

Luis González de Alba

**El burro de Sancho
y el gato
de Schrödinger**



Un paseo al trote por cien
años de física cuántica
y su inesperada relación
con la conciencia

El burro de Sancho y el gato de Schrödinger

Comentarios y sugerencias: editorial@paidos.com.mx

PAIDÓS AMATEURS / 1

COLECCIÓN DIRIGIDA POR FERNANDO ESCALANTE GONZALBO

1. Luis González de Alba, *El burro de Sancho y el gato de Schrödinger*
2. Adolfo Castañón, *Por el país de Montaigne*

530.9
9656

742 J
Luis González de Alba

El burro de Sancho y el gato de Schrödinger

1/6
Un paseo al trote por cien años
de física cuántica y su inesperada
relación con la conciencia

135261 4, 8, 14, 20

PAIDÓS 
México • Buenos Aires • Barcelona

Alf 1845-

Cubierta: Joan Batallè
Ilustraciones: Marisol Peral

1ª edición, 2000

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

D.R. © de todas las ediciones en castellano,
Editorial Paidós Mexicana, S. A.
Rubén Darío 118, col. Moderna, 03510,
México, D.F.

Tel.: 5579-5922. Fax: 5590-4361

D.R. © Editorial Paidós SAICF
Defensa 599, Buenos Aires

D.R. © Ediciones Paidós Ibérica, S. A.
Mariano Cubí 92, 08021, Barcelona

ISBN: 968-853-452-8

Página web: www.paidos.com

Impreso en México - Printed in Mexico

Amateurs

PAIDÓS AMATEURS nace de la sospecha de que la manera más gozosa de acercarse a un tema es ser invitado o seducido por un aficionado, profesional no del tema en cuestión sino de la escritura: por alguien tan atento a lo que dice como a su manera de decirlo. En esta colección se reúnen textos sobre los temas más diversos a cargo de poetas, ensayistas o narradores que precisamente no son especialistas en la materia tratada. Por eso está aquí el amante, no el cónyuge; el que pasea, no el que radica; quien lo hace más por placer que por sistema, no por obligación sino por antojo, no en horas de oficina sino en noches de insomnio. Lo que estos libros tienen en común es una declarada veneración por el puro gusto. Queremos así despojar a palabras como «amateur» o «diletante» de su cariz despectivo reivindicando la figura antisolemne del aficionado, con su desenfadada aproximación al saber, y subrayando el aspecto lúdico, placentero, hipnotizador y pasional del conocimiento. Jóvenes,

curiosos, vagabundos y aprendices: seamos partícipes de la mirada fresca de los amateurs o diletantes y dejemos que nos cuenten por qué disfrutan tanto su peculiar y absorbente pasatiempo. Dispongámonos al contagio de su enigmática fascinación y, sí, de su deleite.

*El universo se parece cada vez menos
a una gran maquinaria y cada vez más
a un gran pensamiento.*

SIR JAMES JEANS

Índice

Dedicatoria	13
1. La pirámide que se derrumbó	17
2. Si no se marea... es que no ha entendido	45
3. El <i>quantum</i> en la materia	71
4. El vacío vuelve a llenarse	97
5. La síntesis de Dirac	113
6. El fin de la paradoja	137
7. El invitado faltante	159
8. La física del siglo XXI: las supercuerdas	179
9. El último misterio: la conciencia humana ..	197
10. El inicio egeo de la aventura	233
Bibliografía	265

Dedicatoria

Este libro está dedicado a los jóvenes que piensan elegir carrera profesional. Deseo que la narración de la aventura seguida por la física en los últimos cien años entusiasme a algunas almas inquietas. «El conocimiento es una forma de éxtasis», dice Carl Sagan. Hoy se busca el éxtasis por vías que no siempre terminan bien y el conocimiento es visto con sospecha, hasta con temor. Si el universo que hay en un grano de sal atrae inteligencias juveniles, este libro habrá cumplido su primera finalidad.

También está dirigido a hombres y mujeres que se preguntan qué es el mundo y de qué está hecha la materia, por qué es tan famoso Einstein, quién es Heisenberg y qué preguntas se hacen los físicos por estos años. Intento mostrarles que la ciencia más «dura», la física, plantea mayores portentos y más extraordinarios prodigios que los pregonados por las creencias esotéricas de todo tipo que hoy nos invaden.

Está escrito como una conversación, evitando el lenguaje técnico mientras no haya sido explicado en el mismo texto. Pero, ni modo, no se puede hablar de ciencia sin el lenguaje de la ciencia, así que quien abra páginas al azar encontrará términos «en chino». Es que la única manera de decir «quark» es con la palabra «quark», pero creo haber logrado suficiente claridad en estas explicaciones para hacerlas accesibles a lectores sin conocimientos previos del tema. Por lo mismo, es un libro para leerse desde el principio.

Agradezco mucho la invitación de Fernando Escalante Gonzalbo a escribirlo y la aceptación entusiasta de Editorial Paidós, representada por Laura Lecuona, de incluirme con tan arriesgado tema. En estos meses de trabajo me divertí tanto que espero haber conseguido transmitir al menos una parte de ese gozo a las páginas de una ciencia que tantas personas ven con místico horror.

No agradezco a institución alguna, científica o cultural, ni el menor apoyo. Ni siquiera, vaya, el permiso para usar una buena biblioteca. Me basé en la mía, en mis colecciones personales y pagadas año con año de *Science*, *The Sciences*, *Scientific American* y mi magnífica *Encyclopædia Britannica*, así como en la dotación de libros de física que he acumulado por el simple placer de leerlos y que nadie me ha ayudado a comprar y, peor aún, ni siquiera a conversarlos.

Tampoco tengo a quién agradecer, como se lee en trabajos de este tipo, la «cuidadosa mecanografía» ni la «paciente corrección del original», ni tuve los valiosos comentarios de alguien. Si acaso, las cariñosas y frecuentes interrupciones de Carlos Mendoza Arizmendi.

La pirámide que se derrumbó

Trivia no tan falsa

Es ya lugar común (y probablemente falso) la anécdota según la cual a fines del siglo XIX la ciencia por antonomasia, la física, creía haber hecho su tarea y estaba concluida. John Horgan, quien desde hace años escribe para *Scientific American*, opina que no hay sino una cita para apoyar tan extendida opinión [véase *El fin de la ciencia*, p. 37]. En tal caso estaríamos ante una mentira compartida, como la que sostiene que Ingrid Bergman solicita: «Play it again, Sam», en *Casablanca*; que Galileo murmuró por lo bajo, terco: «E pur si muove» («Y sin embargo, se mueve»), cuando la Inquisición le mostró los instrumentos de tortura con los que le arrancaron el juramento de que nunca más sostendría la falsa doctrina de que la Tierra gira alrededor del Sol en movimiento anual, y en torno de su propio eje, en movimiento diario; o que Carl Sagan decía repetidamente en *Cosmos*: «Billions and billions», como él aclara en su libro póstumo que lleva, a

propósito, ese título, como quien dice: «Pues no lo dije, pero ahora lo diré, pues.»

Quizá estemos ante un caso de falsa trivia científica, con gran éxito por su notoria paradojez, pero grandes y famosos como Steven Jay Gould sostienen que en 1900, al borde de la avalancha de descubrimientos que han moldeado nuestra idea del universo, los científicos creían haber llegado al fin de la ciencia, para decirlo con el título del reciente, brillante y polémico libro de Horgan... salvo uno o dos detalles de poca trascendencia: «Pelillos a la mar», como diría don Quijote para sortear un disgusto en alguno de esos capítulos donde Cervantes se hace bolas y Sancho tiene burro y no tiene burro, tiene burro y no tiene burro. Apenas se lo ha robado Ginesillo de Pasamonte, cuando ya lo monta; lo acaba de montar en lo alto de la página cuando llora por el recuerdo de su pérdida tres párrafos adelante, detalle observado por Erwin Schrödinger durante una conferencia en Ginebra [«What is Matter?»].

Pero quizá la trivia no sea tan falsa. Sostienen Kafatos y Nadeau:

Hacia el final del siglo XIX, lord Kelvin, uno de los más conocidos y respetados físicos por entonces, comentó que «sólo dos pequeñas nubes» permanecían sobre el horizonte del conocimiento en física. En otras palabras, había, desde el punto de vista de Kelvin, sólo dos fuentes de confusión en nuestro por otra parte completo conocimiento de la realidad material: los resultados del experimento de Michelson y Morley, quienes no habían podido detectar la existencia de una hipotética sustancia

llamada éter, y la incapacidad de la teoría electromagnética para predecir la distribución de la energía radiante a diferentes frecuencias emitidas por un ideal «radiador» llamado cuerpo negro. Estos problemas parecían tan «pequeños» que algunos físicos de renombre estaban alentando a quienes contemplaran graduarse en Física a seleccionar otros campos de estudio en los que hubiera mejores oportunidades de hacer contribuciones originales al conocimiento científico. Lo que lord Kelvin no podía haber anticipado era que los esfuerzos por resolver esas dos anomalías conducirían a la relatividad y a la teoría cuántica, o a lo que vino a llamarse la «nueva» física [*The Conscious Universe*, p. 13].

El padre fundador: Max Planck

Lo que es un hecho es que la física, como se la conoció hasta 1900, dio paso a una nueva concepción que nadie habría podido vislumbrar: el espacio no es un enorme agujero donde están colocadas estrellas, galaxias y humanos, sino algo elástico, que hace curvas y está indisolublemente unido al también elástico tiempo; la materia está constituida sobre todo de vacíos enormes circundados por electrones, que no son pequeñas bolitas giratorias sino cargas negativas sin ubicación ni velocidad previamente existentes. Y quien comenzó el derrumbe fue Max Planck con su concepción de *quantum*.

El esquema general de la física, lo que Kuhn llamaría luego «paradigma», funcionaba a satisfacción de todos. Luego de los triunfos de la teoría gravitatoria de Newton, al permitir predecir la existencia de

Neptuno y su ubicación exacta antes de ser observado, había ocurrido la gran unificación de la electricidad, el magnetismo y la luz a cargo de Maxwell. No quedaban territorios por descubrir. Se procedía a llenar huecos en el gran mapa dibujado por Newton y Maxwell sin esperar grandes sorpresas. Dos de tales huecos se habían mostrado particularmente tenaces a los esfuerzos de los físicos y resistían todo intento de solución: la «catástrofe ultravioleta» y el efecto fotoeléctrico.

Con la expresión «catástrofe ultravioleta» se referían los físicos al hecho que veremos enseguida. Es fácil observar que la radiación de un cuerpo varía con la temperatura; por ejemplo, al aumentar el calor en una fragua, un hierro pasa del rojo oscuro al rojo vivo, al naranja, al amarillo y luego al blanco. Las ondas de luz se vuelven amplias hacia el rojo y comprimidas hacia el violeta. Si imaginamos la luz como ondas que se esparcen sobre un estanque al arrojar una piedra, la distancia entre una cresta y otra de esas ondas es mayor en la luz roja y menor en la violeta. Las ondas de luz violeta van más juntas y apretadas; se dice que la longitud de la onda es menor. Si el rojo es una luz con ondas más amplias que el amarillo, podemos decir entonces que, al ir calentando en la fragua el hierro del ejemplo, la longitud de onda de la luz irradiada se va volviendo menor. A mayor temperatura, menor longitud de onda en la luz emitida por un objeto caliente. Dicho a grandes rasgos, la temperatura y la longitud de onda son inversamente proporciona-

les. Esta relación sirve hoy a los astrónomos para conocer la temperatura de las estrellas a partir del espectro de su luz.

El caso teórico perfecto sería aquel donde no tuviéramos un pedazo de hierro, sino un objeto constituido de una materia ideal, materia que absorbera sin desperdicio alguno toda la radiación dirigida a ella (de ahí su nombre, «cuerpo negro»). Expliquemos esto: si un cuerpo blanco es el que refleja todos los colores de la luz visible, uno negro es el que no refleja ninguno; los absorbe todos, y por eso vemos negra una tela, aunque nunca totalmente negra. En un cuerpo negro perfectamente eficiente, la frecuencia y la intensidad de la radiación dependerían sólo de la temperatura. Esta relación entre radiación y temperatura —el color y el calor en el ejemplo del hierro en la fragua— sigue una ley muy precisa y bien conocida por los físicos, sospechada desde mediados del siglo XIX, pero no formulada sino hasta 1893, por Wilhelm Wien. Dicho otra vez: entre más calentemos un objeto, menor será la longitud de onda de la luz que emita.

La radiación sigue las predicciones de la ley hasta un límite, pero cuando el calor supera los dos mil grados centígrados, la radiación (el color) llega al ultravioleta; a partir de allí, los valores predichos por la ley de Wien son infinitos. Un radiador negro debe emitir una cantidad infinita de luz ultravioleta, lo cual es evidente que no ocurre en la realidad. Una ley muy precisa al pasar del rojo al naranja, al amarillo y otras frecuencias, se tambalea a partir del

azul y afirma un sinsentido cuando la frecuencia rebasa el violeta: es la catástrofe ultravioleta. Nadie podía imaginar explicación alguna.

Planck hace paquetes

Max Planck analiza el problema en una obra de título humilde: *The Theory of Heat Radiation*, en cuya segunda parte repasa a Maxwell, Boltzman y Wien en sendos capítulos.

Para resolver el enigma, Planck ideó una solución puramente matemática, sin prueba experimental alguna: si imagináramos la energía no como un chorro continuo de agua, sino de manera discontinua, como un chorro de pelotas, y si además dichas pelotas no fueran siempre iguales, sino que tuvieran cada vez mayor energía al ir del infrarrojo hacia el ultravioleta (digamos, ilustrando la energía con tamaño, pelotas rojas chicas, mayores las amarillas y azules, pelotas violeta grandes y ultravioleta más grandes...); entonces, la catástrofe ultravioleta no ocurría y la ley de Wien daba resultados que podían confirmarse y no esos valores infinitos tan similares a los de la división entre cero. Se trataba de una hipótesis tan *ad hoc* que el mismo Planck la consideró con gran desazón y sólo temporalmente. Resultaba como hacer trampa con las cuentas del mandado para lograr en el cambio la cantidad correcta. Eran demasiados «si» condicionales. Planck calculó qué valor debían tener esos pasos discretos de la energía.

En 1900 dio con un número pequeñísimo, pero exacto, para ajustar los valores en la radiación de cuerpo negro y evitar así la catástrofe ultravioleta: 0.000000000000000000000000655 de centímetro-gramo-segundo. Como hay 26 ceros después del punto decimal, esta infinitesimal fracción se expresa más fácilmente como h , la constante de proporcionalidad o constante de Planck: un producto de la energía por el tiempo. Los científicos, para ahorrar espacio y no estar contando ceros, acostumbran expresar los números muy grandes o muy pequeños con una notación basada en exponentes de diez: 10^2 es 100 ($10 \times 10 = 100$), 10^3 es 1 000. Así, en este caso, la constante de Planck se escribiría 6.55×10^{-27} ergios/segun-do. Hoy se fija con más exactitud en 6.626196×10^{-27} .

El propio Planck expresa así sus dudas en su discurso de recepción del premio Nobel en 1920:

O bien el *quantum* de acción era una magnitud meramente ficticia y, por lo tanto, toda la deducción de la ley de la radiación era ilusoria y un puro juego de fórmulas, o bien en el fondo de este método de derivar la ley de la radiación había un concepto físico verdadero. De admitirse esto último, el *quantum* tendría que desempeñar en la física un papel fundamental y anunciar el advenimiento de una nueva era, acaso destinado a transformar por completo nuestros conceptos físicos, que, desde que Leibniz y Newton introdujeron el cálculo infinitesimal, han estado basados en el supuesto de la continuidad de todas las cadenas causales de acontecimientos [«El origen y el desarrollo de la teoría del *quantum*»].

Saltos de h en h

Han pasado, pues, veinte años y es probable que Planck arregle de manera retrospectiva sus viejas y nuevas concepciones acerca de su descubrimiento. Quizá no en 1900, pero ya plenamente en 1920 tenía claro que si no se trataba sólo de un artificio urdido para ajustar las cuentas de la radiación, sino que la naturaleza se comportara de esa manera, dando esos pequeñísimos saltos, significaba algo todavía más inquietante: que un cuerpo no puede radiar energía en todos y cada uno de los valores numéricos que podamos imaginar, que la columna de un termómetro no puede ser subdividida en unidades tan pequeñas como las podamos marcar, que la energía da saltos de h en h y los da sin pasar por estadios intermedios. Eso va contra todo sentido común. Un conejo que brinca pasa, si bien por el aire, por todos los puntos intermedios entre salto y salto. La energía no. Ahora está aquí, luego está allá. Así dice Tomás de Aquino en su *Summa Theologica* que se mueven los ángeles. A ningún físico le complacía mucho esa semejanza.

A esos paquetes de energía Planck los llamó con el término latino «quantum», que significa «cuanto». Por terminar en «um» es palabra neutra y hace su plural en «quanta». En español podemos, pues, decir «los quanta», o «los cuantos», castellanizado, pero jamás «los quantas».

Planck aceptó los *quanta* de energía sólo porque la solución era inmejorable, pero a la espera de des-
embarazarse de ellos. No lo consiguió porque Einstein

vio en ellos la solución para otro de los detalles molestos que perturbaban el casi perfecto panorama de la física al terminar el siglo XIX: el efecto fotoeléctrico. Su solución acabó de derrumbar la pirámide lentamente construida en quinientos años, con cimientos colocados en el siglo VI antes de Cristo en Jonia, la costa griega de lo que hoy es Turquía.

Luz, más luz

Quizá sea otro mito en la trivia histórica que Goethe al morir dijo, como últimas palabras: «Luz, más luz.» Pero un segundo hueco importante que faltaba por llenar en el mapa bien delineado de la física de fines del siglo XIX trata de la luz: el efecto fotoeléctrico. Consiste en que, de manera a todas luces inexplicable por entonces, la luz arranca electrones de una placa de metal cuando la ilumina, pero, curiosamente, la velocidad a la que son despedidos no depende de la intensidad de la luz, como podría suponerse: una luz más poderosa haría salir los electrones a mayor velocidad, como un golpe más fuerte produce ese efecto en un paquete de pelotas. No era así. La velocidad a la que los electrones eran arrancados del metal dependía del color de la luz que lo iluminara. A más corta longitud de onda, mayor velocidad. La física clásica no tenía respuesta. Pero Planck acababa de ofrecer una con respecto a la energía para explicar la «catástrofe ultravioleta». Si se piensa en la luz como partículas de energía variable dependiendo del color, el fenómeno es claro.

Sólo que los físicos tenían por un hecho perfectamente comprobado en miles de laboratorios que la luz no eran partículas, sino ondas semejantes a las del sonido en el aire o las olas en el agua.

Ibn al-Haytham

Si alguna pregunta se había hecho la humanidad era la referida a la naturaleza de la luz. Los egipcios y luego los griegos y otros pueblos antiguos pensaron que vemos porque el ojo proyecta un rayo sobre las cosas. Así pues, la luz del sol era nada menos que la mirada de Dios. Debimos esperar a que los árabes tomaran la estafeta en la civilización mediterránea para tener un cambio de opinión. En la Bagdad del año 1000 de nuestra era, convertida en centro de todas las artes, la filosofía y las ciencias, un astrónomo y matemático, Ibn al-Haytham, o simplemente Alhazen, hizo los estudios de óptica más importantes en muchos siglos precedentes y subsecuentes. Fue el primer científico en referirse a las postimágenes: si miramos fijamente un objeto luminoso, por ejemplo, desde una habitación en penumbra una ventana abierta al día brillante, y luego cerramos los ojos, veremos la ventana danzar por algunos segundos ante nuestros párpados cerrados. Y aún más, la veremos en los colores opuestos, en negativo. Los verdes y azules se convertirán en una postimagen roja y naranja. Para Alhazen ésa era la prueba de que el ojo recibe y no lanza rayos de luz.

Bien, ¿pero de qué estaba hecha la luz? Cada religión tenía una opinión firme. Pero los científicos habían aprendido a interrogar a la naturaleza, aun sin abandonar sus creencias religiosas. Que Dios había hecho el mundo de manera que pudiéramos entenderlo fue la convicción que nos heredaron los filósofos jonios del siglo VI antes de Cristo. Así que en la Italia renacentista, donde se había inventado la perspectiva para dar apariencia de realidad a la pintura, Galileo sugirió que la luz estaba formada por corpúsculos luminosos que se crean al reducir la sustancia a átomos indivisibles. Este desacuerdo con la doctrina de la Iglesia, sumado a su apoyo abierto y publicado a la teoría de Copérnico, que ponía al Sol en el centro del sistema solar y a la Tierra como un planeta más girando a su alrededor, y sus muchas discrepancias con Aristóteles, el santo sin canonizar de la Iglesia, hicieron que Galileo pasara el final de su vida prisionero en su casa.

Ondas esféricas

Un siglo después, otro grande, Christiaan Huygens, contemporáneo de Newton, propuso la teoría ondulatoria de la luz: «He, pues, mostrado de qué manera uno puede concebir que la luz se esparce por ondas esféricas», sostiene en el primer capítulo de su *Tra-tado de la luz*. Los muy claros argumentos de Huygens sobre la reflexión y la refracción, en el aire y en el «cristal de Islandia», no hicieron mella en la comuni-

dad científica porque sir Isaac Newton, en todo el esplendor de la gloria que un científico puede alcanzar, propuso en su *Óptica* que la luz eran «muy pequeños cuerpos emitidos desde las sustancias brillantes».

