

De la filosofía natural al enigma de la materia oscura

LA HISTORIA DE LA FÍSICA

Anne Rooney

Grupo Editorial Tomo, S.A. de C.V.,
Nicolás San Juan 1043,
03100, México, D.F.

1a. edición, julio 2013.

The Story of Physics
Anne Rooney
Copyright © 2011 Arcturus Publishing Limited
26/27 Bickels Yard, 151-153 Bermondsey Street,
London SE1 3HA

© 2013, Grupo Editorial Tomo, S.A. de C.V.
Nicolás San Juan 1043, Col. Del Valle
03100 México, D.F.
Tels. 5575-6615, 5575-8701 y 5575-0186
Fax. 5575-6695
http://www.grupotomo.com.mx
ISBN-13: 978-607-415-473-3
Miembro de la Cámara Nacional
de la Industria Editorial No. 2961

Traducción: Luigi Freda Eslava
Diseño de portada: Karla Silva
Formación Tipográfica: Armando Hernández R.
Supervisor de producción: Leonardo Figueroa

Derechos reservados conforme a la ley.
Ninguna parte de esta publicación podrá ser reproducida o transmitida en cualquier forma, o por cualquier medio electrónico o mecánico, incluyendo fotocopiado, audio, etc., sin autorización por escrito del editor titular del Copyright.

Este libro se publicó conforme al contrato establecido entre *Arcturus Publishing Limited* y *Grupo Editorial Tomo, S.A. de C.V.*

Impreso en México - *Printed in Mexico*

Contenido

Introducción: El libro del Universo 6

Capítulo 1 **Mente sobre materia 14**
¿El primer físico? • Materia atómica y elemental • El nacimiento de la física del estado sólido • Átomos y elementos

Capítulo 2 **Hacer que la luz trabaje: Óptica 36**
Un primer vistazo a la luz • Salir de la oscuridad • Frentes de onda y cuantos • Un nuevo amanecer: Radiación electromagnética • A la velocidad de la luz

Capítulo 3 **Masa en movimiento: Mecánica 64**
Mecánica en acción • El problema de la dinámica • El verdadero nacimiento de la mecánica clásica • Aire y agua • Poner la mecánica a trabajar

Capítulo 4 **Campos y fuerzas de energía 86**
La conservación de la energía • Termodinámica • Calor y luz • Descubrimiento de la electricidad • Electromagnetismo: La unión de la electricidad y el magnetismo • Más ondas

Capítulo 5 **Dentro del átomo 116**
Disección del átomo • Solaz cuántico • Todo se hace pedazos • El final del átomo clásico

Capítulo 6 **Alcanzar las estrellas 148**
Estrellas y piedras • De observar a pensar • La tierra se mueve... de nuevo • Lo invisible se hace visible • Galileo, amo del Universo • Catalogar los cielos • Lejos, muy lejos • La vida secreta de las estrellas

Capítulo 7 **Continuación del tiempo-espacio 192**
Breve historia del tiempo • Todo es relativo • De vuelta al principio • Del huevo cósmico al Big Bang

Capítulo 8 **Física para el futuro 208**
Despedazarlo y comenzar de nuevo • ¿Qué sigue para la materia?

Índice 218

Créditos por las fotografías 222

El libro del Universo

"No se puede comprender el libro del Universo a menos que primero uno aprenda a comprender el alfabeto en que está compuesto. Está escrito en el lenguaje de las matemáticas, y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es humanamente imposible comprender una sola palabra de él; sin ellos, uno vaga en un laberinto oscuro".

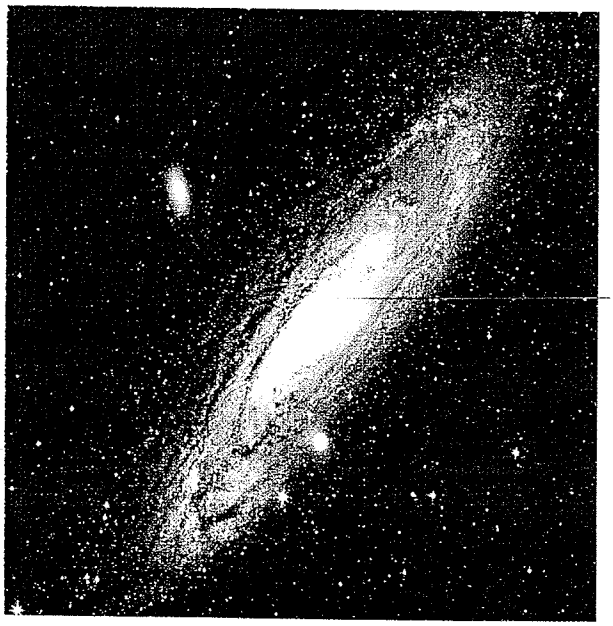
Galileo, *El ensayador*; 1623

La física es la ciencia fundamental que forma la base de todas las demás, la herramienta con que exploramos la realidad; su objetivo es de explicar cómo funciona el universo, de las galaxias a las partículas subatómicas. Muchos de nuestros descubrimientos sobre el universo físico representan el pináculo de los logros humanos. La historia de la física sigue la pista al camino de los intentos de la humanidad por leer el libro del universo, aprendiendo y empleando el lenguaje de las matemáticas que describe el científico del Renacimiento Galileo Galilei (1564-1642). También revela lo poco que todavía sabemos, pues toda la física que conocemos aborda sólo el 4 por ciento del universo, el otro 96 por ciento es un misterio que todavía se tiene que aclarar.

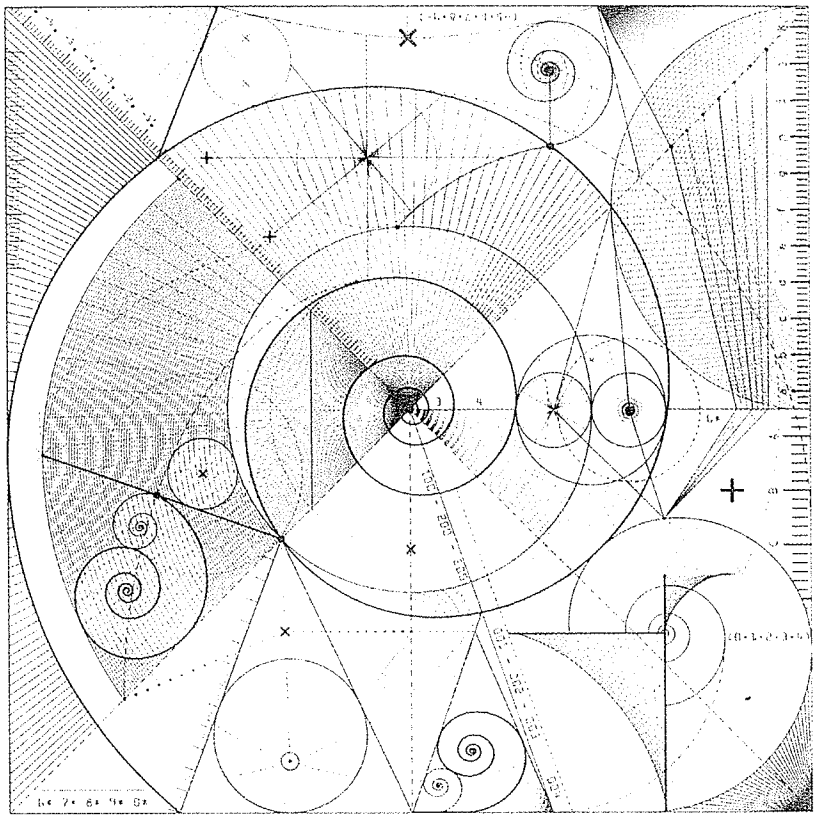
El nacimiento de la física

Antes del desarrollo del método experimental, los primeros científicos, o "Filósofos naturales", como se les conocía, aplicaron la razón a lo que veían a su alrededor y presentaron teorías para explicarlo. Por ejemplo, como los cuerpos celestiales parecen moverse a través del espacio, muchos de nuestros antepasados llegaron a la conclusión de que la Tierra era el centro del Universo y que todo giraba a su alrededor.

Los pocos que pensaban de manera diferente tuvieron que presentar buenos



La galaxia de Andrómeda es la galaxia más cercana a nuestra Vía Láctea: La física trata de explicar todo, desde el principio del tiempo hasta el final del Universo.



Los diseños, formas y números que construyen el mundo natural son asunto de la física.

argumentos para refutar la solución del sentido común, y por 2000 años los superaron en número y a veces los ridiculizaron o incluso los persiguieron.

Muchas creencias supersticiosas y religiosas tienen sus raíces en la explicación de la observación del mundo. Por ejemplo, el sol se levanta porque lo impulsa por el cielo un auriga sobrenatural. Por otro lado, la ciencia se encarga de encontrar la naturaleza real y las causas de los fenómenos observados. Los antiguos griegos fueron el primer pueblo del que sabemos que intentó remplazar las explicaciones místicas y supersticiosas con otras basadas en la observación y la razón. La primera persona en tratar de explicar el mundo natural sin recurrir a la creencia religiosa bien pudo haber sido Tales, pero el primer científico verdadero tal vez fue el pensador griego Aristóteles (384-322 a.C.), un empirista meticuloso. Creía que mediante la observación cuidadosa y las mediciones podía lograr la comprensión de las leyes que rigen todas las

Tales de Mileto (*aprox.* 624 a.C. - *aprox.* 546 a.C.)

El primer individuo reconocido como científico y filósofo vivió hace más de 2500 años en lo que ahora es Turquía. Tales estudió en Egipto y se le atribuye haber llevado las matemáticas y la astronomía a Grecia. Considerado uno de los Siete Sabios de la antigua Grecia, tenía la reputación de ser extraordinariamente inteligente y de tal vez haber enseñado a los filósofos Pitágoras y Anaximandro. Tales sugirió que existe una causa física más que sobrenatural para todos los fenómenos del mundo a nuestro alrededor, y así empezó una búsqueda de las causas físicas que determinan cómo se comportan las cosas. Como no sobrevive ninguno de sus escritos, es difícil valorar su verdadera contribución.

cosas. Aristóteles fue pupilo de Platón (*aprox.* 428-347 a.C.), quien seguía un camino deductivo (ver cuadro de la siguiente página), y creía que la razón sola era suficiente para permitir a la humanidad desentrañar los misterios del Universo. Aristóteles puso su fe en el "razonamiento inductivo", es decir, la lógica que trabajaba a partir de la observación del mundo. Tenía los principios del método científico.

Razonamiento inductivo y deductivo

El razonamiento deductivo es un método que parte de un aspecto general, que se ilustra con el enfoque de Platón. El científico o filósofo crea una teoría, desarrolla una hipótesis para ponerla a prueba, hace observaciones y llega a la confirmación (o refutación) de la hipótesis. El razonamiento inductivo empieza con la observación del mundo y avanza hacia una explicación que le permita identificar un modelo, luego proponer una hipótesis para explicarlo y avanzar a una teoría general. Los métodos de Aristóteles eran inductivos. El científico Isaac Newton (1642-1727) fue uno de los primeros en reconocer que los razonamientos deductivo e inductivo tenían un lugar en el pensamiento científico.

Aunque no propuso experimentos, Aristóteles abogaba por una investigación completa de todo lo escrito previamente de un tema (en términos modernos, una revisión de la literatura), observación experimental y mediciones; luego, la aplicación de la razón para llegar a una conclusión.

Los griegos fueron los primeros en dividir la ciencia en diferentes disciplinas. La gran biblioteca de Alejandría produjo el primer catálogo de biblioteca, el cual era esencial para el tipo de revisión de la literatura que proponía Aristóteles como parte de cualquier investigación.

Del empirismo al experimento

Con el final de la era helenística (la cumbre de la civilización griega clásica), decayó el uso del método científico para comprender el mundo natural hasta el surgimiento de la ciencia árabe en el siglo VII d.C. El brillante Ibn Al-Hassan Ibn Al-Haytham (965-1039) elaboró un procedimiento similar al método experimental moderno. Empezó con el planteamiento de un problema, luego ponía a prueba su hipótesis mediante experimentos, interpretaba los datos y llegaba a una conclusión. Adoptó una actitud escéptica e inquisitiva, y reconoció la necesidad de un sistema de mediciones e investigación controlado con rigurosidad. Otros científicos árabes contribuyeron a esto. Abu Rayhan Al-Biruni (973-1048) se dio cuenta de que se podían introducir errores e información sesgada por el uso de instrumentos imperfectos u observadores falibles. Recomendó que los experimentos se debían repetir varias veces y combinar los resultados para obtener una conclusión confiable. El médico Al-Rahwi (851-



Ilustración medieval de Tales.



"Prefiero encontrar la causa verdadera de un hecho que convertirme en rey de los persas".

Demócrito (*aprox.* 450 - *aprox.* 370 a.C.), filósofo

934) introdujo el concepto de revisión por iguales, sugiriendo que los médicos debían documentar sus procedimientos y ponerlos a disposición de otros médicos del mismo prestigio, aunque su principal motivación era evitar el castigo por negligencia. Geber (Abu Jabir, 721-815) fue el primero en introducir los experimentos controlados en el campo de la química, y Avicena (Ibn Sina, *aprox.* 980-1037) declaró que la inducción y la experimentación debían ser las bases de la deducción. Los científicos árabes valoraban el consenso y tendían a eliminar las ideas alternativas que no tenían el apoyo de otros.

Sin embargo, los avances del Islam al final obstaculizaron las actividades de los científicos árabes. Cuestionar al mundo llegó a considerarse como una actividad blasfema, como si fueran a entrometerse en los caminos de Dios y se trataran de violar misterios sagrados. Se restringieron las actividades que un científico musulmán fiel (o prudente) podía realizar. Entonces los eruditos medievales de la Europa cristiana recogieron la antorcha de la labor científica que arrojaron los filósofos naturales del Islam.

La ciencia árabe y las obras de Aristóteles llegaron a Europa en traducciones latinas a principios de la Edad Media. Los escritores del periodo del Renacimiento del siglo XII empezaron a integrar el método científico embrionario con sus propios estudios y a nutrirlo, pero al principio no desafió a las autoridades clásicas. El fraile franciscano inglés Roger Bacon (*aprox.* 1210 - *aprox.* 1292) fue uno de los primeros en dudar de la aceptación incondicional de los escritos de los antiguos, y recomendó un examen renovado de las ideas arraigadas. En particular se centró en Aristóteles, cuyas ideas en muchos campos se aceptaban como la verdad evangélica, y recomendó que se pusieran a prueba sus conclusiones. Sin duda, Aristóteles hubiera aprobado la aplicación de métodos empíricos para revaluar y cuestionar sus escritos. En sus propias investigaciones científicas, Bacon seguía un modelo que consistía en formar una hipótesis basada en observaciones, luego en

El método científico

El método científico, como se emplea por lo general en la actualidad, sigue estas etapas:

- Plantamiento de un problema. Luego se puede limitar a algo que se pueda enfrentar con un experimento o conjunto de experimentos.
- Planteamiento de una hipótesis.
- Diseño de un experimento para poner a prueba la hipótesis. El experimento debe ser una prueba justa, con variables controladas (que se mantienen iguales) y una variable independiente (la condición que se va a variar).
- Llevar a cabo el experimento, haciendo y registrando las observaciones y mediciones.
- Análisis de los datos.
- Plantear las conclusiones y someterlas a la evaluación de otros especialistas.

llevar a cabo un experimento para poner a prueba la hipótesis. Repetía sus experimentos para asegurarse de los resultados, y documentaba sus métodos con meticulosidad, de manera que los pudieran examinar otros científicos. Nombró a la experimentación la "vejación de la naturaleza". Dijo: "Aprendemos más mediante la vejación ingeniosa de la naturaleza que mediante la observación paciente".

Otro Bacon, el abogado y filósofo inglés Francis Bacon (1561-1626), propuso un nuevo enfoque para la ciencia, el cual publicó en 1621 en *Novum Organum Scientiarum (El nuevo Órganon de las ciencias)*. Creía que los resultados de los experimentos podían ayudar a desentrañar teorías contradictorias y ayudar a la humanidad a avanzar hacia la verdad. Promovió el razonamiento inductivo como base del pensamiento científico. Bacon propuso un proceso de observación, experimentación, análisis y razonamiento inductivo que a menudo se considera el inicio del método científico moderno. Su método empieza con un aspecto negativo, liberar la mente de "ídolos" o nociones recibidas, y avanza a un aspecto positivo que implica exploración, experimentación e inducción.

La revolución científica

Aunque Bacon fue el primero en formular el método, Galileo ya había adoptado un enfoque similar a la experimentación. Fue un gran partidario del razonamiento inductivo, dándose cuenta de que la evidencia empírica de un mundo complejo nunca se compararía a la pureza de la teoría. Razonó que no es posible tomar en cuenta todas las variables en un experimento. Por ejemplo, creía que sus experimentos con la gravedad nunca eliminarían los efectos del arrastre o fricción del aire. Sin embargo, estandarizar los métodos y las mediciones significa que un experimento que se lleva a cabo repetidas veces, tal vez por diferentes personas, puede producir un conjunto de resultados de los que se pueden extrapolar conclusiones. Galileo tenía suficiente fe en el método experimental como para arriesgar su reputación, así que realizó una demostración pública para resolver una discusión en 1611. Él y un profesor rival de Pisa habían discutido respecto a si la forma de objetos del mismo material (y de la misma densidad) afectaba su capacidad para flotar en el agua. Galileo desafió al profesor a una demostración pública, diciendo que se atendría a los resultados del experimento; el otro profesor no se presentó.

Se dice que Bacon murió después de realizar un experimento para producir los primeros pollos congelados en 1626:

"Mientras [sir Francis Bacon] tomaba el aire en un carruaje con el doctor Witherborne (un médico) dirigiéndose a Highgate, había nieve en el suelo, y a mi señor se le ocurrió que por qué la carne no se podía conservar en nieve, como en la sal. Decidieron que realizarían el experimento de inmediato. Descendieron del carruaje y fueron a la casa de una mujer pobre en la base de la colina Highgate, compraron una gallina e hicieron que la mujer la limpiara; luego llenaron el cuerpo con nieve y mi señor ayudó en hacerlo todo. La nieve lo enfrió tanto, que de inmediato cayó muy enfermo, [le dio] un resfriado tan fuerte que en dos o tres días, según recuerdo que me contó el señor Hubbes, murió de sofocación".

John Aubrey, *Vidas breves*

Sociedades científicas

El creciente interés en la ciencia dio a luz a sociedades científicas que surgieron por toda Europa desde el siglo XVII. Proporcionaron un centro de atención para conversación, experimentación y desarrollo científicos. Federico Cesi, florentino adinerado con un fuerte interés en la ciencia, fundó la primera sociedad científica, la Academia Linceana (Accademia dei Lincei). Aunque sólo tenía 18 años de edad, Cesi creía que los científicos debían estudiar directamente la naturaleza, en lugar de confiar en la filosofía aristotélica como su guía. Los primeros miembros de la academia vivieron en comunidad en la casa de Cesi, donde les proporcionó libros y un laboratorio bien equipado. Entre los miembros estaban el médico holandés Johannes Eck (1579-1630), el erudito italiano Giambattista della Porta (*aprox.* 1535-1615) y, el más famoso, Galileo. En su mejor momento, la academia tuvo 32 miembros diseminados por toda Europa. La academia expuso sus metas en 1605 como "adquirir conocimiento de las cosas y sabiduría, y exhibirla ante los hombres sin perjuicio alguno". A pesar de esto, acusaron al grupo de practicar magia negra, de oponerse a la doctrina de la iglesia y de vivir en forma escandalosa.

Los linceanos fueron una sociedad muy privada, y cuando Cesi murió en 1630 pronto fracasaron. La sucedió la Academia de Experimentos, en Florencia, fundada en 1657 por dos antiguos pupilos de Galileo, Evangelista Torricelli (1608-1647) y Vincenzo Viviani (1622-1703). También duró poco; cerró después de diez años, en 1667 más o menos, en el momento en que el centro del desarrollo científico pasó de Italia a Inglaterra, Francia, Alemania, Bélgica y Países Bajos.

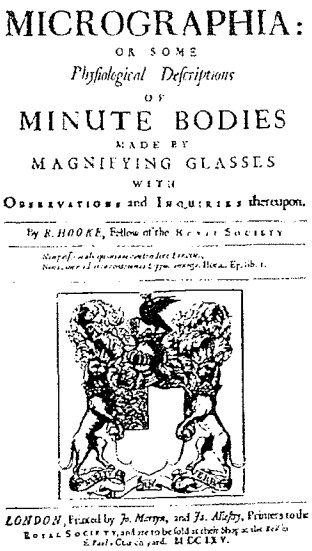
La más grande de las sociedades científicas fue la Real Sociedad de Londres. Aunque su fundación oficial fue en 1660, sus orígenes se encuentra en un "colegio invisible" de científicos que empezó a reunirse para debatir en la década de 1640. En su fundación tenía 12 miembros, entre ellos el arquitecto inglés sir Christopher

Robert Boyle cuando era joven.





No ha sobrevivido ningún retrato de Robert Hooke. En 1710 existía un retrato en la Real Sociedad, pero se ha sugerido que Newton hizo que lo destruyeran.


MICROGRAPHIA:
OR SOME
Physiological Descriptions
OF
MINUTE BODIES
MADE BY
MAGNIFYING GLASSES
WITH
OBSERVATIONS and INQUIRIES thereupon.
By R. HOOKE, Fellow of the ROYAL SOCIETY
LONDON, Printed by Jo. Martyn, and Ja. Allestry, Printers to the ROYAL SOCIETY, and are to be Sold at their Shop at the Bell in S. Paul's Church-yard. MDCLXV.

La Micrografía *de Robert Hooke reveló por primera vez los detalles diminutos de la vida.*

Wren (1632-1723) y el químico irlandés Robert Boyle (1627-1691). El discurso inaugural de Wren hablaba de fundar un "Colegio para el Fomento del Aprendizaje Experimental Físico-Matemático". La sociedad planeaba reunirse una vez a la semana para ser testigos de experimentos y discutir temas científicos, con Robert Hooke (1635-1703) como primer curador de los experimentos. Al parecer, sin nombre al principio, la Real Sociedad aparece por primera vez en forma impresa en 1661, y en los Segundos Estatutos Reales de 1663 se hace referencia a ella como "La Real Sociedad de Londres para el Mejoramiento del Conocimiento Natural". Fue la primera "real sociedad" de cualquier tipo. Empezó a adquirir una biblioteca en 1661 y luego un museo de especímenes científicos, y todavía conserva los portaobjetos de microscopio de Hooke. Después de 1662 se otorgó a la sociedad el privilegio de publicar libros, y uno de sus primeros títulos fue *Micrographia* (*Micrografía*) de Robert Hooke. En 1665 la Real Sociedad publicó el primer número de las *Philosophical Transaction* (*Transacciones filosóficas*), actualmente el diario científico más antiguo en publicación continua.

A la Real Sociedad le siguió con rapidez la Académie des Sciences, en París, en 1666. Los miembros de la Académie no necesitaban ser científicos necesariamente; en algún momento Napoleón Bonaparte fue el presidente. Los grandes proyectos científicos pronto se convirtieron en fuente de orgullo nacional y de rivalidad internacional, en especial para la república francesa y la Francia de Napoleón.

"Galileo fue responsable del nacimiento de la ciencia moderna, tal vez más que cualquier otra persona".

Stephen Hawking, cosmólogo británico, 2009

La mejor herramienta científica: el cerebro

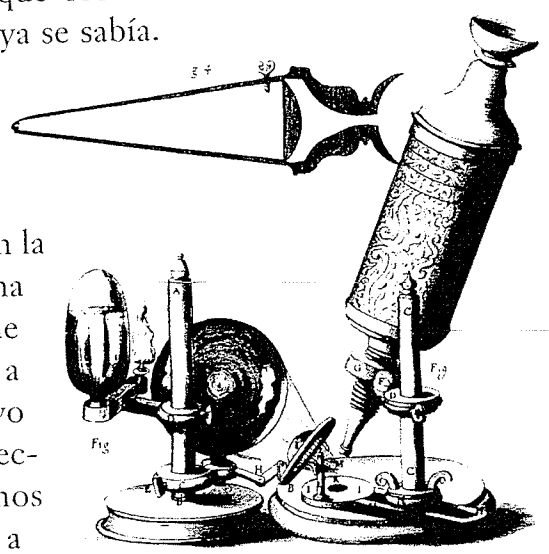


El péndulo de Foucault en el Panteón de París, proporcionó una demostración dramática de que la Tierra gira en su eje.

Sin el recurso de equipo y sin llevar a cabo experimentos, Aristóteles presentó modelos para la naturaleza de la materia y el comportamiento de los cuerpos bajo condiciones diferentes que funcionaban con lo que ya se sabía. A principios del siglo XX, el físico Albert Einstein (1879-1955) revolucionó la física y el punto de vista científico del universo, usando sólo pluma y papel. Al igual que Aristóteles, estaba trabajando con observaciones del Universo para desarrollar teorías, abordando fenómenos que en ese tiempo no se podían investigar verdaderamente mediante la experimentación o incluso con mediciones.

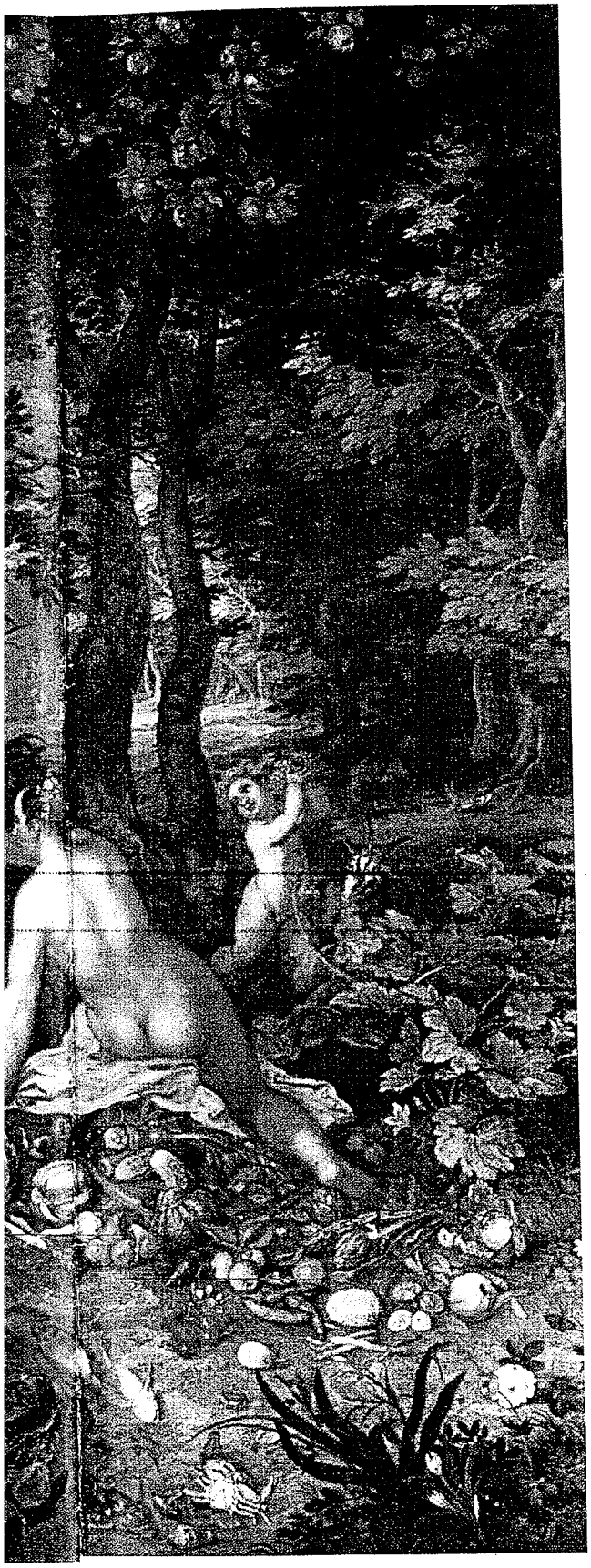
Sin embargo, a diferencia de Aristóteles, y siguiendo una práctica que inició Newton en 1687, Einstein empleó con rigurosidad las matemáticas para apoyar sus argumentos y mostrar que sus sistemas funcionaban con lo que ya se sabía. Hizo predicciones que ya se han confirmado mediante la observación y la experimentación. Por lo general, en la actualidad se emplea una cantidad considerable de matemáticas para poner a prueba un modelo nuevo en la física, y en ese aspecto los físicos modernos tienen ventaja respecto a las generaciones previas. Ahora tienen computadoras que les permiten llevar a cabo cálculos con tal rapidez que hubieran tardado vidas enteras en un pasado no tan distante.

Pero detrás de todo desarrollo en la ciencia, está la inventiva y la curiosidad de los seres humanos que impulsan el progreso, tanto en universidades y laboratorios de investigación actuales, como en academias al aire libre de la antigua Grecia.



Microscopio de Robert Hooke.





CAPÍTULO 1

MENTE SOBRE **MATERIA**

Cuando se examina un objeto sólido, es difícil imaginar que está compuesto de muchas partículas muy pequeñas y gran cantidad de espacio vacío. Es todavía más extraño cuando nos detenemos a pensar que las partículas mismas son más espacio que materia. La idea de que la materia no es continua, y que incluso contiene gran cantidad de espacio vacío, lo cual es una descripción justa de la teoría atómica moderna, se sugirió por primera vez hace unos 2500 años. A pesar de todo, la mayoría de los científicos sólo ha aceptado la teoría atómica por poco más de un siglo. Durante gran parte del tiempo intermedio, se desacreditó el concepto e incluso se ridiculizó.

Ceres y los cuatro elementos, *de Jan Brueghel el Viejo, 1568-1625.*

¿El primer físico?

Los orígenes de la "filosofía natural", o ciencia como le llamamos en la actualidad, tal vez se encuentren, como apuntala la cultura occidental, en la antigua Atenas. La primera persona a la que podemos darle el nombre de físico es a Anaxágoras, quien vivió en el siglo V a.C. En un tiempo en que la lógica estaba en sus inicios, trató de ajustar sus miles de observaciones y los resultados de su experimentación en una estructura lógica que le permitiera comprender y explicar la naturaleza del mundo. Anaxágoras buscó un punto de vista del universo material en el que la superstición o la intervención divina no fuera necesaria, un esquema con el que todo se pudiera explicar para la mente racional, un modelo en verdad científico. Al limitarse a tipos de materia que se pudieran percibir, Anaxágoras estableció un modelo para que los físicos trataran con el mundo visible y físico que iba a durar por casi 2500 años.

> "Nada saldrá de la nada".
>
> *Rey Lear*, Acto 1, Escena 1

Las semillas de la materia

Para Anaxágoras, la característica central del mundo natural era el cambio. Veía todo en movimiento continuo, una cosa cambiando a otra en un círculo interminable. Dijo que la materia no podía empezar a existir de la nada, ni dejar de existir, creencia que compartía con pensadores anteriores como Tales de Mileto y Parménides (*aprox.* 515–*aprox.* 445 a.C.). Mucho tiempo después el químico Antoine Lavoisier (1743-1794) presentó esta misma creencia en la ley de la conservación de la masa (ver la pág.31). Además, afirmó que toda la materia estaba compuesta por los mismos ingredientes fundamentales, propiedades esenciales y tal vez "semillas" de sustancias básicas. Las propiedades siempre existían en pares que eran opuestos polares, como caliente-frío, oscuridad-luz y dulce-amargo. Siempre había las mismas cantidades de cada propiedad en total. Las semillas eran en particular de materia orgánica (sangre, carne, corteza, piel).

Anaxágoras creía que cualquier porción de la materia, sin importar lo pequeña que fuera, contenía todas las propiedades (o materiales) posibles. Esto significa que debe ser capaz de dividirse en forma infinita. Las propiedades que predominan son evidentes y dan a la sustancia sus características observables, mientras que otras son latentes. Así que un árbol tiene más corteza que piel, pero todavía tiene algo de cada una, es sólo que no tiene suficiente piel para manifestar "pilosidad". Esto explica cómo cualquier sustancia se puede hacer a partir de cualquier otra, ya que sólo requiere que tome diferentes proporciones de todas las propiedades (o materiales) para formar la nueva sustancia.

La mente anima la materia

Anaxágoras tenía un ingrediente adicional para poner en el crisol, y era la mente o *nous*. No creía que la mente estuviera pre-

Anaxágoras (*aprox.* 500 – *aprox.* 430 a.C.)

Nació en Jonia, en la costa occidental de lo que ahora es Turquía; Anaxágoras se trasladó a Atenas a la edad de 20 años, donde entró de inmediato a los círculos intelectuales más elevados. Se convirtió en el compañero íntimo e instructor de Pericles, gobernante político de Atenas en el momento más elevado del poder de la ciudad (454-431 a.C.). Anaxágoras enseñó y escribió un tratado de filosofía natural que más adelante emplearía el filósofo griego Sócrates (469-399 a.C.). Su fama se extendió por todas partes, su fervor por la vida intelectual y su desprecio por todos los placeres de la carne y de la sociedad se volvieron tan famosos como sus enseñanzas. Anaxágoras estaba tan dedicado a la vida de la mente que descuidó todo lo demás y permitió que su cuantiosa herencia se desperdiciara.

A pesar de ser la figura intelectual más importante en Atenas, se alejó de la ciudad después de aproximadamente de 30 años y se sabe poco de su vida posterior. Murió en Lámpsaco, en la costa de los Dardanelos, acuando tenía alrededor de 70 años, pero su influencia continuó hasta un siglo después de su muerte.



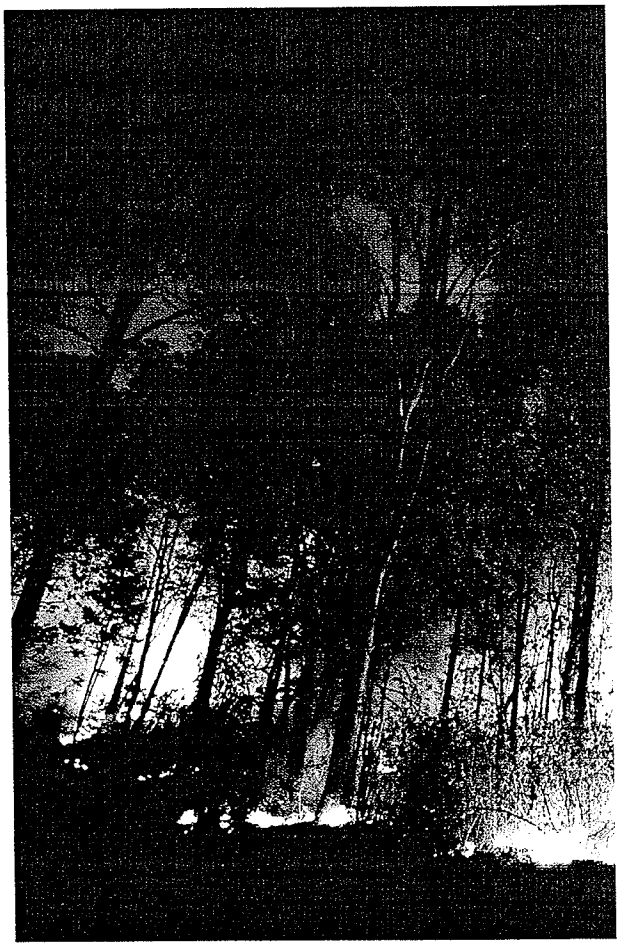




En el esquema de Anaxágoras, un objeto natural, como un tejón, mezcla semillas que incluyen piel, sangre y hueso con el nous *o la "mente" que lo anima. Un objeto inanimado comparte las mismas semillas en diferentes proporciones, pero no tiene "mente".*

sente en toda la materia, sino sólo en los serēs animados (vivos o conscientes). Sin embargo, la mente tenía una función adicional: Al inicio de todas las cosas, la materia no se distinguía en diferentes sustancias, sino que era una pila homogénea de partículas o estiércol líquido que se dividió en materia "adecuada" mediante el principio de la mente.

Sin embargo, esto suena terriblemente como creación mediante una entidad divina, y Anaxágoras se mantenía firme en que no deseaba supersticiones, ni religión en su explicación del mundo. Su, "mente" no era un creador inteligente, sino algún tipo de elemento inspirador que ponía en movimiento las fuerzas físicas que arremolinó la materia elemental, causando que se separara, diferenciara y formara cuerpos como la Tierra y el Sol. Es difícil ser precisos respecto a la función de la mente, ya que no sobrevivió el texto completo de Anaxágoras. Platón informó que Sócrates compró un ejemplar de la obra de Anaxágoras porque pensaba que contenía una explicación que involucraba una inteligencia que lo formó, pero quedó desilusionado.



Cuando un árbol se quema, sus componentes se reacomodan en forma bastante dramática.

Todo es cambio

Anaxágoras tenía un modelo que la materia no se podía crear o destruir, pero en el que la mutabilidad del mundo a nuestro alrededor se explica por el cambio de posición de la materia con el paso del tiempo. Si se corta un árbol y la madera se convierte en un bote, la materia se ha movido y reacomodado, pero es del mismo tipo y cantidad (contando el bote, los restos y el aserrín) que antes. Otros cambios requieren reacomodos más considerables: Por ejemplo, prender fuego a un árbol produce cenizas, vapor de agua y humo que no parecen ser similares en absoluto a la madera. Como todo objeto contiene, en diferentes proporciones, todos los posibles tipos de materia y cualidades, siempre existe el potencial para que cada tipo de materia se pueda obtener de cualquier objeto; por ejemplo, así puede crecer una planta del suelo mediante reacomodar o extraer tipos de materia.

Anaxágoras se dio cuenta de que para hacer que esto funcionara las partes componentes de la materia (las semillas) deben



ser en extremo pequeñas, ya que de otra manera no serían posibles los tipos de cambios que vemos todos los días. El requisito de que los componentes de la materia sean infinitesimalmente pequeños iba a presentar problemas insuperables para el modelo.

Porciones imposibles de cortar

La palabra "átomo" procede de la palabra griega "atomos" que significa "imposible de cortar o indivisible". La sugerencia de que todo está formado por partículas muy pequeñas e indivisibles tuvo su origen en el siglo V a.C., con la obra de Leucipo y luego de su pupilo Demócrito. Se sabe mucho más de Demócrito (*aprox.* 460–*aprox.* 370 a.C.) que de Leucipo, al grado de que el filósofo griego Epicuro (341-270 a.C.) dudaba de que Leucipo siquiera existiera. Es imposible decir qué parte del modelo atómico procede de Leucipo. El atomismo afirma que el Universo consta de materia formada por pequeñas partículas indivisibles que existen en un vacío. Los átomos de cualquier sustancia particular son todos del mismo tamaño y forma, y están hechos del mismo material.

Si los átomos son partículas diminutas y homogéneas (homeómeros), existe una pregunta obvia: ¿por qué no se pueden dividir más? Si Demócrito tenía una respuesta, no ha sobrevivido. Puede haber sido que los átomos, al ser homogéneos, no tenían vacío interno (mientras que los trozos más grandes de materia tienen espacio entre los átomos), y sólo esto significa que no se pueden dividir.

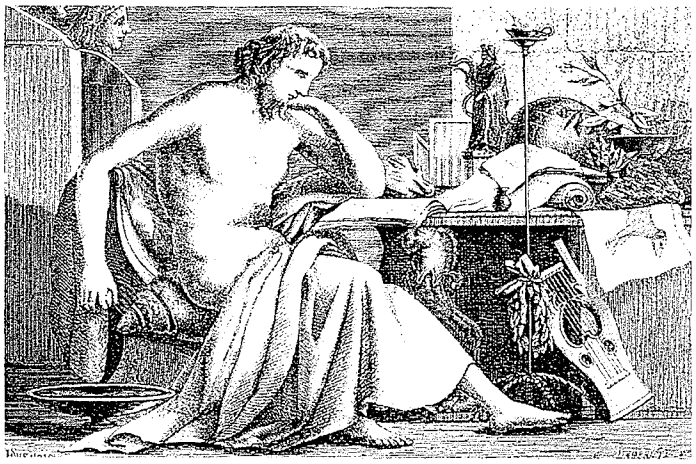
También hay una paradoja innata en un modelo de materia formado por partículas infinitesimales. Lo que Anaxágoras quería decir con infinitesimal era que las partículas eran más pequeñas que cualquier medición arbitrariamente pequeña que fuera mayor a cero. A pesar de todo, creía que todo objeto tenía un número infinito de partículas, ya que sin importar lo pequeña que fuera una porción que tomara, siempre había algo de todo tipo de materia. Si los átomos o semillas no tenían extensión en el espacio (tamaño cero), entonces incluso un número infinito de ellos no podría formar materia de tamaño finito. Este dilema presentó problemas insuperables para los pensadores griegos posteriores, y condujo al modelo atómico al estancamiento del que no saldría por 2000 años.

Homeómeros

Anaxágoras y los pensadores griegos posteriores distinguían entre sustancias que eran homeómeras (homogéneas) y las que no lo eran. Una sustancia homeómera es aquella en la que todas las partes son como el todo. Así, un pedazo de oro es homeómero porque sin importar qué tan pequeño sea el trozo que se tome, todavía tiene las propiedades de un trozo grande de oro. Un árbol o barco no es homeómero, ya que se puede fragmentar en partes que tienen diferentes características. Para los ojos modernos, los homeómeros son los elementos y los compuestos químicos puros.

Aristóteles (384-322 a.C.)

Aristóteles nació en Estagira, Macedonia, fue el hijo de un médico de la corte, pero quedó huérfano a temprana edad. Se trasladó a Atenas más o menos a los 18 años para estudiar con Platón en su academia, siguiendo el consejo que le dio el oráculo délfico. Se volvió el mejor discípulo de Platón, y el más famoso. En 342 a.C., Aristóteles se trasladó de vuelta a Macedonia y se convirtió en el tutor de Alejandro, el hijo de Felipe II de Macedonia, el cual más tarde se volvería Alejandro Magno. Aristóteles revisó la obra de todos los pensadores griegos más antiguos y luego formó sus propios puntos de vista, basándose en los aspectos que pensó eran correctos, y los amplió. Escribió sobre casi todos los temas, incluyendo la física. Lo eruditos árabes conservaron sus enseñanzas y éstas revivieron en Europa en traducción latina en los siglos XII y XIII. Las ideas científicas de Aristóteles dominaron la ciencia occidental hasta el siglo XVIII.



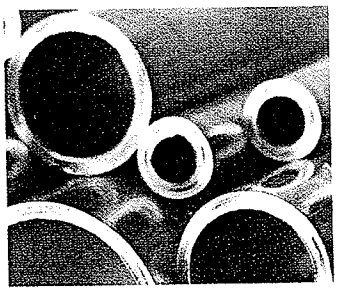
Cosas y no cosas

Hasta este momento, el atomismo parece muy similar al modelo de Anaxágoras; sin embargo, él tenía a toda la materia flotando en el aire o *aether* (ver la página 22), que es una sustancia física, mientras que los atomistas tenían a las partículas de materia existiendo en un vacío. Demócrito (o Leucipo) fue el primero en postular un vacío, ya que era claro que era necesario si la materia se iba a mover: en un universo repleto de materia toda porción del espacio ya estaría ocupada, de manera que no la podría ocupar algo más que se moviera hacia ella. Cuando algo se mueve no sólo avanza en el espacio vacío o empuja el espacio vacío, también deja espacio vacío detrás. Mientras que los pensadores anteriores habían negado que existiera un vacío ("lo que no es"), Demócrito confió en la evidencia de nuestros sentidos (sabemos que las cosas se mueven) para establecer al vacío como un concepto válido. Lo que es más, podemos ver que el Universo está formado por muchas cosas (tiene pluralidad), mientras que si no hubiera espacio vacío, toda la materia sería continua. La pluralidad y el cambio requieren un vacío.

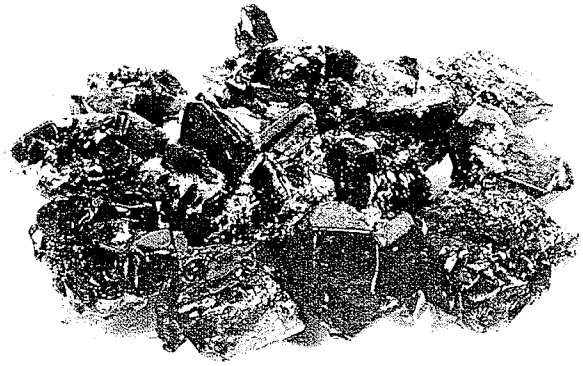
Materia atómica y elemental

Para la mente moderna, los átomos y los elementos son parte del mismo modelo

del universo. Los elementos son las sustancias químicas puras, cada uno formado por átomos idénticos, de manera que todo el oro son átomos de oro, y todo el hidrógeno son átomos de hidrógeno. Por otro lado, por ejemplo, los compuestos contienen átomos de dos o más elementos, así que el bióxido de carbono contiene átomos de carbono y de oxígeno. Sin embargo, en las teorías antiguas de la materia, los átomos y los elementos pertenecen a modelos diferentes.

