

gundo. Así pues, nadie podía saber si un fotón sería dirigido hacia un medidor con igual orientación o a su contrario. En el primer caso, el fotón cruzaría y sería detectado. En el segundo caso, no sería detectado. Los medidores de polarización estaban a seis metros y medio de la fuente, pero en el cienmillonésimo de segundo de cada cambio, un fotón habría podido recorrer sólo unos tres metros. Esto es como tener un lanzador de pelotas que las dispara tan rápido que la señal entre un cácher y el de enfrente no alcanza a llegar, ni a la velocidad de la luz, antes de que ambos tengan la pelota en el guante [véase la figura 6.1].

El resultado en el experimento de Aspect fue el predicho por la cuántica y contrario a Einstein: si los medidores de un lado captaban un fotón  $p$ , los del otro captaban uno  $q$ , y viceversa, con la inversión estadística predicha por las matemáticas descubiertas por Dirac y Schrödinger, sin que comunicación alguna entre aparatos pudiera explicar el fenómeno.

Con esa velocidad de cambio en la trayectoria de fotones lanzados hacia medidores con polarizaciones opuestas, ya no fue necesario mandar partículas hasta galaxias lejanas, como en el experimento mental de Einstein, Podolsky y Rosen, el famoso EPR. Bastaban seis metros de separación entre detectores: una distancia razonable dentro de cualquier laboratorio. Aspect puso trece.

Para que esta correlación inversa ocurriera, quien no deseara aceptar el extraño enlazamiento de par-

tículas predicho por la física cuántica estaba obligado entonces a aceptar algo peor: que alguna señal debía de haber viajado a velocidad superior a la de la luz para que los detectores se comunicaran entre sí y mostraran consistentemente una correlación entre la polarización del fotón captado: la «acción fantasmagórica a distancia» que tanto enojaba a Einstein.

En conclusión, quedaba demostrado que los fotones no habían tenido ninguna polarización, ni  $p$  ni  $q$ , antes de que alguno de los dos fuera detectado. La polarización la adquiría el fotón aleatoriamente y en su gemelo quedaba determinada la opuesta.

Con este experimento quedaba desechada la comunicación entre los receptores. Pero todavía podía ser que fueran los propios fotones los que se avisaran entre sí emitiendo una señal que informara al otro sobre su polarización, así que, describen Ortoli y Pharabond [*El cántico de la cuántica*, p. 63], Aspect hizo una modificación a su diseño para asegurarse de que tal aviso no ocurriera. Puso un medidor muy cercano a la fuente de fotones y el otro más alejado. La primera medición realizada debía determinar el resultado de la segunda si la cuántica estaba en lo cierto. La segunda medición ocurría en tiempos tan breves que una posible señal del primer fotón no podía alcanzar al gemelo antes de que éste llegara al detector [véase la figura 6.2]. Una vez más ocurrió el más extraño resultado: al mostrar el primer fotón una polarización determinada, el segundo en llegar al detector exhibió la contraria, revelando el

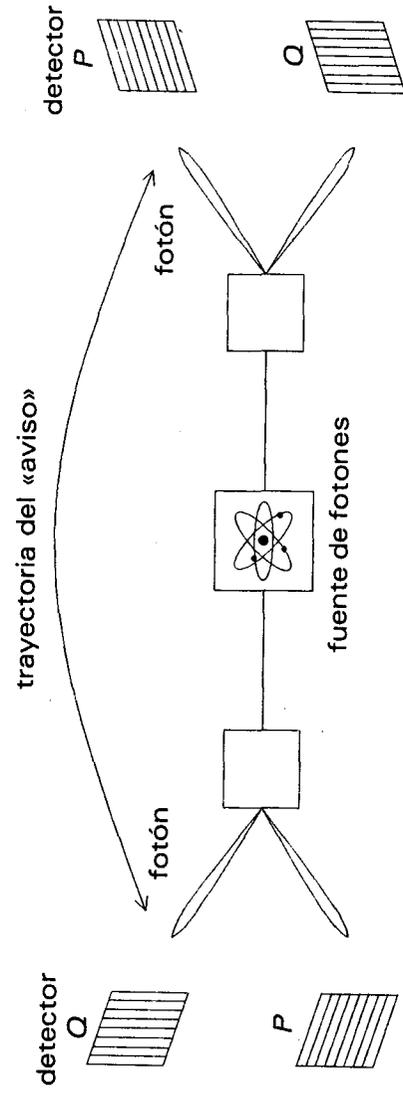


FIGURA 6.1. El experimento de Aspect.

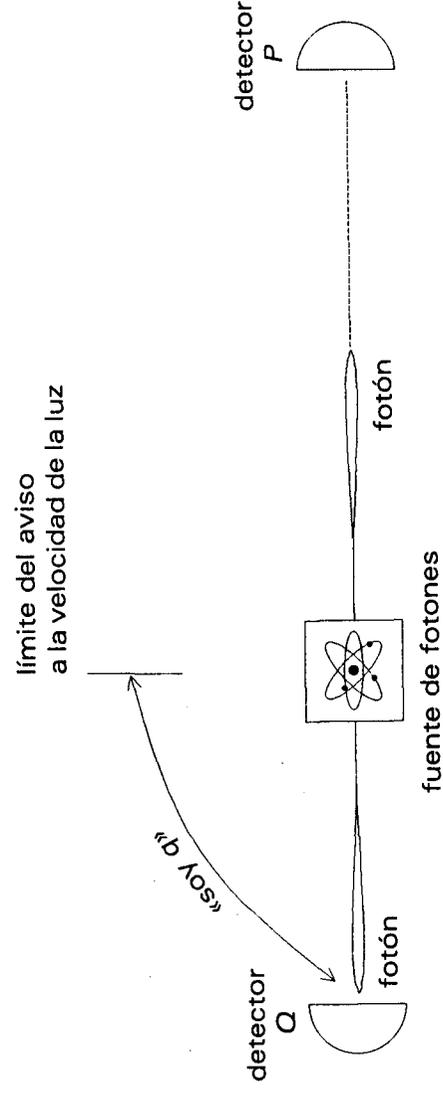


FIGURA 6.2. El aviso del primer fotón en llegar (y así quedar determinado) no puede alcanzar al fotón gemelo antes de que sea detectado en *P*.

enlazamiento predicho por las nuevas matemáticas. Pero, por la teoría de la relatividad, el primer fotón en llegar y ser medido no podía haberse comunicado con el que aún iba en vuelo, antes de que llegara al segundo receptor, pues ni la velocidad de la luz habría sido suficiente.

Penrose, en su comentario sobre este asombroso experimento, concluye: «Ninguno de los fotones por separado tiene un estado objetivo: el estado cuántico se aplica sólo a los dos en conjunto. Ninguno de los fotones tiene, individualmente, una dirección de polarización: la polarización es una cualidad combinada de ambos fotones juntos» [*La mente nueva del emperador*, p. 345].

Los resultados demostraban que los fotones no tenían polarización alguna previa a la medición, y que era ésta, la medición, la que al azar determinaba una u otra. Los físicos llaman a estos efectos instantáneos «no localidad», y era a lo que Einstein se refería con «acciones fantasmagóricas a distancia». El fotón gemelo emitido en dirección contraria presentaría la polarización inversa porque estaba descrito por la misma ecuación de onda: la paradoja EPR no era una demostración de que la física cuántica descansara en bases falsas, sino el modo de acción de la naturaleza. Einstein, el sentido común, la sensatez y la noción misma de realidad habían sido refutados. El mundo era absurdo.

## No separabilidad

Ante la incógnita, los físicos se plantearon dos extremos: o no existe el espacio o no existe el tiempo. A esa violación de nuestra noción de espacio se le llama «no separabilidad». Nos dice que los dos fotones son un conjunto indivisible, por mucho que se alejen, hasta que uno de ellos sea objeto de una medición.

*Corolario:* Entonces se puede aplicar la no separabilidad a todo el universo, pues de acuerdo con la teoría del Big Bang, todos los componentes del universo estuvieron unidos, hace unos 15 000 millones de años, en una *singularidad* y fueron descritos, por tanto, por una misma ecuación de onda... ¿o no?

La ruptura entre la relatividad y la cuántica fue así completa. La física cuántica ha seguido poniendo en duda nuestra concepción del mundo. O bien algo está radicalmente mal en el sentido común, incluido el de Einstein, o bien lo está en la física cuántica. Pero si esta ciencia continúa haciendo predicciones con niveles de exactitud más agudos que el radio de un protón, ¿cómo puede estar errada? Revisemos algunos recientes hallazgos que llevan a inusitadas consecuencias las paradojas ya revisadas.

## Del pasmo a la estupefacción

En 1997, un grupo suizo encabezado por Nicolas Gisin empleó fibra óptica para enviar pares de fotones alrededor de Ginebra y los resultados, una vez más, fueron consistentes con la física cuántica y contra-

rios a Einstein: «Sí hay en realidad acciones fantasmagóricas a distancia» [véase Watson, «Quantum Spookiness Wins...»]. Como propone el principio de incertidumbre (o de indefinición) de Heisenberg, las propiedades de los fotones creados en pares gemelos no estaban definidas sino hasta el momento de ser medidas en cualquiera de los dos fotones gemelos. Una vez realizada la medición en uno, el fotón gemelo quedaba instantáneamente definido a su vez. La no separabilidad de los gemelos hasta el momento de una medición y su consecuente negación del espacio reaparecía en pruebas con bases técnicas más refinadas.

Un año después, en 1998, científicos del Caltech reportaron un experimento por el que emplearon la no separabilidad para producir teleportación, esto es, «transporte sin cuerpo» y sin pasar a través de ningún medio físico, ni siquiera los puntos del espacio que separan la estación transmisora de la receptora. Ha sido denominada «teleportación cuántica incondicional» [véase Furusawa y otros, «Unconditional Quantum Teleportation»].

La teleportación del grupo californiano, encabezado por A. Furusawa, consistió en el envío de los estados cuánticos de un rayo de luz para reproducirlo. Pero no fue como enviar un plano, sino una reconstrucción del original. Pensemos en un fax para darnos una imagen más cotidiana. Cuando enviamos una fotografía, el aparato convierte la información visual, los colores, las formas y las líneas, en señales eléctricas que viajan por las líneas telefónicas. Luego esas señales recomponen la información

en el fax de llegada. Ahora imaginemos un caso en el que no obtuviéramos una copia, sino una reproducción exacta del original, incluido cada átomo, y la lectura del original lo hiciera desaparecer para reaparecer en la otra máquina de fax, sin haber cruzado por los puntos intermedios del espacio.

Los científicos creadores de la primera teleportación cuántica incondicional tuvieron el humor cruel de llamar EPR a sus rayos de fotones enlazados, con los que llevaron a cabo las «acciones fantasmagóricas a distancia» detestadas por Einstein y ofrecidas por él como ejemplo contra la naturaleza cuántica de la Naturaleza.

### La elección retrasada de Wheeler

Si las partículas se comportaban de tan diferente manera según fueran observadas o no, como demuestra el experimento clásico de las dos rendijas, ¿qué pasaría si el experimentador-observador retrasara su decisión de observar o no observar hasta que la partícula hubiera pasado por las rendijas, ya fuera por una o por ambas?

En el experimento de las dos rendijas los resultados cambiaban no sólo cuando se cerraba una de ellas, sino también cuando se ponían detectores, lo cual elude cualquier explicación sensata. Los cuantos de los que la materia misma está hecha —sean estrellas, galaxias o humanos—, los electrones, se comportan como ondas de luz al pasar por ambas

rendijas a la vez y dejar huellas de interferencia, rayas oscuras y claras, en las placas de los investigadores. Son partículas en cuanto se cierra una rendija y así puede determinarse su posición al instante de cruzar.

John Wheeler, quien estudió con Bohr en los años treinta, ideó un experimento para atrapar al electrón en el momento de elegir entre ser partícula o ser onda. ¿Qué pasaría, se preguntó el alumno de Bohr, si el investigador esperara hasta que el electrón pasara por las dos rendijas antes de decidir si observa o no? Llamó «elección retrasada» a su experimento mental.

Apenas cinco años después fue realizado simultáneamente en las universidades de Munich y Maryland. En vez de rendijas se empleó un espejo semirreflejante para partir en dos un rayo láser. Así, algunos cuantos, en este caso de luz, serían desviados a un lado, llamémoslos semirrayo *A*, y otros cruzarían de largo, a través del espejo: el semirrayo *B*. Luego otros espejos los regresaban hasta un detector.

Bien, cuando el diseño no permitía a los investigadores conocer el camino de cada fotón individual, los fotones seguían ambos: en el espejo semirreflejante se partían en dos onditas que regresaban, reflejadas por los dos espejos finales, y producían las rayas clásicas de la interferencia en el detector. Lo mismo que con las dos rendijas.

Luego los investigadores instalaron una celda de cristal del tipo que permite, al aplicársele una corriente eléctrica, desviar uno de los rayos hacia un

detector auxiliar. Se conocen como celdas de Pockels. Sin corriente, se trata de un simple cristal perfectamente transparente a través del cual pasa el rayo de luz partido. Un generador de señales al azar encendía y apagaba la celda eléctrica *después* de que el fotón ya había cruzado el semiespejo partididor del rayo y, por tanto, según había mostrado en el paso previo, se había partido cada fotón en dos onditas que formaban los rayos *A* y *B*. Era la idea de Wheeler.

Pero cuando la celda estaba encendida y enviaba en consecuencia el medio láser *A* al detector auxiliar, los fotones no mostraban rayas de interferencia en ninguno de los dos detectores, ni siquiera en el primario, a donde siempre volvía el rayo *B*, para el que no se había dispuesto una celda eléctrica. Por lo tanto, debía concluirse que ambos semirrayos estaban conformados por partículas que no se habían partido en el semiespejo, sino que, como un puñado de canicas ante un obstáculo, unas habían tomado un camino y otras otro, completas y sin partirse. Pero bastaba con apagar la celda y permitir a los fotones del rayo *A* pasar sin ser observados por el detector auxiliar para que reaparecieran las rayas de la interferencia.

### La elección

¿Cómo «sabía» el rayo entero, al llegar a donde debía partirse en dos, si debía partirse como canicas que se separan completas en dos grupos o bien como gotas

de agua que se parten en dos y cada mitad sigue un camino y forma media corriente? La célula eléctrica está colocada *después* de donde el rayo se parte, y se activa o permanece inactiva no sólo al azar, sino por una elección que se toma *después* de que el rayo se ha partido, por tanto ya va viajando en dos semirrayos, sean de canicas enteras o de gotas partidas. ¿Y cómo «sabía» el rayo *B* si el rayo *A* estaba cruzando por un cristal inerte o activado para desviarlo? Si arrojamos un puñado de canicas contra la esquina de un mueble, ¿cómo puede cambiar de comportamiento la corriente que pasa por la derecha según lo que ocurra a la de la izquierda? Es más, ¿cómo puede saber si se encenderá o no un aparato? Tendríamos que hablar de premonición.

La falacia tiene lugar, explica Wheeler, porque pensamos que un fotón (o un electrón) son ondas o partículas antes de observarlas. Pero los elementos cuánticos, por el principio de incertidumbre, no son ni ondas ni partículas sino algo indeterminado hasta el momento de una medición. Ya lo había dicho a principios del siglo XVIII el obispo de Cloyne, Irlanda, George Berkeley: ser es ser percibido.

### Una gran maquinaria o un gran pensamiento

Leonard Mandel, en la Universidad de Rochester, demostró en 1991 algo todavía más asombroso: basta la posibilidad de conocer una ruta determinada en una

corriente de fotones para que éstos no se comporten como ondas que pasan por dos rutas a la vez, sino como partículas que van por una o por otra [véase Horgan, «Quantum Philosophy»]. Primero, Mandel dividió en dos un rayo láser empleando un semiespejo (un espejo que refleja sólo la mitad de la luz y deja pasar otra mitad, como en el experimento antes descrito); así consiguió dos rayos: llamémoslos otra vez rayos *A* y *B*. Luego, empleando lentes que parten un fotón en dos con la mitad de la energía cada uno, dividió cada fotón de los dos rayos láser en dos fotones. Así obtuvo cuatro rayos: *a*, *a'*, *b* y *b'*. Mezcló *a'* y *b'* en un solo rayo y los envió a un detector. Los otros dos rayos, *a* y *b*, fueron a otro detector. Entre tantas particiones, subparticiones y mezclas, no había forma de saber cuál camino seguiría un fotón en particular. En este caso los fotones tomaron, cada uno, ambas direcciones en el semiespejo (comportándose como ondas) y cada uno pasó por la lente dividiéndose en dos (de nuevo como onda). Los detectores mostraron la señal de interferencia propia de las ondas.

Nada distinto a lo sabido, salvo que este diseño permitía bloquear *a'* o *b'*. Entonces desaparecieron las rayas oscuras y claras de la interferencia en los detectores. Los fotones se comportaban como partículas simplemente porque ahora los investigadores podían determinar la ruta seguida por los fotones *a* y *b* a lo largo de las particiones del rayo en el semiespejo y en las lentes. Les bastaba con medir los tiempos de llegada de éstos contra el tiempo de *a'* o *b'*, la vía no bloqueada.

Una vez más: al llegar al semiespejo, cada fotón individual del rayo de luz debe «decidir» si se parte como una gota de agua contra una esquina o bien rebota a derecha o izquierda como una canica. Luego viene la lente que lo parte en dos fotones de energía menor y sólo después se encuentra o no el obstáculo. Al llegar a él, el fotón ya había tomado su primera «decisión»: partirse como onda y tomar las dos direcciones o sólo una, como partícula, ante el semiespejo. ¿Cómo «sabe» si adelante habrá un obstáculo? ¿Y cómo «sabe» que, dado el diseño del laberinto, ese obstáculo permite descubrir información ilegal? No puede, si es onda, haber seguido un camino preciso, de partícula. Pero el laberinto de Mandel lo permite. Así que la sola posibilidad cancela al fotón como onda y hace que se comporte como partícula.

Richard Feynman expone estos resultados bajo la sencilla regla empírica: «Si los caminos son distinguibles, entonces la luz se comportará como partículas y no habrá interferencia. Si los caminos son indistinguibles, entonces la luz se comportará como onda e interferirá consigo misma» [Watson, «“Eraser” Rubs Out Information...»].

La «conferencia celebrada en honor del profesor John A. Wheeler», a la que convocó The New York Academy of Sciences en 1995, tuvo numerosas ponencias con diseños similares al descrito, publicadas en el volumen 755 de los *Annals of The New York Academy of Sciences* con el título *Fundamental Problems of Quantum Theory*.

Refinamientos subsecuentes en la misma dirección de este experimento permitieron cuatro años después, en 1996, emplear esta paradoja del mundo cuántico para examinar objetos sin observarlos en absoluto: sin que los toque nada, ni un rayo de luz ni cualquier otra cosa. Investigadores de la Universidad de Innsbruck han conseguido lo que llaman «interaction-free measurements»: mediciones sin interacción alguna con el objeto medido. La imagen la forman fotones que jamás han tocado el objeto, pero que pertenecen a un ramal de dos en que se ha partido un láser. Ninguno de los dos ramales del rayo partido toca el objeto, pero uno de ellos «sabe» cómo es y dónde está. Si Mandel demostró que la sola posibilidad de conocer la vía seguida por un fotón hace que se comporte como partícula, los investigadores de Innsbruck emplean esa base, en diseños mucho más complejos, para ver en total ausencia de interacción con el objeto «visto» [véase Kwiat, Weinfurter y Zeinlinger, «Quantum Seeing in the Dark»].

### Feynman y los viajes al pasado

«Haciendo las cosas todavía más raras, en la formulación según Feynman de la QED [electrodinámica cuántica], un positrón es equivalente a un electrón moviéndose hacia atrás en el tiempo» [Johnson, *Fire in the Mind*, p. 138]. Feynman es quizá el más importante entre los físicos cuánticos de la generación posterior a los padres fundadores. El 15 de septiembre de 1949, en *Physical Review*, publica Feynman el ar-

título «Space-time Approach to Quantum Electrodynamics». Allí postula para el positrón «componentes de tiempo negativo».

La historia del positrón, iniciada en el «mar de Dirac» y las bromas sobre elefantes pensativos, ha seguido siendo tormentosa como su nacimiento marino. Tras el positrón fueron postuladas antipartículas para cada una de las existentes, antiquarks, antimisones y todo un universo-espejo que es la antimateria.

Conocido por los estudiantes de física sobre todo por los «diagramas de Feynman», los gráficos por él inventados para facilitar los complejos cálculos necesarios en la física de partículas, Feynman recibió en 1965 el premio Nobel. En uno de los ejemplos expuestos a menudo en sus conferencias y artículos, un trazo del diagrama representa un electrón desplazándose libremente en el vacío. Al entrar a un fuerte campo electromagnético, la trayectoria del diagrama muestra la correspondiente alteración de la trayectoria. La aparición de un positrón (el electrón de energía negativa de Dirac) se muestra en el diagrama como una línea que surge cuando el electrón ya ha pasado, pero remonta el curso del tiempo, lo alcanza y se aniquilan. El positrón es un electrón viajando al pasado.

#### El artículo de 1949

En su artículo de 1949 «Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics», Feynman lo dice así:

«Positron states being those with negative time component» [p. 776]. Está hablando de los estados inicial y final de un electrón. Entre esos extremos es donde el electrón puede estar en momentos de tiempo negativo. Dicho en español: en el pasado.

Pero no le basta esa audacia. Descubre cómo cierto problema (no importa describirlo) «puede ser resuelto considerando que las masas de las partículas y los cuantos tienen partes imaginarias negativas infinitesimales» [«Space-Time Approach...», pp. 776-780]. Aquí, Feynman emplea el término *imaginario* en el sentido matemático, muy distinto del habitual. Los números imaginarios no son los que imaginamos, sino los basados en la raíz cuadrada de  $-1$ , que se expresa por la letra  $i$ . Los números imaginarios toman su nombre del hecho de que no pueden ser colocados sobre la recta de los números reales, donde están  $-2$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $0.5$ ,  $3$ ,  $3.14159\dots$ ,  $5$ ,  $5.999$ , etc. Feynman nos propone que las partículas de las que todos estamos hechos tienen partes de algo tan imposible de figurar como la «masa imaginaria negativa». En términos terrestres, la masa es el peso. Puedo decir que algo es tan pequeño que pesa muy, pero muy poco. Ya es difícil concebir el hecho de que algo exista y no pese nada. Pero ¿que pese menos que nada? ¿Cómo sería una manzana que pesa  $-50$  gramos? Es una manzana tal que, puesta sobre una balanza, hace que el platillo donde la colocamos no sólo permanezca inmóvil —eso apenas es la masa cero—, sino que se levante. Eso es la masa negativa. ¿Y la «imaginaria negativa»? No hay ejemplos

posibles, no hay imágenes, sólo hay ecuaciones y están en las páginas citadas. Ya lo dijo el mismo Feynman: «Nadie entiende la física cuántica.»