Además, había un asunto de la mayor importancia no resuelto. Si la luz se parece a una onda en el agua, respondemos en el ejemplo con facilidad a la pregunta ¿qué es lo que ondula? Ondula el agua. Una botella flotando nos permite ver que cuando es alcanzada y levantada por una ola, una vez que ésta pasa, la botella sigue en su sitio. La ola no es un movimiento *del* agua, sino *en* el agua. Cuando ocurre un sonido, ondula el aire. Bien, si la luz es ondas y éstas nos llegan del Sol, de la Luna, de las estrellas, y por lo tanto atraviesan distancias inmensas de espacio vacío, ¿qué es lo que ondula? Huygens propuso un medio que permeaba todo el universo, al que llamó «éter».

A pesar de esta grave deficiencia en la teoría ondulatoria, pues no había manera de demostrar la existencia del éter, tampoco la teoría corpuscular de la luz pasó sin otras críticas. A mediados del siglo XVIII, más de cincuenta años después de ser publicada la *Óptica*, Leonhardt Euler, uno de los más grandes matemáticos de todos los tiempos, sostuvo que la luz es con respecto al éter lo que el sonido es con respecto al aire. El éter había sido ideado por quienes apoyaban la teoría ondulatoria porque la luz que nos llega del Sol debe cruzar el espacio vacío que lo separa de nuestro planeta. Si la luz es una onda, ¿qué ondula en el vacío? Con esa pregun-

ta se terminaba la discusión porque no había respuesta. Entonces surgió la idea de una sustancia más dura que el acero, y millones de veces más sutil que el aire, que llenaba perfectamente todo el universo: el éter luminífero. El apellido significaba «portaluz».

Durante los siguientes 150 años, los científicos se darían a la tarea de encontrar la forma de detectar el medio que era a la luz lo que el aire al sonido. La evidencia de que la luz era un fenómeno ondulatorio resultaba ya avasalladora, sobre todo a partir de Fresnel y sus observaciones sobre la interferencia.

Augustin Fresnel y Thomas Young

Cuando arrojamamos una piedra en un estanque se forman ondas concéntricas. Si arrojamamos dos piedras las diversas ondas se entrecruzan. Donde coinciden dos crestas, la ola es más alta, pero si coinciden cresta y valle, el agua se aplanan. Interfiere una onda con otra y se cancelan mutuamente [véase la figura 1.1].

De manera similar, donde se intersectan dos haces de luz deben de aparecer rayas más brillantes, como opina el sentido común, pero vemos también rayas oscuras. Si la luz es ondas, al pasar por dos pequeñas rendijas y caer sobre una pantalla debe producir mayor brillo en algunas zonas de la intersección, pero también partes oscuras que demuestren el encuentro de una cresta y un valle de la onda luminosa. Rayas oscuras y brillantes. Era fácil constatar la predicción [véase la figura 1.2].

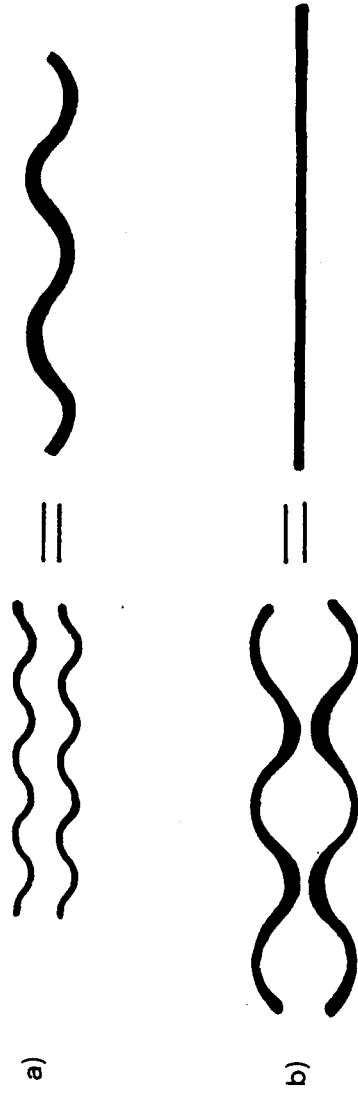


FIGURA 1.1. a) Ondas en fase se suman; b) ondas fuera de fase se restan.

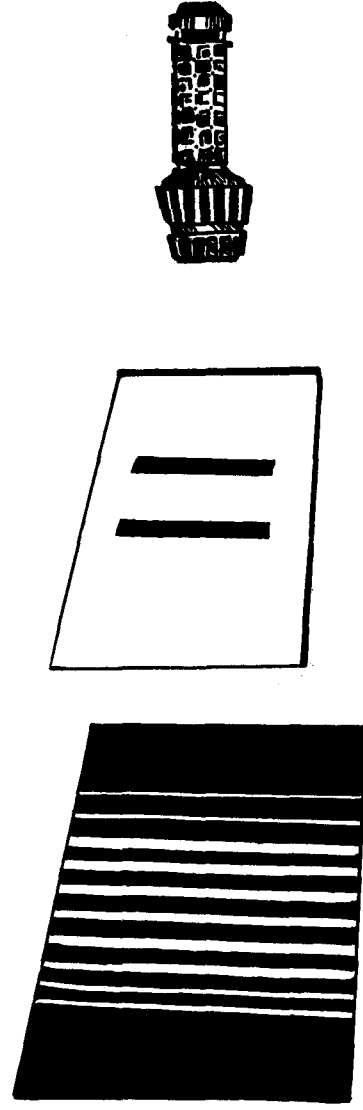


FIGURA 1.2. Interferencia.

De forma independiente, el francés Augustin Fresnel y el inglés Thomas Young propusieron una teoría ondulatoria de la luz. Fresnel, un ingeniero de caminos desconocido hasta entonces, elaboró además el andamiaje matemático de la teoría. Ésta encontró, para empezar, la oposición de nada menos que Laplace. Luego las difíciles ecuaciones de Fresnel, resueltas por Siméon-Denis Poisson, discípulo y amigo de Laplace, demostraron algo que pareció dar al traste con la teoría ondulatoria, al menos en la versión matemática de Fresnel, pues predecían que la luz rodearía un cuerpo opaco y produciría un punto de luz en la zona más oscura de la sombra. Si el cuerpo era lo bastante pequeño, las ondas de luz descritas en las ecuaciones de Fresnel debían encontrarse en el polo contrario a la fuente de luz. Poisson, a quien debemos algo tan actual como sus «Investigaciones sobre la probabilidad de las opiniones» y la tan famosa en estadística «distribución de Poisson», ofreció a sus amigos su descubrimiento como el acta de defunción de la teoría ondulatoria.

Magnetismo hecho con electricidad

Pero en 1820, *ô là, là!*, otro francés, François Dominique Arago, trabajando sobre hallazgos del danés Oersted, había conseguido producir magnetismo con un alambre de cobre electrificado y enrollado en un cilindro. Era la evidencia de que la electricidad y el

magnetismo tenían alguna relación directa. Arago era un convencido de que la luz era una onda. Así que tomó las ecuaciones resueltas por Poisson, diseñó el experimento que debía producir ese punto de luz en la oscuridad, lo llevó a cabo y encontró que el efecto predicho ocurría. El efecto a todas luces absurdo se verificó. Los sarcasmos de Laplace y sus amigos terminaron.

La luz era, pues, una onda sin lugar a dudas. Pero la pregunta básica seguía sin ser respondida. Entre el Sol y la Tierra, en 150 millones de kilómetros de vacío absoluto que la luz atraviesa para llegar a nosotros, ¿qué es lo que ondula? La respuesta fue tan etérea e increíble como siempre: el éter luminoso, más duro que el acero y más sutil que el aire. Pero eso había que probarlo.

Faraday

En el debate acerca de si la luz era ondas o partículas, pronto intervino una noción todavía más misteriosa: el campo.

El inglés Michael Faraday era un hombre profundamente religioso y científico de primera línea. Sus estudios de la luz y de la electricidad cambiaron el mundo. Descubrió que al transmitir electricidad por uno de dos cables, dispuestos muy cerca uno de otro, pero sin tocarse, el cable que no recibía electricidad de cualquier manera mostraba un ligero efecto eléctrico siempre que comenzaba o termina-

ba el flujo eléctrico en el otro cable. Había algo que no pasaba por los cables, pero que alcanzaba al no electrificado, y esto no sucedía de manera constante, sino únicamente al variar la corriente en el cable electrificado, ya fuera que se abriera o se interrumpiera el flujo de corriente. Una onda eléctrica sin un medio identificable. Anotó en su diario el 26 de marzo de 1836: «Entendí que la electricidad, al pasar, produce magnetismo.»

En un segundo experimento descubrió que por medio de un imán podía producir una corriente eléctrica en un cable vecino, y así abrió sin sospecharlo la puerta de toda la producción actual de electricidad en el mundo entero, sea hidroeléctrica, nuclear o eólica, pues en todas ocurre la misma y sencilla acción: un magneto que gira en una turbina produce electricidad en los cables que lo rodean. «En la actualidad, toda dínamo con su zumbido, todo motor eléctrico en su girar, canta un himno de alabanza en honor de aquel inglés genial, sosegado y laborioso» [«Diario de Faraday», p. 272].

Electricidad hecha con magnetismo

Si Arago producía magnetismo con electricidad, Faraday mostraba el inverso de la moneda: producía electricidad con magnetismo. Un magneto alineaba misteriosamente las virutas de hierro en torno de sus polos. La electricidad producía magnetismo que luego producía electricidad. La materia se comportaba

extrañamente, desbordando sus límites aristotélicos, alcanzando una zona del espacio no ocupada por ella. El campo magnético, con sus líneas de fuerza marcadas por las limaduras de hierro, inició el derrumbe de la concepción de la materia dictada por el sentido común.

Maxwell

Un escocés, James Clerk Maxwell, reuniría todo este material disperso en cuatro breves ecuaciones que muestran cómo la electricidad y el magnetismo son expresiones de un fenómeno más fundamental: el electromagnetismo.

La teoría que propongo puede llamarse, pues, teoría del campo electromagnético, porque se refiere al espacio vecino a los cuerpos eléctricos o magnéticos [...]. El campo electromagnético es la parte del espacio que contiene cuerpos en condiciones eléctricas o magnéticas, y los circunda [«Teoría dinámica del campo electromagnético», p. 426].

En cuanto a cómo se transmiten las ondulaciones de la luz y del calor, responde sin dudar: «Lo que ondula es una sustancia etérea.»

Pero lo que se transmitía entre los alambres cercanos de Faraday iba a la velocidad de la luz, según predecían las ecuaciones formuladas por Maxwell, así que el hombre a quien debemos la primera de las grandes unificaciones de la física da un salto

gigantesco y une dos campos que no parecían afines: el electromagnetismo y la luz. «La velocidad se aproxima tanto a la de la luz que, según parece, tenemos poderosas razones para suponer que la luz misma es una perturbación electromagnética» [«Teoría dinámica del campo electromagnético», p. 426]. Por lo tanto, ésta formaba parte del electromagnetismo. Hoy llamamos radiación electromagnética lo mismo a la luz visible que a los rayos X, a las ondas de radio y a las de color azul, infrarrojo o ultravioleta.

En el seno mismo de la física había aparecido un término inmaterial: «campo electromagnético». La luz no era una cosa, sino una perturbación del campo electromagnético. Heisenberg afirma que la imagen materialista del universo era simplista, y que en esa imagen se abrió una grieta en la segunda mitad del siglo XIX con el descubrimiento del campo electromagnético. En sus propias palabras: «En electrodinámica, lo auténticamente existente no es la materia, sino el campo de fuerzas» [*La imagen de la naturaleza en la física actual*, p.12].

Pero la concepción del universo como una maquinaria y de la luz como una parte de esa gran máquina hizo que los científicos siguieran buscando el sustrato material por el que corría ya no sólo la luz, sino el nuevo campo electromagnético de Maxwell. Y la respuesta fue la ya sabida: el campo electromagnético tiene como sustrato físico al éter luminífero.

Michelson y Morley

Casi para terminar ese siglo comenzado con Napoleón, Laplace y su teoría sobre el origen del sistema solar, las guerras de independencia en América, la certidumbre de que la luz eran corpúsculos como decía Newton, más adelante continuado por Fresnel y su prueba indudable de la naturaleza ondulatoria de la luz, y coronado por la gran unificación de Maxwell, persistía la gran duda: ¿existía el éter con sus maravillosas cualidades? Y si no existía, ¿cómo llegan las ondas de luz provenientes del Sol y de las estrellas? Otra vez: ¿qué ondula en el espacio vacío? Se diseñó el experimento perfecto para probar la existencia del éter, y buena parte de los científicos contuvieron el aliento rogando que el éter existiera, con todo y resultar tan perfecto y diseñado a la medida de las necesidades teóricas que era mejor si no existía. Pero si no...

Albert Abraham Michelson nació en un pueblo de Prusia, reino alemán luego unificado en un solo imperio alemán, y hoy, tras dos guerras mundiales, perteneciente a Polonia. Cuando tenía dos años, por la década de 1850, sus padres emigraron a Estados Unidos. Se graduó en la Academia Naval y allí mismo inició su carrera como profesor. Pronto se interesó en la luz y en el problema del éter. Para determinar la existencia de este último concibió uno de los experimentos más importantes de toda la física.

Michelson supuso, primero, que el movimiento de traslación de la Tierra en su órbita debía crear

una corriente de éter, como la que se produce cuando movemos en círculos la mano en un estanque de agua inmóvil. Así pues, enviaría un rayo de luz *contra* la corriente del éter, o sea en el sentido de la traslación de la Tierra, y otro rayo perpendicular al primero. Era como poner a competir a dos nadadores: uno cruzando un río en sentido transversal, digamos cincuenta metros, y otro cruzando los mismos cincuenta metros, pero contra la corriente, según el descriptivo ejemplo de March: «El aparato de Michelson se basaba en una idea notablemente simple. En lenguaje ordinario, era que *se tarda menos tiempo en atravesar a nado una corriente y volver que en recorrer la misma distancia río arriba y volver*» [*Física para poetas*, p. 137]. Aunque ambos nadadores resienten el retraso que les provoca la corriente, pues uno la recibe de lado y lo desvía, y el otro de frente y lo empuja en sentido contrario, es fácil intuir que llegará primero el que nade atravesando el río y no el que recorra esa misma distancia río arriba, pues éste soportará la presión directa del agua en contra.

Un rayo contra el éter

La Tierra viaja a treinta kilómetros por segundo, velocidad que por tanto sería la de la corriente del éter, de la misma forma que si movemos la mano a un metro por segundo en agua inmóvil, un sensor en la mano detectaría una corriente de agua en dirección opues-

ta a la misma velocidad de un metro por segundo. La luz, a 300 000 kilómetros por segundo, debía remontar esa corriente en contra. Otro rayo de luz haría las veces del nadador que cruza el río y sería disparado en sentido perpendicular al primero. Si se pusieran detectores a la misma distancia, el rayo de luz que corra en el sentido de la traslación de la Tierra debería sufrir más los efectos de la resistencia opuesta por el éter al ser cruzado por nuestro planeta. El segundo rayo, perpendicular a la órbita, sufriría menor retraso. Éste sería detectado antes [véase la figura 1.3].

Para decirlo con Feynman sin ecuaciones: el tiempo para ir al espejo lateral y regresar es un poco menor que el tiempo para ir al espejo de enfrente y regresar, aun cuando los espejos estén equidistantes de la fuente de luz. Es la predicción teórica basada en cálculos donde intervienen las transformaciones de Lorenz, las cuales nos podemos saltar aunque nos perdamos la belleza didáctica con que Feynman las lleva en sustituciones algebraicas. Concluye Feynman: «El aparato era ampliamente sensible para observar tal efecto, pero no se encontró diferencia de tiempos: la velocidad de la Tierra a través del éter no podía ser detectada. El resultado del experimento era nulo» [*Six Not-So-Easy Pieces*, p. 57].

Pero eso no fue todo. El fallido experimento tuvo una implicación mucho más profunda, que expresa así el mismo Feynman:

Sin embargo, en muchos otros experimentos para descubrir el viento del éter surgieron dificultades simila-

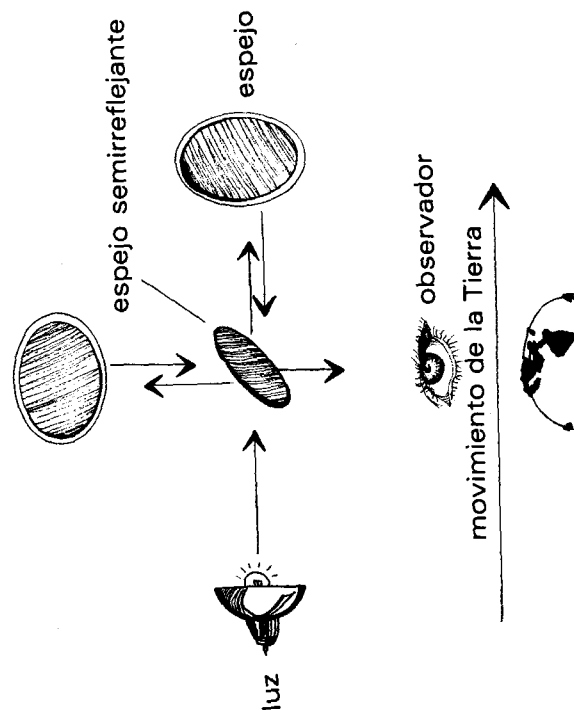


FIGURA 1.3. Esquema del aparato de Michelson y Morley.

res, hasta que pareció como si la naturaleza estuviera en una «conspiración» para frustrar al hombre introduciendo algunos nuevos fenómenos para deshacer cada fenómeno que él pensara que podría permitir llegar a una medición de u [la velocidad absoluta de la Tierra respecto del éter en reposo].

Fue finalmente reconocido, como Poincaré señaló, *¡que una completa conspiración era en sí misma una ley de la naturaleza!* Poincaré entonces propuso que *existe* tal ley de la naturaleza, que no es posible descubrir un viento del éter por *ningún* experimento; o sea, no hay forma de determinar una velocidad absoluta [*Six Not-So-Easy Pieces*, p. 57].

El éter, pues, era algo contra lo cual medir todo movimiento y cualquier transcurso de tiempo. En palabras más técnicas: constituía un sistema inercial preferente. Y está claro que era preferente porque, de existir, todo movimiento podría medirse con referencia a él: si un objeto no se mueve con respecto al éter, está en reposo absoluto en el universo; y si se mueve, podemos medir su velocidad absoluta al cruzar el éter en reposo. Sería como medir la velocidad de un submarino respecto del agua inmóvil que lo rodea.

El aparato

En síntesis, Michelson diseñó un sistema que dividía un mismo haz de luz en dos rayos perpendiculares entre sí, dos rayos en ángulo de noventa grados. Luego, con la ayuda de Edward Morley, construyó un enorme aparato de inmensa precisión y lo puso a flo-

tar en mercurio para evitar toda vibración del exterior. El rayo de luz se debía partir en dos haces en ángulo recto, reflejarse en espejos colocados exactamente a la misma distancia y volver. ¿Pero cómo medir una diferencia tan infinitesimal? Michelson y Morley la midieron con la propia longitud de onda de la luz. Dispusieron un interferómetro que analizaría ambos rayos a su llegada. Si lograban colocarse las ondas de luz cresta con cresta y valle con valle, como una línea ondulada bien superpuesta con otra, o sea en fase, sería prueba de que ambos rayos habían recorrido la misma distancia sin que ninguno de ellos encontrara oposición alguna. Ninguno de ellos habría encontrado corriente alguna producida por el movimiento de la Tierra en el éter inmóvil. En caso contrario, si crestas y valles no se alineaban en el interferómetro al regresar, la discrepancia probaría la existencia de un medio interestelar invisible y la medida de la discrepancia diría mucho sobre las características de dicho medio. En 1887 ocurrió lo primero: el interferómetro no mostró bandas por desfase de los dos rayos, sino la luz de dos rayos idénticos que habían ido y venido sin obstáculo para ninguno. Lo mismo era ir en el sentido en que la Tierra se desplaza que en diagonal, pues el planeta no produce ninguna corriente en su traslación. El río de los dos nadadores estaba seco y caminando habían recorrido sin problema la misma distancia en el mismo tiempo.

Si no había diferencia alguna en los rayos nacidos idénticos y reflejados idénticos, entonces o la Tierra no se movía o no existía el éter. La primera

alternativa era inadmisibile. El sistema copernicano está comprobado de muy diversas maneras y no hay duda alguna de que los planetas giran en torno de su eje y se trasladan en torno al Sol. Debía tomarse la segunda opción. La física estaba en graves problemas, pues, esfumado el éter, ahora debía explicarse cómo es que una onda luminosa (de las que vemos y de las que no vemos, como las de radio o las microondas) atraviesa el espacio vacío donde no hay nada que ondule. Un ruido sin aire. Una ola sin agua. ¿Era posible?

La respuesta de Lorenz y FitzGerald

Hubo una respuesta adelantada de manera independiente por dos investigadores, el holandés Hendrik Antoon Lorenz y el irlandés George FitzGerald: los cuerpos en movimiento se acortan en el sentido de su movimiento. El brazo del aparato de Michelson y Morley se había acortado en el sentido del movimiento terrestre; por lo tanto, la luz en ese brazo había recorrido un trecho más corto que en el perpendicular, lo cual había compensado los tiempos y provocado que parecieran recorridos iguales en tiempos iguales. Ahora conocemos más a Lorenz por el desarrollo matemático de la propuesta: las transformaciones de Lorenz.

