

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*

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

## Capítulo 1

### 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 bil-lions», como él aclara en su libro postumo 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 ra-diante 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

Pag 20

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 proporcionales.

Pag 21

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 tu-viéramos un pedazo de hierro, sino un objeto constituido de una materia ideal, materia que absorbiera sin desperdicio alguno



basada en exponentes de diez:  $10^2$  es 100 ( $10 \times 10 = 100$ ),  $10^3$  es 1000. Así, en este caso, la constante de Planck se escribiría  $6.55 \times 10^{-27}$  ergios/segundo. Hoy se fija con más exactitud en  $6.626196 \times 10^{-27}$ . 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»].*

Pag 24

### **Salto 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-embarrassarse de ellos. No lo consiguió porque Einstein

Pag 25

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 foto-eléctrico. 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 trivía 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 mas corta longitud de onda, mayor velocidad. La física clásica no tenia 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.

Pag 26

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 Alha-zen, 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.

Pag 27

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 Tratado 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

Pag 28

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

Pag 29

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 su-lil 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 v sus observaciones sobre la interferencia.

### **Augustin Fresnel y Thomas Young**

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

De manera similar, donde se interceptan 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].

Pag 30 y 31 (Figuras 1.1 y 1.2)

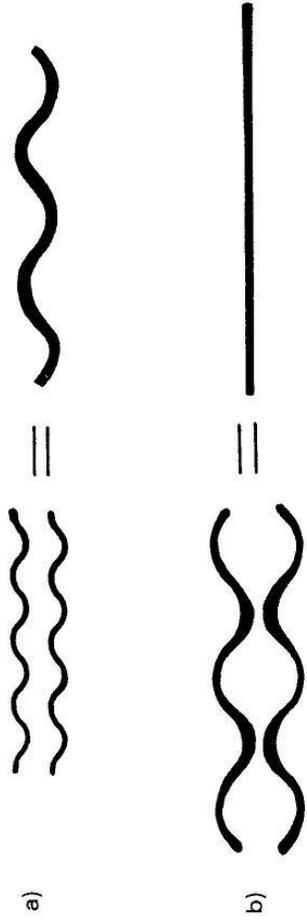


FIGURA 1.1. a) Ondas en fase se suman; b) ondas fuera de fase se restan.

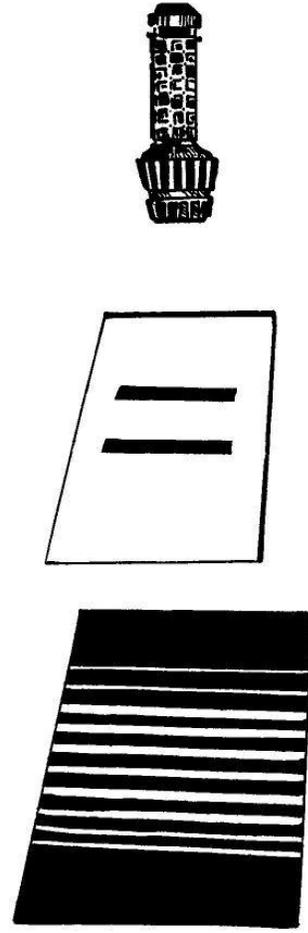


FIGURA 1.2. Interferencia.

Pag 32

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, ó la, la!, 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

Pag 33

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 luminífero 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

Pag 34

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 cólica, 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 dinamo 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

Pag 35

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 ministran 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

Pag 36

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.

Pag 37

### **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

Pag 38

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

Pag 39

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 Lorentz, 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*

Pag 40 (Figura 1.3)

