los físicos reemplazan este enunciado, diciendo que la luz contiene las longitudes de onda 0,656280, 0,486133, 0,434047, 0,410174 (milésimas de milímetro) en el campo visible y muchas, muchas otras que no pueden ser descubiertas más que con ayuda de la placa fotográfica, o de una termopila o de otros dispositivos. Ahí tenemos un ejemplo de la forma en que la ciencia trata de despojar sus proposiciones de los graves defectos derivados de que las mentes estén separadas unas de otras por fosas infranqueables. El método seguido consiste en reducir, en la medida de lo posible, las proposiciones cualitativas a proposiciones cuantitativas basadas únicamente en la concepción de números, o más especialmente de números enteros (1, 2, 3, 4, 5...), puesto que los números de todas clases se derivan de la noción de número entero, la más simple, la más neutra y quizá la más interesante de todas las que se ofrecen a la mente humana. Es cierto que en sus esfuerzos por borrar cualquier traza de su sujeción a lo que hemos llamado la «hipótesis P», la ciencia ha obtenido éxitos admirables. Lo que hemos querido mostrar aquí, es que no por ello dejamos de estar en presencia de un axioma básico que obstaculiza la verdadera independencia de la ciencia, puesto que este axioma no puede ser ni eliminado enteramente ni demostrado con los métodos de la ciencia misma.

# III. La nueva mecánica ondulatoria (1935)

Traducción de Xavier Zubiri

### § 1. La antigua teoría de los quanta: Planck, Rutherford, Bohr

Todos ustedes saben que la teoría de los quanta nació en vísperas del siglo XX.

Nació en diciembre de 1899, cuando Max Planck presentó a la Academia de Ciencias de Berlín su célebre memoria, en la cual había llegado definitivamente a la conclusión de que, siguiendo la línea de los principios de la Física admitidos hasta entonces, fracasaba el intento de explicar lo que se llama la ley de la radiación negra, es decir, la manera como la energía está distribuida entre las diferentes longitudes de onda, en la radiación del cuerpo negro. Para darse cuenta de ello era indispensable, se decía, admitir un principio completamente nuevo y sumamente extraño, a saber: que la materia no puede ni emitir ni absorber la radiación sino que continuamente, la radiación de una determinada, se emite y se absorbe en quantos hv solamente, donde h es la constante de Planck.

Partiendo de esta hipótesis, no se está, tal vez muy lejos de admitir que las unidades materiales que emiten la radiación —es decir, en muchos casos los átomos y las moléculas aisladas— no son capaces de poseer una energía cualquiera, sino que un átomo determinado, por ejemplo el átomo de hidrógeno o de carbono, o bien una molécula determinada, como H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>..., están restringidos a valores

discontinuos de su energía, que forman una serie de números absolutamente determinada, que caracteriza el átomo en cuestión. Esta serie se llama el esquema de los niveles, o bien el espectro de los niveles o de los términos de este átomo o molécula. Por lo demás, no es en modo alguno necesario que estos niveles sean equidistantes o que la serie sea una serie aritmética. Esto depende de la radiación que el átomo emite al pasar de un nivel al siguiente. Si la frecuencia es siempre la misma, como para el oscilador de Planck, hay que admitir niveles equidistantes; si no es así, no lo serán. Hablando en general, la ley puede ser cualquiera.

Es de todos conocido que fue Niels Bohr quien precisó y generalizó la hipótesis de Planck en la forma que acabo de exponer; admitiendo para los átomos el conocido modelo planetario de Rutherford, y sirviéndose de reglas muy extrañas, seleccionó entre las posibles órbitas una serie discontinua de órbitas, que Bohr llamaba estacionarias y que consideró como las únicas órbitas admisibles. De esta manera, según ustedes conocen, logró Bohr dar una explicación bastante concreta de los espectros discontinuos emitidos por los átomos y por las moléculas, y sobre todo explicar las líneas generales del sistema periódico de los elementos químicos. Se vio entonces que la constante de Planck, o más exactamente, su concepción, según la cual la energía de un sistema no puede cambiar más que en cantidades finitas y, por tanto, de una manera discontinua, como por un salto, se encuentra en la base de nuestra concepción de la naturaleza. Pero, sin embargo, la teoría de Bohr

tenía considerables puntos de insatisfacción. Voy a diseñarlos brevemente.

En primer lugar, aquellas extrañas reglas para seleccionar las órbitas estacionarias no eran aplicables en realidad más que a algunos sistemas simples, entre los cuales figuraba, por ejemplo, el átomo de hidrógeno, pero no el átomo de helio ni ninguno de los átomos más pesados. Es casi incomprensible cómo a pesar de ello pudo Bohr llegar a deducir de aquellas reglas la teoría del sistema periódico. Hay que atribuirlo a una adivinación o un fino presentimiento de las reglas precisas que suministró más tarde la mecánica cuántica.

Además, estas reglas incompletas y provisionales de que se servía, habían sido, a su vez, establecidas por adivinación: no se conocía cuál fuera su origen. La frecuencia de revolución en las órbitas estacionarias —por ejemplo del electrón en el átomo de hidrógeno—no tenía nada que ver con la frecuencia de la luz emitida a consecuencia de una transición súbita desde una órbita a otra, frecuencia determinada por la magnitud del quantum, es decir, por la diferencia de los niveles. Y esta transición, y por tanto el fenómeno mismo de emisión, permanecía envuelta en misterio. ¿Había que admitir que la transición se efectuaba súbitamente en el sentido literal de la palabra «sin emplear tiempo»?

Pero ¿cómo comprender entonces el desarrollo del tren de ondas de luz coherente que resulta del tránsito? Por otra parte, atribuyendo a la transición una duración comparable a la del tren de ondas luminosas, entonces los átomos radiantes se encontrarían

prácticamente en constante transición. Pero esto equivalía a confesar que a pesar de la penosa descripción que la teoría nos daba de los estados estacionarios, nos dejaba sin embargo en completa ignorancia acerca del estado en que el sistema se halla durante la mayor parte del tiempo, puesto que guardaba completo silencio por lo que se refiere a lo que acontece durante la transición. Hay una dificultad semejante a propósito de lo que se llama degeneración. Intentaré explicarlo por medio de un ejemplo muy conocido, pero del cual quiero hacer resaltar que se trata de un caso sumamente general. Gracias a la isotropía del espacio, la orientación de las órbitas estacionarias cuánticas de un sistema cualquiera queda indeterminada, por lo menos si el sistema es libre, es decir, sin fuerzas exteriores. Pero en cuanto se establece un campo exterior, por ejemplo un campo magnético homogéneo, por débil que sea, las condiciones cuánticas exigen que una órbita determinada, solamente pueda admitir un número limitado de orientaciones respecto del campo, perteneciendo las diferentes orientaciones a niveles de energía ligeramente diferentes, pero que coinciden en el límite donde el campo es cero. Es lo que se llama algunas veces «cuantificación en el espacio», y que sirve de base a la explicación del efecto Zeeman (cuando se trata de un campo magnético).

Imaginen ustedes ahora que se haga tender el campo hacia cero, de una manera continua, y que después comienzan ustedes a restablecerlo nuevamente, pero en otra dirección. Es casi incomprensible que el cambio de dirección del campo en el momento en que pasa por cero produzca una reorientación, puesto que el cambio de dirección podrá efectuarse por una variación del campo tan débil como se quiera. Pero he aquí lo que justamente exigen inapelablemente las condiciones de cuantificación. Podría añadirse que, aun hecha abstracción de un cambio de dirección, la orientación perfecta para un campo infinitamente débil, es una consecuencia sumamente extraña, puesto que debería hacerse sentir por una especie de anisotropía que aparecería y desaparecería bruscamente con el campo. Jamás se ha observado semejante cosa. En resumen, hay que confesar que, ateniéndose rigurosamente a las hipótesis de Planck y de Bohr y siguiéndolas en todo su rigor, nos vemos conducidos a consecuencias difíciles de reconciliar con las más primitivas nociones que desde hace tiempo hemos adquirido sobre los fenómenos naturales. Y además (y esto me parece igualmente grave) la teoría rehúsa responder a un número de cuestiones que sería justificado plantear, por lo menos según los principios dominantes en la física teórica hasta fines del último siglo. La teoría aparece evidentemente incompleta por no dar una descripción ni del estado del átomo durante la transición ni de la manera como la onda luminosa se desarrolla a consecuencia de la transición de un estado estacionario a otro. La teoría no da, según se ve, más que el balance de lo que acontece, ignorando los detalles. Parece que se ha exagerado evidentemente la discontinuidad admitiendo que el átomo puede tener solamente, o bien tal, o bien tal otra energía. Debe haber algo intermediario, deben existir estados intermediarios del átomo. Naturalmente, la hipótesis de la discontinuidad no es arbitraria. Una ojeada lanzada sobre un espectro de un gas cualquiera nos muestra de manera convincente, por el aspecto de las finas rayas espectrales separadas por intervalos oscuros, que debe existir algo muy discontinuo en la emisión de la luz. La hipótesis de Planck-Bohr da cuenta de la posición exacta de estas rayas, en muchos casos con una exactitud maravillosa. Pero es demasiado brusca, y se opone por ello a una descripción completa del fenómeno. El fundador Max Planck no desconocía estos defectos. Durante muchos años se esforzó en paliar su hipótesis de la discontinuidad para hacerla entrar en lo posible en el esquema clásico. Pero no lo logró.

#### § 2. La nueva teoría de los quanta: funciones y valores propios

En 1925 y 1926 una revolución importante tuvo lugar en la teoría de los quanta. Provenía de dos fuentes en apariencia muy distintas, pero que pronto se reunieron para formar una sola teoría, de suerte que poco después no puede ya distinguirse realmente la «mecánica cuántica», salida de Göttingen, con los trabajos de Heisenberg y Born, de la «mecánica ondulatoria» de De Broglie y de mí mismo. Desde el punto de vista en que hoy nos hallamos colocados, el punto esencial de esta nueva teoría me parece ser el siguiente. Conservando las discontinuidades observadas en los espectros de los gases (y en otros) introduce, sin embargo, de manera ingeniosa, una continuidad de estados intermedios que es mucho más extensa inclusive que en mecánica clásica, de suerte que la variedad de estados posibles del sistema parece a primera vista enorme. En

seguida daré los detalles. En consecuencia, el tránsito del sistema de un estado estacionario a otro se hace perfectamente accesible a la nueva teoría. También se resuelven completamente las otras dificultades que vimos surgir, por ejemplo, colocando un átomo de hidrógeno en un campo magnético, que se hace desaparecer gradualmente y reaparecer después en otra dirección. Pareció de momento como si todas las cuestiones que antes estaba prohibido plantear se hubieran solventado de golpe. Sin embargo, yo no estoy muy seguro de que esté justificado abandonarse a una alegría triunfal. Ustedes lo juzgarán por sí mismos. Parece que, por lo menos en el estado actual a que la interpretación de esta teoría ha llegado, debe contentarse con un éxito un poco más modesto, a saber: no haber eliminado de la física del átomo las cuestiones que no estaba prohibido plantear, sino hacerlas entrar en un sistema preciso e interesante; ha hecho, por así decirlo, de esta incertidumbre, una ley fundamental, —la ley de incertidumbre o de indeterminación de Heisenberg, de la cual tendremos que hablar en seguida.