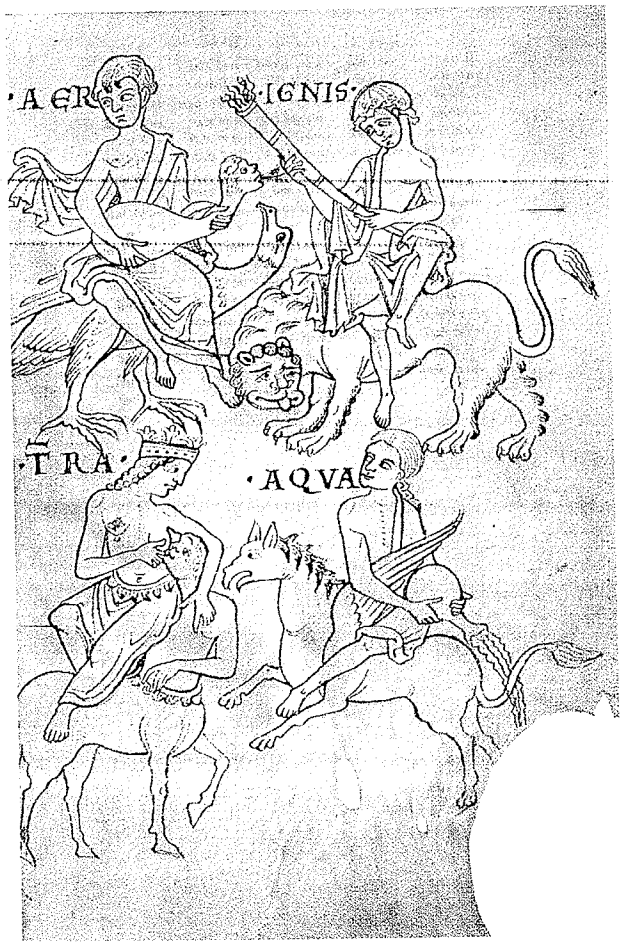


El metal cobre de color brillante está formado sólo por átomos de cobre. Los cristales azules del compuesto sulfato de cobre están formados por átomos de cobre, azufre y oxígeno.



Cuatro o cinco elementos

Empédocles (*aprox.* 490 – *aprox.* 430 a.C.) enseñó que todo está formado por cuatro "raíces": tierra, aire, agua y fuego. Aristóteles, tal vez el pensador más grande y más influyente en la historia de Occidente, revisó y abogó por este modelo.



Representación alegórica de los cuatro elementos en un manuscrito del siglo XII.

Platón renombró las cuatro raíces como "elementos" y Aristóteles empleó este término. Cada elemento se caracteriza por dos propiedades de contrarios naturales: calor-frío y húmedo-seco. Así, la tierra es fría y seca, el agua es fría y húmeda, el aire es caliente y húmedo y el fuego es caliente y seco. Estas propiedades también formaron la base del modelo de salud y enfermedad que propuso Hipócrates (*aprox.* 460 - *aprox.* 377 d.C.) o su escuela, que duró hasta el siglo XIX.

De acuerdo a la teoría elemental, toda la materia ocupaba en forma natural un

reino que se asociaba con sus elementos y la materia es atraída hacia su reino natural. La tierra ocupaba la posición más baja, el fuego la más alta, con el agua y el aire entre ellos. Esto explicaba algunos tipos de movimiento en el mundo físico: Los objetos pesados caen a la tierra porque la tierra es su principal elemento; el humo consta de fuego y aire, lo que ocupa los reinos superiores, así que se eleva. Una vez que un elemento está en su lugar natural, no se moverá a menos que algo lo provoque.

Además de los cuatro elementos, existe un quinto elemento muy diferente (o "quintaesencia") llamada el "aether". El concepto de "aether" (o "éter") nunca desapareció del todo, aunque se favoreció y cayó en desgracia por miles de años (ver cuadro de la izquierda).

Aunque el modelo atomista de Demócrito estaba en verdad mucho más cerca de la realidad como se comprende en la actualidad, fue la idea favorecida por Empédocles, Platón y Aristóteles de un mundo formado por cuatro elementos, la que demostró ser más popular. Cuando los pensadores árabes de principios de la Edad Media revitalizaron y desarrollaron el pensamiento de la Grecia clásica, fue este modelo elemental el que fomentaron. De ahí se tradujo al latín y a otros idiomas europeos; continuó siendo la piedra fundamental del pensamiento sobre la naturaleza de la materia por más de 2000 años.

El aether: 2500 años de un medio indetectable

El aether, o quintaesencia, aparece por primera vez como el quinto elemento en el pensamiento de la antigua Grecia. Es el elemento del cielo y no forma parte de la materia terrenal. Se le consideraba el reino natural de los dioses y era inmutable y eterno. Se pensaba que sólo se movía en círculos, ya que el círculo es la forma perfecta. Se pensaba que las diferentes densidades del aether explicaban la existencia de los cuerpos celestiales. El gran filósofo y matemático francés René Descartes (1596-1650) pensaba que la visión era posible porque la presión que ejercía en el aether se transfería al ojo. El científico escocés James Clerk Maxwell (1831-79) revivió el concepto del aether o "éter" en el siglo XIX para explicar el transporte de la luz y de otras formas de la radiación electromagnética.

El físico holandés Hendrik Lorentz (1853-1928) elaboró una teoría de un medio electromagnético abstracto en 1892-1906, pero cuando Albert Einstein publicó su teoría especial de la relatividad en 1905, prescindió por completo del aether.

En fechas más recientes, gran cantidad de cosmólogos han propuesto de nuevo algún tipo de aether que baña el cosmos, tal vez vinculado con la materia oscura.

C-c-cambios

Mientras Parménides no podía explicar el cambio de ninguna forma y los atomistas empleaban el vacío para permitir que la materia cambiara, Aristóteles formuló todo el cambio como transformación entre estados. Esto implicaba "convertirse" y "desconvertirse" de nuevo, una versión de la conservación de la masa. Así que para convertirse en estatua, un bloque de piedra o de bronce dejaba de ser bloque para convertirse en estatua. Para convertirse en hombre, un niño dejaba de ser niño. Cada objeto cambiable ya tenía el potencial de ser algo más, y ese cambio se



Kanada (Kashyapa)

El filósofo hindú Kanada nació en Gujarat, India. Según la tradición, originalmente se llamaba Kashyapa, pero cuando era niño le dio el nombre Kanada (de Kana, que significa grano) el sabio Muni Somasharma para explicar su fascinación por los objetos diminutos. Su principal área de estudio fue un tipo de alquimia (ver la página 27). Propuso una teoría atómica de la materia, que según informes le llegó mientras caminaba comiendo y arrojando pequeñas partículas de alimento. Se dice que se dio cuenta de que no podía continuar dividiendo el alimento en partes cada vez menores, sino que al final debía estar formado por átomos indivisibles.

hacía realidad cuando cambiaba. Entonces perdía su potencial de llegar a ser y tenía "realidad".

Atomismo hindú

Los griegos no fueron los únicos pensadores en presentar un tipo de teoría atómica. Los filósofos hindúes también sugirieron que la materia podía estar formada de partículas diminutas. No está claro si los griegos o los hindúes lo elaboraron primero, y si lo desarrollaron en forma independiente o si una tradición influyó en la otra. El filósofo hindú Kanada (Kashyapa) pudo haber vivido en el siglo VI o II a.C. (los historiadores no se pueden poner de acuerdo). Si la primera fecha es la correcta, el atomismo de Kanada antecede a la tradición griega y pudo haber influido en ella.

La teoría de los átomos de Kanada complementó la teoría elemental porque propuso cinco tipos diferentes de átomos, uno por cada uno de los cinco elementos que formaban el modelo hindú de la materia: Fuego, agua, tierra, aire y aether, los mismos del modelo de Aristóteles. Los átomos, o *parmanu*, se atraen entre sí y se agruparán. Una partícula biatómica, *dwinuka*, tiene propiedades que pertenecen a cada componente; luego se agrupan en grupos triatómicos que se pensaba eran los componentes de la materia más pequeños visibles. La variedad y las diferentes propiedades de la materia se explicaban mediante combinaciones y proporciones distintas de los cinco tipos de *parmanu*. En la versión del atomismo de Kanada que elaboró la escuela de Vaisesika, los átomos podían tener una combinación de 24 propiedades posibles. Los cambios químicos y físicos de la materia se producen cuando se recombinan los *parmanu*.

A diferencia de los filósofos griegos, Kanada creía que los átomos podían aparecer o dejar de existir al instante, pero que no se podían destruir con medios físicos o químicos.

La teoría jaina del atomismo procede del siglo I a.C. o antes. Considera que todo el mundo, a excepción de las almas, está

compuesto por átomos, cada uno de los cuales tiene un tipo de gusto, un olor, un color y dos tipos de tacto. Los átomos jaina estaban en movimiento constante, por lo general en línea recta, aunque podían seguir un camino curvo si los atraían otros átomos. También tenía un concepto de carga polar, en el que las partículas tenían una característica lisa o rugosa que les permitía pegarse. Los átomos se podían combinar para producir uno de seis "conglomerados": Tierra, agua, sombra, objetos de los sentidos, materia kármica y materia indigna. Existían teorías complejas de cómo actuaban, reaccionaban y se combinaban los átomos.



Al-Ghazali fue un asharita, una secta que creía que la razón humana no podía determinar las verdades sobre el mundo físico sin la revelación divina.

Atomismo islámico

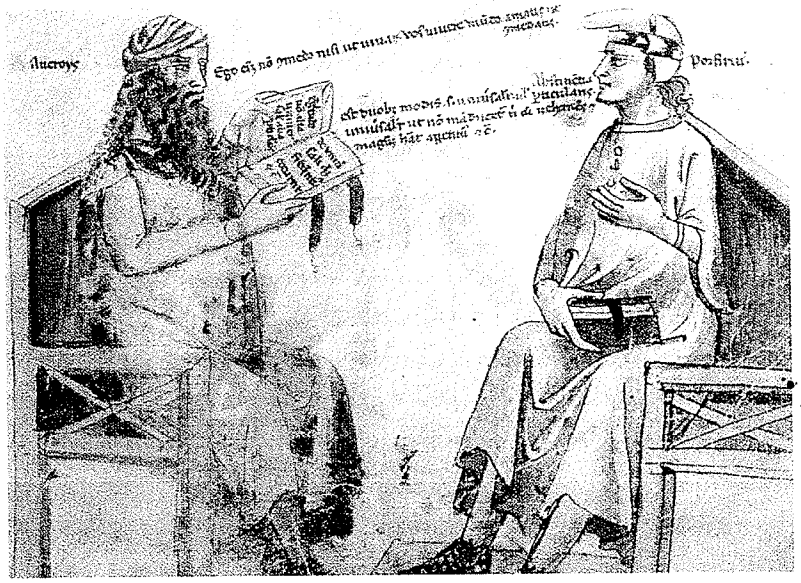
Fueron más antiguas las teorías hindúes o griegas, los eruditos islámicos reunieron ambas. Las enseñanzas de los antiguos griegos sobrevivieron en el Imperio Romano Oriental (Bizancio) y los eruditos árabes las resucitaron, las tradujeron y comentaron. Había dos formas principales de atomismo islámico, una más cercana al hindú y una con el pensamiento aristotélico. La más exitosa fue la obra asharita de Al-Ghazali (1058-1111). Para Al-Ghazali, los átomos son los únicos objetos materiales que son eternos; todo lo demás dura sólo un instante y se dice que es "accidental". Los objetos accidentales no pueden ser la causa de nada, excepto de la percepción.

Unos años antes, el filósofo islámico nacido en España, Averroes (Ibn Rushd, 1126-1198), rechazó el modelo de Al-Ghazali y comentó en forma extensa sobre Aristóteles. Averroes tuvo una enorme influencia en el pensamiento medieval posterior, y tuvo un papel decisivo en que se absorbiera a Aristóteles en la erudición cristiana y judía.

Gran parte de las obras árabes se tradujeron al latín al principio de la Edad Media, introduciendo el pensamiento griego clásico en la Europa Occidental. La iglesia católica adoptó las enseñanzas de Aristóteles siempre que no contradijeran directamente a la Biblia o a los pensadores cristianos influyentes. Por esta ruta, constituyeron el fundamento de los modelos científicos y filosóficos que estuvieron vigentes en Occidente hasta el Renacimiento, cuando los pensadores europeos por fin empezaron a desafiar y verificar las enseñanzas de los antiguos.

De los átomos a los corpúsculos

En el siglo XIII, un alquimista anónimo conocido como Pseudo-Geber expuso una teoría de la materia basada en diminutas partículas, a las que llamó "corpúsculos" (El extraño nombre de Pseudo-Geber pro-



Debate imaginario entre el aristotélico Averroes (izquierda) y el filósofo neoplatónico Porfirio, quien murió 800 años antes del nacimiento de Averroes.

cede de que firmaba sus obras como Geber, que era la forma latinizada del nombre Jabir ibn Hayyan, alquimista islámico del siglo VIII, a pesar de que los textos en realidad no eran traducciones de las obras de Geber). Pseudo-Geber propuso que todos los materiales físicos tienen una capa interna y externa de corpúsculos. Creía que todos los metales estaban formados por corpúsculos de mercurio y azufre en diferentes proporciones. Empleó esta creencia para apoyar la alquimia (ver cuadro, página 27), ya que sostenía que todos los metales tenían los ingredientes necesarios para convertirse en oro y que sólo necesitaban el refinamiento o reacomodo apropiado.

Nicolás de Autrecourt (*aprox.* 1298–*aprox.* 1369) describió algo similar al punto de vista de Pseudo-Geber. Autrecourt reanudó el debate que estaba de moda en París, en ese tiempo el centro intelectual de Europa, respecto a la divisibilidad o indivisibilidad de un continuo. Esta duda surgió de la declaración de Aristóteles de que un continuo no puede estar formado por partículas indivisibles. Creía que toda la materia, el espacio y el tiempo estaban formados por átomos, puntos e instantes y que todo cambio era resultado de reacomodar átomos. Diversos puntos de vista de Autrecourt ofendieron a la Iglesia y se tuvo que retractar de ellos después de que lo enjuiciaran en 1340-1346. Para él, todo movimiento era inherente al objeto que se movía (ya que el movimiento se reduce al movimiento de partículas). Pensadores posteriores no adoptaron su punto de vista de que el tiempo es granular, al igual que la materia, al estar formado por instantes discretos.

Una variante del atomismo antiguo se volvió popular en el siglo XVII y tuvo el apoyo del químico irlandés Robert Boyle, el filósofo francés Pierre Gassendi (1592-1655) e Isaac Newton, entre otros. Conocida como "corpuscularismo", difería del atomismo en que los corpúsculos no necesitaban ser indivisibles. De hecho, los proponentes de la alquimia (incluyendo a Newton) emplearon la divisibilidad de los corpúsculos para explicar cómo el mercurio se podía insinuar entre las partículas de otros metales, allanando el camino para su trasmutación a oro. Los corpuscularianos sostenían que nuestras percepciones y las experiencias del mundo a nuestro alrededor son resultado de las acciones de las

partículas diminutas de la materia en nuestros órganos de los sentidos.



Pierre Hassendi fue un defensor del corpuscularismo

De los corpúsculos de vuelta a los átomos

El atomismo no revivió en verdad hasta que Pierre Gassendi propuso un punto de vista escéptico del mundo en el que todo lo que sucedía pasaba por el movimiento y la interacción de diminutas partículas que seguían las leyes naturales. Gassendi excluyó a los seres pensantes de este esquema, pero en otros aspectos la teoría que publicó en 1649 era sorprendentemente exacta. Pensó que las propiedades de la materia eran producto de las formas de los átomos, que los átomos se podían juntar en moléculas y que existían en un vasto vacío, de manera que la mayor parte de la materia era en realidad no materia. La idea de Gassendi no tuvo tanta influencia como debió tener, principalmente porque Descartes se oponía directamente a ella, negando en forma categórica que pudiera existir un vacío. Sin embargo, Gassendi y Descartes estaban de acuerdo en un aspecto: Ambos creían que el mundo era de naturaleza mecanicista y seguía las leyes de la naturaleza.

Robert Boyle llevó el atomismo a primera plana de nuevo unos cuantos años después de la muerte de Gassendi. En 1661 publicó *The Sceptical Chymist* (*El químico escéptico*), describiendo un Universo formado completamente por átomos y conglomerados de átomos, todos en movimiento perpetuo. Boyle propuso que todos los fenómenos son resultado de colisiones entre átomos en movimiento y pidió a los químicos investigar los elementos, ya que sospechaba que había más de los cuatro que Aristóteles había identificado.

La Ilustración

La Ilustración es el nombre que se da por lo general al periodo que empezó alrededor de 1600, cuando el estado de ánimo filosófico de Europa Occidental y de las nuevas colonias en Estados Unidos estaba lleno de confianza en las actividades humanas. Continuó el florecimiento del optimismo y los logros que se habían iniciado en el Renacimiento, y completó el cambio del punto de vista de menosprecio o sumisión de la humanidad, como pecadores, que predominó en la Edad Media, a un punto de vista que celebraba los logros humanos y su potencial. La Ilustración impulsó y a la vez tuvo el impulso de avances en ciencia, tecnología, filosofía, pensamiento político y artes.

La filosofía de este periodo a veces se divide en dos campos: racionalista y empirista. Los racionalistas sostenían que la razón era la ruta al conocimiento, mientras que los empiristas favorecían la observación del mundo a nuestro alrededor. Esto seguía en forma aproximada la división entre Platón (racionalista) y Aristóteles (empirista) en el pensamiento antiguo.

El punto de vista empirista condujo directamente a la experimentación y observación científicas, mientras que el racionalismo favorecía los enfoques matemático y filosófico. Sin embargo, no existe una división clara entre los dos, ya que las conclusiones alcanzadas por la deducción racional a menudo son susceptibles a probarse mediante los métodos empíricos. Juntos, estos enfoques formaron la base de la revolución científica. El desarrollo del método científico, uno de los triunfos de la Ilustración, cambió para siempre el curso de los descubrimientos científicos.

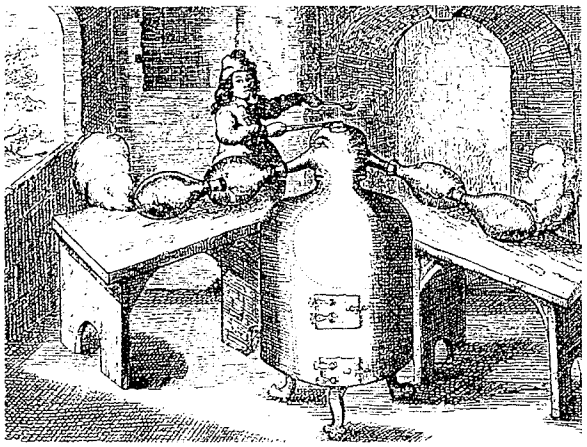
El nacimiento de la física del estado sólido

Aceptar que la materia está formada por partículas diminutas, sea que las llamemos átomos o corpúsculos, condujo a preguntas obvias como ¿qué forma tienen?, ¿cómo se unen para formar la materia contigua? ¿Cómo reaccionan e interactúan los diferentes tipos de materia? ¿Cómo se relacionan los cambios físicos (derretimiento, congelación, sublimación) con el modelo de partículas? Los físicos del siglo XVII dedujeron modelos de la estructura de la materia a partir de la observación de las propiedades y el comportamiento de las sustancias, lo que a veces los llevó a deducciones muy extrañas.

Después de observar que se produjera hierro forjado, Descartes llegó a la conclusión de que las partículas de hierro de alguna manera se unían en granos, y que la cohesión dentro de los granos era mayor que la cohesión entre los granos. Sin embargo ninguno de los métodos de los alquimistas.

Alquimia

Las metas más conocidas de la actividad filosófica y científica de la alquimia son cambiar metales comunes en oro, mediante la trasmutación, y producir un elíxir de la vida. A menudo se pensaba que la legendaria piedra filosofal era un componente esencial del elíxir de la vida, o del proceso de trasmutación, o de ambos. La alquimia se ha practicado de diferentes formas en el antiguo Egipto, Mesopotamia, la antigua Grecia, China y el Medio Oriente islámico, además en la Edad Media y en el Renacimiento de Europa. La alquimia es la base de la química y la farmacología modernas, y en la alquimia china la producción de medicinas era una actividad importante. Los intentos de trasmutación empezaron con el plomo, pero se podían emplear otros metales. No es necesario señalar que no



Un alquimista trabaja en la destilación en su laboratorio.

El poder de la nada

El científico alemán Otto von Guericke (1602-1686) inventó, o descubrió, la nada. En forma literal, demostró que el vacío podía existir, algo que los científicos habían negado antes. Después de experimentar con fuelles y crear una bomba de aire, presentó una demostración espectacular frente al emperador Fernando III, en 1654. Construyó esferas de metal con dos hemisferios y les sacó el aire con una bomba. Mostró el poder del vacío, o más bien el poder de la presión atmosférica, al demostrar que ni siquiera dos caballos podían separar los hemisferios.



Robert Boyle en 1689, dos años antes de su muerte, cuando su salud ya era mala.

bargo, no se dio cuenta que los "granos" en el hierro forjado forman una estructura cristalina. Aunque en teoría los microscopios pudieron revelar esas estructuras, no fueron de uso común hasta la segunda mitad del siglo XVII; incluso entonces se usaban casi siempre en estudios biológicos. Por supuesto, ningún microscopio puede mostrar la forma de los átomos o las moléculas.

El físico cartesiano Jacques Rohault (1618-1672) sugirió en 1671 que los materiales plásticos (o flexibles) tenían partículas con texturas complejas que están entremezcladas, mientras que los materiales quebradizos tienen partículas con una textura simple que se tocan entre sí sólo en unos cuantos puntos. En 1722 el pensador francés René Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757) determinó que al

"[Robert Boyle] es muy alto (alrededor de 1.80 metros) y muy recto, muy mesurado, virtuoso y austero; es soltero, tiene carroza, viaja con su hermana, lady Ranelagh. Su mayor placer es la química. Tiene en casa de su hermana un majestuoso laboratorio y varios sirvientes (aprendices según él) para cuidarlo. Es caritativo con la gente ingeniosa necesitada, y los químicos extranjeros han tenido grandes pruebas de su generosidad, ya que no se detiene en costos para encontrar algún raro secreto. A su propia costa hizo que tradujeran el Nuevo Testamento al árabe, para enviarlo a los países mahometanos. No sólo tiene renombre en Inglaterra, sino en el extranjero y, cuando los extranjeros vienen acá, es una de sus curiosidades hacerle una visita".

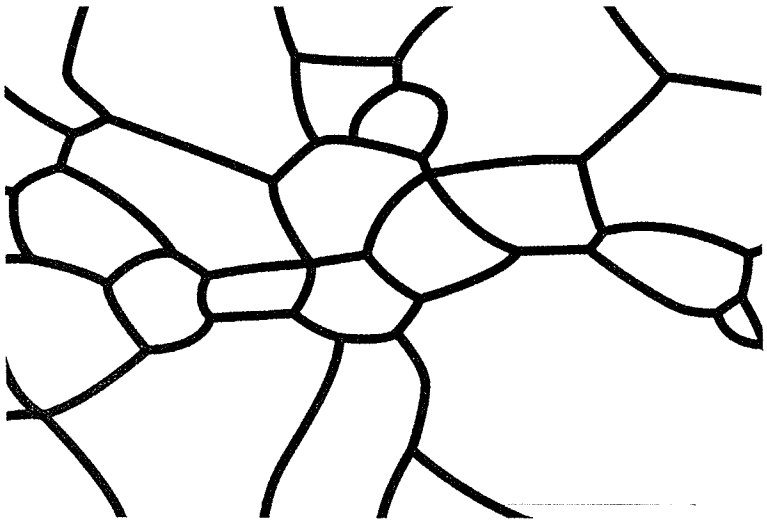
John Aubrey, *Vidas breves*

"Por lo tanto, existen agentes en la naturaleza que pueden hacer que las partículas en los cuerpos se peguen con atracciones muy fuertes. Y es asunto de la filosofía experimental encontrarlos. Ahora las partículas más pequeñas de la materia pueden formar una unidad mediante las atracciones más fuertes, y componer partículas más grandes de virtud más débil, y muchas de ellas pueden formar una unidad y componer partículas más grandes cuya virtud es todavía más débil, y así en adelante para diversas sucesiones, hasta que la progresión termine en las partículas más grandes, de las cuales dependen las operaciones de la química, y los colores de los cuerpos naturales, que al formar unidades componen cuerpos de una magnitud práctica. Si el cuerpo es compacto, y se dobla o cede a la presión sin deslizarse alguna de sus partes, es dura y elástica, volviendo a su figura con la fuerza que surge de la atracción mutua de sus partes. Si las partes se deslizan unas sobre otras, el cuerpo es maleable o suave. Si se deslizan con facilidad, y son de un tamaño apropiado para agitarse mediante el calor, y éste es lo bastante grande para mantenerlas en agitación, el cuerpo es fluido".

Isaac Newton, notas para la segunda edición de *Óptica*, Londres, 1718

contrario de la creencia previa, el acero no es hierro purificado, sino hierro al que se le han añadido "azufres y sales" y que las partículas de estas sustancias se encuentran entre las partículas del hierro.

Al no tener otro método en el cual confiar aparte de la imaginación, los físicos presentaron algunas sugerencias descabelladas para las formas de las partículas. Nicolaas Hartsoeker (1656-1725) afirmó en 1696 que el aire estaba formado por bolas huecas construidas con anillos como de alambre, que el cloruro mercúrico es una bola de mercurio con picos pegados en forma de aguja o de navaja de sal y ácido sulfúrico, y que el hierro tiene partículas con dientes que se entrelazan para volverlo duro cuando está frío. Sostenía que el hierro es maleable cuando se calienta, ya que las partículas se separan lo suficiente para permitir que se deslicen unas sobre otras. Pensar en las estructuras de la materia era un juego, y Hartsoeker terminó alentando a sus lectores a unirse: "No deseo privar al lector del placer de hacer él mismo la búsqueda, siguiendo los principios que he establecido antes".



La microestructura del acero: los científicos del siglo XVII no examinaban el metal con microscopios.

Imagen contemporánea de la fundición del hierro, como Descartes la vio.



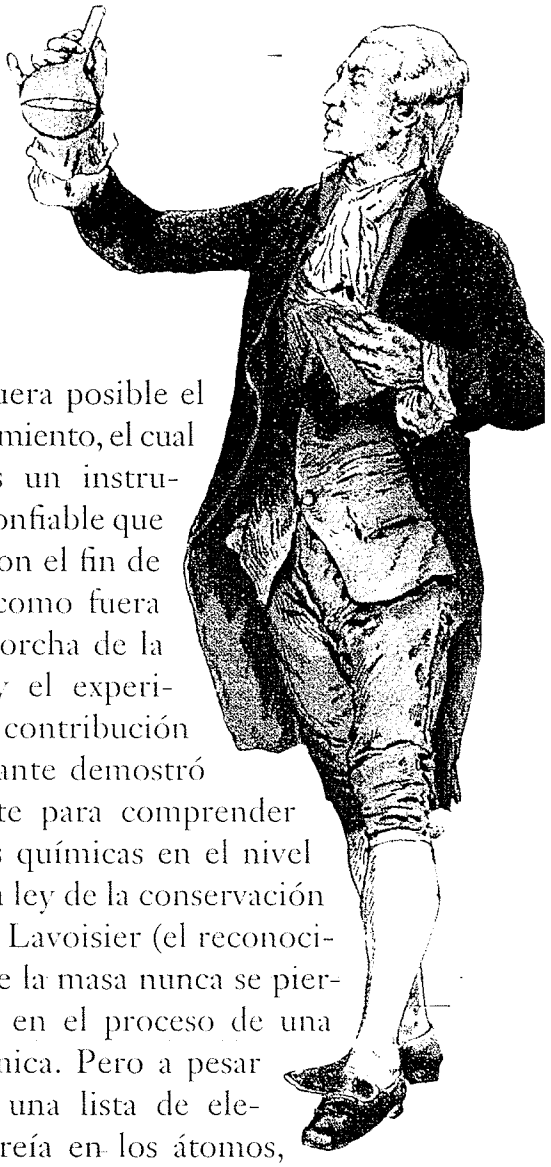
Átomos y elementos

Robert Boyle tuvo razón en impulsar a los químicos a buscar más elementos que tierra, agua, aire y fuego, pero pasó algún tiempo antes de que se formulara una tabla de los elementos químicos. Antoine Lavoisier produjo la primera obra de química moderna en 1789 e incluyó en ella una lista de 33 elementos (sustancias que no se podían fragmentar más). Por desgracia, la lista de Lavoisier incluía la luz y el "calórico", que pensaba que era un fluido que producía pérdida o ganancia de calor mediante su movimiento (ver la página 93). Lavoisier no consideraba completa su lista de elementos, dejando la puerta abierta para mayores investigaciones y descubrimientos posteriores. Tampoco organizó su lista de elementos en la tabla periódica (ese trabajo quedó para que el químico ruso Dmitri Mendeleev [1834-1907] lo completara en 1869). La tabla periódica es relevante para la historia de la física, ya que al organizar los elementos de acuerdo a sus propiedades reveló el significado del número atómico y su relación con la valencia la forma en que los elementos se unen.

"Alma del mundo, inspiradas por ti
Se unen las discordantes
semillas de la materia,
Pues ataste los átomos dispersos
Que, unidos por las leyes
de la verdadera proporción,
Constituyeron de diversas
partes una sola y perfecta armonía".

Nicholas Brady, "Oda a Santa Cecilia", *aprox.* 1691

Como empirista, Lavoisier afirmó que en su obra había "tratado de llegar a la verdad vinculando los hechos; de reprimir



Antoine Lavoisier, el primer químico verdadero.

Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794)

Antoine Lavoisier (como se hacía llamar después de la Revolución Francesa, cuando un nombre caprichoso de noble se convirtió en un riesgo) fue el hijo de un abogado adinerado y se educó originalmente en la ley. Sin embargo, se decidió por la ciencia, estudiando primero geología, y después se interesó cada vez más por la química. Tenía su propio laboratorio y, junto con su casa, se convirtieron en un imán para librepensadores y científicos.

Se ha llamado a Lavoisier el padre de la química moderna. Sus logros fueron considerables y variados. Además de hacer la lista de los elementos, reconoció el papel del oxígeno en la combustión y la respiración, y que se involucraban reacciones similares en ambas. Esto acabó con la teoría popular y antigua del flogisto (una sustancia que se suponía que se liberaba cuando se quemaba la materia, ver la página 90).

Lavoisier era liberal en el aspecto político, y apoyaba los ideales que condujeron a la Revolución Francesa. Sirvió en un comité que propuso la reforma económica y sugirió mejoras para las nefastas condiciones en cárceles y hospitales de París, pero esto al final no lo salvó. Lo ejecutaron en la guillotina durante el Terror, en 1794. Se dice que pidió que retrasaran la ejecución para que pudiera terminar sus experimentos, pero le dijeron: "La República no necesita científicos". Se propagó por todas partes una historia de que le pidió a un asistente que contara cuántas veces continuaba parpadeando después de que separaran su cabeza de su cuerpo, pero es probable que fuera falsa.

tanto como fuera posible el uso del razonamiento, el cual a menudo es un instrumento poco confiable que nos engaña, con el fin de seguir tanto como fuera posible la antorcha de la observación y el experimento". Otra contribución que más adelante demostró ser importante para comprender las reacciones químicas en el nivel atómico fue la ley de la conservación de la masa de Lavoisier (el reconocimiento de que la masa nunca se pierde o se gana en el proceso de una reacción química. Pero a pesar de presentar una lista de elementos, no creía en los átomos, algo que consideraba imposible desde el punto de vista filosófico).

Todo en proporción

Decidir que existen los átomos es un buen principio, pero con el fin de construir materia continua a partir de ellos, y sin más variedades que sólo los elementos identificados por Lavoisier, era necesario algún medio para unir los átomos. Cómo se adherían con exactitud los átomos en grupos era un enigma para los primeros atomistas. Newton

escribió sobre "Agentes en la naturaleza" que podían mantener unidos los átomos.

El primer paso para investigar cómo se combinan los átomos era determinar las proporciones en que se unen con los compuestos. El químico francés Joseph Proust (1754-1826) dedujo la ley de las proporciones definidas a partir de experimentos que llevó a cabo entre 1798 y 1804, mientras era director del Laboratorio Real en Madrid. Su ley declara que en cualquier compuesto químico particular, los elementos siempre se combinan en las mismas proporciones de números enteros de acuerdo a la masa.

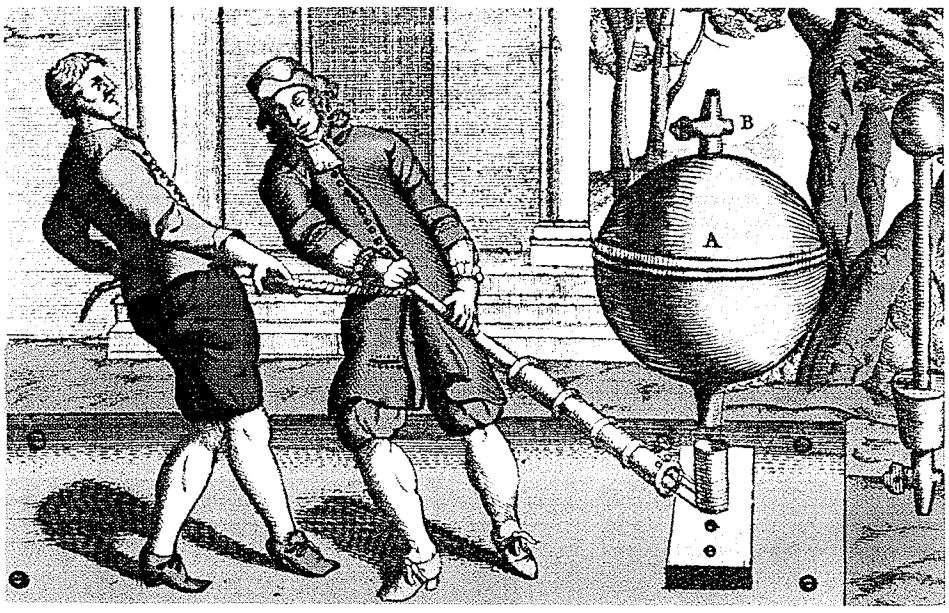
Sólo unos años después de que guillotinaran a Lavoisier en París, el químico inglés John Dalton (1766-1844) elaboró más esta idea y puso las bases para la teoría atómica moderna. En la obra que empezó en 1803 y publicó en 1808, expuso cinco observaciones sobre los átomos:

- Todos los elementos están formados por átomos.
- Todos los átomos de un elemento dado son idénticos.
- Los átomos de un elemento difieren de los átomos de cualquier otro elemento y se pueden distinguir por sus pesos atómicos.
- Los átomos no se pueden crear, destruir o dividir mediante procesos químicos.
- Los átomos de un elemento se pueden combinar con los átomos de otro para formar un compuesto químico; un compuesto determinado siempre contiene la misma proporción de cada elemento.

"Se requirió sólo un momento para cortar esa cabeza, y tal vez un siglo no sea suficiente para producir otra como ella".

El matemático y astrónomo Joseph-Louis Lagrange acerca de la ejecución de Lavoisier, 1794

Dalton elaboró la ley de las proporciones múltiples. En lugar de sólo examinar un compuesto único formado por dos elementos, examinó elementos que se pueden combinar en más de una forma.



Otto von Guericke llevando a cabo un experimento para demostrar un vacío.



Encontró que las proporciones relativas siempre son prōporciones pequeñas de números enteros. Así, por ejemplo, el carbono y el oxígeno pueden formar monóxido de carbono (CO) o bióxido de carbono (CO_2). Empleando los pesos del oxígeno y el carbono que se combinan, en CO la proporción es 12:16, y en CO_2 es 12:32. Por lo tanto, la proporción de oxígeno en CO con respecto a la de CO_2 es 1:2.

De las proporciones en que se combinan las masas de los elementos, fue posible calcular las masas atómicas relativas. Dalton calculó la masa atómica de acuerdo a la masa de cada elemento en un compuesto, empleando al hidrógeno como su unidad de referencia (1). Sin embargo, se equivocó al suponer que los compuestos simples siempre se formaban con la proporción 1:1; así que pensó que el agua era HO y no H_2O, y como resultado cometió algunos errores graves en su tabla de números atómicos. Dalton tampoco se dio cuenta que existen algunos elementos como moléculas diatómicas (es decir, en pares, como el O_2). Estos errores básicos se corrigieron en 1811, cuando el químico italiano Amedeo Avogrado (1776-1856) se dio cuenta de que un volumen fijo de cualquier gas a la misma temperatura y presión contiene el mismo número de moléculas (relacionado con la Constante de Avogrado, 6.0221415×10^{23} mol^{-1}). A partir de esto Avogrado calculó que como dos litros de hidrógeno reaccionan con 1 litro de oxígeno, los gases se combinan en la proporción 2:1. En la actualidad se considera a Avogrado (su nombre completo era Lorenzo Romano Amedeo Carlo Bernadette Avogadro de Quaregna y Cerreto) el creador de la teoría atómica-molecular.

Átomos: ¿Verdaderos o falsos?

Aunque la obra de Dalton parece convincente en retrospectiva, los científicos de su tiempo no se quedaron con la boca abierta por su explicación, y los físicos continuaron estando divididos en dos campos: Los que aceptaban la posible existencia de los átomos y los que no. Por fortuna, había buenas razones prácticas para continuar examinando los gases. El desarrollo del motor de vapor provocó un creciente interés en la termodinámica y, por lo tanto, a la consideración de las propiedades y al comportamiento de los átomos. Dicho comportamiento se podía relacionar con la acción de los gases calientes en una escala mucho más grande y, por lo tanto, con las leyes de la termodinámica que surgió a mediados del siglo XIX.

La primera evidencia visual de que la materia está formada por partículas diminutas la descubrió el botánico escocés Robert Brown (1773-1858) en 1827, aunque no se explicó de inmediato. Mientras examinaba minúsculos granos de polen en agua bajo el microscopio, Brown notó que se movían de un lado a otro constantemente, como si algo invisible estuviera chocando con ellos. Encontró que el mismo movimiento ocurría incluso cuando empleaba granos de polen que habían estado almacenados por cien años, de manera que demostraba que el movimiento no era iniciado por los mismos granos vivos. Brown no pudo explicar lo que vio, así que lo que en la actualidad se conoce como "movimiento browniano" atrajo poca atención por largo tiempo. En 1877, J. Desaulx lo revisó, sugiriendo que: "En mi forma de pensar, el fenómeno es el resultado del

movimiento molecular térmico en el medio líquido (de las partículas)". El físico francés Louis Georges Gouy (1854-1926) encontró en 1889 que entre más pequeña es la partícula, más marcado era el movimiento, lo cual estaba con claridad en concordancia con la hipótesis de Desaulx. El geofísico austriaco Felix Maria Exner (1876-1930) midió el movimiento en 1900, relacionándolo con el tamaño de la partícula y la temperatura. Esto allanó el camino para que Albert Einstein explicara el movimiento browniano en 1905. Einstein estaba seguro de que las moléculas eran responsables del movimiento, y llegó a los primeros cálculos para el tamaño de las moléculas. El físico francés Jean Perrin (1870-1942) validó la teoría en 1908, cuando midió el tamaño de una molécula de agua empleando el modelo de Einstein. Fue la primera evidencia experimental de la existencia de las moléculas, por lo que le otorgaron a Perrin el Premio Nobel para Física en 1926. Por fin, sólo podía ser un científico desafiante en particular quien pudiera negar la existencia de átomos y moléculas.

¿Son divisibles los átomos?

Si adoptamos el punto de vista de Demócrito de que los átomos son los componentes indivisibles más pequeños de la materia, entonces los átomos no son, hablando con rigurosidad, átomos. Incluso mientras Einstein y Perrin estaban de-

Átomos: Un asunto de vida o muerte

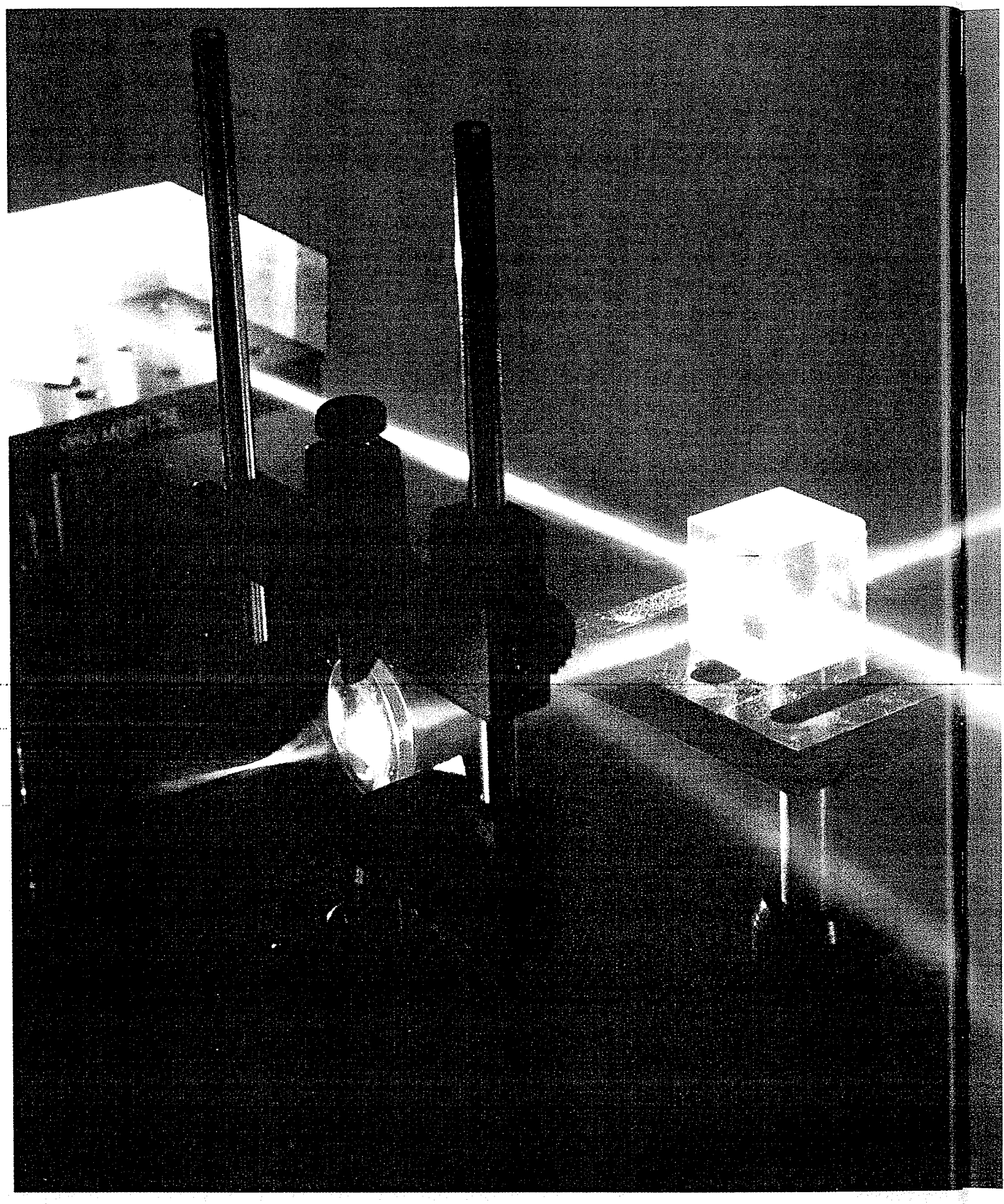
Los debates respecto a si los átomos existían o no estuvieron de moda durante todo el siglo XIX, donde algunos físicos afirmaban que los átomos sólo eran un concepto matemático útil y no parte de la realidad. Los debates causaron que el físico austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), médico austriaco y atomista confirmado, buscara una filosofía que pudiera dar cabida a ambos puntos de vista y poner fin a las riñas. Tomó una noción del físico alemán Heinrich Hertz (1857-1894) que sugería que los átomos eran "Bilder" o imágenes. Esto significaba que los atomistas podían pensar que eran reales y los anti-atomistas podían pensar en ellos como una analogía o imagen. Ningún lado quedó satisfecho. Boltzmann decidió volverse filósofo para encontrar una forma de refutar los argumentos en contra del atomismo. En una conferencia de física en San Luis, Estados Unidos, en 1904, Boltzmann descubrió que la mayoría de los físicos eran anti-átomos, y ni siquiera lo invitaron a asistir a la sección de física. En 1905 empezó a tener correspondencia con el filósofo alemán Franz Brentano (1838-1917), con la esperanza de demostrar que la filosofía se debía eliminar de la ciencia (un punto de vista que repitió el cosmólogo británico Stephen Hawking, en 2010), pero quedó desalentado. La desilusión con la mayoría de los físicos que rechazaban el atomismo al final contribuyó a que Botzmann se suicidara, colgándose en 1906.