Resulta difícil decidir qué interpretación del positrón es más contraria al sentido común: una partícula constituida por energía negativa, como dice Dirac (con las implicaciones relativistas que eso tendría para la masa... masa negativa), o un electrón común, hecho de energía común, viajando al pasado. Pero el positrón es un hecho, y también es un hecho que es idéntico en todo al electrón, salvo que se desvía a la inversa en un campo magnético.

Y aquí ha aparecido otra de las grandes interrogantes de la física cuántica: ¿por qué la masa de los diversos electrones es tan absolutamente idéntica y sin la más infinitesimal variación? La respuesta del venerable John Wheeler, director de tesis de Feynman en la Universidad de Princeton, es para leerse varias veces: porque todos los electrones son uno, uno solo y el mismo electrón.

Todos los electrones son iguales, porque no hay más que uno en todo el universo [véase Von Baeyer, «Tiny Doubles»]. Este único electrón aparece una y otra vez, en cada átomo de cada molécula de cada objeto, ser vivo o no, planeta, estrella, galaxia, cúmulo de galaxias. El único electrón viene del pasado, lo observamos en el presente y continúa hacia el futuro, regresa en el tiempo como un positrón (la antipartícula del electrón) y vuelve al presente, que fue pasado cuando venía del futuro y es futuro cuando

regresa a un pasado más lejano. Es una danza que llena el espacio y el tiempo./

Wheeler llega a esa conclusión por los siguientes pasos que Forward enumera así:

- 1) Todos los electrones son producidos inicialmente mediante la creación de un par electrón-positrón; es decir, no se puede hacer un electrón sin hacer un positrón al mismo tiempo;
- 2) todos los electrones y positrones desaparecen alguna vez en un proceso de aniquilación electrón-positrón;
- 3) todas las trayectorias que los electrones y positrones recorren en el espacio-tiempo comienzan y terminan con el comienzo o fin de otro electrón o positrón;
- 4) eso significa que todas las sendas están unidas por los extremos en una larga trayectoria que zigzaguea de atrás para adelante en el espacio y el tiempo;
- 5) por tanto: si el positrón es sólo un electrón que retrocede en el tiempo, todos los electrones y positrones que ahora observamos en el universo son un solo electrón visto en diferentes tramos de una única y larga senda de electrones [*Explorando el mundo de la antimateria*, p. 44].

No es, pues, que sean idénticos, sino que son el mismo electrón. Ahora se entiende la razón de que Richard Feynman, levantando los hombros, comente que nadie entiende la mecánica cuántica.

### Faltas contra la belleza

Ya desde que las masas del electrón, el neutrón y el protón fueron confirmadas repetidamente en diversos laboratorios había resultado sorprendente la desproporción entre esos elementos de la naturaleza. Las matemáticas lo señalaban, el laboratorio lo confirmaba. No había error: el protón era 1 836 veces más pesado que el electrón. Tal ausencia de armonía era muy inquietante. Guiados más por motivos estéticos que científicos, los físicos buscaban una explicación sin conformarse con un sencillo «Así es y basta». Nunca se dan por vencidos. La verdad y la belleza van juntas, dijo Platón, pero es al parecer también una profunda y no siempre consciente certeza en la ciencia. «Una ley física debe poseer belleza matemática», escribió Paul Dirac [véase Corby y Kragh, «P. A. M. Dirac and the Beauty of Physics»]. Y no es nada bello un diminuto chícharo de un gramo girando en torno a una sandía de casi dos kilos. Un matrimonio muy ridículo.

Luego el también hermoso modelo basado en tres partículas se vino abajo. Ya no hubo sólo electrones, protones y neutrones para la materia, fotones para la energía. El zoológico se fue llenando de raras bestias que se acumularon por decenas. Otra vez: la naturaleza no podía estar constituida así, por centenares de diversas partículas. ¿Y por qué no? El creyente puede contentarse con decir que así quiso Dios, el no creyente puede conformarse diciendo que así es la Naturaleza. Pero el científico siente, más allá de toda prueba, que no puede ser así. Y no puede ser simplemente porque es confuso, arbitrario, escandaloso y feo.

Algunas de las partículas resultaban tan arbitrarias como el muon, en casi todo idéntico a un electrón, salvo que pesa 200 veces más. Isidor Isaac Rabi, quien obtendría el premio Nobel, lo recibió con la frase de disgusto a un mesero descuidado: «¿Y quién pidió esto?» Pero el muon allí estaba.

### El quark

Faltaba una sorpresa para redondear lo que hoy llamamos *modelo estándar* de la física de partículas: ni el protón ni el neutrón, las partículas constituyentes del núcleo atómico, eran partículas elementales. Estaban compuestas por partículas, éstas sí elementales hasta ahora (aunque bajo sospecha), y por su respectivo cuanto de energía que las une: los quarks y los gluones, respectivamente. Murray Gell-Mann

tomó el nombre «quark» de *Finnegans Wake*, la última novela de Joyce, y, según dicen, más ininteligible que la física cuántica por su invención de palabras y con algunas similitudes con el mundo subatómico, pues los personajes aparecen, se mezclan y desaparecen como guiados por el principio de incertidumbre. Lo cual también lo aproxima al burro de Sancho y, por supuesto, al gato de Schrödinger. Los gluones obtuvieron su nombre de manera más mundana: de «glue», pegamento en inglés, porque pegan un quark con otro.

En 1964, Murray Gell-Mann y Yuval Ne'man, por una parte, y George Zweig por otra, propusieron de manera independiente la teoría de los quarks. Así, los centenares de partículas descubiertas quedaron reducidas a una con seis «sabores» [véase Voss, «Marking the Stuff of the Big Bang»] y cuyas diversas combinaciones producían distintas partículas, ninguna de ellas elemental, o, es decir, constituida por un solo quark. Dos hacen un mesón, tres un protón, tres en otra combinación nos dan un neutrón. Volvió el orden a la acumulación de partículas nuevas descubiertas incesantemente por los enormes aceleradores que rompen átomos y núcleos a cada vez mayores energías. Todas eran combinaciones de quarks.

Los quarks recibieron nombres que no sugieren ninguna relación con el significado de la palabra en el mundo cotidiano: «up», «down», «strange», «charm», «bottom» (o «beauty») y «top» (o «truth»), comprobado en 1994. Protones y neutrones están formados

por tres quarks. Los protones tienen dos up y un down; los neutrones a la inversa, dos down y un up. Así que para construir la materia que forma galaxias y seres humanos bastan dos quarks, up y down, y electrones suficientes para equilibrar el átomo. Otra vez tres partículas elementales: un número que a todos nos gusta. Habría que añadir la partícula predicha en los años treinta por Wolfgang Pauli, el neutrino, para la que la materia común es tan translúcida que, procedente del Sol, cruza nuestro planeta sin apenas mostrar algún disturbio en su trayectoria. Pero cuatro partículas tampoco están mal para explicar el universo.

### El gluon

Si el fotón es el cuanto de energía electromagnética, el gluon es el cuanto de la fuerza nuclear fuerte que une a los quarks en protones o neutrones y a éstos en núcleos atómicos. La carga de la fuerza fuerte se describe por un color. Si la carga eléctrica puede ser positiva o negativa, los portadores de la fuerza color son rojo, azul y verde [véase Greene, *The Elegant Universe*, p. 125], sin que, de nuevo, el nombre indique ni remotamente nuestra idea de esos colores. Así que, revisada la receta para construir un protón, se debe añadir que de los tres quarks necesarios, dos up y un down, cada uno de ellos debe tener un «color» o carga diferente: rojo, verde y azul. El neutrón, con dos quarks down y uno up, también debe tomar cada

uno de ellos en color diferente. La suma de los tres colores primarios da una carga neutra o «blanca» a la fuerza color.

### Las fuerzas

Las fuerzas en el universo también han quedado ordenadas en cuatro: 1) el electromagnetismo, cuyo mensajero es el fotón, y que es la luz visible, los rayos X, todo el espectro no visible de la luz y cuanto fenómeno eléctrico y magnético llena la naturaleza, el más elemental de los cuales sería la carga eléctrica del electrón, transportada por el fotón; 2) la fuerza nuclear fuerte, transportada por el gluon, que se ejerce únicamente en las minúsculas distancias del núcleo atómico para unir quarks en protones y neutrones y a éstos en núcleos de átomos; también une quarks en otro tipo de partículas; 3) la fuerza débil, responsable de la radioactividad del uranio o el cobalto, cuyos mensajeros son los bosones débiles; y, por último, 4) la fuerza gravitatoria, que nos une al planeta, a los planetas en sistemas solares, a éstos en galaxias, a las galaxias en cúmulos, a los cúmulos en supercúmulos y a éstos en estructuras aún mayores.

Las cuatro fuerzas son transportadas por cuatro partículas: fotón, gluon, bosones débiles y gravitón. Es un vaivén de partículas lo que explica toda fuerza en el universo. Un intercambio de gluones entre quarks los pega en protones, neutrones, mesones y otras partículas de peso medio y pesado; un inter-

cambio de fotones explica la atracción y la repulsión eléctricas entre los átomos. Estos intercambios han quedado descritos en tres formidables teorías.

### Resumen: el modelo estándar

La materia está hecha, pues, de átomos formados por electrones externos y quarks up y down en el centro, formando protones y neutrones. Estos dos últimos, por integrar el núcleo del átomo, reciben el nombre genérico de nucleones. El protón tiene carga eléctrica positiva y el neutrón la tiene neutra; de ahí su nombre. Están unidos por mensajeros de fuerza llamados gluones. Hay además, fuera del átomo, neutrinos a los que nadie encuentra utilidad. El electrón se considera perfectamente puntual, una partícula sin dimensiones, sin radio, de carga negativa y más de 1800 veces menor que los nucleones.

Las fuerzas, como ya dijimos, son cuatro: electromagnetismo, fuerza fuerte, fuerza débil y gravitación. El electromagnetismo comprende aspectos que parecen diversos en la vida cotidiana y Maxwell descubrió que proceden de un sustrato común, como la luz, el radio, los rayos X, la electricidad, el magnetismo. Su *quantum* o cuanto de energía es el fotón. La fuerza fuerte une los quarks en protones o neutrones. Su cuanto es el gluon y viene en ocho presentaciones. La fuerza débil es responsable de ciertos aspectos de la radioactividad y sus cuantos se conocen como bosones débiles, que vienen en tres

tipos:  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$ . La gravitación es la fuerza más débil en pequeñas distancias y se predice como portador un cuanto llamado gravitón.

Con electrones, quarks y las cuatro fuerzas bastaría para entender el universo. Pero no es tan simple. Hay otras dos familias de partículas que no forman átomos, aunque están bien relacionadas con las de la primera familia descrita. El electrón tiene dos primos enormes, el muon y la partícula tau. Los dos quarks que nos bastan para tener materia tienen, cada uno, otros dos primos; up tiene a charm y a top, down tiene a strange y a bottom. El neutrino tampoco está solo y tiene dos primos: el neutrino-muon y el neutrino-tau.

### Complicación de la clasificación

La clasificación de las partículas se ha complicado. Las partículas elementales, no compuestas, como electrones y neutrinos, reciben el nombre de «leptones», del griego «leptós», ligero. Leptones y quarks integran los fermiones, llamados así en honor de Enrico Fermi, y siguen el principio de exclusión de Pauli «según el cual no puede haber dos de tales partículas en el mismo estado de movimiento. La presencia de un electrón en un estado específico (por ejemplo, en un particular punto del espacio) excluye de allí a otros» [Polkinghorne, *The Quantum World*, p. 39]. Los protones y neutrones, compuestos por quarks, reciben el nombre de «hadrones» con otras partículas como los mesones pi o

piones. Los mesones tienen ese nombre porque se encuentran entre los ligeros electrones y los pesados protones: «mesos» significa «intermedio» en griego. El mesón mu es parecido a un electrón, pero 200 veces más pesado; su nombre se condensó en «muon». El mesón pi es aún más pesado. También hay kaones. Las partículas más pesadas se conocen como «bariones», del griego «barós», pesado. Entre ellas encontramos, de nuevo, al protón y al neutrón, a los que podemos llamar, por tanto, nucleones, hadrones y bariones.

Los cuatro mensajeros de las fuerzas, llamados genéricamente «bosones» en honor al físico hindú Satyendra Nath Bose, no siguen el principio de exclusión de Pauli. Por el contrario, «positivamente les gusta estar en el mismo estado juntos», dice Polkinghorne.

Unos y otros tienen su antipartícula, ante la cual desaparecen en un estallido de energía pura equivalente a sus masas. Algunos, como el fotón y el pión neutro, son su propia antipartícula [véase Weinberg, *The Discovery of Subatomic Particles*].

### Preguntas sin respuesta

No acaba de estar libre de fealdades el modelo estándar de la física cuántica: la más alta culminación del espíritu humano. Entre ellas algunas en verdad repelentes, como que el quark top sea 40 200 veces más pesado que el común quark up que hace protones y neutrones, o bien que las partículas tau sean 3 520

veces más pesadas que un electrón. Son números muy raros que parecen dictados por el azar y que conducen a buscar más abajo, más adentro de la materia, donde pudiera encontrarse un común denominador, único, hermoso, elegante, como lo fue el electrón para la química cuando quedó establecido que la simple suma de un elemento idéntico producía toda la diversidad de los elementos y la arbitrariedad del mundo. Entre el hidrógeno, el plomo y el oro no hay más que una diferencia en el número de electrones. Por supuesto, con los suficientes protones para equilibrar sus cargas eléctricas. El aparente desorden entre gases, sólidos, líquidos, con sus diversas texturas y características, el humor explosivo del hidrógeno y la tranquilidad del nitrógeno, la ductilidad y el brillo del oro, la dureza del hierro: electrones más, electrones menos, y eso es todo. Es la corona final de la química.

Podemos decir que desde entonces la química está concluida. Por supuesto, se inventarán nuevas moléculas, se añadirán elementos más pesados. Pero la investigación básica, fundamental, está hecha, y terminó con el descubrimiento del electrón como explicación de los elementos.

La física de partículas busca otro tanto. Ha aparecido orden en el zoológico de partículas, pero ¿un quark 40 200 veces más grande que otro? ¿Y por qué ese 200 sobrante y no 40 000 cerrados? Se ha propuesto un elemento que explica al electrón y al quark: la cuerda. Revisaremos esa teoría, quizá para siempre fuera de toda posible comprobación, en el capítulo

ocho. Por ahora, todavía hay más motivos de asombro en el mundo de las partículas que no lo son.

### Las unificaciones

Tres de las cuatro fuerzas del universo han podido unificarse al sondear la materia hasta niveles donde muestra que son parte de un elemento aún más básico, de un denominador común.

El electromagnetismo, ya producto a su vez de la unificación de Maxwell, fue incorporado a la materia por los físicos como una danza entre fotones emitidos por electrones, pares electrón-positrón surgidos de un fotón, y la relatividad especial. Tenemos así electromagnetismo, cuántica y relatividad incorporados en la teoría llamada «electrodinámica cuántica», QED por sus siglas en inglés (*quantum electrodynamics*), en un juego con la idea de demostración concluida, pues se emplean las mismas letras, QED, para expresar «Quod Erat Demonstrandum», «lo cual estaba en demostración», al finalizar una prueba matemática, por ejemplo, un teorema.

Una lúcida serie de conferencias titulada *QED: The Strange Theory of Light and Matter* hizo de Richard Feynman uno de los principales arquitectos de esta teoría que describe la relación entre átomos y cargas eléctricas como un intercambio incesante de fotones que van y vienen, vibrando continuamente a través del espacio y del tiempo. Sostiene Greene:

El éxito de la electrodinámica cuántica inspiró a otros físicos en las décadas de 1960 y 1970 a emplear una aproximación análoga para desarrollar una comprensión cuantomecánica de las fuerzas débil, fuerte y gravitatoria. Respecto de las fuerzas débil y fuerte, ésta demostró ser una inmensamente fructífera línea de ataque. En analogía con la electrodinámica cuántica, los físicos pudieron construir teorías de campo cuánticas para las fuerzas fuerte y débil, llamadas cromodinámica cuántica y teoría cuántica electrodébil [...]. Con su trabajo ganador del premio Nobel, Sheldon Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg mostraron que las fuerzas electromagnética y débil están unidas naturalmente [...] aunque sus manifestaciones parezcan tan completamente distintas en el mundo alrededor de nosotros [...]. En esencia, mostraron que a suficientemente alta energía y temperatura —tal como la ocurrida una mera fracción de segundo después del Big Bang— los campos de fuerza electromagnético y débil se *disuelven* uno en otro [*The Elegant Universe*, p. 122].

Después, cuando la temperatura comienza a caer, ese campo unificado original se cristaliza en las diversas fuerzas que conocemos y que nos parecen tan notablemente divergentes, como la gravitación y la luz.

La gravitación se ha resistido al entusiasmo unificador de los físicos, pero ya vimos que otras fuerzas no. Así como el electromagnetismo y la fuerza débil resultaron indistinguibles y se disuelven una en la otra, en una sola fuerza, a las altísimas temperaturas que sólo existieron al inicio del tiempo, también la fuerza fuerte ha quedado enmarcada en una sólida teoría.

La teoría que analiza la colorida danza de los gluones y los quarks, la fuerza fuerte, se llama «cromodinámica cuántica», QCD por las iniciales de *quantum chromodynamics*. El *chromo* («color» en griego) le viene porque la carga de los quarks recibió el nombre de «color» y ya vimos que son tres colores. El aspecto más asombroso de esta teoría es su descripción del vacío como cualquier cosa menos vacío. El espacio vacío está lleno de un mar de pares de quarks virtuales que brotan por nanoinstantes en una vibración de perenne animación causada por el principio de incertidumbre [véase Voss, «Making the Stuff of the Big Bang»]. Las partículas virtuales incesantemente toman prestada energía al espacio mismo y salen de la nada sólo para desaparecer al instante [véase Marschall, «Null and Void»]. Si no hay límites claros entre el átomo y el vacío, tampoco los hay entre la existencia y la no existencia, al menos en el mundo subatómico.

Las tres fuerzas no gravitatorias y las tres familias de materia ya vistas, una sola de las cuales basta para crear toda la materia y que conforman el «modelo estándar» de la física, poseen relaciones que nos dejan llenos de preguntas. Sigamos las que se hace Greene:

¿Por qué hay tantas partículas fundamentales, especialmente cuando parece que la gran mayoría de las cosas en el mundo a nuestro alrededor sólo necesitan electrones, quarks up y quarks down? ¿Por qué hay tres familias? ¿Por qué no una familia o cuatro familias o cualquier otro número? ¿Por qué las partículas tienen

una masa en apariencia azarosa, por qué, por ejemplo, la tau pesa 3 520 veces más que un electrón? ¿Por qué el quark top pesa unas 40 200 veces más que el quark up? Son estos números tan extraños, al parecer debidos al azar. ¿Ocurren por casualidad, por alguna elección divina, o hay una explicación científica comprensible para estos rasgos fundamentales de nuestro universo? [*The Elegant Universe*, pp. 9–10].

Añadiríamos: de las cuatro fuerzas, tres de sus mensajeros son partículas sin masa. El fotón, el gluon y el gravitón tienen masa cero.

¿Qué significa «masa cero»? Las masas dadas aquí son las masas de las partículas *en descanso*. El hecho de que una partícula tenga masa cero significa, de alguna manera, que no puede *estar en descanso*. Un fotón nunca está en descanso, siempre se está moviendo a 300 000 kilómetros por segundo [Feynman, *Six Easy Pieces*, p. 43].

### El nuevo malestar

Hay de nuevo el sentimiento en la física de que falta algo muy importante. No un detalle, otra partícula, un quark, un bosón, sino una total renovación equivalente a la que se dio en la tercera década del siglo XX. Falta un nuevo punto de vista, más global, desde donde todas estas extrañas casualidades caigan armoniosamente en una nueva imagen del universo.

Tenemos dos grandes teorías para explicar el universo: la relatividad general la empleamos cuando

tratamos con distancias estelares, galaxias en movimiento y velocidades cercanas a la de la luz. Pero cuando debemos estudiar los componentes de esas mismas galaxias, estrellas y observadores de estrellas, los átomos con sus electrones y quarks, debemos elegir otra teoría, la física cuántica. ¿Cómo pueden ser mutuamente incompatibles las dos teorías que describen el mundo con tal precisión? Guiadas por las ecuaciones de la relatividad, van y vienen naves espaciales que se dan vuelo gravitatoriamente empleando la cercanía de un planeta para acelerarse rumbo a los confines del sistema solar. La deformación del espacio-tiempo en su más alto grado, los hoyos negros, también se han visto confirmados luego de su predicción hace décadas por las ecuaciones relativistas. La relatividad es correcta.

También lo es la cuántica. Ha predicho cuanta partícula, y antipartícula, hoy tenemos observada. Ha dicho cuál sería su masa, su spin, su carga eléctrica, cómo podríamos observarla, y un buen día allí estuvo, cumpliendo con todos los rasgos previstos, exacta a las ecuaciones hasta la milbillonésima. La cuántica es correcta.

Pero no lo pueden ser ambas, subraya Greene. Cada una ha comprobado su enorme poder y es por tanto correcta en su campo, lo enorme o lo minúsculo. Y con todo, los seres humanos no podemos creer que el universo tenga esa división en su propio seno aunque los intentos por incorporar la gravedad a la física cuántica hayan fallado. Las fluctuaciones del vacío predichas por la incertidumbre convierten el inten-

to de unificación en un desastre con predicciones aberrantes. Cuando las perfectas ecuaciones que nos dan la masa exacta de un hoyo negro penetran hasta la región donde el espacio danza al ritmo de las ecuaciones de Heisenberg, la danza se vuelve monstruosa y las ecuaciones afirman sinsentidos.

Veamos algo más sobre ese que parece uno de los mayores obstáculos entre la relatividad y la cuántica: el vacío que no lo es tanto.

### El mayor obstáculo entre relatividad y cuántica: la fuerza del vacío

Se llama longitud de Planck a una fracción de centímetro que se escribe con un punto, 32 ceros y un 1 (repetiendo el ejemplo, si infláramos un átomo hasta el tamaño de todo el universo, la longitud de Planck habría crecido al tamaño de un árbol). El principio de incertidumbre predice, para niveles en la longitud de Planck, una extraña descripción de un vacío viviente en el que pares de partículas y antipartículas brotan de la nada a la existencia y de nuevo regresan a la nada sin otra causa que las fluctuaciones de «incertidumbre» del espacio mismo. Son pares de partículas *virtuales*, que toman su existencia en préstamo debido a que el principio de incertidumbre permite esa posibilidad.