El planteamiento, que parecía salvar al éter, en realidad le dio el tiro de gracia porque abrió el camino de la relatividad.

Este acortamiento o relatividad del espacio, y por lo tanto del tiempo, quedaría luego incluido en la teoría de la relatividad de 1905, de la que es elemento esencial al punto de darle nombre. Aunque Lorenz y FitzGerald habían salvado la hipótesis del éter, la teoría de la relatividad la iba a hacer por completo innecesaria.

2

Si no se marea... es que no ha entendido

Einstein: el *quantum* en la luz

Tras este largo rodeo regresamos al problema del efecto fotoeléctrico, planteado anteriormente como uno de los pocos huecos que los físicos no habían llenado para completar el mapa de la física. El efecto fotoeléctrico, por el que la luz arranca electrones a un metal, había sido observado desde 1839, aunque no se tenían entonces los conceptos para formularlo. Fue explícitamente formulado en 1887 por el alemán Heinrich Hertz. Lo más curioso del efecto era que la velocidad a la que salen los electrones no depende de la intensidad de la luz, sino de su longitud de onda, o sea de lo que llamamos color cuando es visible. ¿Cómo podía la luz, que era ondas según tantas demostraciones, arrancar de su sitio partículas de materia?

Siendo un adolescente de 16 años, Albert Einstein se había preguntado cómo se vería un rayo de luz si uno va montado en otro. Respondió que se vería «un campo electromagnético espacialmente oscilatorio

en reposo» [Calaprice (comp.), *Einstein entre comillas*, p. 42]. A los 26 publicaría la teoría especial de la relatividad, donde ofrece mucho más que una explicación para el efecto de la luz en los metales: remodela el mundo.

En 1905, su «año milagroso», Einstein mostró que el efecto fotoeléctrico podía explicarse si aceptamos que la luz, como la energía de Planck, viene en paquetes y no en un chorro continuo. Además, la energía de cada paquete era proporcional a su frecuencia (cuántas ondas por segundo), por eso el color de la luz, y no su intensidad, era la variable de la cual dependía la velocidad del electrón arrancado a una placa de metal. Teniendo la luz ultravioleta mayor frecuencia (más ondas por segundo) que la visible, golpeaba los electrones con mayor energía y éstos mostraban una mayor velocidad. Pero, más asombroso aún, la variación entre la energía de los fotones no se daba de forma continua, sino de acuerdo a un factor de proporcionalidad que era nada menos que la constante de Planck.

Así, de un solo golpe, Einstein resuelve ese problema un tanto menor, además del gran problema de la transmisión de la luz en el vacío, que se ha quedado sin éter para que sus ondulaciones viajen, y el de los molestos *quanta* de Planck, a los que instala para siempre en la física del nuevo siglo. Tuvo en principio la oposición del mismo Planck, quien llamaba a sus hijos, los *quanta* de energía, «la horrenda hipótesis», y deseaba por tanto desembarazarse de ella. Y Einstein le hacía el flaco favor de

instalarlos en la luz. Todavía sin experimentos que certificaran la existencia de los *quanta* de luz, los científicos recibieron con escepticismo o franco rechazo las paradójicas contradicciones de la luz según Einstein. Pronto deberían aprender a pensar en esos y más paradójicos términos, pues en 1916 Robert Millikan comprobó en Estados Unidos la solución propuesta por Einstein para el efecto fotoeléctrico.

¿Ondas o partículas?

Si al atravesar el vacío y al golpear contra las placas metálicas de Millikan, la luz era partículas moldeadas por la constante de Planck, ¿cómo luego era ondas al producir interferencia? ¿Qué hacer con las claras demostraciones de Fresnel y las rayas oscuras y brillantes del espectro, prueba irrefutable de picos y valles, por tanto de ondas de luz? Resultaba violento sostener que la luz a veces se comportaba como partícula y a veces como onda, pero así era. Las unidades de luz de Einstein, los *quanta* de luz, no necesitaban de medio alguno para viajar en el vacío porque eran partículas, y producían rayas oscuras y claras de interferencia... porque eran ondas. Así de contradictorio. El *quantum* de luz era ambas cosas, o mejor todavía, no era ninguna de ellas y nos presenta una respuesta según la pregunta que le hagamos. Si le preguntamos cómo cruza desde las estrellas hasta aquí nos dice que es una partícula; si le preguntamos

cómo arranca electrones a los átomos de un metal, nos dice lo mismo: que es una partícula. Si le preguntamos cómo una partícula cruza por dos rendijas a la vez y sigue dos caminos distintos a la vez (según veremos en el capítulo cuatro), responde que lo hace así sencillamente porque es una onda.

La dualidad de la naturaleza de la luz, implicada en la teoría de la relatividad, traería en el curso de las siguientes tres décadas el levantamiento de la concepción estadística del átomo, esencia de la física cuántica, aspecto que Einstein luego rechazaría terminantemente. Pero sin duda fue él quien jaló la piedra que inició el derrumbe de la casa.

Dos décadas después, en 1926, un químico estadounidense, Gilbert Lewis, acuñó un acertado nombre para el *quantum* o cuanto de luz conjeturado por Einstein. Tomando la palabra griega para luz, «foos», y la última sílaba de «electrón», la partícula de materia descubierta por Thomson, sumó «fotón», nombre con el que conocemos la unidad de luz. A partir de ese momento, los *quanta* se desbordarían por toda la física del átomo, invadiendo las órbitas de los electrones, el núcleo y hasta el espacio vacío mismo, que danza al ritmo de h , la constante de Planck, como iremos descubriendo.

Por lo pronto, había que esperar una solución que parecía milagrosa para resolver el misterio de la dualidad de la luz. El milagro lo produciría el joven Werner Heisenberg cuando desarrollara su teoría. Una espera de dos décadas, pues en aquel momento era un niño de cinco años.

La relatividad

En 1905, cuando Albert Einstein, de 26 años, trabajaba en la oficina de patentes de Berna, Suiza, publicó tres artículos en una revista especializada y prestigiosa, los *Annalen der Physik*, de la que Planck era el director. Cualquiera de los tres habría dado fama permanente a un físico; pero el tercero de ellos hizo algo más: transformó toda la física. Se titula «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento». Es la teoría de la relatividad. Un artículo sin notas ni referencias aparecido en septiembre de 1905 en el volumen 17 de los *Annalen*. Física, cosmología, astronomía, mecánica cuántica y, con ellas, el mundo cotidiano de hoy, son impensables sin ese artículo de Einstein que delinea la teoría de la relatividad. Una década más tarde publicaría la teoría general de la relatividad, su versión de la gravitación universal. Aquí no nos referiremos a ella, pero sí a la relatividad especial en palabras del propio Einstein para explicar su teoría. Es una exposición popular publicada en 1916; el párrafo siguiente está tomado de allí:

Me asomo a la ventanilla de un vagón de ferrocarril que se mueve con velocidad uniforme, y dejo caer una piedra, sin arrojarla. Entonces, haciendo caso omiso de la resistencia del aire, veré cómo la piedra cae en línea recta. El peatón que desde la carretera mire mi fechoría advertirá cómo la piedra al caer describe una curva parabólica. Pregunto, pues, ahora: ¿Se hallan «realmente» en línea recta o en parábola las posiciones recorridas por la piedra? [...] Podemos responder: La piedra recorre una línea recta relativa a un sistema de coorde-

nadas [el vagón del tren]; pero respecto de un sistema de coordenadas rigidamente vinculadas con el suelo describe una parábola. Con ayuda de este ejemplo se ve a las claras que no existen trayectorias independientes, sino tan sólo trayectorias relativas a un cuerpo especial de referencia [«Exposición popular...», p. 497].

Es el «principio de relatividad», que podemos describir con otro ejemplo: cuando un avión toma velocidad en la pista y alza el vuelo, sentimos la aceleración como una fuerza que nos empuja contra el asiento. Pero una vez que el avión ha alcanzado su máxima altura nos parece tan inmóvil como cuando estuvo en tierra. Si una maleta cae de los compartimentos superiores la veremos caer en línea recta sobre el suelo y no irá a dar a la parte trasera del avión; cuando nos sirven la cena, vaciamos un poco de vino de la botella al vaso sin notar que sea diferente a cuando lo hacemos en tierra. Las leyes de la física son idénticas en un restorán y en un avión a mil kilómetros por hora. Ningún experimento nos permitiría saber si viajamos o estamos en reposo; sólo viendo por la ventanilla sabemos que nos movemos. Si fuera de noche, una noche totalmente oscura, con nuestro avión muy por encima de las últimas nubes, y en tales condiciones viéramos acercarse otro avión, tendríamos la impresión de que sólo el otro se mueve. Pero los pasajeros de ese avión pensarían exactamente igual: que ellos están inmóviles y otro avión cruza en sentido contrario. Si medimos el tiempo que tarda en rebasarnos podremos decir que iba a 2 000 kilómetros por hora. Es solamente nuestra experiencia cotidiana la que

nos informa que nuestro avión no puede estar inmóvil en el aire, como un helicóptero, y que por tanto esos 2 000 kilómetros son una suma de nuestra velocidad y la del otro avión.

Otro ejemplo más. Yendo en auto, lanzo al aire una pelota y la veo regresar de nuevo a mi mano en línea recta. Pero quien haya visto, desde fuera, la trayectoria de la pelota dirá que trazó una parábola entre dos puntos de la trayectoria [véase la figura 2.1].

El agua de Newton

En cine se consiguen resultados similares por simple intuición. Cuando vemos un auto en marcha y la cámara enfoca a sus ocupantes mientras corren por una carretera, es frecuente que en la filmación el auto esté inmóvil y contra las ventanillas se haga una proyección en sentido contrario al de la marcha. Así, el director de la película engaña al cerebro del espectador. Éste sabe que los paisajes no caminan y los autos sí; por lo tanto interpreta el paso de los árboles de adelante hacia atrás como movimiento del auto de atrás hacia adelante. Es lo mismo, dice el principio de relatividad.

Para Einstein, el problema mayor con el éter no eran sus características concebidas tan *ad hoc*, sino que «el éter resultaba ser así como una especie de personificación de un espacio en reposo absoluto» [La relatividad, pp. 192-193].

Newton había tratado de definir un espacio absoluto con un cubo de agua. Imaginemos, nos dice,

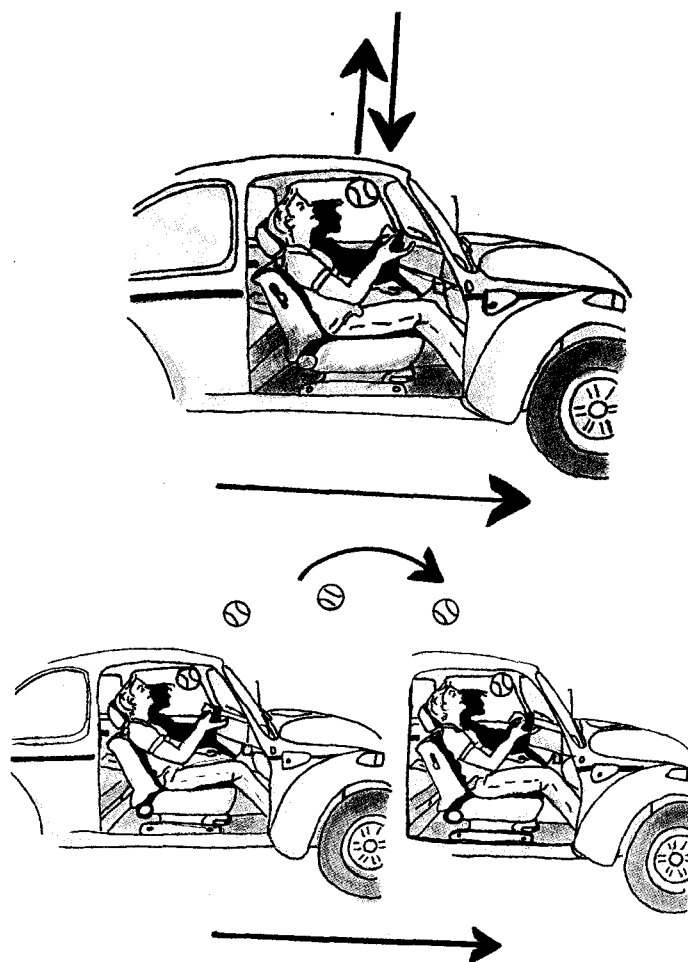


FIGURA 2.1. En un auto en movimiento, ¿la pelota sube y baja en línea recta o traza una parábola?

que todo el universo estuviera vacío, excepto por un cubo lleno a medias de agua. ¿Cómo puedo saber si el cubo está inmóvil o girando? Observo el agua: si está plana, está en reposo; si se curva como un reflector parabólico, está rotando. ¿Pero rotando con respecto a qué? No hay nada en referencia a lo cual comprobar la rotación, ninguna estrella, ninguna marca. Pero la superficie del agua, en el experimento mental de Newton, indica con su forma si el cubo está rotando o está inmóvil en referencia a un «espacio absoluto».

Eran precisamente el espacio y el tiempo absolutos, postulados por Newton, lo que la teoría de la relatividad echaba por tierra: no había ningún punto fijo de comparación para determinar el transcurso del tiempo ni la medida del espacio, o el giro o la inmovilidad de un cubo lleno de agua; de ahí el nombre mismo de «relatividad» del tiempo y del espacio. Reconocer un punto fijo desde el cual medir sería, en palabras de Einstein, otorgar «preferencia a un sistema inercial en particular» [*La relatividad*, pp. 192–193]. Para no entrar en complicaciones, un sistema inercial es el andén y otro un tren en movimiento. Si consideramos que el tren se mueve con respecto al andén y no al contrario, estamos aceptando un «sistema inercial preferente», en este caso el andén. Pero no hay nada similar en el universo con lo cual podamos relacionar diversos sistemas. El paso de un tren puede interpretarse como si fuera el andén lo que se moviera y los vagones estuvieran quietos. «Más aún, según el principio especial

de la relatividad, tal interpretación se justifica plenamente desde el punto de vista físico», concluye Einstein [«Exposición popular...», p. 501].

(El siguiente paso de Einstein: la teoría general de la relatividad, su teoría de la gravitación, diez años después haría al espacio algo aún más inconcebible que llenarlo de éter: lo haría elástico. Un espacio que se contrae y se alarga, se curva y hasta se rompe en una curvatura infinita cuando demasiada masa se concentra en demasiado poco espacio: los hoyos negros. No tenemos una imagen de un espacio tal en cuatro dimensiones; apenas si nos lo podemos representar en dos dimensiones: como un cielo raso elástico al que pelotas de diversos pesos le producen hondonadas mayores y menores. Pero cuando intentamos pasar esa imagen a las tres dimensiones conocidas, ya nos topamos con un límite de nuestras capacidades.)

Hasta aquí no es difícil seguir el razonamiento de Einstein. Pero al sentido común se le complica el aspecto medular de la teoría: la luz como constante en cualquier sistema de referencia. Esto es, una vez que Einstein nos ha convencido de que el movimiento de la piedra al caer es relativo y describiremos trayectorias diferentes, ambas correctas, según el sistema de referencia (suelo o vagón) desde donde observemos, debemos aceptar algo contra toda lógica sensata y toda intuición del mundo, que es lo siguiente. Si en ese mismo vagón juego a la pelota con otro pasajero, estaremos de acuerdo en que si bien la pelota va a, digamos, diez kilómetros por

hora, para quienes estamos dentro, si el tren viaja a cien kilómetros por hora y una persona lo ve pasar desde un andén, dirá que la pelota va a 110 kilómetros por hora cuando la lanzamos hacia adelante, y a noventa al lanzarla hacia atrás. No ocurre así con un rayo de luz. Tanto si encendemos una lámpara en el tren parado o a toda velocidad, si dirigimos el rayo hacia adelante o hacia atrás cuando va en movimiento, la velocidad de la luz es la misma: 300 000 kilómetros por segundo. Es como decir que tanto da correr en una escalera eléctrica en movimiento como esperar de pie, exclamó Bertrand Russell.

La constancia de la luz

La constancia de la velocidad de la luz puede producir extraños resultados. Veamos antes un ejemplo común: un hampón va huyendo en un auto a cien kilómetros por hora. Lo ve pasar una patrulla y se lanza a perseguirlo. Cuando alcanza los cien kilómetros por hora, ¿a qué velocidad se acerca al perseguido? A cero: mantienen la misma distancia indefinidamente, igual que si ambos coches estuvieran detenidos. De pronto, el auto del hampón comienza a fallar y baja a cincuenta kilómetros por hora. La patrulla, que sigue a cien, ahora se acerca al auto del hampón a una velocidad de cincuenta kilómetros por hora. El hampón realiza una maniobra, un bombeo con el acelerador que limpia súbitamente el carburador, y su auto se lanza a 150 kilómetros por hora; ahora la pa-

trulla se está alejando a cincuenta kilómetros por hora. Esto no es nada extraño; los patrulleros saben que deben ir a una velocidad superior a la de otro auto si desean alcanzarlo.

Pero esta patrulla está equipada con un mortífero rayo láser, que viaja a 300 000 kilómetros por segundo, y los policías lo apuntan contra las llantas del auto perseguido. Sólo que el hampón ya ha cambiado su auto por un veloz cohete que viaja a mil kilómetros por segundo. El rayo láser disparado desde la patrulla no se acercará al cohete a una velocidad de 299 000, sino a los mismos 300 000 kilómetros por segundo. Es más, las velocidades no se sumarían ni siquiera si el delincuente decidiera entregarse y dirigiera su cohete hacia el rayo láser; el rayo seguirá aproximándose a la misma velocidad tanto si el delincuente lo espera como si huye de él o se dirige hacia él. En palabras de Greene:

Aunque usted se esté alejando, seguirá midiendo la velocidad de los fotones [la luz] que se aproximan a 1 080 millones de kilómetros por hora, ni una pizca menos [...]. Lo mismo es verdad si usted corre hacia los fotones que vienen o si corre tras de ellos: siempre parecerán viajar a 1 080 millones de kilómetros por hora [The Elegant Universe, p. 32].

Comprobación estelar

Por supuesto que poner a prueba este elemento clave de la relatividad sería difícilísimo en el escaso territorio de un planeta, pero se ha comprobado con luz

de estrellas binarias, estrellas que giran una en torno de otra como las pesas de una mancuerna: la velocidad de su luz es la misma tanto cuando se alejan de nosotros como cuando se acercan.

Esa paradoja había sido propuesta y comprobada por el astrónomo holandés De Sitter, a quien Einstein da el crédito debido, pero él la une al principio ya mencionado de relatividad y de allí saca como consecuencia toda suerte de actos mágicos: relatividad del tiempo y por lo tanto imaginarios gemelos que envejecen a distinto ritmo según si uno permanece en tierra y el otro viaja a las estrellas; los objetos se acortan o achican en el sentido de su marcha; la masa aumenta paulatinamente al aproximarse a la velocidad de la luz; la simultaneidad no existe sino dentro de un mismo sistema de referencia, y dos relámpagos que parecen simultáneos a un observador en tierra no lo son para el viajero en un tren; además, un obstáculo al que se resiste la mente: la velocidad de la luz no sólo es la mayor en el universo, sino la máxima, y nada puede rebasarla, ni la propia luz.

¿Por qué? Porque cuando un cuerpo se mueve, sus dimensiones se acortan en el sentido de su movimiento, según propusieron Lorentz y FitzGerald de forma independiente para explicar la falla en el experimento de Michelson y Morley. Einstein hizo de esa variación parte de su teoría. Este acortamiento o achicamiento de los cuerpos móviles alcanza su máxima expresión a la velocidad de la luz.

El tiempo

Que el tiempo es una cuarta dimensión lo observamos fácilmente al hacer una cita con alguien: «Nos vemos en la esquina de Vallarta y Marsella, tercer piso.» Aquí hay tres elementos: un punto en el plano, dado por dos datos, y un tercer dato que proporciona la altura o tercera dimensión. Pero todavía no podremos asistir a la cita si no nos dicen la hora. «A las 6:30» completa los cuatro datos que se requieren. (El tema de las dimensiones se aborda con mayor amplitud en el capítulo ocho.)

La velocidad es una relación entre el espacio y el tiempo. Decimos «cien kilómetros por hora», lo cual significa que un espacio de cien kilómetros será recorrido en el tiempo de una hora. ¿Pero qué hacemos cuando las dimensiones se nos acortan? Si el cohete en que intenta huir el facineroso va a mil kilómetros por segundo, sabemos que la máquina y su ocupante sufren un acortamiento proporcional a esa velocidad. ¿Qué relación tiene eso con la constancia de la velocidad de la luz? Volvamos al avión donde viajamos a velocidad uniforme y sin aceleración, por lo cual ya no sentimos movimiento alguno. Cuando servimos vino en tierra podemos calcular la velocidad a la que cae los quince centímetros que hay de la botella a nuestra copa. Nos basta un buen cronómetro y un buen ojo. Luego medimos ese mismo acto en el avión que parece inmóvil porque ha dejado de acelerar y la atmósfera está tranquila. El resultado debería ser idéntico si colocamos la

botella a los mismos quince centímetros. Si no lo fuera ya habríamos encontrado una manera de determinar si estamos viajando y no inmóviles. Las leyes de la física no serían idénticas en marcos de referencia distintos (en un restorán o en un avión en vuelo). Lo cierto es que cae de la botella a la copa en el mismo tiempo, cuando hacemos la medición en el viaje sin aceleración. Pero *desde el punto de vista del observador en tierra*, el chorro de vino siguió una trayectoria muchísimo más larga cuando lo servimos en el avión, pues no recorrió quince centímetros en línea recta, sino que trazó una diagonal (más exactamente, una parábola) de unos noventa metros. Nos da tiempos iguales tanto fuera como dentro del avión porque, considerado desde fuera, el chorro de vino siguió una trayectoria más larga, pero también cayó en la copa a una velocidad mayor, pues el observador externo suma la velocidad del avión a la de la caída libre del vino. El movimiento horizontal del avión y el vertical del vino producen una componente diagonal más larga por la que cae el vino también a mayor velocidad. Resultado: tiempos iguales.