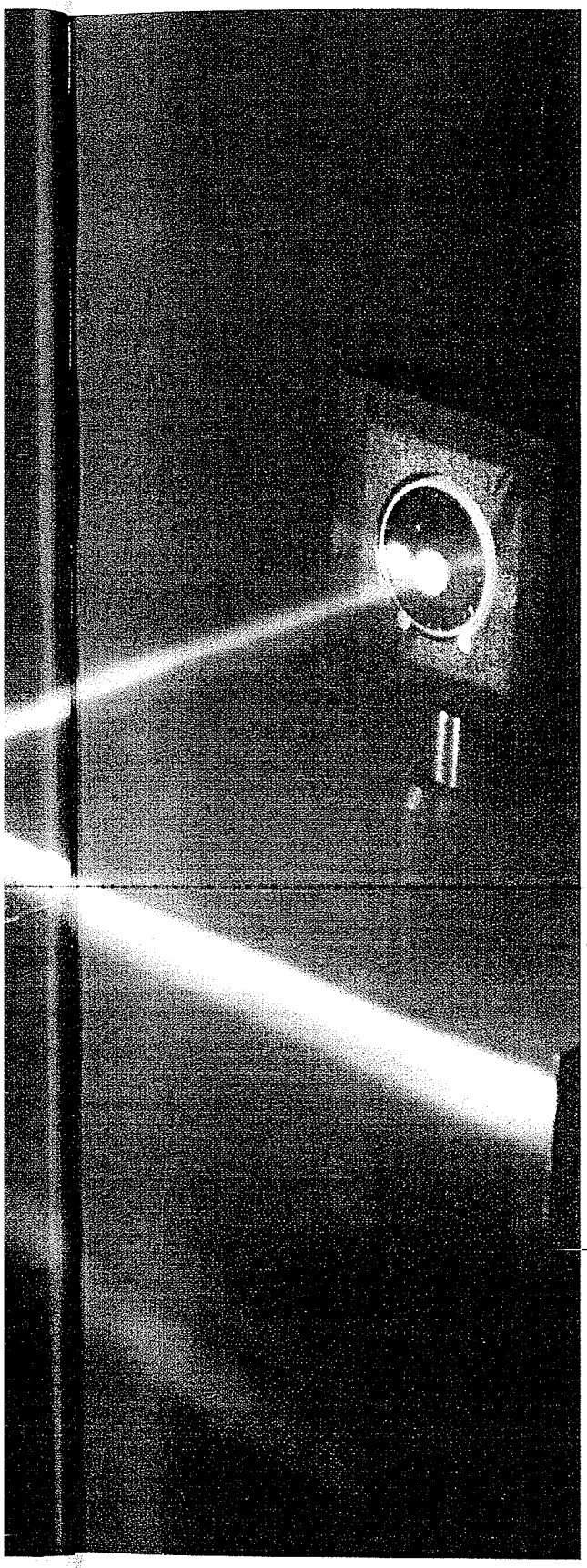


Ludwig Boltzmann



mostrando la existencia de los átomos, estaba empezando a surgir evidencia de partículas más pequeñas, subatómicas. Con el descubrimiento del físico británico Joseph John (J. J.) Thomson, del electrón en 1897, estaba a punto de desafiarse la indivisibilidad del átomo. El átomo gozaría de su título de partícula última tan sólo unos breves años. Pero antes de que ahondemos en el interior del átomo, vamos a examinar algunos fenómenos que por lo general no se considera que tengan relación con nada: luz, fuerza, campo y energía.





CAPÍTULO 2

HACER QUE LA LUZ TRABAJE: **ÓPTICA**

Los seres humanos han aprovechado la luz del sol, la luna y las estrellas, y posteriormente la de las lámparas por milenios. La luz es tan esencial para nuestra existencia que a menudo se vincula con creencias religiosas y supersticiosas como una fuerza creadora o que da vida. Por lo tanto, durante la mayor parte de la historia registrada, la luz ha ocupado un lugar especial. Con el paso de los siglos, la gente ha pensado en ella como una deidad, un elemento, una partícula, una onda y, por último, una onda-partícula. Como la luz está unida en forma inseparable con la visión, el estudio de la óptica ha unido la luz y la visión. No fue hasta hace aproximadamente 100 años que los científicos empezaron a reconocer que la luz visible era sólo una parte de un espectro completo de radiación electromagnética.

El descubrimiento de que la luz blanca está compuesta de luz de diferentes colores fue un avance sensacional en el estudio de la óptica.

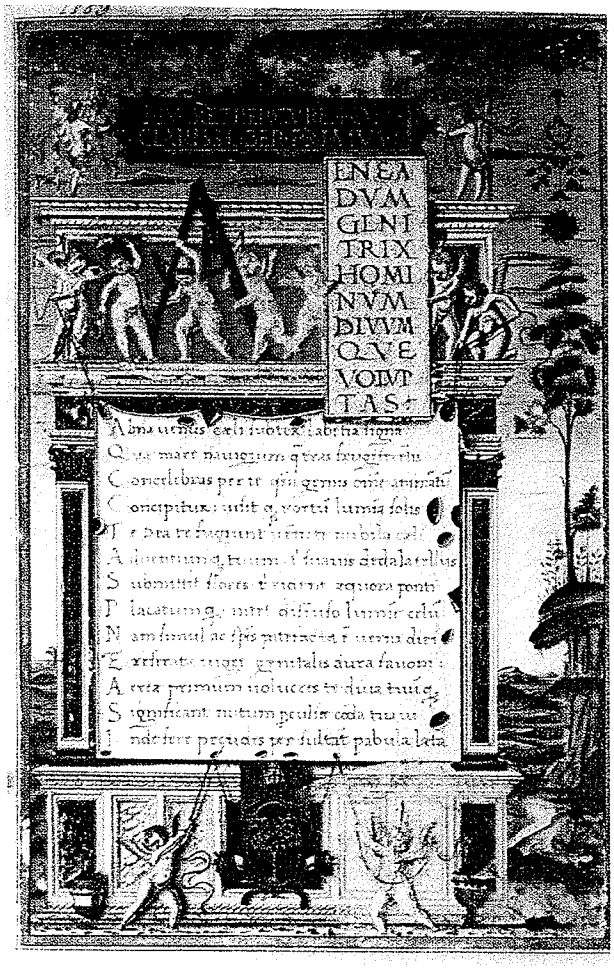
Un primer vistazo a la luz

Se registraron las ideas sobre la naturaleza de la luz en la India del siglo V o VI. La escuela samkhya consideraba que la luz era uno de los cinco elementos "sutiles" fundamentales con los que se construyen los elementos "burdos". La escuela Vaisheshika, que adoptaba un punto de vista atomista del mundo, sostenía que la luz estaba formada por una corriente de átomos de fuego de movimiento rápido, no muy diferente del concepto actual del fotón. El texto hindú del siglo I a.C., *Vishnu Purana*, hace referencia a la luz del sol como los "siete rayos del sol".

Los antiguos no pudieron separar la luz de la visión. En el siglo VI a.C., el filósofo griego Pitágoras sugirió que los rayos viajan desde el ojo como palpadores, y que vemos un objeto cuando los rayos lo tocan, modelo llamado teoría de emisión (o extramisión). Platón también creía que los rayos emitidos por los ojos hacían posible la visión; y Empédocles, que escribió en el siglo V a.C., habló de un fuego que brillaba surgiendo de los ojos. Sin embargo, este punto de vista del ojo como un tipo de antorcha no podía explicar por qué no podemos ver igual en la oscuridad que con la luz del día, de manera que Empédocles sugirió que estos rayos de los ojos debían interactuar con la luz de otra fuente, como el sol o una lámpara.

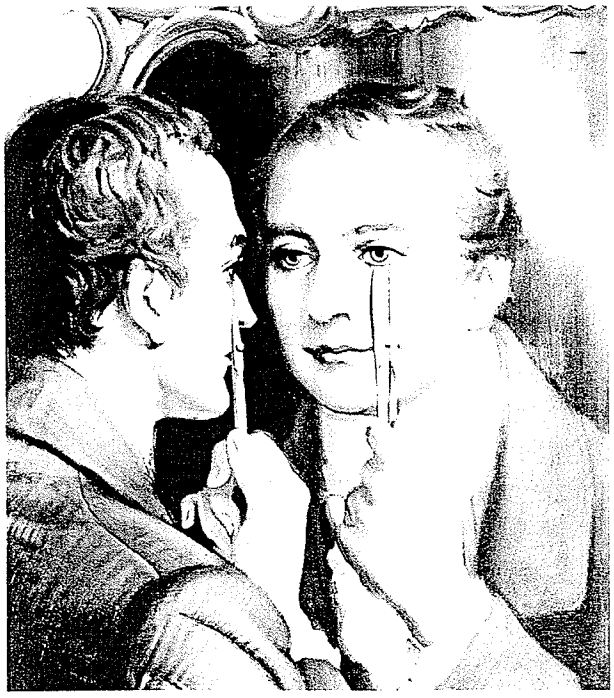
"La luz y el calor del sol, están compuestos de diminutos átomos que, cuando se les empuja, no pierden tiempo en salir disparados por el interespacio del aire, en la dirección impartida por el empujón".

Lucrecio, *Sobre la naturaleza del Universo,* 55 a.C.



Portada de De rerum natura (Sobre la naturaleza de las cosas) de Lucrecio.

La obra sobreviviente más antigua sobre óptica es del pensador griego Euclides (330-270 a.C.), quien también aceptó el modelo de emisión. Más conocido como matemático, Euclides comenzó el estudio de la óptica geométrica, escribiendo sobre las matemáticas de la perspectiva. Relacionó el tamaño de un objeto con la distancia al ojo, y expuso la ley de la reflexión: Que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, de manera que la imagen reflejada parece estar tan detrás del espejo como el objeto está frente a él.



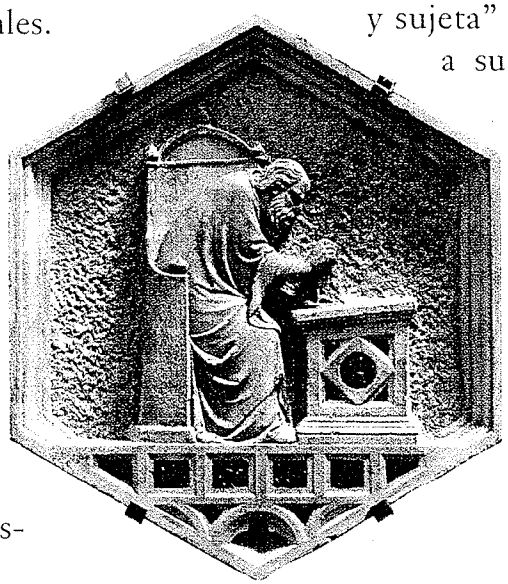
El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, de manera que el reflejo de Thomas Young parece estar tan atrás del espejo como él está frente a él

Más o menos 300 años después, otro innovador matemático griego, Herón de Alejandría (*aprox.* 10-70 d.C.), mostró que la luz siempre sigue el camino más corto posible mientras viaje a través del mismo medio. Por ejemplo, si la luz se propaga y observa en el aire, no habrá desviación. Se dio cuenta de que reflejar la luz de espejos planos no afecta este principio y, de nuevo, demostró que los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales.

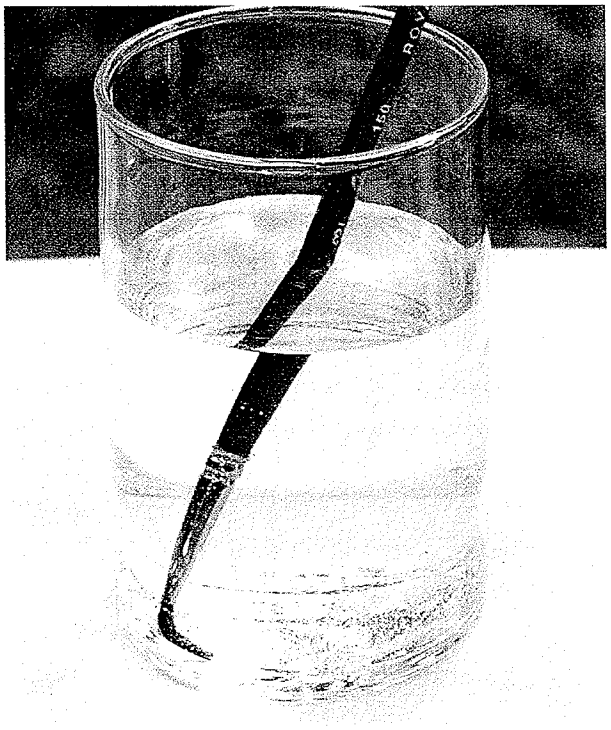
Jugando con la luz

Conforme decaía la Grecia clásica como centro cultural de Europa, también decayó gran parte de la actividad intelectual, incluyendo las pujantes ciencias físicas. Los pocos pensadores griegos restantes se trasladaron hacia el Este. El astrónomo griego Claudio Ptolomeo (*aprox.* 90 – *aprox.* 168 d. C.) llevó a cabo el trabajo experimental más antiguo sobre la luz mientras trabajaba en la Biblioteca de Alejandría en el Egipto Romano. Encontró que al entrar a un medio más denso (como al pasar del aire al agua), la luz se dobla en una dirección perpendicular a la línea divisoria. Lo explicó sugiriendo que la luz se vuelve más lenta al entrar al medio más denso.

Aunque Ptolomeo aceptó el modelo de emisión de la visión, llegó a la conclusión de que los rayos *de los ojos* se comportaban de la misma forma que los rayos de luz que viajaban *a los ojos*, y así al final unió las teorías de la visión y de la luz. Sin embargo, pasarían muchos siglos antes de que se aceptara que la visión era en su totalidad el resultado de la luz que cae en el ojo, y que éste de ninguna forma "se extiende y sujeta" las imágenes del mundo a su alrededor. Ese paso de suma importancia se llevó a cabo en aproximadamente en 1025 por parte del erudito árabe Ibn Al-Hassan ibn Al-Haytham, al que se conocía como Alhazen en



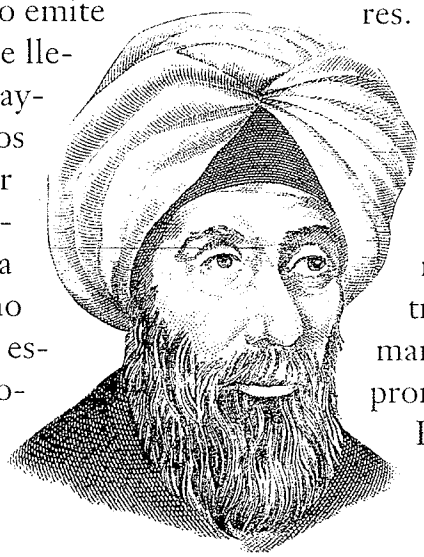
Euclides, el matemático griego.



La refracción causa que un objeto que está parte en agua y parte en aire aparezca inconexo o doblado en el límite entre los medios

Europa. Su obra se tradujo al latín como *De aspectibus (Sobre la perspectiva)* y tuvo gran influencia en la Europa medieval. Al-Haytham amplió la obra del primer científico árabe que trabajó con la óptica, Al-Kindi (*aprox.* 800-870) quien propuso "que todo en el mundo emite rayos en toda dirección, que llenan todo el mundo". Al-Haytham afirmó que los rayos que comunican luz y color proceden del mundo externo hacia el ojo. Describió la estructura del ojo y cómo funcionan los lentes, hizo espejos parabólicos y dio valores para la refracción de la luz. Al-Haytham también declaró que la velocidad de la luz era finita, pero fue otro científico árabe, Abu Rayhan Al-Biruni (973-1048), quien primero descubrió que la velocidad de la luz era más rápida que la del sonido.

Qutb Al-Din Al-Shirazi (1236-1311) y su estudiante Kamal Al-Din Al-Farisi (1267-1319) ampliaron la obra de Al-Haytham, explicando cómo se crea un arcoíris mediante la división de la luz blanca del sol en los colores componentes del espectro. Más o menos en el mismo tiempo, el profesor alemán Teodorico de Friburgo (1250-1310) empleó un frasco esférico de agua para mostrar cómo se crea un arcoíris cuando la luz del sol se refracta al pasar del aire a una gota de agua, y se refracta de nuevo, pasando de vuelta del agua al aire. Dio el ángulo correcto del arcoíris (entre el centro y el halo) como de 42 grados. A pesar de eso, no pudo determinar qué causaba el arcoíris secundario. Fue René Descartes quien descubrió, 300 años después, que es un segundo reflejo de la luz dentro de las gotas de agua lo que da lugar al arcoíris secundario y que también causa que se inviertan los colores.



Ibn Al-Haytham

La luz de Dios

Se tradujeron los escritos de los científicos árabes al latín; a menudo lo hacían eruditos que trabajaban en la España musulmana (controlada por árabes), y pronto se extendieron por toda Europa. Los primeros científicos europeos tomaron la obra sobre la óptica, entre



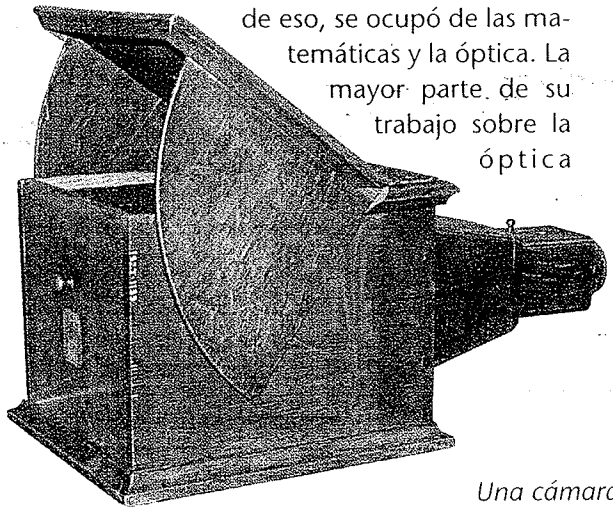
El arcoíris se produce por refracción y reflexión cuando la luz brilla en gotas de agua.



ellos el inglés Richard Grosseteste (*aprox.* 1175-1253), y más adelante el erudito inglés Roger Bacon (*aprox.* 1214-1294). Grosseteste estaba trabajando mientras decaía la fuerte dependencia en Platón, bajo el resurgimiento de las obras de Aristóteles acerca de la tradición árabe. Recurrió a Aristóteles, Averroes y Avicena para formar su propia obra sobre la luz. Como obispo, Grosseteste tomó como punto de inicio la creación de la luz de Dios, en Génesis 1:3 "Hágase la luz". Veía el proceso de creación como un proceso físico impulsado por la expansión y contracción de esferas concéntricas de luz. Sostenía que la luz es infinitamente autogeneradora, ya que una esfera de luz crece al instante de una fuente de luz de un solo punto. Su obra es más metafísica que física, y es en extremo original por postular un método de creación basado en la ac-

Ibn Al-Haytham (965-1040; también Alhazen)

Nacido en Basra, luego parte del Imperio Persa, Al-Haytham se entrenó en teología y trató de resolver las diferencias entre las sectas sunnah y chia del Islam. Al fallar, en lugar de eso, se ocupó de las matemáticas y la óptica. La mayor parte de su trabajo sobre la óptica tuvo lugar durante un periodo de diez años, mientras estaba encarcelado en El Cairo, después de que lo catalogaran como demente. Parece que fingió locura después de que lo metiera en problemas una afirmación demasiado ambiciosa de poder contener la inundación del Nilo con uno de sus proyectos de ingeniería. Con el fin de poner a prueba su hipótesis de que la luz no se dobla en el aire, Al-Haytham hizo la primera cámara oscura conocida: Una caja con un agujero en un extremo para dejar entrar la luz y formar una imagen en la superficie opuesta que se puede calcar a papel. Era un firme creyente en emplear experimentos para poner a prueba sus teorías. Como físico experimental riguroso a veces se le acredita por inventar el método científico.



Una cámara oscura o estenopeica.

"El buscador de la verdad no es alguien que estudia los escritos de los antiguos y, siguiendo su disposición natural, confía en ellos, sino más bien alguien que sospecha de su fe en ellos y cuestiona lo que se cosecha en ellos, el que los somete a discusión y demostración".

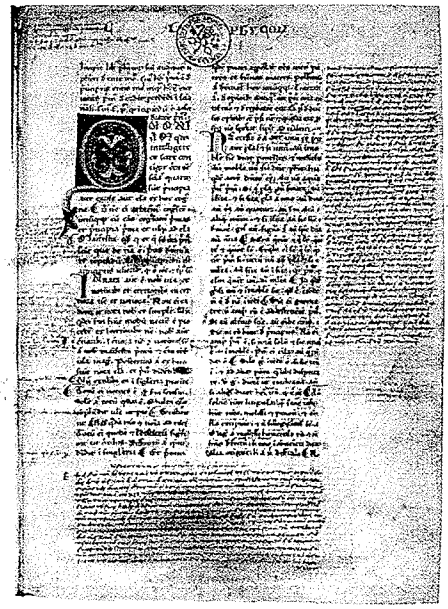
Ibn Al-Haytham

ción de la luz como "primera forma". Una digresión interesante y prueba adicional de la originalidad de Grosseteste es que parece ser el primer pensador occidental en haber sugerido múltiples infinitos: "La suma de todos los números, pares y nones es infinita y, así, es mayor que la suma de todos los números pares, incluso si ésta también es infinita; ya que la supera por la suma de todos los números nones".

Roger Bacon, quien se trasladó de la universidad de Oxford a la de París, dominaba la mayoría de los textos griegos e islámicos sobre óptica que se escribieron entre 1247 y 1267, y produjo su propio texto, Optics (*Óptica*). Más adelante se propuso un programa de estudio que incluía ciencias que entonces no se enseñaban en la universidad, y un modelo de ciencia experimental basado en su trabajo en óptica. Sugirió que el conocimiento de la lingüística y la ciencia podían fomentar y apoyar el estudio de la teología, tal vez en un intento por aplacar a la Iglesia Católica Romana. Sin embargo, el dominio de la iglesia continuó reprimiendo los avances científicos por muchos siglos, donde las autoridades católicas silenciaban e incluso ejecutaban a científicos que levantaban la voz contra la versión bíblica recibida de los eventos y los fenómenos físicos.

Aristóteles, favorito y en desgracia

El redescubrimiento de la obra de Aristóteles en Europa, mediante traducciones en latín de los textos conservados por árabes eruditos, no fue popular de inmediato para la Iglesia Católica Romana. La universidad de París condenó los libros de Aristóteles, *Libri naturales* (libros de ciencia natural) en 1210, y de nuevo en 1215 y en 1231, lo que significaba que no se podían enseñar. Pero para 1230, todas las obras de Aristóteles estaban disponibles en latín, de manera que la facultad de París dejó la pelea y en 1255 Aristóteles estaba de vuelta en el plan de estudios y era lectura obligatoria. Roger Bacon, que trabajaba en París en ese tiempo, fue uno de los primeros en ver el efecto de dejar a los eruditos parisienses sueltos en el campo de juegos de Aristóteles.

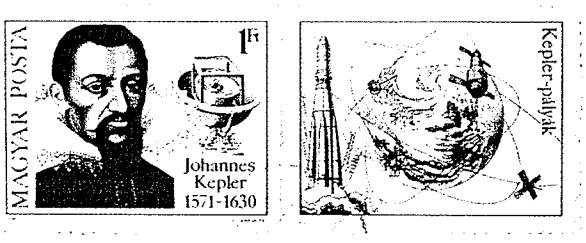


Ejemplar manuscrito medieval de la Física *de Aristóteles en traducción latina.*

Salir de la oscuridad

Hasta el Renacimiento no aparecieron en Europa trabajos originales en verdad importantes sobre óptica y luz. Las figuras más destacadas de la ciencia de los siglos XVI y XVII, como Nicolás Copérnico (1473-1543), Galileo Galilei (1564-1542), Johannes Kepler (1571-1630) e Isaac Newton (1642-1727), por fin desmantelaron el modelo aristotélico del Universo que había dominado el pensamiento científico por casi 2000 años, y expusieron las leyes de la mecánica y la óptica que se mantendrían sin oposición por otros cuatro o cinco siglos. De ellos, Kepler y Newton fueron los más importantes para la óptica.

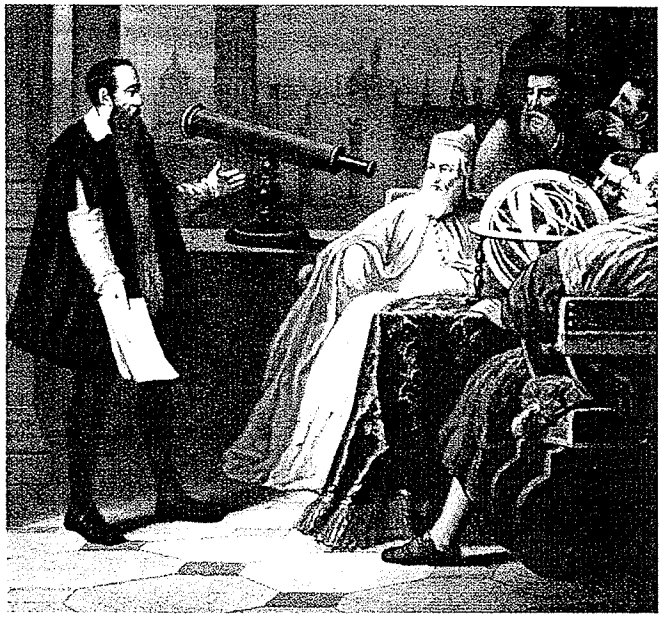
Kepler, matemático y astrónomo alemán, creía que Dios había construido el Universo de acuerdo a un plan comprensible y que su funcionamiento era, por lo tanto, susceptible de descubrir mediante la aplicación de la observación y el razonamiento científicos. Aunque fue más famoso por su extenso trabajo en astronomía, Kepler introdujo la técnica de calcar rayos de luz de punto a punto para determinar y explicar su camino. De esto, dedujo que el ojo humano trabaja mediante refractar los rayos de luz que entran por la pupila y los enfoca en la retina. Explicó cómo funcionan los lentes de los anteojos (se habían



Estampillas postales húngaras que conmemoran a Kepler y su contribución a la ciencia espacial.

El telescopio de Galileo

Galileo estaba en Venecia cuando escuchó de la invención del telescopio; un holandés visitante había venido a Italia para vender el instrumento al senado veneciano. Desesperado por vencerlo, Galileo construyó un telescopio en sólo 24 horas que era mejor que cualquiera que existiera. En lugar de emplear dos lentes cóncavas, que producían una imagen invertida, el telescopio de Galileo tenía una lente convexa y una cóncava, y producía una imagen derecha. Persuadió al senado para postergar la decisión de comprar el telescopio holandés. Luego Galileo produjo uno mejor que regaló al dox de Venecia, asegurando la victoria y la posición en su puesto profesional en la universidad de Padua.



Galileo presenta su telescopio a Leonardo Donato, dux de Venecia, en 1609.

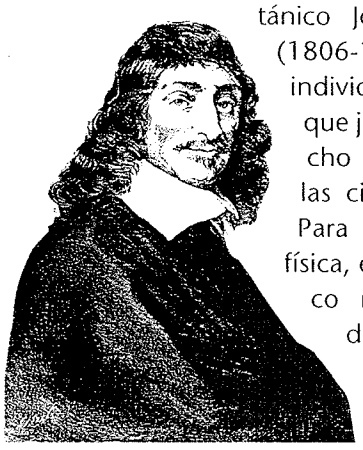
estado usando por alrededor de 300 años), pero en realidad nadie comprendía los principios en que se basaban, y cuando los telescopios se empezaron a usar en todas partes, más o menos en 1608, también explicó cómo funcionaban. Kepler publicó su obra sobre óptica en 1603, casi cuarenta años antes de que Isaac Newton naciera. Aunque Leonard Digges fabricó el primer telescopio astronómico en Inglaterra a principios de la década de 1550 (ver página 168), se asocian más con la obra de un hombre, el astrónomo Galileo Galilei (ver cuadro, página 43).

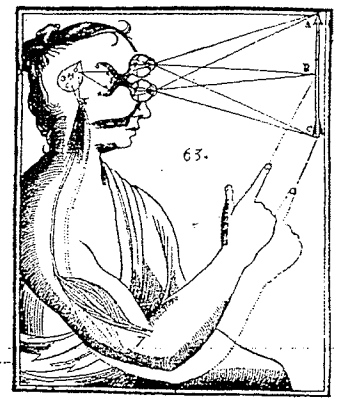
A través de un cristal con brillantez

Los lentes cambian el camino de la luz; son la herramienta óptica más básica. Se crearon mucho antes de que cualquiera pudiera explicarlos. El ejemplo más antiguo que sobrevive es la lente de Nimrud,

René Descartes, 1596-1650

Descartes nació en La Haye, Turena, en Francia, y era hijo de un político local. Su madre murió cuando sólo tenía un año de edad. Aunque al principio siguió los deseos de su padre de entrenarse en la ley y la ciencia, Descartes abandonó el plan de convertirse en abogado y pasó su tiempo estudiando matemáticas, filosofía y ciencia, con un pensamiento independiente e incursionando en el ejército. Por suerte, tenía suficiente riqueza para sostener este estilo de vida. Se le ha llamado el "padre de la filosofía moderna", y su desarrollo de las coordenadas cartesianas recibió su nombre gracias al filósofo británico John Stuart Mill (1806-1873), "el paso individual más grande que jamás se haya hecho en el avance de las ciencias exactas". Para la historia de la física, el avance filosófico más importante de Descartes fue el modelo mecánico: Se esforzó por ver el Universo completo como sistemas similares a máquinas que seguían un plan de leyes físicas en su funcionamiento.



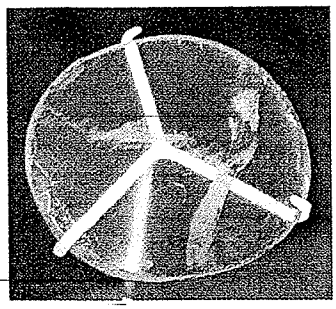


El modelo de la visión de Descartes, mostrando cómo viajan los rayos de luz, y la información se transmite a la glándula pineal.

Descartes era sensible y amante de las comodidades desde la infancia. Se levantaba tarde, y dijo que su mejor obra se llevó a cabo en una cómoda cama (así como la elaboración del sistema de coordenadas cartesianas, ver cuadro, página 47). Cuando la joven reina Cristina de Suecia lo empleó como su tutor e insistió en tutorías a las 5 am, en una biblioteca helada, sólo se necesitaron cinco meses para que Descartes cayera presa de una grave enfermedad pulmonar y muriera justo a la edad de 46 años.

hecha en la antigua Asiria hace 3000 años a partir de un trozo de cuarzo. Se emplearon lentes similares en Babilonia, en el antiguo Egipto y en la antigua Grecia, tal vez para agrandar objetos o para encender algo, al concentrar los rayos del sol para comenzar un fuego. Mientras que griegos y romanos llenaban recipientes de vidrio esféricos con agua para hacer lentes, los lentes de vidrio pulido con la forma requerida no se desarrollaron hasta la Edad Media.

El primer uso de una lente para corregir la visión pudo ser registrado por el autor romano Plinio el Viejo (23-79 d.C.), el cual informó que Nerón observaba los juegos de gladiadores en el Coliseo a través de una esmeralda. Las piedras para leer, trozos convexos de vidrio o cuarzo, se empleaban para ampliar el texto desde el siglo XI. Los lentes de cristal pulido se emplearon en anteojos desde alrededor de 1280, aunque nadie sabía al principio cómo o por qué funcionaban. La creación del microscopio y el telescopio durante los siglos XVI y XVII produjo la necesidad de lentes más exactas. Conforme se refinaban con el paso de los siglos las técnicas para pulir, las lentes mejoradas condujeron a descubrimientos posteriores que luego causaron demanda de lentes mejores. Algunos de los más grandes científicos del Renacimiento y de la Ilustración, incluyendo a Galileo, al pionero belga del microscopio, Antoine van Leewenhock (1632-1723) y al físico y astrónomo holandés, Christiaan Huygens (1629-95), se hicieron sus propios lentes.



El lente de Nimrud, descubierto en Kurdistán (norte de Irak).

Presión en el éter

El trabajo sobre la óptica de René Descartes describía el funcionamiento del ojo y sugería mejoras para el telescopio. Empleó analogías mecánicas para producir con matemáticas muchas propiedades de la luz, incluyendo las leyes de reflexión y refracción. Sin embargo, en otros aspectos, se vio obstaculizado por su negativa a aceptar la existencia de un vacío. Para teóricos como Gassendi, quien visualizaba un vacío con átomos en movimiento, la luz se podía explicar como una corriente de partículas de movimiento rápido que viajaban a gran velocidad por el espacio. Sin un vacío, Descartes necesitaba un mecanismo diferente. Creía que algún tipo de "fluido intersticial" fino, otra versión del aether, llenaba todos los espacios, y que era la presión ejercida en todo este fluido lo que producía la visión. Por lo tanto, si el sol empujaba en el fluido intersticial, esta presión se podía transmitir instantáneamente al ojo, que entonces percibiría al sol. Había poca base para esta teoría, en especial una vez que consideramos que el sol está separado de la Tierra por 150 millones de kilómetros, pero puso las bases para una obra más importante de parte de Christiaan Huygens (ver página 50), hijo de un amigo cercano de René Descartes, e indujo a Newton a seguir sus propias ideas en el tema, pero en una dirección diferente.

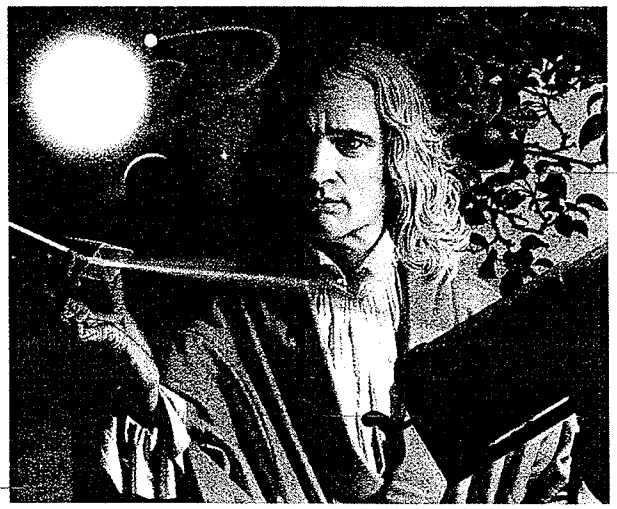
"[Descartes] fue un hombre demasiado inteligente para cargar con una esposa; pero como era hombre, tenía los deseos y apetitos de un hombre; por lo tanto, tenía una mujer apuesta, bien adaptaba que le gustaba, y con la que tuvo algunos hijos (creo que dos o tres). Es una lástima, pero al proceder del cerebro de un padre así, debieron estar bien educados. Estaba tan eminentemente educado que todos los eruditos lo visitaban, y muchos de ellos deseaban que les mostrara su colección de instrumentos (en esos días, el aprendizaje matemático se basaba mucho en el conocimiento de los instrumentos, y como dijo sir Henry Savile, en hacer trucos). Sacaba un pequeño cajón de debajo de su mesa y les mostraba un compás con una pata rota; y luego, como su regla, empleaba una hoja de papel doblada dos veces".

John Aubrey, *Vidas breves*

El señor de la luz: Isaac Newton

Tal vez Newton fue el científico más grande que jamás haya vivido; se iba a convertir en el gigante en cuyos hombros otros se han sostenido por más de 400 años. Su trabajo sobre las fuerzas y la gravedad (ver página 79) tal vez es más famoso que su trabajo sobre óptica, pero no más importante.

Newton dividió con éxito la luz blanca en su espectro componente, y luego recombinó los rayos de colores en luz blanca, demostrando así, en forma concluyente, que la luz blanca es una mezcla de colores. Esta posibilidad se había notado mucho antes. Aristóteles afirmó que la causa del arcoí§§ris son las nubes que actúan como lente en la luz del sol, una explicación que también aceptó Al-Haytham. El filósofo romano Lucio Anneo Séneca (*aprox.* 4 a.C. – *aprox.* 65 d.C.) hizo referencia en *Naturales quaestiones* al producir una banda de colores similares a los de un arcoíris al pasar la luz del sol a través de prismas de vidrio. Sin embargo, en tiempos de Newton, la mayoría de las personas creían que la luz de color era una forma de sombra, formada al mezclar luz blanca con oscuridad. Descartes pensó que la causa del color era el movimiento giratorio de las partículas que formaban la luz. El gran rival intelectual de Newton, Robert Hooke, pensaba que el color se grababa en la luz, como cuando brilla a través de un cristal de colores. Trató de em-



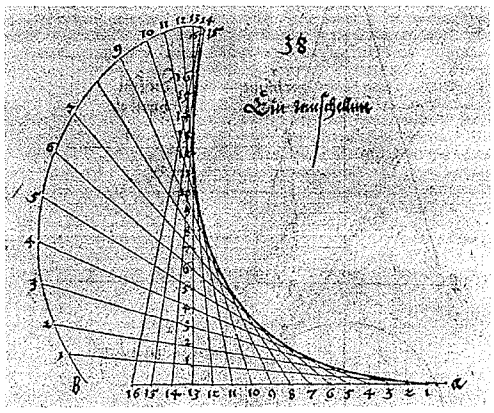
A través del prisma del genio: La obra de Isaac Newton sobre gravedad y óptica revolucionó la filosofía natural.

"La naturaleza y las leyes de la naturaleza se encuentran ocultas en la noche; Dios dijo: 'Qué se haga Newton' y se hizo la luz".

Alexander Pope, 1727

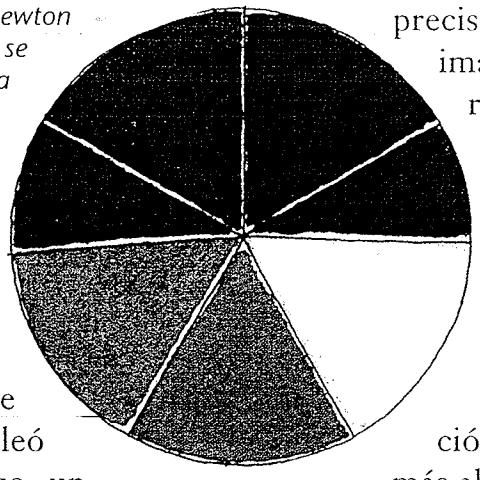
Una mosca que hizo historia

Descartes dio su nombre al sistema de coordenadas cartesianas que todavía se emplean para especificar un punto en un espacio tridimensional al relacionar la ubicación de tres ejes: "x", "y" y "z". Afirmó que había elaborado el sistema en 1619, mientras estaba en la cama observando a una mosca zumbar en un rincón de su recámara. Se dio cuenta de que la posición de la mosca se podía identificar con precisión en cualquier momento dado, trazando su distancia desde las dos paredes más cercanas y el piso o el techo; en otras palabras, sus coordenadas en tres dimensiones. De esta simple observación dedujo que una forma geométrica se podía representar con números (las coordenadas de sus extremos) y que una curva se podía describir con una serie de números que se relacionan unos con otros mediante una ecuación (de ahí que se pueda trazar, por ejemplo, el camino parabólico como una gráfica). El sistema completo de la geometría que se investigó mediante el álgebra se volvió posible una vez que Descartes vio y reflexionó sobre su mosca arrinconada.



Al trazar una serie de puntos en términos de distancias a dos ejes, la geometría cartesiana muestra una ecuación como una gráfica.

Cuando la rueda de colores de Newton se gira con mucha rapidez, no se pueden distinguir los colores y la rueda se ve blanca.



plear un prisma para dividir la luz, pero sólo produjo luz blanca con bordes coloreados. Newton tuvo éxito donde Hooke falló porque empleó un equipo superior. Hizo un agujero en una pantalla negra de ventana para dejar que un rayo de luz angosto entrara a su habitación en el colegio Trinity, en la universidad de Cambridge, y empleó un prisma de vidrio tallado con precisión, proyectando una imagen en otra pantalla a varios metros de distancia. Al permitir que hubiera suficiente espacio para que los rayos de colores se desplegaran en forma adecuada, produjo un espectro claro.

Newton llevó su dedicación a la óptica experimental más allá de los límites de la sensatez. En una narración famosa de autolesión, clavó un punzón (una aguja larga y roma) en la cuenca de su ojo, presionando hacia adentro lo más que pudo, sin romper el globo ocular, en un intento de dis-



"Si he visto más lejos, ha sido al pararme en los hombros de gigantes".

Isaac Newton, en una carta pública a Robert Hooke, escrita a insistencia de la Real Sociedad para componer, o disimular, el distanciamiento entre los dos.

torsionar la forma del globo ocular y ver si esto afectaba su percepción del color. Newton se dio cuenta de que los objetos de colores aparecen del color que tienen por la luz que reflejan. Por ejemplo, una capa roja aparece de color rojo porque refleja la luz roja, mientras que una camisa blanca refleja toda la luz. También asoció los diferentes grados de refrangibilidad con diferentes colores.

A pesar de esta admirable dedicación a la ciencia, Newton era un hombre difícil, arrogante y con argumentos. Su antagonismo hacia Hooke era obsesivo, pero no único; varias personas más causaron también su odio y fuerte crítica. La fama de Hooke pudo haber sido mayor si no hubiera tenido la mala suerte de morir antes que Newton, quien se apropió de uno de los descubrimientos de Hooke, los llamados anillos de Newton, de colores, que se ven en las películas delgadas de aceite en el agua. De hecho, en forma deliberada, Newton impidió la publicación de su propia obra sobre luz y color, *Opticks* (*Óptics*), por 30 años, y la publica después de que Hooke murió, para que de esa manera no se pudiera cuestionar su autoría.

"Tomé un punzón y lo puse entre mi ojo y [el] hueso lo más cerca que pude de la parte posterior de mi ojo; y presioné con el extremo (de manera que se hiciera [la] curvatura abcdef en mi ojo). Aparecieron varios círculos oscuros y de colores r, s, t, etc. Dichos círculos se hicieron más claros cuando continué frotando mi ojo [con la] punta del punzón, pero si mantenía mi ojo y el punzón quietos, aunque continuara presionando mi ojo [con] él, aunque [los] círculos se volvían tenues y a menudo desaparecían hasta que los eliminaba al mover el ojo o el punzón.

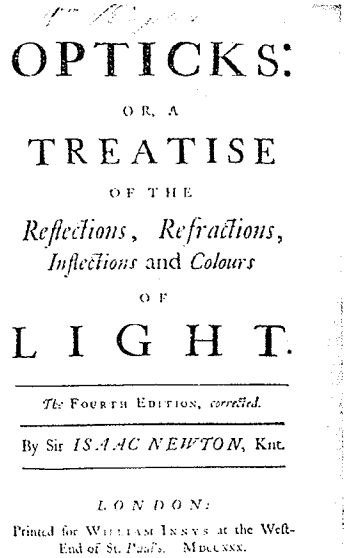
"Si [el] experimento se llevaba a cabo en una habitación iluminada de manera [que] aunque mis ojos estuvieran cerrados pasara algo de luz por sus párpados, aparecía un círculo oscuro azulado ancho y grande en la parte externa (como 'ts'), y [dentro] de eso otra mancha clara 'srs' cuyo color era muy parecido a [ese] en [el] resto [del] ojo como en 'k'. Dentro de [esa] mancha aparecía otro punto azul 'r', en especial si presionaba mi ojo con fuerza y [con] un punzón pequeño con punta. Y en la parte más exterior en 'vt' aparecía un borde de luz".