En primer lugar bosquejaremos la manera como en mecánica ondulatoria se introduce esta inmensa variedad de estados intermediarios. La hipótesis fundamental de la mecánica ondulatoria es que hay que abandonar la imagen clásica del sistema en cuestión —la cual prácticamente consiste en un número de puntos electrizados— y sustituirla por una imagen completamente diferente, pero definida, sin embargo, únicamente por el sistema clásico que se considera. El sistema ondulatorio es un sistema

continuo, que ejecuta vibraciones del mismo género que, por ejemplo, un cuerpo elástico o un fluido. El estado del sistema está, pues, descrito por una o varias funciones de ciertas variables independientes, y sus vibraciones por una o varias ecuaciones lineales para estas funciones, en derivadas parciales respecto de estas variables y del tiempo, y que se llaman la ecuación o ecuaciones de ondas. En cuanto a estas variables independientes, son las mismas que las que sirven para describir la configuración de un sistema en mecánica clásica; por tanto, en el caso más simple, coordenadas rectangulares de los puntos electrizados o del punto electrizado, si el sistema consiste en un solo punto. Se ve que solamente en este último caso se puede representar el sistema ondulatorio como un movimiento ondulatorio en tres dimensiones, es decir, en el espacio ordinario. En general se trata de un espacio superior, «el espacio de configuración» del sistema clásico en cuestión. En un momento cualquiera el estado del sistema se da en este espacio por una función, por ejemplo

$$\psi_0(q_1, ..., q_n)$$
 o  $\psi(q_1, ..., q_n, t)$ ,

que es esencialmente arbitraria, pero cuyo transcurso temporal está regido por la ley de ondas. Esta última se determina (por reglas en las cuales no voy a entrar aquí) partiendo de la función hamiltoniana del sistema clásico.

A los estados estacionarios de Planck y de Bohr corresponden en esta nueva imagen ondulatoria las vibraciones propias o vibraciones normales del sistema. Porque resulta que las frecuencias normales son siempre iguales a los términos espectroscópicos experimentales, o, hablando en el lenguaje de la teoría de Bohr, a los niveles estacionarios de energía, divididos por la constante de Planck. He aquí el resultado del cálculo. Conviene añadir que en todos aquellos casos (y existían algunos) en que las dos teorías estaban en desacuerdo, la experiencia decidió invariablemente en favor de la nueva teoría. Además ésta es aplicable a todos los sistemas, incluso a aquellos en que las antiguas reglas de cuantificación fracasaron. En todo caso se había encontrado, pues, un medio matemático, relativamente sencillo, de ejecutar la cuantificación de un sistema cualquiera. Por lo demás, aparece ahora un poco más satisfactorio que la frecuencia de la luz emitida por el átomo sea igual, por lo menos, a la diferencia de dos frecuencias de vibraciones del sistema (si no a las frecuencias mismas), al paso que no tenía nada que ver con la frecuencia de revolución de las órbitas. No quiero entrar en este momento en más detalles -por ejemplo, cómo la nueva teoría se presta a calcular no solamente la frecuencia, sino también la intensidad de las rayas espectrales; en particular da cuenta del caso frecuente en que la intensidad es cero, caso de «transición prohibida» en la teoría de Bohr—. Hago mención de todo esto contrabalancear solamente el reparo natural para experimenta frente a este modelo de vibración polidimensional, que no puede representarse en el espacio ordinario. No hay necesidad de decir que no se trata más que de un aparato matemático para describir lo que pasa en nuestro espacio-tiempo; pero de un aparato maravillosamente eficaz, que parece corresponder excelentemente a los fenómenos reales.

Volvamos ahora al hecho de que las vibraciones propias del sistema ondulatorio corresponden a los estados estacionarios de Bohr; y recordemos el hecho de que la ecuación de ondas que regula el transcurso en el tiempo es lineal y homogénea, como en las vibraciones elásticas, por ejemplo. Por tanto, su solución más general se formará añadiendo todas las soluciones correspondientes a las vibraciones propias —las funciones propias, como se las llama— después de haber multiplicado cada una de ellas por una constante arbitraria (en realidad, las soluciones de una ecuación homogénea no están definidas en si mismas más que con una constante multiplicativa; tienen necesidad de ser normadas, pero no vamos a entrar en este punto). En vista de esta solución o vibración general que el sistema puede ejecutar, no hay razón para presumir o admitir que el átomo prefiera ejecutar una sola vibración propia. Por el contrario, hay que esperar que el estado de un átomo luminoso corresponderá en general a una superposición de muchas e incluso de todas sus vibraciones propias. La proporción en que cada una de ellas contribuye a aquel estado se expresará por la constante que la multiplica en la serie de superposición:

### <u>especialización</u>

$$\psi(x, y, z, t) = \sum kc_k \psi_k(x, y, z) e^{2\pi i v_k t}$$

(para fijar las ideas por una fórmula).

He aquí toda una inmensa variedad de estados posibles de un átomo, un aspecto a que no se prestaba la teoría de Bohr, puesto que aparecían en ella los estados estacionarios bajo la forma de órbitas de partículas. La superposición de varias órbitas es una concepción que carece de sentido; la mecánica clásica impedía imaginarla.

Consideremos nuestro sistema en un momento cualquiera, por ejemplo t = 0:

$$\psi(x, y, z, 0) = \psi(x, y, z) = \sum kc_k \psi_k(x, y, z).$$

Según la teoría antigua, el sistema no podía tener más que o bien el estado k = 1 (de energía  $hv_1$ ) o bien el estado k = 2, etc. La fórmula precedente deberá interpretarse de manera que al estado actual que describe la función  $\psi(x, y, z)$  contribuye el estado uno y el estado dos, etc., y evidentemente el estado k-ésimo contribuye en la medida de la constante  $c_k$ . Mientras la antigua teoría tenía que admitir saltos cuánticos de un estado a otro, en la nueva teoría las constantes  $c_k$  cambiarán gradualmente bajo influencias externas (de las cuales una de las más importantes es la interacción con la radiación o con el éter, si ustedes quieren). Asimismo la dificultad respecto a la cuantificación de la orientación, de que hablábamos hace poco (y otras dificultades semejantes), se resuelve muy sencillamente. No habrá cambio brusco en el momento en que el campo, después de haberse anulado, comienza a restablecerse en otra dirección. Pero respecto a la nueva dirección del campo, el

sistema ya no se encontrará en uno de sus estados estacionarios solamente, sino en una superposición de ellos. (Nb.: el cálculo muestra en seguida que las funciones propias respecto a una dirección son, en efecto, funciones lineales de las que pertenecen a la otra dirección —en el límite, campo = cero.)

## § 3. Teoría de las transformaciones. «estado» de un sistema. Relaciones de indeterminación

El error de la antigua teoría fue muy semejante al que cometería un geómetra que se imaginara que un vector no pudiera estar dirigido más que o en la dirección de las x, o de las y, o de las z, mientras que en realidad no se trata sino de una especificación de las direcciones según las cuales se ha convenido en descomponer el vector. Este geómetra hablaría de un salto de dirección si encontrara un vector en la dirección de las y, después de haberlo encontrado poco tiempo antes en la dirección de las x. Se vería apurado para indicar el estado del vector en el tiempo intermediario y la manera como ha cambiado de dirección, siendo así que el vector habría girado tomando sucesivamente direcciones intermedias. De la misma manera nuestro buen hombre se vería apurado para responder a la pregunta de cómo se comportaría un pobre «vector x» si al geómetra le conviniera cambiar el sistema de referencia. ¿Es que este procedimiento puramente mental podría hacer que el vector físico (por ejemplo una velocidad o una fuerza) saltara de la dirección x a x', y' o z'?

acabamos de introducir analogía que muy intima. La es Actualmente la mecánica cuántica considera la función  $\psi$  o bien el estado de un sistema físico, bajo la noción de vector, especialmente de vector con una infinidad de componentes. En la fórmula precedente las  $c_k$  pueden ser consideradas como las componentes del «vector-estado» en un sistema de referencia particular, la dirección de cuyos ejes está indicada por los estados estacionarios, o las funciones propias  $\psi_k$ . Se puede incluso llamarlas un sistema de ejes rectangulares en un sentido perfectamente definido matemáticamente. Esto se funda en que las funciones  $\psi_k$  forman lo que se llama un sistema completo de funciones ortogonales. La serie por medio de la cual acabamos de representar nuestra función  $\psi$  no es otra cosa sino el desarrollo de  $\psi$  en serie de estas funciones ortogonales. La totalidad de las  $c_k$  equivale a la función en sí misma, como la totalidad de los coeficientes de Fourier de una función es equivalente a la función misma. Además la serie (o la integral) de Fourier es, a su vez, el ejemplo más sencillo de un desarrollo semejante respecto a un sistema completo ortogonal. Dado el estado actual del sistema en un momento, es decir, dada su función  $\psi(x, y, y)$ z), se podrá desarrollar también respecto a otro sistema completo de funciones ortogonales. Esto equivale en nuestro lenguaje a servirse de otro cuadro de referencia. Veremos que esto puede tener sentido físico. Esto depende de que los estados del sistema elegido sean o no estados notables desde el punto de vista físico. En todo caso se encontrará otro sistema de coeficientes como las  $c_k$  que indicarán, por así decirlo, la proporción según la cual el estado actual se

compone de esta nueva serie de estados que hemos elegido como estados de referencia. Voy a añadir un detalle matemático: en todas estas representaciones posibles, la suma de los cuadrados de los valores absolutos de las  $c_k$  queda constante

$$|c_1|^2 + |c_2|^2 + |c_3|^2 + \dots = \text{const.} = 1.$$

Puesto que esta constante no cambia tampoco con el tiempo, conviene normalizarla, por ejemplo, a la unidad. Representa casi el valor absoluto del vector  $\psi$  elevado al cuadrado. Son suficientes, pues, los vectores unidades para representar el estado del sistema. En vista de la relación precedente, son evidentemente las  $|c_k|^2$  las que determinan la proporción en que el estado especializado k-ésimo contribuye al estado actual.