Luego de cenar, nos recostamos en el asiento del avión y nos disponemos a leer un libro de física para calcular el tiempo en que recorre el vino los quince centímetros de su caída libre. Encendemos la luz. De nuevo: para nosotros, el rayo de luz bajó en línea recta hasta el libro, pero un observador externo, que se encontraba disfrutando la plácida noche en su jardín, jura que trazó una diagonal, como la

del vino, puesto que vio avanzar el avión. «Cuando la luz se encendió, el avión estaba sobre la torre de la iglesia —explica— y cuando iluminó las páginas de física ya estaba adelante.» Para él, la luz siguió un recorrido más largo: desde la torre de la iglesia hasta el atrio, en diagonal. Si medimos tiempos, encontraremos que tardó lo mismo en llegar del foco al libro, tanto si medimos dentro como si medimos desde fuera del avión. Sólo que en este caso no podemos decir que esa igualdad se deba a que la luz, si bien viajó una distancia mayor, lo hizo a velocidad también mayor pues se sumó la velocidad del avión, como en el caso del chorro de vino. La velocidad de la luz es constante en todo marco de referencia, para el observador en tierra o para el viajero en el avión. Por tanto debemos concluir que sobre el avión, *el tiempo* se modificó. Transcurrió más lentamente, pues la luz sólo avanzó, desde el foco hasta la página, un metro. Un microsegundo del avión es distinto a un microsegundo en tierra.

Volviendo al experimento de Michelson, señala Feynman que el tiempo calculado para el viaje del rayo de luz desde la fuente hasta el espejo y de regreso

no es el mismo cuando es calculado por un hombre que realiza el experimento en una nave espacial en movimiento [o el planeta] que cuando es calculado por un observador estacionario que mira la nave espacial [...]. En otras palabras, cuando desde fuera alguien mira al hombre en la nave espacial encender un cigarro, todas las acciones parecen ser más lentas que las normales,

mientras que para el hombre de dentro todo se mueve a una velocidad normal. Así pues, no sólo las longitudes deben acortarse, sino que también los instrumentos medidores de tiempo («relojes») aparentemente deben hacerse lentos [*Six Not-So-Easy Pieces*, p. 59].

La luz no envejece nunca

A medida que una velocidad se aproxima a la de la luz el tiempo transcurre más lentamente. La clave está en el principio mismo de la relatividad: si podemos considerar, con igual validez, que un objeto se mueve y el otro está fijo, o con movimientos repartidos entre ambos, como en el caso de los aviones al cruzarse, también podemos decir que la luz está inmóvil y que todo el universo se mueve a la velocidad de la luz. ¿Pero no dijimos que no era posible? Da lo mismo decir que el auto corre en un paisaje fijo o que el paisaje corre ante un auto inmóvil. Podemos aplicar esa misma regla a la luz. Con la salvedad de que esa velocidad está combinada, en el caso de la materia, en las cuatro dimensiones, tres de espacio y una de tiempo. Sigamos a Greene en *The Elegant Universe*:

Si un objeto está inmóvil (en relación con nosotros) y consecuentemente no se mueve a través del espacio en absoluto, entonces todo el movimiento del objeto está usado en viajar a través de una dimensión: en este caso la dimensión tiempo. Es más, todos los objetos que están en descanso en relación con nosotros y con cada uno de ellos se mueven a través del tiempo —envejecen— exactamente a la misma velocidad. Sin embargo, si un

objeto sí se mueve a través del espacio, esto significa que algo de su movimiento previo a través del tiempo debe de distraerse [...]. La velocidad de un objeto a través del espacio es, pues, meramente un reflejo de cuánto de su movimiento a través del tiempo se distrae [...]. La máxima velocidad a través del espacio ocurre si todo el movimiento de un objeto a través del tiempo se ha invertido en movimiento a través del espacio [p. 50].

Así pues, cuando un objeto ha invertido toda su capacidad de movimiento en viajar por el espacio, alcanza la velocidad más rápida que cualquier objeto pueda tener, concluye el físico de Columbia. En consecuencia, si todo se ha invertido en las tres dimensiones del espacio, no queda nada para la dimensión tiempo. La conclusión es que lo que viaje a la velocidad de la luz no ha dejado nada para viajar en el tiempo: «Por tanto, la luz no envejece; un fotón que surgió del Big Bang tiene hoy la misma edad que entonces. No hay paso del tiempo a la velocidad de la luz» [*The Elegant Universe*, p. 50].

Poner a prueba la variación del tiempo es en extremo difícil porque las velocidades deben ser muy cercanas a la de la luz para que los efectos sean notorios. Pero la propia naturaleza nos ha dotado de observaciones inesperadas. Un ejemplo de cómo el tiempo se atrasa conforme la velocidad aumenta nos lo da una partícula subatómica llamada muon (o mesón mu). Estas partículas se desintegran en tiempos tan breves como poco más de dos millonésimas de segundo. Los muones llegan a la Tierra y en su mayor parte se desintegran. Pero algunos de ellos,

creados a diez kilómetros de altitud en la atmósfera, pueden encontrarse en los laboratorios que los buscan. Sin embargo, aun a la velocidad de la luz, su vida es tan breve que en teoría no podrían avanzar más de 600 metros. La explicación estriba en que, desde nuestro punto de vista, el tiempo transcurre para los muones más lentamente que para nosotros y pueden así alcanzar el suelo [véase Feynman, *Six Not-So-Easy Pieces*, p. 62].

Al aproximarse a la velocidad de la luz, la masa de los cuerpos aumenta de forma espectacular y con ello su resistencia a la aceleración. No es lo mismo empujar un auto pequeño descompuesto que empujar un tráiler: la masa (el peso, decimos en términos terráqueos) ofrece una mayor resistencia a cambiar su estado inmóvil. Es también lo que llamamos inercia. De ahí que, conforme nos aproximamos a la velocidad de la luz, nuevos aumentos de velocidad sean cada vez más difíciles y obtengan menores resultados. Es como si por empujar el tráiler lo fuéramos volviendo cada vez más pesado, lo cual a su vez nos dificultaría el siguiente empujón. De hecho así ocurre, sólo que el cambio a tan bajas velocidades resulta imperceptible.

Este aumento de la masa con la velocidad puede observarse en los aceleradores de partículas, esos enormes túneles con los que los laboratorios de física sondean el átomo. Así, por ejemplo, comenta Feynman que para guiar la corriente de electrones en el interior del sincrotrón del Caltech se requieren campos magnéticos 2 000 veces más fuertes que

los necesarios si los electrones no fueran acelerados. «En otras palabras, la masa de los electrones en el sincrotrón es 2000 veces mayor que su masa normal» [*Six Not-So-Easy Pieces*, p. 67].

Aceleración, gravitación y tiempo

Otra conclusión en cuanto al paso del tiempo es la siguiente. Quedamos en que a mayor inversión de movimiento en las dimensiones de espacio, menor en la de tiempo, y los minutos y segundos se vuelven más largos a velocidades crecientes. Pero nos falta observar que para Einstein no sólo la velocidad, como la imaginamos todos, entra en consideración. La fuerza gravitatoria, de la que Newton nos dijo cómo era pero no qué era, es en la teoría general de la relatividad, publicada en 1916, una curvatura del espacio y del tiempo, que son ya una sola unidad: el espacio-tiempo. Como una bola de boliche sobre un colchón, las estrellas y los planetas curvan el espacio en sus cercanías. En realidad lo hacemos todos los seres compuestos de materia, pero a escala infinitesimal. Un planeta queda en órbita no a causa de una misteriosa fuerza atrayente, sino porque se limita a seguir la curvatura del espacio producida por una estrella. Un satélite queda en órbita porque sigue la curvatura del espacio producida por un planeta. Si un objeto apareciera en el espacio, la curvatura producida se extendería en todas direcciones, y esa onda avanzaría, cada vez más aplanada, a la velocidad de la luz.

El mismo efecto de la gravitación se obtiene con la aceleración; incluso el cine ha empleado abundantemente esa equivalencia entre una y otra. El principio de equivalencia, de Einstein, estipula que el movimiento acelerado y la gravitación son indistinguibles. Cuando nos muestran una estación espacial con gravitación artificial, ésta se produce por el movimiento rotatorio de la estación, que lanza a todos sus ocupantes contra las paredes más alejadas del eje de rotación. Así pues, basta con ordenar todo para que esas paredes sean el piso, y ya nadie siente que camina por una pared, como araña, sino que ve un piso como lo tenemos por la gravitación terrestre. El campo gravitatorio tiene el mismo efecto sobre el tiempo que la aceleración: el transcurso del tiempo se vuelve más lento conforme más fuerte es el campo gravitatorio. Sobre uno de nuestros grandes planetas, los relojes marcharían más despacio que en la Tierra.

Los hoyos negros

El astrónomo alemán Karl Schwarzschild propuso en 1916 unos cúmulos de gravitación siguiendo cálculos derivados de la teoría de la relatividad. Hoy están comprobados por sus poderosos efectos, aunque sean para siempre inobservables: los hoyos negros; así los llamó John Wheeler. Son los restos de estrellas mayores que el Sol, cuyas capas superiores han aplastado las inferiores con un apachurrón que primero des-

truye los átomos, luego funde los electrones y protones en neutrones y después toda esta gravitación concentrada en apenas dos o tres kilómetros desgarrar el espacio-tiempo con una curvatura de la que nada escapa, ni la luz. Es como colocar una bola de boliche sobre un cielo raso de manta: lo rompe. De ahí lo de «hoyos». Y «negros» porque la «velocidad de escape», la necesaria para vencer la atracción, dentro del agujero debería ser superior a la de la luz. Como tal velocidad no existe ni puede existir en el universo, nada, ni la luz, es capaz de vencer esa fuerza gravitatoria concentrada.

Pero antes de caer hacia el fondo de eso donde nos quedamos sin capacidad de imaginación, existe un borde, llamado «horizonte de eventos», donde una nave podría estar en órbita sin ser absorbida por la monstruosa gravitación del hoyo negro. En ese borde, el tiempo transcurriría tan lentamente que tras circundarlo por un mes, un astronauta descubriría que en la Tierra habrían pasado 800 años. Con apenas las raciones para treinta días y el inicio del tedio, a su regreso el mundo estaría en el 2800.

Así pues, el tiempo transcurre a muy distintas tasas para dos hermanos gemelos, no sólo cuando uno de ellos viaja a velocidades enormes, sino también cuando permanece en un poderoso campo gravitatorio. Es la muy famosa «paradoja de los gemelos» que siempre se menciona al hablar de relatividad. Vemos coincidir aceleración y gravitación cuando deforman los rostros de viajeros espaciales lanzados a velocidad de escape. Se deforman por un au-

mento de la fuerza gravitatoria, o por un aumento de la velocidad; es lo mismo: podemos medir en kilómetros por hora o en unidades *g* de gravitación.

Regreso al tiempo

Así pues, la solución de dos pequeños problemas de física operó la transformación completa de esta ciencia. El resultado negativo en el experimento con el interferómetro de Michelson y Morley creó grandes dificultades en la física, comenta Wolfgang Pauli en su difícil *Theory of Relativity*: «Para eliminar éstas, Lorentz e, independientemente, FitzGerald adelantaron la hipótesis de que todos los cuerpos cambian sus dimensiones cuando se mueven» [p. 2]. Sobre estas bases y el trabajo matemático de Minkowski, Einstein nos cambió el mundo y transformó la física en un sentido que nadie a fines del siglo XIX habría siquiera podido sospechar.

Una de las mayores transformaciones es la referente al tiempo. Nunca más tendremos ese tiempo subjetivo al que todos consideramos fluyendo. De Broglie lo dice en estos términos:

En el espacio-tiempo, todo lo que para cada uno de nosotros constituye el pasado, el presente y el futuro es dado en bloque, y la colección de eventos completa, sucesiva para nosotros, y que constituye la existencia de una partícula material está representado por una línea, la línea-mundo de la partícula [citado en Yourgrau, *Gödel Meets Einstein*, p. 9].

Quizá esté más claro en un fragmento de *Gödel Meets Einstein* que a continuación parafraseo resumido para evitar complejidades filosóficas: A partir del descubrimiento de la relatividad no podemos seguir diciendo que sólo el presente es real («el pasado es el presente desaparecido, el futuro aún no existe»). Un observador *A*, en un marco inercial *M*, mira a otro observador *B* en un marco *N* (lo de «inercial» quedó ejemplificado con el andén y el tren). Ahora consideremos el evento *e* en el futuro de *A*. Según la relatividad, desde el punto de vista de *B* puede ser un evento que ya está ocurriendo. Es presente, es real. «Pero lo que es real para alguien que es real para mí, debe, por transitividad, ser real para mí» [p. 64]. Así es como el futuro se vuelve tan real como el presente. Es más, si el futuro entonces, en un sentido, ya está allí, eso significa que para *A* el futuro está determinado.

Para Roger Penrose, lo que descubrió Einstein «no fue sólo alguna pieza menor de la física, es la cosa más fundamental que tenemos en la Naturaleza: la naturaleza del espacio y del tiempo» [*The Large, the Small and the Human Mind*, p. 25].

(¡Atención! *Achtung!*, sociólogos posmodernos: la relatividad se refiere a las leyes de la física, a que los resultados de un experimento serán los mismos en cualquier marco de referencia elegido, ¡no a que todo marco de referencia *social* sea igualmente válido y las chozas de los cazadores de cabezas tengan el mismo valor que el Taj-Mahal o la Alhambra!)

Con respecto a la vida cotidiana y al pensamiento filosófico, Richard Feynman encuentra tres influencias de la teoría de la relatividad en su artículo «Relativistic Energy and Momentum». Una es que si las leyes de Newton, pareciéndonos tan exactas, resultaron erróneas y sólo aplicables para el limitado rango de las velocidades bajas en las que los efectos relativistas no son detectables, o no lo eran por los instrumentos de hace cien o 300 años, entonces:

Ahora tenemos un punto de vista más humilde de nuestras leyes físicas: ¡todo *puede* estar equivocado!

En segundo lugar, si tenemos un conjunto de «extrañas» ideas, tales como que el tiempo va más despacio cuando uno se mueve, y así por el estilo, el que nos *gusten* o *no* nos gusten es un asunto irrelevante. El único asunto relevante es si las ideas son consistentes con lo que se encuentra experimentalmente. En otras palabras, las «ideas extrañas» sólo necesitan concordar con experimentos, y la única razón que tenemos para discutir la conducta de los relojes y lo demás es para demostrar que aunque la noción de dilatación del tiempo es extraña, es *consistente* con la forma en que medimos el tiempo.

Finalmente, hay una tercera sugerencia que es un poco más técnica, pero que ha resultado ser de enorme utilidad en nuestro estudio de otras leyes físicas, y que es buscar la simetría de las leyes o, más específicamente, buscar las formas en que las leyes pueden transformarse y permanecer iguales [*Six Not-So-Easy Pieces*, p. 77].

Hasta aquí Einstein y la relatividad. Ahora volvamos unos años atrás para seguir la línea de descubrimientos que condujo hasta Bohr y la física cuántica, el otro pilar de la física del siglo XX, y luego atender a la asombrosa discrepancia entre ambas teorías y su intento de fusión. También, como la relatividad de Einstein, el personaje central es Planck y su noción de energía en paquetes, en cuantos. Pero si la relatividad es una teoría de lo inmensamente grande, la física cuántica atenderá lo inmensamente pequeño.

3 El *quantum* en la materia

Joseph John Thomson

Cuando Dimitri Mendeleiev, el químico ruso a quien debemos la tabla periódica de los elementos, descubrió en 1869 ese orden progresivo que comienza con el hidrógeno y va añadiendo elementos cada vez más pesados hasta llegar al uranio y los siguientes, no podía explicar el fundamento de dicho orden. Informaba que existía y predecía elementos por descubrir en los huecos de la tabla, pero le faltaba saber el porqué.

Por la misma época, un monje austriaco de apellido con el mismo inicio, Gregor Mendel, hizo el descubrimiento de las primeras leyes de la genética estudiando sus cultivos de flores de chícharo. Tampoco sabía por qué la transmisión de ciertas características ocurría de la manera por él observada. Habló de «genes» como Planck, décadas más tarde, de «cuantos»: poniendo un nombre a algo desconoci-

do y quizá inexistente, pero que, por el momento, proporcionaba una explicación.

En tiempos de Mendeleiev, la teoría atómica estaba bien establecida en la química. Planteada desde el siglo V antes de Cristo por Leucipo y Demócrito, a principios del siglo XIX la reintrodujo sobre bases científicas John Dalton (cuya ceguera al color dio nombre al daltonismo, por cierto). En su *Nuevo sistema de filosofía química*, sostiene que «todos los cuerpos de magnitud sensible, ya fueren sólidos o líquidos, están constituidos por un inmenso número de partículas en extremo pequeñas, o átomos de materia» [p. 219]. Pero tanto a Dalton como a Mendeleiev les faltaba un elemento esencial para explicar el paso de un elemento a otro: de hidrógeno a helio a oxígeno a hierro a oro. La tabla periódica ponía orden, pero ¿qué subtendía a ese orden? ¿Qué ordenaba los elementos? El peso atómico, es verdad. De menor a mayor. Pero ¿qué era el peso atómico?

Engels acierta sin saberlo

Engels hizo una previsión asombrosa dejándose llevar tan sólo por la ley dialéctica de «la conversión de la cantidad en calidad». Entre sus notas dispersas, amontonadas luego en el volumen póstumo *Dialéctica de la naturaleza*, señala que este proceso es observable en todos los fenómenos naturales. El ejemplo más común lo tenemos con el agua: los aumentos de temperatura alcanzan un límite, pasado el cual ya no

tenemos agua más caliente, sino algo distinto: vapor. Las sumas de cantidades de calor han producido el salto a otra calidad. Señala luego Engels: «Pero el campo en que alcanza sus triunfos más imponentes la ley natural descubierta por Hegel es la química. Podríamos decir que la química es la ciencia de los cambios cualitativos de los cuerpos como consecuencia de los cambios operados en su composición cuantitativa. Esto ya lo sabía el propio Hegel» [p. 44]. Luego observa que si sumamos átomos de oxígeno, al combinar tres átomos en vez de dos obtenemos ozono, «un cuerpo que se distingue claramente del oxígeno corriente, tanto por el olor como por sus efectos» [p. 44].

Entre notas y pedacería se encuentra un párrafo escrito en 1885, donde Engels revisa la tabla periódica de Mendeleiev y subraya las predicciones de elementos desconocidos donde la tabla tiene huecos. Luego llega a su conclusión deslumbrante:

Si todas las diferencias y todos los cambios de cualidad pudieran reducirse a diferencias y cambios cuantitativos, a desplazamientos de lugar, llegaríamos necesariamente a la conclusión de que toda la materia se halla formada por partículas pequeñísimas *idénticas* [subrayado de Engels] y de que todas las diferencias cualitativas que se dan en los elementos químicos de la materia están determinadas por las diferencias cuantitativas, es decir, por el número y la agrupación local de estas partículas mínimas para formar átomos. Pero a semejante resultado no hemos llegado todavía, ni mucho menos [p. 216].

Era 1885. Esas partículas idénticas entre sí que al sumarse producen los saltos de un elemento a otro iban a ser descubiertas doce años después, en un laboratorio no lejano de donde Engels moriría dos años antes del hallazgo, dejando ese y otros manuscritos inéditos y desordenados. Era el electrón. Las leyes de Mendel debieron esperar mucho más: hasta el descubrimiento, en 1953, de la doble hélice del ADN en el núcleo de las células, medio por el cual se transmite la herencia de un ser vivo a su progenie. La tabla de Mendeleiev obtuvo su explicación faltante a fines del mismo siglo en que él vivió.

El electrón

Siempre citado como J. J. Thomson, sir Joseph John Thomson descubrió el electrón en 1897, recibió el premio Nobel en 1906, el título de caballero en 1908 y siete de sus colaboradores fueron posteriormente otros tantos premios Nobel.

Trabajando con la electricidad y el magnetismo, una sola y la misma cosa tal como había demostrado Maxwell, los científicos habían observado que un tubo lleno de cualquier gas y con placas de metal en sus extremos, conectado luego cada uno de éstos a cada polo de una batería, generaba desconocidos rayos que cruzaban de una placa a la otra. Se trata de los rayos catódicos, cuyo nombre deriva de «cátodo», la placa de donde parecen surgir hacia el ánodo o polo opuesto. Concluyeron que tales rayos estaban for-

mados por partículas y no por ondas, porque podían hacer girar una ruedecita muy ligera montada en un eje. Si se colocaban magnetos en torno del tubo se conseguía curvar los rayos.