Cuaderno de notas de Newton, CUL MS Add. 3995

Micrografía de Hooke

La obra más famosa de Hooke es *Micrographia* (*Micrografía*), publicada en 1665. Fue un ejemplo maravilloso de cómo los avances en la óptica condujeron con rapidez a desarrollar en otras áreas de la ciencia, especialmente la biología y astronomía. Aunque Hooke no fue el primer microscopista, llevó al microscopio a la ciencia convencional e hizo mejorías al diseño del microscopio y del telescopio. *Micrografía* presenta dibujos de objetos, materiales orgánicos y diminutos organismos vistos a través del microscopio de Hooke. Las detalladas ilustraciones, algunas dibujadas por el arquitecto Christopher Wren, eran

innovadoras, haciendo de *Micrografía* uno de los libros de ciencia más importantes que jamás se hayan publicado. Samuel Pepys registró en su diario que estuvo sentado hasta las 2 am, leyéndolo, y que fue "el más ingenioso libro que alguna vez haya leído en mi vida".



OPTICKS:

OR, A

TREATISE

OF THE

Reflections, *Refractions*, *Inflections* and *Colours*

OF

LIGHT.

The FOURTH EDITION, *corrected*.

By Sir *ISAAC NEWTON*, Knt.

LONDON:

Printed for WILLIAM INNYS at the West-End of St. *Paul's*. MDCCXXX.

Portada del tratado de Newton sobre óptica, publicado en 1704.

¿Onda o partícula?

Es importante reconocer que la luz blanca es un compuesto de luz de colores, pero esto a su vez lleva a la pregunta de qué es la luz de colores. Opiniones divergentes respecto a si la luz está formada por partículas o si es una onda de algún tipo se encuentran en los primeros escritos hindúes sobre ciencia. En Europa, Empédocles sugería rayos y Lucrecio hablaba de partículas, y el debate continuó por siglos; Hooke, siguiendo a Descartes, adoptó el punto de vista de que la luz es una forma de onda. Era otro punto de disputa con Newton, quien escribió sobre "corpúsculos" (es decir, partículas) de luz, una idea que primero propuso Gassendi y de la que Newton leyó en la década de 1660. Newton fue tan influyente que la teoría de la onda tuvo una pobre aceptación en Bretaña por largo tiempo. Sin embargo, en otras partes de Europa, la arrogancia y la naturaleza discutidora de Newton lo hicieron impopular y, en el mejor de los casos, dañó el apoyo para el modelo corpuscular. Newton rechazó la teoría de la onda porque creía que una onda longitudinal (que vibrara en la dirección de propagación) no podría explicar la polarización. Nadie había considerado la posibilidad de las ondas transversales (que vibran en una dirección en ángulo recto con la dirección de la propagación). Newton aceptó la idea de un aether luminífero (portador de luz), un medio por el que viajaba la luz, aunque no era necesario en forma estricta para su teoría corpuscular, ya que las partículas hubieran podido viajar igual de bien a través de un vacío. Además creía que los corpúsculos de luz cambiaban entre dos fases conocidas como "reflexión fácil" y "transmisión fácil". La periodicidad también es una característica básica de la teoría de las ondas, y en esto se anticipó a la mecánica cuántica (ver la página 122). Aunque el nombre de Newton se asocia en forma íntima con la teoría

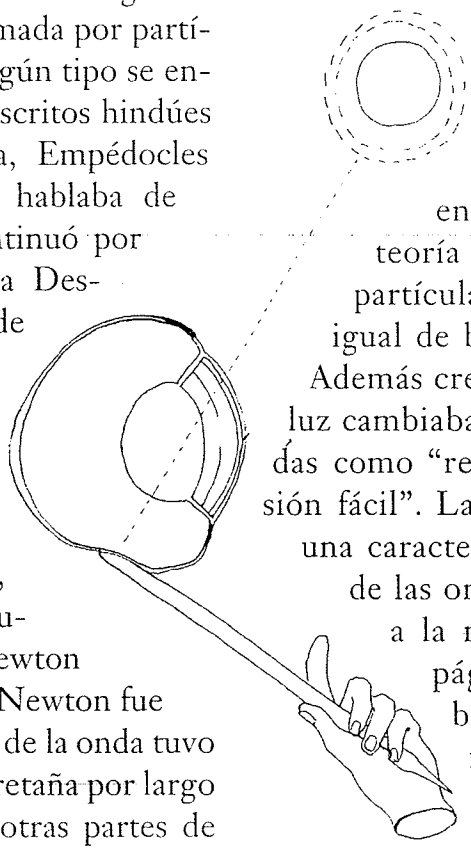


Ilustración de Opticks *de Newton de la exploración experimental de su ojo con un punzón.*

corpuscular, sus propios escritos incorporan aspectos de ambas ideas. Por ejemplo, explicó la difracción al sugerir que los corpúsculos de luz creaban ondas localizadas en el aether. Es interesante que esto lo coloque más cerca del punto de vista moderno de la "dualidad de la luz", que tiene cualidades tanto de onda como de partícula.

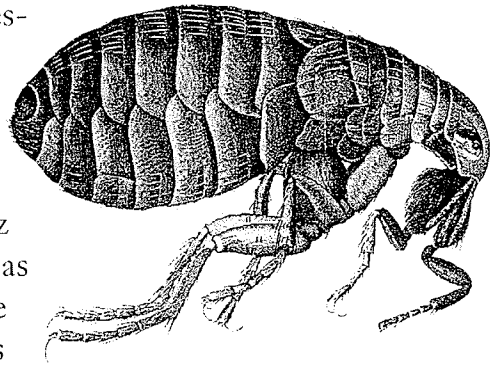


Ilustración de una pulga ampliada de Micrografía *de Hooke.*

"[Hooke] es de estatura regular, algo encorvado, de cara pálida, y su cara está un poco baja, aunque su cabeza es grande; sus ojos son rasgados y saltones, y no son rápidos, son grises. Tiene melena delicada, café, y de excelentes rizos húmedos. Es y siempre ha sido muy templado, moderado en la dieta, etcétera.

Al igual que tiene una cabeza prodigiosa e inventiva, también es una persona de gran virtud y bondad. Ahora que he hablado de que su facultad de inventiva es tan grande, no podrás imaginar que su memoria sea excelente, ya que son como dos baldes, cuando uno aumenta, el otro se reduce. Es con seguridad el mayor experto en mecánica de la actualidad en el mundo. Su cabeza se dedica mucho más a la geometría que a la aritmética. Es soltero y, creo, nunca se casará. Su hermano mayor dejó una hija hermosa, la cual es su heredera. En conclusión, (que completa todo) es una persona de gran afabilidad y bondad.

Fue el señor Robert Hooke quien inventó los relojes de péndulo, que son mucho más útiles que otros relojes.

Ha inventado un aparato para hacer con rapidez una división, etcétera, o para averiguar con rapidez el divisor".

John Aubrey, *Vidas breves*

Frentes de onda y cuantos

En Europa, Christiaan Huygens elaboró la teoría de frente de onda. Su teoría de la luz, que completó en 1678, pero que no publicó hasta 1690, se basaba en sus propios hallazgos experimentales. Como Descartes, quien había sido un visitante asiduo a la casa donde pasó su infancia, Huygens consideraba que la luz era una onda que se propagaba a través del aether. Predijo que la luz viajaría con más lentitud en un medio denso que en uno menos denso. Esto era significativo ya que, a diferencia de Descartes, estaba diciendo que la velocidad de la luz es finita.

La teoría del frente de onda de Huygens explica cómo evolucionan y se comportan las ondas cuando encuentran obstáculos (que se reflejen, se refracten o se difracten). Sugirió que cada posición en una onda se vuelve el centro de una ondícula que viaja hacia afuera en todas direcciones. En el caso de la luz, a la que consideraba un fenómeno de pulso, se emitían ondas en forma repetida y viajaban hacia afuera a la velocidad de la luz. La onda de la luz se propaga por un espacio tridimensional, en forma de una onda esférica.

En el borde de una región que alcanzan los rayos de luz, las ondículas interfieren unas con otras y pueden cancelarse entre sí. Si chocaban con un objeto opaco, par-

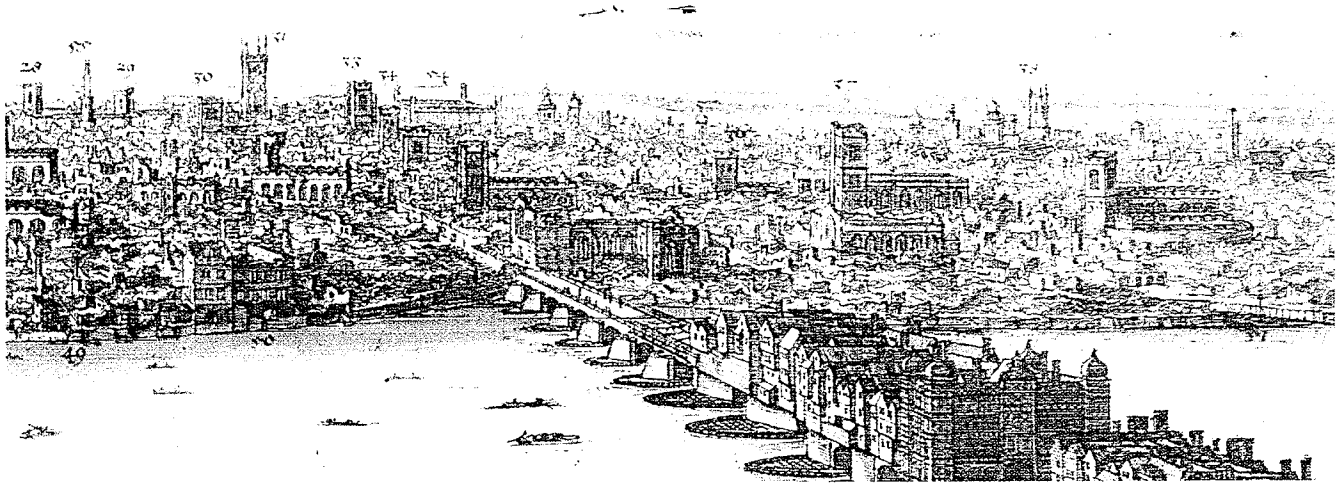


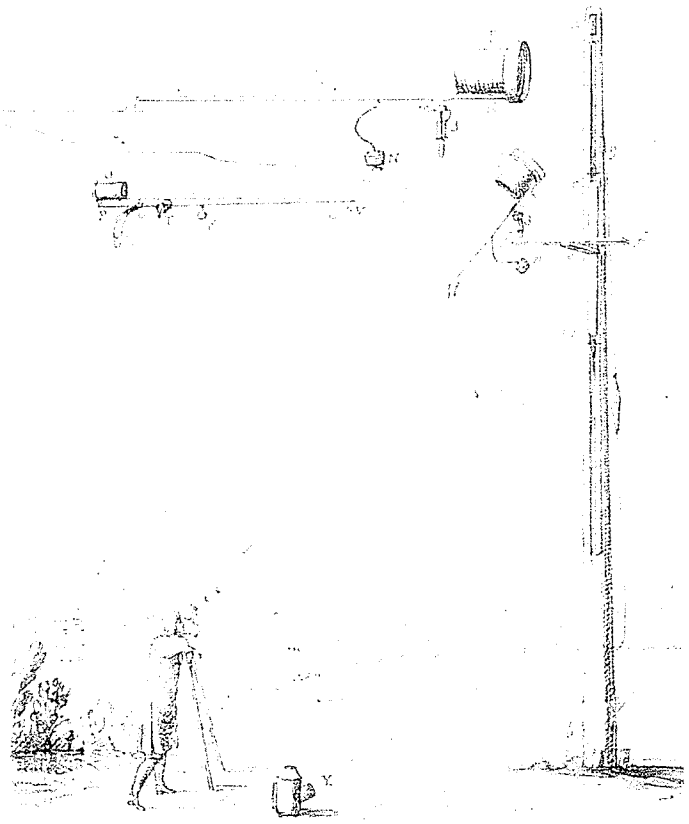
Robert Hooke (1635-1703)

Hooke nació en la isla de Wight donde su padre era cura de la iglesia de Todos los Santos, Freshwater. Hooke fue a la escuela de Westminster, en Londres, a la edad de 13 años cuando murió su padre, y luego al colegio Christ Church, en Oxford, como cantante de coro. Si hubiera sido más sano, Hooke hubiera destinado una carrera en la iglesia, pero se dedicó a la ciencia, convirtiéndose en asistente del químico Robert Boyle, en Oxford. Hooke se trasladó de vuelta a Londres en 1660 y se convirtió en miembro fundador de la Real Sociedad en 1662. Como el primer curador de la Sociedad, se encargó de demostrar "tres o cuatro experimentos significativos" cada semana. Realizó estudios extensos con su microscopio, publicando dibujos de lo que veía en *Micrografía* (1665) y acuñando el término "célula" para los componentes del tejido viviente (llamada así por los "poros" que vio en una rodaja delgada de corcho que le recordó los cuartos o "células" que ocupaban los monjes). Hooke fue uno de los dos topógrafos de Londres utilizados después de que la ciudad quedó destruida por el Gran Incendio de 1666, empleo que lo hizo rico. También construyó el hospital Real de Bethlehem, el infame asilo para dementes, mejor conocido en la actualidad como "Bedlam".

Fue un pensador ingenioso, científico experimental y mecánico; presentó innovaciones y mejorías para muchos dispositivos existentes, entre ellos la bomba de aire, el microscopio, el telescopio y el barómetro, y fue el pionero en el uso de resortes para hacer funcionar los relojes. La mayoría de sus ideas fueron mejoradas por otras personas. Hooke proporcionaba el trampolín esencial, pero recibía poco del crédito. Tenía teorías sobre la combustión y la gravedad; sugirió incluso la ley del inverso del cuadrado de la distancia en relación con la gravedad, en 1679, que fue la piedra angular de la obra de Newton en el tema. Newton nunca permitió ninguna sugerencia de superioridad o brillantez de Hooke, y la sombra del rencor de Newton negó a Hooke el lugar en la historia que merecía. No existe ni un retrato de Hooke que haya sobrevivido.

Parte del paisaje devastado de Londres después del Gran Incendio de 1666.





El telescopio aéreo de Huygens tiene una amplia longitud focal, que se logró mediante separar el objetivo y el ocular, para luego alinearlos con una cuerda.

tes de las ondículas se cortan y algunas persisten, produciendo la compleja y fina estructura de líneas en los bordes de las sombras e imágenes que forman patrones de difracción. La opinión científica se divide respecto a si Huygens descubrió el principio mediante un toque de genio o si sólo fue buena suerte y encontró la respuesta correcta por las razones equivocadas.

Durante el siglo XIX, varios científicos que trabajaban en diferentes países europeos establecieron la teoría de que la luz era una onda transversal (que vibraba en ángulo recto a la dirección de la propagación y del viaje, como una serpiente que culebrea por el suelo). En 1817, el físico francés Augustin Jean Fresnel (1788-1827) presentó su propia teoría de onda de la luz a la Académie des Sciences, y para 1821 había mostrado que la polarización sólo se podía explicar si la luz constaba de ondas transversas, sin vibración longitudinal. Esto contestaba a la objeción de principios de Newton respecto a la luz como una onda. Fresnel es más conocido como el inventor de la lente que lleva su nombre, diseñada originalmente para fortalecer el rayo que brilla de los faros.



Christiaan Huygens, 1671

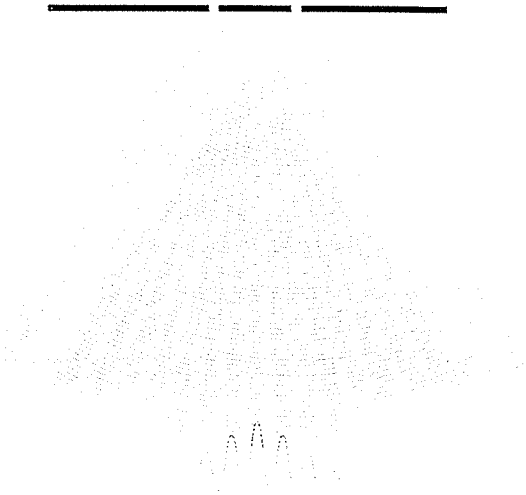
Experimento de doble ranura de Young

En 1801, Thomas Young llevó a cabo un experimento que parecía demostrar, de una vez y para siempre, que la luz era una onda. Hizo brillar la luz a través de dos ranuras que había hecho. En lugar de ver la suma de los resultados de los experimentos con ranuras individuales, como era de esperar, notó un complejo patrón de difracción, causado por



Thomas Young

la interferencia entre la luz de las dos rendijas. Entre más rendijas añadió, más complejo se volvía el patrón de interferencia. Esto demostró que la luz en verdad era una onda, ya que los valles y las crestas de las ondas se cancelaban entre sí o se reforzaban para formar los patrones de interferencia. Young también propuso que los diferentes colores de la luz son el resultado de longitudes de onda distintas, un pequeño paso hacia la comprensión que tendría lugar más adelante, en el siglo XIX, de que la luz que vemos es sólo una parte del espectro completo de radiación electromagnética, que en la actualidad se sabe que abarca rayos gamma, rayos X, luz ultravioleta, luz visible, infrarrojo, microondas, ondas de radio y ondas largas.



Modelo de interferencia cuando la luz brilla a través de dos ranuras, lo cual apoya la teoría de onda de la luz.

Un nuevo amanecer: Radiación electromagnética

Fue James Clerk Maxwell (1831-1879) quien mostró por primera vez que la radiación electromagnética consta de ondas transversales de energía que se mueven a la velocidad de la luz. Los diferentes tipos de radiación electromagnética, incluyendo las ondas de luz y de radio, se caracterizan por diferentes longitudes de onda. De hecho, el físico inglés Michael Faraday (1791-1867) ya había demostrado en 1845 la conexión entre el electromagnetismo y la luz, cuando mostró que con un campo magnético se giraba el plano de polarización de un rayo de luz (ver cuadro, página 110).

Maxwell todavía asumía que había un aether luminífero por el que todas las formas de radiación electromagnética debían moverse. El aether era diferente a todo lo demás en que era un verdadero continuo e

infinitamente divisible y no estaba formado por partículas discretas como la materia normal. No sólo el aether era infinitamente divisible, también lo eran las ondas de energía que viajaban por él. Se presentaron problemas con la teoría de Maxwell que sólo se resolverían cuando Max Planck mostró que la energía se debía emitir en cantidades diminutas, pero finitas, ahora llamados cuantos (de otra manera, por razones complejas, toda la energía en el Universo se transformaría en ondas de alta frecuencia).

Albert Einstein demostró en 1905, en su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico (ver cuadro, página siguiente) que la luz en sí se comporta como si estuviera formada por cuantos, o diminutos paquetes de energía, a los que en la actualidad se llama fotones. Utilizó lo que ahora llamamos "la constante de Planck" para relacionar la energía de un fotón con su frecuencia.

En la actualidad se considera que la luz tiene la dualidad onda-partícula: A veces se comporta como onda y a veces como partícula. Es útil tener alguna forma de predecir cuándo hará una o la otra, y la mecánica cuántica puede predecirlo (ver la página 122).

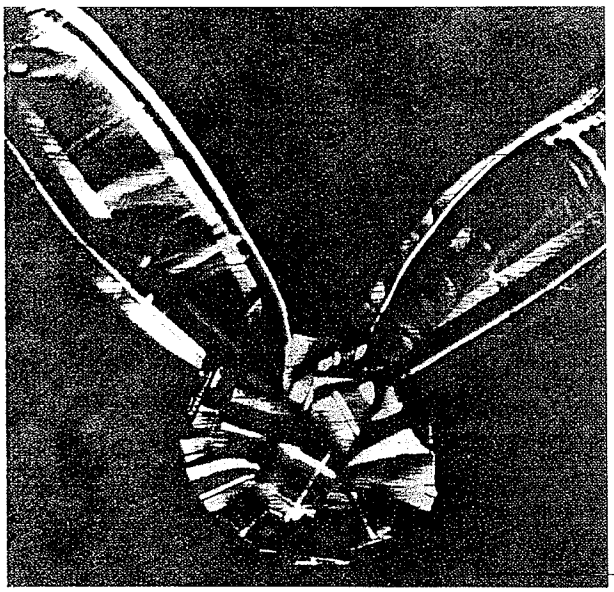


James Clerk Maxwell

El fin de un aether: El experimento Michelson-Morley

Nuestra comprensión normal de una onda es que tiene que viajar por algún medio, como aire o agua. De la misma manera, se suponía que las ondas de luz debían viajar por el aether luminífero en una forma similar.

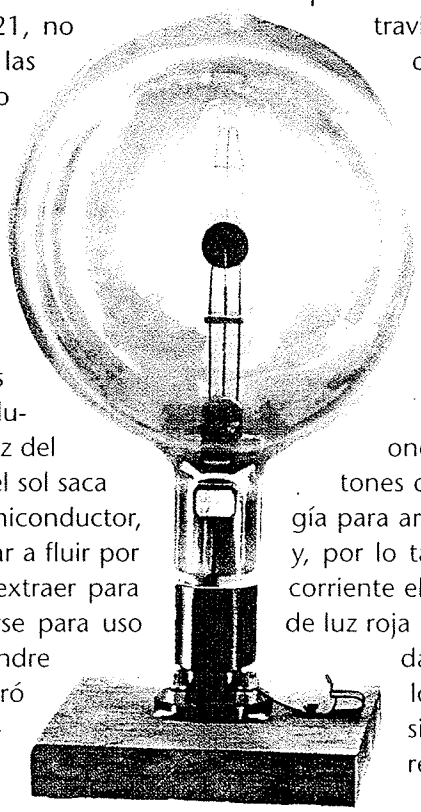
El fin del aether se dio como resultado de un experimento que llevaron a cabo en 1887 dos físicos estadunidenses, Albert Michelson (1852-1931) y Edward

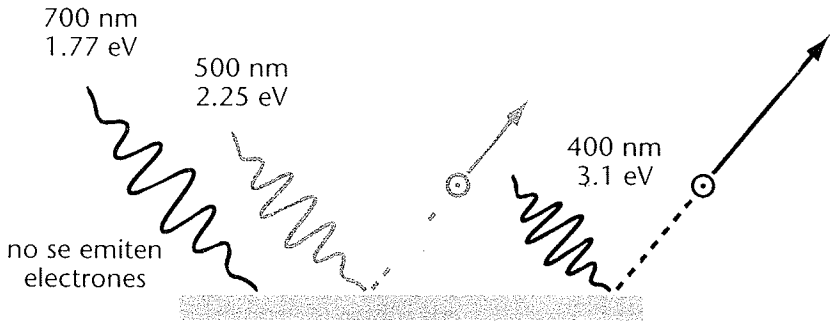


James Clerk Maxwell tomó la primera fotografía a color que jamás se produjera en 1861 y muestra un listón de tela de cuadros.

El efecto fotoeléctrico

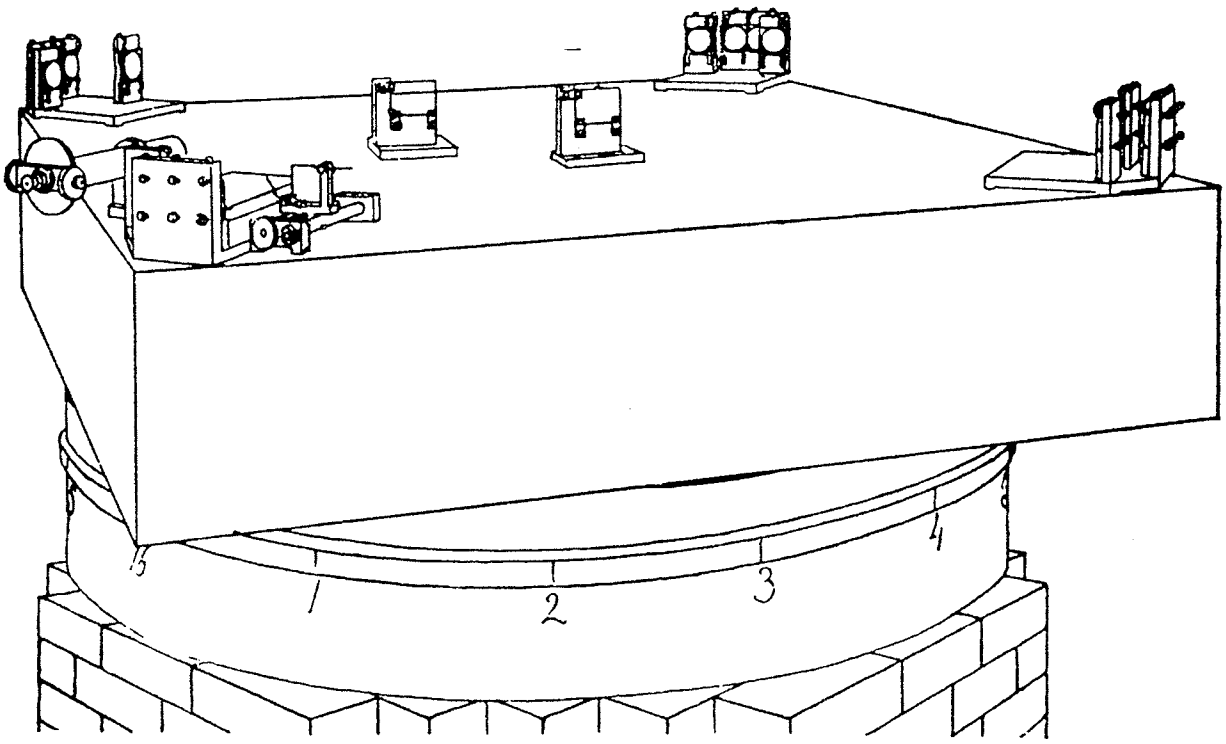
Cuando le otorgaron el Premio Nobel de Física a Albert Einstein en 1921, no fue por sus ideas más famosas, las teorías de la relatividad, sino por su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico. Él explicó cómo un fotón (aunque no se le llamaba así en esa época) a veces podía sacar a un electrón de su órbita en un átomo, produciendo una diminuta ráfaga de energía. Así es como los paneles de energía solar producen electricidad a partir de la luz del sol. Los electrones que la luz del sol saca de una pieza de material semiconductor, como el silicio, se pueden forzar a fluir por un cable, y luego se pueden extraer para hacer trabajo útil o almacenarse para uso posterior. El físico francés Alexandre Becquerel (1820-1891) registró por primera vez el efecto fotoeléctrico en 1839. Observó que cuando se hace brillar luz azul o luz ultravioleta en ciertos metales, se produce una corriente eléctrica, pero no sabía cómo funcionaba. Einstein tomó la idea de Max Planck de los cuantos, que al principio se aplicó a la energía de los átomos, y la empleó para describir pequeños paquetes de energía de la luz: Los fotones. La cantidad de energía que un fotón representa depende de la longitud de onda de la luz. Mientras que los fotones de luz azul tienen suficiente energía para arrancar a un electrón de su órbita y, por lo tanto, liberarlo, produciendo una corriente eléctrica en el proceso; los fotones de luz roja no lo hacen. Aumentar la intensidad de la luz roja no ayuda, ya que los fotones individuales de luz roja simplemente no son capaces de realizar el trabajo.





Potasio: se necesitan 2.0 eV para expulsar un electrón

Los fotones que caen en la superficie sólo arrancarán un electrón si tienen suficiente energía; la luz roja no producirá corriente, pero la luz azul o verde lo hará.



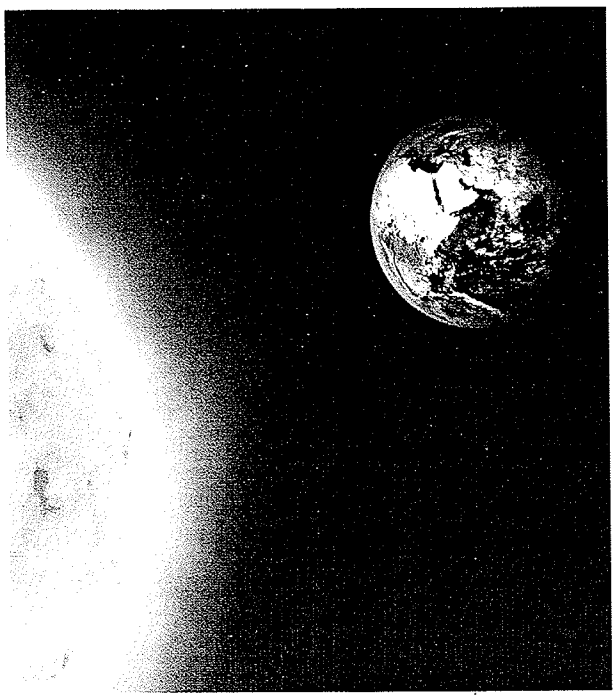
El equipo de Michelson-Morley para medir la velocidad de la luz se diseñó con la intención de demostrar la existencia del aether.

Morley (1838-1923). Si existía el aether, supusieron los científicos, debía llenar el espacio, ya que llevaba la luz del sol y las estrellas a la Tierra. En 1845, el físico británico George Gabriel Stokes (1819-1903) había sugerido que como la Tierra se mueve a gran velocidad por el espacio, debía producirse un efecto por el arrastre de nuestro planeta mientras pasa por el aether. En cualquier punto de la superficie de la Tierra, la velocidad y dirección del "viento" de aether variaría dependiendo del tiempo, del día y del año, así que sería posible detectar el movimiento de la Tierra en relación con el aether al examinar la velocidad de la luz en diferentes tiempos y diferentes direcciones.

Michelson y Morley construyeron un equipo para medir la velocidad de la luz, de forma tan precisa que detectaría el efecto del aether si estuviera presente. Este aparato dividía un rayo de luz en dos rayos que viajaban en ángulo recto, uno con respecto al otro hacia dos espejos. Los rayos se reflejaban de ida y vuelta por una distancia de 11 metros antes de que se recombinaran en un ocular. Si la Tierra estaba viajando por el aether, el rayo que se movía en paralelo con el flujo del aether tomaría más tiempo para volver al detector, que el rayo que se movía perpendicular al aether. Si un rayo viajaba con más lentitud que el otro, esto se mostraría en los márge-

"[El aether] es la única sustancia en que confiamos en la dinámica. De algo estamos seguros, y es en la realidad y sustancialidad del aether luminífero".

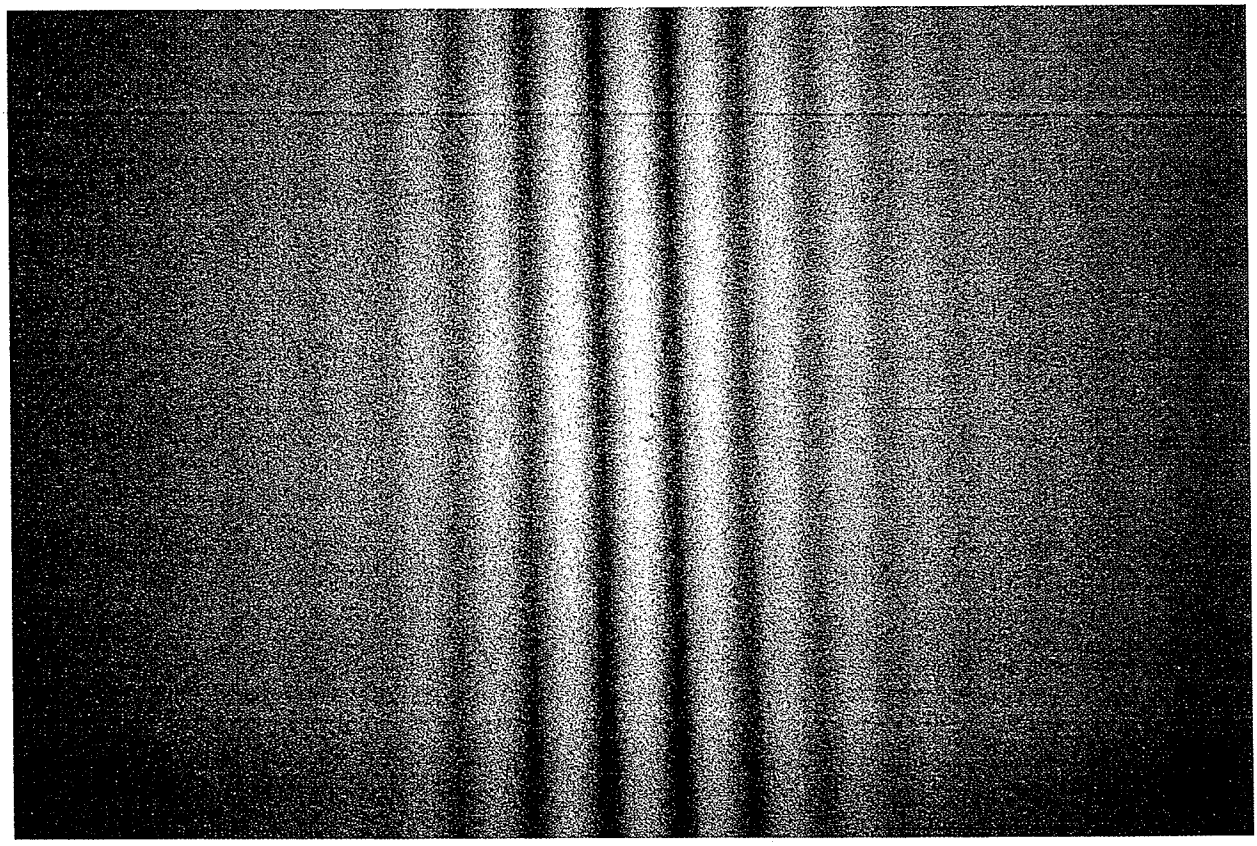
William Thomson, lord Kelvin, 1884



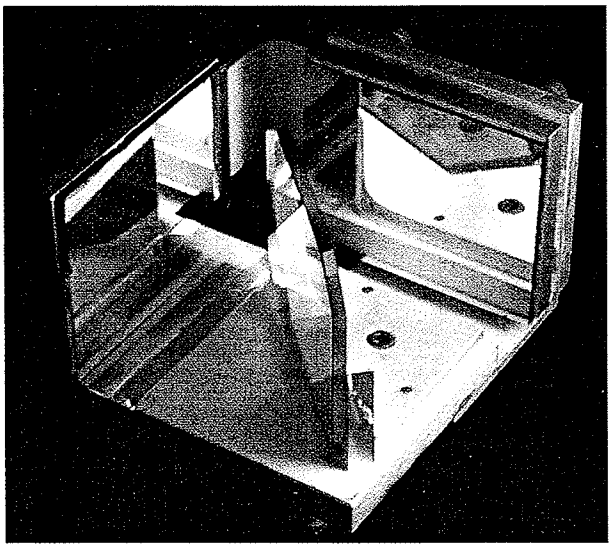
Los primeros científicos no podían ponerse de acuerdo acerca de si la Tierra cuelga en el espacio vacío o se mueve a través de un aether.

nes de interferencia que se produjeran cuando los rayos se recombinaran. El aparato completo se construyó con un bloque de mármol, flotando en un baño de mercurio, construido en el sótano de un edificio para eliminar tanto como fuera posible cualquier vibración que pudiera interferir con los resultados. El equipo era lo bastante sensible para detectar el efecto que se esperaría si la Tierra en verdad estuviera sujeta al viento del aether. Cuando no mostró resultados positivos estadísticamente relevantes, Michelson y Morley tuvieron que informar que su experimento fue un fracaso. Otros siguieron para per-

Se puede emplear el interferómetro de Michelson (ver página 58) para producir interferencia de colores a partir de la luz blanca.

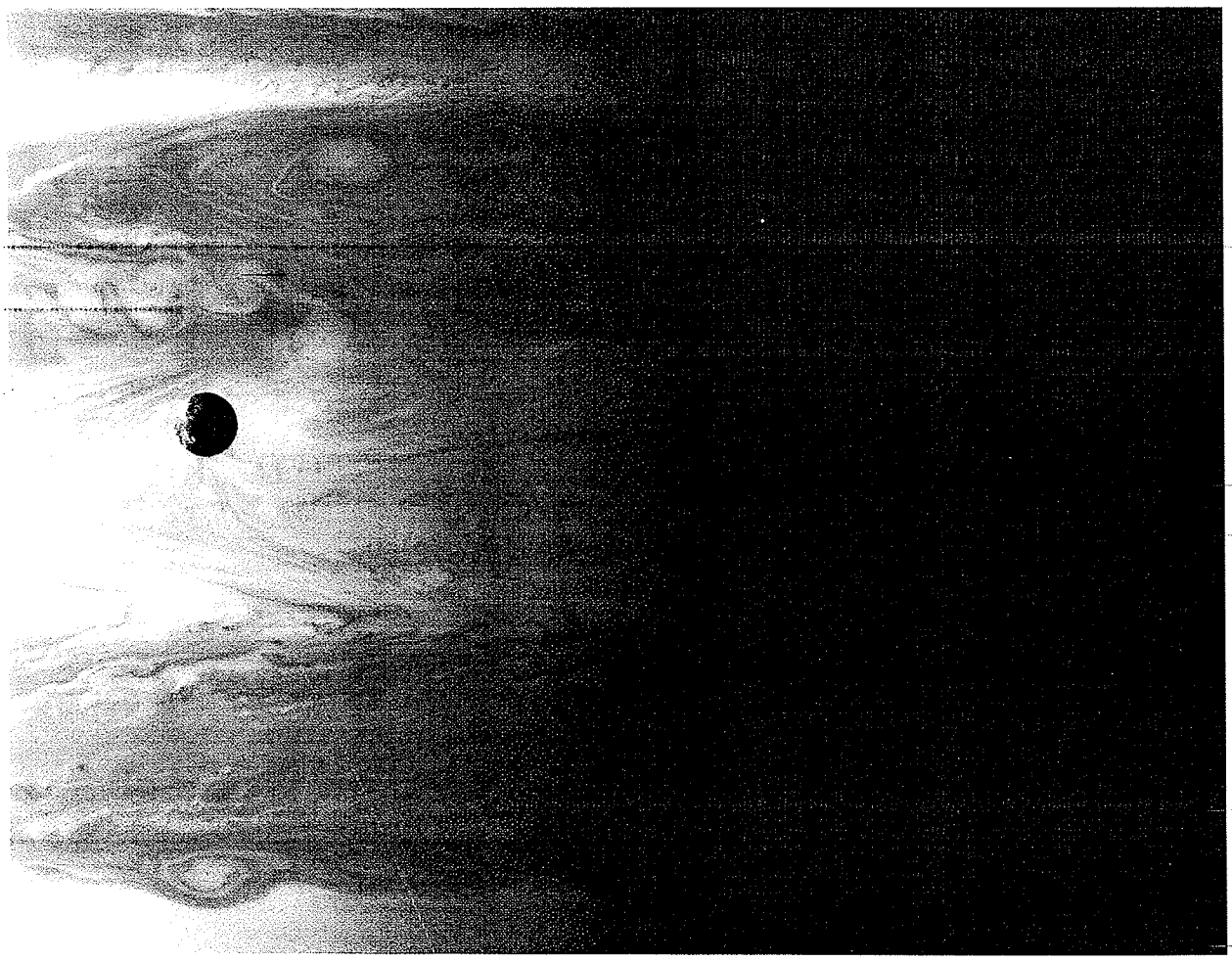


El interferómetro de Michelson funciona dividiendo un rayo de luz en dos, luego reflejando y recombinando los rayos resultantes.



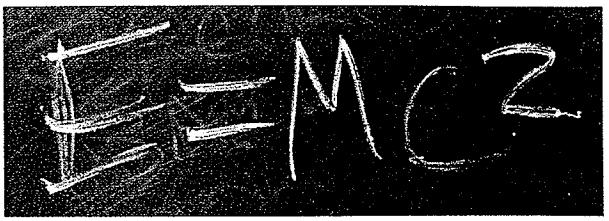
feccionar el aparato, pero de todos modos no encontraron evidencia de aether. Por supuesto, el experimento de Michelson y Morley no había fallado. Había mostrado que no existía aether luminífero. Por desgracia, la conclusión de Michelson no fue que no había aether, sino que era correcto el modelo de un aether estacionario que impartiera arrastre a la luz (la hipótesis de arrastre del aether) propuesto por Augustin-Jean Fresnel.

Júpiter y su luna Ío; los eclipses de Júpiter por sus lunas convencieron a Huygens de que la luz viajaba a una velocidad finita.



C

La velocidad de la luz se representa por la letra "c" (como en $E=mc^2$), que representa la palabra latina *celeritas*, que significa rapidez o velocidad.



A la velocidad de la luz

Ya desde *aprox.* 429 a.C., Empédocles creía que la luz viajaba a una velocidad finita, incluso a pesar de que parecía llegar al instante. Sin embargo, era una excepción notable entre los pensadores antiguos, ya que la mayoría estaba de acuerdo con Aristóteles en que la velocidad de la luz era infinita. Los científicos árabes Avicena y Al-Haytham estaban de acuerdo con Empédocles, al igual que Roger y Francis Bacon. Pero el punto de vista prevalente, incluso en la Europa del siglo XVII, y que sostenía Descartes, era que la luz viajaba a una velocidad infinita.

El primer intento de desafiar esta suposición y medir la velocidad de la luz lo realizó Galileo en 1667, empleando un método muy primitivo. Galileo y un asistente parados a 1.6 kilómetros de distancia se turnaron en cubrir y descubrir linternas y tomar el tiempo de cuánto les tomaba notar la luz. Tal vez fue una buena medición de la velocidad de sus reacciones más que otra cosa. Galileo llegó a la conclusión de que si la velocidad de la luz no era infinita, con seguridad era muy rápida, tal vez al menos diez veces la velocidad del sonido, el cual había medido por primera vez el filósofo y matemático francés Marin Mersenne (1588-1648) en 1636.

La convicción de Huygens de que la luz viaja a una velocidad finita se produjo después de las observaciones que hizo el científico danés Ole Rømer (1644-1710), que trabajaba con el astrónomo nacido en Italia Giovanni Cassini (1625-1712) en París, después de ver eclipses de las lunas de Júpiter. Cassini y Rømer notaron que aunque los eclipses debían ocurrir a intervalos regulares, no siempre se presentaban a tiempo, y la variación dependía de la posición de la Tierra en relación con Júpiter. Llegaron a la conclusión de que cuando la Tierra está más lejos de Júpiter, vemos el eclipse más tarde porque le toma más tiempo a la luz llegar a la Tierra. Cassini afirmó en 1676 que las discrepancias en los tiempos aparentes de estos eclipses se podían explicar si la luz viajaba a una velocidad finita. Continuó calculando que le tomaría alrededor de diez u once minutos a la luz viajar del Sol a la Tierra. Sin embargo, no continuó el tema y le faltó a Rømer calcular la velocidad de la luz con precisión. Predijo con exactitud el momento exacto de un eclipse de Ío en 1679, diciendo que tendría lugar diez minutos después de lo que todos esperaban. Traba-

jando con el mejor cálculo del diámetro de la órbita de la Tierra, calculó la velocidad de la luz como 200 000 kilómetros por segundo. Empleando la cifra actual de la órbita de la Tierra en la fórmula de Rømer da 298 000 kilómetros por segundo, lo cual es notablemente cercano al valor moderno de 299 792. 548 kilómetros por segundo. (Esta velocidad no va a cambiar por trabajos futuros, ya que la longitud de un metro se estableció como la distancia que la luz viaja en 1/299 792 458 de segundo.