En lo que precede he tratado de dar a ustedes una idea de lo que se llama la teoría de las transformaciones en mecánica cuántica, en la medida en que esto es posible sin invocar cálculos extensos. Lo he hecho para ampliar el horizonte frente a una cuestión física de gran importancia que tenemos que abordar ahora.

¿Qué quiere decir físicamente que el estado del sistema se compone de tal o cual manera (indicada por los valores de la  $c_k$  o más bien de las  $|c_k|^2$ ) de los estados estacionarios? ¿Qué valor debe atribuirse a la energía del sistema en este estado «mixto»?

A primera vista propendería uno a atribuirle un valor intermedio o mediano, a saber:

$$\bar{\mathbf{E}} = \sum k \mid c_k \mid^2 h \nu_k$$

Pero esto hay que rechazarlo ya desde el punto de vista teórico, puesto que no se conforma con lo que anteriormente hemos supuesto, a saber: que la función propia  $\psi_l$  caracteriza el nivel de energía  $E_l = hv_l$ . Se ve, en efecto, que por medio de una conveniente elección de las  $c_k$  se podría hacer el valor medio de  $\bar{E}$  igual a uno de los niveles estacionarios  $E_l$ , por ejemplo, incluso con  $c_l = 0$ . Es decir, el sistema tomaría la energía  $E_l$  sin que la función  $\psi_l$  que consideramos como característica de este valor de energía, intervenga para nada. En todo caso, la frase: el sistema tiene energía  $E_l$  tendría una significación bastante equívoca si se llamara  $\bar{E}$  al valor de la energía.

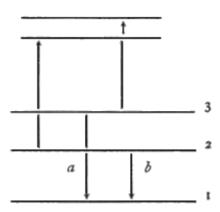
Nos vemos, pues, conducidos a suponer que en general no se puede fijar un valor definido de energía. Hay que admitir que el sistema participa realmente de las propiedades de varios (incluso de todos) los estados de energía estacionaria, sin confundirlos. Y he aquí que la experiencia lo confirma. Es cierto que la experiencia está enturbiada en la mayoría de los casos por el hecho de que jamás es posible preparar solamente un átomo en el estado deseado. Pero entonces, preparando un gran número de ellos, todos en *idéntico estado*, por ejemplo (para simplificar)

$$\psi = c_2 \psi_2 + c_3 \psi_3$$
  $|c_2|^2 + |c_3|^2 = 1$ 

se encuentra que se comportan como si la porción (o por mejor decir, la fracción)  $|c_2|^2$  de ellos se hallara en el estado número 2, y la fracción  $|c_3|^2$  en el estado numero 3. Por ejemplo: los átomos irradian todas las rayas espectrales que salen de estos dos niveles y absorben también todas aquellas que salen en la otra dirección (por así decirlo).

Las intensidades están determinadas, entre otros factores, por las fracciones tantas veces citadas

$$|c_2|^2$$
,  $|c_3|^2$ .



Lo que sería muy interesante es decidir experimentalmente si el *mismo* átomo irradia *a* y *b* (véase la figura) o no. Pero esto es probablemente imposible.

Sea de ello lo que fuere, lo que es seguro es que hay que admitir estados en que la energía no está determinada; más aún, que éste es el caso general. Los estados estacionarios son los estados excepcionales de energía bien definida, que al mismo tiempo sirven,

por así decirlo, como cuadro de referencia para describir un estado cualquiera del mismo sistema. Se dice frecuentemente que la energía no tiene en general valor fijo, sino solamente un valor estadístico; y se añade que de una experiencia que se podrá considerar como una determinación de la energía, resultará el valor  $E_k$  con la probabilidad  $|c_k|^2$ . Es posible que esto sea justo. Sin embargo, me parecería más prudente confesar con franqueza que la noción clásica de energía —y muchas otras de que hablaremos en seguida— no son en realidad aplicables a la nueva imagen de la naturaleza, puesto que un estado bien determinado de un sistema no contiene en general un valor bien determinado de la variable en cuestión. Habiéndolo reconocido así, yo considero como un poco atrevido el intento de interpretar una experiencia cualquiera como determinación del valor actual de una variable que en general no lo posee.

Habíamos indicado ya antes que la resolución de  $\psi$  en serie de funciones propias no constituye matemáticamente más que un caso especial del desarrollo de esta función de estado, respecto a un sistema completo de funciones ortogonales cualquiera. Añadí además que una investigación matemática, un poco más minuciosa, hace resaltar pronto la íntima analogía que existe entre este desarrollo general y la descomposición de un vector en componentes rectangulares respecto de un sistema de coordenadas orientado arbitrariamente, con la sola diferencia de que en el vector-estado el número de componentes es infinito. Este punto de vista sugiere la cuestión de si el desarrollo, en funciones propias, es el único que

tenga sentido físico, o si, por el contrario, existen otros que merecen ser tomados en consideración por la física.

Hay que responder que existen muchos otros; más aún, que si el físico quisiera contentarse con sólo el primer cuadro, se vería forzado, a pesar suyo, a considerar otros muchos si pretendiera investigar su sistema bajo las influencias variables del contorno, o en acción mutua con otros sistemas. Pero nos limitaremos a hacer esta observación, que no puedo desenvolver en este momento. Voy a indicar a ustedes en seguida cuál es la situación general acerca de este punto.

En mecánica clásica, la energía no era la única variable cuyo valor nos interesaba, en un sistema. Había otras muchas, como, por ejemplo, las componentes del momento lineal o la del momento angular. Acontecía así que podía interesar el valor instantáneo de la energía cinética o potencial o el valor de la energía de una cierta parte del sistema solamente. Incluso los valores particulares de las coordenadas de una partícula, por ejemplo la posición de un planeta en un cierto momento, o su velocidad, o su impulso, eran cantidades dignas de que nos informáramos de ellas y capaces de ser especificadas numéricamente, al igual que la energía total, aunque estas cantidades son en general funciones del tiempo, es decir, no permanecen constantes en el curso de él, como la energía total.

Conviene insinuar la sospecha de que todas estas concepciones clásicas perderán en la nueva teoría su significación propiamente dicha, de la misma manera que la perdió la energía. Habiendo abandonado la imagen clásica de las partículas en movimiento, y reemplazada ésta por algo completamente distinto, no hay que esperar que, por ejemplo, la noción «de lugar de una de las partículas» puede subsistir en su sentido propio. Pero de la misma manera que la energía, lejos de perder su importancia, suministraba el sistema de funciones propias, infinitamente precioso como sistema de referencia para la función  $\psi$ , así también habría que esperar algo parecido de las demás nociones clásicas. Así es en realidad. Se ha visto que entre los cuadros de referencia más generales de que hablábamos, se encuentran algunos que desempeñan respecto a cada una de las variables clásicas exactamente el mismo papel que el sistema de funciones propias respecto a la energía. Es casi inevitable, si no se quiere cometer una manifiesta inconsecuencia, aplicar todo lo que hemos dicho sobre la energía a cualquier otra variable clásica. Ésta no tiene, en general, un valor bien determinado, sino una «estadística». Solamente si  $\psi$  es igual a una de sus funciones propias (que por lo demás serán, en general, completamente distintas de las de la energía), solamente entonces podrá atribuírsele por excepción un valor determinado. Los que favorecen la interpretación estadística propiamente dicha os dirán que de una experiencia, adecuada para determinar el valor de esta variable, resultará un valor u otro: estando regulada la probabilidad por el cuadro de coeficiente en el desarrollo, análogamente a lo que acontecía con la energía. Pero yo prefiero pensar que ninguna experiencia es adecuada para medir una cosa que de antemano se sabe que no tiene existencia ninguna.

Conviene añadir que los valores que puede tomar una variable, y que se llaman sus «valores propios» no constituyen necesariamente discontinua. Incluso variedad muchos en exactamente los mismos que en mecánica clásica. Ahora bien, la suma que representa la función  $\psi$ , desarrollada en serie de funciones propias —o por lo menos una parte de esta suma—, se convierte en una integral. (Porque puede muy bien ocurrir que el «espectro» de los valores propios sea en parte discontinuo en parte continuo.) Sin embargo, la energía no es una excepción desde este punto de vista. También ella puede tener un espectro continuo o discontinuo o mixto según la naturaleza del sistema físico en cuestión y de las fuerzas o condiciones a las cuales está sometido. Por ejemplo, para un solo punto libre en el espacio infinito, el espectro de energía es continuo. Pero si está rodeado de paredes que no puede rebasar, el espectro es discontinuo. Si las paredes reculan hacia el infinito, los valores propios se acumulan cada vez más para formar en el límite un espectro continuo. La menor abertura en las paredes, que permitiera una escapada hacia el infinito, hace de un golpe continuo el espectro. Ven ustedes, pues, que la diferencia no es muy esencial desde el punto de vista físico. Por esto escribiremos y consideraremos el desarrollo bajo forma de una suma, como lo hemos venido haciendo hasta el presente.

Volvamos ahora a la concepción según la cual a una variable clásica corresponde en mecánica cuántica un sistema de ejes rectangulares al que hay que referir el vector-estado (es decir,  $\psi$ ) para informarnos de la estadística de esta variable, por ejemplo la energía, en el

estado dado por  $\psi$ . A otra variable clásica, por ejemplo a una componente del impulso, corresponderá un sistema de ejes rectangulares de orientación distinta, es decir, un sistema que resultaría del primero por una cierta rotación, que por lo demás puede ser cualquiera. Aunque el número de ejes es infinito —dicho toscamente, llamamos «ejes» a las funciones propias—, bastará con que se representen ustedes el caso tridimensional considerando  $\psi$ como un vector de tres dimensiones. Para abreviar llamaremos A y B a las dos variables clásicas. Si ocurre que A tenga en particular un valor determinado, esto querrá decir que  $\psi$  tendrá exactamente la dirección de uno de los ejes de A que, en general, no coincidirá con un eje de B. Por consiguiente,  $\psi$  tendrá, en general, componentes no nulas en todos los ejes de B, es decir,  $\psi$  no tendrá en este caso un valor definido, sino una estadística. Dicho brevemente, la fijación de una variable excluye en general la fijación de otra. Ambas no pueden hallarse a la vez determinadas. No hay estado de  $\psi$  en que se hallen. Por lo menos éste es el caso general. Sin embargo, dada la infinidad del número de ejes de una y otra especie, la coincidencia de algunas de ellas no es tan excepcional como lo sería en tres dimensiones. Acontece, inclusive, que los dos sistemas de ejes coinciden por completo; pero ello es debido a una relación muy especial entre A y B.