Pero en su intento por explicar «la discrepancia que existe en el modo como se desvían los rayos catódicos, según que actúen sobre ellos fuerzas magnéticas o fuerzas eléctricas», Thomson llegó «tras largas meditaciones acerca de los experimentos» a las conclusiones siguientes, según su propio relato:

1. Los átomos no son indivisibles, porque de ellos pueden arrancarse partículas cargadas de electricidad negativa [...].
2. Todas estas partículas son idénticas en cuanto a la masa y llevan idéntica carga de electricidad negativa, sea cual fuere la especie de átomos de que salgan, y son elementos constitutivos de todo átomo.
3. La masa de dichas partículas es menos de un milonésimo de la masa del átomo de hidrógeno [«El descubrimiento del electrón», p. 477].

Thomson dio a esas partículas el nombre de «corpúsculos de electricidad». Un nombre más exitoso fue el de «electrones».

Así pues, Thomson, en el Laboratorio Cavendish de Cambridge, Inglaterra, planteó que se trataba de partículas cargadas negativamente y calculó la razón entre la carga eléctrica y la masa de tales partículas. En Estados Unidos, Robert Millikan midió la carga del electrón. Establecida por Thomson la razón entre carga y masa, se obtuvo de inmediato la masa del electrón.

El átomo perdió su característica esencial y de la cual tomaba su nombre: *a-tomo*: sin división. Estaba formado por partículas negativas sumidas en un medio positivo. El átomo debía de tener la forma, como dijo descriptivamente el propio Thomson, de «un pastel con pasas». Los electrones eran las pasas.

Pero el átomo tampoco iba a ser ese racimo de apretadas cargas, sino algo mucho más complejo. Y vacío.

Ernest Rutherford

En 1910, y en el mismo Laboratorio Cavendish de Cambridge, Ernest Rutherford puso a prueba esta teoría del átomo. Disparando las entonces llamadas partículas alfa (que son núcleos de átomos de helio) contra los átomos de una hoja de oro, mostró que algunas rebotaban y señalaban así la existencia de elementos de gran masa, y otras se desviaban de manera no predicha por el modelo del racimo, según el cual debían cruzar sin dificultad, «como balas que perforan una nube de polvo» [Ortoli y Pharabond, *El cántico de la cuántica*, pp. 31-32].

Forward describe así el razonamiento de Rutherford al poner a prueba el modelo atómico de Thomson, quien «veía el átomo como un budín de ciruelas donde los electrones eran ciruelas de carga negativa insertados en un difuso budín de carga positiva». Emplearía la emisión de algunos elementos radioactivos descubierta por él mismo, las partículas alfa, para bombardear el budín:

Si el modelo atómico de Thomson era correcto, las partículas alfa apenas sufrirían perturbaciones en su pasaje por la película de metal. Los electrones de los átomos de oro desviarían algunas partículas alfa, pero muy ligeramente. Rutherford y sus colegas descubrieron que la mayoría de las partículas alfa se desperdigaban en pequeños ángulos. Pero no todas. Un significativo número de partículas alfa se desviaba en ángulos grandes. Algunas rebotaban de la lámina de oro para regresar hacia la fuente emisora. Rutherford dijo después que era como disparar un obús de quince pulgadas a un trozo de papel higiénico y verlo rebotar. El modelo de Thomson no podía ser correcto. Parecía que la mayor parte de un átomo consistía en un núcleo diminuto con carga positiva [Forward y Davis, *Explorando el mundo de la antimateria*, p. 41].

El protón

Así pues, la delgada hoja de oro no era ni pastel con pasas, ni nube de polvo, ni budín de ciruelas, ni papel higiénico. Los proyectiles rebotaban contra algo muy duro que debía de ser un núcleo positivo denso. Los electrones negativos no podían estar pegados al núcleo, sino en órbitas a mucha distancia, dejando vacía la mayor parte del átomo. En 1911, Rutherford propuso «la idea en que el átomo consistía de un núcleo pequeño, masivo, positivamente cargado, rodeado de electrones» [Watson, «Quantum Spookiness Wins...»]. Era allí donde rebotaban las partículas alfa. En 1913, dos de sus jóvenes ayudantes comprobaron el planteamiento teórico de Rutherford con un cuidadoso programa por el que midieron el rebote de las

partículas alfa desde varios ángulos. «E. Rutherford mostró [en 1919] que el nitrógeno bajo bombardeo de partículas alfa lanzaba lo que parecían ser núcleos de hidrógeno. Hacia 1920 aceptó el núcleo de hidrógeno como partícula fundamental, dándole el nombre de protón» [*Encyclopædia Britannica*, entrada «proton»]. El nombre lo tomó de la palabra griega para «primero»: «protos». Identificados los protones, quedó establecido que integraban la mayor parte de la masa en un átomo.

El átomo vacío

En resumen, Rutherford mostró que el átomo no podía ser un racimo de cargas positivas y negativas, sino un gran espacio vacío: un núcleo de partículas positivas, los protones, rodeado de electrones negativos. Para balancear sus cargas debía de existir, por cada protón en el núcleo, un electrón circulando. Así quedó explicado el origen del orden observado por Mendeleiev: en los diversos elementos de la naturaleza se iban sumando electrones y protones. Y la suma de cantidad, uno, dos, cinco, cien electrones, con sus correspondientes protones en el núcleo, producía los saltos de calidad: nitrógeno, flúor, neón, bario, cobre, zinc, manganeso, plomo. La transformación de la cantidad en calidad esperada por Engels a partir de la dialéctica de Hegel.

La nueva imagen del átomo queda así descrita por su descubridor. Tras elegir para su ejemplo «el átomo más pesado, el de uranio», señala:

En el centro del átomo hay un núcleo diminutísimo en torno del cual se arremolina un conjunto de 92 electrones, todos los cuales se mueven recorriendo órbitas determinadas y ocupando, aunque de ningún modo llenando, un volumen muy grande en comparación con el del núcleo [Rutherford, «La estructura eléctrica de la materia», pp. 479-480].

Luego precave sobre los límites de considerar al átomo como un pequeño sistema solar, pues a diferencia del verdadero, el átomo tiene un asombroso equilibrio gracias al cual si una partícula se dispara a través de él puede que pase sin alterarlo, y hasta en el caso de que la partícula arranque algún electrón de su órbita, ésta será pronto llenada por un electrón tomado del exterior y el átomo permanecerá idéntico.

El modelo del átomo de Rutherford resultaba particularmente inquietante porque estaba constituido, casi en su totalidad, de vacío. Un escritorio, tan sólido como lo vemos, está hecho de átomos huecos. Imaginemos un chicharro girando tan alto como las bóvedas de una catedral. Ese enorme hueco demarcado por una partícula diminuta es todo lo que nos queda de la catedral del átomo. Y de ese mismo vacío está hecha toda la materia: las estrellas, los planetas, las flores y los seres humanos.

El neutrón

Pero el modelo pronto presentó problemas: uno, de la mayor importancia, era que los cálculos realizados

mostraban que los electrones debían perder energía y caer hacia el núcleo en una cienmillonésima de segundo. La materia no debía de existir. Pero el hecho es que existe, así que algo fallaba en los cálculos que tan rigurosos y exactos se mostraban al predecir la órbita de un planeta, pero no la de un electrón.

Por otra parte, había átomos que, teniendo la misma cantidad de electrones, poseían distinto peso. Esto es, algunos elementos venían en diversas presentaciones, sin dejar de ser siempre el mismo elemento. Es lo que llamamos isótopos. El hidrógeno viene en tres, pero sigue siendo hidrógeno, aunque en su caso los isótopos reciban nombres distintos: deuterio y tritio.

Tenía que haber, pues, otra partícula, aunque saltaba a la vista que si hubiera un protón extra en el núcleo, la carga quedaría desequilibrada y el átomo tomaría pronto otro electrón. El elemento que producía diversos pesos en átomos del mismo número de electrones (diversos isótopos del mismo elemento) tenía que ser neutro, ni positivo ni negativo, y además, pesar lo mismo que el protón. Ésta fue la propuesta de Rutherford. «Neutrón» resultó el nombre lógico para esa partícula neutra del núcleo si ya se tenían los términos «electrón» y «protón». No existía prueba directa de su existencia, pero resultaba una buena conjetura.

En 1932, un alumno de Rutherford, James Chadwick, encontró partículas que no podían ser desviadas por magnetos; por lo tanto, eran neutras. El neutrón quedó firmemente anclado al núcleo del átomo.

mo. Pero en el interior de éste seguían ocurriendo cosas muy extrañas. Por ejemplo, con las órbitas de los electrones: no se encontraban todas las que el espacio interior del átomo permite. ¿Por qué no? Y, además, ¿por qué no caían los electrones en espiral hacia el núcleo como predecían las ecuaciones?

Bohr: el *quantum* en el átomo

El danés Niels Bohr dejó su país luego de obtener su doctorado y buscó a Thomson en Inglaterra. Trabajó con él en Cambridge; después con Rutherford, ya por entonces en Manchester. En 1913, Bohr regresó a Dinamarca y se dedicó a estudiar la luz. Si ésta, como sostenía Einstein, estaba constituida por paquetes, por cuantos, haciendo así que el reino de las ondas, el electromagnetismo, estuviera formado por partículas, era bien posible que esos mismos saltos cuánticos se aplicaran a las órbitas de los electrones.

Tomando el átomo de Rutherford, semejante a un pequeño sistema solar, Bohr añadió las discontinuidades de Planck, los cuantos. El verdadero «átomo», el mínimo elemento no divisible, era el cuanto de energía; por ende, la energía de los electrones debía de seguir los mismos saltos. Así que hizo dos suposiciones: una, que las órbitas de los electrones sólo podían existir en ciertos niveles o estados permitidos; dicho de otra forma, que el radio de las órbitas no puede variar de manera continua, sino en múltiplos de h , la constante de Planck. La otra fue

que si bien con sus órbitas en tales posiciones el átomo no emite radiación, y en consecuencia permanece sin cambio, cuando un electrón pasa a una órbita más cercana al núcleo emite radiación, y por el contrario, si el átomo absorbe energía ésta exige que los electrones alcancen órbitas más alejadas del núcleo. Lo más notable era que tanto la emisión de energía al bajar de nivel como la absorción al subir se daban en múltiplos de h . También el átomo estaba cuantizado. Bohr de esta manera unía los cuantos de Planck y Einstein con el átomo hueco y casi vacío de Rutherford, semejante a un diminuto sistema solar.

El vuelo de los ángeles

Si las ecuaciones de la física predecían el colapso de los electrones contra el núcleo atómico, los cálculos basados en los valores discontinuos, o cuantos, ya empleados con éxito por Einstein para su teoría de la luz, daban resultados concordantes en todo con la realidad: los átomos no se colapsan, y eso es lo que predice el modelo cuántico. Se comenzó a emplear adjetivos diferentes para la física: «clásica», cuando no consideraba a la energía subdividida en pequeñas unidades; «cuántica», cuando echaba mano de los paquetes de energía sugeridos por Planck.

En esta descripción había un elemento aún más inconcebible para el sentido común: al cambiar de una órbita a otra, el electrón no pasaba por los esta-

dos intermedios por la sencilla razón de que son posiciones no permitidas por la división cuantizada de la energía. Si un electrón, en su camino a una órbita más cercana o más alejada del núcleo, pudiera pasar por los puntos intermedios, sería señal de que puede *existir* allí, pero las nacientes matemáticas de la física cuántica, guiadas por la constante h , sostenían que el electrón no puede existir en tales posiciones, ni siquiera por el instante en que atraviesa por ellas. En consecuencia, no pasa por las posiciones intermedias. Una vez más los físicos se topaban con el movimiento de los ángeles descrito por santo Tomás de Aquino en su *Summa Theologica*.

Cuando la teoría de Bohr fue comprobada en el Laboratorio Cavendish, durante el otoño de 1913, la física clásica llegó a su fin en el ámbito del átomo. Lo que seguiría iba a arrancar la conocida expresión de Bohr: si al pensar en la mecánica cuántica usted no siente vértigo... es que realmente no ha entendido.

De Broglie: las ondas de materia

Si de acuerdo con Einstein la luz, energía, son partículas, ¿no podemos decir que las partículas, materia, son ondas? No había dato alguno experimental para apoyar semejante sugerencia en 1923, pero daba tan perfecto equilibrio al nuevo edificio de la física que resultaba imposible evadir su belleza intelectual. Por razones estéticas, no experimentales, el francés

Louis de Broglie propuso ese año que la esencia de la materia, las partículas subatómicas, como los electrones y los protones, eran ondas. Propone, pues, que a toda partícula se asocie una onda cuya longitud estará determinada por dos elementos: uno, la constante de Planck (que aparece una vez más), y dos, el producto de la masa y la velocidad de la partícula. Era como decir que una canica debía considerarse en adelante un sonido.

La única base teórica para tan atrevida generalización era la unión de dos ideas. En términos generales consistían en tomar la más popular ecuación de Einstein (y de toda la física), que muestra cómo se relacionan la energía y la masa: $E=mc^2$ (la energía, E , es igual a la masa, m , por la velocidad de la luz, c , al cuadrado). Luego se decía: ya Planck mostró que E , la energía, está formada por paquetes, cuantos, que es una forma de ser discreto (con límites) como una partícula, y tanto él como Einstein relacionaron la energía con la frecuencia de las ondas (recordemos la solución de la catástrofe ultravioleta y del efecto fotoeléctrico); por lo tanto, la masa, m , en el otro lado de la ecuación y relacionada por un signo de igual, también debía de tener una expresión como onda. E y m ¿no son declaradas por Einstein como iguales una vez añadido el factor de la velocidad de la luz?

Al detallar su audaz generalización de los cuantos a la materia, De Broglie explica que no considera a la partícula como caracterizada por una longitud de onda pura, sino por un paquete de ondas. El

mejor ejemplo es, de nuevo, el sonido. Un sonido en un instrumento musical o en una garganta no se produce por una onda pura, sino por el tono y sus armónicos, que contribuyen a la belleza y al misterio del sonido. Así, la partícula debía considerarse un paquete de ondas. Algunas se cancelan entre sí, como la ola que se encuentra con el valle de otra, pero en un punto convergen aproximadamente las crestas, como varias olas en el agua, cuando coinciden sus alturas y se suman en una ola más alta. Entonces la ola avanza dejando tras de sí una cola que disminuye paulatinamente. Así debíamos ver al electrón en su órbita: como una ola alta donde se encuentra la partícula, seguida por una cauda en la que el paquete de ondas se cancela paulatinamente.

La materia se hace ondas

Dicho en palabras de Louis de Broglie: «Ya no podemos representarnos el electrón como diminuto corpúsculo de electricidad: tenemos que asociarle una onda. Y esta onda no es mera ficción: puede medirse su longitud, calcularse de antemano su interferencia [«Mecánica ondulatoria», p. 518].

Queda claro que si las partículas materiales son ondas, deben producir, como la luz, un fenómeno de interferencia que consistiría en mostrar bandas oscuras y brillantes en el espectrógrafo. Oscuras donde coinciden valle y cresta, brillantes donde dos crestas suman su efecto.

Apenas cuatro años después, en 1927, dos investigadores observaron en Estados Unidos que un haz de electrones producía sobre una placa fotográfica el rayado típico de la interferencia. Sin duda, los fundamentos de la materia eran ondas, pues producían los mismos efectos ópticos que la luz... que estaba constituida de partículas, según Einstein.

De Broglie no se preguntaba si la materia estaba formada por ondas o por partículas. Afirmaba que era ambas cosas de manera simultánea, como la luz de Einstein. Las ondas de materia se mostraban como partículas en la región de coincidencia del paquete de ondas. Y así era como producían las órbitas «legales» postuladas por Bohr, que sólo se permitían ciertos niveles y no otros. A sólo dos años de comprobarse su intuición, en 1929, el príncipe Louis de Broglie recibió el premio Nobel de física.

Conclusión del edificio: Schrödinger y Heisenberg

En 1921, el austriaco Erwin Schrödinger (se lee «shroedinger») formula las bases matemáticas del paquete de ondas postulado por De Broglie y en 1926 Max Born les da forma definitiva. Con su ecuación describe el comportamiento del electrón. Esta interpretación plantea que el paquete de ondas que conforma el electrón debe verse como una probabilidad. Esto es, el átomo es como un puñado de arena, donde cada grano indica una probabilidad mayor o menor de presencia

de la partícula-onda. En algunas partes la probabilidad de existencia es mayor, en otras menor. De esa manera, la ecuación de Schrödinger describe las probabilidades que gobiernan el movimiento de las partículas subatómicas. Su autor la puso a prueba aplicándola al átomo de hidrógeno, el más sencillo, y prediciendo sus propiedades con una exactitud nunca igualada por ningún otro instrumento matemático. Esta interpretación sigue vigente, y con gran éxito, en la física de nuestros días. Su poder de predicción rigurosa la hace uno de los instrumentos más perfectos desarrollados por la humanidad.

Un joven alemán de 26 años, Werner Heisenberg, dio en 1927 el paso definitivo para derrumbar la física clásica y terminar los cimientos de la física cuántica. En ese año podemos ubicar la fecha de nacimiento de la nueva ciencia que se había comenzado a gestar en 1900. En esos 27 años la física se transformó más profundamente que en los dos milenios y medio contados a partir de la *Física* de Aristóteles. Incluso en el átomo de Rutherford y Bohr, ya tan vacío y con órbitas prohibidas, se esperaba que la maquinaria funcionase conforme a las leyes de la materia. El átomo era como un delicado mecanismo de relojería, si bien hueco y constituido mayormente por vacío. Pero cuando De Broglie lo convirtió en ondas ocurrió algo de extrema gravedad: la materia nunca más fue esa aristotélica sustancia con un lugar que no puede ser ocupado por otra sustancia simultáneamente. Ya la introducción de los saltos cuánticos a las órbitas de los electrones, por parte

de Bohr, había tambaleado la imagen mecánica del sistema solar en miniatura, aunque seguía siendo un nanoaparato que giraba como un motor.

Pero cuando los electrones y los protones de la materia fueron observados comportándose como ondas, no dejaron rastro del mecanismo de relojería giratoria ni de sustancia aristotélica. «Obviamente los cuerpos físicos contienen superficies y volúmenes, líneas y puntos», sostiene Aristóteles en la *Física* [libro II, capítulo 2]. A partir de la generalización concebida por De Broglie y su rápida comprobación experimental, los cuerpos físicos más pequeños, los de orden subatómico, dejaron de tener «obviamente» los rasgos sensatamente señalados por Aristóteles. Incluso dejaron de ser «cuerpos físicos».

Sujeto y objeto se desvanecen

También Einstein había transformado la física para siempre con su teoría de 1905. Pero aún quedaba algo, lo finalmente desechado por Heisenberg, quien lo explica con esta sencillez en las primeras palabras de la conferencia sobre el principio de incertidumbre, parte de una serie pronunciada en 1929 en la Universidad de Chicago:

Por grandes que sean las exigencias de aptitud para el pensamiento abstracto por parte de la teoría de la relatividad, ésta satisface los requisitos tradicionales de la ciencia; permite una división del mundo en sujeto y objeto, observador y observado, y, por tanto, una for-

mulación clara de la ley de causalidad [«El principio de incertidumbre», p. 523].

Cuando quedaba tan poco de la noción de materia, como la sensata, intuitiva y científicamente necesaria causalidad, Heisenberg desechó esos restos estableciendo en el corazón de la materia la contradicción más íntima: incertidumbre. Hasta el lenguaje está construido para que las cosas sean o no sean, como se interroga Hamlet. Lo poco que restaba de la noción de materia acabó para siempre aplastado bajo el principio de *incertidumbre*, descubierto por Heisenberg, y meollo de la nueva física. Las órbitas limitadas del átomo desaparecieron y los electrones como pequeñísimos trozos de materia también. Y algo todavía más importante: la causalidad (esto es, el principio de que a todo efecto le antecede una causa) dejó su milenaria plaza a la incertidumbre.

Si Rutherford había descubierto que la materia está constituida esencialmente de vacío y De Broglie que la materia eran ondas, Heisenberg desarrolló una rigurosa teoría matemática según la cual no sólo ambos estaban en lo cierto, sino que además no existen órbitas definidas para los electrones y éstos no tienen posición ni velocidad dentro del átomo. No es que no sepamos la velocidad mientras no la midamos, afirmación fácil de aceptar por evidente, sino que *un electrón no tiene velocidad ni posición ni órbita definida mientras no exista una observación*. Así como suena. Y de aquí en adelante tendremos

como único consuelo la paradoja de Bohr: si no sentimos vértigo ante la mecánica cuántica es que no hemos entendido. Suponemos que el vértigo nos ataca ante lo desconocido. Bohr nos previene de que será a la inversa: sentiremos vértigo al conocer. Ésa será la firma de que comprendemos.