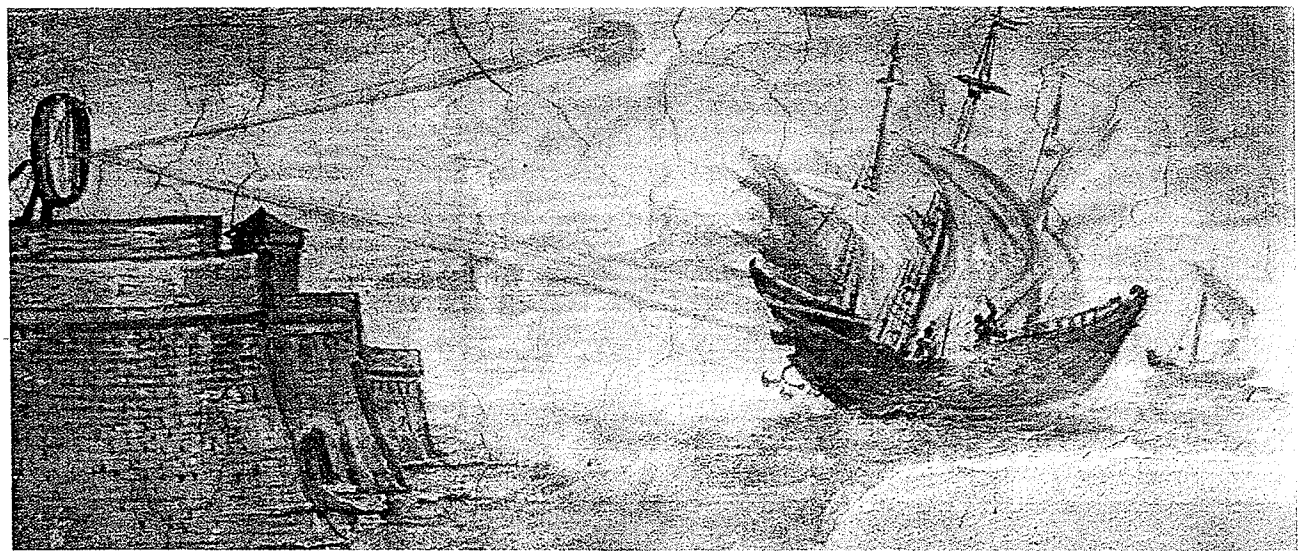
En 1678, Huygens empleó el método de Rømer para mostrar que la luz requiere un periodo de segundos para viajar de la luna a la Tierra. Newton afirmó en los *Principia* (*Principios*) que la luz requiere siete u ocho minutos para llegar a la Tie-

El rayo de calor de Arquímedes

De acuerdo a la tradición, el científico, matemático e ingeniero griego Arquímedes (*aprox.* 287 – *aprox.* 212 a.C.) erigió una disposición parabólica de espejos en la playa para usar la luz del sol e incendiar los barcos enemigos durante el Sitio de Siracusa (*aprox.* 214 - 212 a.C.). Un experimento en 1973 en una base naval cerca de Atenas empleó 70 espejos recubiertos de cobre de 1.5 metros por 1 metro para dirigir la luz del sol a un modelo de barco de guerra romano de madera contrachapada, pintado con alquitrán a unos 50 metros de distancia. El barco explotó en llamas en segundos. Un experimento similar en 2005 de un grupo de estudiantes del Instituto Tecnológico de Massachusetts también incendió un modelo de barco en condiciones climáticas perfectas.

Aunque esta técnica, como usar lentes convexas para iniciar un fuego, parece usar la luz, por supuesto, no es la luz blanca visible la que incendia los barcos o provoca fuegos, sino la radiación infrarroja invisible (calor) que acompaña a la luz del sol.

Arquímedes quema un barco enemigo con el uso de un espejo; de hecho, ¡se necesitó más de un espejo!





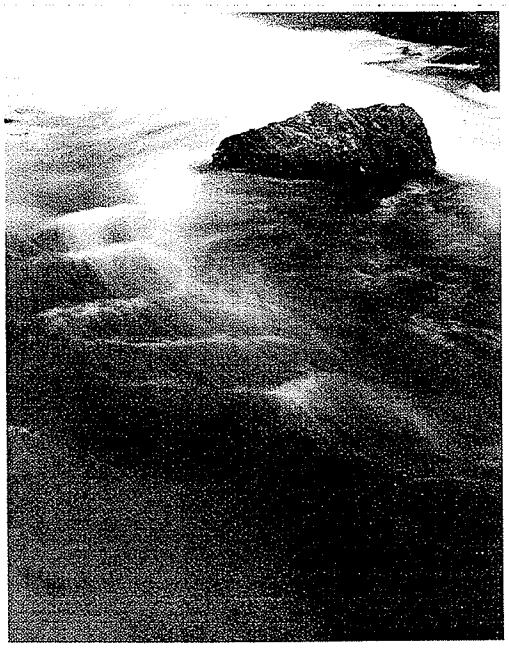
rra desde el Sol, lo cual está muy cerca de la cifra real de 8 minutos, 20 segundos, en promedio.

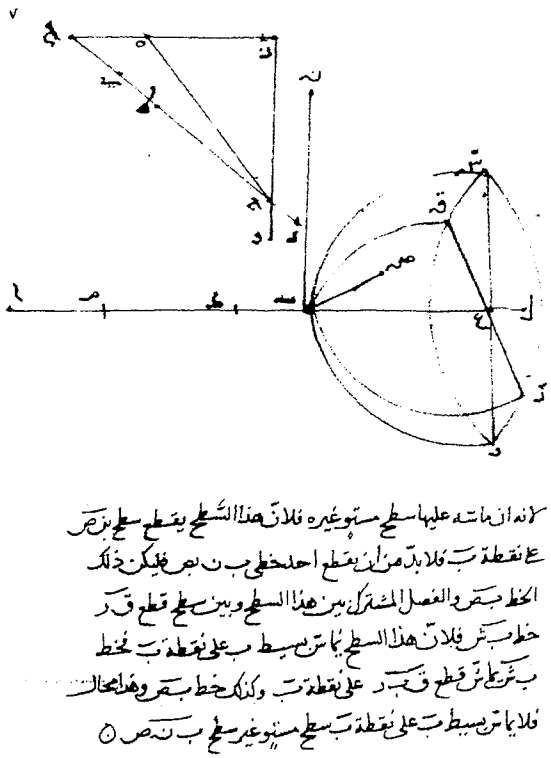
Newton y otros supusieron que la velocidad de la luz variaba dependiendo del medio por donde viajara. Si la luz consistiera de partículas, esto tendría sentido. Si la luz fuera una onda, no sería por fuerza así. No todos estaban convencidos con los cálculos de Huygens, y la opinión de si la luz viajaba a una velocidad finita siguió dividida hasta que el astrónomo inglés James Bradley (1693-1762) decidió la cuestión de una vez por todas en 1729. Descubrió la aberración de la luz (también llamada aberración estelar). Es el fenómeno de una estrella que parece describir un pequeño círculo alrededor de su posición real como resultado de la velocidad de la Tierra (velocidad y dirección) en relación con la estrella. Su estudio requirió más de 18 años para completarse.

Después, dos franceses recrearon el experimento de Galileo con lámparas y sirviente, pero en una forma bastante más sofisticada. En 1849, el físico Hippolyte Fizeau (1819-1896) empleó dos linternas y una rueda que giraba con rapidez, con dientes que en forma alterna mostraban y ocultaban la luz, y un espejo para reflejarla de vuelta. La luz sólo podía brillar de vuelta a través del mismo hueco si volvía con suficiente rapidez, así que su velocidad se podía calcular a partir de la velocidad de rotación de la rueda. Al hacer girar una rueda con cien dientes varias veces por segundo, pudo medir la velocidad de la luz hasta aproximadamente 1600 kilómetros por segundo. Léon Foucault (1819-1868), por el péndulo, empleó un principio similar. Hizo brillar un rayo de luz en un

Manto de invisibilidad

Durante la década de 1990, los científicos elaboraron meta-materiales con un índice de refracción negativo. El índice de refracción de un material determina cuánta de la luz que entra en él será refractado. Un vacío tiene 1 como índice de refracción, y los materiales más densos tienen índices más altos. En 2006, se emplearon meta-materiales en el primer dispositivo de encubrimiento, haciendo que un objeto parezca invisible a las microondas. Las partículas de meta-material deben ser más pequeñas que la longitud de onda de la luz, de manera que la luz fluya alrededor de ellas, como el agua que fluye alrededor de una piedra en una corriente. Hasta el momento, no se ha perfeccionado un dispositivo de invisibilidad que funcione con ondas de luz y que tenga más de unos cuantos micrones de diámetro.





El manuscrito original que presenta la explicación de la ley de la refracción de Ibn Sahl, aprox. *984.*

espejo giratorio que se inclinaba, luego lo rebotaba de vuelta a un segundo espejo ubicado a 35 kilómetros de distancia. Como cambiaba el ángulo del espejo giratorio, pudo calcular el ángulo en que se refleja la luz que y por lo tanto, determinar qué tan lejos se había movido el espejo y cuánto tiempo había pasado. En 1864, Fizeau sugirió que "se usara la longitud de una onda de luz como estándar de longitud", y al redefinir el metro en términos de la velocidad de la luz, eso se pudo lograr.

Einstein basó sus teorías de la relatividad en la observación de que la velocidad de la luz es constante en todo el Universo.

Recta y sin desviaciones

Anaxágoras ya tenía la certeza en el siglo V a.C. de que la luz viaja sólo en líneas rectas. Esta creencia se mantuvo hasta el siglo XX, cuando Einstein dijo que la gravedad podía doblar a la luz a un camino curvo. Sin embargo, estaba claro para los antiguos que se puede hacer que la luz cambie de dirección, por ejemplo, cuando se refleja, o cuando se refracta mientras pasa de un medio a otro. Ptolomeo presentó una explicación aproximada de la refracción, y en 984 la describió el físico persa Ibn Sahl (*aprox.* 940 – 1000 a.C.).

Sin embargo, la ley matemática que explica y predice el ángulo de refracción se conoce como Ley de Snell en honor al astrónomo holandés Willebrord Snellius (1580-1626). Aunque Snellius redescubrió la relación en 1621, no la publicó. Descartes publicó en 1637 una prueba de dicha ley. La Ley de Snell funciona porque la luz sigue el camino más rápido a través de cualquier sustancia, como lo mostró el matemático francés Pierre de Fermat (1601-1665).

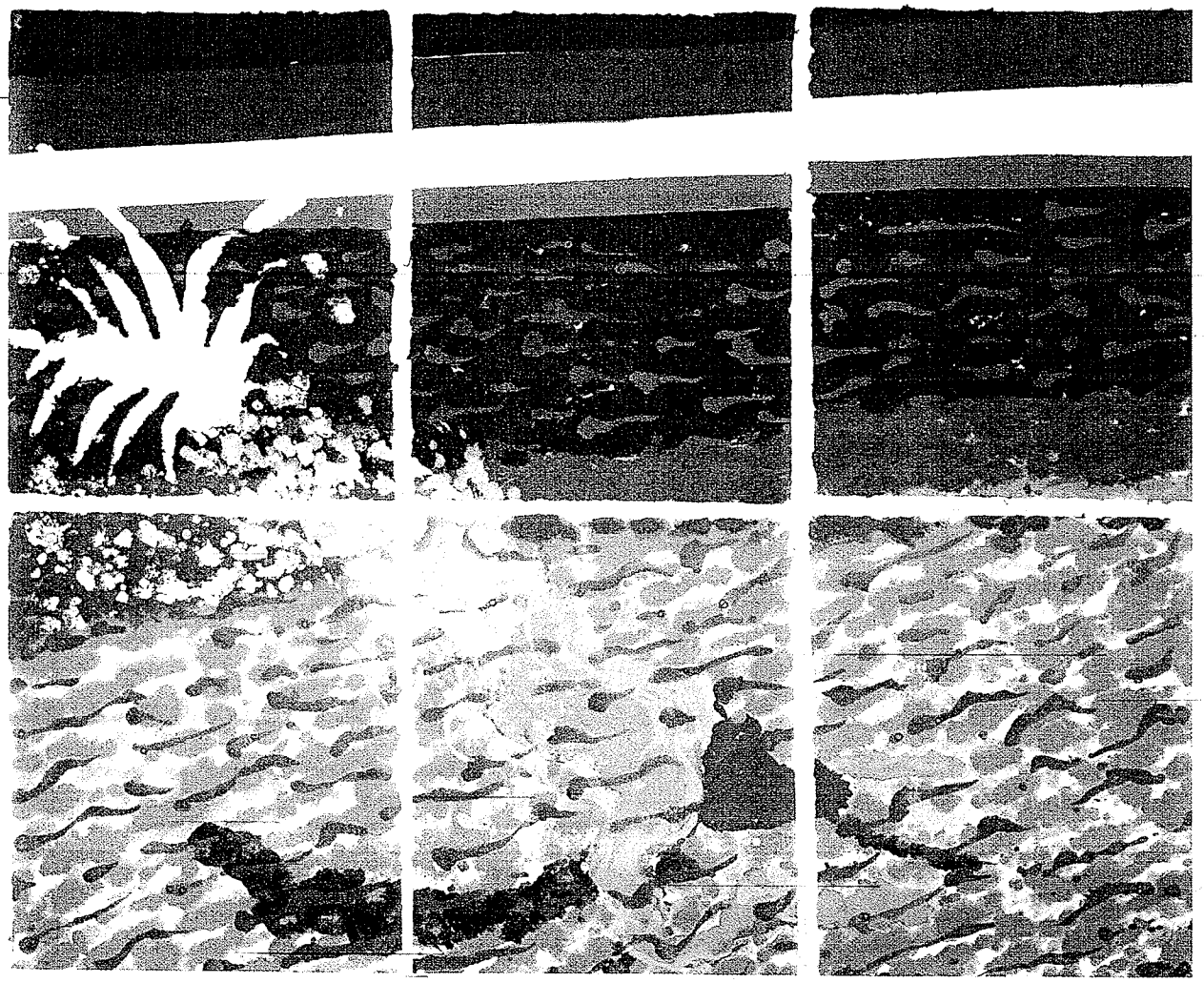
Que la luz sigue un camino curvo se confirmó por primera vez a principios del siglo XX como parte de una demostración de la teoría de la relatividad de Einstein.

El astrónomo Arthur Eddington dirigió una expedición británica a la Isla de Príncipe, cerca de la costa de África, para aprovechar un eclipse solar total visible en 1919. La expedición fotografío las estrellas que se encontraban cerca de la posición del sol que de otra manera estarían ocultas por la luz del sol. Una estrella que en realidad estaba detrás del sol y que por eso no se hubiera podido ver, era visible con claridad en una de las fotografías que

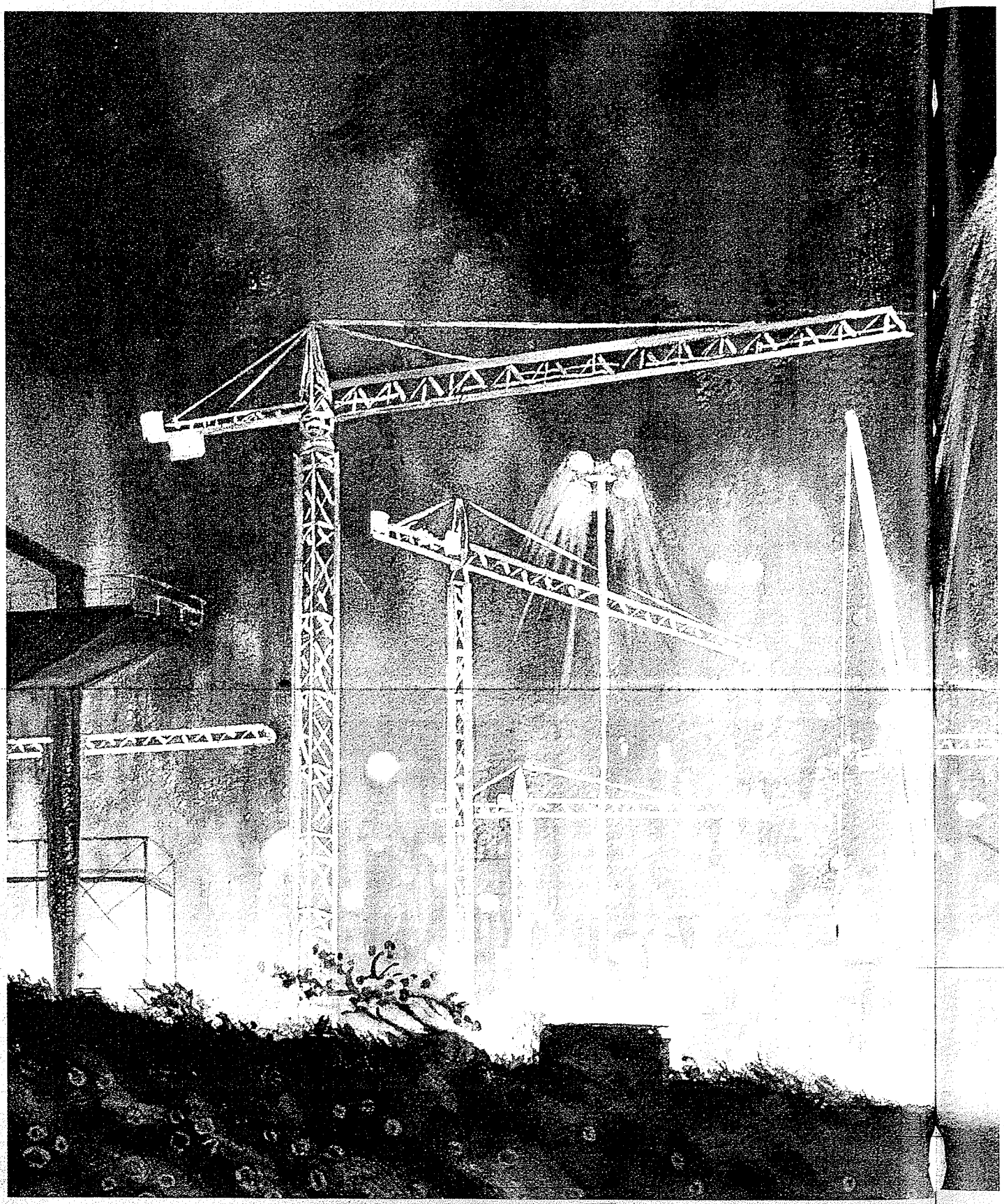
Eddington tomó. Esto demostraba que la luz de la estrella había sido doblada por el campo gravitacional del sol, y que esto había alterado la posición aparente de la estrella a un punto en que ahora era visible.

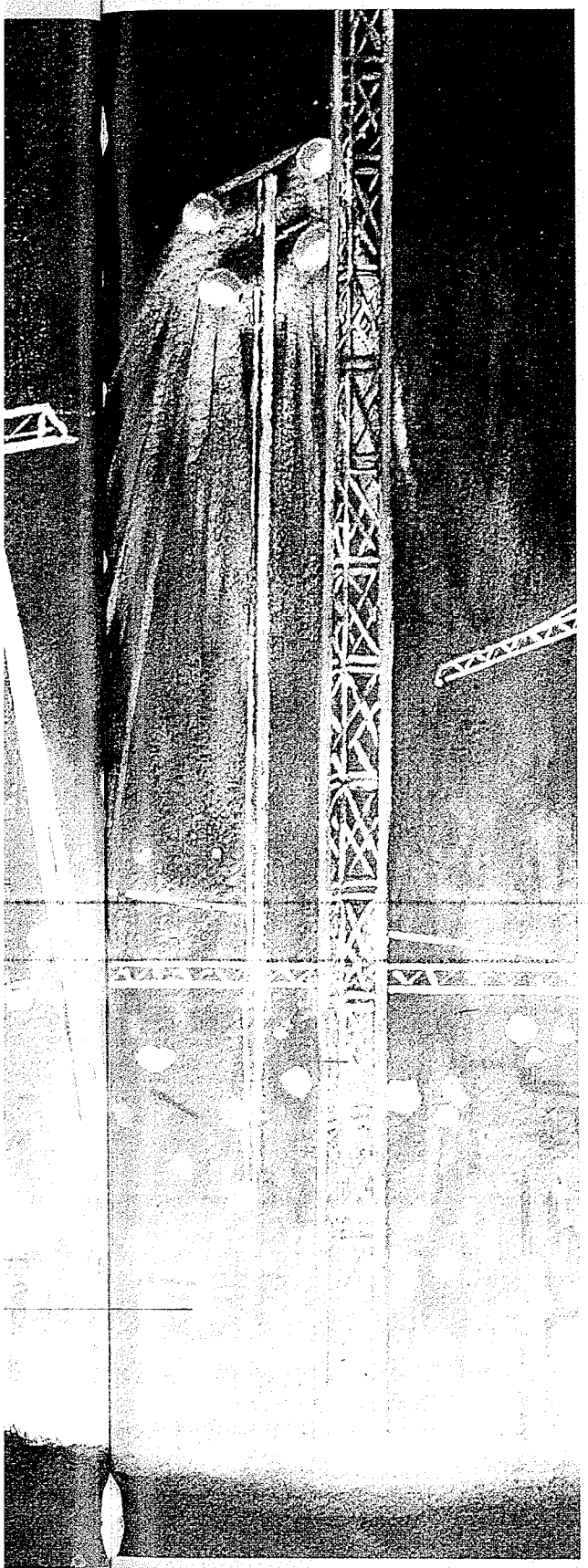
El lugar de la luz en el espectro de radiación electromagnética

La luz ha ocupado un lugar especial en la historia de la física, ya que es visible y representa una enorme diferencia para la humanidad. Pero como demostró la obra de Maxwell, la luz visible es sólo una forma de radiación electromagnética. Todas las formas se mueven a la velocidad de la luz, todas son formas cuánticas de energía (es decir, pueden existir como partículas u ondas), pero la luz visible es la única que vemos. No se hicieron intentos antiguos por distinguir entre el calor del sol (o su radiación infrarroja) de su luz visible. Otras formas de radiación electromagnética, como rayos X, ondas de radio y microondas, no se descubrieron hasta finales del siglo XIX.



El artista David Hockney realizó una serie de pinturas de alberca en las que jugó con la refracción y la reflexión de la luz que tocaba el aire y el agua.



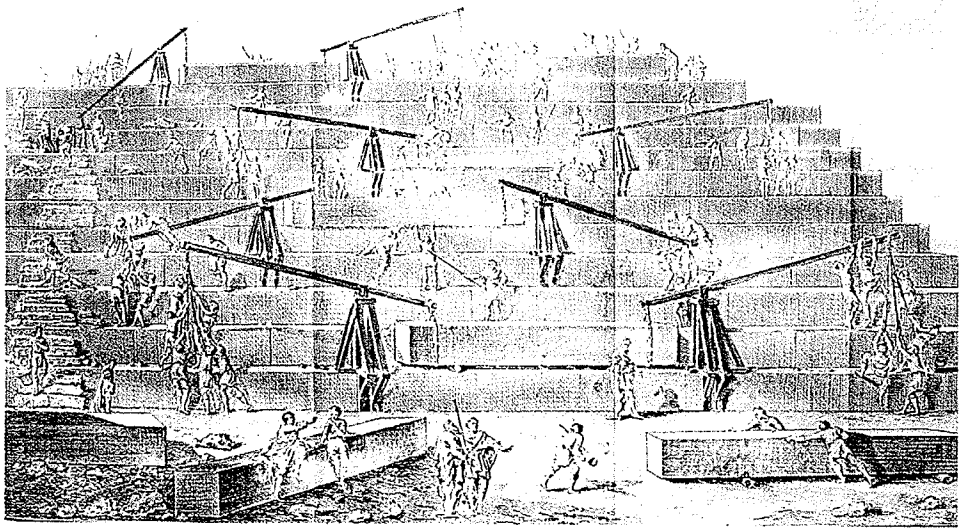


CAPITULO 3

MASA EN MOVIMIENTO: **MECÁNICA**

Mecánica es el término empleado para describir la forma en que los cuerpos actúan cuando están sujetos a fuerzas. La mecánica clásica empezó en serio cuando Newton describió sus tres leyes del movimiento. Se ocupa de las acciones de los cuerpos y la materia de todo tipo y tamaño por encima de lo atómico, desde cojinetes de bolas hasta galaxias, incluyendo líquidos, gases y sólidos, objetos inanimados y partes de organismos vivos. La gente daba un uso práctico a las fuerzas físicas mucho antes de que tuvieran la mínima comprensión de ellas, o incluso que empezaran a preguntarse respecto a las leye que las gobiernan. Los constructores más antiguos utilizaron palancas y rodillos para mover grandes bloques de piedra, emplearon la gravedad para dejar caer objetos a un lugar y para revisar la perpendicular con plomadas.

La utilización de la energía mecánica ha permitido el desarrollo del mundo moderno.



Los antiguos egipcios pudieron emplear dispositivos mecánicos, como palancas y rodillos, para ayudarse a mover los bloques de piedra necesarios para construir las pirámides.

Mecánica en acción

Siempre que utilizamos las fuerzas que actúan en la materia, estamos empleando leyes mecánicas para que trabajen para nosotros. Los constructores egipcios de las pirámides (por lo que sabemos) no tenían comprensión de las fuerzas implicadas en mover bloques de piedra para construir las pirámides, y tampoco los arquitectos de los complejos sistemas de irrigación empleados en Sri Lanka tenían conocimiento formal de la dinámica de los fluidos. Sin embargo, ambas culturas pudieron, mediante la experimentación, por ensayo y error, utilizar las leyes de la física para su beneficio.

El Creciente Fértil es una área que se extiende desde el Mediterráneo hasta el golfo Pérsico. Contiene toda la tierra que

Ingeniería e hidráulica antigua en acción

Los ingenieros hidráulicos en Sri Lanka construyeron complejos sistemas de irrigación en el siglo III a.C. El sistema se fundó con la invención del *biso-kotuwa*, similar a una moderna torre de toma, la cual regula el flujo hacia afuera del agua. Enormes reservas de agua de lluvia en diques, embalses, canales y represas proporcionaban suficiente agua para sustentar al pueblo cingalés de Sri Lanka, con una dieta basada en el arroz. El primer tanque de agua de lluvia se construyó durante el gobierno del rey Abhaya (474-453 a.C.). En los siglos posteriores se construyeron sistemas mucho más sofisticados y extensos, comenzando durante el gobierno del rey Vasaba (65 - 108 d.C.). Sus ingenieros construyeron doce canales de irrigación y once tanques, los más grandes eran de 3 kilómetros de ancho. Sus mayores logros se llevaron a cabo bajo el gobierno del rey Parakrambahu el Grande (1164-1196 d.C.), cuando ingenieros cingaleses lograron un gradiente continuo de 20 centímetros por kilómetro en canales de irrigación que se extendían por alrededor de 80 kilómetros.

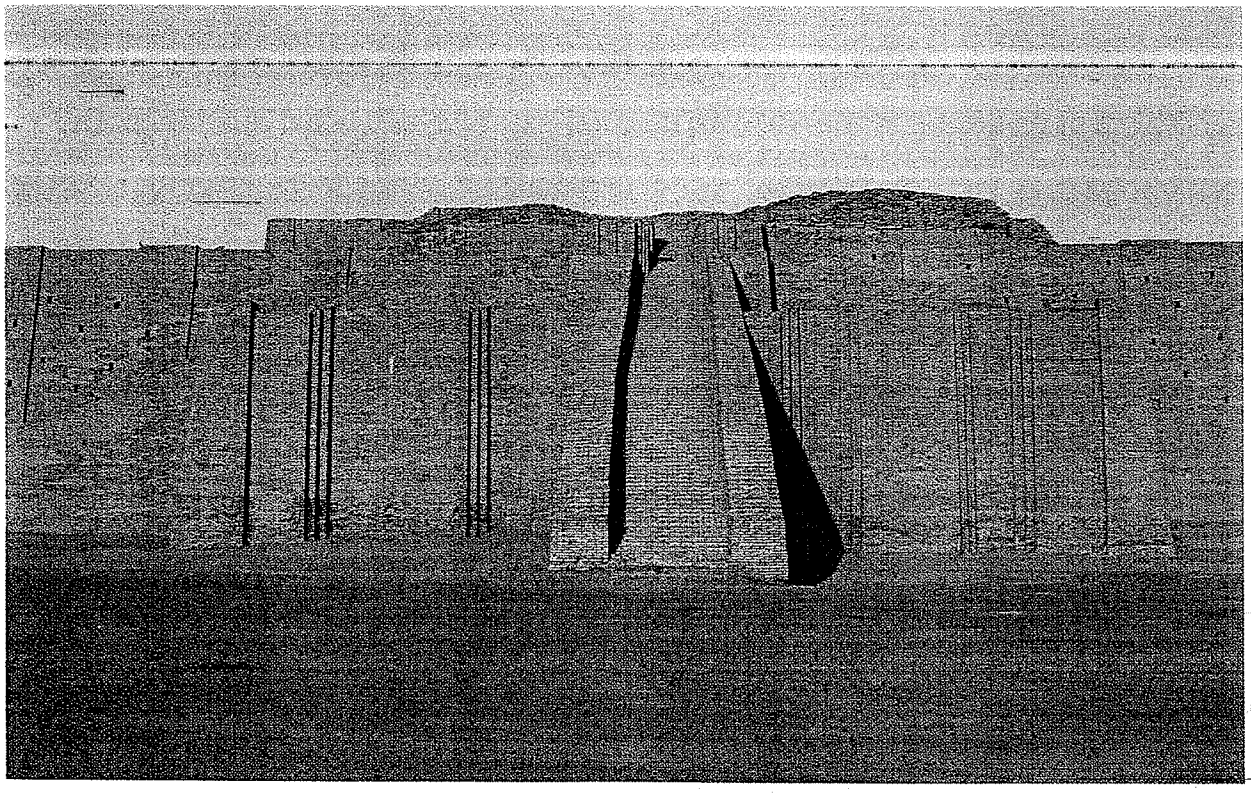
se encuentra entre los ríos Tigris y Éufrates que los griegos conocían como Mesopotamia ("entre dos ríos") que incluye áreas que en la actualidad son Siria e Irak. La agricultura se desarrolló en esta área hace aproximadamente 10 000 años, y para el 5000 a.C., los sumerios habían construido las primeras ciudades, empleando métodos para cortar, mover y apilar vastos bloques de piedra. Los sumerios también inventaron la rueda, dominando así las fuerzas físicas en una nueva forma. Conforme crecía la población, el pueblo de Mesopotamia hizo el primer uso práctico de la dinámica de fluidos, desarrollando sistemas de irrigación para regar sus granjas en el milenio VI a.C.

El agua que corre se puede emplear para mucho más que sólo nutrir las cosechas. Tiene su propia fuerza y la presión que ejerce se puede emplear para hacer trabajo útil. El primer uso conocido del agua para proporcionar fuerza motriz fue en la antigua China, cuando Zhang Heng (78-139 d.C.) empleó agua para dar fuerza y hacer girar una esfera armilar (un globo empleado en astronomía para determinar las posiciones de las estrellas). Du Shi, en 31 d.C., empleó una rueda de agua para impulsar los fuelles en un alto horno que producía hierro fundido.

Mecánica de los antiguos griegos

Aunque las primeras civilizaciones dieron un uso práctico a la mecánica, no tenemos registro de pensamiento sistemático o de

El Gran Zigurat de Ur (ahora en Irak) se construyó hace alrededor de 4000 años y representa una hazaña considerable de ingeniería.



"Dénme un punto de apoyo y moveré la Tierra".

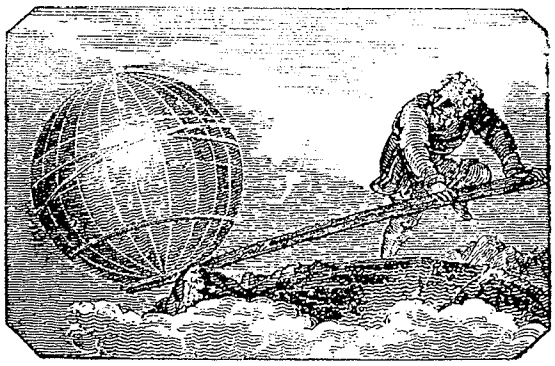
Arquímedes

Las invenciones de Arquímedes

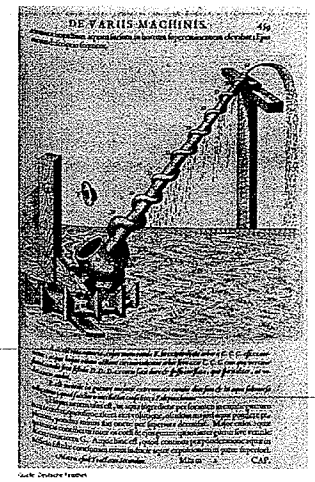
Arquímedes dio un uso práctico y apropiado a su conocimiento de la mecánica. El rey Hierón II lo comisionó para diseñar un barco enorme, el primer buque de lujo en la historia, capaz de transportar a 600 personas y con instalaciones que incluían decoraciones de jardín, gimnasio y un templo dedicado a Afrodita. Para bombear hacia afuera el agua que se filtrara en el casco, se dice que desarrolló el tornillo de Arquímedes, una hoja giratoria con forma de tornillo que se ajustaba dentro de un cilindro y que se hacía girar con las manos. El mismo diseño se adaptó para transferir agua de una fuente baja a canales de irrigación (y todavía se emplea en la actualidad). Otras invenciones que se atribuyen a Arquímedes son una disposición parabólica de espejos para concentrar los rayos del sol en barcos enemigos para quemarlos (ver página 60), y una garra gigante para sacar a los barcos enemigos del agua. Como sucede a menudo, la guerra parece impulsar los avances científicos.

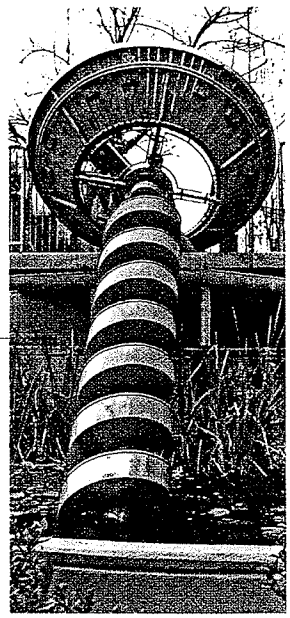
análisis de las fuerzas. La primera evidencia de pensamiento abstracto, respecto a cómo y por qué las fuerzas actúan en los objetos, procede de la antigua Grecia. En *Mecánica*, Aristóteles investigó cómo las palancas hacían posible mover grandes pesos empleando poca fuerza. Su respuesta fue: "Al moverse por la misma fuerza, la parte del radio de un círculo, que es la más lejana del centro, se mueve con más rapidez que el radio más pequeño que está cerca del centro".

Aristóteles reconoció esto poco después de la invención de una forma de balanza que tenía brazos de longitud diferente. En una balanza de brazos iguales,



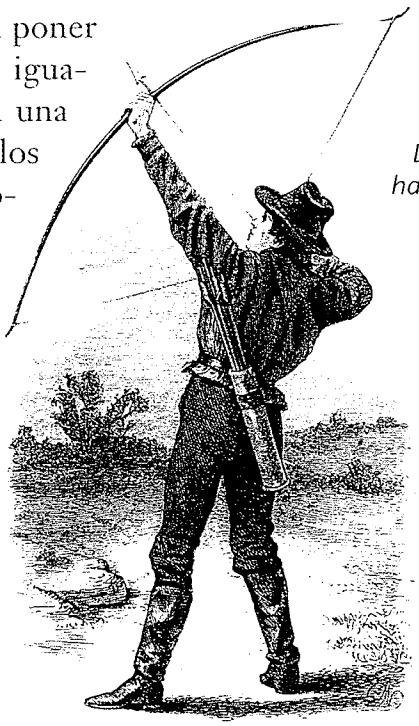
Según se dice, Aristóteles alardeó diciendo que si le daban una palanca lo bastante apropiada y un punto de apoyo para ponerla, podría mover la Tierra. En principio, es cierto.





El tornillo de Arquímedes se emplea para mover agua, incluso en algunos sistemas de irrigación de la actualidad.

los pesos de un lado se deben poner en equilibrio mediante pesos iguales en el otro lado. Pero con una balanza de brazos desiguales, los pesos también se pueden poner en equilibrio moviendo el fulcro (el punto en que la barra se balancea) y moviendo un peso a lo largo de su brazo. Entonces, especular respecto a las fuerzas mecánicas sólo tuvo lugar después de que se había ideado un dispositivo práctico que ponía en uso esas fuerzas. La existencia de la balanza de brazos desiguales dio a Aristóteles la oportunidad de hacer observaciones e investigaciones.



Disparar una flecha hacia arriba hará que siga un camino parabólico predecible.

El descubrimiento de Aristóteles es el precursor de la ley de la palanca para la que Arquímedes (*aprox.* 287–212 a.C.) proporcionó una prueba más o menos un siglo después (aunque es probable que la ley ya fuera muy conocida antes de que Arquímedes la confirmara).

En su forma moderna, la prueba afirma que peso por distancia en un lado del fulcro es igual al peso por distancia en el otro lado:

$$PD = pd$$

Arquímedes expresó esto en términos de promedios, ya que no hubiera aceptado la multiplicación de medidas diferentes (peso y distancia). Como proporciones, la ley de la palanca toma la forma:

$$P:d = p:D$$

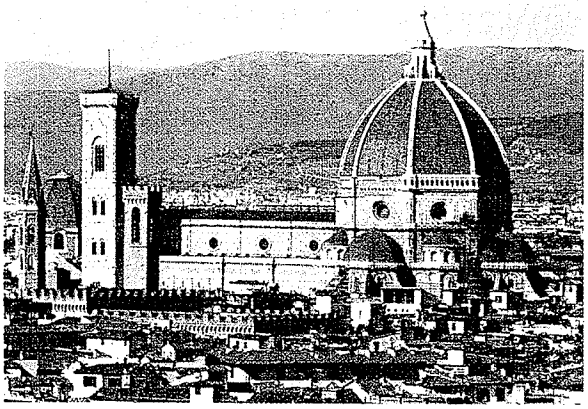
El problema de la dinámica

Aristóteles empezó con la proposición de que algo se mueve porque se le aplica fuerza y se sigue moviendo mientras la fuerza continúe. La tendencia de un cuerpo en movimiento de seguirse moviendo se llama ahora "momento". Esta proposición de Aristóteles explica lo que sucede si empujamos o jalamos algo, pero es claro que falla cuando se aplica a proyectiles. Si lanzamos algo, disparamos una flecha de un arco o una bala de una pistola, el objeto se continúa moviendo después que la persona o lo que sea que inició el "empujón" ya no está en contacto con el proyectil. Aristóteles resolvió el problema al transferir la condición de "movedor" al medio por donde viaja el proyectil, de manera que el aire continúa ejerciendo una fuerza en la flecha, empujándola hacia su objetivo. Esta fuerza se graba en el aire cuando la flecha sale al principio del arco.

El matemático griego Hiparco (*aprox.* 190 – *aprox.* 120 a.C.) lo rechazó, y sostenía que la fuerza se había transferido al proyectil en sí. Por lo tanto, una flecha que se dispara con exactitud hacia arriba tiene más poder, o ímpetu, para alejarse de la

Mecánica de la estática

Mientras que los antiguos griegos se ocupaban de la dinámica (la mecánica del movimiento), los romanos dominaron la mecánica de la estática. La mecánica de la estática explica cómo las fuerzas que se mantienen en equilibrio mantendrán una fuerza estacionaria. Es un principio fundamental en la arquitectura, donde fuerzas no equilibradas pueden causar que un edificio o un puente se colapse. Por ejemplo, un puente de arco se mantiene en pie tan sólo porque la presión ejercida por las piedras que forman el arco está balanceada a la perfección. Los retos de la arquitectura medieval y del Renacimiento, de construir grandes techos de bóveda, arcos y domos, eran problemas de mecánica de la estática que condujeron a soluciones exquisitas.



El Duomo de la catedral en Florencia, construido por Filippo Brunelleschi, representa un triunfo de la ingeniería (se mantiene en pie sólo por el peso de sus propias piedras).

Tierra de la que tiene la gravedad para jalarla de vuelta a ella. Sin embargo, este poder disminuye con el tiempo en forma natural. Disminuye por sí mismo, no por la resistencia del aire, ni por la gravedad, ni por ninguna otra influencia. En el punto en que el ímpetu es igual al jalón de la gravedad, la flecha se queda inmóvil un momento. Luego comienza a caer, aumentando la velocidad de su caída conforme su ímpetu original disminuye a cero. Conforme disminuye el ímpetu, puede hacer menos por resistir el jalón de la gravedad en el objeto. Cuando no queda ímpetu residual, la flecha cae a la misma velocidad que un objeto que se ha tirado en lugar de lanzado. El modelo de Hiparco también explicaba el comportamiento de un cuerpo que caía o dejaban caer. El objeto empieza en un estado de equilibrio entre el jalón hacia abajo de la gravedad y el ímpetu hacia arriba de la mano. El empujón hacia arriba se actualiza en el momento en que se libera el objeto, pero luego disminuye con regularidad, de manera que el objeto acelera hacia el suelo. El modelo también explica la velocidad terminal, ya que el ritmo de caída se vuelve constante una vez que ha disminuido todo el ímpetu del cuerpo.

El filósofo Juan Filópono (490-570 d.C.), a veces conocido como Juan el gramático o Juan de Alejandría, tenía una teoría similar del ímpetu. Sugirió que un proyectil tenía una fuerza que le otorgaba



el "movedor", pero que era autolimitador y después de que se gastaba el proyectil volvía al modelo de movimiento normal. En el siglo XI, Avicena (*aprox.* 980–1037) encontró fallas en el modelo de Filópono, y sostuvo que que un proyectil recibe una inclinación más que una fuerza, y que no disminuye en forma natural. Por ejemplo, en el vacío el proyectil se movería por siempre, siguiendo la inclinación que había recibido. También creía que el movimiento del aire que desplaza empuja hacia adelante un proyectil.

El filósofo español-árabe Averroes (1126-1198 d.C.) fue la primera persona en definir fuerza como "la velocidad con que se realiza el trabajo al cambiar la condición cinética de un cuerpo material"; y sostener "que el efecto y medición de la fuerza es el cambio en la condición cinética de una masa materialmente resistente". Introdujo la idea de que los cuerpos que no se mueven tienen resistencia a comenzar a moverse, lo que se conoce en la actualidad como inercia, pero sólo lo aplicó a los cuerpos celestes. Fue Tomás de Aquino quien extendió el concepto a los cuerpos terrenales. Kepler siguió el modelo de Averroes-Aquino, y fue él quien introdujo el término "inercia", que al final se convirtió en el concepto central de la dinámica de Newton. Esto significa que Averroes es responsable de una de las dos innovaciones cruciales en el desarrollo de la dinámica newtoniana a partir de la dinámica aristotélica.

El filósofo francés del siglo XIV, Jean Buridan (*aprox.* 1330–*aprox.* 1358), relacionó el ímpetu que imparte el movedor con la velocidad del objeto que se mueve. Pensó que el ímpetu podía ser una línea recta o un círculo, donde el segundo explicaría los movimientos de los planetas. Su explicación es similar al concepto moderno de "momento".

El pupilo de Buridan, Alberto de Sajonia (*aprox.* 1316–1390), amplió la teoría dividiendo el camino de un proyectil en tres etapas. En la primera etapa (A-B), la gravedad no tiene efecto y el cuerpo se mueve en la dirección del ímpetu que le imparte el movedor. En la segunda etapa (B-C), la gravedad recupera su poder y el ímpetu disminuye, de manera que el cuerpo comienza a tender a ir hacia abajo. En la tercera etapa (C-D), la gravedad toma el mando y jala el cuerpo hacia abajo mientras el ímpetu se agota.

Rumores insidiosos

Las historias de la vida de Buridan que nos han llegado en la actualidad pueden no ser todas ciertas, pero sugieren que era un personaje alegre y pintoresco. Se dice que golpeó con un zapato al futuro papa Clemente VI en la cabeza durante una discusión respecto a una mujer, y que murió después de que el rey de Francia lo arrojó al río Sena en un saco, como castigo por tener una aventura con la reina.

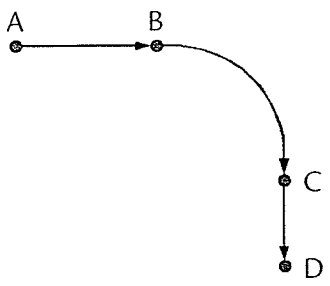
El experimento del túnel

Una de las disquisiciones teóricas más importante en la historia de la ciencia se relaciona con dejar caer en forma imaginaria una bola de cañón por un túnel que pasa por el centro de la Tierra y hasta el otro lado. Diversos pensadores medievales discutieron el experimento, desarrollando las

ideas de Avicena y Buridan sobre el ímpetu. Se pensaba que la bola de cañón se elevaría en el otro lado del mundo hasta la altura desde la que se dejó caer. La explicación era que la bola de cañón recibía el ímpetu de la fuerza de gravedad, actuando en ella para jalarla hacia la Tierra, y eso sería suficiente para contrarrestar la gravedad en el camino de salida. Cuando llegara a la altura desde la cual la dejaron caer originalmente, el ímpetu se agotaría y la bola de cañón caería de nuevo, siguiendo el mismo patrón y estableciendo un movimiento oscilatorio. Fue el primer punto en que el movimiento oscilatorio, tan importante en la física del siglo XVII, entró al estudio de la dinámica.