Una relación especial, pero de índole justamente opuesta, tiene lugar entre una variable q cualquiera y lo que se llama su variable canónica conjugada, p; por ejemplo, entre la coordenada rectangular de un punto material y la componente del momento

lineal (masa multiplicada por la velocidad) en la misma dirección. Estas dos variables *jamás* pueden estar bien determinadas a la vez; no hay excepción. Más aún, existe la relación recíproca siguiente: cuanto más se reduzca (por una elección conveniente del vectorestado  $\psi$ ) la estadística de *una* de estas variables a un dominio estrecho, tanto más extensa es la estadística de la otra. La relación numérica es

$$\Delta x \cdot \Delta p \sim h$$

si  $\Delta x$ ,  $\Delta p$  indican las extensiones aproximadas de las estadísticas de x y de p, y h la constante de Planck.

He aquí la célebre relación de incertidumbre de Heisenberg. Para deducirla hay que tener en cuenta:

**Primero.** Que es la función  $\psi(q_1 \dots q_n)$  misma, o por mejor decir  $|\psi|^2$ , la que da «la estadística de configuración».

**Segundo.** Que un valor determinado p del impulso —supongámoslo, para simplificar, dirigido hacia las x, con componentes cero en las otras direcciones— se traduce en mecánica ondulatoria por una onda plana, dirigida hacia las x, y de longitud de onda

$$\lambda = h/p$$
 o sea  $p = h/\lambda$ 

El problema que se plantea es evidentemente encontrar una función  $\psi(x)$  que no cubra (esencialmente) más que una estrecha región  $\Delta x$  de las x y que, al mismo tiempo, se componga, por superposición de

ondas planas, de diferentes longitudes de onda, pero haciendo intervenir un intervalo de A, es decir, de p, tan estrecho como sea posible.

Es fácil ver ahora que para restringir  $\psi(x)$  al dominio  $\Delta x$  es preciso por lo menos que

$$\Delta(\Delta x/\lambda) \ge 1$$

porque si se exige que dos ondas de diferentes longitudes se destruyan a la cabeza y a la cola del intervalo  $\Delta x$ , reforzándose en el centro, su diferencia en marcha debe llegar a ser 1. Por consiguiente,

$$\Delta x \cdot \Delta (1/\lambda) \ge 1$$

o sea

$$\Delta x \cdot \Delta p \ge h$$
. *l.q.s.q.d*.

## § 4. Representación geométrica de la nueva mecánica.

### Equivalencia del método de matrices y del método ondulatorio

Permítanme ustedes explicar un poco más detalladamente la significación de una variable clásica en mecánica cuántica, especialmente la manera cómo ella determina el sistema de ejes ortogonales de infinitas dimensiones. Porque se trata aquí de una situación que, en el caso de tres dimensiones, y aún en el de un

orden finito cualquiera de dimensiones, es perfectamente conocida a los físicos desde los tiempos de Lagrange.

Nos hemos habituado ya a considerar la función  $\psi$ , que determina el estado del sistema en cada instante, como un *vector* que posee una infinidad de componentes. En esta misma manera de ver, cada variable clásica puede ser considerada como un *tensor*, especialmente como un tensor simétrico de segundo orden. No voy a explicar a ustedes el procedimiento por el cual este tensor se deriva de manera unívoca de la noción clásica de la variable en cuestión. Pero voy a indicar cómo esta manera de ver se pone de acuerdo con todo lo que precede, y su relación con las expresiones de operador, matriz, etc., que tan frecuentemente se escuchan a propósito de la nueva teoría.

Recuerden ustedes la situación en el caso de tres dimensiones. Un tensor de tres dimensiones es un objeto geométrico de tres por tres componentes, que es conveniente agrupar en forma de *matriz*. La significación física de un tensor está en que aplicado a un vector dado cualquiera, le hace corresponder otro vector determinado:

$$x' = A_{11}x + A_{12}y + A_{13}z$$
  
 $y' = A_{21}x + A_{22}y + A_{23}z$   
 $z' = A_{31}x + A_{32}y + A_{33}z$ 

(Ejemplos: tensor «momento de inercia», aplicado a la velocidad angular, da el momento angular; tensor de «tensión» (en elasticidad),

aplicado a la normal de un elemento de superficie, da la fuerza que actúa sobre ella, etc.)

No tenemos que ocuparnos más que de tensores simétricos:

$$A_{ik} = A_{ki}$$

Un tensor simétrico determina siempre un sistema de referencia de ejes ortogonales, que se llaman sus «ejes principales», sistema absolutamente conocido en los ejemplos citados. Referido a este sistema de ejes (es decir, si se los elige como sistema de coordenadas rectangulares), el tensor se reduce a su diagonal. La manera racional de caracterizar un tensor consiste en indicar, primero, la orientación de sus ejes principales; segundo, los términos diagonales que pertenecen a cada uno de los ejes del sistema de referencia. Se los llama valores principales, o bien valores propios del tensor. La imagen intuitiva de un tensor (como la flecha en el caso del vector) es un elipsoide (o un hiperboloide), orientado en la forma dicha, cuyos ejes tienen una longitud que se halla en relación íntima con los valores principales (actualmente: las recíprocas de sus raíces cuadradas).

Todo esto se aplica sin modificación ninguna a un número cualquiera de dimensiones. (Esto interviene en la teoría de las pequeñas vibraciones de Lagrange. Aplicándola a las vibraciones de un cuerpo continuo, se llega derechamente al caso de una infinidad de dimensiones. Pero no necesitamos echar mano de este caso intermediario.)

Consideradas las funciones  $\psi$  como vectores (cuyos componentes son los «coeficientes del desarrollo»), un tensor estará representado por una matriz doblemente infinita, y servirá para hacer corresponder a una función  $\psi$  cualquiera, otra función: es decir, es una operación o un operador sobre  $\psi$ . Este tensor determina un sistema de ejes principales ortogonales (en número infinito, naturalmente). Ahora bien; puesto que cada variable clásica (como la energía, el momento de impulso, etc.) corresponde en mecánica cuántica a un tensor, cada variable clásica determinará entonces un sistema de ejes ortogonales en el recinto del vector  $\psi$ . He aquí precisamente el sistema característico de referencia de que hablábamos antes. No resta sino añadir que lo que entonces llamábamos valores propios de la variable son idénticos a los valores propios del tensor.

En resumen, pues, tenemos lo siguiente, y para comprenderlo ruego a ustedes que ensayen representarse lo que voy a decir en tres dimensiones, aunque el número de dimensiones del espacio de que ahora hablamos sea infinito. A cada variable clásica corresponde un sistema de ejes ortogonales de orientación determinada con un número determinado asignado a cada eje como valor propio. La totalidad de estos «cuadros de referencia» queda así fijada. Ahora bien, hay un vector  $\psi$  que parte del mismo origen y describe el estado instantáneo del sistema físico en tal forma que sus componentes respecto a uno de estos sistemas de referencia suministran todas las posibles informaciones por lo que se refiere a la variable en cuestión.

Hasta ahora no hemos considerado más que un estado instantáneo del sistema. Es fácil completar nuestra imagen geométrica indicando c'omo el estado del sistema cambia con el tiempo a consecuencia de la ecuación de ondas a la cual está sometida  $\psi$ . No tienen ustedes más que representarse una rotaci'on del espacio, rotación que arrastra al vector  $\psi$ , pero deja fijos todos los sistemas de referencia. Además es una rotaci'on de ejes fijos, de velocidades rotatorias fijas; no depende ni del tiempo ni de la posici'on de 'o. Si ustedes quieren pueden imaginarse todo el «erizo» de flechas que corresponden a todos los posibles estados del sistema físico. Impriman ustedes a todas aquéllas esta misma rotaci'on estacionaria, y habrán descrito ustedes de un golpe todos los movimientos posibles del sistema físico.

Formalmente considerada, la situación es tan sencilla que es preciso recordar nuevamente que se halla «un poco» embrollada por la infinidad de dimensiones. Por ejemplo, esta rotación no es periódica, no lleva el sistema a su estado originario después de un cierto período finito.

Les indicaré a ustedes todavía la dirección de los ejes de rotación. Son simplemente los ejes del «tensor de energía». Gracias a esto, la estadística de la energía es independiente del tiempo (lo que en mecánica cuántica corresponde a la ley de conservación de la energía). Es fácil ver, en tres dimensiones, que la componente respecto al eje de rotación no cambia si el vector está arrastrado por la rotación. Esto es evidente, por lo menos para el eje real. Porque es preciso recordar que, aun tratándose de tres dimensiones, hay

otros dos ejes dirigidos hacia los puntos cíclicos del plano de rotación. En general, la rotación posee tantos ejes cuantas son las dimensiones del espacio en que tiene lugar. Por lo demás — haciendo honor a la verdad—, la componente respecto a un eje de rotación no permanece efectivamente constante; lo que queda constante es su valor absoluto, único que entra en juego en la estadística.

Para terminar con estas observaciones sobre la representación geométrica de la mecánica cuántica, permítanme ustedes utilizarla para explicarles el punto esencial de diferencia entre el método de Heisenberg y Born de un lado, y el de la mecánica ondulatoria de otro.

Evidentemente, en la aplicación de nuestra imagen no importa sino la posición relativa del vector  $\psi$  y del tensor particular en cuestión. Pero puesto que el movimiento general está descrito por una rotación estacionaria del conjunto de todos los posibles vectores  $\psi$ (mientras que la totalidad de los tensores queda invariablemente fijo), es evidente que se podrá obtener exactamente el mismo resultado dejando invariables las  $\psi$  (o en casos particulares la  $\psi$ ), con tal de que se imprima una rotación exactamente inversa a la totalidad de los tensores o «cuadros de referencia». En lugar de la permanecerá ahora invariable, función serán ψ, que las componentes de los tensores (por tanto, los elementos de las matrices) quienes son funciones del tiempo. El mérito de este método estriba en que permite diferir hasta el fin del cálculo la especificación de la función  $\psi$  y obtener incluso resultados de gran interés acerca de ciertos tensores particulares (es decir, variables físicas), sin especificar para nada la función  $\psi$ —resultados que se aplican, por consiguiente, a un estado cualquiera del sistema físico—. Efectivamente, esta manera de ver fue empleada por Heisenberg y Born antes de que la concepción del vector-estado  $\psi$  hubiese sido descubierta poco más tarde por la mecánica ondulatoria.