La incertidumbre

El principio de incertidumbre, en palabras de Heisenberg, es una transformación completa de la relación entre el observador y lo observado. La diferenciación clara entre la *res cogitans* (más o menos el pensamiento) y la *res extensa* (más o menos la materia), tan importante para Descartes, se esfuma, se escapa como agua entre los dedos. En las conferencias que en 1929 dio en la Universidad de Chicago, ya citadas, Heisenberg planteó así el principio de incertidumbre:

En las teorías de la física clásica siempre se ha dado por supuesto, o bien que dicha acción recíproca [entre el observador y el objeto observado] es tan pequeña que puede despreciarse [el observador casi no afecta al objeto observado], o bien que su efecto puede eliminarse del resultado, mediante cálculos fundados en el *control* de los experimentos. Tal suposición no es lícita en física atómica: la interacción entre el observador y el objeto produce cambios grandes e imposibles de fiscalizar, a causa de las mudanzas discontinuas características de los procesos atómicos. La consecuencia inmediata de esta circunstancia es, en general, que todo experimento realizado para determinar algunas cantidades nu-

méricas hace ilusorio el conocimiento de otras, puesto que la perturbación, imposible de fiscalizar, del sistema observado altera los valores de las cantidades antes observadas. Si estudiamos esta perturbación en sus pormenores cuantitativos, veremos que en muchos casos resulta imposible obtener una determinación exacta de los valores simultáneos de dos variables; antes al contrario, la exactitud con que pueden conocerse tiene un límite inferior.

El punto de partida de la teoría de la relatividad era el postulado según el cual no hay velocidad que sea mayor que la de la luz. De manera semejante, ese límite inferior de la exactitud con que pueden conocerse ciertas variables puede postularse como ley de la naturaleza, bajo la forma de las llamadas relaciones de incertidumbre [«El principio de incertidumbre», p. 523],

Sin palabras

Así pues, enfatiza Heisenberg, el principio de incertidumbre o de indeterminación no responde a una incapacidad de nuestros instrumentos actuales, sino que es un estado de la propia naturaleza. La paradoja inescrutable por la que tanto la materia como la radiación muestran características de onda y de partícula, siendo que se trata de conceptos contradictorios, lo explica Heisenberg atribuyendo la paradoja a la incapacidad de nuestro lenguaje, y diríamos de nuestro pensamiento, para describir los procesos atómicos. Nada tiene esto de extraño, pues son procesos que comenzamos a entrever en este siglo y ni los idiomas ni el pensamiento habían jamás requerido los nuevos conceptos. No hay por tanto palabras para ex-

presarlos, ni imágenes mentales para representarlos. «Por fortuna, las matemáticas no están sometidas a semejante limitación; y así ha sido posible inventar un esquema matemático —la teoría del *quantum*— que parece del todo apto para tratar los procesos atómicos», concluye en la misma conferencia.

Para tratar esa paradoja, y muchas otras que vendrían apareciendo, Niels Bohr introdujo el concepto de «complementariedad». Lo explica así Heisenberg:

Dicho concepto significa que diferentes imágenes intuitivas, destinadas a describir los sistemas atómicos, pueden ser todas perfectamente adecuadas a determinados experimentos, a pesar de que se excluyan mutuamente. Una de ellas, por ejemplo, es la que describe al átomo de Bohr como un pequeño sistema planetario: núcleo atómico en el centro, y una corteza de electrones que dan vueltas alrededor del núcleo. Pero para otros experimentos puede resultar conveniente imaginar que el núcleo atómico se halla rodeado por un sistema de ondas estacionarias [«La imagen de la naturaleza en la física actual», p. 35].

De igual forma, unas veces resulta conveniente imaginar al electrón como una onda y otras como una partícula. No es sino el experimento lo que determinará el comportamiento del electrón como una cosa o la otra. Onda y partícula son estados complementarios. El electrón es ambas cosas mientras un experimento no determine alguna de ellas. Es la solución de Bohr a lo que no entendemos.

Más incertidumbre

Los componentes de la luz y de la materia se comportan como ondas unas veces y otras como partículas porque no son una cosa ni otra. La incertidumbre está en la naturaleza misma. Otra incertidumbre muchas veces ejemplificada en los libros de física, hasta en los más elementales, habla de la imposibilidad de asignar a un electrón, de manera simultánea, una velocidad y una posición. A mayor determinación de una, mayor indeterminación de la otra. Se debe, explica Heisenberg, a que los conceptos empleados: velocidad, posición y otros, proceden de nuestra experiencia cotidiana y realizada con objetos comunes.

Luego se han aplicado los mismos conceptos al electrón porque en ciertos experimentos fundamentales el electrón se comporta, desde el punto de vista mecánico, de manera parecida a los objetos de la experiencia común [...]. La velocidad del electrón corresponde a la del haz de ondas, pero este último no puede determinarse con exactitud a causa de la difusión que en él ocurre. Esta indeterminación ha de considerarse como característica esencial del electrón [«El principio de incertidumbre», p. 524].

Esto es, para plantearlo con un ejemplo del mundo cotidiano: si la fotografía de un objeto nos sale borrosa no es por culpa de nuestra cámara o de nuestra ineficacia, sino porque el objeto mismo es borroso. Se distribuye en el espacio como diversas probabilidades de ser. Es la incertidumbre de los números antes de caer los dados: pueden ser una combina-

ción, pueden ser otra; pero una vez que caen los dados y quedan inmóviles, tienen un solo valor.

Suponer que la incertidumbre se debe a la ineludible necesidad del experimentador de «tocar» y en consecuencia alterar de alguna manera su objeto de estudio es una trivialidad. En efecto, todo estudio modifica al objeto estudiado, no sólo cuando lo deshace en sus piezas y por ende lo destruye, sino hasta cuando lo ilumina. Y cuando iluminamos algo tan pequeño como una molécula, los fotones se convierten en bólicos destructores a pequeña escala que entran, literalmente, a la velocidad de la luz, rebotando contra lo que encuentran, arrancando electrones de sus órbitas y haciendo toda clase de perjuicios, alterando y revolviendo átomos y dejando finalmente al investigador en absoluta incapacidad para saber cuál era la situación anterior. El premio Nobel Dennis Gabor sostuvo algo que parece obvio: ninguna observación puede hacerse con menos de un fotón. Así que tendremos al menos el disturbio producido por un fotón; pero éste es un problema técnico y no una incertidumbre esencial a la naturaleza. Si es técnico es por lo tanto trivial. Además fue resuelto en 1996, cuando, en abierta contradicción al postulado sensato de Gabor, los investigadores de la Universidad de Innsbruck (Austria) Paul Kwiat, Harald Weinfurter y Anton Zeilinger realizaron mediciones libres de toda interacción con el objeto. Empleando precisamente las leyes del asombroso mundo cuántico —entre ellas el enlace permanente de dos partículas demostrado por Alain

Aspect en la Universidad de París, como veremos en el capítulo seis— pudieron hacer algo equivalente a conocer el contenido de una caja cerrada sin abrirla ni dirigir sobre ella ninguna forma de radiación. «La imagen es hecha por fotones que no han tocado jamás el objeto» [«Quantum Seeing in the Dark»].

Argumentar el desorden producido en el objeto de estudio hasta por la simple iluminación como si fuera la esencia del principio de incertidumbre es no haberlo entendido en absoluto. No podemos conocer de manera simultánea ciertas variables del mundo subatómico no por problemas con la iluminación, sino porque no están determinadas, no existen, antes de la observación. Esto es, no hay variables ocultas, como la posición y la velocidad, que estén allí pero no las hayamos medido, sino que ni la velocidad ni la posición existen. Y cuando una observación determina alguna de las variables, la misma observación hace más nebulosa la otra variable. Así pues, no es que no podamos «ver» un electrón sin disturbarlo porque debamos iluminarlo y los fotones de nuestra luz cambien la situación. No podemos precisar posición y velocidad porque antes de observar el electrón éste no tiene posición ni velocidad determinadas. Y, de hecho, ya se explicó que sí podemos «ver» un electrón sin tocarlo en absoluto con nada, como lo demostró el experimento de Innsbruck.

Culminación del edificio

Podríamos decir que con el principio de incertidumbre de Heisenberg culmina, en 1927, la construcción del nuevo edificio de la física, conocido con diversos nombres: mecánica cuántica, mecánica ondulatoria o, por lo poco que resta de mecánica, simplemente física cuántica. A partir de ese año la física no ha cesado de producir resultados contraintuitivos. El más contrario a la intuición, por sorprendente, fue la oposición de Einstein a las bases probabilísticas de la nueva física. «No puedo creer que Dios juegue a los dados con el mundo» es su famosa expresión.

Pero si bien la nueva física está completa, todavía en 1952 dirá Erwin Schrödinger en «What is Matter?», refiriéndose a las partículas subatómicas a las que él ha dado la más acabada y exacta expresión matemática:

Si ustedes finalmente me preguntan: «Bueno, ¿qué son esos corpúsculos, realmente?», les debo confesar honestamente que estoy casi tan poco preparado para responder eso como para decir de dónde vino el segundo burro de Sancho Panza.

Los físicos del año 2000, si tienen la misma honestidad intelectual de Schrödinger, deben responder que, habiendo precisado la masa, la carga, el spin y múltiples variables con un nivel de exactitud inigualado para cuanta partícula ha aparecido, siguen todavía sin poder responder a la pregunta: ¿qué es un electrón?

4 El vacío vuelve a llenarse

Einstein contra la incertidumbre

Disgustado con principios como el de incertidumbre en el seno de la física, Einstein se propuso demoler el edificio recién terminado. Su primer asalto lo dio precisamente sobre el principio de incertidumbre. «Los últimos años de la década de 1920 resonaron con el ding-dong de la batalla entre Einstein y Bohr», comenta John Polkinghorne, a quien parafrasearemos en los siguientes párrafos evitando las sutilezas matemáticas, que si bien no son difíciles de comprender, resultan molestas para una cantidad sorprendente de lectores.

El *round* final en la pelea tuvo lugar en torno a una ecuación, mejor dicho una desigualdad. En resumen, la incertidumbre plantea en esa desigualdad que un electrón puede tomar prestada energía para realizar una acción de la que no es capaz, siempre y cuando la devuelva en instantes acotados por la infinitesimal constante de Planck. La incertidum-

bre de la energía puede tomar el préstamo del tiempo y permitir, por ejemplo, que el electrón cruce una barrera para cuya acción no tiene suficiente energía. Se llama «tuneleo». Un ejemplo de la vida cotidiana sería tan absurdo como el siguiente: voy corriendo, llego a un abismo que sólo podría saltar de dos trancos, entonces salto y apoyo el pie en el vacío para dar el segundo tranco, suplicándole a la gravitación que me permita hacerlo ya que, a fin de cuentas, mi apoyo en el vacío contra la gravitación será por un tiempo tan breve tan breve que apenas llegará a la constante de Planck.

En el mundo subatómico sí ocurren estas situaciones, según el principio de incertidumbre, debido a la incertidumbre misma de la energía cuando se baja a niveles tan profundos que un átomo resulta enorme. Para darnos un sentido de la escala de pequeñez que estamos considerando, veamos este ejemplo de Greene: «Si ampliáramos un átomo hasta la medida del universo conocido, la longitud de Planck apenas se habría expandido hasta la altura de un árbol promedio.» Un árbol comparado con todo el universo: así se ve la longitud de Planck respecto de un átomo. Allá, en esas profundidades, la energía pura despliega una danza constante que veremos descrita en el capítulo siete. Y esa energía pura puede tomarse prestada del tiempo y devolversele.

La caja de Einstein

Einstein no podía tolerar semejante broma cuántica. Planteó entonces uno de sus muy ingeniosos *Gedankenexperiment*: experimentos mentales. Se trata de experimentos que, si bien es imposible realizarlos por las limitaciones técnicas, se conducen de acuerdo con una lógica imbatible. Propuso un sistema por el cual la energía podía determinarse con exactitud, aunque Heisenberg dijera lo contrario. Tenemos una caja llena de radiación (recordemos que es un experimento mental) que se abre por un mecanismo de reloj. Lo arreglamos de manera que se abra un tiempo t , dejando salir algo de radiación en ese lapso. Heisenberg dirá que existe una incertidumbre, si bien infinitesimal, acerca de la cantidad de energía soltada y que esa incertidumbre estará acotada por la constante de Planck entre el tiempo t de apertura de la caja. Pero no habrá tal incertidumbre, dice Einstein, pues peso la caja antes y después de soltar la energía. Cuando la haya soltado pesará menos y ese cambio en masa lo transformo en un cambio en energía por medio de la ecuación $E=mc^2$ y ya está: tengo el total de energía sin incertidumbre alguna.

Esto dio a Bohr una noche sin sueño; pero respondió: pesar es comparar un objeto contra un campo gravitatorio. Y Einstein nos ha enseñado, en su teoría general de la relatividad, que los campos gravitatorios hacen ir más despacio a los relojes. Así que cuando Einstein pesa su caja antes y después de soltar energía ya se encuentran inducidas incer-

tidumbres incontrolables acerca del tiempo. Esto es, no sabemos la velocidad a la que avanza el tiempo antes y después de abrir la caja y soltar la energía. Como no podemos saber cuán exactamente tictaqueaba el reloj durante el proceso de pesar la caja, no podemos saber precisamente los tiempos a los que la apertura ocurrió y soltó la energía. Cuanto más exactamente trate uno de determinar el peso de la caja llena de radiación antes y después de soltar una poca, más incierta se volverá la medida de estos instantes. Todo ello concuerda perfectamente con el principio de incertidumbre y con la ecuación citada por Einstein [véase Polkinghorne, *The Quantum World*, pp. 54-55].

Einstein se lamió sus heridas y en 1935 volvió al ataque con lo que llamamos «la paradoja Einstein-Podolsky-Rosen» o simplemente «la paradoja EPR». La veremos más adelante.

Rendijas

Dispongamos una lámpara de luz bien dirigida, un cartón opaco y una pantalla a cierta distancia del cartón en línea recta. Abramos un pequeño agujero en el cartón y encendamos la luz. Sobre la pantalla veremos una imagen de la fuente de luz, el hecho que estudió el árabe Alhazen en Bagdad hace mil años. El principio de la cámara oscura y del ojo, como señaló en el Renacimiento Leonardo da Vinci. Si hacemos un agujero más pequeño, la imagen se reducirá tal y como podemos suponer. Pero, pasado un cierto lími-

te, la pequeñez del agujero deja de dar imágenes consecutivamente más pequeñas, la imagen comienza a volverse borrosa y abierta. Se dice que la luz se difracta en el agujero. Ocurre así porque hemos ido haciendo, al reducir el agujero, cada vez más precisa la posición de los fotones. Por tanto, a causa del principio de incertidumbre, deberán ser más imprecisas su velocidad y su dirección, el *momentum*. La imagen se esfuma. No tiene límites precisos.

Si además de determinar la posición del fotón, que es la de la rendija (pues a través de ella pasa y podemos decir «aquí está»), tuviéramos una perfecta línea recta a un punto en la pantalla, podríamos determinar, con muy sencillos cálculos, la velocidad y la dirección del movimiento de nuestra partícula cuántica (su *momentum*, que es la expresión que comprende masa, velocidad y dirección del movimiento). Así que, en correspondencia con el principio de incertidumbre, entre más pequeña la rendija y por ende mayor determinación de la posición de la partícula en el instante de cruzar, más borrosa y esparcida será la imagen resultante en la pantalla.

Por el contrario: si abrimos la rendija, con eso perdemos certidumbre en la posición exacta de la partícula al cruzar por allí, al igual que no sabemos la posición de una bala disparada dentro de un túnel de ocho carriles; pero tenemos, en cambio, mayor determinación del *momentum*, expresado como una imagen más precisa y cerrada, menos borrosa. La difracción es, pues, un efecto exigido por la incertidumbre.

Las dos rendijas

Quizá la expresión más desafiante del principio de incertidumbre sea la que borró la vieja noción entre el observador y lo observado, el principio de objetividad, base de la vida cotidiana y de la ciencia. Nos dice que no podemos determinar la posición de una partícula simultáneamente con otra variable. Se afirma entonces que son variables complementarias: determinar una hace nebulosa a la otra, como vimos en el experimento de una rendija: a menor diámetro y consecuente mayor determinación de la posición del fotón, más difusa la imagen. Esto impide precisar la trayectoria del fotón con la recta que uniera la rendija con el punto de luz. No hay tal punto, sino una mancha difusa, y las trayectorias son en consecuencia indefinidas. Cada línea es posible; están en superposición de estados, la luz sigue todos esos caminos.

También la naturaleza misma de las partículas subatómicas y de los cuantos de energía, los fotones, está en superposición de estados: son partículas y son ondas de manera complementaria. Esta doble naturaleza la observamos con el clásico experimento de las dos rendijas repetido con fotones o con electrones en numerosos laboratorios y citado millares de veces, quizá decenas de miles. Una magnífica y sencilla exposición se encuentra en el artículo «Quantum Philosophy», de Horgan; otra es «The Quantum Paradox», de Finkelstein, y, por su lenguaje divertido, la de Richard Feynman en *Six Easy Pieces*. A grandes rasgos consiste en lo siguiente:

Si ahora abrimos otra rendija en el cartón, muy cercana a la primera, y tapando ésta lanzamos un rayo de luz monocromática (de una longitud de onda precisa), veremos en la pantalla tras el cartón otra mancha borrosa y esparcida. Marcamos con un lápiz el círculo de luz. Abrimos el otro agujero y cerramos éste. Una segunda mancha de luz surge en la pantalla. Marcamos el círculo de igual manera. Vemos que ambos coincidan en un área, que se traslapan las manchas. Ahora abrimos los dos agujeros y lanzamos nuestro rayo de luz. En la intersección de los dos círculos, donde se empalman, la cantidad de luz que llega es el doble. Podemos esperar entonces que sea más brillante el área de intersección, donde ambas áreas luminosas se traslapan. No es así, como ya sabían Fresnel y Young. En ese lugar se presentan rayas luminosas, pero también rayas oscuras. Nos podemos hacer de inmediato la pregunta siguiente: si hubo fotones que llegaron hasta esa área cuando sólo tenían una rendija para pasar, ¿cómo es que no llegan cuando tienen dos? Los fotones, como ondas producidas al lanzar dos piedras a un estanque, producen interferencia. Donde las crestas coinciden, el brillo aumenta, pero se oscurecen mutuamente cuando se encuentran valle y cresta. Es el conocido fenómeno de interferencia por el que la luz durante un siglo fue considerada un fenómeno ondulatorio. Hasta aquí la nueva física repite experimentos ya realizados, pero tiene una insospechada explicación para el conocido y estudiado fenómeno de la difracción.

Ahora reduzcamos la corriente de fotones en nuestro rayo de luz. La reducimos tanto que podemos lanzar un solo fotón a la vez hacia las dos rendijas, en esta ocasión abiertas ambas, pero sin posibilidad de mostrar interferencia porque no estamos lanzando dos piedras al estanque, sino una sola. El fotón cruza y marca, como esperábamos, una mancha borrosa por difracción: como sabemos, su posición no nos deja saber su *momentum*. Luego empleamos película fotográfica y lanzamos de nuevo un solo fotón hacia las dos rendijas. Conseguimos una imagen sin rayas de interferencia. Ni podría haberla, pensamos, porque hemos lanzado un solo fotón: no tiene con qué interferir. Pero si seguimos lanzando fotones, de uno en uno, acabamos teniendo en la película de nuevo las rayas claras y oscuras que son la firma de la interferencia [recuérdese la figura 1.2].

Si hemos estado lanzando un solo fotón cada vez, ¿con qué interfiere? Quizá, como una ola ante dos huecos, se parte en dos, cruza por las dos rendijas, luego se recombina, y así es como interfiere consigo mismo. Se colocan, pues, detectores en ambas rendijas para saber si pasa por una o por ambas y un detector final al fondo de la trayectoria. Al cruzar el fotón deberá ser percibido por los instrumentos si es verdad que se parte y luego se recombina como las olas en los postes de un muelle. Lanzamos de nuevo nuestro chorro de fotón en fotón. En el detector final aparece la mancha borrosa y sin rayas: señal de que no hay interferencia. El fotón es partícula. Cada fotón pasó por una rendija o por otra, sin

que sepamos cómo elige entre ambas. Quitamos los detectores. Otra vez no podemos saber por cuál rendija pasará el fotón o si pasará por ambas. De nuevo aparecen las rayas oscuras y brillantes de la interferencia: el fotón pasó por ambas, por lo tanto es onda. Recolocamos los detectores que nos permiten observar. Resultado: una mancha borrosa y sin rayas. Es partícula otra vez [véase Horgan, «Quantum Philosophy»].

Feynman

Entre los grandes físicos cuánticos de la segunda generación, Richard Feynman, premio Nobel en 1965, marcó la física de la segunda mitad del siglo XX y a la vez produjo algunas obras de divulgación científica accesibles al lector ilustrado. Algunos capítulos de sus muy famosas *Lectures on Physics* fueron publicados en un volumen titulado *Six Easy Pieces*. Allí nos da esta magnífica descripción de la evanescente conducta de las partículas subatómicas cuando el investigador quiere atraparlas en plena acción. Primero esquematiza el experimento típico que consiste en que con una pistola de electrones se lanzan estas partículas contra una lámina de metal donde se han perforado dos agujeros, y al final se coloca un detector. En el detector se forman las rayas oscuras y claras que demuestran interferencia: el electrón está pasando por ambos agujeros, como una ola que se parte ante los soportes de un muelle y vuelve a integrarse cuan-

do los pasa. Pero Feynman nos dice que ahora vamos a tratar de saber si en realidad cada electrón pasa por ambos hoyos. Ponemos un señalizador luminoso del paso del electrón detrás de los dos agujeros por donde pasará éste. Un detector será el final de la carrera del electrón. Hecho ese arreglo experimental:

Aquí está lo que vemos: *cada vez* que oímos un «click» en nuestro detector de electrones (que los para al fondo), también *vemos* un *flash* de luz, *ya sea* cerca del hoyo 1 o cerca del hoyo 2, *¡pero jamás* ambos a la vez! Y observamos el mismo resultado sin importar dónde pongamos el detector. De estas observaciones concluimos que cuando miramos los electrones encontramos que los electrones pasan ya sea a través de un hoyo o del otro [...]. Debemos concluir que *cuando vemos los electrones*, su distribución en la pantalla es diferente que cuando no los vemos [...]. *¡Si los electrones no son vistos, tenemos interferencia!* [Six Easy Pieces, pp. 127-130].