Se adaptó el experimento del túnel para explicar el balanceo de un péndulo, al que se consideraba como el experimento del túnel en un microcosmo. Se jala el péndulo hacia abajo, a su punto más bajo (el punto medio horizontal), y el ímpetu que ha ganado lo impulsa en su camino continuo lateral (pero también hacia arriba), hasta que esa fuerza se agota y se le jala de vuelta, renovando el impulso, pero en la otra dirección. Para la dinámica aristotélica, y en los modelos de Hiparco y Filópono, el péndulo había sido una anomalía inexplicable. No había una razón obvia para que se elevara de nuevo después de que había caído. Aquí, por fin, estaba una forma de explicarlo.

La trayectoria de una bola de cañón que se dispara horizontalmente de un cañón, sigue un camino recto y luego cae a la Tierra.

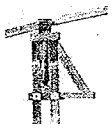


El verdadero nacimiento de la mecánica clásica

Los científicos de los siglos XVI y XVII buscaron explicaciones para el movimiento de los cuerpos físicos que iban de los proyectiles a las estrellas. Se examinó con rigurosidad y se superó el trabajo inicial sobre la dinámica, en particular gracias a los esfuerzos de Galileo en Italia y de Isaac Newton en Inglaterra, aunque con con-

"Cuando un movedor pone un cuerpo en movimiento, le implanta cierto ímpetu, es decir, cierta fuerza que le permite a un cuerpo moverse en la dirección en que el movedor lo inicia, sea hacia arriba, hacia abajo, de lado o en círculo. El ímpetu implantado aumenta en la misma proporción que la velocidad. Es por este ímpetu que una piedra continúa moviéndose después de que quien la arroja ha dejado de moverla. Pero por la resistencia del aire (y también por la gravedad de la piedra) que se esfuerza por moverla en la dirección opuesta al movimiento causado por el ímpetu, la segunda se debilitará todo el tiempo. Por lo tanto, el movimiento de la piedra será más lento en forma gradual, y al final disminuye o destruye el ímpetu, tanto que la gravedad de la piedra se impone y mueve la piedra hacia su lugar natural".

Jean Buridan, *Cuestiones sobre la Física de Aristóteles*



Los calculadores de Oxford: timados de un triunfo

Los Calculadores de Oxford fueron un grupo de científicos y matemáticos que se centraban en el colegio Merton, Oxford, en el siglo XIV; y entre los que estaban Thomas Bradwardine, William Heytesbury, Richard Swineshead y John Dumbeton. Investigaron la velocidad instantánea y presentaron la base de la ley de los cuerpos que caen mucho antes de Galileo, al cual se atribuye por lo general. También expusieron y demostraron el teorema de la velocidad media: Que si un objeto en movimiento acelera a una proporción uniforme por cierto tiempo, cubre la misma distancia que un objeto que se mueve a su velocidad media por el mismo periodo de tiempo. Estuvieron entre los primeros en tratar propiedades como calor y fuerza como algo que en teoría era cuantificable, a pesar de que no tenían medios para medirlas, y sugirieron el uso de las matemáticas en problemas de filosofía natural. A menudo se burlaban de los académicos medievales de Oxford por la naturaleza ininteligible de sus estudios; después el grupo desapareció y quedó en el anonimato.

tribuciones importantes de astrónomos como Johannes Kepler.

El experimento de la bola que gira de Galileo

La desconfianza de Galileo en la física aristotélica empezó a corta edad. Incluso en su adolescencia, cuando era estudiante en Pisa, pudo refutar la afirmación de Aristóteles de que los cuerpos pesados caen con más rapidez que los ligeros, citando como evidencia que los granizos de diferentes tamaños llegan al suelo al mismo tiempo, y es de presumir que caen de la misma altura (por supuesto, es una prueba falsa, ya que no hay forma de saber si los granizos comenzaron su caída al mismo tiempo). También mostró que una bola de cañón que golpea su blanco a la misma altura cuando deja el cañón lo hace a la misma velocidad que cuando deja el cañón.



Una famosa disquisición teórica se relaciona con dejar caer una bola de cañón por dentro de la Tierra.

Galileo tenía un interés particular en proyectiles y cuerpos que caen. Es poco probable que alguna vez haya llevado a cabo en realidad el famoso experimento que se le atribuye, de dejar caer bolas de cañón de diferentes pesos desde la Torre Inclina-

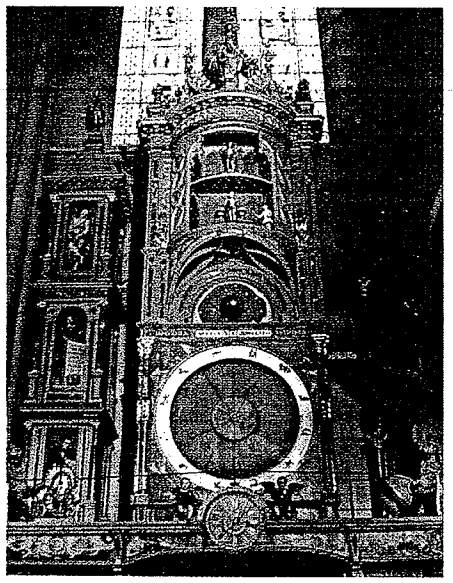
da de Pisa para mostrar que caían a la misma velocidad (es más probable que esto fuera sólo una disquisición teórica). Pero lo hiciera o no, el concepto de llevar a cabo un experimento para poner a prueba una idea, y de usar los resultados como evidencia para apoyar una declaración científica, fue fundamental para las prácticas de Galileo que se volvería la base del método científico.

En lugar de tirar bolas de cañón desde una altura peligrosa, Galileo llevó a cabo sus experimentos con las fuerzas de bolas de diferentes pesos que ruedan por pendientes. En una época en la que los relojes no tenían una segunda manecilla, tomar el tiempo con exactitud en experimentos no era fácil. Galileo empleó un reloj de agua y su propio pulso para medir el tiempo que las bolas requerían para llegar al final de la pendiente, lo que mostraba que los efectos de la gravedad eran los mismos en objetos ligeros y pesados. Esto era contrario a las enseñanzas de Aristóteles y, al parecer, al sentido común. Pero Galileo señaló que cuando vemos caer una pluma u hoja de papel con más lentitud que una bala de cañón, se debe a que la resistencia del aire reduce su caída, no a que la gravedad tenga menos influencia en el objeto más ligero.

El experimento con bolas que ruedan también mostró algo más. Mientras hacía las pendientes cada vez menores, Galileo

Descartes y el punto de vista mecanicista

René Descartes fue, en esencia, la primera persona en proponer que existen leyes inmutables de la naturaleza. Desarrolló un punto de vista mecanicista, inspirado por un científico aficionado y defensor de la filosofía mecánica, el holandés Isaac Beeckman (1588-1637), al que conoció en 1618. Descartes trató de explicar todo el mundo material, incluyendo la vida orgánica, en términos de tamaño, forma y acción de las partículas de la materia que se mueven de acuerdo a leyes físicas. Incluso consideró al cuerpo humano como un tipo de máquina, aunque excluyó al alma de su esquema mecanicista. Desde su punto de vista, Dios era el generador del movimiento que dio al Universo el empujón que necesitaba para ponerse en marcha, pero a partir de entonces avanzó por sí mismo, siguiendo las leyes de la física como un mecanismo de relojería. Creía que si se conocían las condiciones iniciales, se podría predecir el resultado de cualquier sistema.



Descartes creía que los seres animados funcionaban como mecanismos de relojería, siguiendo las leyes físicas.



Es poco probable que Galileo alguna vez haya dejado caer bolas de cañón de la Torre Inclinada de Pisa, pero la idea tiene un atractivo que aún perdura.

se dio cuenta que sin una fuerza que la detuviera, una bola que giraba en un plano horizontal continuaba girando para siempre. De nuevo, esto iba en contra de las enseñanzas de Aristóteles. También podría parecer contrario a la lógica que empujemos un ladrillo a lo largo de una mesa y que se detenga en cuanto dejamos de empujarlo, e incluso un carrito con llantas también se detiene después de un rato. Galileo identificó correctamente una fuerza que actúa para detener el movimiento: La fricción. Sin embargo, cometió un error al interpretar sus descubrimientos sobre que el movimiento continuará a menos que se le impida; supuso que, como la Tierra está girando, el movimiento inercial siempre producirá un camino circular. Le faltó a Descartes demostrar que los objetos en movimiento continúan en una línea recta a menos que alguna fuerza actúe sobre ellos para cambiar la dirección de su viaje.

Detenerse y arrancar

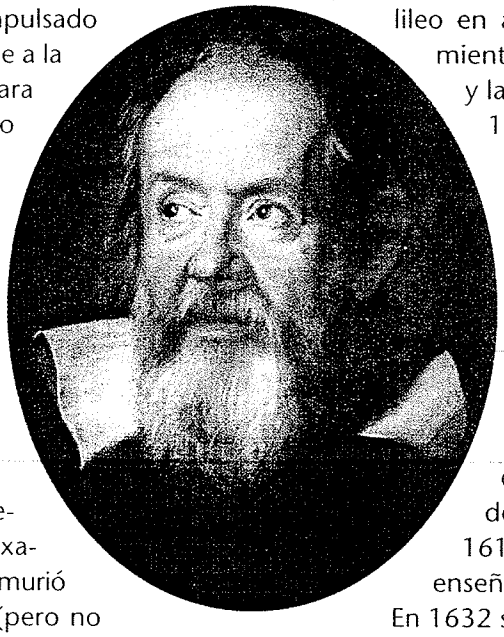
La inercia es la renuencia de un cuerpo a empezar a moverse. Se debe superar si va a iniciarse un movimiento. El momento es la tendencia de un cuerpo en movimiento a continuar moviéndose una vez que se le ha dado un ímpetu inicial. El momento se pierde conforme el cuerpo reduce su velocidad y se detiene en respuesta a una fuerza que actúa en él contra la dirección del movimiento. La obra de dinámica de Aristóteles, Hiparco, Filópono y Avicena se ocupaba en su mayor parte de algo similar al momento y su pérdida (con cómo y por qué un cuerpo continúa moviéndose y luego se detiene después del ímpetu inicial). Sin embargo, no pudieron explicar correctamente por qué un cuerpo deja de moverse. Los físicos persas explicaron la pérdida de movimiento final empezada por un ímpetu mediante una referencia a una tendencia innata a la inmovilidad, *inclinatio ad quietem*. Una tendencia a la inmovilidad es una buena definición de inercia, la cual fue descrita por primera vez por Averroes, pero no es la razón de

El experimento de Galileo sobre la Luna

En 1971, astronautas del Apolo 13 demostraron que era correcto lo que Galileo había dicho sobre los cuerpos que caen. Cuando no hay atmósfera (y por lo tanto no hay resistencia o impulso por el aire), los cuerpos que se dejan caer al mismo tiempo desde la misma altura golpean el suelo al mismo tiempo, sin importar su altura o forma. Los astronautas empleaban una pluma y un martillo geológico para demostrarlo.

Galileo Galilei (1564-1642)

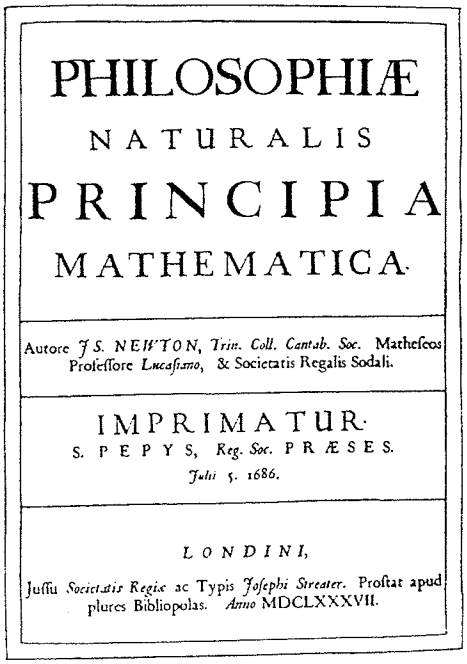
Galileo recibió educación en casa hasta la edad de 11 años, cuando lo enviaron a un monasterio para una educación más formal. Para horror de su padre, Galileo adoptó la vida monástica, y a los 15 años de edad decidió volverse monje novicio. Por suerte para la historia de la ciencia, tuvo una infección en el ojo y su padre lo llevó a su casa en Florencia para tratamiento. Galileo nunca volvió al monasterio. Impulsado por su padre, Galileo fue a la universidad de Pisa para estudiar medicina, pero con rapidez lo distrajeron las matemáticas y trabajó poco en sus cursos de medicina. Se marchó sin un título en 1585, pero volvió cuatro años después como profesor de matemáticas.



Galileo recibía una paga baja como profesor y su pobreza se exacerbó cuando su padre murió después de prometer (pero no entregar) una dote importante para la hermana de Galileo. Después logró conseguir el puesto de profesor de matemáticas en Padua en 1592, una universidad más prestigiosa y un trabajo mejor pagado. Sin embargo, todavía tenía preocupaciones de dinero y recurrió a la invención como forma de mitigarlas, creando primero un termómetro que no tuvo éxito comercial y luego una máquina de cálculo mecánico que le produjo ingresos por un tiempo. En 1604, Galileo trabajó con Kepler para examinar una nueva estrella (de hecho, una supernova) y más o menos en 1608 demostró que el camino que sigue un proyectil es parabólico. En 1609, Galileo empezó a hacer sus propios telescopios, y en el curso de ese año había mejorado de tres a veinte veces el aumento en comparación con el diseño existente. Envió un instrumento a Kepler quien lo empleó para confirmar los descubrimientos de Galileo en astronomía. Estos descubrimientos, como las lunas de Júpiter y las fases de Venus (ver página 169), apoyaron el punto de vista de Copérnico de que la Tierra viaja alrededor del sol (heliocentrismo), en lugar de que el sol viaje alrededor de la Tierra (geocentrismo). Galileo por muchos años fue cauteloso en expresar o publicar este punto de vista que era contrario a la doctrina de la iglesia católica, y en 1616 se le prohibió fomentar o enseñar el modelo heliocéntrico. En 1632 se le dio permiso para publicar una discusión equilibrada del tema llamada *Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo*, pero era tendencioso contra el geocentrismo, así que condenaron a Galileo por herejía en 1634 y pasó el resto de su vida en arresto domiciliario. Durante su aislamiento terminó sus *Discursos y demostraciones matemáticas sobre dos ciencias nuevas*, en donde expuso el método científico y afirmó que el intelecto humano podía comprender el Universo y que estaba regido por leyes que se pueden reducir a matemáticas.

que un cuerpo deje de moverse.

Pierre Gassendi llevó a cabo el experimento definitivo que desacreditaba la inercia como una fuerza para reducir la velocidad del movimiento en 1640 a bordo de una galera que tomó prestada de la fuerza naval francesa. La galera se movió con remos a la máxima velocidad, cruzando el mar Mediterráneo mientras dejaban caer bolas de cañón de la parte superior del mástil. En cada caso, chocaron con la cubierta en el mismo punto (con exactitud al pie del mástil). No se quedaron atrás por el movimiento hacia adelante del barco. Esto mostró que un cuerpo seguía moviéndose en la dirección con que había empezado, a menos que la detuviera alguna fuerza. La bola de cañón mantenía el ritmo de la galera, ya que nada detenía su movimiento hacia adelante y continuaba junto con el movimiento hacia abajo. Gassendi había recibido en gran medida la influencia de Galileo y su promoción del método experimental.



PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA

Autore *J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc.* Matheſeos Profeſſore *Lucaſiano*, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, *Reg. Soc.* PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Juſſu *Societatis Regiæ* ac Typis *Joſephi Streater.* Proſtat apud plures Bibliopolas. *Anno* MDCLXXXVII.

Principia *de Newton tal vez ha sido el libro de ciencia más influyente que jamás se haya publicado.*

El maestro habla

A la forma de la mecánica clásica que dominó la física por más de 200 años a veces se le llama "mecánica newtoniana" por las tres leyes del movimiento formuladas por Isaac Newton en la década de 1660. Eran la ley de la inercia, su segunda ley de la aceleración y la ley de la acción y la reacción. Abordó la segunda y tercera leyes en *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (Principios matemáticos de filosofía natural)*, publicado en 1687, por lo general llamado sólo *Principia*. El gran avance de Newton fue proporcionar una explicación detallada de la mecánica, empleando el sistema matemático que en la actualidad se llama cálculo diferencial que él había elaborado.

Leyes del movimiento de Newton

Primera ley: Los cuerpos se mueven en línea recta con velocidad uniforme, o se mantendrán estacionarios, a menos que una fuerza actúe para cambiar su velocidad o dirección.

Segunda ley: Las fuerzas producen una aceleración que está en proporción a la masa del cuerpo ($F = ma$, o $F/m = a$).

Tercera ley: Toda acción de una fuerza produce una reacción igual y opuesta (por ejemplo, se impulsa un cohete hacia adelante con tanta fuerza como los gases de escape se expulsan hacia atrás de él).

Estas leyes encarnan las leyes de la conservación de la energía, momento y momento angular.

Movimiento y gravedad

Newton presentó los principios de conservación del momento y del momento angular, y la formulación de la gravedad en su ley de la gravitación universal. Ésta declara que toda partícula en el Universo que tiene masa atrae a toda otra partícula que tenga masa. Esta atracción es la gravedad. Cuando cae una manzana de un árbol, la gravedad la jala hacia abajo, a la Tierra, pero al mismo tiempo la manzana ejerce su propio jalón gravitacional diminuto en la Tierra. La fuerza gravitacional entre dos cuerpos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ambos. La ley de la gravedad, publicada en 1687, fue la primera fuerza en ser descrita en forma matemática. Al formular la ley, Newton demostró por primera vez que todo el Universo está regido por las mismas leyes, y son leyes que se pueden modelar.

Las leyes del movimiento y de la gravitación de Newton se aplican por igual a los objetos cotidianos en la Tierra y a los cuerpos celestes. Explican la mayor parte del movimiento discernible en el mundo a nuestro alrededor, y falla sólo cuando los objetos se mueven cerca de la velocidad de la luz o son en extremo pequeños, posibilidades que preocuparían a Newton. Las leyes de Newton explicaban los descubrimientos de Galileo, incluyendo su disquisición teórica con bolas de cañón de diferentes pesos, y también la explicación de Kepler de que los planetas siguen órbitas elípticas. En el Universo de Newton, era predecible el movimiento de todos los cuerpos, dada la información sobre la masa del cuerpo y las fuerzas que actúan sobre él.

El Universo como terreno de pruebas

Newton verificó sus nuevas leyes mostrando cómo explicaban el movimiento de los planetas en el Sistema Solar. Mostró cómo la curvatura de la órbita de la Tierra es el resultado de la aceleración en la dirección del sol, y que la gravedad del sol determina las órbitas de los planetas. Sus explicaciones sustentan las explicaciones dadas antes por Kepler (ver página 167). La mecánica celestial, el estudio del movimiento y de las fuerzas que actúan en los cuerpos celestes, se estableció como terreno de pruebas para las teorías en la física. Durante los siguientes siglos, nuestra comprensión del movimiento de los planetas se refinó al incluir los campos gravitacionales que ejercen los planetas en los cálculos basados en las leyes de Newton. Newton se daba cuenta de que las órbitas planetarias no eran del todo como había calculado que debían ser, y con fervor creía que la intervención divina se necesitaba cada cierto tiempo para situar todo de nuevo en curso, poniendo a los alborotadores, Júpiter y Saturno, de vuelta a sus lugares justos.

Fue el matemático y astrónomo francés Pierre Simon Laplace (1749-1827) quien resolvió qué estaba

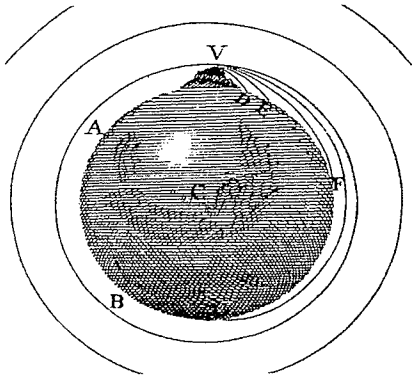
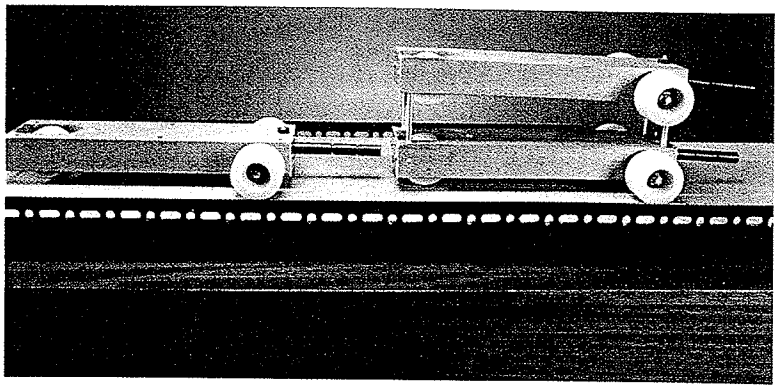


Diagrama del Tratado del sistema del mundo, *de cómo poner en órbita una bala de cañón.*



Es fácil repetir los experimentos de Galileo al rodar camiones de madera por una pista con pendiente, como saben muchos niños en edad escolar.

sucediendo en realidad dentro de la estructura de las leyes de Newton.

Aire y agua

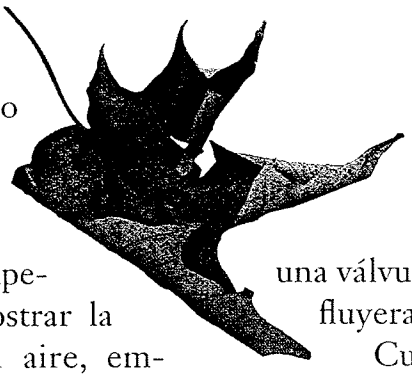
Mientras que algunas fuerzas son obvias; por ejemplo, le damos un empujón a un camión de juguete y se mueve, otras no son tan fáciles de ver. La presión del aire o del agua que actúa sobre un cuerpo puede moverlo, deformarlo o incluso destruirlo. Los fluidos no actúan como cuerpos en la misma forma en que lo hace un planeta o una manzana. Un fluido puede fluir, no tiene forma fija y esto significa que la fuerza que ejerce es diferente a la fuerza que ejerce un cuerpo sólido. A pesar de eso, es posible ver un líquido fluir o caer y comprender parte de su fuerza. El comportamiento de los gases fue un poco más difícil de ver e investigar, ya que no son visibles la mayoría de los gases. Está claro por el

Isaac Newton (1642-1727)



Newton nació prematuro el día de Navidad de 1642 (del calendario pregregoriano) y no se esperaba que viviera. Cuando era niño, se le catalogó como indolente y distraído en la escuela, y fue un estudiante mediocre en Cambridge. Cuando cerraron la universidad por la Gran Plaga de 1665, Newton se vio obligado a pasar su tiempo en casa, en Lincolnshire. Fue aquí que elaboró las primeras versiones de sus leyes del movimiento y sus primeras ideas de la gravedad. Después de su vuelta a Cambridge, lo hicieron profesor lucasiano de matemáticas en 1669, a la edad de sólo 27 años. Demostró que la luz blanca está formada por el espectro completo, y desarrolló el cálculo diferencial, aunque se produjo una discusión respecto a la prioridad con Gottfried Leibniz (1646-1716), quien lo realizó de forma independiente. Newton escribió dos textos importantes, *Principia* (*Principios*) y *Opticks* (*Óptica*). Famoso por sus argumentos y por ser arrogante, Newton tenía discusiones frecuentes con otros científicos y un enfrentamiento de larga duración con Robert Hooke.

poder del viento para derribar árboles y destruir edificios, que un gas en movimiento puede tener mucha fuerza, pero es más difícil experimentar con él.



Una hoja no cae directo a la Tierra, ya que su baja masa y gran superficie de área hacen que el viento se la pueda llevar con facilidad.

Anaxágoras llevó a cabo experimentos públicos para demostrar la existencia de la presión del aire, empleando el aire contenido en un recipiente esférico cerrado que presionaba el agua. Aunque había hecho pequeños agujeros en el fondo del recipiente, no se llenaba con agua porque ya estaba lleno de aire. Anaxágoras no extendió su trabajo a la presión atmosférica, pero mostró cómo la resistencia del aire explica por qué las hojas pueden flotar en el aire. Arquímedes especuló que un cuerpo sumergido en agua está sometido a una fuerza hacia arriba, que es igual al peso del agua que desplaza.

Herón de Alejandría (*aprox.* 10-70 d.C.) dio un uso práctico a la presión de aire, agua y vapor, inventando una rueda de aire, para hacer funcionar un órgano musical, y el primer motor de vapor. También creó una puerta automática: El aire calentado en el fuego de un altar desplazaba agua, la cual se acumulaba y su peso jalaba una cuerda para abrir las puertas. Herón también fue responsable de la primera máquina expendedora, e incluso de un espectáculo de marionetas automático. La máquina expendedora despachaba un volumen medido de agua bendita. La moneda insertada caía en un plato que se ladeaba, abriendo una válvula para permitir que el agua fluyera.

Cuando la moneda caía del plato, un contrapeso detenía el suministro de agua. El espectáculo de marionetas era impulsado por un sistema de cuerdas, nudos y máquinas simples que se manejaban juntas al hacer girar una rueda dentada cilíndrica.

Desde la Antigüedad, se ha sabido que el agua se puede bombear a una altura aproximada de 10 metros, pero no más alto, algo que se descubrió por prueba y error. En la década de 1640, los científicos empezaron a vincular esto con la presión atmosférica. El matemático italiano Gasparo Berti (1600-1643) sin querer hizo un barómetro de agua, en alrededor de 1640, y descubrió que la altura del agua en un tubo largo y cerrado invertido sobre un plato se asentaba en 10.4 metros, dejando espacio, un vacío, en la parte superior del tubo. Otro italiano, el físico Giovanni Batista Baliani (1582-1666), había descubierto en 1630 que no podía sacar agua con sifón por encima de esta altura y le había pedido a Galileo que ex-



Una eolípila, o motor antiguo de vapor, de un tipo diseñado por Herón de Alejandría; el vapor que escapaba causaba que la esfera superior girara.

plicara por qué. La explicación de Galileo había sido que el agua se mantenía arriba sostenida por el vacío, y que el vacío no podía sostener cualquier peso mayor que el agua a 10 metros. En este punto, la mayoría de las personas, incluyendo a Galileo, creía que el aire no tenía ningún peso propio.


DANIELIS BERNOULLI Joh. Fil.
Med. Prof. Basil.
ACAD. SCIENT. IMPER. PETROPOLITANÆ, PRIUS MATHESEOS SUBLIMIORIS PROF. ORD. NUNC MEMBRI ET PROF. HONOR.
HYDRODYNAMICA,
SIVE
DE VIRIBUS ET MOTIBUS FLUIDORUM
COMMENTARII.
OPUS ACADEMICUM
AB AUCTORE, DUM PETROPOLI AGERET,
CONGESTUM.
ARGENTORATI,
Sumptibus JOHANNIS REINHOLDI DULSECKERI,
Anno M D CC.XXXVIII.
Typis Joh. Henr. Decker, Typographi Basilienſis.

Portada de Hidrodinámica *de Bernoulli, la primera obra sobre mecánica de fluidos.*

Del agua al mercurio

Evangelista Torricelli (1608-1647), amigo y estudiante de Galileo, sugirió en 1644 que el aire de hecho tenía peso y que era éste lo que presionaba hacia abajo en el agua del plato y lo que mantenía la columna de agua en el tubo a una altura de 10 m. Las habladurías de que Torricelli estaba dedicado a la brujería lo obligaron a mantener en secreto sus experimentos, de manera que buscó un líquido más denso que se pudiera situar a un nivel más bajo. Usó mercurio que, a 16 veces la densidad del agua, da una columna mucho menos conspicua de sólo 65 centímetros.

El matemático y físico francés Blaise Pascal (1623-1662) repitió el experimento de Torricelli con un barómetro de mercurio y fue más allá, haciendo que su cuñado llevara el equipo arriba de una montaña y lo probara ahí. Al encontrar que el mercurio se hundía más en la altura, Pascal correctamente llegó a la conclusión de que el peso del aire era menos allá arriba y, por lo tanto, ejercía menos presión. De sus hallazgos sacó extrapolaciones para sugerir que la presión del aire continúa reduciéndose conforme aumenta la altura. En algún punto, el aire se acaba y sólo existe vacío sobre la capa de la atmósfera de la Tierra. La medición de la presión en la actualidad se llama pascal (Pa) en su honor, donde un pascal es equivalente a un newton por metro cuadrado.

El barómetro de vino

Después de descubrir cómo funcionaba su barómetro, Pascal se propuso poner a prueba la creencia de los físicos aristotélicos de que la parte "vacía" del tubo estaba llena con vapores del líquido que presionaban la columna hacia abajo. (Habían rechazado la idea de que pudiera quedar un vacío en la parte superior del tubo). Como se consideraba al vino más volátil que el agua, escogió el vino para una demostración pública. Preguntó a los aristotélicos que predijeran por adelantado lo que sucedería. Propusieron que la columna de vino se situaría más abajo que la columna de agua, ya que habría más vapor para presionarla. Se demostró que estaban equivocados y prevaleció la explicación de Pascal.

Dinámica de fluidos

Aunque la gente había estado aprovechando el movimiento de los fluidos por mile-

nios, no fue hasta mediados del siglo XVIII que se empezó a comprender. El matemático holandés-suizo Daniel Bernoulli (1700-1782) estudió el movimiento de los líquidos y los gases, publicando su obra de gran influencia, *Hidrodynamica* (*Hidrodinámica*), en 1738. Descubrió que el agua que fluye con rapidez ejerce menos presión que el agua que fluye con lentitud, y que este principio se puede ampliar a cualquier fluido, fuera líquido o gas. Si Bernoulli insertaba un tubo vertical delgado por la pared de un tubo horizontal más ancho que llevaba agua que fluía, el agua se elevaba en el tubo delgado. Entre mayor fuera la presión del agua en el tubo ancho, más se elevaba en el tubo delgado. Si se hace más delgado el tubo, aumenta la presión del líquido que fluye. Si el tubo se reduce a la mitad de su ancho previo, la presión se cuadriplica, ya que se le aplica la ley de los cuadrados.

Bernoulli expuso sus conclusiones en lo que en la actualidad se conoce como el teorema de Bernoulli: En cualquier punto en un tubo por el que fluye agua, la suma de la energía cinética, la energía potencial y la energía de presión de una masa dada del fluido, es constante. Es el equivalente para la ley de la conservación de la energía. Los fenómenos en que se basa el teorema de Bernoulli mantienen a los aviones volando, nos permiten predecir el clima y nos ayudan a hacer modelos de la circulación de los gases en estrellas y galaxias.

Bernoulli se había educado como médico por la insistencia de su padre y estaba interesado en el flujo de la sangre en el cuerpo humano. Diseñó un método para medir la presión sanguínea que implicaba insertar un tubo capilar en un vaso sanguíneo y medir la altura a que se elevaba la sangre en el tubo. Este método invasivo e incómodo para medir la presión sanguínea se usó por más de 150 años, hasta 1896.

Unión de los fluidos y la masa

Hasta que fue común aceptar que la materia está formada por átomos, era imposible que se igualara el comportamiento de los cuerpos sólidos y el comportamiento de los fluidos en alguna forma significativa. Pero en cuanto fue claro que líquidos y gases están compuestos por moléculas, fue posible comprender que la presión del agua y la presión del aire se producen por las partículas en movimiento que ejercen fuerza en otros cuerpos con los que entran en contacto. De hecho, fue la imagen de que esto sucedía en el movimiento browniano lo que al final demostró la existencia de los átomos (ver página 33). El modelo atómico de la materia por fin logró la aceptación universal en los primeros años del siglo XX. En ese preciso momento, empezaron a aparecer grietas en la mecánica newtoniana.

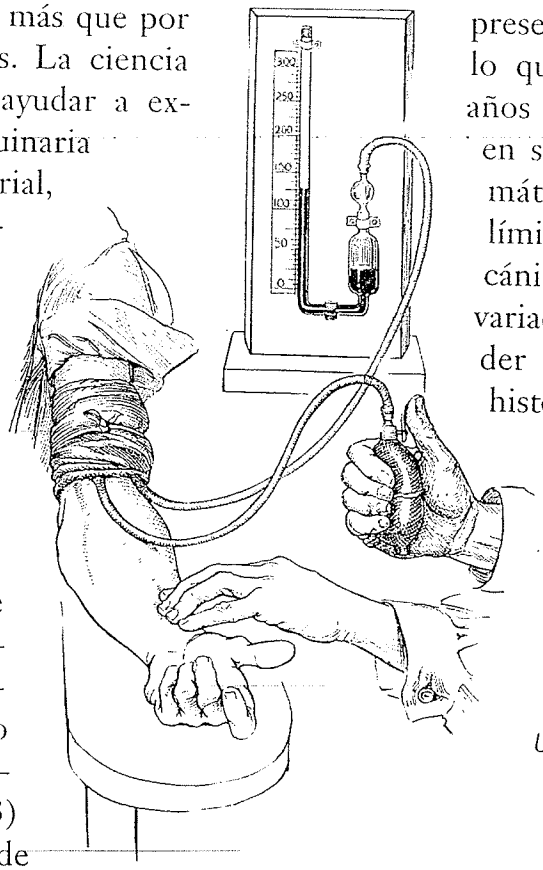
Se pone la mecánica a trabajar

Durante la Revolución Industrial en los siglos XVIII y XIX, la mecanización en industria, agricultura y transporte transformó por completo la vida en Europa y Estados Unidos. Poblaciones enteras se movieron en masa del campo a la ciudad, las máquinas hicieron posible la fabricación en masa de bienes, se apoderaron de las tareas de la agricultura que antes requerían un gran número de trabajadores agrícolas y mo-

vieron bienes, alimentos y personas en forma más eficiente. La necesidad de perfeccionar la maquinaria ayudó a impulsar el progreso en la ciencia. La máquina de hilar algodón construida por James Hargreaves en 1764 empleó maquinaria simple para manejar seis husos con una sola rueca. El marco giratorio movido por agua que desarrolló Thomas Arkwright en Inglaterra en 1771 y empleado para hilar recibía energía de agua corriente. Los primeros aparatos impulsados por vapor fueron bombas, pero con el motor de vapor, mejorado por James Watt, se podía emplear para hacer muchos trabajos diferentes. Estas invenciones no fueron obra de físicos, sino de personas prácticas que necesitaban llevar a cabo una tarea práctica y buscaban una solución práctica. Estas soluciones surgieron por la observación e inspiración, más que por la formación de teorías. La ciencia pronto intervino para ayudar a explicar y mejorar la maquinaria de la Revolución Industrial, y lo ha hecho desde entonces.

Se pone la mecánica newtoniana en una nueva posición

Las leyes de Newton pusieron las bases para la mecánica clásica, pero se extendieron y desarrollaron durante los siguientes siglos. El matemático y científico suizo Leonhard Euler (1707-1783) amplió la esfera de acción de las leyes de las partículas a cuerpos rígidos (cuerpos sólidos idealizados de tamaño finito) y presentó dos leyes adicionales que explican que no es necesario que las fuerzas internas en un cuerpo estén distribuidas equitativamente. El principio de Euler de menor acción (que la naturaleza es perezosa) tiene muchas aplicaciones en la física (en particular que la luz sigue el camino más corto). El brillante matemático italofrancés Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) sucedió a Euler como director de la Academia de Ciencias de Berlín. Ayudó a reunir todos los avances en la mecánica newtoniana, en el siglo después de la muerte de Newton, y los volvió a formular en la mecánica lagrangiana. En *Méchanique analytique (Mecánica analítica)*, que empezó cuando tenía 19 años de edad y terminó a los 52, Lagrange presentó una síntesis de todo lo que había pasado en los años intermedios, basándose en su propio sistema matemático, que describía los límites de un sistema mecánico en relación con las variaciones que podrían suceder durante el curso de su historia expresadacon el empleo del cálculo. Las ecuaciones lagrangianas relacionan la energía cinética de un



Una forma mecánica de medir la presión sanguínea que se empleó hasta finales del siglo XX.

sistema con sus coordinadas generalizadas, fuerzas generalizadas y tiempo. Su libro no contiene diagramas (un logro notable para un libro sobre mecánica); sus métodos emplean el cálculo y excluyen la geometría. Su obra simplificó muchos cálculos en la dinámica al tratar con funciones escalares de la cinética y la energía potencial, en lugar de una acumulación de fuerzas, aceleraciones y otras cantidades vectoriales.

Tanto Euler como Lagrange abordaron también la dinámica, pero adoptaron diferentes enfoques. Euler describió el movimiento de puntos particulares en un fluido, mientras que Lagrange dividió el fluido en regiones y analizó sus trayectorias.

Otro matemático que hizo contribuciones significativas a la mecánica práctica moderna fue el noble irlandés sir William Rowan Hamilton (1805-1865). En su tratado *On a General Method in Dynamics* (*Sobre un método general en la dinámica*, 1835) expresó la energía de un sistema en términos de momento y posición, reduciendo la dinámica a un problema en el cálculo de las variaciones. A veces se llama mecánica hamiltoniana a su reformulación de la mecánica clásica en las ecuaciones hamiltonianas. En el proceso descubrió que existe un vínculo íntimo entre la mecánica newtoniana y la óptica geométrica. El significado completo de su obra no fue visible hasta el surgimiento de la mecánica cuántica casi cien años después.

Sir Willian Rowan Hamilton (1805-1865)

Brillante desde el inicio de la infancia, Hamilton aprendió a leer a la edad de tres años. Podía traducir latín, griego y hebreo a la edad de cinco años, compiló una gramática del siríaco a los 11 años y a los 14 compuso una bienvenida en persa para el embajador persa que estaba visitando Dublín. El don de Hamilton para las matemáticas y la astronomía fue tan considerable que lo eligieron profesor de astronomía y Astrónomo Real en Irlanda mientras todavía no se graduaba. Dependía bastante del alcohol como fuente de sustento, y aunque llevaba a cabo la mayor parte de su trabajo en el comedor de su casa, comía poco, aparte de chuletas de carnero. Se encontraron docenas de platos todavía con huesos de carnero entre sus muchos papeles después de su muerte. Sus logros abarcaron matemáticas, astronomía, clásicos, dinámica, óptica y mecánica.



La inercia y la gravedad se unen

Entre la declaración de Newton de las leyes de la inercia y la gravedad y las teorías de Einstein de la relatividad estuvo el físico austriaco Ernst Mach (1838-1916). Newton creía que el espacio era un fondo absoluto contra el que se trazaba el movimiento. Mach estuvo en desacuerdo, diciendo que el movimiento siempre es relativo a otro objeto o punto. Como Einstein, creía que sólo el movimiento relativo tiene sentido. Como consecuencia, la inercia sólo se puede comprender si existen otros objetos con los cuales podamos comparar el movimiento o la inmovilidad de un cuerpo. Por ejemplo, si no existie-

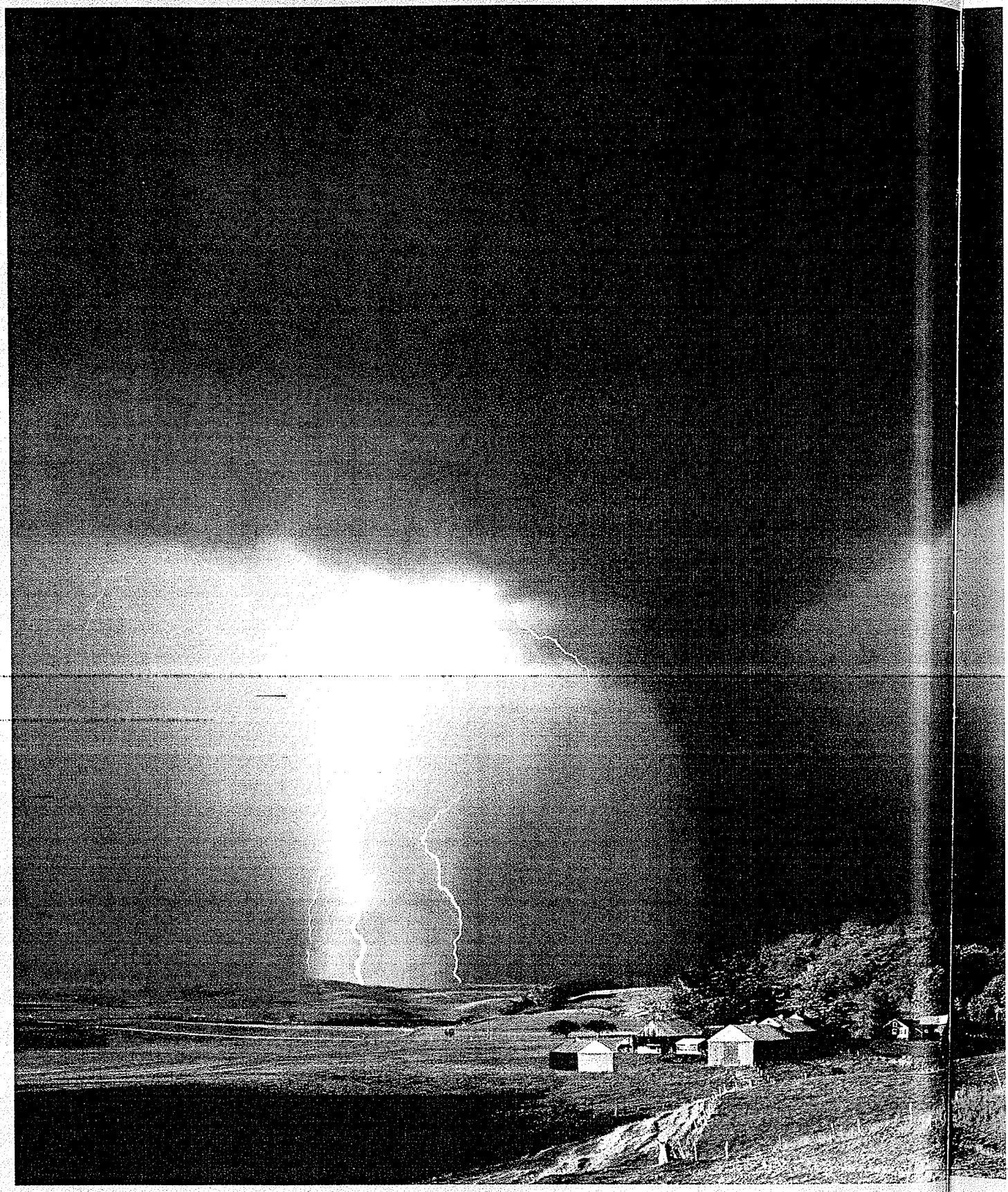


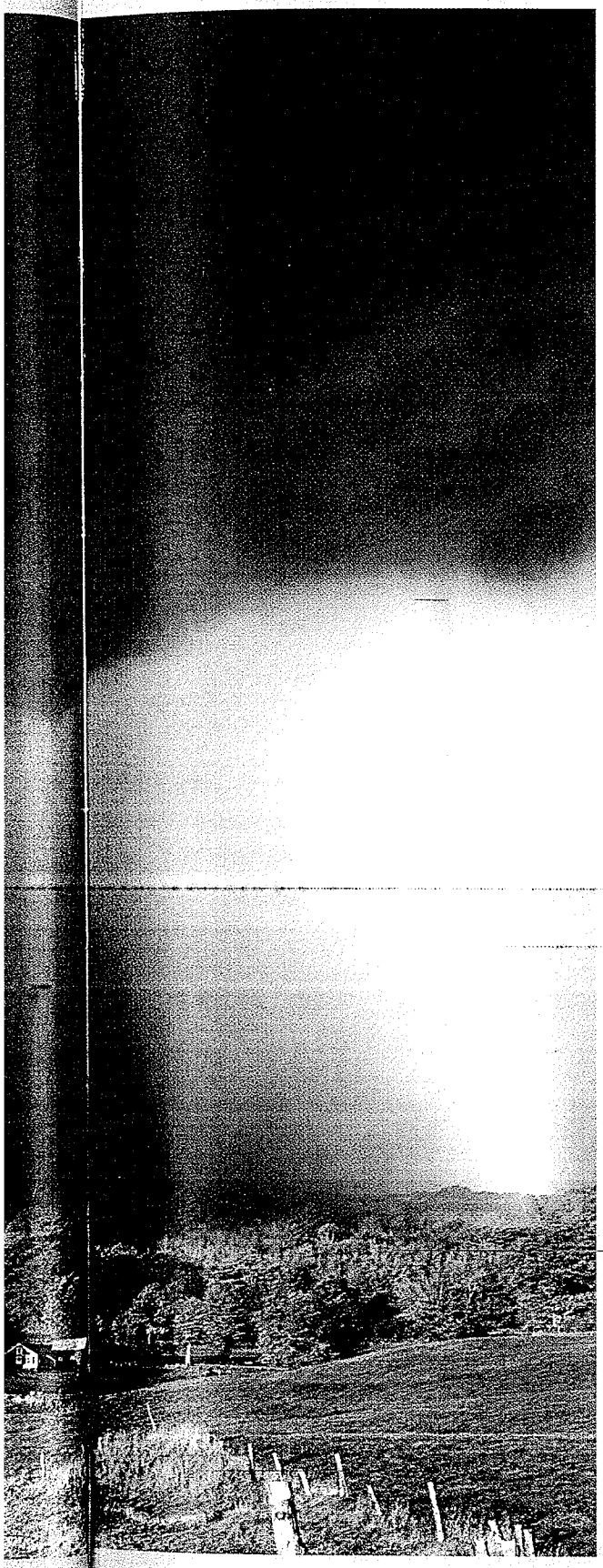
ran estrellas o planetas, no podríamos decir que la Tierra está girando. El principio de Mach (que él no presentó como principio, fue Einstein quien acuñó el término) se ha expresado en forma bastante general como "la masa allá influye, la inercia acá". Sin masa "allá", no puede haber inercia "acá".