El otro método, que expuse ya antes, es el de la mecánica ondulatoria. Posee justamente los méritos opuestos. Se busca en ella lo que acontece con un vector-estado particular en el curso del tiempo, sin decidirse acerca de las variables físicas que se quieran considerar. Terminado el cálculo podrá aplicarse a una variable cualquiera. Este procedimiento parece, tal vez, el más directo, y es también más simple de cálculo. Pero evidentemente los dos métodos son absolutamente equivalentes. La elección depende del problema. El uno tiende a recoger todo lo que puede saberse respecto a una variable particular, cualquiera que sea el estado particular del sistema. El otro se ocupa de un estado inicial particular, agotando para él, de un golpe (por lo menos en principio), todas las cuestiones posibles. Pero ha existido una gran confusión respecto a esos dos métodos, porque las constantes del uno son en el otro funciones del tiempo, y viceversa. Y desdichadamente la mayoría de los autores callan caprichosamente el método empleado. Frecuentemente se sirven del lenguaje del uno y del otro, sin decirlo.

# § 5. La causalidad y los conceptos físicos clásicos en la nueva mecánica

No voy a continuar hoy las consideraciones más o menos matemáticas de que nos hemos ocupado ayer, y voy a entrar en una cuestión sobre la cual se discute enormemente, a saber: la cuestión de la causalidad.

Se comprende perfectamente que la nueva mecánica haya dado lugar a esta cuestión, a pesar de que el *estado* de un sistema físico queda determinado unívocamente y sin ambigüedad para todo el porvenir, por el estado inicial dado. Pero el estado inicial mismo, e igualmente cada uno de los estados que le siguen en el curso del tiempo, carecen —ya lo hemos visto— de precisión, si se consideran desde el punto de vista clásico. Ahora bien; puede ocurrir que un estado, cuya imprecisión inicial está muy por bajo del límite de observación, se cambie, en el curso del tiempo, en una imprecisión que parece ser accesible a observaciones de bulto.

Por ejemplo, tomen ustedes el sistema más simple —un solo punto material, tal como un electrón o un fotón—. Su estado inicial, su función  $\psi$ , lo suponemos representado por un tren de ondas suficientemente estrecho en todas las direcciones, y al mismo tiempo suficientemente monocromático, para que las incertidumbres de lugar y de velocidad sean insignificantes; lo cual es posible por la extrema exigüidad de la constante h. Hagamos que este «paquete de ondas» encuentre un pequeño obstáculo, por ejemplo un núcleo atómico, o bien una pequeña ranura en una pantalla impermeable al punto material. Como se puede presumir,

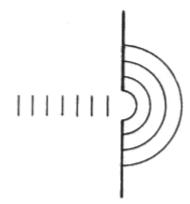
resulta del cálculo que el grupo de ondas se transformará por difracción, por lo menos parcialmente, en una onda esférica que emana del obstáculo o de la ranura. Se propagará sobre una parte del espacio cada vez mayor. Aunque desde el punto de vista ondulatorio se trata siempre de un estado bien definido de nuestra partícula, la estadística de coordenadas se ampliará hasta tomar dimensiones macroscópicas, incluso gigantescas (si se aguarda un tiempo suficiente), de suerte que se podrán concebir experiencias que decidan el lugar en que la partícula se halla realmente.

Ahora bien, la mayoría de los teóricos esperan encontrar la partícula, en tal caso, difundida, tan pronto en una dirección, tan pronto en otra, estando determinada la estadística por la intensidad que la onda esférica difundida posee en la dirección en cuestión. Esto quiere decir: si se repite la misma experiencia, de manera exactamente igual, a partir de la preparación de la partícula, antes de ser lanzada contra el obstáculo, no producirá, sin embargo, siempre el mismo efecto, sino tan pronto uno, tan pronto otro. Es lo que se llama el defecto de causalidad, que tanta inquietud ha producido.

Un físico de la época clásica no se hubiera conmovido por semejante serie de experiencias. «Naturalmente», hubiera dicho, «puesto que usted confiesa que la manera de lanzar su proyectil no es suficiente para prever con exactitud ni su velocidad ni su recorrido inicial, el proyectil pasará unas veces más cerca, otras más lejos del obstáculo, unas veces a la izquierda, otras a la derecha suya, de

suerte que deben hacerse esperar desviaciones muy diferentes. No hay en ello nada de extraño.»

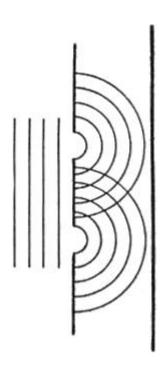
Pero fácilmente comprenderán ustedes que nosotros nos encontramos en otra situación distinta, al aceptar la teoría que he expuesto en las conferencias anteriores. No podemos atribuir a circunstancias accidentales estos efectos desparramados, que según nuestra teoría serían inevitables, aun con el empleo de medidas las más exactas posibles, para preparar y lanzar proyectiles, porque estos proyectiles son cosa bien distinta de los puntos materiales de la antigua teoría. Parece que nos es preciso admitir que condiciones de estado inicial idénticas predisponen efectos diversos. Porque fue forzoso admitir que un estado del sistema participa en general en diversos valores de una variable cualquiera, y que tratándose, en especial, de un «punto material», no existe ningún estado en el cual las coordenadas y la velocidad posean valores únicos.



Hay otra circunstancia desconcertante. Volvamos a la onda esférica que emana del obstáculo; supongamos, para fijar las ideas, que se trata de una ranura de una pantalla (v. la figura). Coloquemos a una gran distancia de la ranura una multitud de pantallas receptoras, por ejemplo, placas fotográficas, e interceptemos nuestra partícula por una de aquéllas. Una vez que ha sido absorbida por una de las placas, gastando su energía cinética en ionizar una molécula AgBr (bromuro de plata), no podrá aparecer sobre ninguna de las otras. Toda la onda esférica ha quedado, pues, casi aniquilada en este momento. Pero esto es, justamente, apenas concebible, a menos que se considere la onda como una cosa puramente mental. No se trataría, pues, sino de «ondas de probabilidad», como se les llama frecuentemente. En realidad no existiría más que la partícula, y en cada experiencia especial no intervendrá más que un solo recorrido rectilíneo; lo que hay es que no lo conocemos de antemano.

Pero estas interpretaciones apenas pueden admitirse, por la razón siguiente. Tomemos una pantalla con dos finas ranuras no demasiado distantes, y dejemos caer sobre ella una onda plana, suficientemente extensa para cubrir las dos ranuras; o, en otro lenguaje, una partícula cuya velocidad está determinada con gran exactitud, a costa de la determinación del lugar. Ahora bien, repitiendo esta experiencia muchas veces, pero cada vez con una sola partícula, encontraremos sobre una pantalla receptora que interceptara todas las partículas, franjas de interferencia, que corresponden a la cooperación de dos ondas esféricas. Es una experiencia muy conocida en óptica, con los «fotones», sólo que de ordinario la intensidad es demasiado grande para que se pueda

pretender realizar experiencias con un solo fotón. Pero es casi seguro que esto no alteraría en nada el resultado. Además, todos ustedes saben que se han logrado realizar experimentos muy semejantes con electrones.



Y está ya fuera de toda duda que si se redujera la intensidad del haz electrónico nada cambiaría, salvo el tiempo de exposición necesario para obtener las franjas de interferencia.

Si en cada experimento no interviniera más que un solo electrón con recorrido determinado, este electrón debería pasar, o bien por una de las ranuras, o bien por otra. Sin embargo, la *existencia* de la otra ranura, por la cual el electrón no pasa, pero *hubiera podido* pasar, debería influir sobre su recorrido, en forma que condujera al electrón preferentemente hacia un máximum, y muy raramente a

un mínimum, de la figura de interferencia que resulta matemáticamente de la cooperación de dos ondas esféricas. He aquí algo un poco dificil de concebir.

Yo añadiría otro ejemplo que me parece especialmente interesante. Según las ideas clásicas, un átomo radiante emite ondas esféricas, que por razón de simetría poseen un impulso lineal resultante cero. El átomo no experimentaría, pues, un choque de retroceso. Aunque la nueva teoría acepta la concepción de la onda esférica, no ve en ella la representación del estado de un objeto físico de impulso cero, sino, por el contrario, de impulso, en valor absoluto

$$h v/c \cdot (= h/\lambda)$$
.

siendo v la frecuencia de la luz. Solamente, en el estado representado por la onda esférica, la *dirección* del impulso es indeterminada; todas las direcciones contribuyen a aquélla, y de una manera simétrica. En consecuencia, el átomo experimentará un retroceso de dirección opuesta. Después de haber emitido el fotón, el átomo se encontrará también en un estado en que el impulso tiene el valor absoluto  $h \ v/c$ , pero de dirección indeterminada. (Para simplificar suponemos que el impulso total de la emisión es cero. La *estadística* del impulso total, átomo + fotón, es independiente del tiempo. Debe, pues, continuar siendo cero, de donde se deduce la conclusión precedente.)

Quizá nos sintiéramos inclinados a considerar todo esto como un juego de palabras. Si no se puede decir ni tan siquiera que la velocidad de retroceso está o a la derecha o a la izquierda, sino solamente, de modo místico, a la izquierda y a la derecha a un tiempo, ¿no es esto, en fin de cuentas, lo mismo que llamarla cero? No; porque entonces la *energía* cinética sería igualmente cero, mientras que según la otra opinión es siempre

$$\frac{1}{2}M (h v/c)^2$$

cualquiera que sea la dirección del retroceso. Ya en 1917 Einstein había demostrado que es absolutamente preciso exigir esta energía de retroceso, para que los átomos o las moléculas de un gas en equilibrio con la radiación negra reciban una agitación térmica suficientemente grande. O dicho de otro modo: sin este retroceso, el gas exigiría una radiación negra distinta (es decir, un poco más intensa) de la de un cuerpo negro de misma temperatura; lo cual es termodinámicamente inadmisible. Se podría añadir que la teoría de los quanta logra explicar el efecto Doppler precisamente gracias a esta energía de retroceso.

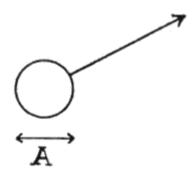
Además, el defecto de determinación en la dirección del fotón es una consecuencia inmediata de la ley de Heisenberg, en virtud de la exigüidad del átomo emisor. La variable conjugada del ángulo es el momento angular. El fotón que proviene de un recinto de dimensiones lineales A posee un momento angular cuya incertidumbre no puede sobrepasar de

$$A \cdot p = A \cdot h/\lambda$$
.