Y la interferencia, firma de todas las ondas, desaparece cuando podemos saber si pasaron por el hoyo 1 o por el hoyo 2. Las cursivas y los signos de admiración son producto del entusiasmo de Feynman por las paradojas del mundo cuántico, que él explica con peculiar sentido del humor.

¿Por qué desaparecen las bandas de interferencia cuando podemos «ver» al electrón pasando por dos hoyos a la vez? Colocar detectores en ambas rendijas nos permite determinar con exactitud el camino seguido por el electrón. Ese conocimiento está prohibido por la naturaleza, según nos dice el prin-

cipio de incertidumbre, también llamado de indeterminación. Por lo tanto, el electrón se comporta como partícula y elige una rendija para su paso y no ambas.

Nada cambia si en estos experimentos empleamos cuantos de energía, fotones, o cuantos de materia, electrones. La esencia de la materia muestra el mismo inmaterial comportamiento y la misma alianza insoluble con el observador.

El fotón, como el electrón y todos los cuantos, no es, pues, partícula ni onda. En 1927, Bohr concluye el dilema entre onda o partícula por su principio de complementariedad: la sustancia básica de la materia y la energía tiene manifestaciones corpusculares y ondulatorias. Éstas son manifestaciones complementarias de un mismo sustrato profundo. El corpúsculo y la onda existen en una superposición de estados. Cuando observamos un cuanto, la superposición de estados desaparece y se muestra como partícula.

El gato de Schrödinger

Erwin Schrödinger ideó otro ingenioso experimento mental para ilustrar la superposición de estados. Imaginó un famoso ejemplo que se conoce en los textos de física como «el gato de Schrödinger». En una caja metemos un gato, un frasco de gas venenoso y un aparato con un mecanismo dependiente de un azaroso evento cuántico, que rompa el frasco al tener

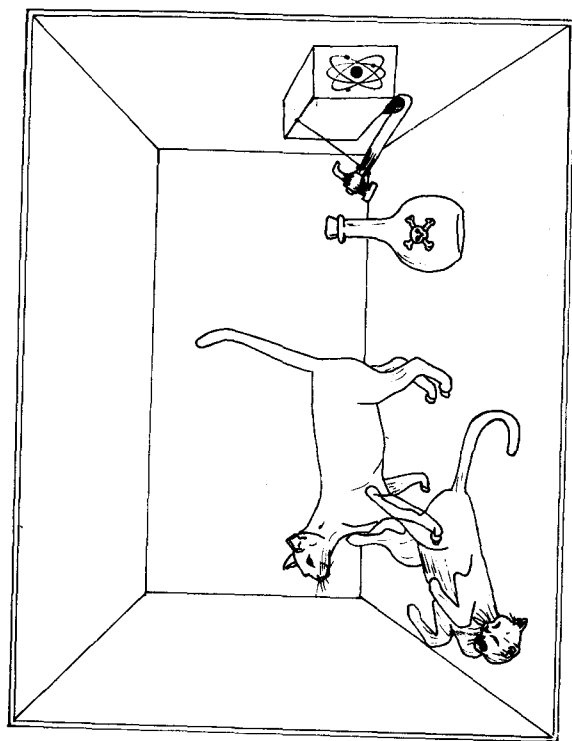


FIGURA 4.1.1. El gato de Schrödinger en superposición de estados: vivo-muerto.

lugar. Puede ser, por ejemplo, un átomo radiactivo con probabilidad 50-50 de decaer en el término de una hora, emitiendo con eso un rayo gama. Este rayo dispara un dispositivo que rompe el frasco de gas venenoso. Cerramos la caja. Esta emisión gama es un evento cuántico impredecible y la probabilidad de que ocurra está dada por la ecuación de Schrödinger. El conjunto completo gato-dispositivo-partícula está descrito por una función de onda complejísima que incluye todos los átomos participantes y los dos estados de la partícula mortífera: emitida o no emitida. Por lo tanto, todo el conjunto se encuentra en superposición de estados. En uno la partícula ya accionó el mecanismo; en otro, esto no ha ocurrido. El gato está en superposición de estados: está vivo-muerto, y sólo la observación permite determinar uno solo de los estados: o vivo o muerto. Como el burro de Sancho, que ora está, ora no está. La observación colapsa el paquete de ondas y nos da un solo resultado.

Los físicos dicen que una observación *colapsa* la onda de probabilidad y da existencia a una sola de entre el paquete de probabilidades. Cómo ocurre que un observador colapse la onda de probabilidad es uno de los debates en los que se enzarzan diversas posturas filosóficas. A todos nos consta que el gato no está vivo-muerto, aunque el ejemplo sea divertido. ¿Cómo de ese mundo atómico inasible tenemos rocas, planetas y estrellas? La superposición de estados no se da sino en el nivel atómico y, de alguna manera que la física aún no nos explica satisfactoriamente, la suma de muchos átomos con sus inde-

terminaciones produce el mundo determinado y conocido, regido por las leyes de Newton y no por las de la cuántica.

La superposición de estados de los cuantos subatómicos (para ya no hablar de partículas, pues no lo son) se muestra también en la capacidad que éstos tienen para estar en dos lugares a la vez: un fotón o un electrón pueden pasar simultáneamente por dos caminos separados. Dirac lo expresó así en *The Principles of Quantum Mechanics*, ya desde 1930: «Podría argüir que una muy extraña idea ha sido introducida: la posibilidad de que un fotón esté de cierto modo en cada uno de dos estados de polarización o de cierto modo en cada uno de dos rayos separados» [p. 10].

La solución de Feynman

Las cosas pueden todavía empeorar en manos de Feynman. Él propone que cada partícula no sólo pasa por ambas rendijas, sino que sigue simultáneamente toda trayectoria posible. Es una aproximación a la mecánica cuántica llamada «suma de caminos» («sum-over-paths» por si el lector encuentra mejor traducción). Esto es, *todos los caminos*, entre ellos los que le dan la vuelta al planeta antes de penetrar por una rendija, los que van derecho, los que dan unos pocos giros y eligen o, siguiendo a Greene,

se van en larga jornada hasta la galaxia de Andrómeda antes de regresar y pasar a través de la rendija izquier-

da en su camino a la pantalla [...]. El electrón, de acuerdo con Feynman, simultáneamente «olfatea» cada posible vía que conecte su locación de arranque con su destino final [*The Elegant Universe*, p. 110].

Y, de nuevo, este comportamiento se da únicamente mientras no exista no solamente una observación, sino *ni siquiera la posibilidad de una observación*, como demostró Mandel en 1996. En un diseño los investigadores no podían saber cuál de dos rutas fue «escogida» por un fotón particular dentro de un rayo láser: entonces el fotón va por ambas; hay superposición de estados y está en dos lugares al mismo tiempo. En otro diseño sí pueden saber la ruta que sigue, pero no emplean esa capacidad, no observan; el fotón sigue una sola ruta. Hay un colapso de la función de onda y desaparece la superposición de estados *aunque no hubo observación realmente*. «¿Qué ha cambiado? La respuesta es que el conocimiento potencial del observador ha cambiado», comenta Horgan. Ahora puede determinar cuál ruta tomaron ciertos fotones. Un fotón «ya no puede ir por ambas vías».

La comparación de tiempos de llegada [por las dos vías] no necesita ser realizada en realidad para destruir el patrón de interferencia. La mera «amenaza» de obtener información acerca de cuál vía siguió el fotón, explica Mandel, lo fuerza a viajar sólo por una ruta. «El estado cuántico refleja no sólo lo que conocemos acerca del sistema, sino lo que es en principio conocible» [Horgan, «Quantum Philosophy»].

Una exposición del propio Mandel sobre tan estrafalarias faltas a la lógica aristotélica por parte de la naturaleza puede encontrarse en su experimento descrito en *Fundamental Problems in Quantum Theory*.

Si Einstein nos había dicho que no existía el tiempo absoluto, ese tiempo de Newton que según los *Principia Mathematica* «fluye uniformemente sin referencia a nada externo», y al unificarlo con el espacio nos dio un nuevo concepto, el espacio-tiempo, a su vez la física cuántica sostenía que tampoco había elementos para considerar al observador y lo observado como entidades absolutas e independientes. Los procesos subatómicos, el ámbito de la cuántica, son inseparables del proceso de observación. Cada resultado posible en un particular marco de observación es, en otro marco, una superposición de estados. Cuando un investigador elige su marco de trabajo sabe que por cada uno de sus resultados habrá, en quien trabaje en otro marco, una superposición de muchas posibilidades.

5

La síntesis de Dirac

Dirac: relatividad e incertidumbre

El físico inglés Paul Dirac, a los 25 años de edad, habría de unir, en otra más de las felices síntesis de campos opuestos, las teorías de Schrödinger y Heisenberg, quienes nunca se expresaron con amabilidad de sus respectivos y extraordinarios hallazgos. Si la ecuación de Schrödinger sólo se aplicaba a partículas con velocidades muy inferiores a la de la luz, en 1927 Dirac la combinó con la relatividad y la incertidumbre, propuso un giro sobre su eje para el electrón y así produjo un solo conjunto de cuatro ecuaciones simultáneas que describían un electrón cuántico, relativista y con spin o giro (por supuesto, tal descripción del spin es sólo una manera de hablar, común hasta en los físicos para referirse a lo inefable; pero el electrón ni gira ni tiene eje porque no es una bolita minúscula).

Las nuevas ecuaciones explicaron de inmediato los resultados salidos de los primeros laboratorios

de partículas. Comenzaba otra época de sorpresas y las ecuaciones de Dirac parecían perfectamente aptas para ellas. Pero en un punto predecían algo muy extraño: energía negativa. Así lo sostienen Forward y Davis en su obra con dedicatoria a Dirac en la primera página:

En diciembre de 1929, la solución de Dirac se publicó en los *Proceedings of the Royal Society*. Era un trabajo sorprendente, pues las ecuaciones de Dirac lograban algo extravagante [...]; tenían dos soluciones posibles: un electrón con energía positiva, o un electrón con energía negativa [*Explorando el mundo de la antimateria*, p. 40].

El físico (Forward) y el periodista científico (Davis) parecen plantear un absurdo, pero insisten enseñada en que sí han dicho lo que leímos:

Dirac descubrió que un electrón con energía negativa que atravesara un campo magnético actuaría exactamente igual que un electrón con energía positiva, siempre que el electrón tuviera una carga eléctrica positiva en vez de negativa [p. 41].

En sentido matemático no había nada extraño: si nos preguntamos cuál es la raíz cuadrada de 4 tenemos dos soluciones: 2 es la inmediata, pero no es menos correcta -2. Las ecuaciones de Dirac admitían igualmente dos soluciones: una para un electrón común y otra para un electrón en todo semejante, pero con energía negativa.

Entendámonos: desde un principio se llamó «electrón» a la carga eléctrica negativa mínima. Pero las ecuaciones de Dirac, en una de sus dos soluciones, predecían algo imposible de imaginar: no *carga eléctrica negativa*, sino *energía negativa*.

El término «negativo» induce a confusiones porque se emplea aquí en dos acepciones muy diferentes una de otra. La carga eléctrica del electrón no tiene nada de negativa en el sentido en que es negativo -2. Desde 1733, el jardinero del rey Luis XV había anunciado la existencia de dos tipos de electricidad: una atraía y la otra repelía objetos. Se las pudo haber denominado electricidad «blanca» y «negra», «A» y «B», «alfa» y «omega», en fin, con cualquier par de palabras que expresaran oposición. Fue Benjamin Franklin quien ideó el uso de los signos + y - para distinguir una de la otra; por eso hablamos de electricidad positiva y negativa. La carga del electrón pudo llevar cualquier otro nombre.

La antimateria

Así pues, una carga eléctrica negativa no tiene nada de *negativa*. Pero las ecuaciones de Dirac tenían dos soluciones: una era un electrón común de carga eléctrica negativa, y la otra era, siguiendo a Forward y Davis, un electrón hecho de algo inimaginable: energía negativa, no energía, energía inferior a cero. ¿Cómo se puede tener menos energía que cero energía? Es como preguntarse cómo puede haber menos

agua que nada de agua. Ni siquiera es fácil darle sentido a esa expresión. Pero eso decían las ecuaciones. Puesto que Einstein había encontrado la relación entre la masa y la energía, ¿podía también hablarse de masa negativa, de una no masa, de una masa más ausente que ninguna masa? Un peso es una cantidad representada por una moneda. Al gastarlo nos quedan cero pesos. Pero si gastamos dos debemos uno, para lo cual contamos con una representación numérica, -1 , pero no con una física. Si nos regalan un peso, con eso apenas compensamos la deuda y quedamos en cero. ¿Podría haber algo semejante en la materia? Sería como una deuda, un hueco en el espacio donde la materia al caer simplemente llenara esa falta y dejara espacio vacío, sin hueco ni materia, como el peso que pagamos cuando debemos uno. Pero desde el punto de vista del espacio no tiene sentido hablar de *huecos* o de faltantes.

Las ecuaciones predecían una forma de descubrir esa extraña manifestación de la materia, si aún se le podía aplicar ese nombre, según vimos: un electrón de energía negativa cruzando por un campo magnético sería observado como un electrón con carga eléctrica positiva. Otra vez: no es que los electrones vengan en dos presentaciones, uno bien conocido y con carga eléctrica negativa, y otro novedoso con carga positiva. No es así. La segunda solución de las ecuaciones de Dirac predice una partícula que será similar a un electrón, pero cuya energía será inferior a cero, energía negativa. Por tanto, al cru-

zar un campo magnético será desviado *como si fuera* una partícula positiva.

Las partículas positivas del átomo son los protones, así que Dirac buscó en ellos una explicación más sensata. Pero el protón tiene casi dos mil veces la masa del electrón. No podía tratarse de protones, sino de alguna nueva partícula, no descubierta en el laboratorio pero ya predicha por las ecuaciones, lo cual ocurre con gran frecuencia. Dirac propuso llamar «antielectrón» a la nueva partícula. Con él se abriría la existencia de toda una nueva familia de partículas, pues sus ecuaciones predecían, con sus dos soluciones, un gemelo para cada una de las conocidas. Había nacido la antimateria. Su comprobación experimental llegó en 1932.

La antimateria sigue viva y sana, pero no el nombre de la primera antipartícula propuesta. El antielectrón de Dirac es conocido hoy día como «positrón».

El positrón

En el artículo «Symmetry in Physical Laws» incluido en el volumen *Six Not-So-Easy Pieces*, Feynman describe así el descubrimiento de la antimateria:

Dirac predijo que además de los electrones debía de haber otra partícula, llamada positrón (descubierta en el Caltech por Anderson), que está necesariamente relacionada con el electrón. Todas las propiedades de estas dos partículas obedecen a ciertas reglas de correspondencia: las energías son iguales; las masas son

iguales; las cargas invertidas; pero, sobre todo, las dos, cuando se encuentran, pueden aniquilarse una a la otra y liberar su masa entera en forma de energía, es decir, de rayos gama [p. 43].

Aunque esta redacción da la apariencia de que Dirac llamó «positrón» a la hipotética partícula, es sólo un problema de excesiva condensación sintáctica; en realidad Dirac la llamó «antielectrón». Para mostrar la esencia del descubrimiento, Feynman recurrir al neutrón, que siendo eléctricamente neutro no conduce a las confusiones entre las cargas eléctricas (positivas o negativas) y la energía negativa en el sentido en que -2 es negativo.

La regla para el «anti» no es sólo que tenga carga opuesta; tiene cierto conjunto de propiedades, la partida entera de las cuales son opuestas. El antineutrón se distingue del neutrón de esta manera: si ponemos dos neutrones juntos, permanecen sólo como dos neutrones, pero si ponemos juntos un neutrón y un antineutrón, se aniquilan uno al otro liberando una gran explosión de energía, con varios mesones π , rayos gama y lo que se te ocurra [*Six Not-So-Easy Pieces*, p. 44].

El mar de Dirac

Forward y Davis afirman que Dirac sugirió, posteriormente, un segundo modelo para dar cuenta de los estados de energía negativa aparecidos en la solución de sus ecuaciones [véase *Explorando el mundo de la antimateria*, p. 42]. El modelo, que exige del

lector algo más que imaginación, es descrito así por dos investigadores de Cornell:

[Dirac] imaginó que el vacío constituía un «mar» uniforme de estados de energía negativa, todos llenados por electrones. Puesto que el principio de exclusión de Pauli prohíbe que dos electrones ocupen el mismo estado cuántico, los electrones de energía positiva [electrones comunes] se mantendrían encima del mar invisible para formar los estados «excitados» observables en la naturaleza. Un estado excitado podría también crearse echando suficiente energía positiva para sacar un electrón del mar, proceso que dejaría un hoyo en el cual otro electrón de energía negativa caería. «Estos hoyos serán cosas de energía positiva y por tanto serán al respecto como partículas ordinarias», escribió Dirac [R. C. Hovis y H. Kragh, «P. A. M. Dirac and the Beauty of Physics»].

En una carta a Niels Bohr fechada el 26 de noviembre de 1929, dice Dirac:

Parece razonable asumir que no todos los estados de energía negativa están ocupados, sino que hay unos pocos vacíos o «agujeros». Tal agujero —que puede ser descrito por una función de onda— aparecería experimentalmente como una cosa con energía $+ve$ [positiva], puesto que para hacer el agujero desaparecer (p. ej. para llenarlo), uno debería poner energía $-ve$ [negativa] dentro de él [citado en «P. A. M. Dirac and the Beauty of Physics»].

Como podemos ver, aquí ya Dirac pone la energía negativa no en la antipartícula del electrón, que ahora es de energía común y corriente (positiva), sino,

peor aún, llenando el universo. Es todo el espacio lo que está lleno de un mar de partículas densamente apretadas y hechas todas ellas de energía negativa. Puesto que todo el espacio está lleno (al parecer el éter se resiste a morir), no hay diferencias que podamos detectar y el mar de energía negativa es inobservable. Pero cuando una partícula real arranca uno de estos electrones con menos energía que cero, menos que vacío, menos que nada, queda un hueco en el mar de energía negativa. Hay un hueco en el mar de huecos. Tenemos una negación de la negación, diría Engels. O lo que es lo mismo: tenemos ahora un hueco de energía positiva, una antipartícula hecha de energía común. Al encontrarse la antipartícula y un electrón normal, se comportarán como una bola de billar al caer en un agujero exactamente de su tamaño: desaparecen ambos. Un electrón normal y un antielectrón se aniquilan mutuamente; al hacerlo liberan energía equivalente a dos masas de electrón.

Nada en los laboratorios hacía prever semejante anomalía en el universo conocido, así que Niels Bohr hizo a Dirac una famosa broma. Dijo que se podrían cazar elefantes de la siguiente manera: en un gran cartel se escribe la teoría de Dirac y se coloca donde los elefantes van a beber. Cuando el elefante, que proverbialmente es un animal sabio, llega al agua y lee el cartel, se queda embelesado. Los cazadores aprovechan el éxtasis elefantuno para amarrarle las patas y enviarlo al zoológico de Copenhague. ¿Y por qué a Copenhague? Porque se conoce como Escuela

de Copenhague la posición filosófica que adoptan buena parte de los físicos cuánticos para atender las paradojas del mundo subatómico.

Comprobación inmediata

Pero un año después, en 1932, aquel Robert Millikan al que conocimos por el efecto fotoeléctrico se había instalado en Pasadena, California, donde pensaba transformar en un gran centro de investigación el departamento de física de una escuela privada, el Instituto Tecnológico de California (o Caltech, como se lo conoce brevemente). Entre los investigadores se encontraba un joven de 26 años, Carl Anderson.

Un detector llamado cámara de niebla, en el cual las partículas dejan rastros al ser lanzadas a través de vapor, es el instrumento que las hace visibles. Si la cámara se rodea de magnetos se obtienen diversas desviaciones que permiten estimar las cargas y las masas. Al estudiar fotografías de las trayectorias dejadas por diversas partículas en la cámara de niebla, Anderson encontró trayectorias del todo similares a las de los electrones, pero invertidas. El campo magnético de la cámara de niebla curvaba en dirección opuesta las trayectorias. Anderson pasó un año sin una explicación satisfactoria y, además, sin conocer la predicción de Dirac. Luego identificó pares de un electrón y de una de esas partículas con igual masa y trayectoria opuesta. Finalmente la teoría de Dirac había encontrado su comprobación. La par-

tícula fue llamada «positrón». El nombre da lugar a confusiones y era mejor el de «antielectrón», pues no es algo tan sencillo como un electrón positivo, uno que en vez de carga eléctrica negativa la tiene positiva, como un protón chiquito. Es algo más incomprensible: es la unidad mínima, el cuanto de un universo gemelo y especular hecho de antimateria.