Grande y pequeño

Mientras que la mecánica newtoniana parecía funcionar bien para los objetos más grandes en el Universo, comenzó a fallar cuando se aplicaba a los más pequeños. En cuanto los físicos empezaron a darse cuenta las partículas atómicas y subatómicas, descubrieron que las leyes de la física, que consideraban fijas e inmutables para todas las cosas, ya no parecían aplicarse. Las partículas más pequeñas podían llevar a cabo acciones extrañas. La confianza ganada con tanto trabajo en las leyes de la física estaba zozobrando, y en el siglo XX estas leyes se sometieron a un gran escrutinio.

En lugar de que el trabajo en el átomo demostrara que las ideas de Newton en realidad explican todo el Universo, se mostró que en escalas muy pequeñas la materia actúa en formas verdaderamente sorprendentes. La mecánica clásica alcanza sus límites en la escala atómica, a velocidades cercanas a la velocidad de la luz y en intensos campos gravitatorios. Antes de examinar el átomo y cómo parece desafiar las leyes de la naturaleza, necesitamos volver atrás un poco y examinar la energía (la otra mitad de la ecuación masa en movimiento).





CAPÍTULO 4

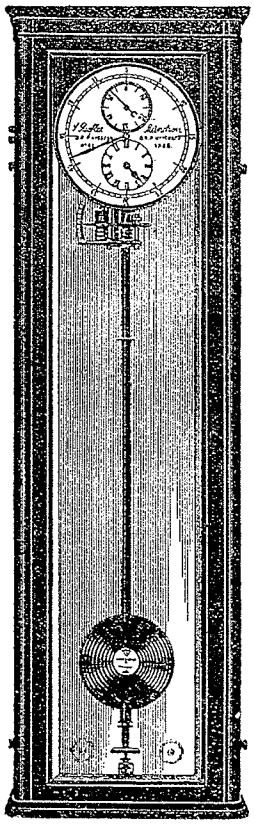
CAMPOS Y FUERZAS DE **ENERGÍA**

Cuando una fuerza actúa para mover una masa, nos parece obvio que está involucrada la energía. Así que puede parecer sorprendente que a pesar de toda la consideración de las fuerzas desde la Antigüedad, los primeros filósofos naturales en gran medida no dieran importancia a la energía. El concepto de energía es relativamente nuevo, surgió apenas en el siglo XVII. De hecho, el término "energía" (del griego *energía*, acuñado por Aristóteles) sólo se presentó con su significado moderno en 1807, gracias al genio y sabio Thomas Young (del experimento de la doble rendija). Las formas más obvias de energía son la luz y el calor, los cuales surgen gracias al sol. La humanidad también ha aprovechado la energía química (liberada de quemar combustibles), la energía gravitatoria de un cuerpo que cae, la energía cinética del viento y el agua en movimiento, y, más recientemente, la energía eléctrica y nuclear.

Los rayos y el viento representan enormes ráfagas de energía en la naturaleza, y son temidos por su poder destructivo.

La conservación de la energía

Al igual que la materia se conserva, al no ser creada ni destruida, la energía también se conserva. Puede convertirse de una forma a otra, y es así como la aprovechamos para hacer trabajo útil, pero en realidad nunca se gasta esa energía. Galileo se dio cuenta de que un péndulo convierte la energía gravitacional potencial en energía cinética o energía del movimiento. Cuando el cabeceo del péndulo está en el punto alto de su giro, está inmóvil por un momento, y tiene la máxima energía potencial. Ésta se convierte en energía cinética cuando el cabeceo empieza y el cabeceo recupera su energía potencial cuando sube al otro lado de su balanceo.



Christiaan Huygens creó los relojes de péndulo por primera vez en 1656: Al péndulo siempre le toma el mismo tiempo balancearse.

Inventar la "energía"

Que los diferentes tipos de energía son equivalentes no fue obvio de inmediato. Incluso en la actualidad no existe una com-

"Hay un hecho, o si lo deseas, una ley, que rige todos los fenómenos naturales que hemos conocido hasta la fecha. No existe una excepción conocida a esta ley (es exacta hasta donde sabemos). A la ley se le llama la conservación de la energía. Afirma que existe cierta cantidad, a la que llamamos energía, que no se transforma en los múltiples cambios por los que pasa la naturaleza. Es una idea de lo más abstracta, ya que es un principio matemático; dice que existe una cantidad numérica que no cambia cuando algo sucede. No es una descripción del mecanismo, o algo concreto; es sólo un extraño hecho con el que podemos calcular algún número y cuando terminamos de observar la naturaleza pasar por sus trucos y calculamos de nuevo la cifra, es la misma".

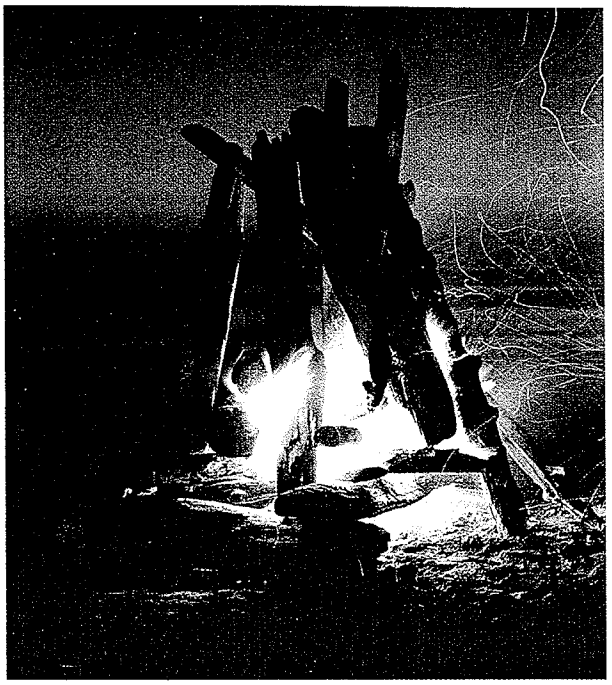
Richard Feynman, físico estadunidense, 1961



Una patinadora puede acelerar sus giros, poniendo sus brazos cerca de su cuerpo, o reducir su velocidad extendiendo sus extremidades.

prensión fundamental de qué es con exactitud la energía y cómo trabaja. El matemático alemán Gottfried Leibnitz (1646-1716) explicó en forma matemática la conversión entre diferentes tipos de energía, a lo que llamó *vis viva*. Su trabajo, junto con las observaciones del matemático y filósofo holandés Willem Gravesande (1688-1742), fueron perfeccionados por la física francesa Marquise Émile du Châtelet (1706-1749), quien definió la energía de un cuerpo en movimiento como proporcional a su masa, multiplicada por su velocidad al cuadrado. La definición actual de energía cinética es muy cercana a esto:

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2$$



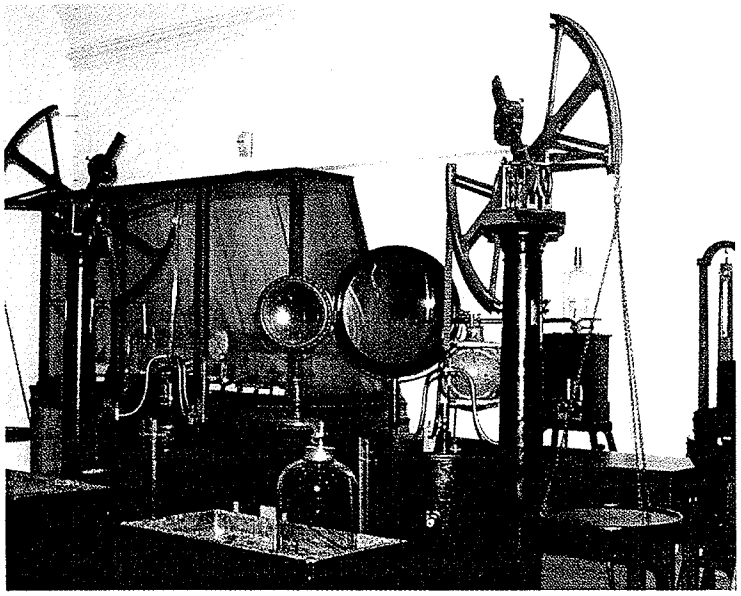
Los humanos emplearon el fuego por miles de años sin comprender cómo funciona.

Apuros con el fuego

Las primeras teorías sobre cómo y por qué ardían los objetos se centraron en un supuesto compuesto de materia inflamable llamado flogisto. Cuando se quemaba el material, escapaba el flogisto. No era en realidad una teoría de la energía, sino de los cambios físicos y químicos que causaba el fuego. La teoría se originó en 1667 con el trabajo del alquimista Johann Becher (1635-1682). Revisó el antiguo modelo de la materia que contenía cuatro

Máquinas de movimiento perpetuo

El principio de la conservación de la energía podría sugerir que es posible hacer una máquina de movimiento perpetuo: Una máquina que utilice la energía que produce para mantenerse en marcha, de manera que todo el tiempo recicle su energía de diferentes formas. El matemático hindú Bhaskara (1114-1185) sugirió por primera vez esta idea más o menos en 1150, y propuso una rueda que dejara caer pesas a lo largo de sus rayos mientras giraba, impulsándose así. Incluso Robert Boyle, de quien se podía esperar que fuera más sensato, sugirió un sistema que llenaba continuamente una taza con agua, la vaciaba y la volvía a llenar. Sin embargo, todas las ideas para máquinas de movimiento perpetuo deben fallar, ya que se pierde energía por la fricción y por ineficiencia. En el siglo XVIII, tanto la Real Academia de Ciencias francesa como la Oficina de Patentes estadunidense estaban tan inundadas con solicitudes y propuestas para máquinas de movimiento perpetuo, que las prohibieron.



Laboratorio de Lavoisier en París.

elementos: tierra, aire, agua y fuego, que se remonta a los días de Empédocles (ver página 21) y la remplazó con tres formas de tierra: *terra lapidea*, *terra fluida* y *terra pinguis*. En 1703, Georg Ernst Stahl (1660-1734), profesor de medicina y química en la Universidad de Halle, en Alemania, cambió el modelo un poco y renombró a la *terra pinguis* como "flogisto".

Se pensaba que el flogisto era una sustancia sin olor, color o sabor que libera la materia cuando se quema. Cuando se ha liberado todo el flogisto, por lo general es diferente la naturaleza del material quemado, como cuando la madera se convierte en cenizas. Sin embargo, si se quema la materia en un espacio cerrado, puede no quemarse toda, ya que el aire se satura de flogisto. Tuvieron dificultades para explicar cómo a veces los metales aumentan de masa cuando se queman o calientan (ahora sabemos que se debe a que se forman óxidos), pero los teóricos del flogisto tuvieron una solución astuta para esto. Afirmaron que a veces el flogisto no tiene peso, a veces tiene peso positivo y a veces incluso tiene peso negativo, de manera que la pérdida del flogisto puede en realidad aumentar la masa del material quemado.



Georg Ernst Stahl.

También se involucró al flogisto con la herrumbre y los sistemas vivos; una criatura no puede vivir en aire "flogistado" en el que algo se ha quemado, ni el hierro tendrá herrumbre en él.

No se anuló esta teoría para poner una explicación química hasta que Antoine-Laurent Lavoisier (ver página 31) demostró que cuando el material se quema o se oxida se combina con el oxígeno. La comprensión de que esto tenía un vínculo con los procesos de la vida, que la respiración también requiere oxígeno, fue la primera pista de que los procesos químicos están en el centro de la vida.

Mientras que el flogisto y luego el oxígeno explicaban el proceso químico de quemar algo, el calor mismo siguió siendo un

Gabrielle Émile le Tonnelier de Breteuil, marquesa du Châtelet (1706-1749)

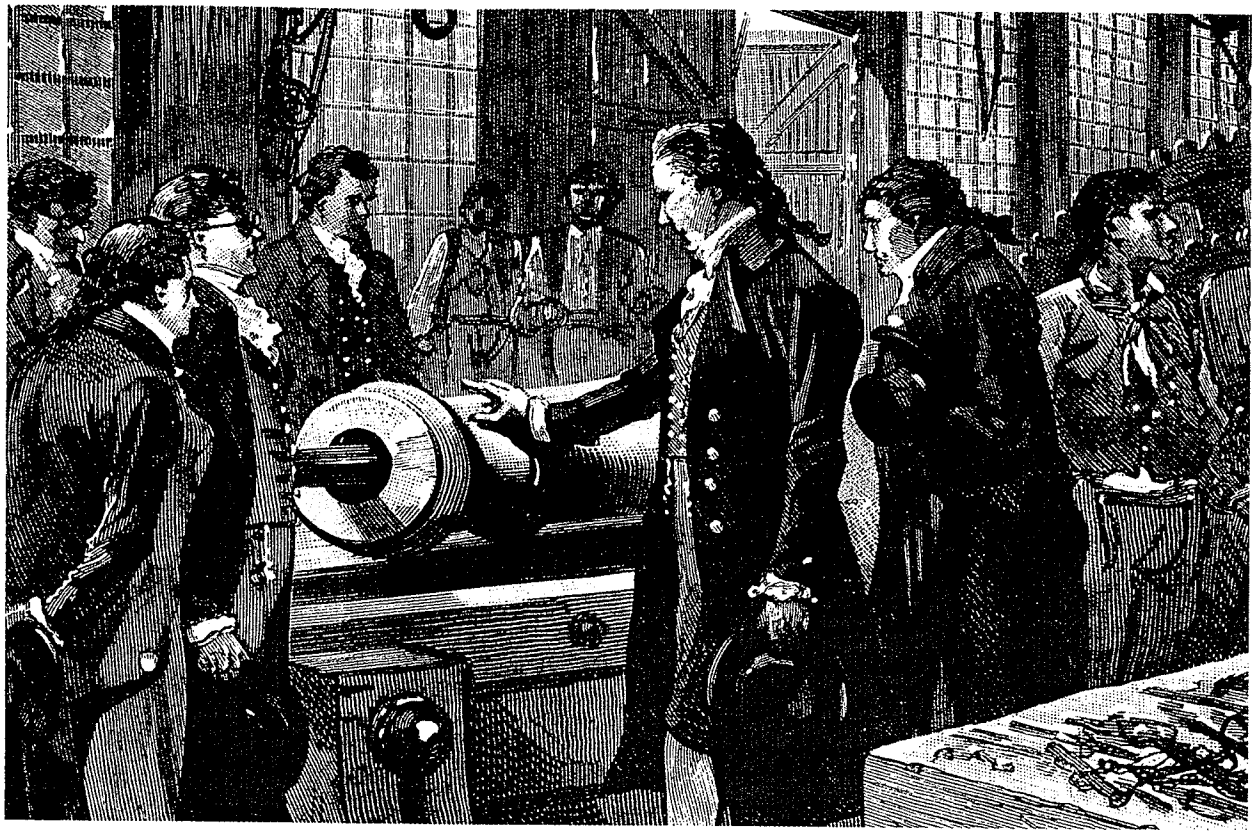
Hija de un aristócrata francés, Émile du Châtelet era considerada demasiado alta para ser mujer y su padre pensó que era poco probable que se casara. En consecuencia, empleó a los mejores tutores para ella (a la edad de 12 años podía hablar seis idiomas), y le permitió dedicarse a la física y a las matemáticas. Su madre lo desaprobaba y deseaba enviarla a un convento, pero, por fortuna, prevaleció el punto de vista de su padre. Émile se interesó en el juego, usando las matemáticas para mejorar sus probabilidades de ganar, luego usaba sus ganancias para comprar libros y equipo de laboratorio.

Émile sí se casó y tuvo tres hijos. Como su marido a menudo estaba lejos en campañas militares o visitando sus numerosas propiedades, ella estaba libre para continuar con sus actividades científicas y tener amantes (tal vez incluso el escritor y filósofo Voltaire, cuyo nombre real era Françoise-Marie Arouet). Con seguridad Voltaire era su compañero intelectual íntimo y pasaba mucho tiempo en la propiedad de du Châtelet, en Cirey-sur-Blaise, donde la pareja compartía un laboratorio. Émile tradujo *Principia* de Newton y escribió *Las Instituciones de la Física* (1740), que trataba de reconciliar los puntos de vista de Newton y de Leibnitz. En 1937 entró a una competencia dirigida por la *Académie de Science* con un artículo que investigó en secreto sobre las propiedades del fuego. En él sugirió que los diferentes colores de la luz tenían diferente poder para calentar, presagiando la identificación de la radiación infrarroja. No ganó la competencia, pero se publicó su artículo.

Uno de sus experimentos se relacionaba con dejar caer bolas de cañón en una base de arcilla húmeda. Descubrió que duplicar la velocidad de la bola de cañón causaba que se enterrara cuatro veces más en la arcilla, mostrando que la fuerza es proporcional a la masa por la velocidad al cuadrado ($m \times v^2$) y no, como dijo Newton, la masa por la velocidad.



Émilie du Châtelet fue una notable física en un tiempo en que la ciencia era dominio masculino.



Uno de los experimentos de Rumford con cañones. Propuso que el calor consta de partículas en movimiento y que la fricción lo puede causar.

misterio hasta 1737, cuando du Châtelet propuso lo que más adelante se reconoció como radiación infrarroja.

Termodinámica

La creación del motor de vapor y de muchas otras máquinas con motor de la Revolución Industrial significó que había una necesidad cada vez más urgente de comprender la termodinámica (cómo se produce, transfiere y se puede aprovechar el calor para hacer trabajo físico). Dos teorías sobre la naturaleza del calor, no excluyentes entre ellas del todo, pero que formaban una extraña pareja, eran comunes en el siglo XVIII: el modelo calórico y el modelo mecánico del calor.

El modelo mecánico se basa en el movimiento de diminutas partículas. La teoría cinética de los gases tiene su origen en el libro de Daniel Bernoulli, *Hydrodynamica* (*Hidrodinámica*), publicado en 1738. Sugirió que los gases están formados por moléculas en movimiento. Cuando bombardean una superficie, el efecto es presión, su energía cinética se siente como calor. Éste es el modelo que todavía se acepta en la actualidad.

"No estoy tan convencido de la inexistencia del calórico como lo estoy de la existencia de la luz".

Humphry Davy, 1799



Congelados

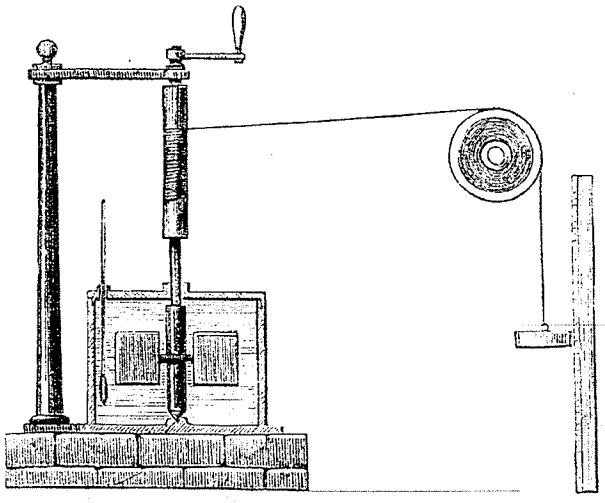
Al igual que se suponía que el calor era resultado del calórico, algunos científicos de la década de 1780 creían que el frío era una propiedad producida por la presencia de una sustancia llamada "frigoric". El filósofo y físico suizo Pierre Prévost (1751-1839) dijo que el frío tan sólo es la ausencia de calor, y mostró en 1791 que todos los cuerpos, sin importar lo fríos que parezcan estar, irradian algo de calor.

El modelo calórico sugería que el calor es una forma de materia, un tipo de gas con partículas indestructibles. Los átomos de calor, o calórico, se podían combinar con los átomos de otras sustancias o podían estar libres y meterse a hurtadillas entre los átomos de otra materia. Lavoisier propuso la existencia del calórico mientras desacreditaba el flogisto. Creía que los átomos de calórico eran un componente del oxígeno y que su liberación producía el calor de la combustión. Cuando se producía calor por fricción, ocurría porque los átomos de calórico se desprendían por el roce del cuerpo en movimiento.

El físico nacido estadunidense, Benjamin Thompson, conde Rumford (1753-1814), llevó a cabo un experimento en el que pesaba hielo, lo derretía y lo volvía a pesar de nuevo. Descubrió que no había una diferencia discernible en el peso, lo que sugería que no se ganaba calórico al derretir el hielo. Pero los partidarios del modelo calórico lo rebatieron sugiriendo más bien que el calórico tenía masa insignificante. La observación adicional del conde de Rumford de que el acto de perforar agujeros en el metal, como los cañones, producía una enorme cantidad de calor, junto con experimentos llevados a cabo por el químico inglés Humphry Davy (1778-1829), debieron demostrar a todos que la teoría calórica estaba equivocada, ya que mostraban que el calor se podía producir por el trabajo físico mismo. Aunque algunas personas dudaban de la teoría calórica, las conclusiones del conde Rumford y de Davy no se aceptaron hasta que el físico inglés James Prescott Joule (1818-1889) repitió algunos de sus experimentos 50 años después.

Joule llevó a cabo experimentos para demostrar que el trabajo se podía convertir en calor. Por ejemplo, forzar el paso de agua a presión por un cilindro perforado eleva la temperatura del agua. Esto expuso las bases para la teoría de la conservación de la energía mediante su transferencia a

El equipo de Joule para medir el equivalente mecánico del calor.



La física se vuelve estadística

La formulación de las velocidades de las moléculas de James Clerk Maxwell, conocida como la distribución Maxwell, proporcionó una forma para calcular la proporción de las moléculas con una velocidad específica (o la probabilidad de que una partícula tenga una velocidad específica) en un gas donde las moléculas tienen movimiento libre. Fue la primera ley estadística en la física. La ha remplazado la distribución Maxwell-Boltzmann, que perfecciona la técnica y las suposiciones de Maxwell.

diferentes formas, y mostró que el modelo calórico del calor no era correcto (por extraño que parezca, la conservación de la energía del calor era esencial para el modelo calórico, ya que convertía al calor en materia, que ya se sabía que se conservaba).

Joule calculó que la cantidad de trabajo necesaria para elevar un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua era una fuerza de 838 libras-pie (una libra-pie es el par de torsión, o fuerza de torcimiento, que crea una fuerza de una libra actuando en una distancia perpendicular de un pie de un punto pivote). Puso a prueba diferentes métodos y obtuvo resultados similares, lo que lo llevó a aceptar que su teoría y sus cifras eran más o menos correctas.

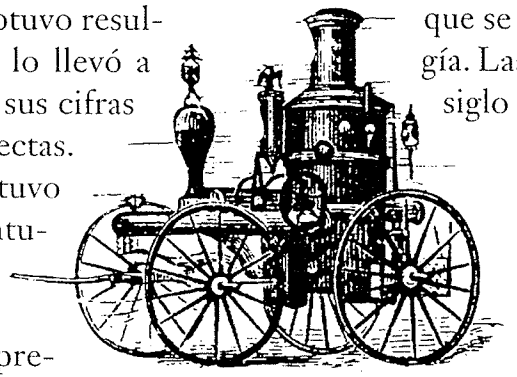
La obra de Joule tuvo una recepción poco entusiasta al principio, en parte porque se basaba en mediciones muy precisas; diferencias en temperatura de 1/200 de grado.

Cuando Michael Faraday y William Thomson (más adelante lord Kelvin) escucharon la presentación de Joule de su trabajo en 1847, ambos se interesaron, pero se requirió mucho tiempo para que compartieran su punto de vista.

La primera colaboración con Thomson tuvo lugar cuando los dos se reunieron mientras Joule estaba de luna de miel. Planearon medir la diferencia de temperatura del agua en la parte superior e inferior de una cascada en Francia, pero al final demostró ser poco viable. Thomson y Joule mantuvieron correspondencia de 1852 a 1856, donde Joule llevaba a cabo experimentos y Thomson comentaba los resultados. Joule llegó a la conclusión de que el calor es una forma de movimiento de los átomos. Aunque el modelo atómico de la materia no se había aceptado en todas partes en ese momento, Joule había aprendido todo al respecto del químico inglés John Dalton (ver página 32) y aceptó el modelo atómico sin reservas.

Las leyes de la termodinámica

Tres leyes de termodinámica establecen los límites de lo que se puede y lo que no se puede hacer en cualquier sistema que se relacione con calor y energía. Las leyes surgieron durante el siglo XIX, una vez que se aceptó



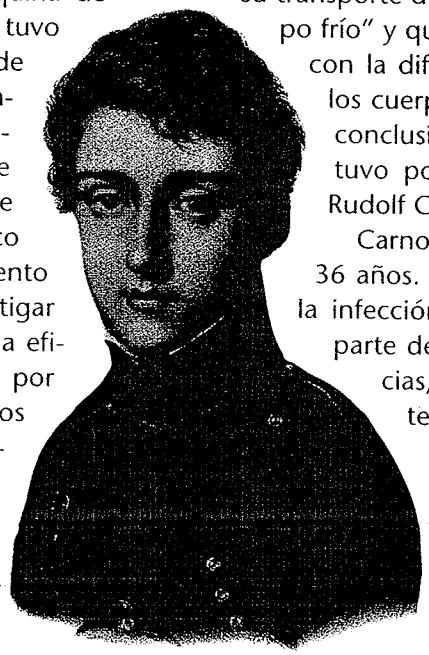
Un motor de vapor convierte la energía del calor en energía cinética para impulsar un vehículo o maquinaria.

Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832)

Nacido en París, Francia, Nicolas Carnot fue hijo de un líder militar y primo de Marie Françoise Sadi Carnot, quien fue presidente de la República Francesa, de 1887 a 1994. Desde 1812 el joven Carnot asistió a la École Polytechnique en París, donde tal vez le enseñaron los notables físicos Siméon-Denis Poisson (1781-1840), Joseph Louis Gay- Lussac (1778-1850) y Anduve-Marie Ampère (1775-1836). La máquina de vapor, en uso desde 1712, tuvo grandes mejorías por parte de James Watt por más de cincuenta años. Sin embargo, su desarrollo había sido en gran parte un asunto de ensayo y error y de conjeturas inspiradas, con poco estudio científico. En el momento en que Carnot empezó a investigar la máquina de vapor, tenía una eficiencia promedio de sólo tres por ciento. Se propuso contestar dos preguntas: "¿El trabajo disponible de una fuente de calor carece en potencia de limitaciones?, y ¿se pueden mejorar los motores remplazando el vapor por algún otro fluido o gas funcional?". Al abordar esas preguntas, presentó un modelo matemático del motor de vapor que ayudó a los científicos a comprender cómo funcionaba.

Aunque Carnot expuso sus descubrimientos en relación con el calórico, su obra puso las bases para la segunda ley de la termodinámica. Descubrió que un motor de vapor produce poder no por el "consumo de calórico, sino [por] su transporte de un cuerpo caliente a un cuerpo frío" y que el poder producido aumenta con la diferencia de temperatura "entre los cuerpos caliente y frío". Publicó sus conclusiones en 1824, pero su obra tuvo poco reconocimiento hasta que Rudolf Clausius la rescató en 1850.

Carnot murió de cólera a la edad de 36 años. Por preocupaciones respecto a la infección, lo enterraron con la mayor parte de sus papeles y otras pertenencias, dejando sólo su libro como testimonio de su obra.



Nicolas Sadi Carnot

el calor en general como el movimiento de partículas.

La primera ley de la termodinámica, formulada por Rudolf Clausius (1822-1888) en 1850, es en esencia una declaración de la conservación de la energía: El cambio en la energía interna de un sistema es igual a la cantidad de calor que se le suministra, menos la cantidad de trabajo que lleva a cabo el sistema. En otras palabras, la energía nunca se crea ni se destruye. La ley, como la expuso Clausius, se basó en la demostración de Joule de que el trabajo (o la energía) es equivalente al calor. De hecho, la segunda ley de la termodinámica se descubrió antes que la primera. El ingeniero militar francés Nicholas Sadi Carnot (ver cuadro, arriba) describió una máquina de

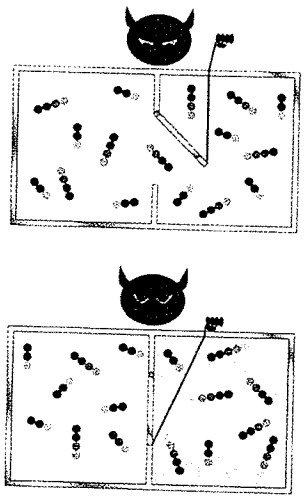
calor ideal y teórica en la que no se pierde energía por fricción o desperdicio, y demostró que la eficiencia de la máquina depende de la diferencia en temperaturas entre los dos cuerpos. Así que una máquina de vapor que emplea vapor sobrecalentado producirá más trabajo que una que usa vapor más frío y, al final, un motor que emplea combustible (como el diesel) a más alta temperatura será todavía más eficiente. Como gran parte del trabajo sobre termodinámica en el siglo XIX, Carnot tomó el diseño de maquinaria existente como punto de arranque para explorar y explicar la física que lo hacía funcionar. La ciencia práctica estaba dirigiendo la ciencia teórica.

Carnot expuso sus hallazgos en relación al calórico, y fue Clausius quien reformuló la ley en relación con la entropía, diciendo que un sistema siempre tiende a un mayor estado de entropía. Por lo general, se considera que la entropía es "desorden". En forma más precisa, es la medición de la falta de disposición de energía en un sistema para hacer el trabajo; en cualquier sistema real se pierde parte de la energía en el calor que se disipa. Cuando se enciende el combustible, la energía se convierte de un estado organizado (de baja entropía) a un estado desorganizado (de alta entropía). La entropía total del Universo aumenta cada vez que se enciende combustible. Clausius resumió la primera y la segunda leyes, diciendo que la cantidad de energía en el Universo se mantiene constante, pero su entropía tiende a un máximo. El fin del Universo, si se lleva a este extremo, será una vasta sopa de átomos disociados. Clausius propuso por primera vez esta situación, llamada muerte térmica.

Le siguió la tercera ley de la termodinámica mucho después, en 1912. Elabora-

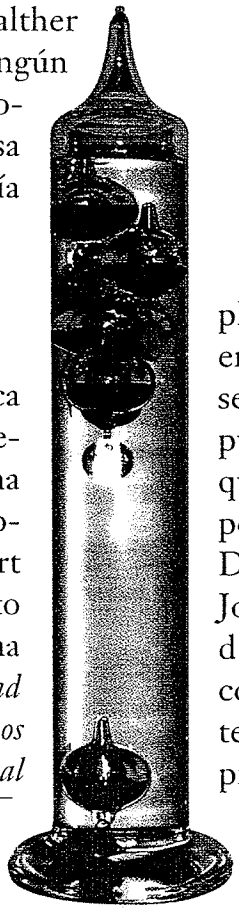
El demonio de Maxwell

En 1871, James Clerk Maxwell propuso una disquisición teórica para tratar de burlar la segunda ley de la termodinámica. Describió dos cajas adyacentes, una que contenía gas caliente y una que contenía gas frío, con un pequeño agujero que las conectaba. Por lo general, el calor se mueve de un área caliente a un área fría, las partículas rápidas chocan con partículas lentas y las aceleran, y viceversa. Al final, el gas en ambas cajas contendría partículas con una distribución similar de velocidades y tendría la misma temperatura. Sin embargo, en el experimento, un demonio se encuentra en el agujero regulando las partículas que pueden pasar por él. El demonio abre el agujero para permitir que las partículas de movimiento rápido pasen de la caja de gas frío a la caja de gas caliente; y las partículas de movimiento lento, de la caja de gas frío a la caja de gas caliente. De esta forma, el demonio puede elevar la temperatura del gas caliente a costa del gas frío y disminuir la entropía del sistema. De todos modos, el sistema no puede burlar la ley, ya que lo que lleve a cabo la función del demonio debe usar energía para funcionar. En 2007, el físico escocés David Leigh hizo un intento a nanoescala de la máquina demonio. Puede separar partículas de movimiento rápido y lento, pero necesita su propio suministro de energía.





da por el físico y químico alemán Walther Nernst (1864-1941), afirma que ningún sistema puede alcanzar el cero absoluto, la temperatura en que casi cesa el movimiento atómico y la entropía tiende a un mínimo o cero.



El termómetro de Galileo depende de la variación en la presión con la temperatura; en el cero absoluto no se ejerce presión alguna, ya que los átomos no se mueven.

Cero absoluto

La tercera ley de la termodinámica requiere el concepto de una temperatura mínima, bajo la cual ninguna temperatura puede caer jamás (conocida como cero absoluto). Robert Boyle comentó primero el concepto de una posible temperatura mínima en 1665, en *New Experiments and Observations Touching Cold* (*Nuevos experimentos y observaciones respecto al frío*) en donde se refirió a la idea de un *primum frigidum*. Muchos científicos de la era creían que había "uno u otro cuerpo que es por su propia naturaleza sumamente frío y por participación con el cual todos los demás cuerpos obtienen esa cualidad".

El físico francés Guillaume Amontons (1663-1705) fue el primero en abordar el problema en forma práctica. En 1702, construyó un termómetro de aire y declaró que la temperatura a la que el aire no tenía "resorte" para afectar la medición era el "cero absoluto". El cero en su escala era alrededor de -240°C. El matemático y físico suizo Johann Heinrich Lambert (1728-1777), quien propuso una escala de temperaturas absolutas en 1777, refinó la cifra a -270°C, cerca de la cifra aceptada en la actualidad.

Sin embargo, esta cifra casi correcta no fue aceptada por todos. Pierre-Simon Laplace y Antoine Lavoisier sugirieron en 1780 que el cero absoluto podía ser de 1500 a 3000 grados abajo del punto de congelación del agua, y que mínimo debía ser de 600 grados por debajo de la congelación. John Dalton presentó la cifra de -3000°C. Joseph Gay-Lussac se acercó más después de sus investigaciones de cómo se relacionan el volumen y la temperatura. Descubrió que si la presión se mantiene constante, aumenta el volumen de un gas por 1/273 por cada aumento de 1°C por encima de cero.

A partir de esto, pudo extrapolar hacia atrás a una cifra para el cero absoluto de -273°C, aún más cerca de la cifra correcta.

El problema tomó un giro diferente luego de que Joule mostró que el calor es mecánico. En 1848, William Thompson (más adelante lord Kelvin) ideó una escala de temperatura basada sólo en las leyes de la termodinámica, no en las propiedades de cualquier sustancia particular (a diferencia de Fahrenheit y Celsius). Kelvin descubrió un valor para el cero absoluto que todavía se acepta, -273.15°C, muy cerca del valor que surge del termómetro de aire y de la teoría de Gay-Lussac. La escala Kelvin se basa en la escala Celsius pero comienza en -273.15°C, en lugar de 0°C. Aunque fue en extremo influyente, lo

¿Qué tan frío?

Incluso el espacio sideral no está en el cero absoluto. La temperatura ambiente es de 2.7 grados Kelvin, ya que la radiación cósmica de microondas de fondo (el calor que quedó del Big Bang), está presente en todo el espacio. El área conocida más fría está en la nebulosa Boomerang, una nube de gas oscuro que está sólo a 1 grado Kelvin. La temperatura más baja que jamás se haya logrado en forma artificial es 0.5 billonésimos de Kelvin que se alcanzó brevemente en un laboratorio del Instituto Tecnológico de Massachusetts en 2003.



nombraron caballero y presidente de la Real Sociedad, Kelvin no era un científico muy refinado, y rechazó tanto la teoría de la evolución de Darwin como la existencia de los átomos.

Calor y luz

Por milenios había sido claro para la humanidad que la luz del sol proporciona tanto luz como calor, pero el vínculo entre ellos se explicó sólo hace relativamente poco tiempo. La primera persona conocida en notar la conexión fue el erudito italiano Giambattista della Porta (*aprox.* 1535-1615), el cual, en 1606, notó el efecto del calentamiento de la luz. Al ser un poco polifacético, della Porta fue dramaturgo además de científico, publicó sobre agricultura, química, física y matemáticas. Su *Magiae naturalis* (1558) inspiró la fundación de la Academia Científica italiana, la Academia Linceana (Accademia del Lincei o "Academia de los Linces"), en 1603 (la portada del libro estaba ilustrada con un diseño de lince y el prólogo contenía una descripción del científico como alguien que "con ojos de lince examina las cosas que se manifiestan, de manera que después de observarlas puede usarlas con diligencia").

Émile du Châtelet estableció un vínculo entre el calor y la luz cuando se dio cuenta de que el poder del calentamiento de la luz variaba con su color. Aunque esto preveía el espectro electromagnético y

"(La solución cuántica para el problema del cuerpo negro) fue un acto de desesperación, ya que se tenía que encontrar a cualquier costo una interpretación teórica, sin importar qué tan alto pudiera ser (el precio)".

Max Planck, 1901



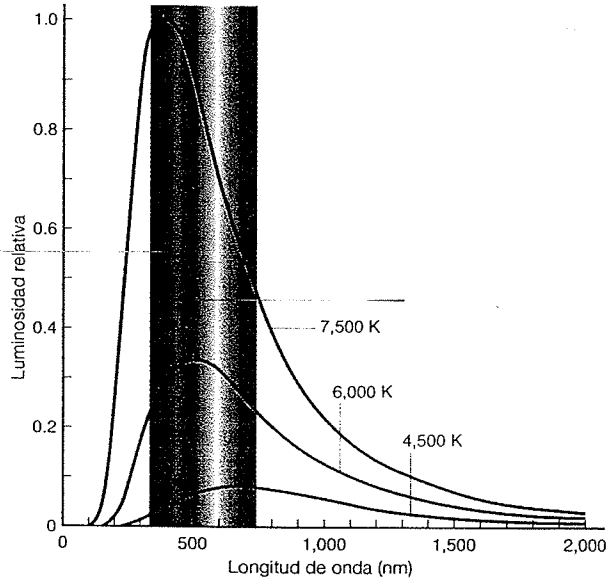
La Accademia dei Lincei ha ocupado el Palazzo Corsini en Roma desde 1883.

el descubrimiento de la radiación infrarroja, no se desarrolló más en ese tiempo. En 1901, Max Planck (ver cuadro, abajo) hizo un descubrimiento importante que vinculaba luz y calor mientras investigaba la radiación de cuerpo negro, pero fue un avance accidental, resultado de una tontería. Sin embargo, esa tontería iba a formar la base de la mecánica cuántica.

Radiación de cuerpo negro y cuantos de energía

Muchos tipos de material brillan cuando se calientan, emitiendo luz que pasa de rojo a amarillo y a blanco. La longitud de onda de la luz que se emite a temperaturas más altas se vuelve cada vez más corta, conforme avanza hacia el extremo azul del espectro. Como esto se añade a la luz amarilla y roja, el brillo del cuerpo caliente se vuelve más blanco y luego más azul. La gráfica que muestra esta distribución de calor y color se llama la curva de cuerpo negro. El "cuerpo negro" perfecto es algo que absorbe toda la radiación que cae en él. Una caja hecha de grafito con un diminuto agujero es una aproximación apropiada de un cuerpo negro perfecto (el agujero actúa como el cuerpo negro). Cuando se calienta el cuerpo negro, brilla, irradiando luz a diferentes longitudes de onda para diferentes temperaturas. El color de la luz irradiada depende por completo de la temperatura y no del material del cuerpo.

Planck trató de calcular la cantidad exacta de luz que emitía a diferentes longitudes de onda un cuerpo negro que



A 7500 K el cuerpo negro irradia luz en el extremo violeta del espectro; a 4500 K ha pasado al rojo.



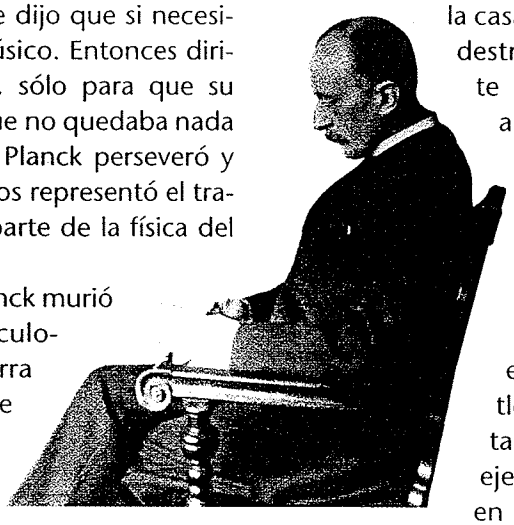
La espectroscopía, al trabajar con la luz emitida por la lava que brilla, se puede emplear para calcular la temperatura de la corriente de lava de una erupción volcánica.

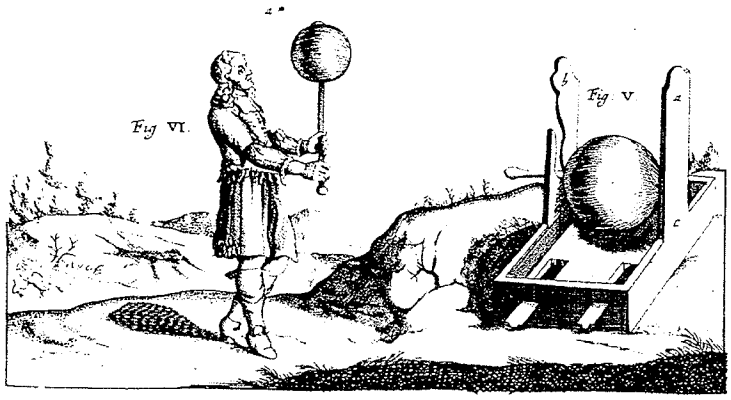
consistía en una caja negra con un diminuto agujero en ella. Aunque casi podía lograr que su ecuación diera una resultado correcto, tuvo que hacer una suposición extraña para hacerla perfecta. Esa suposición era que en lugar de que la luz surgiera de la caja en una corriente constante, como se pudiera esperar que fuera la onda, tenía que cortarse en pequeños trozos o paquetes de onda discontinuos o cuantos. Planck en realidad no había tenido la intención de que los cuantos de energía llegaran a formar parte del paisaje de la física. En lugar de eso, los consideró como un ingenioso compromiso matemático que en algún punto sería remplazado por un

Max Planck (1858-1947)

Max Planck tuvo una vida larga, pero trágica. Nacido en Kiel, en el ducado de Holstein (en la actualidad Alemania), primero quiso ser músico. Cuando le preguntó a otro músico qué debía estudiar, el hombre le dijo que si necesitaba preguntar, no sería músico. Entonces dirigió su atención a la física, sólo para que su profesor de física le dijera que no quedaba nada por descubrir. Por fortuna, Planck perseveró y su formulación de los cuantos representó el trabajo preliminar para gran parte de la física del siglo XX.

La primera esposa de Planck murió en 1909, tal vez de tuberculosis. Durante la Primera Guerra Mundial, mataron a uno de sus hijos en el Frente Occidental, y otro, Erwin, fue prisionero de los franceses. La hija de Planck, Grete, murió en el parto en 1917, y su hermana gemela, Emma, murió de la misma forma en 1919 (después de casarse con el viudo de Grete). En 1944, la casa de Planck en Berlín quedó destruida por completo durante un ataque de bombardeo aliado, y se perdieron todos sus artículos científicos y su correspondencia. La gota que derrama el vaso tuvo lugar en 1945, cuando los nazis ejecutaron a Erwin por conspirar en un plan para matar a Hitler. Planck perdió la voluntad de vivir después de la ejecución de Erwin, y murió en 1947.





Generador de electricidad de Otto von Guericke; funcionaba con electricidad estática.

nuevo descubrimiento o cálculo. Estaba muy equivocado.