Por consiguiente, la incertidumbre del ángulo debe ser necesariamente superior a

$$h/Ap = h/A(h/\lambda) = \lambda/A$$

Puesto que A es considerablemente inferior a  $\lambda$ , el ángulo será completamente indefinido. Es lo que expresa la onda esférica. En el tiempo en que Einstein hubo aplicado su memoria, se hablaba mucho de la «radiación en aguja». Se dan ustedes cuenta de que semejante concepción, tomada literalmente, es injusta en su punto esencial.



Sin embargo, el retroceso de un átomo que irradia luz no es una construcción puramente teórica. Hace un año, R. Frisch, de Hamburgo (un discípulo de O. Stern), ha logrado dar una prueba experimental de su existencia, utilizando el método de «haces moleculares», que ha sido desarrollado en el Instituto de Fisicoquímica de Hamburgo con una perfección maravillosa. Un haz de átomos de sodio, formado por una hendidura de diez micras de anchura solamente (y de dos milímetros de altura) se recoge por un

hilo incandescente de tungsteno (Wolfram) de la misma anchura

(modificando una corriente iónica al destruir la carga espacial). El libre recorrido es aproximadamente de dos o tres decímetros. Ahora bien, si el haz de átomos de sodio está iluminado por una lámpara de resonancia de sodio por un lado, digamos por el derecho, el choque experimentado al absorber la luz produce desplazamiento del haz, de diez micras aproximadamente hacia la izquierda, en el lugar de la interceptación. La velocidad media es 9.104; la velocidad comunicada por el choque es de 3 cm/seg. Es un efecto que Frisch pudo medir hasta cuantitativamente. El retroceso de reemisión, que nos interesa aquí, debe manifestarse por un ensanchamiento del haz, que se observa actualmente, pero que no prueba nada, puesto que los átomos de diferentes velocidades (en la distribución maxwelliana) sufren desviaciones distintas por los choques de absorción, lo cual produce el mismo efecto. Pero pueden hacerse ineficaces, por así decirlo, los choques de absorción, dándoles la dirección de la hendidura, es decir, iluminándolo con rayos de luz paralela a ésta. Ahora bien, no se experimenta desviación ninguna del centro, sino un ensanchamiento. La intensidad en el centro disminuía el 2 por 100, que es una aproximación favorable comparada con el 2,5 por 100 exigido por el cálculo. Además, todos ustedes saben que tratándose de partículas más

Además, todos ustedes saben que tratándose de partículas más pesadas que los fotones, por ejemplo de partículas *a*, se pueden fotografiar, por el método de Wilson, los recorridos del átomo que

retrocede y de la partícula emitida. Teóricamente, el caso de emisión a es absolutamente análogo a la emisión fotónica.

Y nos preguntamos de nuevo qué es lo que existe en realidad: la onda esférica o el recorrido unilateral de una partícula. ¡Las mismas inquietudes que antes con la onda esférica de difracción! Es interesante averiguar si el principio de Heisenberg en el caso de las partículas a exige también una indeterminación en la dirección (como en el caso fotónico). La indeterminación del momento angular no es superior a

A · masa velocidad  

$$5.10^{-24} \cdot 10^9 = 5.10^{15} \cdot A$$
,

siendo A la región en que la partícula está proyectada. La indeterminación del ángulo, por tanto, es por lo menos

$$6 \cdot 5.10^{-27} / 5.10^{-15} \cdot A \cong 10^{-12} / A.$$

Para hacer el ángulo suficientemente definido, la región de emisión debería sobrepasar considerablemente los  $10^{-12}$ , lo cual es poco probable.

Siento mucho no poder desprenderles a ustedes de estas inquietudes y ni tan siquiera aliviarlas. Prefiero hacerlas resaltar claramente mejor que disimularlas bajo una costra de cálculos impermeables. Personalmente me siento inclinado a creer que el orgullo de poder perseguir en nuestras experiencias el recorrido de

un átomo, y aún de un electrón (o positrón) aislado, o de observar su efecto, nos ha llevado a abusar de la libertad de realizar experiencias mentales con partículas aisladas. Hasta podría imaginarme que existe una especie de «ley de incertidumbre» en cuanto al número de partículas que entran en una experiencia, de suerte que este número no podría fijarse de antemano. Si, por ejemplo, no se tuviese nunca la seguridad de experimentar sobre una sola partícula, no se podría llegar jamás a la conclusión siguiente: puesto que «la» partícula se ha manifestado sobre la pantalla número 1, no podrá aparecer sobre otras pantallas. Siento no poder precisar más estas ideas.

## § 6. Física microscópica y geometría. El cuerpo rígido en la nueva mecánica

La fuente de las dificultades de que acabamos de hablar se encuentra evidentemente en la hipótesis que admitimos, al comienzo, respecto de la indeterminación de las variables clásicas, tales como la velocidad, las coordenadas, etc., para un estado cuantomecánico. Esta hipótesis no es en realidad otra cosa que el principio de superposición, deducido del aspecto ondulatorio. Se encuentra en la base de la nueva teoría constituyendo, como lo hemos dicho varias veces, su más importante progreso. Pero en vista de las antítesis que engendra, se podría realmente dudar y creer que, a pesar de todos los grandes éxitos de la teoría, se ha seguido un camino falso.

Si se conserva la noción de partícula en algún sentido, ¿por qué no había de ser posible determinar su posición y su velocidad con toda la precisión deseada? Esto equivale, en efecto, a decir que las más simples nociones de la geometría no son ya aplicables, o que si se aplican uno se queda perdido entre antítesis.

Pero no es la cosa tan extraña como parece. Las consideraciones siguientes hubieran podido conducirnos a ello si alguien las hubiese hecho con anterioridad a la mecánica cuántica. Después de ella, nos servirán por lo menos para disminuir nuestro asombro.

En la base de la geometría se encuentran nociones como las de congruencia, longitud, etc. Para explicarlas es necesario tomar una figura y moverla sin que cambie de forma hasta hacerla coincidir con otra figura. O bien hay que tomar un metro y moverlo sin que cambie de longitud, hasta aplicarlo a la línea cuya longitud se quiere medir. (O dicho más precisamente, puesto que un metro con sus divisiones es ya una noción muy complicada, nos hará falta, para medir una línea, disponer de una unidad suficientemente pequeña, que aplicada varias veces a la línea nos permita saber cuántas unidades contiene aquélla.) Evidentemente, pues, lo que se encuentra en la base de la geometría es la noción del cuerpo rígido, es decir, de un cuerpo que puede desplazarse sin deformación.

Al afirmar que un punto material, por ejemplo el electrón dentro de un átomo, tiene tales o cuales coordenadas cartesianas, no se hace otra cosa sino dar instrucciones para encontrar el punto por medio de ciertas operaciones: tómese una regla rígida, aplíquese de tal o cual manera, aplíquese después un triángulo rectángulo, etc., etc., y entonces se encontrará nuestro electrón. La noción del lugar mensurable de un punto (naturalmente respecto a un cuadro de referencia) implica, pues, ciertas experiencias mentales, realizadas con cuerpos rígidos. Ni que decir tiene que cuanto mayor precisión se desee tanto más *absolutamente* rígidos tendrán que ser los cuerpos imaginados.

No existen cuerpos absolutamente rígidos. Pero la mecánica clásica no prohibía apelar a ellos. Permitía inventar fuerzas o energías potenciales cualesquiera entre los puntos materiales que componen los cuerpos sólidos; lo cual permitiría evidentemente aproximarse a la rigidez tanto como se quiera. Ahora bien; pudiera, sin embargo, ocurrir que la teoría de los quanta haga imposible la experiencia de un cuerpo absolutamente rígido. Si así fuera, sería inadmisible utilizarlo en una experiencia mental. Las antítesis que encontramos al aplicar la geometría a los átomos serían comparables a los fracasos bien conocidos que se experimentan en termodinámica, si permite mentalmente se operar con un cuerpo «termodinámicamente imposible». Aquí tampoco importa que el exista actualmente; está permitido cuerpo considerado no idealizarlo tanto como se quiera, con tal de que no se le atribuyan propiedades que contradicen a una ley fundamental de la naturaleza.

He dicho que pudiera ser que la teoría de los quanta excluyera la rigidez absoluta. Pero creo que se puede ir más lejos.

Desde que sabemos interpretar los espectros de banda (los espectros moleculares) sabemos que los vínculos entre los átomos

son de naturaleza cuántica. Sin entrar en detalles, bastaría decir que ya las formas primordiales de la teoría de los quanta se oponen a la idea de un vínculo infinitamente rígido entre dos átomos, puesto que las diferencias de niveles de energía son necesariamente finitos. Se podrá, pues, siempre hacer pasar un sistema de dos o más átomos, de un estado a otro, suministrándole una energía finita, y no infinitamente grande. Dicho más detalladamente: si se intentara aplicar un proceso de límite, semejante al de la teoría clásica, he aquí el resultado que se obtendría: imaginándose curvas de energía potencial cada vez más inclinadas —con el fin de que el vínculo sea cada vez más rígido— se ve que, o bien se debe hacer tender al mismo tiempo también las masas hacia el infinito, o bien la frecuencia, y al mismo tiempo la «energía de cero» hv, tienden hacia el infinito. En ambos casos el sistema se hace infinitamente pesado, y por consiguiente se opone evidentemente a todo movimiento, es decir, a todo lo que le impusiera un desplazamiento en el espacio. Acabamos de hablar de las dificultades que se encuentran aplicando la geometría al átomo. Desde el punto de vista moderno, la geometría adecuada a la naturaleza no es la geometría de tres dimensiones, sino la de cuatro dimensiones de la relatividad restringida. Esto nos explica entonces por qué la reconciliación de la mecánica cuántica y de las concepciones de la relatividad nos cuesta tanto esfuerzo.

Permítanme ustedes entrar en esta cuestión con un poco más de detalle.