Pag 41

*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].*

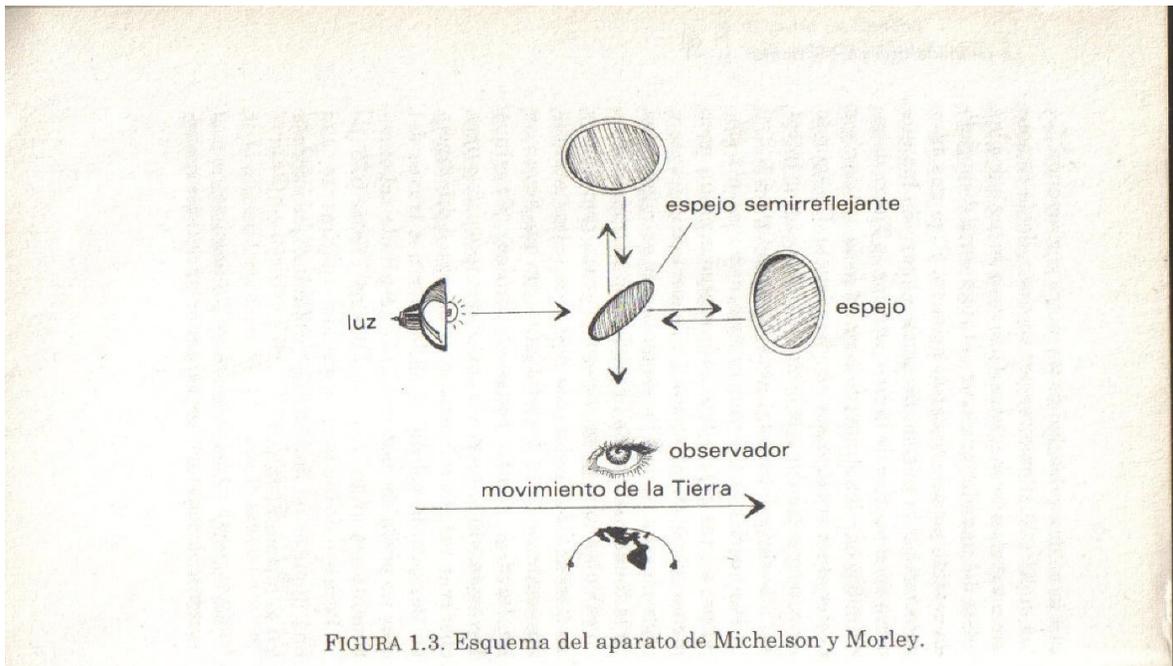


FIGURA 1.3. Esquema del aparato de Michelson y Morley.

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 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-

Pg 42

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

Pag 43

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.

Pag 44

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.

Pag 45

## **Capítulo 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

Pag 46

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 cuanta 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 cuanta de energía, «la horrenda hipótesis», y deseaba por tanto desembarazarse de ella. Y Einstein le hacía el flaco favor de

Pag 47

instalarlos en la luz. Todavía sin experimentos que certificaran la existencia de los cuanta 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 foto-eléctrico.

### **¿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 cuanta 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

Pag 48

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 guanta 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.

Pag 49

## **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 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 deajo*

*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-*

Pag 50

*nadas [el vagón del tren]; pero respecto de un sistema de coordenadas rígidamente 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

Pag 51

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**

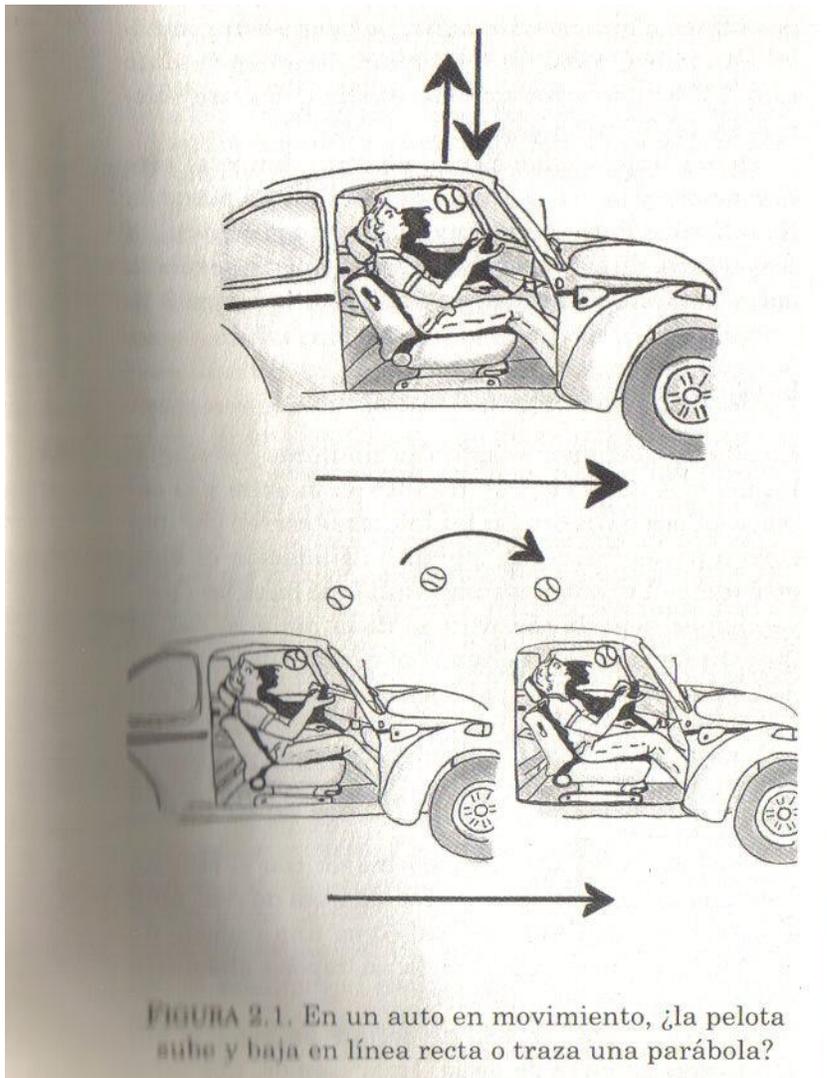
En cine se consiguen resultados similares por simple intuición. Cuando vemos un auto en marcha y la cámara enfoca a sus ocupantes mientras corren por una carretera, es frecuente que en la filmación el auto esté inmóvil y contra las ventanillas se haga una proyección en sentido contrario al de la marcha. 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,