Esta hermosa y terrible coreografía de la nada ha sido comprobada por Steven Lamoreaux, del Laboratorio Nacional Los Álamos. Siguiendo las ecua-

ciones de la física iniciada por Planck y Einstein, culminada por Heisenberg, De Broglie y Schrödinger, incluso en el cero absoluto, el vacío germina en actividad «virtual». Es la energía ahora llamada «del punto-cero». «Por décadas después que Planck y Heisenberg describieran la energía punto-cero [*zero-point energy*], los físicos prefirieron ignorarla» [Seife, «The Subtle Pull of Emptiness»].

Pero pronto la energía del vacío demostró que no podía seguir siendo ignorada. Científicos de la Philips en Holanda, Hendrick Casimir y Dik Polder, descubrieron que las fluctuaciones del vacío explicaban cierta débil atracción entre átomos neutros que, por ser neutros, no debían mostrarla. Pero, además, el alejamiento de los átomos producía una pauta muy particular en el debilitamiento de la atracción. Si se aceptaba la energía de punto-cero, postulada por la física cuántica y olvidada por extravagante e inmanejable, se comprendía esa atracción entre los átomos. Se le llamó efecto de Casimir-Polder y fue medida por primera vez con exactitud en 1993.

### El punto-cero

La energía de punto-cero se revela por la atracción que parece unir a dos superficies separadas por una distancia minúscula. Si se consiguiera acercar tanto las dos superficies que se impidiera el surgimiento de partículas virtuales en su interior, las del exterior harían una pequeña presión contra las superficies,

uniéndolas. Lamoreaux dispuso dos superficies de cuarzo recubiertas de oro a menos de un micrómetro, una de ellas conectada a un péndulo de torsión y la otra fija. Así creó un espacio tan reducido que sólo permitía algunas longitudes de onda; por lo tanto, había muy escasas partículas virtuales en el interior mientras afuera brincoteaba alegremente una multitud con todas las longitudes de onda. Éstas produjeron presión contra las superficies de cuarzo y el sutil movimiento fue transmitido a los instrumentos. Lamoreaux midió la presión del vacío, la energía de punto-cero, con una diferencia menor al cinco por ciento respecto del predicho por la teoría [véase Seife, «The Subtle Pull of Emptiness»].

Einstein encontró esa fuerza del vacío derivándose naturalmente de las ecuaciones relativistas y mostrando que el universo no era estático. Pero ocurrió antes de que Edwin Hubble descubriera, a fines de la década de 1920, la expansión del universo, así que Einstein, como Planck, introdujo en sus ecuaciones una constante *ad hoc*, la necesaria para mostrar un universo estático. La llamó «constante cosmológica». Tras el descubrimiento de Hubble y la comprobación de que el universo se expande, Einstein llamó a su componenda el más grande error de su vida.

### Espuma cuántica

Así pues, la nada resultó llena de energía punto-cero, permeada por un campo que para algunos físicos sur-

ge del principio de incertidumbre y, para otros, en la teoría competitiva, «un campo punto-cero es tan fundamental como la existencia del universo mismo» [Haisch, Rueda y Puthoff, «Beyond  $E=mc^2$ »]. Está allí como toda la creación. El campo de energía punto-cero es una perpetua danza entre el ser y el no ser, un ir y venir de pares virtuales de la inexistencia a la existencia y de nuevo a la inexistencia, aparición y desaparición: el vibrante tejido del espacio-tiempo bajo la fuga perpetua conducida por un tema único: el principio de incertidumbre. Basta una fluctuación azarosa de la incertidumbre para que puedan surgir a la existencia un par de cuantos opuestos, digamos un electrón y un positrón, que se aniquilarán y volverán a la nada.

Todo está sujeto a las fluctuaciones cuánticas inherentes al principio de incertidumbre, aun el campo gravitatorio. Si bien el razonamiento clásico implicó que el espacio vacío tiene campo gravitatorio cero, la mecánica cuántica muestra que en promedio es cero, pero que su valor real ondula arriba y abajo debido a fluctuaciones cuánticas. Es más, el principio de incertidumbre nos dice que la medida de las ondulaciones del campo gravitatorio será mayor conforme enfoquemos nuestra atención en menores regiones del espacio [Greene, «The Elegant Universe», p. 127].

Es éste el obstáculo para unificar la relatividad y la física cuántica, subraya el mismo autor. Este frenesí subatómico en la energía, esta «espuma cuántica», como la llamó John Wheeler, tiene una manifestación como masa, de acuerdo con la conocida

ecuación «La energía es igual a la masa por la velocidad de la luz al cuadrado». Tres físicos lo plantean más rotundamente al sugerir una reinterpretación de ésta, la más conocida ecuación de Einstein, y quizá de toda la física, en los siguientes términos: «Deberíamos decir que la masa no es equivalente a la energía. La masa es energía» [Haisch, Rueda y Puthoff, «Beyond  $E=mc^2$ »].

Ahora sólo nos falta saber lo que es la energía. Preguntemos a Feynman, el premio Nobel favorito en estas citas. Ésta es su respuesta: «Es importante darse cuenta de que en física, hoy, no tenemos conocimiento de qué es la energía» [*Six Easy Pieces*, p. 71].

No hay duda: así se comporta el vacío, y cuando el tiempo es lo bastante breve, la energía toma a la existencia instantes prestados, se manifiesta como masa, como materia, y luego paga el brevísimo préstamo volviendo a la nada. En ese frenético mundo, las ecuaciones relativistas estallan. Si durante sus últimas tres décadas Einstein soñó con una teoría unificada de la física y a encontrarla dedicó todos sus esfuerzos, ahora parece como si el universo fuera irreconciliable... salvo que tenga razón el sentimiento generalizado de que el conflicto sólo está producido por la perspectiva desde la cual miramos, de que hay algo profundamente equivocado en el horizonte limitado desde el cual estamos observando. Debe de ser eso. Por ejemplo, Steven Weinberg considera probable que la teoría general unificadora ni siquiera vaya a ser formulada de manera al-

guna en el espacio-tiempo [véase «A Unified Physics by 2050?»].

De estas dudas ha surgido un intento por reconciliar a Bohr y a Einstein, la cuántica y la relatividad general. Se conoce como teoría de las supercuerdas o simplemente de las cuerdas. La veremos en el capítulo siguiente.

## 8

# La física del siglo XXI: las supercuerdas

### Cuerdas en vez de partículas

Hacia 1968 comenzó una nueva inquietud en la física. Siguiendo matemáticas puras de Leonhardt Euler, el gran matemático alemán del siglo XVIII, varios jóvenes físicos encontraron con sorpresa que con ellas se podían describir las partículas elementales (el electrón, el fotón, etc.) como si fueran, en vez de puntos, pequeñas cuerdas vibrantes: algo similar a ligas de hule. Sus diversos modos de vibración darían origen a las diferentes partículas, tal y como el vibrar de una cuerda de violín produce distintas notas. «La estructura matemática de la teoría de las cuerdas era tan hermosa y tenía tantas propiedades maravillosas que debía estar apuntando hacia algo profundo», comenta uno de los pioneros [citado en Greene, *The Elegant Universe*, p. 137].

En el modelo estándar, un electrón no tiene radio alguno. Suena rarísimo, pero así es. No tiene extensión; es un punto puro. Por lo mismo, el espa-

cio siempre puede subdividirse hasta el infinito, como en la paradoja de Zenón. Y cuando llegamos a regiones del espacio más pequeñas que la extensión de Planck, encontramos toda suerte de resultados anómalos, como esa danza frenética de la nada a ser, descrita en el capítulo anterior, que impide aplicar en esas regiones la teoría de la relatividad, puesto que ésta exige un espacio de comportamiento uniforme y suave. Entonces la pregunta esencial es la siguiente: ¿Será verdad que el espacio lo podemos dividir y subdividir hasta el infinito? ¿Que entre dos marcas siempre podemos poner otra intermedia? ¿Siempre y hasta el infinito?

No fue así con la energía ni con la materia. Vimos que ambas manifestaciones deben darse en múltiplos de la constante de Planck. No son divisibles hasta el infinito. Pero un punto es tan pequeño como queramos, es menos que cualquier cantidad que uno imagine. Igual que en los juegos verbales de los niños, ante un número dado siempre podemos responder con otro menor. El punto siempre será todavía menor. Y así están definidas las partículas elementales en el modelo estándar.

De ahí que el spin, o giro, de las partículas elementales se considere más bien una propiedad intrínseca y no un giro real. Un punto no puede girar. Cuando un objeto gira sobre un eje de rotación, este eje no gira, sino que está perfectamente fijo y todos los puntos a su alrededor dan vueltas. Veamos girar un globo terráqueo escolar: el eje permanece inmóvil y los puntos hacia el ecuador giran en torno

de él, y a mayor velocidad conforme se alejan, pues deben cubrir una circunferencia mayor en el mismo tiempo. Pero si un objeto es ya un punto, ¿qué es lo que gira? Así pues, el spin o giro de un electrón no es un movimiento circular, sino una propiedad intrínseca del electrón, como la carga, que recibió un nombre no del todo acertado.

### Filamentos de una sola dimensión

Todas las citas que siguen en este capítulo están tomadas del capítulo seis de *The Elegant Universe*, de Greene. Sigo, en esencia, su razonamiento, pero añado ejemplos más adecuados al tono de este libro.

Aunque las partículas subatómicas, como el electrón, se consideran realmente elementales, es decir, sin composición alguna, de cualquier forma se estima que el material de cada uno es diferente.

El *material* de electrón, por ejemplo, tenía carga eléctrica negativa, mientras que el *material* de neutrino no tenía carga eléctrica. La teoría de las cuerdas altera esta imagen radicalmente al declarar que el material de toda la materia y de todas las fuerzas es el mismo. Cada partícula elemental se compone de una sola cuerda, esto es, cada partícula es una sola cuerda, y todas las cuerdas son absolutamente idénticas. Las diferencias entre las partículas surgen porque sus respectivas cuerdas entran en diferentes patrones de vibración. Lo que parecen ser diferentes partículas elementales son en realidad diferentes «notas» de una cuerda fundamental.

A diferencia del modelo estándar de la física, la teoría de las cuerdas propone que las partículas elementales no son puntos de radio cero y sin extensión, sino filamentos en la longitud de Planck y con la forma de una liga de hule. Se ha dicho de ella que es una teoría del siglo XXI descubierta por casualidad en el XX. El gran interés que despierta entre los físicos se debe a dos aspectos fundamentales:

- 1) Parece resolver el conflicto entre la teoría de la relatividad y la física cuántica.
- 2) Provee una teoría verdaderamente unificada, pues toda la materia y todas las fuerzas son el resultado de un solo ingrediente básico e idéntico: cuerdas vibrantes. Es el modo de vibración, no la cuerda misma, lo que produce un electrón, un fotón, un quark up, un quark strange.

### Dimensiones

Las cuerdas tienen una sola dimensión. Un ejemplo para imaginar un mundo de una sola dimensión es una raya de ancho cero y del largo que se desee. Los habitantes de esa raya sólo tendrían dos direcciones: adelante y atrás. Ocuparían siempre la misma disposición, pues uno no podría rebasar a otro. No hay anchura para hacerlo.

Un dibujo en una hoja de papel es ejemplo de un mundo en dos dimensiones; largo y ancho, sin altura. Los habitantes de ese mundo no concebirían el

«arriba» ni el «abajo». Nosotros vivimos en un mundo de tres dimensiones espaciales y una temporal. Las cuerdas son bandas vibrantes de una sola dimensión. Comparadas con un núcleo atómico, éste resulta cien millones de billones (un 1 y veinte ceros) más grande que una cuerda. El diámetro de la órbita de Plutón es solamente 12 000 billones de veces más grande que un milímetro. Si lo multiplicáramos por 10 000, de ese tamaño sería un núcleo atómico si una cuerda midiera un milímetro.

La energía de una cuerda particular depende de dos aspectos. Uno es la amplitud con que vibre, es decir, la distancia entre los picos y los valles en la ondulación. A mayor amplitud, mayor energía. Ahora bien, por la relatividad sabemos que energía y materia son dos aspectos de una misma cosa; por ende, la masa de una partícula elemental estará determinada por la energía de la cuerda vibrante. El otro elemento para determinar la energía de una cuerda es la tensión. Como en el caso de una cuerda de violín o de piano, para vibrar debe estar tensa. La cuerda de un violín tiene menos tensión que la de un piano; su energía, en este caso su sonoridad, es menor. Igual ocurre con las cuerdas subatómicas: a mayor tensión corresponde mayor energía.

Como siempre en el mundo cuántico, la energía en las cuerdas también sigue las discontinuidades de Planck. Una cuerda vibra sólo en unidades discretas, en múltiplos enteros de la *energía de Planck*. Encontramos de nuevo una constante de proporcionalidad y saltos, cuantos.

Las cuerdas vibran en un número infinito de patrones. «¿Significa esto que habría correspondientemente una secuencia sin fin de partículas elementales?» La respuesta es sí, dice Greene, aunque estamos muy lejos de tener los medios para realizar las investigaciones que lo demostraran.

### Vibración y masa

Puesto que la masa de un objeto determina sus propiedades gravitatorias (un tráiler es más difícil de levantar del suelo que un Volkswagen), «vemos que hay una asociación directa entre el patrón de vibración en la cuerda y la respuesta de una partícula a la fuerza gravitatoria». Entre los patrones de vibración estudiados por medio de las matemáticas de las cuerdas, uno ajusta perfectamente las propiedades del gravitón. Esto produjo un gran entusiasmo entre los físicos. Lo entendemos si recordamos que la gravitación ha sido la única fuerza, de las cuatro existentes en el universo, que ha resistido los esfuerzos unificadores de la física, continuando así con la vieja polémica entre Bohr y Einstein.

El gran atractivo de las cuerdas es que acaban con las hostilidades entre la relatividad y la mecánica cuántica. La relatividad general es una teoría de la gravitación. Nos dice que los cuerpos curvan el espacio (y el tiempo) en torno de ellos, como una bola de boliche sobre un colchón. Cuando las ecuaciones relativistas se aplican a espacios por debajo

de la escala de Planck, la incertidumbre produce ondulaciones del espacio, más grandes conforme más se penetra en el espacio: esto es la «espuma cuántica» de Wheeler. Las ondulaciones del espacio alcanzan tal frenesí que las ecuaciones derivadas de la relatividad dan resultados desastrosos. Ello se debe a nuestra concepción del espacio como un continuo: todo segmento lo podemos cortar de nuevo a la mitad, al menos con el pensamiento. Esta concepción, tan poco cuántica, ha prevalecido curiosamente en pleno corazón de la física cuántica porque las partículas elementales se consideran puntos. Y un punto es tan diminuto como se quiera. Sin límite. En consecuencia, podemos colocar ese punto en regiones tan pequeñas del espacio como ceros podamos agregar luego del punto decimal: diez, treinta, cien, mil ceros. No hay límite alguno.

• Pero la teoría de las cuerdas considera que sí hay límites al seccionar el espacio. Veamos por qué. Primero consideremos que las «observaciones» que hacemos del mundo subatómico las realizamos lanzando partículas para sondear otras partículas. Cuanto más pequeña sea la partícula empleada, más nítida será la imagen que produzca. Esto es: para formar una imagen con nudos en una alfombra persa, más definida estará la imagen conforme más pequeño sea el nudo. Una fotografía es más nítida conforme el grano de la película es más fino. Si voy a hacer el molde de una estatua y empleo canicas para el molde, perderé todos los detalles y apenas si conseguiré determinar la silueta general; empleando tierra, que está

formada de granos mucho más pequeños que canicas, tendré mejores resultados; y si consigo una resina muy tersa para hacer el molde, podré copiar hasta los menores detalles de la estatua, como las pestañas y hasta la calidad de la piel. Así, «veo» más claro un átomo conforme le lanzo partículas más pequeñas. Tengo mayor resolución.

### Contra Zenón de Elea

El modelo estándar nos dice que podemos sondear el átomo (hacer su molde) con partículas tan finas como se quiera, pues disponemos de puntos para hacerlo. Y el punto es tan pequeño como el investigador lo describa, pues no tiene extensión alguna. Entonces puedo ir más abajo que la longitud de Planck, y allí es donde la relatividad y la cuántica acaban peleadas y salta espuma.

En cambio, si las partículas que lanzo para sondear el átomo no son puntuales (no son puntos), sino que tienen alguna extensión, así sea pequeñísima, esto mismo me indica que no podré superar cierto límite. Es el de la propia medida de la partícula, pues no existe nada más chico para lanzar contra el átomo y mejorar mi resolución. Repitiendo: para «ver» la forma de un átomo lo recubro de las partículas más pequeñas que encuentre, digamos de electrones. Para la nueva teoría, los electrones no son partículas puntuales, sin extensión, sino cuerdas con extensión minúscula. Un electrón que lanzo contra

mi átomo es una cuerda vibrando. Lo lanzo con energías cada vez mayores para sondear más internamente la materia. Sin embargo,

cuando se incrementa la energía de una cuerda, es al principio posible sondear estructuras de escala más corta [...], pero cuando su energía se incrementa más allá del valor requerido para sondear estructuras en la escala de la longitud de Planck, la energía adicional no agudiza la cuerda lanzada. Más bien, la energía causa que la cuerda crezca de tamaño, disminuyendo consiguientemente su sensibilidad para distancias cortas.

No es un límite de los aparatos. Es un límite de la naturaleza, como el principio de incertidumbre: cuanto más energía ponga en el electrón para que sondee más abajo, más grande lo hago, y cuanto más grande es, menos resolución me da. Como cuando uso película fotográfica de grano grueso: es imposible tomar con nitidez detalles más pequeños que el grano de la película. Así pues:

*Si los constituyentes elementales del universo no pueden sondear distancias en la escala sub-Planck, entonces tampoco ellas ni nada hecho por ellas puede verse afectado por las supuestamente desastrosas ondulaciones cuánticas de corta distancia.*

Las entusiastas cursivas son del autor; veamos por qué se emociona. Nos dice que así como nuestros dedos son incapaces de distinguir los poros de una pieza de granito bien pulida aunque sepamos que, vista

al microscopio, está llena de poros, así la cuerda aplasta las fluctuaciones ultramicroscópicas del espacio «lo suficiente para curar la incompatibilidad entre la relatividad general y la mecánica cuántica».

Pero hay una diferencia esencial con la analogía del granito, subraya. Sabemos que nuestros dedos no tienen capacidad de resolución para detectar los poros del granito, pero que otros instrumentos sí lo hacen.

En cambio, con la teoría de las cuerdas no hay manera de exponer las «imperfecciones» de escala sub-Planck en el tejido del espacio. En un universo gobernado por las leyes de la teoría de las cuerdas, la noción convencional de que podemos disectar la naturaleza en cada vez más pequeñas distancias, sin límite, no es verdadera. Sí hay un límite, y entra en función antes de que encontremos la devastante espuma cuántica.

¿No nos estamos haciendo tontos? La solución propuesta suena un poco a trampa positivista: si no lo mido no existe. ¿No está allá abajo la espuma cuántica ingobernable por la relatividad general, aunque uno no pueda llegar a ella? No, no existe. Dicho más claro:

Primero, lo que el argumento anterior implica es que las supuestamente problemáticas fluctuaciones de longitud sub-Planck son un artefacto [que surge por] haber formulado la relatividad general y la mecánica cuántica en un marco de partículas puntuales. En cierto sentido, pues, el conflicto central de la física teórica contemporánea ha sido un problema de nuestra propia hechura. A causa de que previamente contemplamos

todas las partículas de materia y todas las partículas de fuerza como objetos puntuales, sin, literalmente, extensión espacial, estuvimos obligados a considerar las propiedades del universo a escalas de distancia arbitrariamente cortas.

Pasa luego al segundo punto y recuerda que desde mucho antes, algunos de los más grandes físicos teóricos habían intentado abandonar la noción de partículas puntuales. Pero cuando el paradigma se desechaba ocurrían violaciones a dos principios fundamentales: uno, que los objetos no aparecen ni desaparecen súbitamente del espacio sin dejar rastro (conservación de la probabilidad cuántica) y dos, que son imposibles las transmisiones de información a velocidad superior a la de la luz. Para hacer electrones con algún radio había que caer en aceptar algo peor.

Con la teoría de las cuerdas no ocurren tales violaciones y se acaba con la espuma cuántica. La incompatibilidad de la relatividad general y de la física cuántica se evita porque ocurre a distancias que no existen. El universo tiene distancias que no podemos siquiera decir que existan.

### Las dimensiones de Kaluza

En 1995 se inició la segunda revolución de las supercuerdas, cuyo paladín es Edward Witten, y se caracteriza por la introducción de más dimensiones espaciales que las tres conocidas. ¿Cómo es que no las

vemos? Greene ofrece un inmejorable ejemplo: si vemos de lejos una manguera de jardín colgando, digamos entre dos bardas, nos parece una línea si estamos lo bastante alejados. Tiene una sola dimensión: largura; una línea sin ningún grosor. Pero cuando la observamos con unos prismáticos descubrimos, primero, que sí tiene grosor y luego que, además, el grosor se enrolla y por eso es poco perceptible. La superficie de una manguera es un objeto de dos dimensiones donde el ancho se enrolla (para hacer el tubo) y por lo tanto, desde lejos, parece tener una sola dimensión o largura.

Un matemático polaco de la Universidad de Königsberg, Theodor Kaluza, envió en 1919 a Einstein un ensayo donde proponía que el universo podía tener no solamente las tres dimensiones espaciales, sino más. Su trabajo fue refinado en 1926 por el matemático sueco Oskar Klein. En esencia, sostiene que «*el tejido espacial de nuestro universo podría tener dimensiones tanto extendidas como enrolladas*» [curvas de Greene]. Los cálculos de Klein determinaron que esas dimensiones adicionales debían ser tan pequeñas como... la longitud de Planck. De nuevo el *quantum*. Ahora en las dimensiones del espacio. Es la teoría de Kaluza-Klein.