## § 7. Mecánica cuántica y mecánica relativista. La variable tiempo

Aplicar la geometría tridimensional a la física implica, lo hemos visto, aplicar la idea del movimiento sin cambio de forma. Desde el punto de vista matemático, el movimiento es una cierta transformación del espacio en sí mismo; y la totalidad de estas transformaciones constituye lo que los matemáticos llaman un grupo. Exactamente de la misma manera la teoría de la relatividad restringida está vinculada a un grupo. Se puede decir que consiste en aplicar el grupo de transformaciones Lorentz a los fenómenos físicos. Para hacerlo hay que ejecutar experiencias mentales muy análogas a aquellas de que hablábamos a propósito de la geometría tridimensional, pero mucho más complicadas, porque el tiempo interviene en ellas como una cuarta coordenada; de suerte que, además de reglas de medir, triángulos, etc., tenemos necesidad todavía de relojes. Ahora bien; ustedes saben que la teoría de la relatividad lleva consecuencias sorprendentes а (pero indudablemente fundadas e inseparablemente unidas a la teoría) en cuanto a la contracción de una regla de medida en movimiento y también, a pesar de su carácter sorprendente, al retraso de un reloj en movimiento. Son éstas consecuencias tan naturales como pueda serlo en geometría tridimensional el acortamiento en perspectiva. Pero combinando estas consecuencias las nociones con fundamentales de la teoría cuantista, es fácil ver que no pueden efectuarse con una precisión arbitraria las operaciones necesarias

para fijar un cuadro de referencia espacio-temporal, o, como se dice, un cuadro de Lorentz.

En efecto, entre estas operaciones figuran naturalmente el reglaje de un reloj, y no solamente de uno solo, sino de una multitud de ellos distribuidos en todos los puntos del espacio. Pero para regular un reloj hay que mirarlo varias veces, y he aquí que esto no es un proceso irrelevante, puesto que:

- 1°, para ser visible el reloj debe emitir luz (o reflejarla), y por tanto experimentará él un retroceso, y
- 2°, este retroceso cambia su *marcha*, que es lo que precisamente queremos comprobar.

Sin embargo, todo ello importaría poco con tal que supiéramos precisamente la dirección y la magnitud del retroceso. En el caso presente podemos admitir que la dirección es conocida, pero no la magnitud, por la razón siguiente. El tren de ondas que nos informa, por ejemplo, de una cierta posición de la aguja debe ser lo suficientemente corto para que no sea demasiado vaga la información que nos suministren acerca del tiempo. Pero por otra parte, cuanto más corto es, tanto menos monocromático será, de suerte que el retroceso es menos determinado, y el cambio de la marcha (causado por el cambio de velocidad) no se puede prever más que aproximadamente. Se ve en seguida que se trata de dos exigencias concurrentes que no suministrarán la máxima precisión que se puede lograr, sino gracias a un compromiso.

En efecto, llamemos t al intervalo del tiempo a medir (por ejemplo, entre dos posiciones de la aguja). Sea  $\beta$  la parte indeterminada de la

velocidad de retroceso (1/c). El segundo error se da, en primera aproximación por

$$\frac{1}{2}\beta^{2}t = t(1 - \sqrt{1 - \beta^{2}})$$

Sea m la masa del reloj; por tanto,  $mc\beta$  la indeterminación de retroceso que nos hemos permitido. El defecto de monocromatismo  $\Delta v$  y está, pues, dado por

$$m \cdot c \cdot \beta = h \Delta v / c$$
,

y permite limitar la duración de la señal a

$$\tau = 1/\Delta v = h/mc^2\beta$$
,

pero no a un tiempo más corto. Es el primero de los dos errores mencionados antes. Sumando los dos, se tiene como error total

$$\frac{1}{2}\beta^{2}t + h/mc^{2}\beta = 0$$

el cual es mínimum para

$$\beta t - h/mc^2\beta = 0$$

o bien para

$$\frac{1}{2}\beta^{2}t - h/2mc^{2}\beta = 0$$

Los dos errores deben ser, pues, de mismo orden de magnitud, para que su suma sea mínima. La expresión del primero muestra que este orden de magnitud es seguramente superior a  $-(h/mc^2)$ . Un cálculo más detallado hace ver que este límite inferior ni tan siquiera puede ser alcanzado, si no es con un t de igual orden, es decir, con un error de mismo orden de magnitud que la cantidad medida.

Se puede expresar nuestro resultado diciendo que los acontecimientos que pasan en un sistema de masa m no están localizados en el tiempo, los unos respecto a los otros, más que con una precisión máxima de

$$\Delta t \cong h/mc^2$$

Multiplicando esta relación por  $mc^2$  (es la energía total del sistema según la ley, bien conocida, de Einstein), se encuentra una ecuación, a saber:

$$\Delta t \cdot mc^2 \cong h$$
,

que se asemeja notablemente a la relación de Heisenberg, puesto que el tiempo y la energía se comportan mutuamente, desde muchos puntos de vista, como variables canónicamente conjugadas. Solamente que  $mc^2$  es la energía total, y no el defecto de

determinación de la energía. Evidentemente esto se funda en el hecho de que en la curva de las experiencias mentales que condujeron a nuestra fórmula, hemos permitido al sistema emitir un fotón, lo cual cambiará su energía en una cantidad de un orden a lo sumo  $mc^2$ .

Ahora bien; esta consideración desvanece la sospecha a la cual está expuesta la deducción precedente, a saber: la sospecha de que los acontecimientos de nuestro sistema mostrarían un defecto de localización en tiempo solamente para un observador exterior, pero estarían perfectamente determinados desde el punto de vista interior, por así decirlo. Lejos de esto, en un sistema cuya masa es precisamente m, no pasa absolutamente nada. No existe orden ninguno de acontecimientos en tal sistema, por lo menos si se aceptan las nociones fundamentales de la mecánica cuántica y la relación de Einstein entre masa y energía. Porque entonces la determinación precisa de la masa m implica la determinación igualmente precisa de la energía  $mc^2$ . Es decir, el sistema se encuentra en uno de sus estados estacionarios de energía, estando dada su función por

$$\Psi (q_1 ... q_n) e^{(2\pi i mc^2/h)t}$$

Esta función no depende del tiempo más que por una sola exponencial imaginaria. Esta exponencial reaparecerá invariablemente en cada coeficiente  $c_k$  del desarrollo respecto a un cuadro de referencia o sistema completo de funciones ortogonales

cualquiera. Los valores absolutos de todos los coeficientes  $c_k$  serán, pues, independientes del tiempo. El comportamiento del sistema respecto a una variable clásica cualquiera será; pues, independiente del tiempo. Esto quiere decir que en el sistema no pasa nada, puesto que nada cambia en él.

Esta misma consideración aplicada a un sistema cuya energía no estaba determinada más que aproximadamente, hace notar que existe, en efecto, precisamente la relación de Heisenberg entre el intervalo de indeterminación de la energía total del sistema ( $\Delta E$ ) y la indeterminación en cuanto al instante ( $\Delta t$ ) en que un acontecimiento arbitrario tiene lugar en el sistema:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$
.

Por lo demás, haciendo tender  $\Delta t$  hacia cero, la indeterminación de E es tal, que todos sus valores se hacen igualmente probables. Pero esto quiere decir que la probabilidad de un valor *inferior* a un límite arbitrariamente fijado, por grande que sea, tiende a cero con  $\Delta t$ . El sistema tendrá, pues, una energía indeterminada, pero en todo caso más allá de todo límite, es decir, infinita. Bien entendido, este resultado es todavía independiente de la teoría de la relatividad. Muestra que, según los principios de la mecánica cuántica, un reloj preciso es un absurdo. Volveremos en seguida sobre ello.

Volvamos por el momento a la teoría de la relatividad y observemos que el resultado que hemos obtenido al regular un reloj lo encontramos igualmente al aforar una regla de medida. Para medir la distancia entre dos puntos marcados sobre un cuerpo de masa m hay que comenzar por determinar el lugar de uno de ellos, lo cual llevará ya consigo una indeterminación de la velocidad del cuerpo, que será tanto más grave cuanto mayores sean las exigencias para determinar el lugar. Por consiguiente, no se deberán exagerar aquéllas, para no introducir una contracción de Lorentz demasiado grande y por lo demás desconocida. El concurso de estas dos exigencias conduce a un límite absoluto h para la precisión de medida (la cual, además, no podrá obtenerse más que para una distancia de mismo orden de magnitud).

Para asignar valores numéricos a los límites h/mc,  $h/mc^2$  que se imponen a la precisión de las mediciones necesarias para establecer un cuadro de Lorentz, habría que decidir el valor que pudiera permitirse a la masa m. Con la masa electrónica se trataría de la longitud de onda de Compton (~ $10^{-11}$  cm.) y de la frecuencia de la luz que le pertenece. En mi opinión, éstos son efectivamente los límites que actualmente hay que admitir, por lo menos si se trata de utilizar el cuadro para localizar, en el espacio-tiempo, los electrones y los acontecimientos que con ellos suceden.

En virtud de estas consideraciones, la teoría de la relatividad queda relegada efectivamente al rango de una teoría macroscópica. Por lo menos no conocemos aún sus exigencias en un dominio microscópico del espacio-tiempo. Yo no creo que estas exigencias se traduzcan en lenguaje matemático de manera tan sencilla como hasta ahora se había creído, tomándolo como cosa casi decidida, a

saber: que las ecuaciones de ondas deben ser covariantes respecto al grupo de Lorentz.

Para dudar de ello hay todavía otra razón distinta del defecto de precisión que se impone a la geometría cuadridimensional «en pequeño», por así decirlo. Recuerden ustedes las generalidades de la mecánica cuántica. El tiempo tenía una prerrogativa en ella. La función

$$\psi(q_1, \ldots q_n, t)$$

de las coordenadas y el tiempo se considera como indicadora del estado del sistema en un momento preciso, al paso que todos los otros conceptos heredados de la mecánica clásica, menos el tiempo, deben cambiar de manera que no signifiquen una cosa bien determinada en un estado bien determinado del sistema.

Esta prerrogativa del tiempo aparece bastante improbable en sí misma. Está contradicha, separada e independientemente, tanto por la teoría de la relatividad como por las consecuencias sacadas de la mecánica cuántica respecto a la existencia de un reloj preciso.

Puesto que esta última observación muestra evidentemente una contradicción intrínseca de la mecánica cuántica, podría esperarse que, una vez eliminado este defecto, el desacuerdo con la relatividad desaparecería por el mero hecho. Pero yo creo que esta esperanza es vana. Porque la indeterminación  $h/mc^2$  de los acontecimientos que ocurren en un sistema de masa m es una consecuencia inmediata de las dos cosas siguientes:

1°, el retroceso de Einstein, que le falta poco para ser determinado exactamente por el experimento de Frisch; y

2°, el retraso de un reloj en movimiento, consecuencia inmediata de la idea de la relatividad.

Al exigir el reglaje preciso de un reloj, la relatividad misma se encuentra, pues, en contradicción con sus propios principios, combinados con un resultado experimental.

Me parece muy interesante que las dos teorías más importantes de la física del siglo XX tropiecen ambas a dos con el mismo obstáculo, y conduzca ambas a dos también, a sospechar una especie de *futilidad* de la variable *tiempo*, que está, sin embargo, en la base no sólo de la física, sino también de la vida.