En vez de llegar al zoológico de Copenhague amarrado entre sus elefantes pensativos, Paul Dirac recibió el premio Nobel en 1933 (compartido con Schrödinger). Era tan joven que Leon Lederman comenta en *The God Particle*: «Cuando Dirac y Heisenberg fueron a Estocolmo para recibir sus premios Nobel, iban, de hecho, acompañados por sus madres.»

Y, con todo, los físicos siguieron buscando para el positrón una fuente menos descabellada que el mar de energía negativa propuesto por Dirac. Con el éter habían tenido suficiente. La alternativa no fue mucho mejor; la presentó Richard Feynman, quien podemos decir que encabeza la segunda generación de físicos cuánticos, como veremos más adelante.

Las variables ocultas

Por el principio de complementariedad, enunciado por Bohr, concluyó el debate sobre la naturaleza ondulatoria o corpuscular de la luz y de la materia. Terminó como el gato de Schrödinger, en una superposición

de estados. Ambos estados, partícula y onda, están superpuestos en tanto no haya una observación.

Luego el principio de incertidumbre extendió a todo el mundo subatómico la superposición de estados. La ecuación de Schrödinger hizo del electrón un paquete de ondas: la observación producía el colapso de la función de onda y la localización del electrón. Con la síntesis de Dirac, que añade otra variable a las partículas, el spin o giro, sólo tenemos otra variable para incrementar las indeterminaciones, pues también el spin se somete a las paradojas de un mundo sin definición y al colapso de la función de onda por la observación.

Para el sentido común, tal situación es inconcebible. También lo es para la física clásica, e incluso para la relativista. Todos los objetos del mundo poseen atributos: color, peso, forma, reposo o movimiento. Nuestros sentidos nos entregan los atributos del objeto, y en todo caso ha sido función de la filosofía determinar en qué medida nos engañan, cuándo los atributos percibidos se corresponden con la realidad. Pero es un hecho que, hasta cuando vemos verde un objeto azul por efectos cromáticos bien estudiados, el objeto tiene un color propio.

Que los objetos cuánticos, por ser diminutos, ofrecieran dificultades a la detección de sus atributos era de esperarse. Que la observación los modificara y resultaran por tanto en buena medida inaccesibles también era un conocido problema de laboratorio. ¿Cómo iluminar un átomo si un solo cuanto de luz lo perturba? Era un problema serio, pero un pro-

blema técnico al fin. Si tales eran los problemas, la física cuántica era una teoría realista y local, como estipula la física que debe ser toda teoría saludable.

La sensatez pierde terreno

Pero la nueva física establecía algo inaudito. En física cuántica los atributos del mundo subatómico no eran simplemente difíciles de observar porque el hecho mismo de la observación los modificara. No: los atributos de ese ámbito, por ejemplo valores como velocidad, spin, posición y trayectoria, no existen antes de que sean determinados por una observación. Esto resulta tan contraintuitivo como decir que un automóvil con el velocímetro descompuesto no tiene velocidad. Si los físicos cuánticos sostenían que las variables no observadas no existen, que permanecen en el ser y no ser de la superposición de estados múltiples y contradictorios, los demás declaraban que tal afirmación era aberrante y que las variables no observadas están allí, existentes y determinadas, aunque ocultas porque no ha venido un observador a descubrirlas. Si no podemos conocer simultáneamente posición y velocidad es porque nuestros medios para realizar las observaciones necesarias son todavía insuficientes, argumentaron, lo cual suena completamente sensato. Y más cuando uno de los inconformes era Einstein. Había nacido la postura llamada de «variables ocultas».

Los primeros desacuerdos entre Bohr y Einstein nacieron desde que se daban los toques finales al

edificio de la cuántica. Ya en 1927, en la conferencia del Instituto Solvay celebrada en Bruselas, se delinearon las dos posiciones irreductibles en la nueva física. «Vemos que los puntos esenciales del argumento EPR [Einstein-Podolsky-Rosen; véase p. 128] ya habían sido considerados por Einstein unos ocho años antes, en el Quinto Congreso Solvay» [Hardy, «The EPR Argument ...»]. Cada postura divergente estaba encabezada por uno de los padres fundadores.

Para Einstein y más aún para sus partidarios, el aspecto impreciso e indeterminado de la física cuántica no puede satisfacer a un científico y muestra que debe de haber algo por debajo de ese aspecto: sería menester volver a encontrar bolitas u ondas, en fin, algo que podamos representarnos. Si todavía no se las puede ver, ello se debe a que nuestros medios de observación son insuficientes [Ortoli y Pharabond, *El cántico de la cuántica*, p. 45].

Se trataba de las variables ocultas que habrían de buscarse afanosamente.

Einstein tenía a su favor que su postura coincidía con el sentido común y la sensatez: nadie nos puede decir, tan fresco, que para que un auto tenga movimiento es necesario observar el velocímetro. Respondemos que podemos ignorar la velocidad exacta, no conocerla por faltar la observación, pero el auto tiene ya una velocidad exacta, aunque desconocida para nosotros. Es una variable oculta porque no tenemos cómo medirla o no hemos mirado. ¿Cómo podían Bohr, Heisenberg, Dirac y tantos hombres

que no parecían tontos decir lo contrario? Einstein se desesperaba.

Pasarían más de cincuenta años antes de que esa discusión quedara definitivamente zanjada por Alain Aspect, en 1982. Mientras tanto, un elemento de la cuántica era innegable: resultaba rigurosamente exacta, más que ninguna otra ciencia humana, más que la celebrada mecánica de Newton que había predicho la posición de planetas nunca observados. Nadie había visto nunca tales niveles de predicción. ¿Cómo sus mediciones con exactitud en las mil billonésimas de centímetro y de segundo podían derivarse de una teoría falsa?

Einstein clama por auxilio divino

«Ich habe genug!», debió decirse Albert Einstein. ¡Ya basta! Era demasiado. «No puedo creer seriamente en la teoría cuántica porque no puede ser reconciliada con la idea de que la física debe representar una realidad en el tiempo y el espacio, libre de fantasmagóricas acciones a distancia.» O peor aún, en una carta personal: «A medida que el éxito de la teoría cuántica aumenta, más tonta parece» [*Einstein entre comillas*, p. 190].

Luego llamó en su ayuda a Dios con su popular expresión sobre los dados que, por cierto, no es una, sino varias, pues parece que al mismo Einstein le gustó el ejemplo. Dice en una carta a Max Born fechada apenas en 1926:

Bien vale la pena prestarle atención a la mecánica cuántica. Pero una vocecita interior me dice que no se trata del verdadero Jacob. La teoría rinde mucho, pero me temo que a duras penas nos acerca a los secretos del Viejo. En todo caso, estoy convencido de que Él no juega a los dados [*Einstein entre comillas*, p. 196].

El tratamiento familiar que da Einstein a Dios: «el Viejo», no deja de quedar en la línea de quien dijo de sí mismo: «Soy un no creyente... muy religioso», y que a la pregunta acerca de si creía en Dios respondió: «Creo en el Dios de Spinoza.» No hay nada de sorprendente en ello, porque la definición que ese filósofo judío, de origen portugués y nacionalidad holandesa, proporciona de Dios en su *Ética* no podría ser más semejante a una definición del universo firmada por Einstein. Algo similar dice Einstein en otra cita:

Me es posible, aun en el peor de los casos, llegar a concebir que Dios tal vez creó un mundo en el que no existen las leyes naturales. En dos palabras, un caos. Pero pensar que existen leyes estadísticas con soluciones precisas, es decir, leyes que obligan a Dios a lanzar los dados en cada caso individual, me parece en extremo desagradable [p. 200].

Y en otra carta, ésta ya de 1942: «Es difícil echarles una mirada disimulada a las cartas que Dios tiene en la mano. Pero que él haya resuelto jugar a los dados con el mundo... es algo que no puedo creer ni por un solo instante» [p. 200]. La réplica de Niels

Bohr fue más breve y cortante: «Deja de decirle a Dios lo que puede hacer.»

Mucho tiempo después, en años recientes, respondería otro grande de este siglo que aún era niño a la muerte de Einstein, Stephen Hawking: Dios no solamente juega a los dados con el mundo, sino que a veces «los arroja donde no podemos verlos» [*The Nature of Space and Time*, p. 26]. Se refiere a los agujeros negros, por cuyo estudio teórico y desarrollo matemático recibió en 1978 el premio Albert Einstein. Nueva paradoja.

EPR

Convencido de que la física debe ser una descripción de la realidad, tal y como sostiene el sentido común, Einstein se propuso mostrar que la física cuántica no se ajustaba a esa exigencia. En términos técnicos se dice que en tal caso una teoría es incompleta. Sin embargo, ya de inicio, para los físicos con la postura filosófica llamada de la Escuela de Copenhague, que una teoría sea completa no es lo mismo que para Einstein. La física, sostienen, no es una aproximación a la realidad ni las teorías se miden por su mayor o menor ajuste con algo externo. Para eliminar las complicaciones filosóficas de llamar a una invitada tan indefinible como la realidad, molestos con Kant y su noción del «objeto en sí», construyeron un andamiaje teórico que no requiere mencionar la realidad. Bohr y Heisenberg exigen de una teoría únicamente

que no prediga resultados contradictorios para un mismo experimento y que represente todo experimento posible; entonces es completa y con eso basta. Si describe o no la realidad es una pregunta sin sentido, ajena a la ciencia. La misma posición expresa entre los físicos de hoy Stephen Hawking. En su famoso debate con Roger Penrose sobre la naturaleza del espacio y el tiempo dijo que una teoría sólo era un modelo matemático y no tenía sentido preguntarse si se correspondía con la realidad. «Porque no sé qué sea eso», replicó sencillamente [p. 121].

Pero Einstein sí quería saber qué era eso, qué era la realidad; y para conocerla era físico. Así que en 1935, con dos jóvenes colaboradores, Boris Podolsky y Nathan Rosen, publicó un artículo que se ha vuelto famoso bajo las iniciales de sus apellidos: EPR. Se trata de otro *Gedankenexperiment*. A grandes rasgos, plantearon un caso donde el principio de incertidumbre y con él la física cuántica se verían prediciendo un absurdo.

Dos partículas enlazadas

Consideraron un sistema formado por dos partículas (de alguna forma hay que llamarlas) que tras estar en interacción se separan en direcciones opuestas. Según la teoría cuántica, seguirán descritas por una sola función de onda, así esperemos a que se alejen años luz entre sí. Ninguna tendrá atributos propios; no tendrán posición ni dirección ni spin ni velocidad

determinados, sino todos ellos en diversos grados. Son como una nube difusa. Están en superposición de estados, como el gato de Schrödinger. /

Pero una vez que pasan los años que se quiera y las partículas gemelas se encuentran en confines opuestos del universo, determinamos cualquier atributo de una sola de ellas. Con eso, de acuerdo con la cuántica, la función de onda pierde la superposición de estados; ya no predice una infinidad de valores posibles y adquiere uno solo. Por ejemplo, determinamos el spin. Ambas partículas, cuyo spin puede ser «arriba» o «abajo», tienen ambos en superposición de estados, pero al observar una de las partículas su spin queda determinado. Decimos que la observación ha realizado la reducción del paquete de ondas a una sola, o que las múltiples posibilidades se colapsaron y presentan ahora una posición precisa. Sólo que, recordemos, esa función de onda describe a ambas partículas gemelas, así que la determinación de algún valor en una produce la determinación de la otra. Suponiendo que estemos empleando un par de protones, sabemos que por la manera en que los produjimos tienen spin contrario. Si uno es «arriba», el otro es «abajo», y viceversa. Así pues, en cuanto hacemos la medición en el protón *A* queda determinado también el valor del spin en el protón *B* en el otro extremo de la galaxia.

El ejemplo era muy ilustrativo porque demostraba un absurdo flagrante derivado de los propios planteamientos fundamentales de la cuántica. Se hizo el silencio. La física clásica diría que los spines es-

taban ya fijados desde el momento en que los dos protones se separaron, pero que simplemente no los conocíamos y ahora, por nuestra observación, los conocemos. Para la física cuántica no es así. «El acto de medición debe inducir un nuevo estado para *B*, no solamente revelar su estado previamente existente» [Polkinghorne, *The Quantum World*, p. 71].

A estos aspectos de la cuántica se refería Einstein al exclamar que la física no debería tener «acciones fantasmagóricas a distancia». Y las tenía, pues una medición aquí permite determinar instantáneamente un valor en otra parte del universo.

Ejemplo con bolas

Pensemos en bolas de billar con dos colores: media esfera es roja y media esfera es azul. La cuántica establece que la posición de estas mitades en la bola es indeterminada: no existe mientras no se realice una observación. Pero una vez que determinamos que una es azul arriba y rojo abajo, la otra, en una remota galaxia, habrá quedado también determinada y será a la inversa: azul abajo y rojo arriba. Si lo detectado fuera el spin de una partícula, el efecto sería el descrito con bolas de billar. Conocido un spin, el de la otra partícula también quedaría determinado. ¿Y cómo sabe el gemelo que su par ha sido observado? «¡Por telepatía!», exclamó Einstein. Su risa estremeció la nueva física. En efecto, tampoco había capacidad para realizar ese experimento, pero todas sus bases lógicas parecían irrefutables.

Al silencio súbito siguieron intentos de réplica. Bohr dijo que en el desarrollo de los argumentos en EPR, el uso dado a la relatividad por Einstein (*of all people!*) y sus colegas era erróneo; que no era la teoría cuántica la que se había mostrado equivocada, sino el concepto que Einstein, Podolsky y Rosen tenían de la realidad; que... Muchos argumentos complejos que llevan de nuevo a confrontar dos particulares concepciones de la ciencia; con todo, la paradoja resultaba incontestable. En esencia porque se trataba de dos idiomas. Para los contrarios a la cuántica, el mundo subatómico debía comportarse como minúsculas bolas de billar, por muy pequeñas que fueran. Los cuánticos hablaban de comportamientos contrarios al sentido común.

Los físicos cuánticos pusieron la paradoja EPR en el archivo de *pendientes* para poder seguir trabajando, porque algo seguía siendo innegable: predecían resultados en el límite de las mil billonésimas. Pero la espina estaba clavada. Mientras tanto, los laboratorios seguían entregando los resultados más exactos que ciencia alguna hubiera imaginado, con todo y que la teoría predijera algo tan aberrante. Nadie sabía cómo quitarle al experimento EPR lo *gedanken*, lo pensado, y llevarlo a cabo realmente.

Bohm y Bell

Las directrices generales del experimento para someter a prueba la física cuántica habían quedado señaladas en la paradoja EPR. Si un experimento com-

probaba que había medido alguna característica previamente existente en las partículas *antes* de la medición, la cuántica estaba equivocada. El principio básico era sencillo. Había que imaginar su realización.

El húngaro Johann von Neumann puso una primera piedra en 1929, con su «teorema de variables ocultas», donde probaba que la asignación de valores simultáneos a variables complementarias, como la velocidad y la posición, siempre daría resultados diferentes a los propuestos por la cuántica. Las determinaciones de valores en cuántica no son una muestra de valores previamente existentes.

Pensemos que tenemos un millón de canicas, de las cuales la mitad son azules, un 25 por ciento rojas y el 25 por ciento restante verdes. Si las metemos en una gran revolvedora de lotería y sacamos al azar un millar, encontraremos la misma distribución en esa muestra del total: la mitad serán azules (con algunas más o menos de diferencia) y las otras serán rojas y verdes en igual proporción. Es porque nuestra selección se hace realmente al azar, pero también porque las canicas ya eran previamente azules, rojas y verdes. Éste es el principio de las encuestas. Si la muestra es grande y se hace al azar, las variables detectadas en la muestra serán una miniatura de la población general. Dicho con un ejemplo cotidiano: si 20 000 personas elegidas al azar prefieren a un candidato a la presidencia, éste ganará las elecciones. El problema, simplemente técnico, es cómo asegurar que la elección de los 20 000 se haya hecho al azar.

Si la revolvedora no permite ver las canicas —a diferencia de las empleadas por la lotería—, diremos que los colores están ocultos, como ocurre en las revolvedoras de cemento. Allí tenemos un modelo de variables ocultas. La cuántica sostiene que las canicas no tienen color mientras no las saquemos y que se irán pintando de un color u otro al salir. Las teorías de variables ocultas dicen que ya tienen color y sólo constataremos ese hecho. Ahora sí: bastará con saber los porcentajes de colores que deberían tener las canicas y tomar una muestra. Si la muestra tiene distribución semejante al total conocido, el mundo se comporta sensatamente, Einstein tiene razón y la cuántica está en serios problemas porque las variables existen antes de ser medidas.

Sobre estas bases, David Bohm propuso un experimento en el que no era preciso ir a otras galaxias. En la versión del experimento Bohm-EPR se determina la polarización de fotones. Produciendo pares de fotones gemelos se observa la polarización haciéndolos pasar por polarizadores con diversos ángulos de polarización. Si la polarización existe en el fotón antes de ser observada (si es una variable oculta) y los pares de fotones se eligen verdaderamente al azar y los polarizadores también cubren diversos ángulos al azar, entonces la muestra de pares observados será similar a la distribución teórica de las polarizaciones. El experimento Bohm-EPR predice lo que cualquier encuesta: que si está bien hecha nos dará un modelo a escala de la población general, con porcentajes similares de hombres y mu-

jes, rubios y morenos, altos y bajos. En este caso, nadie pone en duda que tales características existen previamente en la población y en consecuencia pasan a la muestra.

Afinando el teorema de Von Neumann, en 1964 el irlandés John Bell estableció las bases matemáticas para llevar al laboratorio ese *Gedankenexperiment*, al que ahora debemos llamar Bell-Bohm-EPR. Dichos fundamentos se conocen como teorema de Bell y desigualdad de Bell. Nuevos instrumentos, nacidos precisamente gracias a la física cuántica, pusieron a prueba a la madre años después, en la Universidad de París.

Alain Aspect responde

Las «acciones fantasmagóricas a distancia», como llamó Einstein a aquellos resultados puramente lógicos derivados de la física cuántica, pudieron ponerse a prueba cuando la tecnología, impulsada por la misma cuántica, creó los instrumentos adecuados, entre ellos el láser. En 1982, la experiencia de Alain Aspect realizada en la Universidad de París puso en práctica la idea con la que Einstein, Podolsky y Rosen habían «demostrado» en 1935 que la física cuántica conducía a un absurdo y por lo tanto sus bases mismas eran erróneas [véase Ortoli y Pharabond, *El cántico de la cuántica*, pp. 53-63].

Antes que nada había que producir pares de partículas gemelas. Aspect lo consiguió excitando átomos de calcio por medio de dos rayos láser. La energía de los rayos excita los átomos; luego, al interrumpirse la estimulación, cada átomo vuelve a su esta-

do previo, para lo cual emite dos fotones. Ya se tienen así los gemelos. Ahora se debe medir alguna variable en uno de ellos y esperar a que el segundo sea a su vez medido. Si de manera consistente parecen enlazados aunque haya una distancia separándolos, la cuántica tiene razón y el mundo es absurdo.

Con pelotas y colores

El experimento de Aspect, explicado con pelotas y colores, era como lanzar dos pelotas de color desconocido, rojo o azul, en sentidos opuestos. La cuántica dice que no tienen color previo antes de verlas. EPR dice, sensatamente, que ya son rojas o azules, aunque no lo sepamos por no haberlas visto. Para comprobar quién tiene razón, pintamos una de ellas, ya en vuelo, de rojo o de azul, y descubrimos que, invariablemente, la otra tiene el color distinto. Si la pinto de rojo, la otra será azul; si la pinto de azul, la otra será roja. El azar dice que al menos algunas veces tendrían que coincidir los colores. Si nunca coinciden es porque no tienen color previo y la gemela toma el opuesto en cuanto pintamos una de ellas. Pero entre el momento de pintarla y su llegada al detector, donde se ve el color, transcurre un tiempo tan breve que ni un rayo de luz alcanzaría a llegar de la pelota pintada a la otra. En consecuencia no podría enviar ningún mensaje con la información sobre el color. Antes de que llegara el mensaje, aun a la velocidad de la luz, la pelota sin pintar ya estaría en el detector.

Con fotones y polarización

Repitiendo: para llevar a cabo el experimento EPR, Aspect y sus colaboradores emplearon como partícula el fotón y como variable oculta o desconocida la polarización de la luz. Se habla de polarización de la luz cuando sus ondas vibran en un solo plano; por consiguiente sólo pueden cruzar por filtros que tengan ese mismo ángulo de paso. Es algo así como lo que ocurre con las persianas: en una persiana horizontal únicamente podemos meter una hoja de papel si la colocamos horizontalmente; y en persianas verticales debemos pasar la hoja en posición vertical.

Los fotones, tras ser emitidos por los átomos de calcio con el método anteriormente descrito, se dirigieron, en sentidos opuestos, hacia receptores que midieron su polarización. Consideremos dos posibles polarizaciones, p y q , que, para facilitar el ejemplo, lo mismo podemos definir como luz que ondula en dirección vertical, como las olas, o en sentido horizontal, como las víboras. Pero —aquí viene la parte interesante— para evitar una posible comunicación entre los aparatos medidores de algún tipo misterioso que nadie lograra imaginar, y por la cual se avisaran: «Llegó un p , señala tú un q », con lo cual darían un tramposo triunfo a la cuántica, que eso predice, Aspect interpuso, entre la fuente de fotones y los medidores de polarización de un lado y de otro, aparatos que enviaban cada fotón en dirección hacia un medidor P o uno Q . Esa dirección de los fotones cambiaba, al azar, cien millones de veces por se-