Kaluza desarrolló las ecuaciones de la relatividad para una dimensión más, es decir, para cuatro dimensiones espaciales y una temporal, y las envió a Einstein. Había descubierto que resultaban las mismas ecuaciones que en la relatividad, pero, como

había añadido una dimensión más, tenía más ecuaciones. Al revisarlas y compararlas,

Kaluza se dio cuenta de que algo sorprendente estaba ocurriendo. Las ecuaciones extra no eran otras que ¡las que Maxwell había desarrollado en la década de 1880 para describir la fuerza electromagnética! Añadiendo otra dimensión espacial, Kaluza había unificado la teoría gravitatoria de Einstein con la teoría de la luz de Maxwell.

El entusiasmo inicial se enfrentó con la falla absoluta de la teoría de Kaluza en el único sitio donde una teoría no puede fallar: en el laboratorio. Predecía una relación entre la masa y la carga del electrón que no coincidía con ninguna observación. Con eso se perdió el interés en las dimensiones espaciales adicionales.

Pero los modelos más recientes de la teoría de las cuerdas exigen, para existir, espacios extradimensionales. Las cuerdas vibran en espacios de diez dimensiones y Witten propone once: tres extendidas que ya conocemos —ancho, largo y altura—, más el tiempo, al que la relatividad general convirtió en una dimensión más, y las demás dimensiones espaciales, ya sean seis o siete, estarían enrolladas en cada punto del espacio, como en el ejemplo de la manguera. «Después de haber sido dada por muerta a finales la década de 1920, la teoría Kaluza-Klein fue resucitada.»

¿Por qué sólo tres dimensiones, las que conocemos, se extendieron? Es necesario buscar la respuesta

en las modalidades que debió tener el Big Bang con el que el espacio-tiempo dio comienzo. Aunque no podemos percibirlos, el hecho de que las cuerdas existan en estas dimensiones y, sobre todo, que los patrones de vibración producidos en ese mundo multidimensional a su vez sean causa de lo que percibimos como carga y masa en las partículas,

significa que *la geometría extradimensional determina los atributos físicos fundamentales, como masa y carga de las partículas que observamos en las tres grandes dimensiones espaciales ordinarias de nuestra experiencia común* [...]. Porque los patrones de vibración de las cuerdas nos parecen las masas y cargas de las partículas elementales, concluimos que estas propiedades fundamentales del universo están determinadas, en gran medida, por el tamaño y la forma geométrica de las dimensiones adicionales. Éste es uno de los atisbos de mayor alcance en la teoría de las cuerdas.

### Postdicciones

Las teorías se consolidan conforme sus predicciones resultan acertadas. La desviación de la luz por los campos gravitatorios era un postulado de la relatividad general. Cuando Eddington observó ese desvío durante el eclipse solar de 1919, la relatividad obtuvo un fuerte apoyo empírico. La teoría de las cuerdas está, al parecer, para siempre fuera de las comprobaciones directas realizadas con aceleradores de partículas. Para alcanzar esos niveles necesitaríamos aceleradores tan grandes como toda la galaxia. Las

pruebas deberán ser indirectas. Por lo pronto, la teoría de las cuerdas ya ha predicho algo muy curioso: la gravitación. Esto es, de acuerdo con las matemáticas de la teoría, en el universo debe haber algo que tenga todas las características... de la gravitación. Es una «postdicción» muy interesante.

El entusiasmo en torno a las cuerdas, como el Santo Grial que nos dará la Teoría de Todo, hace pensar en la efervescencia intelectual de la década anterior a 1927. Dice Greene que era como haber desempacado un juguete maravilloso por Navidad, y descubrir que falta el manual de instrucciones. Los físicos están escribiendo ese manual, pero las matemáticas que éste exige son realmente endiabladas hasta para ellos, pues deben tratar la topología de objetos con diez dimensiones.

### El campo de Higgs o el éter que vos matasteis...

Los físicos que no se han entusiasmado por las supercuerdas buscan afanosamente un elemento que podría poner orden dentro del modelo estándar, donde ocurren cosas tan feas como partículas 350 000 veces más masivas que otras. Desde Platón estamos convencidos de que la verdad y la belleza van juntas.

El bosón de Higgs nació de la desesperación, comenta Von Baeyer. El modelo estándar obtiene gran parte de su elegancia de un supuesto teórico: que sus partículas fundamentales tienen masa cero,

que su masa en reposo es cero. Eso significa que nunca están en reposo, sino siempre viajando a la velocidad de la luz. Pero en la vida real las partículas no van a la velocidad de la luz y sí tienen una masa que puede ser medida. Para conservar la sencillez del modelo estándar, los teóricos postulan que todas las partículas viajan en un medio universal y ubicuo llamado «campo de Higgs» en honor a quien lo propuso, Peter Higgs, de la Universidad de Edimburgo. Podríamos parafrasear aquí: «El éter que vos matasteis... goza de cabal salud.» El campo de Higgs actúa como un mar (otra vez el mar de Dirac) de melaza que permea todo el universo. Una arruga en ese mar es un bosón de Higgs [véase Von Baeyer «Desperately Seeking SUSY»].

El bosón de Higgs es decisivo para la física de partículas porque vendría a dar cuenta del origen de tan diversas masas, de por qué el electrón es 350 000 veces más ligero que el más pesado quark y los neutrinos todavía más ligeros. El campo de Higgs se concibe como una suerte de voltaje sin cambio que permea el universo, estropea la simetría de las fuerzas y da origen a un arreglo de masas tan aparentemente azaroso. Excitaciones cuánticas del campo de Higgs darían origen a la partícula de Higgs, tal y como los fotones, las partículas de luz, emergen de un suave campo electromagnético [véase Glanz, «Will the Higgs Particle Make an Early Entrance?»].

## El principio

Los cosmólogos han propuesto una época, en los primeros nanosegundos de la creación, a la que llaman «inflación». Alan Guth y Andrei Linde son los pioneros de este planteamiento. Cuando el universo tenía una fracción de segundo que se escribe con un punto decimal y 34 ceros seguidos de un 1, fue el reino del campo de Higgs. Luego el universo pasó por una transición de fase, como la que vemos en el agua cuando se transforma en hielo. Entonces se crearon las partículas y la radiación. Luego empezó la fase en que el enfriamiento relativo habría de permitir la integración de los primeros átomos. El premio Nobel Leon Lederman relata así la acción del campo de Higgs en el principio:

Habiendo donado toda su energía a la creación de partículas, el campo de Higgs se retira temporalmente, reaparece varias veces en distintos disfraces para mantener las matemáticas consistentes, suprimir los infinitos y supervisar la creciente complejidad conforme las fuerzas y las partículas continúan diferenciándose. Aquí tenemos a la Partícula Dios en todo su esplendor [Lederman y Teresi, *The God Particle*, p. 398].

La «Partícula Dios» es el nombre para las ondas del campo de Higgs. Continúa páginas adelante: «Podría haber dado la impresión de que la Partícula Dios, una vez entendida, proveería la revelación última: cómo funciona el universo.»

Podemos concluir este repaso sobre la desmaterialización de la materia con una bella reflexión de George Johnson: «Así pues, mientras algunos científicos están tratando de reducir la conciencia a materia, otros están tratando de reducir la materia a conciencia» [*Fire in the Mind*, p. 149].

## 9

# El último misterio: la conciencia humana

### El final del pozo: la información

Tenemos moléculas que están formadas por átomos; éstos a su vez por electrones, neutrones y protones. Los últimos resultaron compuestos y no elementales, formados por partículas a las que se dio el nombre de quarks. Hay indicios de que el quark podría estar compuesto. Todos a su vez podrían no ser sino las diversas formas de vibración de minúsculas cuerdas en la longitud de Planck. Y, finalmente, el último sustrato podría ser información.

La información es un concepto, no una cosa en el mundo. Ésta es la postura sensata. Como siempre en cuántica, no es la sensatez la que gana. Algunos físicos plantean que la información es el último elemento en la composición del universo. «Unos pocos van tan lejos como para sostener que la información puede ser el más fundamental de todos [los ingredientes]; que masa y energía podrían de alguna

manera derivarse de la información» [Johnson, *Fire in the Mind*, p.111].

Sigamos de cerca el relato que hace George Johnson en su admirable obra *Fire in the Mind*. Las citas están tomadas de allí, y todo este apartado es un resumen de su capítulo cuatro, más acotaciones propias.

Johnson comienza por señalar que todo en el universo se puede reducir a cuatro aspectos elementales: masa, energía, espacio y tiempo. Pero quizá podamos dejar sólo dos: energía y espacio-tiempo, como ya hemos visto páginas atrás. El físico polaco Wojciech Zurek, ahora ciudadano estadounidense que trabaja en el famoso Los Alamos National Laboratory, lanzó un manifiesto con el título «Complejidad, entropía y la física de la información», en el que propone otro ingrediente básico del universo: información. «El fantasma de la información recorre el mundo», comienza su manifiesto. Polaco anterior a la caída del Muro a fin de cuentas, y a diferencia de Johnson, Zurek conoce la frase con que da inicio el *Manifiesto comunista* de Marx y Engels.

La información es un concepto desarrollado por Claude Shannon, quien trabajaba en los Laboratorios Bell para estudiar la mejor manera de codificar señales de tal manera que pudieran transmitirse sin que las afectara el llamado ruido de las líneas, un efecto producido por la vibración al azar de las moléculas de cobre de los alambres telefónicos. Publicó sus investigaciones en 1948 y de ellas se deriva lo que conocemos como teoría de la información.

## El demonio de Maxwell

Un siglo antes de los estudios de Shannon sobre la información, el ingeniero militar francés Sadi Carnot demostró que no había forma de utilizar el cien por ciento de la energía de un motor de vapor, pues siempre algo se perdería en forma de fricción, de calor. Eso puso punto final a la vieja búsqueda de una máquina de movimiento perpetuo. Una podría ser un generador eléctrico que diera electricidad a un motor eléctrico que hiciera girar al mismo generador. Funcionarían así acoplados perpetuamente si no fuera porque buena parte de la energía se disipa en el ambiente como calor: el de la fricción de las máquinas, el de la fricción de la electricidad en los cables. Es otro límite de la naturaleza: nuestras máquinas no pueden funcionar sin desperdicio. Un alemán en Berlín, Rudolph Clasius, le puso nombre a esa pérdida inevitable de energía: entropía, que es «vuelta» en griego.

Entropía es el nombre que se da a la tendencia universal al mayor desorden, postulada en la segunda ley de la termodinámica. Una casa abandonada a su suerte comienza a deteriorarse: se rompen los vidrios, se carcome la madera, se agrietan las paredes, se derrumban los techos, se aplana cada vez más hasta que cada ladrillo vuelve al suelo y termina siendo un promontorio sin forma donde crecen las hierbas. De un estado ordenado pasa al más desordenado posible. Vemos casas venirse abajo solas, pero nunca veremos casas levantarse solas y llenarse

de nuevo de cortinas, tapetes y jarrones con flores porque la flecha de la entropía tiene una sola dirección: de menos a más, de orden a desorden. Es una de las flechas del tiempo, pues los sistemas avanzan en ese sentido y no son igualmente posibles las situaciones inversas. El universo entero avanza de estados ordenados, como las estrellas, a estados desordenados que acabarán por convertirlo en una helada extensión homogénea y sin rasgos, a menos que alguna fuerza, la gravitación por ejemplo, revierta el proceso.

Maxwell ideó un experimento mental que parece quebrantar esta ley. Imaginó dos depósitos conectados entre sí, uno de los cuales está lleno de un gas. Si abrimos la válvula entre los depósitos, el gas se dispersará por ambas cámaras hasta alcanzar estabilidad; pasa de un estado de baja entropía y alta organización (todo el gas en un lado), a uno de alta entropía y baja organización. El gas fluye de un compartimento a otro por los movimientos azarosos de sus moléculas. Ese flujo lo podemos utilizar para mover algún pequeño mecanismo, digamos una turbina productora de electricidad, y así encendemos un foco. Pero con el gas estabilizado en ambas cámaras no tenemos flujo alguno; tampoco hay electricidad ni luz. Para repetir el procedimiento tendríamos que invertir energía en volver a bombear el gas a una de las cámaras y tendríamos un costo en energía. Ahora Maxwell imagina un ser inteligente y diminuto que, junto a la válvula, observa cada molécula que se aproxima. Deja pasar las de

movimiento rápido hacia la cámara vacía y no las deja regresar en el sentido contrario. Así, nuevamente acabará lleno uno de los compartimentos y vacío el otro. Si abrimos la válvula, tenemos de nuevo un flujo, éste moverá la turbina y así encenderá el foco. Resultado: energía gratuita, porque no tuvimos que gastar nada en recargar el gas. La inteligencia parece haber vencido a la segunda ley de la termodinámica.

Pero no es así. Cualquier intento de sustituir al pequeño demonio imaginario por un artefacto, digamos una válvula unidireccional, que haga el mismo efecto y permita pasar a toda molécula que llegue en un sentido y a ninguna en el contrario, tendrá un costo: la fricción, el calor. Para que la válvula funcione debemos pagar su gasto en energía. Comprimir el gas a una sola cámara no es gratis: hay un gasto de energía.

### Otra vez el colapso de ondas

Pronto se observó que la información era lo opuesto a la entropía, al desorden al que tiende todo estado. Cuando la entropía aumenta, la información se pierde. Imaginemos una molécula de agua. Tenemos muchos datos, mucha información: número de elementos, número de átomos de cada elemento, estructura de la molécula, distribución de las cargas eléctricas, etc., pero si rompemos la molécula, toda esa información se pierde, y permanece sólo la información que

conforma cada átomo de hidrógeno y de oxígeno: cuántos protones, cuántos electrones. Todavía puede actuar la entropía y alcanzar un estado de mayor desorganización, el de electrones y protones sueltos, que no forman parte de átomos. Aumenta la entropía y disminuye la información. Ahora basta con la información general del electrón o el protón, que es menos que la del átomo. La información se puede considerar como una medida, una tan simple como 1 o 0: la presencia o ausencia de algo. Sí o no es la mínima información.

Yendo más allá de las leyes de la termodinámica, algunos creen que la información desempeña un papel aún más profundo: de acuerdo con algunas interpretaciones de la teoría cuántica consideradas por Zurek y su círculo, sin información no habría nada que se pareciera a lo que llamamos mundo real» [pp. 111-112].

En capítulos anteriores examinamos el problema que plantea la observación de una partícula. Un electrón no existe con los rasgos que para nosotros son la marca misma de la existencia, con posición en el tiempo y en el espacio, sino como una onda de probabilidad, más bien un paquete de ondas, una superposición de todas las trayectorias posibles. Vimos que una observación colapsa el paquete de ondas y nos deja un estado sin superposición, por ejemplo, una posición determinada. Pero cómo ocurre este colapso es materia de no siempre amables discusiones filosóficas. Una respuesta podría ser el flujo de información:

Zurek y algunos de sus colegas esperan desmitificar la teoría cuántica. ¿Qué es una observación sino una recolección de información? Y si la información es fundamental, existe tan seguramente como existen la materia y la energía, sin necesidad de seres conscientes. La onda cuántica podría colapsarse no porque fue requisito de una mente, sino tan sólo porque la información fluyó de un lugar a otro en la región subatómica [p. 112].

De esta manera, la información, no la mente consciente, sería la responsable de que un electrón observado se comporte de tan distinta manera que uno no observado, según vimos en numerosos ejemplos. «Como la masa y la energía, la información sería irreductible, estaría en las raíces de la creación» [p. 113].

Pero la información, como vimos, es lo contrario de la entropía. La casa del primer ejemplo posee una gran cantidad de información: dónde va cada ventana y de qué forma y medida es, qué distribución tienen las diversas áreas, qué colores y texturas se han elegido para decorar. Todo es información. Pero luego de que se cae a pedazos con el paso de los siglos y se convierte en un montón de tierra, la información que describe a ese montón es mínima y mucho menor que la necesaria para describir la casa. La entropía ha crecido, la información disminuye.

### Entropía y observadores

Y otra sorpresa: la entropía también depende del observador. El propio Maxwell lo explica así en la

edición para 1878 de la *Encyclopædia Britannica* [citado por Johnson]: pongamos por caso que tratamos de leer una libreta con notas en la taquigrafía creada por una persona para su propio uso. La libreta

no le parece confusa, suponiendo que esté pulcramente escrita, a una persona analfabeta, ni al dueño que la comprende enteramente, pero para cualquier otra persona capaz de leer parece ser inextricablemente confusa. De la misma manera, la noción de energía disipada no se le ocurriría a un ser que no pudiera conducir ninguna de las energías de la naturaleza en su propio provecho, ni a quien pudiera trazar el movimiento de cada molécula y capturarla en el momento justo. Es sólo para un ser en el estadio intermedio, que puede controlar algunas formas de energía mientras otras eluden su comprensión, para quien la energía parece estar pasando inevitablemente del estado disponible al disipado.

«La implicación era que la entropía existe para criaturas moderadamente inteligentes, como la gente, pero no para los demonios o los perros; que el orden o el desorden están en el ojo del espectador» [p. 118].

Nosotros vemos orden donde un perro encuentra sólo señales caóticas, una hoja impresa tirada en el suelo, por ejemplo. Y sólo encontramos caos donde el pequeño demonio de Maxwell distingue perfectamente un orden. Es nuestra miopía la que no ve orden en los estados de gran entropía.

En 1929, Leo Szilard planteó el experimento mental de Maxwell con su demonio de tal manera que, de nuevo, parecía obtener trabajo de la nada, en violación de las leyes de la termodinámica. En

resumen, redujo el aparato a su mínima expresión, una sola molécula a la que con sucesivas divisiones de la cámara fue arrinconando. Con ello conseguía acumular energía para luego hacer trabajar un pistón que haría volver el aparato a la situación original, y vuelta a empezar: movimiento perpetuo sacado de la nada. No es necesario detallar el experimento, basta con las conclusiones. Szilard descubrió que las mediciones del demonio, realizadas para determinar si la molécula estaba en una subdivisión o en otra, inevitablemente consumían cierta cantidad de energía. Era una medición en términos binarios: está la molécula en un lado de la cámara y no está en otro, 1 cuando ésta, 0 cuando no está. Puesto que era también un experimento mental, Szilard había hecho todos los mecanismos perfectamente sin fricción. Pero descubrió que, si bien por allí no se perdía energía alguna, el mero acto de recoger información, cuando el demonio determinaba en cuál subdivisión había quedado la molécula, debía siempre disipar suficiente energía para hacer imposible esa máquina de movimiento perpetuo. Es decir, procesar esa sencilla información (está aquí o allá, 1 o 0) requería un mínimo gasto de energía. Szilard había dado con otro límite de la naturaleza.

### Computaciones irreversibles

En 1961, Rolf Landauer, de la IBM, hizo por la computadora digital lo que Sadi Carnot había hecho por la máquina de vapor: sondear sus profundidades termo-

dinámicas, prosigue Johnson. Cuando ya no tuvimos un experimento mental, como el de Maxwell o el de Szilard, sino computadoras trabajando con información binaria, sí o no, llega un pulso eléctrico o no llega, 1 o 0, cobró importancia la pérdida de energía descubierta por Szilard. Veamos primero un asunto esencial para comprender este punto, y es que la computación es irreversible. Éste es un ejemplo sencillo: en una calculadora sumo  $2+2=4$ . Se dice que la operación es irreversible porque si paso junto a un escritorio donde alguien dejó encendida su calculadora y veo un 4, es para mí absolutamente imposible saber la operación que produjo ese resultado. Pudo ser  $2+2$ , pero también pudieron ser decenas de operaciones, restas, sumas y divisiones que tienen como resultado ese número. Las vías de regreso son infinitas: la computación es irreversible. Por otra parte, la expresión « $2+2$ » contiene más información que «4». « $2+2$ » incluye información sobre un número, una operación y de nuevo el mismo número. Hasta para decir la expresión necesitamos más palabras. Siendo así, el paso de  $2+2$  a simplemente 4 supone una pérdida de información. ¿Y qué pasa con esa información perdida? «Landauer mostró que se disipa en el medio como calor.» Es irrecuperable, como el agua de un barril vaciada en el mar.

Recoger información tenía, pues, un costo ineludible. O, como planteó Charles Bennett en 1973, no es tanto recogerla, sino borrarla para reiniciar el aparato lo que disipa energía. El borrado de la información transfiere energía al medio. Así es como

se salva la segunda ley de la termodinámica hasta en imposibles aparatos sin fricción alguna. Por supuesto, resulta insignificante esa disipación de energía comparada con el gasto en el motor que mueve el disco duro, la energía para iluminar la pantalla o las pérdidas, como calor, por resistencia de los microcircuitos. «Pero la naturaleza parece poner un límite a cuán económicamente podemos borrar bits. Por abajo de cierto nivel, la pérdida no puede ser reducida. La información, sostuvo Landauer, es en realidad algo físico» [p. 125].

### La información y la mente

De ahí vino el gran salto: Edward Fredkin, de la Universidad de Boston, y algunos otros científicos sostienen que la información es más fundamental que la materia y la energía. Que según estas apariencias tenemos bits de información dando origen al universo que vemos. Esto implica que la realidad es muy semejante a una simulación corrida por un programa de computación; sólo faltaría saber quién está corriendo el programa. La idea ha dado por lo menos una muy buena película: *Matrix*.

De hecho, podemos pensar en el universo como una cinta magnética, vacía y estructurada. Conforme todo este orden se vuelve entropía, la Cinta Universal de Memoria se llena con bits al azar. Pero nunca puede ser borrada. No hay nada para borrarla, ninguna parte adonde exportar ese azar. No se puede *resetear* el universo.

El azar sólo se sigue acumulando. Y ésta es la versión de la teoría de la información para la segunda ley [p. 127].

Las señales de la materia y la energía nos llegan por los sentidos y de allí al cerebro. La información está, pues, directamente ligada a nuestros conceptos de mente y conciencia.