## IV. La estructura del universo en relación con la estructura corpuscular

(1941)

Traducción de Juan Arana

Las experiencias y necesidades de la vida cotidiana están en el punto de partida de toda la ciencia natural. Puede decirse que ocurren en dimensiones y periodos de algún modo comparables con nuestra estatura y la duración del día. Sólo se trata de tres o cuatro potencias de diez en una u otra dirección. Apenas es perceptible la diezmilésima parte de nuestra estatura, mientras que la vista de, digamos, la cumbre de una montaña escasamente sobrepasa cincuenta mil veces la longitud de nuestro cuerpo. Y del mismo

modo, una décima de segundo es quizás el intervalo de tiempo que todavía podría importar en nuestras acciones cotidianas, mientras que toda la vida humana (que, por lo demás, no es ciertamente una experiencia coherente) no dura más que alrededor de doscientos millones de segundos.

A partir de la experiencia cotidiana la ciencia de la naturaleza inorgánica avanza, por así decir, en dos direcciones opuestas: hacia dimensiones y periodos considerablemente más pequeños, y hacia lo que pasa en una escala espacio-temporal mucho más grande. Lo primero es el objeto de la física y la química, mientras que la geografía, la geofísica, la geología, la astronomía y la astrofísica son las ciencias que se mueven en la otra dirección.

Si el título de esta conferencia alude a estas dos direcciones de la investigación humana, no es naturalmente para darles un breve informe sobre el contenido de todas las ciencias citadas. Sólo se trata de señalar una relación probable entre ellas, cierta conexión que creemos existe justo entre los extremos de la escala.

No es seguro que exista esta conexión, pero algunos científicos lo sospechan. Por otro lado, no se trata de cierta semejanza o analogía —como, por ejemplo, la bien conocida semejanza entre el sistema planetario y el modelo del átomo—. Se trata de una conexión intrínseca, que se puede expresar con cifras bien definidas. Si se permite anticipar como cosa cierta lo que, por el momento, no es más que algo presentido con cierta vaguedad, se podría decir: creemos *comprender* que un universo que, a gran escala, muestra la estructura que revela la astronomía, debe necesariamente presentar

a pequeña escala el aspecto que encuentran los físicos y los químicos. El sueño místico de la filosofía natural mágica de la Edad Media parece cumplirse —aunque de manera bastante diferente a lo que se soñó entonces—, a saber: el sueño de la unidad, de la conexión íntima entre el microcosmos y el macrocosmos.

Permítanme que les esboce muy brevemente el estado de la cuestión, de forma estenográfica, por así decir.

La masa ponderable del universo se compone en su mayor parte de una masa-unidad: es la masa del protón, del núcleo del átomo de hidrógeno —muy aproximadamente la masa «1» del químico—.

Estos protones (que, por lo demás, también existen en un estado sin carga eléctrica y entonces se llaman neutrones) se agrupan estrechamente en grupos de 1, 2, 3... hasta alrededor de doscientos cincuenta para formar núcleos de los elementos más pesados. Esta mancomunidad es muy estrecha, siendo siempre la distancia media de 3.10<sup>-13</sup> cm., es decir, alrededor de 30.000 veces más pequeña que el átomo. Es la distancia más pequeña que nunca haya desempeñado un papel en nuestra experiencia, y hay físicos que piensan que es la distancia más pequeña que pueda presentarse en nuestra experiencia. Es cierto que en la geometría abstracta todo intervalo puede ser subdividido una y otra vez: no hay ningún límite en esto. Pero el espacio geométrico es una creación de nuestra imaginación, que ha sido desarrollada para y por el uso de la vida cotidiana. No es en absoluto seguro que la naturaleza posea las propiedades de esta construcción mental cuando se sobrepasan ampliamente los límites en que ha sido formada automáticamente

por la experiencia. En efecto: la idea ingenua del espacio y el tiempo ya ha sufrido considerables modificaciones por la teoría de la relatividad restringida y general, así como por la teoría cuántica. Y, como acabo de decir, hay bastantes indicios para creer que la distancia indicada es algo así como una distancia en principio mínima, es decir: la geometría del mundo es tal que en ella no hay en absoluto distancias menores.

Sea como sea, existe una especie de «gemelo» de esta distancia mínima de la física, a saber, una distancia máxima de la astronomía. Tampoco se trata de algo absolutamente seguro, pero hay muchas razones para creer que el espacio es «esférico», de suerte que dos objetos astronómicos no podrían nunca encontrarse entre ellos a una distancia mayor que una semicircunferencia del espacio; al igual que la máxima distancia sobre nuestro globo es la que existe entre los antípodas. Si ustedes se encuentran por ejemplo en el Polo Norte, no pueden dar un paso en ninguna dirección sin aproximarse un poco al Polo Antártico. Para el espacio es un poco más difícil representarse esta idea, pero acuérdense de que nuestros ancestros experimentaban una dificultad considerable para concebir la idea de los antípodas, que a nosotros no nos incomoda. Se han podido hacer estimaciones de esta distancia máxima, que conducen a algo así como 10<sup>27</sup> o 10<sup>28</sup> cm. Esto representa alrededor de mil millones o diez mil millones de años luz. En comparación, les comunico que los objetos más alejados que se han podido fotografiar con el gran reflector del Monte Wilson se encuentran a una distancia de unos cien millones de años luz; no se trata pues (si estas ideas son justas) más que de un factor de quince o veinte entre su distancia y este límite superior de distancia que creemos existe.

¿Cuál sería entonces la relación entre estos dos «límites»? ¿Cuántas veces habría que multiplicar por diez, y el resultado de nuevo por diez, etc., la distancia mínima para obtener la distancia máxima? ¡Vean que el resultado es de alrededor de 40 veces (10<sup>40</sup>)! Me parece que no es mucho, si ustedes consideran que ya tienen que hacerlo ocho veces (108) entre la distancia de un milímetro y la de cien kilómetros, que ambas son aún directamente perceptibles por los sentidos humanos. No obstante, es un número muy grande. Para ilustrarlo se puede decir que una cadena de protones, agrupados tan estrechamente como los protones en los núcleos atómicos, puesta como «collar de perlas» alrededor de todo el espacio contendría 1040 protones —y tendría una masa total igual a la masa de un cubo de agua de una arista de unos dos kilómetros y medio. Es natural plantearse la cuestión: ¿qué significa eso comparado con el número total de protones en el mundo? Porque, naturalmente, un espacio esférico tiene un volumen limitado (al igual que la tierra tiene una superficie limitada —o más bien finita—) y no contiene más que una masa finita de materia. El resultado es que el número total de protones es alrededor del cuadrado de 10<sup>40</sup>, es decir, 10<sup>80</sup>. ¡Es un resultado bien llamativo! Ilustrándolo de una manera parecida a la precedente, eso quiere decir que si ustedes ponen todos los protones del mundo en una sola capa y a una distancia mutua igual a la que les separa en los núcleos, esta capa tendría una extensión más o menos suficiente para formar una cortina que dividiría el universo en dos mitades (igual que el ecuador divide en dos hemisferios la superficie de la tierra).

Estamos lejos de comprender verdaderamente esta curiosa relación. Pero quizá no es demasiado arriesgado expresarla de la manera siguiente: la magnitud de nuestro universo, medida como múltiplo de la distancia mínima, parece determinar el número de porciones en las que la masa total del universo se divide. Se han hecho tentativas para explicarlo, que sin embargo no son todavía claras ni satisfactorias. No obstante, procuraré presentarles a este propósito un razonamiento interesante de A. Eddington, que no creo muy alejado de la verdad final.

Si el universo es un sistema cerrado («ein in sich geschlossenes Ganzes») que consiste esencialmente en N puntos materiales, entonces esos N puntos representan al mismo tiempo el andamiaje, es decir, el único sistema de referencia, fisicamente determinado, para fijar mentalmente la posición de uno de ellos. Pero en la actualidad nos servimos para este fin, en lugar de ese andamiaje real, de una creación ideal, a saber: un espacio hiperesférico abstracto. Y si decimos que los N puntos materiales están (por lo regular y a gran escala) distribuidos uniformemente en ese espacio, en realidad es más bien el espacio de nuestro pensamiento que, por así decir, se *extiende* entre los N puntos materiales de nuestra observación. Gracias a la enorme magnitud de N (alrededor de  $10^{80}$ ), el espacio ideal está definido con una precisión muy *grande*, pero no con una precisión absoluta, puesto que el número de puntos es de

todos modos *finito*. Eso debe engendrar una *incertidumbre de posición* para cada uno de los puntos, un límite, en principio, a la precisión con que podemos fijarlos. Ahora bien, como (con un reparto uniforme en la hiperesfera) cada uno de los puntos puede ser considerado como el centro de gravedad del sistema total, que por otra parte llena un espacio de magnitud R (~ longitud máxima), es sugestivo admitir que la incertidumbre de posición para cada uno de los puntos sea la misma (o, al menos, del mismo orden de magnitud) que la incertidumbre de posición del centro de gravedad de N puntos materiales, del que sólo se sabe que han sido repartidos por un espacio de dimensiones lineales R *al azar* —y por tanto uniformemente, gracias a su gran número—. En este último caso la incertidumbre de la posición del centro de gravedad (sea =  $\delta$ ) está determinada por una fórmula muy conocida del cálculo de probabilidades, a saber:

$$\delta = R/\sqrt{N}$$

He aquí precisamente la relación que nos ofrece la observación entre la longitud mínima ( $\delta$ ) y la longitud máxima (R),  $10^{-13}$  cm. =  $10^{27}$  cm./ $10^{40}$ .

Aunque todo ello está aún muy lejos de ser una verdadera demostración o explicación, me parece sin embargo que este razonamiento es digno de ser tenido en cuenta.

## El autor

Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger nació en 1887 en Viena,

donde estudió y fue profesor de física en la universidad hasta 1927, año en que fue llamado a Berlín para reemplazar a Max Planck en la cátedra de física. En 1933, al acceder Hitler al poder, decide abandonar Alemania. Ese mismo año le conceden el Premio Nobel, que compartió con P. A. M. Dirac, por la formulación matemática de la mecánica cuántica. Dedicado a



la investigación de la física atómica, física del estado sólido y mecánica estadística, se mostró siempre muy sensible a las implicaciones sociales de la tecnología y preocupado por el aspecto humanístico de la ciencia y la ética científica. Falleció en Viena en 1961, a los 73 años, de tuberculosis. Fue enterrado en Alpbach (Austria).