Pag 52



Pag 53

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 movilidad 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

Pag 54

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

Pag 55

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-

Pag 56

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 300000 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 299000, sino a los mismos 300000 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 1080 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

Pag 57

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.

Pag 58

## **El tiempo**

Que el tiempo es una cuarta dimensión lo observamos fácilmente al hacer una cita con alguien: «Nos vemos en la esquina de Vallarria 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

Pag 59

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

Pag 60

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,*

Pag 61

*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*

Pag 62

*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,

Pag 63

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 NanSo-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 que los laboratorios de física sondan el átomo. Así por ejemplo, comenta Feynman que para guiar la corriente de electrones en el interior del sincrotrón de Caltech se requieren campos magnéticos 2000 veces más fuertes que

Pag 64

los necesarios si los electrones no fueran acelerados. «En otras palabras, la masa de los electrones en el sincrotrón es 2 000 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 que 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.

Pag 65

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-

Pag 66

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 te-dio, 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-

Pag 67

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, Godel Meéis Einstein, p. 9].*

Pag 68

Quizá esté más claro en un fragmento de Godel Meéis 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!)

Pag 69

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].

Pag 70

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.

Pag 71

### **Capítulo 3 El quantum en la materia**

Joseph John Thomson

Cuando Dimitri Mendeleiev, el químico ruso a 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 desconocí-

Pag 72

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

Pag 73

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].

Pag 74

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-

Pag 75

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 millonésimo 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.

Pag 76

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:

Pag 77

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

Pag 78

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» [Encyclopedia Britannica, entrada «protón»]. El nombre lo tomó de la palabra griega para «primero»: «protos». Identificados los protones, quedó establecido que integran 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:

Pag79

*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 chicharo 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

Pag 80

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. Esta 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.

Pag 81

Mo. Pero en el interior de éste seguían ocurriendo cosas muy extrañas. Por ejemplo, con las órbitas de 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

Pag 82

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-

Pag 83

Dios 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 orbita más cercana o más alejada del núcleo pudiera pasar por los puntos intermedio, sería señal de que puede existir allí, pero las nuevas 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 descrita 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

Pag 84

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

Pag 85

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 cola 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.

Pag 86

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 «shroedinguer») 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

Pag 87

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 cuantica. 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, y 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

Pag 88

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. Esa será la firma de que comprendemos.

### **La incertidumbre**

El principio de incertidumbre en palabras de Heisenberg es una transformación completa entre el observador y lo observado. La diferenciación "clara entre la *res cogitans* (mas 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 recíproc (entre el observador y el objeto observado) es tan pequeña que puede desprejarse\_[el observador casi no afecta el 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 nú-*

*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-

Pag 92

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.

Pag 93

## **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-

Pag 94

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 bolidos 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 per-juicios, 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 Antón 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

Pag 95

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, ante tal observación. Esto es, no hay variables ocultas como la posición y la velocidad, que estén allí pero no las hallamos 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.

Pag 96

### **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?

Pag 97

## **Capítulo 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-

Pag 98

bre de la energía puede tomar el préstamo del tiempo y permitir, por ejemplo, que el electrón cruce una l 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 del 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.

Pag 99

### **La caja de Einstein**

Einstein no podía tolerar semejante broma cuántica. Planteó entonces uno de sus muy ingeniosos Gedankexperiment: 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-

Pag 100