### Final: la mente ante el espejo

A principios del siglo XX, don Santiago Ramón y Cajal descubrió que el tejido nervioso no era continuo, es decir, que las células que lo forman no se conectaban de manera directa. La célula nerviosa principal es la neurona y está formada por un cuerpo muy semejante al de otras células y dos tipos de ramificaciones que ninguna otra posee: ramificaciones cortas en forma de árbol, llamadas «dendritas» (del griego «dendro»: árbol), y una larga prolongación llamada «axón». Las dendritas y el axón de una no se integran con los de otra, sino que dejan un pequeñísimo intersticio. Ese tipo de conexión entre neuronas se llama «sinapsis». El impulso nervioso, al viajar por un axón, llega hasta un botón terminal y allí concluye como impulso eléctrico. Para cruzar la sinapsis y alcanzar la dendrita de la siguiente neurona entra en acción un mecanismo distinto y muy complejo. El botón terminal contiene infinidad de vesículas llenas de compuestos químicos llamados «neurotransmisores». Al arribo de la señal eléctrica se abren las vesículas apropia-

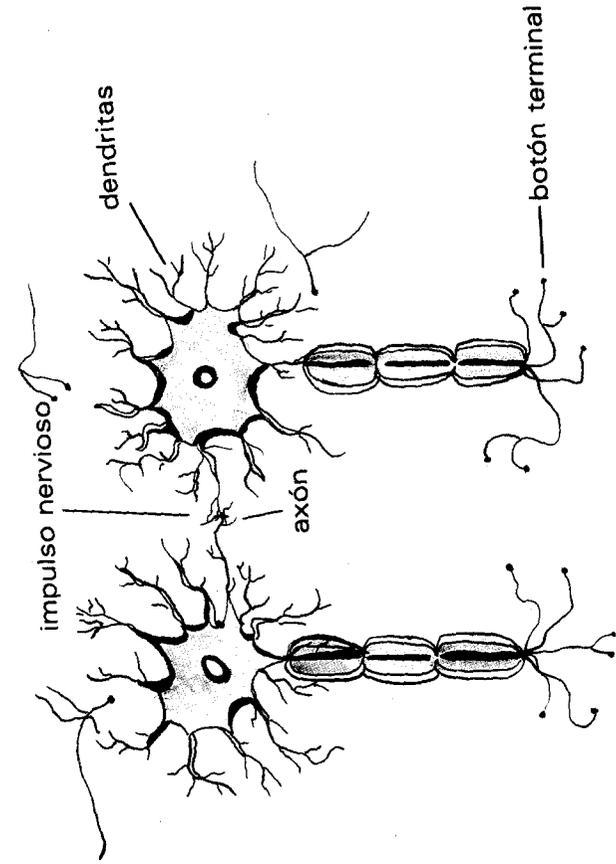


FIGURA 9.1. Neuronas y sus sinapsis.

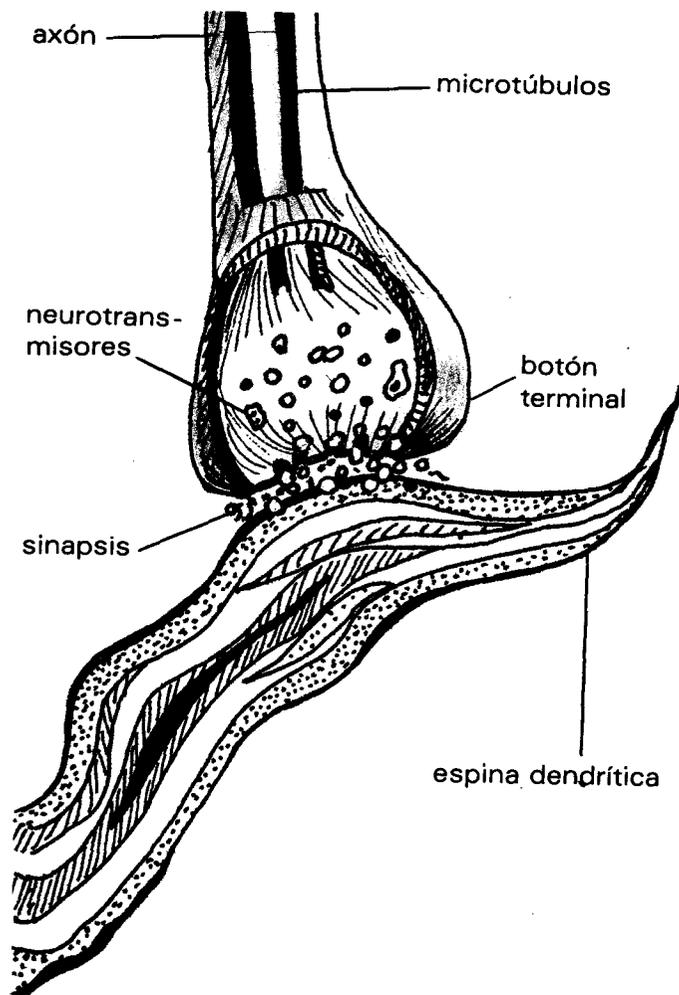


FIGURA 9.2. La sinapsis lanzando neurotransmisores.

das y los neurotransmisores alcanzan la dendrita de la siguiente neurona. Allí estimulan un nuevo impulso nervioso que recorrerá esa célula hasta la siguiente sinapsis. Los neurotransmisores, entonces, modulan la señal nerviosa, pueden aumentarla, inhibirla o transformarla. Es un complejísimo sistema de señales y contraseñas donde participan decenas de neurotransmisores conocidos.

Muchos investigadores de la conciencia consideran este sustrato nervioso como el productor de todas las funciones superiores, y esencialmente del «yo». Por medio de tomografía computarizada y otros sistemas de observación en vivo han podido detectar los cambios precisos ocurridos durante el establecimiento de una memoria. Han visto, literalmente, la integración de un recuerdo en el tejido cerebral. Estudios semejantes se producen todos los días en los laboratorios de neurofisiología y se reportan por decenas en los medios especializados.

### El cerebro y la mente

Pero sigue sin quedar clara la relación entre el tejido cerebral y lo que llamamos «conciencia». El término es ambiguo y los intentos por definirlo pueden resultar infructuosos y llevarnos a vericuetos semánticos sin interés. Hagamos como los matemáticos ante conceptos elementales: démoslo por sabido. No podemos definir «punto», «línea», «conjunto», ni siquiera «número», aunque todos sabemos qué son. Una definición

de «número natural» levantaría polémica a pesar de que todo niño que pueda distinguir tres objetos rojos, dos azules, cinco verdes y una manzana está elaborando el concepto de «número».

Tratemos, pues, de igual manera a la conciencia. Sabemos que tiene que ver con el hecho de estar alerta, con la inteligencia, con la percepción, y que hay algo, la autoconciencia, que nos permite darnos cuenta de que nos damos cuenta. Sabemos que una imagen se forma en la retina, y cada célula estimulada envía una señal eléctrica. Ésta pasa por la modulación de los neurotransmisores y llega a la corteza visual, desde donde se conecta con estructuras internas donde despierta emociones, memorias, acciones voluntarias, como la huida si la imagen es un león, e involuntarias, como la aceleración del ritmo cardíaco. Decimos entonces que tuvimos miedo. Pero esa conciencia del miedo pasado y de su falta de fundamento, si descubrimos que el león en realidad fue una proyección realista en tres dimensiones realizada en broma por un amigo, ¿no es sino otro encadenamiento de neuronas? El miedo y la conciencia del miedo, la risa ante la broma, el enojo, el amor: todos son estados que tienen su contraparte medible, observable, en el cerebro. Pero ¿somos iguales a un robot programado para huir del peligro? El robot «sabe» que huye si posee mecanismos de retroalimentación que le informen sobre su propio estado. ¿Es entonces consciente, al menos en la medida en que lo es un perro que huye? Para decirlo con la

imagen de un objeto ahora omnipresente: ¿somos una computadora hecha de carne?

Podemos programar una computadora para que dé señales de alarma ante la imagen de un león y de enternecimiento ante la de un gatito. Es más, para emplear una buena broma de Roger Penrose, hasta podemos programar un robot para que deambule murmurando: «¡Ay, Dios mío! ¿Cuál es el sentido de la vida?» [véase *La mente nueva del emperador*].

¿Sólo hay entonces diferencias de grado entre una supercomputadora y nosotros? ¿Conseguirá la tecnología producir computadoras que posean las más complejas respuestas humanas? ¿Podrán éstas probar un nuevo teorema? ¿Tendrán lo que llamamos conciencia? Para intentar una respuesta a estas preguntas, sigamos las reflexiones de Roger Penrose, uno de los más notables físico-matemáticos de hoy. Están tomadas en parte de sus Conferencias Tanner, en las que participó otro grande de este fin de siglo, Stephen Hawking. Penrose y Hawking han colaborado a menudo en trabajos sobre el espacio y el tiempo, las singularidades y los hoyos negros, pero en cuanto llegan a cuestiones filosóficas, sus opiniones son por completo divergentes.

### Ellas y nosotros

Una computadora nos puede poner orden en una secuencia de palabras de manera que formen una historia. Lo puede hacer mejor que muchos seres huma-

nos y con mucha mayor rapidez, dependiendo del programa que use para ejecutar esa tarea, pero siempre diremos que la computadora no «comprende» la historia que ella misma ha formado y que nosotros sí. ¿En dónde está la diferencia? ¿Qué es «comprender» cuando una computadora puede darnos un orden, en el ejemplo de la secuencia de palabras, que es tan bueno como el de un ser humano?

Penrose propone que el conocimiento humano, sobre todo el matemático, es una forma de contacto con el mundo platónico de las ideas. El cerebro es el órgano necesario, pero lo que produce no le viene de su actividad interna, así como el hígado produce bilis, sino de su relación con un mundo que capta. «Entre más entendemos acerca del mundo físico, más parece como si el mundo físico casi se evaporara y nos quedáramos sólo con matemáticas» [*The Large, the Small and the Human Mind*, p. 3].

### Va pensiero...

Las matemáticas, el arte, la ciencia, en ocasiones ocurren como descubrimientos y no como invenciones largamente meditadas. A veces pensamos como las computadoras, paso a paso, siguiendo instrucciones, recetas, algoritmos, pero esa pesadez no es la manera característica como se desarrolla el pensamiento humano. No pensamos con palabras más que en ocasiones precisas: «Le voy a decir que...» Las palabras son exigencia de la comunicación y las meditamos bien

cuando deseamos exponer un argumento, pero el pensamiento se parece más a la intuición que a la prosa. Penrose recuerda la similitud con la que Mozart y Einstein describen sus hallazgos: captaban de un golpe una forma, musical o matemática, sin pasos ni razonamientos previos. Para Mozart llegaba un tema musical, luego una melodía ligada, aparecían las armonizaciones necesarias, los timbres y colores de los instrumentos, hasta que era una obra completa en su mente. Luego la obra crecía hasta que la tenía acabada. «Entonces mi mente la atrapa de la misma forma en que mi ojo atrapa de una mirada una imagen bella» [citado en Penrose, *La mente nueva del emperador*, p. 499]. No le llegaban poco a poco unas notas a las que luego debía encontrar armonizaciones y desarrollo, sino obras con su orquestación completa. Después, escribirlas era sólo una laboriosa exigencia para la interpretación.

Einstein dice: «Las palabras o el lenguaje, ya sea escrito o hablado, no parecen desempeñar ningún papel en mi mecanismo de pensamiento» [citado en *La mente nueva del emperador*, p. 499]. Buscar las palabras adecuadas era un acto trabajoso que venía después y debía servir únicamente para comunicar aquel hallazgo. Poincaré, en cuyos trabajos está fundada la relatividad, también relata anécdotas de tales descubrimientos súbitos, en medio de una conversación banal, cruzando una calle. Octavio Paz se sube a un taxi, se acomoda entristecido por una ruptura, el ritmo del auto sobre el pavimento comienza a dictarle: «Un sauce de cristal, un chopo

de agua...» El poema está allí, existe. Ahora sólo hay que escribirlo.

Henri Poincaré relata una noche de insomnio en que las ideas le llegaban por montones y cómo a la mañana siguiente tenía respuesta a un problema con el que había bregado por quince días inútilmente. Los resultados súbitamente aparecidos sólo tuvo que escribirlos.

En otra ocasión, el mismo Poincaré salió en una excursión geológica que le hizo olvidar, con el ajetreo del viaje, sus trabajos matemáticos. Al tomar un autobús le ocurrió lo siguiente:

En el momento de poner el pie en el estribo se me ocurrió la idea, sin que, al parecer ninguno de mis pensamientos anteriores le hubiese abierto camino, de que las transformaciones empleadas por mí para determinar las funciones fuchsianas [olvide el nombre, lector] eran idénticas a las de la geometría no euclidiana. No comprobé la idea, ni hubiese tenido tiempo para ello, porque, en tomando asiento, reanudé una conversación que tenía comenzada; pero me sentí perfectamente seguro [Poincaré, «La creación matemática», p. 485].

Más adelante relata cómo un fracaso lo llevó a darse unas vacaciones por la costa para pensar en otros asuntos. «Una mañana, paseando cerca del mar, se me vino al pensamiento, con los mismos caracteres de brevedad, prontitud y certeza inmediata que en el caso anterior», una idea que luego, trabajada, se mostraría enormemente fructífera.

## La certeza

En todos los casos de contacto con la verdad platónica se observa un profundo convencimiento anterior a toda demostración. Es sabida la anécdota según la cual le preguntaron a Einstein qué habría hecho si Eddington no hubiera observado la predicha desviación en la luz de las estrellas cercanas (aparentemente) al disco solar durante el famoso eclipse de 1919 que confirmó la teoría general de la relatividad. «Lo habría sentido mucho por el pobre lord, porque la teoría es correcta.»

La belleza matemática, la elegancia de la teoría es tal, que no podía ser falsa. Esta intuición estética es compartida por todos los grandes de la física. Sin excepción, todos parecen convencidos de que una teoría horrible no puede ser verdadera.

Con respecto a la relatividad hay todavía algo más asombroso: su falta de observaciones. Penrose lo dice así:

La teoría fue desarrollada originalmente sin ninguna motivación basada en observaciones; la teoría matemática es muy elegante y está físicamente muy bien motivada. El punto está en que la estructura matemática está justo allá, en la Naturaleza; la teoría realmente está afuera en el espacio, no ha sido impuesta sobre la Naturaleza por nadie [*The Large, the Small and the Human Mind*, p. 25].

Los ejemplos abundan en las biografías de artistas y científicos, y se podrían citar más que no añadirían mucho. Mejor observemos que en la vida co-

tidiana de los seres humanos comunes también ocurre que las ideas, las soluciones, aparezcan como un destello imprevisto, una luz que en ese momento no era buscada. La idea esencial de Penrose es que el conocimiento parece tener algo de las características que le atribuía Platón: «Nada nuevo aprendemos, sólo recordamos.» Ahora diríamos: hay algo en nosotros que no podemos poner en una computadora. Y no por falta de tecnología, sino, otra vez, porque damos con un límite de la naturaleza, como en el principio de incertidumbre, en la longitud de Planck, en la velocidad de la luz según la relatividad. En este caso damos con un límite señalado por el teorema de Gödel. Veamos cómo se encontró este nuevo límite.

#### La certificación del conocimiento

¿Cómo podemos estar cien por ciento seguros de que una prueba matemática no tiene error alguno? Elaborando una escrupulosa serie de requisitos que, una vez cumplidos, certifique la verdad. Es como fabricar un comprobador de verdades. Muchos científicos y filósofos se han hecho esa pregunta. Descartes intentó responderla con sus *Reglas para la conducción de la mente*.

David Hilbert planteó en 1900 al Congreso Internacional de Matemáticos una lista de problemas sin resolver. El décimo de tales problemas era precisamente si podemos construir un procedimiento matemático mecánico que permita la comprobación

de cualquier enunciado matemático. A los procedimientos matemáticos mecánicos los llamamos «algoritmos». Consisten en una receta que cualquiera pueda seguir: «Sume éste con aquél, divida entre tanto y reste aquello» es un algoritmo un tanto vago, pero más o menos esa forma tienen incluso los más sofisticados.

Bertrand Russell, junto con Alfred Whitehead, se propuso resolver el asunto planteado por Hilbert y hacer por la aritmética lo que Euclides había hecho por la geometría: axiomatizarla. Esto significa que con unos pocos enunciados y reglas para trabajar esos enunciados se podría establecer un método para asegurar que toda operación aritmética fuera certificadamente correcta. La tarea resultaba monumental. Publicaron los primeros tomos con el nombre de *Principia Mathematica*.

Un joven matemático entonces desconocido, Kurt Gödel, respondió en 1931 con unas cuantas páginas donde probaba que para todo conjunto de enunciados elegido siempre habría una expresión para la que no se podría decidir si era verdadera o falsa. Dicho de otra forma: si quiero certificar la verdad de una afirmación la paso por un mecanismo comprobador. Este mecanismo está constituido de reglas como «Haga esto», «Verifique aquello». Bien, sean cuales sean las reglas que escoja, siempre podré encontrar un enunciado para el que mi máquina comprobadora no pueda responder si es verdadero o es falso. Y eso para cualquier conjunto inicial que elija.

En el caso particular de la aritmética, que era el intento de formalización iniciado por Russell, respondía Gödel: ningún formalismo de la propia aritmética podrá evitar que alguna expresión aritmética resulte improbable. Otra forma de decirlo: siempre encontraré por lo menos una expresión para la cual ninguna sucesión de reglas constituya una prueba.

O con la conclusión más general de Nagel y Newman: «Dado un determinado problema podría construirse una máquina que lo resolviese, pero no puede construirse una máquina que resuelva todos los problemas» [*El teorema de Gödel*, p. 123]. Y en esta limitación queda incluido el cerebro humano.

Pero, con todo, hay algo que distingue al cerebro de las computadoras más sofisticadas, y es lo señalado por Penrose: toda computadora puede resolver sólo problemas que se puedan exponer como una sucesión de pasos, esto es, como un algoritmo. No otra cosa son los programas de computación, sino pasos. Pero hemos visto, en los ejemplos extremos citados y en la actividad mental de las personas comunes, que el cerebro no sigue algoritmos y puede alcanzar súbitos accesos a una idea sin seguir reglas como las exigidas por la comprobación mecánica.

Para decirlo con palabras de Frege, figura esencial en la matematización de la lógica a principios del siglo XX: «Es posible, por supuesto, operar con números mecánicamente, así como es posible hablar como un perico: pero eso difícilmente merece el nom-

bre de pensamiento» [citado en Yourgrau, *Gödel Meets Einstein*, p. 125].

Veamos dos problemas y su distinta solución por seres humanos y por computadoras. En un caso pedimos: «Encuentra un número que no sea la suma de tres números elevados al cuadrado.» Un ser humano debe calcular todas las combinaciones con los primeros números, incluido el cero. Dependiendo de su habilidad y entrenamiento dará con la primera solución: 7. Eso lo hace una computadora en fracciones de segundo. Para ello le basta con seguir un programa de computación, una serie de procedimientos, en fin, un algoritmo. Ahora pedimos: «Encuentra un número impar que sea la suma de dos pares.» La computadora seguirá un algoritmo, algo así como «Toma el primer número impar, divídelo entre 2, comprueba si ambos son pares. Si no lo son, sigue con el siguiente impar. Si lo son, detente. Pero la computadora no llegará a detenerse nunca y seguirá revisando por los siglos de los siglos números cada vez más inmensos. Una persona sabe de inmediato que la tarea es inútil: La suma de dos pares siempre es un par [véase Penrose, *The Large, the Small and the Human Mind*, pp. 106-107].

### Inaprehensibilidad de la conciencia

Si bien la descripción del cerebro es cada vez más minuciosa y conocemos mejor cada vía seguida por, digamos, una percepción visual, la integración de esta

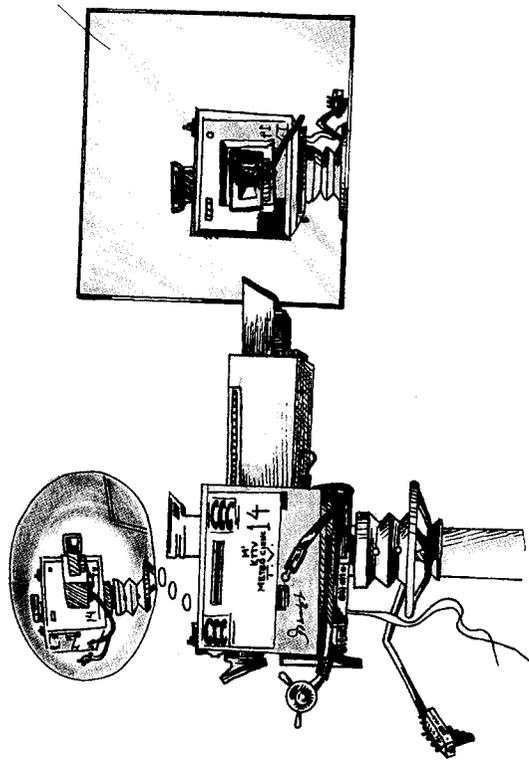


FIGURA 9.3. Una cámara frente a un espejo forma una imagen interna de sí misma. ¿Eso la hace consciente?

imagen en el cerebro no es suficiente para explicar la conciencia. Si lo fuera, comenta jocosamente Penrose, entonces una cámara de video funcionando frente a un espejo tendría conciencia, pues está formando en su interior una imagen de sí misma. La conciencia sigue eludiendo el nivel anatómico. Así lo perfeccionamos hasta conocer cada fibra cerebral, nos deja con la misma pregunta: ¿Cuál es la diferencia entre la conciencia y una cámara que se ve a sí misma? Y la cámara, sin duda alguna, la conocemos hasta en sus menores detalles.

Por supuesto, hay niveles explicativos para los que la respuesta neurofisiológica es suficiente: los pulsos enviados para realizar la digestión, el control automático de la respiración y del latido cardiaco, la marcha, los reflejos. Todo esto se puede programar en una computadora, y de hecho se hace en las salas de cirugía. Pero «la *formación de juicios*, que afirmo es la impronta de la conciencia, es *ella misma* algo sobre lo que la gente dedicada a la inteligencia artificial no tendría ni la menor idea de cómo programar en una computadora» [Penrose, *La mente nueva del emperador*, p. 486].

Por ejemplo, Gerald Edelman tiene algunas sugerencias acerca de cómo podría trabajar el cerebro, sugerencias que según él son no computacionales. ¿Qué es lo que hace? Tiene una computadora que simula todas estas sugerencias. Luego, si hay una computadora que supuestamente las simula, entonces son computables [Penrose, *The Large, the Small and the Human Mind*, pp. 126-127].

Y es precisamente esa formación de juicios, esa capacidad para distinguir o intuir verdad de falsedad, belleza de fealdad, lo que constituye la impronta de la conciencia para Penrose. Que la formación de juicios no sigue algoritmo alguno se comprueba en la propia experiencia del trabajo matemático. Una vez que hemos encontrado un algoritmo, el problema está resuelto. Pero el trabajo inicial, la búsqueda del método correcto para llegar a una solución válida, es una expresión no algorítmica de la conciencia. «¿Cómo sabemos si, para el problema a resolver, debemos multiplicar o dividir los números? Para ello necesitamos *pensar* y hacer un juicio *consciente*.» [*The Large, the Small and the Human Mind*, p. 127]. Esto es, únicamente por una elección consciente, no algorítmica y por lo tanto no computable, puedo saber que el algoritmo (el procedimiento) elegido para una solución particular es el correcto.

Seguimos entonces sin saber cómo juzgan los matemáticos que han alcanzado una verdad, cómo están seguros de una prueba. Pero el hecho es que la verdad matemática se construye a partir de elementos sencillos. Cuando se presenta, se hace evidente para todos.

Debemos «ver» la verdad de un argumento matemático para estar convencidos de su validez. Esta «visión» es la esencia misma de la conciencia. Debe estar presente *dondequiera* que percibimos directamente la verdad matemática. Cuando nos convencemos de la validez del teorema de Gödel no sólo lo «vemos», sino que al hacerlo revelamos la naturaleza no algorítmica del propio

proceso de la visión [Penrose, *La mente nueva del emperador*, p. 493].

Así es como el descubrimiento matemático consistiría en un ensanchamiento del contacto con el mundo platónico de los conceptos matemáticos. Éstos están allí, como está el monte Everest. Sólo hay que «verlos» con un contacto directo, un camino que se establece entre el mundo físico y el mundo platónico.

Cuando el niño abstrae, de diversas cantidades de objetos, la noción de «número natural», es decir, cuando ya «cinco» no debe ir seguido de un sustantivo («cinco pelotas»), sino que ha adquirido un significado abstracto, el niño ha realizado una tarea que no consigue ninguna supercomputadora.

Lo que Gödel nos dice es que ningún sistema de reglas de computación puede caracterizar las propiedades de los *números naturales*. A pesar del hecho de que no hay manera computable de caracterizar los números naturales, cualquier niño sabe qué son [...]. Comprender lo que los números naturales *son* es un buen ejemplo de contacto platónico [Penrose, *The Large, the Small and the Human Mind*, p. 116].

¿Cómo ocurre ese contacto? Polkinghorne, otro físico (y ahora sacerdote y teólogo), propone que lo mental y lo físico se encuentran en una interfase, que es la conciencia [véase *The Quantum World*, p. 65]. Esta interfase tiene características cuánticas; veamos en la siguiente sección cómo las describe Penrose.

## El fotón y el ojo

Cuando un fotón alcanza una célula perceptiva de la retina, al fondo del ojo, estamos ante un hecho, como la medición en el laboratorio, donde el mundo cuántico, en superposición de estados antes de la observación, cancela esta superposición. La detección por la retina colapsa el paquete de ondas característico del fotón, como ocurre al observar el paso de un fotón en los experimentos con dos rendijas. El fotón se encuentra en estado de complementariedad, como diría Bohr: impacta y no impacta la retina. De acuerdo con la ecuación de Schrödinger, habrá por tanto una superposición de la señal nerviosa: presencia y ausencia de señal a lo largo del nervio óptico. Será la conciencia de la persona la que colapse la onda del fotón y lo fije como partícula. La retina de la persona consciente está efectuando una medición; esto desencadena una señal nerviosa perteneciente al mundo de la física clásica. Tenemos, pues, una interfase en el ojo que nos lleva del mundo cuántico y complementario al mundo de la física clásica, donde las cosas siguen la normalidad que conocemos cada día.

Así como ocurre con el fotón en el ojo, de igual forma podemos imaginar toda la actividad cerebral guiada por los principios de complementariedad y de incertidumbre, con la ecuación de Schrödinger llevando el compás de ese telar mágico donde se tejen nuestros deseos, recuerdos y emociones. Así, el cerebro ensayaría no sólo una, «sino un inmenso número de posibles configuraciones, todas superpues-

tas», avanza Penrose [*La mente nueva del emperador*, p. 516]. El cerebro, en tal estado, puede realizar cálculos superpuestos simultáneos.

La acción del pensamiento consciente está muy ligada a la resolución de configuraciones que previamente estaban en la superposición lineal de estados. Todo esto está relacionado con la física desconocida que gobierna la línea divisoria entre [la cuántica y la clásica] y que, a mi modo de ver, depende de una teoría de la gravitación cuántica, GQC, aún por descubrir [*La mente nueva del emperador*, p. 517].

Penrose aventura una hipótesis con respecto al tiempo. Hace notar que en las descripciones físicas el tiempo no fluye en absoluto. Sólo tenemos un espacio-tiempo en el que se disponen los sucesos. No obstante, a nosotros nos parece que el tiempo fluye.

Mi conjetura es que aquí también existe algo ilusorio, y el tiempo de nuestras percepciones no fluye «realmente» en la forma de avance lineal en que lo percibimos fluir (independientemente de lo que esto pueda significar). El ordenamiento temporal que uno «parece» percibir es, afirmo, algo que imponemos a nuestras percepciones para poder darles sentido en relación con la progresión temporal uniforme hacia adelante de una realidad física externa [*La mente nueva del emperador*, p. 523].

Cuando Mozart captaba de golpe una composición musical completa, ésta no se veía sometida al tiempo que toma interpretarla. Tampoco parecen coincidir los largos tiempos de respuesta medidos en

el laboratorio con los tiempos en que respondemos a una actividad consciente, como en un rápido juego de ping-pong. Algo semejante observamos en el experimento EPR llevado a cabo por Aspect: el *enlace* de partículas no puede describirse en función del espacio-tiempo ordinario de forma compatible con la relatividad.

### Niveles de conciencia

Por supuesto, Penrose no considera que únicamente el humano sea poseedor de conciencia. Y proporciona ejemplos de animales en los que hay una chispa, un destello súbito por el que se aprehende una situación y se resuelve un problema. Nos da el de un chimpancé al que «se le ilumina» la cara al pensar, súbitamente, una solución para alcanzar unos plátanos.

Estaba leyendo el nuevo libro de Penrose en el jardín cuando ocurrió un ejemplo aun mejor de conciencia, sin comillas, animal. Mis dos perros, el Oso y el Yanko, *cocker* y *dálmata*, se pasan la tarde (y sólo la tarde, por alguna razón que ignoro), ladrándoles a las personas que cruzan frente a la reja. Las esperan asomados a una reja pequeña y cuando ven una víctima corren a la reja grande, donde tendrán oportunidad de ladrar más rato. Ambos conocen la carrera que pega el otro perro cuando ve aproximarse un incauto o incauta y, sin comprobar, se unen corriendo a la diversión. Es importante este detalle: cada uno conoce el tipo de carrera que indica «hu-

mano, perro o bicicleta aproximándose», que es muy distinta de otras carreras. Hace unos minutos, el Oso encontró un hueso metido en una rendija. Lo sacó trabajosamente y luego se pagó sus esfuerzos royendo lentamente su tesoro. El Yanko lo miraba con envidia, las orejas atentas, la mirada fija en el hueso. Es más grande y fuerte, así que fácilmente se lo podía haber arrebatado a la mala, pero prefirió una vía más amistosa: se puso en pie y lanzó la carrera de «viene alguien a quien ladrarle», el Oso reaccionó al instante y se lanzó a la carrera rumbo a la reja. Pero el Yanko, tras unos cuantos pasos a la velocidad correcta, que es a todo vuelo, se dio vuelta y se dirigió sin dudarlo al hueso abandonado. ¡Había fintado la carrera! «Dijo» que venía alguien para quedarse con el hueso.

No es poca cosa la ocurrida. Implica que para los animales, nosotros y los demás animales no somos «cajas negras» que producen conducta, sino seres con estados internos. «Si corro de la forma *P*, éste que roe el hueso entenderá que viene peatón, correrá conmigo y descuidará el hueso.» Es la presunción completa de un estado interno, esto es, de un estado de conciencia, en su amigo perro.

La conciencia es un continuo que abarca a todos los seres vivos. Se agudiza en perros y gatos, más todavía en los primates, incluido por supuesto el ser humano. También a lo largo de nuestra vida, la conciencia es un continuo que comienza con expresiones casi vegetales: en el recién nacido es apenas una respuesta como la fotokinética por la que las plan-

tas siguen la luz, luego aparece la percepción del espacio y la distancia, después la separación entre el mundo interno y el externo, hasta que la conciencia es plena alrededor de los ocho años, alcanza su culminación con la madurez y comienza su declive hacia la inconciencia de la senectud.

### Microtúbulos y Gödel

Hay algo fundamental que falta en nuestra física. ¿Hay alguna razón en la física misma para pensar que podría haber algo no computable en esta física faltante? Bien, pienso que hay alguna razón para creer esto: que la verdadera teoría cuántica gravitatoria podría ser no computable [Penrose, *The Large, the Small and the Human Mind*, p. 120].

Mientras no tengamos una teoría unificada de la física, una Teoría del Todo que incluya la gravitación, deberemos aceptar que, por razones misteriosas, los efectos cuánticos sólo se dan en el nivel atómico, y que al pasar a los objetos macroscópicos vuelve a regir la física clásica. Por lo mismo, si la conciencia está relacionada con efectos cuánticos, deberemos buscarlos en estructuras muy por debajo de la célula. En la célula nerviosa por excelencia, la neurona, encontramos unas estructuras de pequeñez molecular, los microtúbulos. Éstos transportan los neurotransmisores hasta las sinapsis neuronales. La nueva física podría expresarse en estos microtúbulos.

«Una de las cosas que más me excitan de los microtúbulos es que son *tubos*. Siendo tubos, hay grandes probabilidades de que puedan aislar de la actividad azarosa en el ambiente lo que ocurre en sus interiores» [Penrose, *The Large, the Small and the Human Mind*, p. 131]. Y lo que ocurre en sus interiores estaría dictado por la nueva física, esa física faltante. Habría oscilaciones cuánticas en esos tubos, y por supuesto entrarían en superposición de estados. Los microtúbulos de los axones podrían ser la interfase entre el mundo material y la conciencia, y ésta a su vez sería el medio para captar el mundo matemático platónico, el acceso a ese mundo que no creamos, sino que descubrimos. «En cierto punto, el estado cuántico podría enlazarse con el ambiente», dice Penrose, empleando el término «enlazar» en el sentido de los fotones de Aspect y su cancelación del tiempo y del espacio como los intuimos. «Así pues, sostengo que necesitamos algo en el cerebro que esté suficientemente aislado para que la nueva física tenga una oportunidad de desempeñar un papel importante» [p. 134]. Y serían los microtúbulos, aislados del ambiente, lo que podría permitir la acción de esa «física faltante».

Así es cómo la superposición cuántica de estados, en caso de darse en los microtúbulos neuronales, explicaría la característica no computable de la conciencia. Por el principio de correspondencia de Bohr, las leyes clásicas, las del mundo cotidiano, «son simplemente la forma límite asumida por las fórmulas de la teoría cuántica cuando el número

de los *quanta* o partículas implicados es muy grande», sostiene Eddington [véase «The Decline of Determinism»]. Las superposiciones cuánticas en los microtúbulos pasarían a un solo estado, definido clásicamente, por acción de la conciencia. Pero la conciencia misma seguiría esperando explicación. Quizá no la tiene por ese límite descubierto por Gödel. Parafraseando su famoso teorema quedaría así: la conciencia no puede ser comprendida dentro de la conciencia misma.

### A nuestra imagen y semejanza

Todos los pueblos antiguos comenzaron por explicarse los fenómenos naturales atribuyéndolos a seres poderosos e invisibles: dioses, espíritus, enojos y venganzas de fuerzas celestes. Algunos todavía lo hacen. Egipcios y caldeos, chinos y babilonios; después mayas, germanos o navajos, todos explicaron lo natural que no entendían, por lo sobrenatural. Hace 2 500 años, los griegos no ilustrados tampoco fueron excepción: los rayos tenían por causa la furia de Zeus, así como la de Poseidón era la causa de las tempestades, y era necesario aplacarlos con obsequios; unos dioses se aliaron con Troya y otros con las ciudades griegas durante la guerra cantada por Homero.

En todas partes encontramos dioses hechos a imagen y semejanza de sus pueblos: sangrientos en el altiplano de lo que hoy es México, pacíficos donde el pueblo es pacífico, vengativos donde la ley del padre es la única garantía de supervivencia. Zeus y su

esposa Hera son celosos como griegos, él la engaña con cuanta joven hermosa y jovencito guapo aparece en los campos llenos de ninfas y sátiros. Ella urde toda clase de represalias, las organiza en silencio, como buena esposa griega.

Para todos los pueblos antiguos, el mundo era incomprensible salvo como capricho de dioses y espíritus siempre impredecibles. La benéfica crecida anual del Nilo debía suplicarse con anticipación y con ofrendas suficientes. En China y en Persia, en la India y en América, los dioses hacían de las suyas con los humanos. Cuando amanecían de buen humor se contaba con lluvia suficiente y cosechas para esperar los meses de frío, pero por quitame allá esas pajas podían encolerizarse y lanzar plagas contra los cultivos, enfermedades, guerra y hambre contra los seres humanos. Era necesario adivinarles sus deseos para prevenir los escarmientos.

### Primeras regularidades

Aunque no todo parecía un capricho. Los seres humanos comenzaron a encontrar, por observación, regularidades en la naturaleza. Las más notorias estaban en los cielos: el sol, la luna y las estrellas tenían un comportamiento perfectamente predecible. A su vez, eran dioses en todas las culturas, pero comenzaban a desacoplarse dos nociones: el disco solar en tanto tal y los arrebatos de Ra provocados en ocasiones por su vida familiar y ni siquiera por errores de los seres

humanos. Datos cotidianos, como el paso del sol de oriente a poniente, recibían explicaciones de acuerdo con los usos y costumbres de los pueblos. Era el dios solar viajando entre las riberas del gran río celeste, era carro de fuego, era lo que cada pueblo empleara para viajar.

No sabemos cuándo surgieron las primeras explicaciones sobre los fenómenos de la naturaleza, pero las más antiguas están basadas siempre en las pependencias entre los dioses y los seres humanos. De manera paralela, comenzó a desarrollarse en todos los pueblos la observación: el paso de las estaciones, el perfecto orden de las estrellas y el desorden en cinco de ellas, que vagaban de aquí para allá por entre las estrellas fijas, y por lo cual los griegos las llamaron «planitis», que significa «vagabundo».

Pero la observación, así sea minuciosa y se acumule por milenios, como en las tablas astronómicas chinas, no produce nuevo conocimiento: una vez apuntados todos los erráticos movimientos de Venus o de Marte a lo largo de unos años, el trabajo ha terminado. Salvo que alguien se haga otra pregunta: «¿Por qué?» La respuesta puede venir de la fantasía popular y, así, cada pueblo tendrá una distinta. Pero si son distintas, ¿no serán todas falsas? ¿Cómo comprobar que alguna es verdadera? En la inmensa mayoría de los pueblos, estas dudas no surgieron nunca. Los cielos y la tierra eran como eran por mandato expreso, en cada instante, de algún ser inmortal. La caída de las piedras, la forma de una flor, el aullido de un animal, la tormenta y el rayo: todo

encontraba explicación fuera de la naturaleza, en lo sobrenatural. Y cada pueblo atribuye a lo sobrenatural diversas maneras de acción porque lo único que requiere es fantasía.

Si los leones dibujaran...

Ahora es fácil aceptar que los dioses son hechura de sus pueblos, pero fue un filósofo griego el primero en advertir esta similitud. Xenófanes, cuya filosofía se expresó en grandes poemas épicos, hizo el siguiente escarnio de las creencias populares: «Los hombres suponen que nacen los dioses teniendo forma humana, voces y piel, y sin embargo si los bueyes tuvieran manos, y las tuvieran los caballos y los leones para poder dibujar como los hombres, los caballos dibujarían a los dioses como caballos y los bueyes como bueyes.» Esto fue dicho en el siglo VI antes de Cristo y en Jonia, nombre griego para la costa oriental del Egeo, hoy turca, donde nacieron los primeros intentos de interrogar a la naturaleza. «Hay un solo Dios», escribió Xenófanes, «que ni en imagen ni en pensamiento se parece a los mortales».

Arthur Koestler llama al siglo VI antes de Cristo «el milagroso siglo de Buda, Confucio, Lao-Tsé, de los filósofos jonios y de Pitágoras». En una hermosa imagen describe un viento primaveral que parece soplar desde China hasta la isla de Samos, en el Egeo, despertando la conciencia de los seres humanos.

En la escuela jónica de filosofía, el pensamiento racional comenzaba a surgir del mundo de los sueños mitológicos. Era el principio de la gran aventura: la búsqueda prometeica de explicaciones naturales y de causas racionales que, durante los 2 000 años siguientes, iban a transformar al hombre más radicalmente que los 200 000 años anteriores [*Los sonámbulos*, p. 22].

A ese amanecer lo llama «la fiebre jónica».

### La fiebre jónica

No es menor el entusiasmo de Carl Sagan por el amanecer de la razón en la antigua Jonia. El caos fue, para los primitivos griegos, lo sin forma. De él surgió el orden: el cosmos. El caos es caprichoso e impredecible, el cosmos regular, por lo tanto puede conocerse. En palabras de Sagan: «En el siglo VI antes de Cristo, en Jonia, se desarrolló un nuevo concepto, una de las grandes ideas de la especie humana. El universo se puede conocer, afirmaban los antiguos jonios, porque presenta un orden interno: hay regularidades en la naturaleza que permiten revelar sus secretos» [*Cosmos*, p. 175].

Descubrir que en el universo había orden y leyes llevó al paso inmediato: tratar de encontrarlas, de comprender lo que llamaron «cosmos», develar sus secretos. Ése fue el paso esencial e indispensable para fundar lo que hoy llamamos ciencia. Primero, una intuición germinal que decía: la naturaleza se comporta con base en regularidades, y éstas proceden de la misma naturaleza y no de mandatos ex-

ternos a ella. Segundo, el inmediato afán por conocer esas regularidades. Así de sencillo, y así de difícil, pues sólo hubo una chispa. Su fuego creció durante 300 años, declinó por otros 300, en 300 más se apagó por completo y así permaneció durante mil años. Hasta que los hombres del Renacimiento soplaron los rescoldos y la llama revivió.

¿Por qué saltó esa chispa, esa primera intuición germinal, en Jonia y no en pueblos más antiguos? ¿Por qué no en China, India, Egipto, Babilonia o Centroamérica?, se pregunta Sagan, refiriéndose más bien a lo que los antropólogos llaman Mesoamérica. «¿Por qué no en la India, una cultura muy rica y con dotes matemáticas?», insiste. ¿Por qué ni siquiera en culturas más modernas? Es una buena pregunta que muchos nos hemos hecho y su respuesta es tan insuficiente como cualquier otra. Sagan atribuye el amanecer de la Jonia preclásica al hecho de que las numerosas islas y las quebradas costas que la integraban produjeron diversidad, comercio, intercambio. Jonia fue un punto de cruce para las grandes culturas de Egipto y Mesopotamia.

¿Por qué no?

El río Mississippi constituye una vía navegable tan rica o más que el Mediterráneo oriental y unió diversas culturas americanas, ninguna de las cuales es grandiosa. Los mayas, aunque mil años después que los jonios, podrían haber navegado por Centroaméri-

ca, Yucatán, parte del Caribe, subido por el Mississippi, pero no lo hicieron. Como los hindúes, los mayas tuvieron magníficas matemáticas y observaciones escrupulosas de los astros, pero ninguno de estos importantes pueblos abandonó a sus dioses ni, mucho menos, intentó explicar el mundo mediante los números, como había hecho Pitágoras un milenio antes. Los mayas pudieron predecir eclipses solares, pero los siguieron atribuyendo al devoramiento del Sol por una inmensa serpiente cósmica. Sagan, en ignorancia pasmosa de los tiempos en la historia de México, pero en acto de buena voluntad y de corrección política, menciona hasta a los aztecas como un pueblo, entre los grandes, al que no llegó la luz que iluminó a los jonios. Así es. Pero el nombre no tiene por qué aparecer entre las civilizaciones antiguas, pues sabemos que 2 000 años después del amanecer de la ciencia en el Egeo, los aztecas, en pleno 1300 de nuestra era, con Atenas ya en ruinas, apenas iban llegando al Valle de México arrastrando una cultura de cazadores-recolectores superada en China 10 000 años antes. 10 000 años de atraso histórico respecto de China no son pocos. Y la mal llamada Conquista, por la que México quedó fundado y repoblado, en buena medida se explica porque ninguno de los pueblos americanos, ni los más elogiados, conocía el hierro, el metal para hacer espadas. Pero, sobre todo, ninguno se había propuesto la tarea iluminadora de interrogar a la naturaleza.

Comercio hubo, y mucho, en Mesoamérica. Hubo diversidad de naciones y de culturas. Hubo rutas de

comunicación, inteligencia, arte. Pero no despertó aquí en América ni en China ni en India el interés por encontrar leyes y orden, por ver al mundo como un cosmos y no como un caos. En consecuencia, no hubo ciencia, y la ciencia es la madre de la técnica y la técnica es ama y señora de la guerra. Un pueblo sin ciencia es un pueblo perdido porque será avasallado más bien pronto que tarde. Así pues, al parecer no queda sino una explicación: para suponer que la naturaleza tiene regularidades y, por lo tanto, que podemos conocerlas, fue preciso, en primerísimo término, abandonar a los dioses. Por qué ocurrió ese abandono en la Jonia del siglo VI antes de Cristo y no en otros lugares y otros tiempos, quizá sea para siempre una interrogante sin respuesta.\*

### Tales

Los primeros filósofos, en la Jonia de 600 años antes de nuestra era, a los que también llamamos presocráticos porque sentaron las bases del pensamiento de Sócrates, dieron el paso que fundó la ciencia cuando trataron de explicar la naturaleza por la naturaleza misma. El agua, el fuego, la tierra, el aire, los números dando estructura matemática al cosmos, según cada filósofo y su escuela, eran la base subya-

\* Tras revisar las pruebas de este libro leí una respuesta asombrosamente erudita y perspicaz: se trata de la fascinante visión acerca de los últimos 13 000 años de historia, desplegada con rigor y pasos precisos por Jared Diamond en *Guns, Germs and Steel* [Nueva York: Norton, 1999].

cente a los fenómenos. Todos siguen citando a los dioses, pero ya no los hacen responsables de los fenómenos naturales. Están allí, algunos filósofos creen en ellos, otros no, pero no forman parte de la explicación.

Entre los jonios, el más antiguo es Tales de Mileto, nacido en el 625 antes de nuestra era. Son suyas las primeras especulaciones sobre la realidad física. Propone al agua como la esencia del orden cósmico; calculó el eclipse solar del año 585 antes de nuestra era; en Egipto descubrió un método para medir la altura de una pirámide a partir de su sombra. Con él da inicio la organización de la geometría, la cual concluiría tres siglos después con Euclides.

### Anaximandro

Anaximandro, nacido en el 611 antes de Cristo, también fue de Mileto. Amigo joven y colega de Tales, no aceptó, sin embargo, su teoría del agua y propuso un sustrato último de toda realidad, al que llama «arjé», principio; para Anaximandro, los mundos son infinitos y eternos, sin principio ni fin. Adelantándose veinticinco siglos a Darwin, sostuvo que puesto que los seres humanos no se alimentan por sí mismos en la infancia, debían de provenir de otros animales que sí lo hacen y por tanto logran sobrevivir en situaciones en las que un ser humano perece, que todos debieron de tener su origen en el agua y posteriormente algunos fueron obligados a vivir en tierra, donde pasaron

de una forma corporal a otra, llenando así la tierra con toda su diversidad. No es muy diferente lo que en nuestros días propone la biología evolucionista. Observando los cambios diarios en la sombra de una simple vara clavada en el suelo, Anaximandro determinó con precisión la duración del año. Fue quizá el primer ser humano en no buscar una explicación para el sostenimiento de la Tierra en el espacio: no está ni flotando en agua, ni sobre una tortuga. Su idea fue asombrosamente sencilla: la Tierra está en el centro exacto del universo y por ende no hay fuerza alguna que la atraiga. Aunque ahora sepamos que no está ni remotamente en el centro de nada, la idea sigue siendo válida para explicarle a un niño por qué no cae el planeta.

El universo de Anaximandro consiste en esferas concéntricas. La más externa es de fuego. Luego viene una opaca a través de cuyos orificios vemos la luz del fuego cósmico; los agujeros mayores son el sol y la luna, las estrellas en cambio son pequeños orificios. El modelo, una vez más, es falso y no permite explicar los movimientos de los planetas entre las estrellas fijas, pero ya es un modelo mecánico y no una barca en la que el dios solar se pasea de una ribera a otra del firmamento. El modelo mecánico del universo, parecido en muchos aspectos a los primeros mecanismos, con sus ruedas y engranes, habría de durar desde Anaximandro hasta 1916, cuando Einstein publicó su teoría general de la relatividad.

## Anaxímenes

Para Anaxímenes, también jonio del siglo VI antes de Cristo, el principio de toda la realidad es el aire. El aire es infinito y se encuentra en eterno movimiento. El aire se convierte en fuego o se condensa en nubes, cae como lluvia y esa agua se transforma en tierra y luego, con el tiempo, ésta se endurece en piedra. Así es como ese ciclo acuático explica la multiplicidad de los elementos físicos. Anaxímenes continuó con la idea de las esferas ensambladas, sólo que las imaginó de cristal y con las estrellas pegadas «como uñas», dice. El sistema de Anaxímenes fue perfeccionado setecientos años después, en Alejandría, por Ptolomeo y habría de durar hasta el siglo XVI de nuestra era, cuando el canónigo y astrónomo Copérnico propuso su sistema.

Poco al sur de Mileto, cruzando apenas un estrecho canal, en la isla de Cos, Hipócrates había fundado por entonces su escuela de medicina. Entre los pocos fragmentos que nos han llegado de sus escritos, además del juramento hipocrático, uno está en perfecta línea con la nueva forma de entender la naturaleza: «Los hombres —escribe Hipócrates— creen que la epilepsia es divina simplemente porque no la entienden. Pero si llamaran divino a todo lo que no entienden, realmente las cosas divinas no tendrían fin.»

## Pitágoras cambia el mundo

En la isla de Samos, frente a la costa de Mileto, de la que la separa apenas un estrecho brazo de mar, nació Pitágoras en el año 580 antes de nuestra era. Nos dio dos palabras inmortales aún empleadas en todos los idiomas: «cosmos», mundo organizado y coherente, y nada menos que «filosofía», amistad por la sabiduría. Los pitagóricos se enamoraron de los números; veían en las matemáticas la realidad perfecta de la que las apariencias percibidas no son sino un imperfecto reflejo. Las demostraciones matemáticas, para ellos, eran atisbos al mundo perfecto. Probaron que si bien existe un número infinito de polígonos regulares, sólo hay cinco cuerpos tridimensionales: los llamados sólidos regulares, cuyas caras son el mismo polígono regular. Fundaron una iglesia y se llenaron de ritos secretos y prohibiciones insólitas, como la de comer alubias o la de revelar a las personas comunes la existencia del quinto sólido, el dodecaedro, formado por doce pentágonos. Vieron en la esfera una figura perfecta y la hicieron modelo para el perfecto mundo de los cielos. No tuvieron peor crisis que el descubrimiento de un número que no se podía expresar como dos números enteros formando un quebrado: la raíz cuadrada de 2. Para agravar esta anomalía en el perfecto mundo de los números, el descubrimiento se había hecho al aplicar el teorema llamado precisamente «de Pitágoras»: que la suma de los cuadrados de los lados más cortos de un triángulo recto es igual al cuadrado del lado más largo. Cuando aplicaron este descubri-

miento al más perfecto de los triángulos, que era el formado por dos lados con valor 1 (siendo este número 1 cualquier unidad), descubrieron aterrados que la solución al teorema, o sea la medida del lado más largo o hipotenusa, debía ser la raíz cuadrada de 2, y este número no podía expresarse como razón de dos números enteros, como un quebrado. Dada la fascinación de los pitagóricos por los números enteros, su edificio filosófico parecía tambalearse. Éste fue otro descubrimiento que escondieron, aunque por la razón contraria a aquella por la que habían ocultado el dodecaedro.

Esa misma fascinación de los pitagóricos con los números enteros los llevó a hacer notables descubrimientos musicales al subdividir, en segmentos determinados por proporciones enteras, las cuerdas de una lira. Fueron éstos los primeros experimentos con las armonías musicales. Era una prueba más de la armonía universal determinada por los números.

Pitágoras propuso que la Tierra era redonda, con lo que establecía las bases de lo que unos tres siglos después sería el sistema heliocéntrico de Aristarco, según el cual el Sol es el centro del universo, no la Tierra. Pitágoras hizo la propuesta en parte por su admiración a la forma geométrica que llamaba perfecta, pero también, como buen científico, por observación. El mundo griego fue de marinos, y era notoria la manera peculiar en la que desaparecían los barcos en el horizonte: no se iban empequeñeciendo hasta desaparecer, sino que parecían bajar una colina: primero desaparecía el casco bajo las

aguas, luego las velas, y había un último instante en el que sólo era visible la punta más alta de la vela blanca. El fenómeno se repetía, a la inversa con la llegada de un barco: tampoco se iba haciendo visible desde un punto en el horizonte, sino que aparecía primero la punta más alta de la vela, luego lo demás parecía emerger de las aguas. De nuevo, como si saliera tras de una colina. Esa colina era la redondez del mundo. No le costó mucho trabajo a Pitágoras plantear que no podía ser un segmento de esfera, sino una esfera completa.

La idea pitagórica de un mundo perfecto del que éste sólo es reflejo fue recogida, más de cien años después, por Platón, y de Platón pasó a la Iglesia cristiana primitiva. Cuando Galileo descubrió con su pequeño telescopio que la Luna tenía montañas, ya en pleno Renacimiento, hace unos cuantos siglos, el dato causó conmoción porque se encontraba por primera vez un cuerpo celeste que no era perfecto. Resultaba particularmente grave porque Platón había ingresado a la Iglesia por la vía de san Agustín. Así que la perfección de las esferas celestes ya no era un asunto sólo de astronomía, sino de fe.

### Heráclito

Heráclito, nacido en el año 576 antes de Cristo, en Éfeso, poco al norte de Mileto sobre la costa jónica, propone el extremo opuesto al eterno permanecer de Parménides. «Todo cambia», «Nadie se baña dos veces

en el mismo río», la realidad fluye siempre, como fluye un río, y es por tanto siempre nueva. El universo surge por la oposición de contrarios: luz y tinieblas, paz y guerra, justicia e injusticia, comienzo y fin, son todos parejas de contrarios; «es una armonía de tensiones opuestas», lucha de contrarios, pero también es síntesis que une los contrarios como en la esfera se unen el principio y el fin. «La naturaleza ama los contrarios, y es con ellos, y no con los semejantes, como produce la armonía.» En el siglo XIX, Hegel habría de dar nueva forma al pensamiento de Heráclito en la dialéctica. Pocas décadas después de Hegel, Marx y Engels harían de la dialéctica su herramienta de análisis para desmenuzar la economía y la historia. Hoy la física cuántica nos informa que la materia se produce siempre en pares opuestos: una partícula de materia y una de antimateria entran por instantes a la realidad y vuelven a la nada en una danza que llena todo el espacio, aun el más vacío y donde la temperatura sea el cero absoluto. Heráclito dejó de especular sobre la esencia del ser y descubrió que lo único concreto era el devenir, el cambio.

### • Parménides

Parménides es uno de los primeros filósofos de importancia que no son jonios. Nació en Elea, ciudad griega del sur de Italia, la llamada Magna Grecia, en el año 540 antes de Cristo. Es el fundador de la escuela eleática sobre las enseñanzas dejadas por

Xenófanes. En un extenso poema titulado *La naturaleza*, del que han llegado a nosotros tan sólo fragmentos, sostiene que el ser es eterno, inmóvil y sin cambio, perfecto como una esfera indestructible, que los cambios y mutaciones del mundo son mera opinión transmitida por nuestros sentidos. Su discípulo más famoso es sin duda Zenón de Elea, quien, siguiendo la doctrina de su maestro, con la conocida paradoja de Aquiles y la tortuga quiso demostrar que el movimiento no existe. En una carrera a campo traviesa, el veloz Aquiles da una pequeña ventaja a la lenta tortuga. Esa ventaja bastará para que Aquiles jamás la alcance y la tortuga llegue triunfante a la meta. Nos dice Zenón que cada vez que Aquiles llega a donde estaba la tortuga, ésta ya ha avanzado un poco; cuando de nuevo Aquiles llega a ese punto, la tortuga avanzó más, y así hasta el infinito. Otra forma de la paradoja es la siguiente: si disparo una flecha ésta nunca llegará al blanco. El razonamiento es así de impecable: entre el inicio y el final del recorrido hay una recta, formada por puntos sucesivos; siempre entre dos puntos cualesquiera puedo encontrar otro intermedio y dividir así el espacio una y otra vez hasta el infinito. Por lo tanto, los puntos entre el inicio y el final son infinitos y el tiempo requerido para recorrer infinitos puntos será infinito. Si todos vemos que las flechas llegan y los corredores veloces pasan a los lentos, es porque tal es la opinión de nuestros falaces sentidos.

La paradoja no pudo ser resuelta por los matemáticos sino hasta el siglo XIX.

## Anaxágoras

Anaxágoras nació al comenzar el siglo V antes de nuestra era, en el año 499. Fue el primer filósofo que se instaló en Atenas, donde fue maestro de Pericles. En 434 debió abandonar dicha ciudad, acusado de impío, y volvió a Jonia. El sustrato del universo es el *nous*, la inteligencia, la mente, sostuvo Anaxágoras. El *nous* es infinito, puro, único. La mente infinita rige lo que es, lo que fue y lo que será. Postula que los cambios observables en la realidad son el resultado de la agregación y desagregación de elementos; así se anticipó a la teoría atómica moderna por la cual sabemos que los diversos elementos de la naturaleza (hidrógeno, helio, carbono, hierro, oro...) se forman por simple agregación y desagregación de elementos, en este caso de electrones. Dijo que el sol, la luna y las estrellas eran grandes piedras en llamas y en movimiento circular. Fue uno de los primeros en señalar que nuestros sentidos no eran confiables y en consecuencia no podían alcanzar el conocimiento de la verdad, pero admitía que podemos llegar a ella por el conocimiento parcial que nos dan las cosas visibles. Es ésta la gran duda que permeará toda la filosofía hasta nuestros días: ¿cómo podemos comprobar que una afirmación es verdadera? Ésta es la misma pregunta de Hilbert, y ya vimos en el capítulo anterior cuál fue la respuesta de Gödel.

## Protágoras

Protágoras, ya plenamente del siglo V antes de Cristo (pues nació en el año 485), al parecer el primer filósofo en cobrar por sus lecciones, nos dio también la síntesis del humanismo: «El hombre es la medida de todas las cosas: de las existentes que son, y de las inexistentes que no son.» Otro más que, acusado de impiedad, debió abandonar Atenas. Protágoras prepara a Grecia para la llegada de Sócrates.

## Empédocles

La fiebre jónica, para seguirla llamando con la hermosa expresión de Arthur Koestler, en 150 años se extendió por todo el Mediterráneo y llegó a las colonias griegas de Sicilia, donde en el 483, y en Agrigento, nació Empédocles, el médico a quien debemos uno de los primeros experimentos, en el pleno sentido moderno de la expresión. Todos hemos observado que cuando metemos un popote en agua y lo sacamos, sale vacío. Pero si, luego de meterlo, tapamos el orificio superior con el dedo gordo y sacamos el popote, el agua sigue misteriosamente detenida en su interior. Basta con separar el dedo un poco para que el agua caiga. Los niños descubren este comportamiento de los líquidos en sus refrescos y se baten manos y ropa jugando a beber por el extremo inferior de un popote lleno. Si, por el contrario, tapamos con el dedo desde antes de sumergir el popote, el agua no entra. Así demostró Empédocles la existencia del aire, que, por

raro que nos parezca, no era ninguna evidencia. Que existiera y nos rodeara una sustancia material pero invisible, sin olor ni sabor, resultaba una idea descabellada que algunos filósofos habían sostenido sin comprobación. De manera clara, un experimento ahora demostraba que si el agua no entra cuando tapo el extremo superior del tubo y lo sumerjo, es porque algo hay dentro del tubo que lo impide. La respuesta de Empédocles era la correcta y probaba así la existencia del aire. En su experimento, Empédocles no utilizó más que un instrumento de cocina cuyo funcionamiento nadie podía explicar: la *klepsidra*. «Kleptis» significa ladrón; «idra», agua: ladrón de agua. La *klepsidra* es una esfera con perforaciones en el fondo y un tubo en lo alto. Al sumergirla, se llena de agua. Al sacarla con el tubo superior tapado, el agua no cae.

Al aire recién demostrado, Empédocles añadió el agua, el fuego y la tierra para explicar toda la infinita variedad de la naturaleza terrestre y celeste. A él debemos también una idea que Darwin habría suscrito con gusto: dijo que en otras épocas había existido mayor variedad de seres vivientes, pero muchos de éstos «debieron haber sido incapaces de generar y continuar su especie, porque en el caso de todas las especies existentes, la inteligencia, el valor o la rapidez las han protegido y preservado desde los inicios de su existencia». Ésta es exactamente la idea de la selección natural y la adaptación al medio, hoy comprobada miles de veces.

## Demócrito: los átomos y el vacío

Podemos terminar este repaso con Demócrito, aunque haya nacido en el 460 antes de Cristo, diez años después que Sócrates. A Demócrito debemos el concepto y el término «átomo»: propone los átomos como el último elemento de la naturaleza. Son el último porque son ya indivisibles, de allí su nombre: *a-tomo*. La «a» es partícula negativa, como en «afónico», sin voz; «arrítmico», sin ritmo. Y «tomo» viene de «tomé»: corte, como en «tomografía»: imagen en corte. El español ha formado una expresión semejante a partir del latín: «in-dividuo», el no dividido, persona. En griego moderno, «átomo» es persona o individuo. Cuando vaya a Grecia, en el hotel le preguntarán a usted, si va solo: «¿Ena átomo?» No están hablando de física nuclear: le preguntan si desea cuarto para una persona. Por sus posiciones y formas, los átomos de Demócrito dan origen a los cuerpos físicos. El átomo y el vacío son las únicas realidades. Hemos llegado a la perfecta explicación materialista. Átomos y vacío: materia y nada. Sólo eso forma el universo.

## Aristóteles

Con el nacimiento de Sócrates, en el 470, termina la primera etapa de este amanecer de la razón, la fiebre jónica. Un joven discípulo suyo, Platón, formaría a su vez, al llegar a viejo, al hombre al que podemos considerar el primer científico, en el sentido plenamente moderno del término: Aristóteles. Nacido 85 años

después de Sócrates, ya bien adelantado el siglo IV antes de Cristo, en el año 384, Aristóteles estudió la caída de los cuerpos, el movimiento, el espacio, el tiempo, el cambio en las trayectorias de los cuerpos; tamizó barro seco en busca del origen de los sapos y demostró que no los producía el calor del sol, como se afirmaba entonces, sino diminutos huevecillos puestos por animales semejantes, por lo que concluyó que todo animal procedía de otro semejante. Ahora nos parece obvio, pero entonces no lo era. Fundó la lógica, la física, la metafísica, la biología, la estética, la retórica, la moral, la poética, la psicología, la política, la economía, y acabó siendo hasta el padre de la teología cristiana a través de santo Tomás de Aquino. Tanto la Iglesia católica como todas las demás Iglesias cristianas sostienen el concepto aristotélico de «motor inmóvil» como la causa final y eficiente del universo; en otras palabras, Dios.

## La astronomía pitagórica

Los pitagóricos desarrollaron la astronomía hasta un punto sólo comparable al que Copérnico y Kepler redescubrirían 18 siglos después. Si Pitágoras había dicho, siglos antes, que la Tierra era esférica, Filolao fue el primero en plantear que se movía. Giraba, dijo, en torno de un punto del espacio y describía un círculo en 24 horas. Ese movimiento real producía el aparente paso de los astros por el cielo. El sistema poseía complejidades innecesarias, así que otro pitagórico,

alumno de Platón, Heraclides del Ponto, hizo más sencillo el movimiento de la Tierra poniéndola a girar, ya no en torno a un punto externo, sino sobre su propio eje. Eso explicaba los movimientos diarios de los astros, pero no los anuales. Conforme pasan los meses, los grupos de estrellas que llamamos constelaciones cambian en lenta sucesión, hasta que algunas dejan de ser visibles. Sólo permanecen todo el año visibles las constelaciones más cercanas al norte celeste. Luego, las desaparecidas regresan por la misma época del año.

### Los movimientos celestes

No había ninguna explicación para ese movimiento anual del cielo, pero el nuevo sistema de pensamiento prohibía conformarse con alzar los hombros y murmurar que eran cosas de los dioses o la voluntad de un dios único. Debía encontrarse una explicación mecánica, con ruedas, esferas, engranes. Y no sólo para los cambios anuales en las constelaciones visibles, sino para movimientos aun más extraños: los de cinco estrellas brillantes que parecían ir y venir a su antojo entre las estrellas fijas. Una noche estaban entre estas dos estrellas. A la siguiente ya las habían rebasado. Corrían apresuradas un tiempo, luego se detenían en alguna constelación, sólo para emprender una marcha en sentido contrario, hacia estrellas por las que ya habían pasado. Venus era la más caprichosa de todas, pues aumentaba notoriamente de

brillo, como si se aproximara, y luego parecía alejarse. Siempre cercana al sol, una temporada era estrella vespertina y en otra pasaba por enfrente o por atrás del sol y se convertía en lucero de la mañana. Heraclides propuso una solución: las dos estrellas que tenían ese comportamiento, Mercurio y Venus, debían de ser satélites del Sol. Así pues, la Tierra estaba en el centro del universo, con el Sol girando en torno a ella, pero Venus y Mercurio giraban en torno al Sol y luego, siguiéndolo, daban vueltas a la Tierra. Estaba andada la mitad del camino para el sistema heliocéntrico que hoy todos admitimos.

### Aristarco

Fue Aristarco de Samos quien completaría el sistema heliocéntrico. Se cree que nació, significativamente, en el mismo año en que murió Heraclides, el 310 antes de Cristo. La única de sus obras que ha llegado a nosotros no es la más importante. En su obra principal, conocida por referencias de Arquímedes —su contemporáneo y el inventor más prolífico de la antigüedad— sostiene que el Sol, y no la Tierra, es el centro del universo, y que no sólo Mercurio y Venus giran en torno a él, como ya había descubierto Heraclides, sino también los demás planetas: Marte, Júpiter y Saturno, y también la propia Tierra. Una referencia de Plutarco es clara al respecto, asegura Koestler, así que no hay duda alguna en cuanto a que el sistema heliocéntrico fue no sólo propuesto por Aristarco,

sino conocido y difundido. Pero la humanidad habría de olvidarlo durante casi 2 000 años. Ese movimiento anual en torno al Sol explicaba de manera elegante y sencilla tanto el cambio en el aspecto del cielo en una noche de invierno y una de verano, como los extravagantes vagabundeos de las cinco estrellas móviles. Simplemente, al estar la Tierra en diversas posiciones de su órbita anual en torno al Sol, vemos un diferente telón de fondo. Es como correr trazando un círculo: el paisaje frente a nuestros ojos va cambiando, pero al volver al punto de partida es de nuevo el mismo.

### Eratóstenes: la medición del planeta

Llegamos a lo que podría ser el momento más deslumbrante de la ciencia antigua. En el Egipto helenizado nació Eratóstenes. Hacia mediados del siglo III antes de Cristo llegó a ser bibliotecario de la más famosa biblioteca de la historia, la de Alejandría. Allí leyó alguna vez un documento antiguo en el que se anotaba la curiosa observación de que en una ciudad muy al sur llamada Siena había un pozo donde el día más largo del año, y sólo en esa ocasión, el sol se reflejaba en el agua del fondo, pues sus rayos caían perpendiculares a la Tierra. Ese mismo día, cuando el disco solar estaba más alto, los objetos no proyectaban sombra.

Aquello era muy extraño, pues en esa fecha —la del solsticio de verano, bien determinado por todos los pueblos agrícolas y por supuesto un dato constante en los cálculos de Eratóstenes, matemático,

geógrafo, filólogo y astrónomo— en Alejandría los objetos sí proyectan sombra, aunque es la más corta del año entero. La explicación, se dijo el geógrafo, es la superficie terrestre: si fuera plana, no habría diferencia entre las sombras proyectadas por objetos el mismo día y a la misma hora. Si la hay y además aumenta conforme más al norte vamos, es porque se trata de una superficie curva. Imaginemos una pelota de hule con alfileres clavados en ella, todos dirigidos hacia el centro. Al colocarla frente a un foco, los alfileres más cercanos a la fuente de luz no darán sombra; pero ésta será progresivamente larga conforme se alejen del foco.

Eratóstenes mandó medir la distancia entre Alejandría y Siena: era el equivalente de 800 kilómetros actuales. Después clavó dos estacas siguiendo una plomada, una en Alejandría y la otra en Siena. Luego esperó la llegada del siguiente solsticio de verano. Al mediodía, cuando al sur los objetos no proyectaban sombra, midió la sombra en Alejandría. Por una operación geométrica muy sencilla, Eratóstenes podía obtener el valor de una circunferencia con sólo conocer el ángulo proyectado desde el centro y el segmento de arco que subtiende al ángulo. Si las estacas se prolongaban hasta el centro de la Tierra, ¿qué ángulo formarían? Faltaba ese dato, pues el arco ya lo conocía: eran 800 kilómetros. Un teorema de Euclides, el 29 del libro I, demuestra que «una línea recta que corta dos líneas rectas paralelas hace ángulos alternos iguales uno al otro» [véase la figura 10.1].

Euclides había avanzado, para esa prueba, desde el teorema 15, que prueba la igualdad de ángulos opuestos por el vértice [véase la figura 10.2]. Y luego, por los teoremas 27 y 28, demostró el 29.

Eratóstenes tenía sus paralelas, los rayos del Sol, y una línea recta que las corta: la estaca de Alejandría proyectada hasta el centro de la Tierra. De acuerdo con Euclides, bastaba pues con medir el ángulo formado por la estaca de Alejandría y la línea entre su punta y la punta de su sombra para conocer el ángulo formado por ambas estacas en el centro del planeta [véase la figura 10.3].

Eratóstenes realizó la medición de la línea formada por la sombra al caer: eran siete grados. Esto significaba que el ángulo formado por la prolonga-

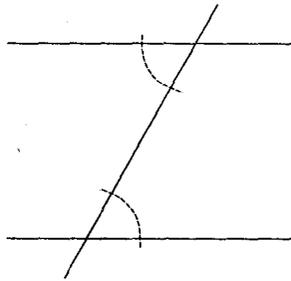


FIGURA 10.1

ción de las estacas hasta el centro de la Tierra era también de siete grados. El círculo completo tiene 360 grados, así que siete grados caben 51 veces en un círculo. Pero esos siete grados de círculo eran 800 kilómetros. Estos 800, multiplicados por 51, son poco más de 40 000 kilómetros: la circunferencia de la Tierra medía 40 000 kilómetros. Ahora sabemos que el resultado es correcto. Por tanto, concluyó, se puede llegar a la India navegando desde España hacia el oeste. La distancia siempre será menor de 40 000 kilómetros.

Así fue como, unos 250 años antes de nuestra era, Eratóstenes midió la circunferencia de nuestro planeta sin otro equipo que dos varas clavadas en ciudades distantes, la medición de sus sombras

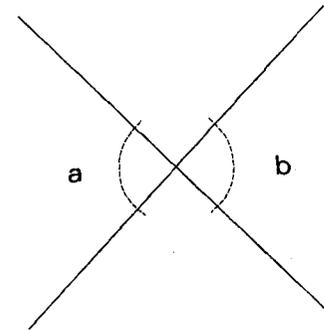


FIGURA 10.2

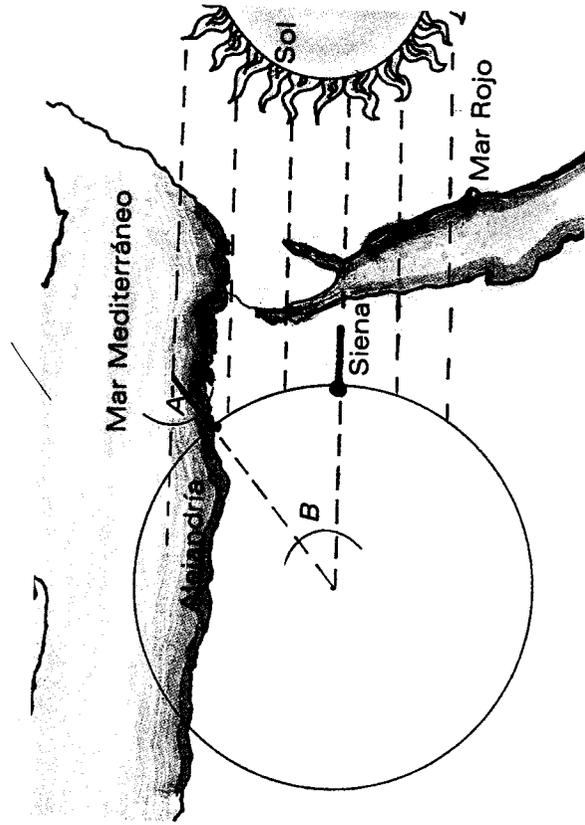


FIGURA 10.3. Los ángulos A y B son iguales porque son alternos entre líneas paralelas (los rayos del sol).

proyectadas en Alejandría y en Siena, del alto Egipto, y, lo más importante, el equipo intelectual de la geometría de Euclides. Éste es uno de los más bellos momentos del pensamiento humano y no existe nada comparable en otras regiones. No porque hayan sido habitadas por pueblos más tontos, sino porque nunca abandonaron las explicaciones religiosas.

Alejandría se convirtió en el centro del mundo mediterráneo. Hacia el año 128 antes de Cristo, Hiparco de Nicea descubrió y calculó la precesión de los equinoccios y su ciclo de 26 000 años; propuso que las estrellas fijas también se desplazan aunque no alcance una vida humana para comprobarlo, y que acaban muriendo. Fue también el primero en catalogar las magnitudes de las estrellas.

Además de Eratóstenes e Hiparco, en Alejandría trabajaron Euclides, construyendo el edificio de su geometría, en la que se formarían Kepler, Newton y Einstein; Dionisio de Tracia, quien hizo por el lenguaje lo que Euclides por la geometría, según recuerda Sagan en *Cosmos*; Herófilo, el fisiólogo que demostró que el cerebro era la sede de la inteligencia; Herón de Alejandría, autor de la obra denominada *Autómata*, donde por primera vez se habla de robots, e inventor de aparatos movidos por vapor y engranes; Apolonio de Perga, el matemático que estudió las secciones cónicas (elipse, parábola e hipérbola); Arquímedes, el mayor genio inventor de la antigüedad, y descubridor del principio por el que un barco de acero flota.

600 años después, hacia el 400 ya de nuestra era, cayó el telón sobre la prodigiosa fiebre de conocimiento despertada en Jonia. Había durado mil años. Habrían de pasar otros mil años, éstos de silencio en el ámbito de la razón, hasta el Renacimiento italiano, para que volviéramos al punto donde nos habíamos quedado. Un largo milenio de paréntesis.

### El amanecer egeo

Cuando los filósofos de la antigua Jonia se dieron a la sorprendente labor de querer explicar el mundo por el fuego, el aire, la tierra, el agua o los números, dio inicio el amanecer de la razón humana. Los dioses o un dios único podían seguir existiendo, pero las causas de los fenómenos naturales estaban en la naturaleza. Zeus lanzando rayos por su furia estaba bien como explicación para el hombre inculto; el sabio, el filósofo, debía encontrar una explicación natural. Así nació ese intento de responder las grandes preguntas al que ahora llamamos ciencia, aunque los antiguos lo llamaron simplemente filosofía, amistad con la sabiduría. No era algo que necesitáramos para comer, pues para ello nos bastaba el saber cómo y cuándo las divinidades de cada pueblo hacían las cosas. Pero llenó otra necesidad tan imperiosa como el hambre: la de conocer las explicaciones últimas de las cosas por métodos de pensamiento que cualquiera pudiese seguir. Para aceptar como explicación de los rayos a Zeus era indispensable creer en él y por lo tanto ser

griego. Para atribuirlos al castigo del dios único que había prometido enviar a su hijo a redimir el mundo era preciso ser parte del pueblo de Israel. En cambio, cualquiera podía seguir las explicaciones de Aristóteles acerca de los huevos de rana que incuban en el lodo tibio. Por encima de las creencias religiosas de cada lector se abría paso el método de Aristóteles buscando causas naturales a los efectos observados. Por eso se lo llama el Filósofo, con mayúscula, y fue fundamento de la ciencia árabe y lectura obligada en la Iglesia de Cristo desde santo Tomás de Aquino. Aristóteles, como después Galileo, Newton o Pasteur, puede ser seguido hasta sus menores detalles por el budista, el cristiano o quien no tenga creencias religiosas.

Y con toda la grandeza de Aristóteles, el paso más formidable en la independencia del pensamiento científico respecto de las preguntas cotidianas que le dan origen es quizá el que dio Euclides. Es verdad que los seres humanos, con la invención de la agricultura y la posesión privada de terrenos, necesitaron técnicas de medición: geometría, en una palabra. Pero la axiomatización creada por Euclides para levantar la geometría paso a paso, teorema por teorema, rebasa con mucho el afán de encausar polémicas entre vecinos con terrenos colindantes: la geometría de Euclides es una catedral fulgurante del pensamiento abstracto. Ya no importa si Euclides nos enseñó a medir terrenos; nos enseñó a pensar.

La semilla griega, cuidada por los árabes tras la caída del imperio romano y del mundo clásico, ger-

minó en la época que, por eso mismo, llamamos Renacimiento. Inicialmente en Italia; luego, cuando la libertad de pensar y opinar trajo la gran escisión religiosa del protestantismo, la ciencia salió del mundo mediterráneo en busca de tolerancia. La encontró en países del norte que se habían ido sumando al protestantismo. Copérnico, Kepler y Galileo eran editados en la Holanda protestante y sus libros introducidos de manera subrepticia a los países católicos, donde estuvieron prohibidos hasta el siglo XIX. Por tal razón, en 200 años la producción científica pasó de Italia y el mundo mediterráneo a Inglaterra, Holanda, Alemania y dondequiera que se pudiera decir, sin arriesgarse a la tortura y la muerte, que la Tierra gira alrededor del Sol y no a la inversa.

La ciencia y la libertad de comercio produjeron, hace apenas tres siglos, la revolución industrial. Esta nueva manera de fabricar mercancías, basada en técnicas como la caldera de vapor, surgidas al descubrir leyes naturales, orden bajo el caos de las apariencias, trajo riqueza y el mundo quedó dividido como ahora lo vemos: entre los países que continúan la tradición jónica de interrogar a la naturaleza, y los que debemos comprar lo que en aquéllos se produce. La actual tolerancia hacia el pensamiento científico en los países sin esa tradición ha llegado demasiado tarde: no es siquiera la tortuga la que lleva ventaja, sino el veloz Aquiles, y somos nosotros quienes debemos alcanzarlo.

## Bibliografía

- ANTIA, MEHER, «Quanta», *The Sciences*, vol. 39, no. 3, mayo/junio de 1999.
- AQUINO, TOMÁS DE, *Summa Theologica*, Chicago: Great Books of the Western World, vol. 19, 1952 [varias versiones en castellano].
- ARISTÓTELES, *Physics*, Chicago: Great Books of the Western World, vol. 8, 1952 [varias versiones en castellano].
- BOHR, NIELS, «El espectro del hidrógeno», en F. R. Moulton y J. J. Schifferes (comps.), *Autobiografía de la ciencia*.
- CALAPRICE, A. (comp.) *Einstein entre comillas*, Barcelona: Norma, 1997.
- CLARK, R. W., *Einstein. The Life and Times*, Nueva York: Avon, 1972.
- DE BROGLIE, LOUIS, «Mecánica ondulatoria: los aspectos ondulatorios del electrón», en F. R. Moulton y J. J. Schifferes (comps.), *Autobiografía de la ciencia*.
- DIRAC, P. A. M., *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford: Oxford Science Publications, 1996 (1ª ed.: 1930).
- DUNCAN, R., y M. WESTON-SMITH, *La enciclopedia de la ignorancia*, México: Fondo de Cultura Económica, 1985.
- EDDINGTON, ARTHUR S., «The Decline of Determinism», en M. Gardner, *Great Essays in Science*.

- EINSTEIN, ALBERT, *La relatividad*, México: Grijalbo, 1982.
- , *Einstein entre comillas*, Barcelona: Norma, 1997.
- , *Ideas and Opinions*, Nueva York: Three Rivers Press, 1982.
- , «On the Generalized Theory of Gravitation», *Scientific American*, número especial, 1991.
- , « $E=mc^2$ », en M. Gardner, *Great Essays in Science*, Amherst: Prometheus Books, 1994.
- , «Exposición popular escrita por el mismo autor de la teoría», en F. R. Moulton y J. J. Schifferes (comps.), *Autobiografía de la ciencia. Encyclopædia Britannica*, varias entradas.
- ENGELS, FEDERICO, *Dialéctica de la naturaleza*, México: Grijalbo, 1961.
- FARADAY, MICHAEL, «Diario de Faraday», en F. R. Moulton y J. J. Schifferes (comps.), *Autobiografía de la ciencia*.
- FELDMAN, G., y J. STEINBERG, «The Number of Families of Matter», *Scientific American*, febrero de 1991.
- FEYNMAN, RICHARD P., «Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics», *Physical Review*, vol. 76, no. 3, 15 de septiembre de 1949.
- , *Six Easy Pieces*, Reading, Mass.: Perseus Books, 1963.
- , *Six Not-So-Easy Pieces*, Reading, Mass.: Perseus Books, 1963.
- FINKELSTEIN, D., «The Quantum Paradox», *Science and the Future 1987*, Chicago: Encyclopædia Britannica, 1986.
- FORWARD, R. L., y J. DAVIS, *Explorando el mundo de la antimateria*, Barcelona: Gedisa, 1990.
- FURUSAWA, A., y otros, «Unconditional Quantum Teleportation», *Science*, 23 de octubre de 1998.
- GARDNER, MARTIN, *Great Essays in Science*, Amherst: Prometheus Books, 1994.

- GARUCCIO, A., «Parametric Downconversion Photon Sources, Beam Splitters, and Bell's Inequality», en *Fundamental Problems in Quantum Theory*, Nueva York: Annals of The New York Academy of Sciences, vol. 755, 1995.
- GLANZ, J., «Will the Higgs Particle Make an Early Entrance?», *Science*, 25 de junio de 1999.
- GELL-MAN, MURRAY, *The Quark and the Jaguar*, Nueva York: Freeman, 1994.
- GREENE, BRIAN, *The Elegant Universe*, Nueva York: Norton, 1999.
- GREENEBERGER, DANIEL M., «Two-Particles versus Three-Particle EPR Experiments», en *Fundamental Problems in Quantum Theory*, Nueva York: Annals of the New York Academy of Sciences, vol. 755, 1995.
- GREENEBERGER, DANIEL M., y ANTON ZEILINGER (comps.), *Fundamental Problems in Quantum Theory: A Conference Held in Honor of Professor John A. Wheeler*, Nueva York: Annals of the New York Academy of Sciences, vol. 755, 1995.
- GRIBBIN, JOHN, *In Search of Schrödinger's Cat*, Nueva York: Bantam Books, 1984.
- HASCH, B., ALFONSO RUEDA y H. E. PUTHOFF, «Beyond  $E=mc^2$ », *The Sciences*, noviembre/diciembre de 1994.
- HARDY, LUCIEN, «The EPR Argument of Nonlocality without Inequalities for a Single Photon», en *Fundamental Problems in Quantum Theory*, Nueva York: Annals of The New York Academy of Sciences, vol. 755, 1995.
- HAWKING, STEPHEN, *Historia del tiempo*, México: Crítica, 1988.
- HAWKING, STEPHEN, y ROGER PENROSE, *The Nature of Space and Time*, Princeton: Princeton University Press, 1996.

- HEISENBERG, W., *La imagen de la naturaleza en la física actual*, Barcelona: Orbis, 1985.
- , «El principio de incertidumbre», en F. R. Moulton y J. J. Schifferes (comps.), *Autobiografía de la ciencia*.
- HORGAN, JOHN, «Quantum Philosophy», *Scientific American*, julio de 1992.
- , *El fin de la ciencia*, Barcelona: Paidós, 1998.
- HOVIS, R. C., y HELGE KRAGH, «P. A. M. Dirac and the Beauty of Physics», *Scientific American*, mayo de 1993.
- JEANS, JAMES, *Physics and Philosophy*, Nueva York: Dover, 1981 (1ª ed.: 1943).
- JOHNSON, GEORGE, *Fire in the Mind*, Nueva York: Knopf, 1996.
- KAFATOS, M., y ROBERT NADEAU, *The Conscious Universe*, Nueva York: Springer, 1990.
- KIESS, T. E., «Three-Particle Bell Inequalities», en *Fundamental Problems in Quantum Theory*, Nueva York: Annals of the New York Academy of Sciences, vol. 755, 1995.
- KOESTLER, ARTHUR, *Los sonámbulos*, México: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 1981.
- KWIAT, PAUL, HARALD WEINFURTER y ANTON ZEINLINGER, «Quantum Seeing in the Dark», *Scientific American*, noviembre de 1996.
- LEDERMAN, L., y D. TERESI, *The God Particle*, Nueva York: Delta, 1993.
- MANDEL, L., «Two-Photon Downconversion Experiments», en *Fundamental Problems in Quantum Theory*, Nueva York: Annals of the New York Academy of Sciences, vol. 755, 1995.
- MARCH, R. S., *Física para poetas*, México: Siglo XXI, 1977.
- MARSCHALL, L., «Null and Void», *The Sciences*, mayo/junio de 1999.

- MAXWELL, JAMES C., «Teoría dinámica del campo electromagnético», en F. R. Moulton y J. J. Schifferes (comps.), *Autobiografía de la ciencia*.
- MERMIN, N. D., «The Best Version of Bell's Theorem», en *Fundamental Problems in Quantum Theory*, Nueva York: Annals of the New York Academy of Sciences, vol. 755, 1995.
- MOULTON, F. R., y JUSTUS J. SCHIFFERES (comps.), *Autobiografía de la ciencia*, México: Fondo de Cultura Económica, 1986.
- NAGEL, E., y JAMES R. NEWMAN, *El teorema de Gödel*, México: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 1981.
- ORTOLI, S., y J.-P. PHARABOND, *El cántico de la cuántica*, Barcelona: Gedisa, 1985.
- PAULI, WOLFGANG, *Theory of Relativity*, Nueva York: Dover, 1981 (1ª ed.: 1958).
- PENROSE, ROGER, *La mente nueva del emperador*, México: Fondo de Cultura Económica, 1996.
- , *The Large, the Small and the Human Mind*, Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- PLANCK, MAX, «El origen y el desarrollo de la teoría del "quantum"», en F. R. Moulton y J. J. Schifferes (comps.), *Autobiografía de la ciencia*.
- , *The Theory of Heat Radiation*, Nueva York: Dover, 1991 (1ª ed.: 1913).
- POINCARÉ, J. H., «La creación matemática», en F. R. Moulton y J. J. Schifferes (comps.), *Autobiografía de la ciencia*.
- POLKINGHORNE, J., «Heavy Meta», *Scientific American*, noviembre de 1996.
- , *The Quantum World*, Princeton: Princeton University Press, 1989.
- REES, M., *Just Six Numbers*, Nueva York: Basic Books, 2000.

- RITH, K., y ANDREAS SCHÄFER, «The Mystery of Nucleon Spin», *Scientific American*, julio de 1999.
- RUTHERFORD, ERNEST, «La estructura eléctrica de la materia», en F. R. Moulton y J. J. Schifferes (comps.), *Autobiografía de la ciencia*.
- SAGAN, CARL, *Cosmos*, México: Planeta, 1985.
- , «Can We Know the Universe? Reflections on a Grain of Salt», en M. Gardner, *Great Essays in Science*, Amherst: Prometheus Books, 1994.
- , *Billions & Billions*, Nueva York: Ballantine Books, 1998.
- SCHRÖDINGER, ERWIN, *Mi concepción del mundo*, Barcelona: Tusquets, 1988.
- , «What is Matter?» *Scientific American*, número especial, 1991.
- , «La idea fundamental de la mecánica ondulatoria», en F. R. Moulton y J. J. Schifferes (comps.), *Autobiografía de la ciencia*.
- SEIFE, C., «The Subtle Pull of Emptiness», *Science*, 10 de enero de 1997.
- SHIH, Y., A. SERGIENKO, T. PITTMAN y H. RUBIN, «EPR and Two-Photon Interference Experiments Using Type-II Parametric Downconversion», en *Fundamental Problems in Quantum Theory*, Nueva York: Annals of the New York Academy of Sciences, vol. 755, 1995.
- SMITH, T. P., «Worlds within Worlds», *The Sciences*, julio/agosto de 1996.
- TAUBES, G., «Atomic Mouse Probes the Lifetime of a Quantum Cat», *Science*, 6 de diciembre de 1996.
- THOMSON, JOSEPH JOHN, «El descubrimiento del electrón», en F. R. Moulton y J. J. Schifferes (comps.), *Autobiografía de la ciencia*.
- VON BAEYER, HANS CHRISTIAN, «Tiny Doubles», *The Sciences*, vol. 37, no. 5, septiembre/octubre de 1997.

- , «Desperately Seeking SUSY», *The Sciences*, vol. 38, no. 5, septiembre/octubre de 1998.
- VOSS, D., «Making the Stuff of the Big Bang», *Science*, 20 de agosto de 1999.
- WATSON, A., «“Eraser” Rubs Out Information to Reveal Light’s Dual Nature», *Science*, 10 de noviembre de 1995.
- , «Quantum Spookiness Wins, Einstein loses in Photon Test», *Science*, 25 julio de 1997.
- WEINBERG, STEVEN, «Unified Theories of Elementary Particle Interaction», *Scientific American*, número especial, 1991.
- , *The Discovery of Subatomic Particles*, Nueva York: Scientific American Books, 1983.
- , «A Unified Physics by 2050?», *Scientific American*, diciembre de 1999.
- WHEELER, JOHN A., *A Journey into Gravity and Spacetime*, Nueva York: Scientific American Books, 1990.
- YOURGRAU, PALLE, *Gödel Meets Einstein*, Chicago: Open Court, 1999.
- ZAJONC, ARTHUR, *Atrapando la luz*, Barcelona: Andrés Bello, 1996.

Luis González de Alba

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

Este libro hace una amena y esclarecedora narración de la aventura seguida por la física en los últimos cien años. Está dedicado a jóvenes que piensan elegir carrera profesional y a quienes se preguntan qué es el mundo y de qué está hecha la materia, por qué es tan famoso Einstein, qué preguntas se plantean los físicos. Escrito como una conversación y evitando al máximo el lenguaje técnico, intenta mostrar que ésta, la ciencia más «dura», plantea mayores portentos y más extraordinarios prodigios que los pregonados por las creencias esotéricas de todo tipo que hoy nos invaden.

Luis González de Alba (1944) escribió su primera novela, *Los días y los años*, en la cárcel de Lecumberri, donde se encontraba por haber sido dirigente del movimiento estudiantil de 1968 en México. Desde entonces ha publicado cuento, poesía, ensayo y otras novelas, pero su predilección es la divulgación científica (obtuvo en 1997 el primer Premio Nacional de Periodismo por su trabajo en esa materia). Toda su vida se ha arrepentido de no haber seguido la carrera de Física o la de Astronomía.

ISBN 968-853-452-8



9 789688 534526

67601