Otras formas de energía

Mientras la luz y el calor se sometían a escrutinio, algunas nuevas formas de energía también estaban llamando la atención de la comunidad científica. Muchos tipos de energía que se habían explotado por años sólo recibieron nombre en el siglo XIX. El científico francés Gustave-Gaspard de Coriolis (1792-1843) describió la energía cinética en 1829, y el físico escocés William Rankine (1820-1872) acuñó el término "energía potencial" en 1853. La primera entre las fuentes de energía recién reconocidas fue la electricidad. Aunque el rayo era algo común para todos, nadie se había dado cuenta de que se relacionaba con la electricidad.

Descubrimiento de la electricidad

El primer tipo que se descubrió fue la electricidad estática. Incluso en la Antigüedad, la gente se daba cuenta de que frotar ámbar o azabache causaba algún tipo de fuerza que hacía que el material atrajera pelusa y pedazos de material, pero no se comprendía la naturaleza de la atracción. El filósofo natural inglés sir Thomas Browne (1605-1682) definió lo "eléctrico" como "un poder para atraer pajas y cuerpos ligeros, y convertir la aguja que fluye con libertad". En 1663, el científico alemán Otto von Guericke construyó el primer generador electrostático. Guericke ya había llevado a cabo experimentos con la presión del aire que mostraban la posibilidad de un vacío (ver página 28). Su generador electrostático, o "máquina de fricción", empleaba un globo de azufre que se podía girar y frotar con la mano para generar una carga. Isaac Newton sugirió usar un globo de vidrio en lugar de uno de azufre, y los diseños posteriores usaron otros materiales. En 1746, una máquina de fricción con una rueda grande que hacía girar varios globos de vidrio empleaba una espada y el cañón de un arma, suspendidos con cordones de seda como conductores; otro empleaba un cojín de cuero en lugar de una mano, y uno que se creó en 1785 implicaba dos cilindros cubiertos con piel de liebre que se frotaban entre sí.

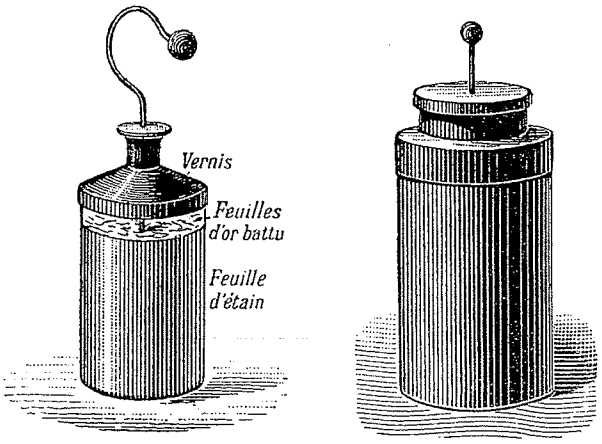
Los experimentos con la electricidad se volvieron más comunes en el siglo XVIII, y los generadores de electricidad estática eran atracciones populares en las conferencias públicas de ciencia. Dos personas, un maestro holandés de matemáticas llamado Pieter van Musschenbroek (1692-1761) y el clérigo alemán Ewald Georg

von Kleist (1700-1748), inventaron en forma independiente la botella de Leyden más o menos en 1744. Consta de una botella llena en parte de agua, con una barra o alambre de metal que cruza el corcho, y era un dispositivo simple para almacenar electricidad. Un diseño más eficiente tenía una laminilla de metal en el exterior de la botella.

Cuando von Kleist tocó por primera vez esta botella, un poderoso choque eléctrico lo tiró al piso. La botella de Lynden se convirtió en una herramienta valiosa en los experimentos con electricidad y es el origen del moderno capacitor. Benjamin Franklin, al investigar la botella, descubrió que la carga se mantiene en el vidrio y no en el agua, como se suponía antes.

Cometas y tormentas de rayos

El científico estadunidense Benjamin Franklin (1706-1790), quien luego ayudó a redactar la Declaración de Independencia de Estados Unidos, demostró por primera vez la naturaleza eléctrica de los rayos, en 1752. En un famoso experimento, puso a prueba su teoría al unir una barra de metal a un cometa y atar una llave al otro extremo de la cuerda. Hizo volar el cometa durante una tormenta eléctrica, con la llave colgando cerca de una botella de Leyden. Incluso sin rayos, había suficiente carga eléctrica en las nubes de tormenta para que la cuerda húmeda condujera electricidad a la llave y causara que brincaran chispas a la botella de Leyden. Franklin sugirió que la electricidad podía tener carga positiva o negativa. Inventó el pararrayos, que lleva la carga eléctrica de un rayo que cae con seguridad a la tierra mediante un conducto metálico, y la campana de rayos (ver cuadro, página 104).



Botellas de Leyden.

Electricidad de moda

Los experimentos con electricidad se volvieron populares como entretenimiento científico, a veces empleando a voluntarios desafortunados y tal vez poco dispuestos. La primera persona en llevar a cabo experimentos metódicos con la electricidad fue el tintorero y científico aficionado inglés Stephen Gray (1666-1736). Su "niño de la caridad" era un joven pobre, suspendido por un cordón aislante mientras sostenía una barra de vidrio cargada, con chispas que le salían de la nariz cuando atraía diminutas partículas de hoja de metal. Además de ser entretenido (al menos para el público), los experimentos de Gray en 1729 demostraron la conductividad, que la electricidad se podía pasar de un material a otro, incluyendo el agua. En un experimento similar, se pasaba una



¿La primera máquina de estimulación nerviosa eléctrica transcutánea?

Los antiguos egipcios pudieron haber empleado el pez gato eléctrico para propósitos médicos, y es seguro que los romanos encontraron que el pez torpedo negro era útil como fuente de alivio del dolor. Como el pez torpedo negro (Torpedo torpedo) produce una carga eléctrica, se puede emplear como máquina de estimulación nerviosa transcutánea de actividad analgésica. Los romanos empleaban al pescado para aliviar el dolor de gota, dolor de cabeza, operaciones quirúrgicas y parto. El pescado no sobrevive al procedimiento (es de suponer que se le usaba fuera del agua). Los intentos por imitar el efecto del pez eléctrico tuvieron su apogeo con el pez torpedo de cuero que hizo Henry Cavendish en 1776. Después de estudiar al pez, primero hizo una copia de madera, pero descubrió que no conducía bien la electricidad. Su segundo pez maniquí estaba hecho con pedazos gruesos de cuero de oveja con delgadas placas de peltre a cada lado para simular los órganos eléctricos. Conectó las placas a botellas de Leyden y remojó al pez de cuero en agua salada. Al poner la mano en el agua, cerca del pez, sintió un choque similar a los que describen personas que han sentido los efectos de un pez torpedo verdadero.

carga eléctrica por una línea de ancianos que se tomaban de la mano. El químico Charles du Fay (1698-1739), que trabajaba en París, desarrolló más el trabajo de Gray, y en 1773 llegó a la conclusión de que todo objeto y todo ser vivo contiene algo de electricidad. Demostró que la electricidad se presenta en dos formas, negativa, a lo que llamó "resinosa", y positiva, o "vítrea". En 1786, el médico italiano Luigi Galvani (1737-1798) experimentó el paso de corriente eléctrica por ranas muertas, causando que sus patas se retorcieran en forma espasmódica. Esto lo condujo a llegar a la conclusión de que los nervios de las ranas transportan un impulso eléctrico que causa que funcionen los músculos de sus patas.



Benjamin Franklin llevó a cabo experimentos con rayos para investigar la electricidad.

Poner a trabajar a la electricidad

Antes de que se pudiera dar buen uso a la electricidad, fue necesario encontrar una forma de liberarla o producirla siempre que se necesitara. La primera pila eléctrica, la precursora de la batería, fue creada por el físico Alessandro Volta (1745-1827), quien dio nombre al voltio, la unidad de medición del potencial eléctrico. Su "pila" eléctrica, hecha en 1800,

"En septiembre de 1752, erigí una barra de hierro para atraer un rayo a mi casa, con el fin de hacer algunos experimentos en él, con dos campanas para avisar cuando se electrificaba la barra. Un artilugio obvio para todo electricista.

Descubrí que a veces las campanas sonaban cuando no había rayo o trueno, pero sólo una nube oscura sobre la barra; y a veces después del destello del rayo de repente se detienen, y que en otras ocasiones, cuando no habían sonado antes, después de un destello, de repente empezaban a sonar; que la electricidad a veces era muy débil, de manera que cuando se obtenía una pequeña chispa, no se podía obtener otra por algún tiempo; en otras ocasiones, las chispas se seguían con extrema rapidez, y una vez tuve una corriente continua de campana a campana, del tamaño de una pluma de cuervo. Incluso durante la misma ráfaga, había considerables variaciones".

Benjamin Franklin, 1753

consistía en un montón de discos de cinc, cobre y papel remojados en una solución salina. No tenía idea de por qué esto producía una corriente eléctrica, pero en realidad no importaba, ya que era claro que funcionaba. El científico sueco Svante August Arrhenius (1859-1927) describió finalmente la intervención de los iones para transportar una carga eléctrica en 1884. El físico alemán Georg Ohm (1789-1854) empleó una versión de la pila de Volta para sus propias investigaciones de la electricidad, que lo llevaron a la formulación de la ley que tiene su nombre, publicada en 1827. La ley de Ohm afirma que cuando se transporta electricidad por un conductor:

$$I = V/R$$

donde I es la corriente en amperios, V es la diferencia de potencial en voltios y R es la resistencia en ohmios. La resistencia del material se mantiene constante, sin importar el voltaje, así que cambiar el voltaje afecta directamente la corriente.

En línea de espera: Magnetismo

No podemos avanzar más allá con la electricidad sin tomar en cuenta a los imanes. Algunos antiguos se dieron cuenta del poder de ciertos materiales para atraer hierro o de alinearse con el norte-sur, pero era algo inexplicable y debió parecer similar a la magia.

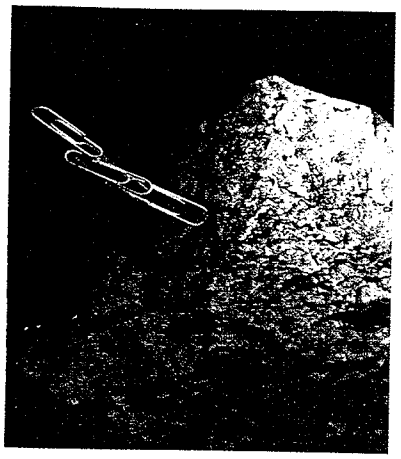
De acuerdo a Aristóteles, Tales (*aprox.* 625-543 a.C.) presentó una descripción



Georg Ohm, cuyo nombre se emplea en la actualidad para las unidades de resistencia eléctrica.



del magnetismo en el siglo VI a.C. En más o menos 800 a.C., el cirujano y escritor hindú Sushruta describió el uso de imanes para retirar esquirlas de metal del cuerpo. Otra referencia antigua al magnetismo se encuentra en una obra china escrita en el siglo IV a.C., *Book of the Devil Valley Master* (*El libro del maestro del valle del demonio*) en la cual se dice: "La piedra imán hace que el hierro se acerque o lo atrae". Una piedra imán es un pedazo imantado en forma natural del metal magnetita. Los trozos de magnetita con la estructura cristalina correcta se pueden imantar gracias a los rayos. Los adivinos chinos empezaron usando piedras imán con tablas de adivinación durante el siglo I a.C. Es posible que las piedras imán se emplearan en brújulas ya desde 270, pero el primer uso confirmado de una brújula para navegación apareció en el libro de Zhu Yu, Pingzhou *Table Talks* (*Conversaciones de sobremesa de Pingzhou*), en 1117, el cual expone: "El navegador conoce la geografía, observa las estrellas en la noche, observa al sol en el día; cuando está oscuro y nuboso, observa la brújula". Tal vez la brújula de navegación se inventó en forma independiente en Europa. Aunque la brújula china tenía 24 divisiones básicas, los tipos europeos siempre han tenido 16. Además, la brújula no apareció en Medio Oriente hasta después de su primer uso registrado en Europa, lo que sugiere que no pasó por Medio Oriente de China a Europa. Por último, mientras que las brújulas chinas a menudo se diseñaban para indicar el Sur, las brújulas europeas siempre han indicado al Norte.



Una piedra imán es magnética en forma natural y atraerá metales magnéticos como hierro y acero.

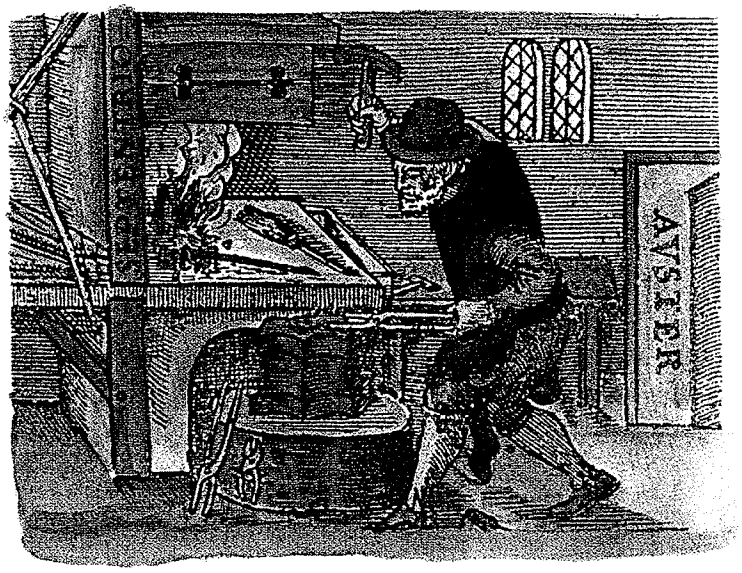
El inglés William Gilbert (1544-1603), científico de la corte de Isabel I, llevó a cabo las primeras investigaciones científicas del magnetismo. Gilbert acuñó la palabra latina *electricus*, que significa "de ámbar". Publicó su libro *De magnete* en 1600, describiendo en él muchos experimentos que había llevado a cabo para tratar de descubrir la naturaleza del magnetismo y la electricidad. Presentó la primera explicación racional de la misteriosa habilidad de la aguja de la brújula para señalar Norte-Sur, revelando la sorprendente verdad de que la Tierra en sí es magnética. Gilbert se las arregló para refutar la creencia popular entre los marineros de que



Una brújula emplea el campo magnético de la Tierra para ayudar a la navegación.

el ajo inutilizaba la brújula (no se permitía a los timoneles comer ajo cerca de la brújula del barco), y la idea de que una enorme montaña magnética cerca del Polo Norte atraería todos los clavos de hierro de cualquier barco que se aproximara demasiado a ella.

Se reconocía la fuerza potencial del magnetismo en historias del féretro de hierro de Mahoma, el cual se suponía que se conservaba flotando en el aire al haberlo colocado entre dos imanes (por supuesto, si este espectáculo fuera real, sólo se hubiera necesitado un imán sobre la tumba, ya que la gravedad hubiera proporcionado el impulso hacia abajo).



Un herrero haciendo un imán, ilustración de De Magnete *de William Gilbert.*

Electromagnetismo: La unión de la electricidad y el magnetismo

Las aplicaciones prácticas para la electricidad empezaron a aparecer a principios del siglo XIX. En 1820, el físico y químico danés Hans Christian Ørsted (1777-1851) se dio cuenta de que una corriente eléctrica podía desviar la aguja de una brújula. Ésta fue la primera pista de una conexión entre la electricidad y el magnetismo. Sólo una semana después, André-Marie Ampère presentó una explicación mucho más detallada. Demostró a la Académie de Science que cuando cables paralelos transportan una corriente eléctrica, se atraen o repelen entre sí, dependiendo de si sus corrientes corren en la misma dirección o en la opuesta, estableciendo así las bases para la electrodinámica. Al año siguiente, Michael Faraday llevó a cabo un experimento en el que puso un imán en un plato de mercurio y suspendió un cable sobre él, apenas metiéndose en el mercurio. Faraday descubrió que cuando pasaba una corriente eléctrica por el cable, giraba alrededor del imán. Llamó a esto "rotaciones electromagnéticas", e iba a ser la base del motor eléctrico. De hecho, un campo magnético cambiante produce un campo eléctrico y viceversa.

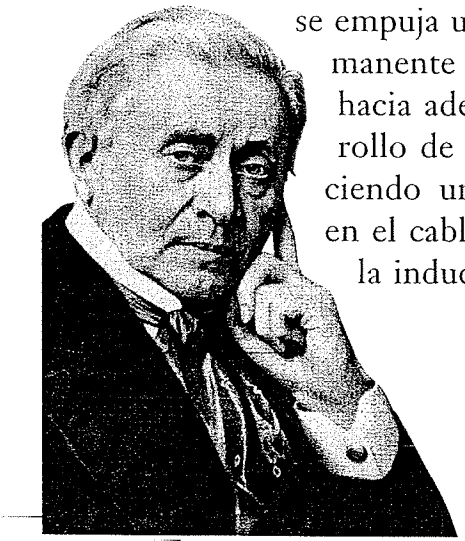
Faraday no pudo darse el tiempo para continuar inmediatamente con su trabajo sobre electromagnetismo, y recayó en el científico estadunidense Joseph Henry (1797-1878) crear el primer electroimán poderoso en 1825. Descubrió que al enrollar cable aislado alrededor de un imán y hacer pasar corriente por el cable podía fortalecer en gran medida la fuerza del imán. Construyó un electroimán que podía levantar casi 1600 kilos. Henry también per-

sistió para poner las bases para el telégrafo eléctrico. Extendió 1.7 kilómetros de cable fino a través de la Academia de Albany y luego pasó electricidad por el cable, empleándolo con éxito para dar fuerza a una campana en el otro extremo. Aunque fue Samuel Morse (1791-1872) quien prosiguió y creó la telegrafía, Henry había demostrado que el concepto era sólido.

Campos y fuerzas

Un campo es la forma en que la fuerza se transmite a distancia. Un campo magnético es el área en que actúa una fuerza magnética. Por lo general se muestra en forma de líneas que irradian del polo norte de un imán a su polo sur. La intensidad de una fuerza electromagnética o gravitacional se reduce en relación con el cuadrado de la distancia de la fuente, así, al doble de distancia de la fuente, la fuerza sólo tiene una cuarta parte de su intensidad original. La ley del inverso del cuadrado que relaciona las fuerzas fue notada por primera vez por Newton en relación con la fuerza gravitacional.

Si sobresale un nombre relacionado con la electricidad, tal vez sea el de Michael Faraday. Aunque estaba demasiado ocupado para continuar el trabajo sobre el electromagnetismo en la década de 1820, después de su primer experimento, volvió al tema en 1831 y descubrió el principio de la inducción eléctrica. Faraday enrolló dos rollos de cable en los lados opuestos de un anillo de hierro y luego pasó una corriente por un cable. Esto magnetizó el anillo y por un breve momento indujo una corriente en el otro rollo de cable, creando el primer transformador eléctrico. Seis semanas después inventó la dinamo, en la cual se empuja un imán permanente hacia atrás y hacia adelante en un rollo de cable, induciendo una corriente en el cable. La ley de la inducción de Faraday afirma que el flujo magnético que varía en el tiempo produce una fuerza electromotriz proporcional. Toda la generación de electricidad se basa en este principio. Faraday también introdujo los términos electrodo, ánodo, cátodo e ion, especulando que parte de una molécula estaba implicada en mover la electricidad entre el cátodo y el ánodo. Al final, Arrhenius explicó la verdadera naturaleza de las soluciones iónicas y de su conductividad, y se le otorgó el Premio Nobel por su trabajo en 1903.



Joseph Henry

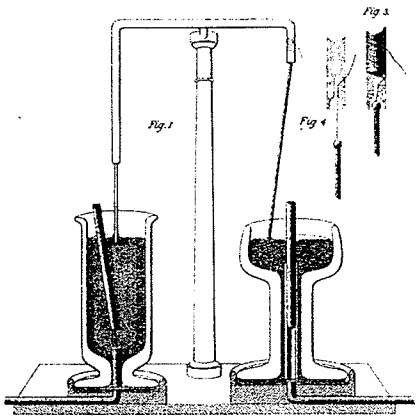
El amanecer de una nueva era electromagnética

Ampliando el trabajo práctico de Ørsted y Faraday, James Clerk Maxwell puso a trabajar las matemáticas con la relación entre la electricidad y el magnetismo. El resultado consistió en cuatro ecuaciones que sacudieron la tierra y que se publicaron en 1873, que demostraban que el electromagnetismo es una sola fuerza. Einstein consideró que las ecuaciones de Maxwell eran el más grande descubrimiento en física

"Éste fue el primer descubrimiento del hecho de que una corriente galvánica se podía trasmitir a gran distancia con tan poca disminución de la fuerza como para producir efectos mecánicos, y de los medios con los que se puede lograr la trasmisión. Me di cuenta de que ahora era factible el telégrafo eléctrico, no tenía en mente alguna forma particular de telégrafo, pero me refería sólo al hecho general de que ahora estaba demostrado que una corriente galvánica se podía transmitir a grandes distancias, con suficiente fuerza para producir efectos mecánicos adecuados al objetivo deseado".

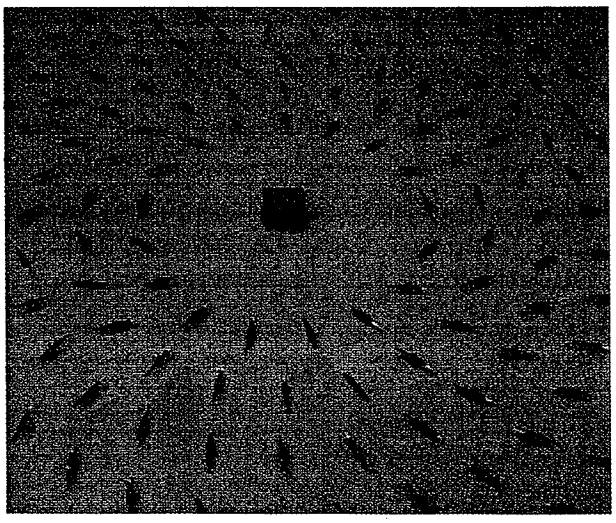
Joseph Henry

desde que Newton formuló la ley de la gravedad. En la actualidad, se reconoce al electromagnetismo como una de las cuatro fuerzas fundamentales que mantienen al Universo en orden (las otras son la gravedad y las fuerzas nucleares fuerte y débil que actúan dentro y entre los átomos). En la escala más pequeña, las fuerzas electromagnéticas unen a los iones en moléculas y proporcionan la atracción entre los electrones, y el núcleo de un átomo.

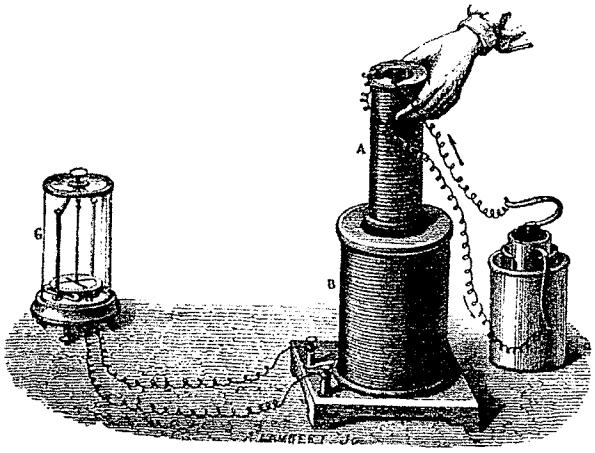


Equipo de Faraday para demostrar la rotación electromagnética.

Maxwell explicó cómo los campos eléctrico y magnético surgen de las mismas ondas electromagnéticas. Un campo eléctrico variable se logra mediante un campo magnético igual de variable que se encuentra en ángulo recto a él. También descubrió que la onda de campos electromagnéticos ondulantes viaja por el espacio vacío a 300 millones de metros por segundo (la velocidad de la luz). Éste fue un descubrimiento sensacional y no todos quedaron felices con la conclusión de que la luz es parte del espectro electromagnético. Einstein agregó el trabajo de Maxwell a sus teorías de la relatividad, diciendo que si un campo era eléctrico o magnético dependía del marco de referencia del observador. Si se ve de un marco de referencia, el campo es magnético. Si se examina de un marco de referencia diferente, el campo es eléctrico.



Un campo magnético se demuestra mediante el arreglo de las agujas de imán alrededor de un imán.



Aparato de Faraday que muestra la inducción electromagnética entre dos rollos de cable. Una batería líquida en el lado derecho proporciona una corriente, y el rollo pequeño se mueve hacia adentro y hacia afuera del rollo grande con la mano para inducir una corriente en el rollo grande, lo cual se indica por el galvanómetro a la izquierda

Leyes de Faraday de la inducción electromagnética

1. Se induce un campo electromagnético en un conductor cuando cambia el campo magnético que lo rodea.
2. La magnitud del campo electromagnético es proporcional a la velocidad de cambio del campo magnético.
3. El sentido del campo electromagnético inducido depende de la dirección de la velocidad de cambio del campo magnético.

Más ondas

Aunque Maxwell predijo la existencia de las ondas de radio, no se observaron hasta que el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (1857-94) produjo ondas electromagnéticas de 4 metros en su laboratorio, en 1888. Hertz no reconoció el significado de las ondas de radio y, cuando se le preguntó sobre el impacto que su descubrimiento tendría, contestó: "Me imagino que ninguno". Además de producir ondas de radio, Hertz descubrió que se podían transmitir a través de algunos materiales, pero que rebotaba en otros una cualidad que más adelante conduciría a la creación del radar. El descubrimiento de las ondas de radio hizo que fuera irresistible la explicación de la radiación electromagnética de Maxwell. En los siguientes años, el descubrimiento de microondas, rayos X, infrarrojos, ultravioletas y gamma completaron el espectro electromagnético.

Nacido en Londres en una familia pobre, Faraday dejó la escuela a los 14 años de edad y se hizo aprendiz con un encuadernador, educándose al leer los libros de ciencia en que trabajaba. Después de escuchar cuatro conferencias que impartió Humphry Davy en la Institución Real en 1812, Faraday escribió a Davy pidiéndole trabajo. Davy rechazó la solicitud al inicio, pero al año siguiente lo empleó como asistente de química en la Institución Real. Al principio, Faraday sólo ayudó a otros científicos, pero luego empezó a realizar sus propios experimentos, incluyendo los relacionados con la electricidad.

"¡Convertir el magnetismo en electricidad!".

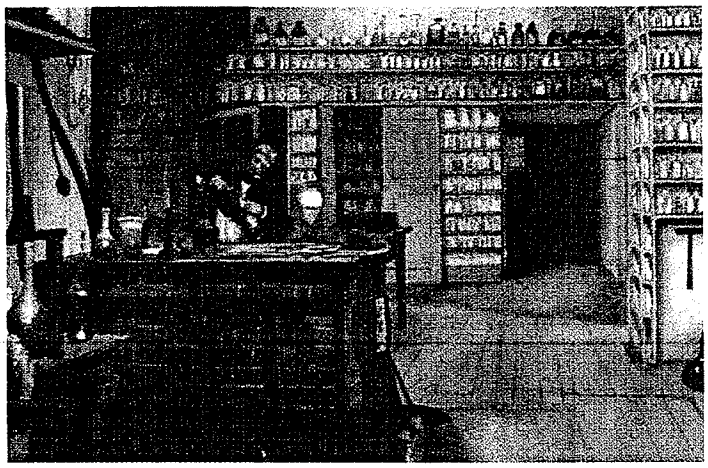
Lista de actividades de Michael Faraday, 1822; realizado en 1831

Michael Faraday (1791–1867)

Nacido en Londres en una familia pobre, Faraday dejó la escuela a los 14 años y fue aprendiz de encuadernador, como autodidacta leyó los libros de ciencia que encuadernaba. Después escuchó cuatro conferencias dadas por Humphry Davy en la Institución Real en 1812 y Faraday le escribió, preguntándole si le daba una oportunidad de trabajo. Davy rechazó inicialmente su solicitud, pero al siguiente año lo empleó como asistente de químico en la Institución Real. Al principio Faraday sólo ayudaba a otros científicos, pero después empezó a realizar sus propios experimentos, incluyendo aquellos con electricidad. En 1826 él comenzó las conferencias de Navidad en la Institución Real y los discursos de viernes por la tarde (ambos continúan hoy en día). Faraday dio muchas conferencias, estableciéndose como el principal catedrático de su tiempo. Descubrió la inducción magnética en 1831, poniendo así la base para el uso práctico de la electricidad, lo cual había sido considerado previamente como un fenomeno interesante, pero sin verdadera relevancia.

En reconocimiento a sus logros, a Faraday le ofrecieron un par de veces la presidencia de la Real Sociedad (las cuales rechazó), y le fue ofrecido un título de nobleza (el cual también rechazó).

Terminó sus días en el Palacio de la Corte, en Hampton, en una casa que fue un regalo del consorte de la reina Victoria, el príncipe Alberto.



Michael Faraday en su laboratorio en la Institución Real.

En 1826 inició las conferencias de Navidad y los Discursos de la noche del viernes de la Institución Real (ambos todavía continúan en la actualidad). Faraday presentó muchas conferencias, llegando a establecerse como el conferencista científico principal de su tiempo. Descubrió la inducción electromagnética en 1831, poniendo la base para el uso práctico de la electricidad, a la que antes habían considerado un fenómeno interesante, pero de poco uso real.

En reconocimiento a sus logros, le ofrecieron a Faraday dos veces la presidencia de la Real Sociedad (y la rechazó dos veces) y le ofrecieron un título de caballero (que también rechazó). Terminó sus días en Hampton Court Palace, en una casa que fue regalo del consorte de la reina Victoria, el príncipe Alberto.



Ecuaciones de Maxwell

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q_{enc}}{\varepsilon_0}$$
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\varepsilon_0$$

La primera ecuación de Maxwell es la ley de Gauss, que describe la forma y fuerza de un campo eléctrico, mostrando que se reduce con la distancia, siguiendo la misma ley del inverso del cuadrado que la gravedad.

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

La segunda ecuación describe la forma y fuerza de un campo magnético: las líneas de fuerza siempre van en curvas del polo norte al sur de un imán (y un imán siempre tiene dos polos).

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

La tercera ecuación describe cómo las corrientes eléctricas cambiantes crean campos magnéticos.

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \alpha_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \alpha_0 i_{enc}$$
$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \tau} + \alpha_0 j_c$$

La cuarta ecuación describe cómo los campos magnéticos cambiantes crean corrientes eléctricas, y también se conoce como ley de inducción de Faraday.

La siguiente forma de energía que se descubrió fueron los rayos X. Aunque el físico alemán Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) nombró y describió los rayos X y por lo general se le acredita con su descubrimiento en 1895, en realidad no fue el primero en observarlos. Los detectó por primera vez su compatriota, el físico Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914). Hittorf fue uno de los inventores del tubo de Crookes, un dispositivo experimental empleado para investigar los rayos catódicos. Consta de un vacío dentro del cual una corriente de electrones fluye entre un cátodo y ánodo, y es precursor del tubo de rayos catódicos empleado en la televisión antes de la llegada de la moderna pantalla de plasma. Hittorf encontró que cuando dejaba placas fotográficas cerca del tubo de Crookes, algunas más tarde estaban marcadas por sombras, pero no investigó la causa. Otros científicos también estuvieron cerca de los rayos X, antes de que

"Apenas podemos evitar la conclusión de que la luz consiste en las ondulaciones transversas de algún medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos".

James Clerk Maxwell, *aprox.* 1862



Rayos X de la mano de la esposa de Röntgen, la primera imagen producida de rayos X; su anillo de boda es visible con claridad

"No es de ningún uso en absoluto [...] es sólo un experimento que demuestra que el maestro Maxwell tenía razón, sólo tenemos estas misteriosas ondas electromagnéticas que no podemos ver a simple vista. Pero están ahí".

Heinrich Hertz, sobre su descubrimiento de las ondas de radio en 1888

Que se haga la luz

El primer suministro público de electricidad fue en Godalming, Surrey, Inglaterra, donde instalaron la iluminación eléctrica de la calle en 1881. Una rueda de agua en el río Wey impulsaba un alternador Siemens que alimentaba lámparas de arco en la ciudad, proporcionando electricidad a varias tiendas y otras instalaciones.

Röntgen produjera la famosa fotografía de rayos X de la mano de su esposa, y explicara el fenómeno. Röntgen hizo que quemaran sus notas de laboratorio después de su muerte, así que es imposible saber con exactitud qué sucedió, pero parece que estaba investigando los rayos catódicos, usando una pantalla pintada con platinocianuro de bario y un tubo de Crookes envuelto en algo negro. Vio un ligero brillo verde en la pantalla y se dio cuenta de que rayos de algún tipo estaban pasando la cartulina del tubo y hacían que la pantalla brillara. Investigó los rayos y publicó sus descubrimientos dos meses después.

Radiación

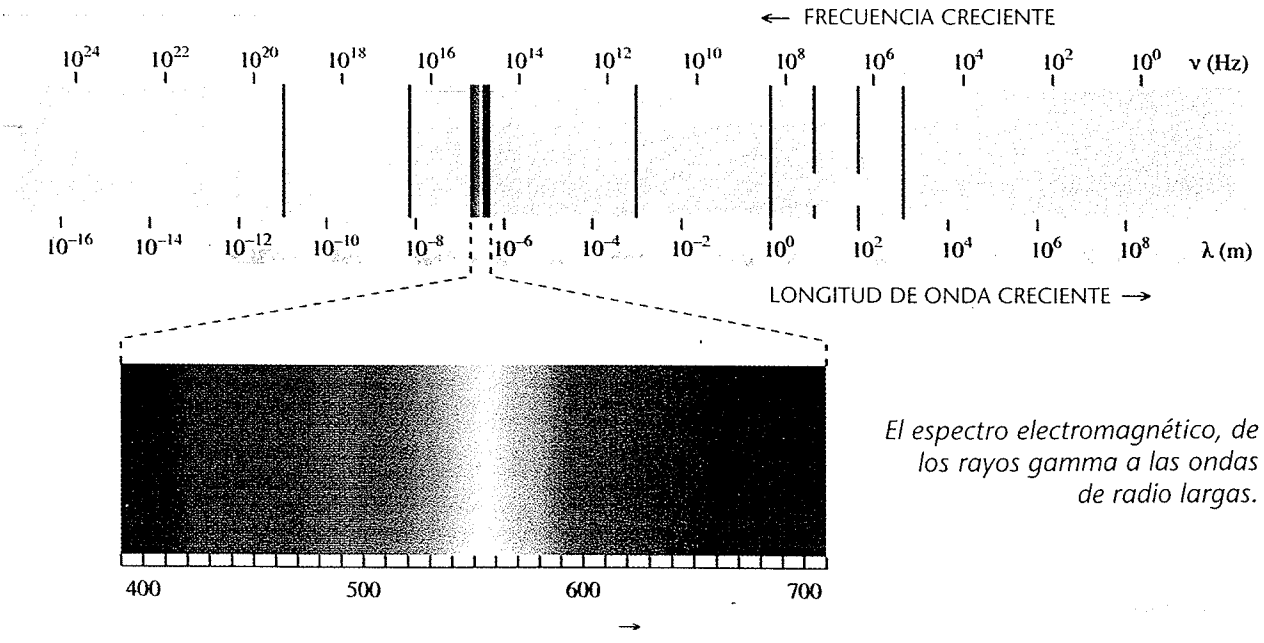
Cuando el físico francés Henri Becquerel (1852-1908) escuchó sobre los rayos X, en 1896, que procedían de un punto brillante en la pared de un tubo de Crookes, sospechó que los objetos fosforescentes también pueden emitir rayos X. Becquerel era profesor de física en el Museo Francés de Historia Natural y, por lo tanto, tenía acceso a una gran colección de materiales fosforescentes. Descubrió que si les permitía absorber energía de la luz del sol por un tiempo, estos materiales brillarían en la oscuridad hasta que se agotara la energía. Entonces descubrió que si envolvía una placa fotográfica en papel oscuro para excluir la luz y lo colocaba sobre un plato de sales fosforescentes que se habían "cargado" en el sol, las áreas de luz aparecían en la placa. Al poner un objeto de metal entre la placa y el plato, produjo una imagen como sombra del objeto en la placa fotográfica, igual que las placas de rayos X

de Röntgen. En un experimento posterior, preparó su sistema y planeó dejarlo al sol. Aunque París no tuvo luz solar por varios días, Becquerel decidió revelar la placa de todas maneras, esperando no encontrar nada. Para su sorpresa, encontró una imagen, las sales de uranio que estaba empleando parecían emitir rayos X sin exposición al sol, lo que parecía violar la ley de la conservación de la energía para producir energía de la nada. Investigó más a fondo y encontró que la radiación no era la misma que en los rayos X, ya que un campo magnético la podía desviar y, por lo tanto, debe consistir en partículas cargadas. Sin embargo, no trabajó más en el tema, dejando el campo abierto para la física experimental polaca, Marie Curie.

Marie Curie (1867-1934) estaba trabajando en su doctorado sobre "rayos de uranio" cuando descubrió que la mena de la que se extraía el uranio, la pechblenda, es más radiactiva que el elemento mismo. Esto sugería que existían otros elementos, más radiactivos, en la mena. Con su marido Pierre, extrajo dos de estos elementos: polonio y radio. Le tomó cuatro años desde su descubrimiento en 1898 hasta extraer un décimo de gramo de radio, empleando toneladas de pechblenda. Pierre descubrió que un gramo de radio podía calentar uno y un tercio de gramo de agua desde el punto de congelación

Becquerel por siempre

El puesto de catedrático en física en el Museo Francés de Historia Natural era en esencia hereditario. Antoine Becquerel (1788-1878) fundó el puesto en 1838 y lo ocupó un Becquerel sin interrupción hasta 1948, cuando el titular no tuvo un hijo al cual pasárselo.

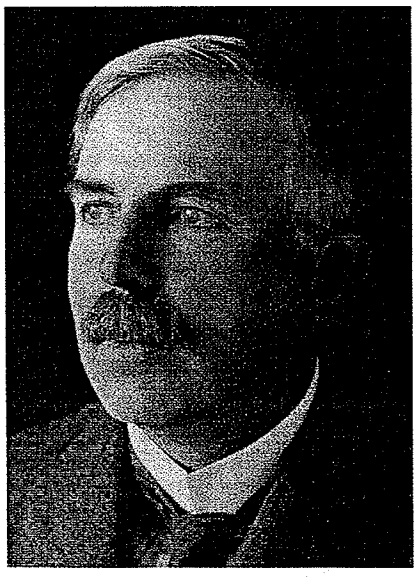


El espectro electromagnético, de los rayos gamma a las ondas de radio largas.

hasta el punto de ebullición en una hora, y podía continuar haciendo esto, una y otra vez. Parecía como energía de la nada, un descubrimiento sorprendente.

Los Curie no supieron qué forma de energía era en realidad la radiactividad. Ese descubrimiento le tocó al químico y físico británico nacido en Nueva Zelanda, Ernest Rutherford (1871-1937), quien trabajaba en el laboratorio Cavendish en Cambridge. Rutherford fue la primera persona que admitieron en Cambridge como estudiante investigador, en lugar de avanzar a la investigación después de obtener un título en la universidad. Se presentó, por una beca de Nueva Zelanda, dos meses antes de que Röntgen descubriera los rayos X, pero sólo obtuvo el puesto por casualidad. Fue uno de dos solicitantes de la beca y no lo escogieron, pero el solicitante que obtuvo el puesto se marchó. Rutherford empezó a trabajar en ondas de radio, y tal vez hubiera logrado la transmisión a larga distancia antes que Marconi, pero como no estaba interesado en su potencial comercial, no explotó sus hallazgos.

Cuando Rutherford dirigió su atención a la radiación, encontró que la forma que Becquerel había descubierto estaba hecha de dos tipos diferentes: Radiación alfa, que se puede bloquear con una hoja de papel o unos cuantos centímetros de aire vacío; y radiación beta, que puede penetrar más en la materia. En 1908, Rutherford mostró que la radiación alfa es una corriente de partículas alfa; átomos de helio despojados de sus electrones. La radiación beta consta de electrones de movimiento rápido, como un rayo catódico, pero con más energía. En 1900, Rutherford descubrió un tercer tipo de radiación, al que llamó "radiación gamma". Como los rayos X, los rayos gamma forman parte del espectro electromagnético. Son ondas de alta energía, con una longitud de onda más corta que los rayos X. El trabajo de Rutherford lo había llevado al interior del átomo, que es nuestro próximo destino.



Ernest Rutherford

Se necesitan: Átomos

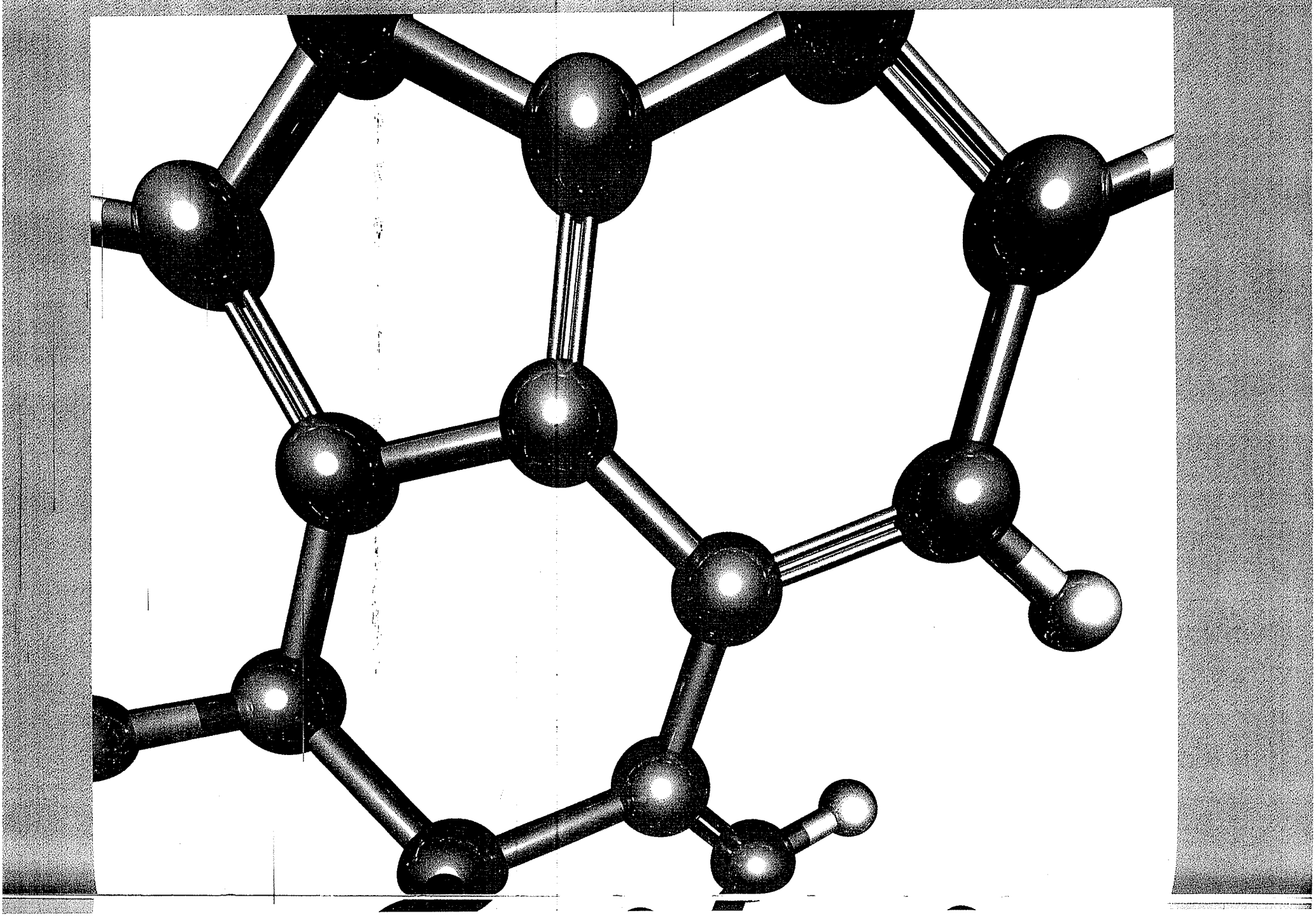
El trabajo en termodinámica a finales del siglo XIX mató el modelo calórico del calor y condujo a físicos como el austriaco Ludwig Eduard Boltzmann y James Clerk Maxwell a creer que el calor es una medición de la velocidad a lo que se están moviendo las partículas, aunque no estaban seguros sobre la naturaleza de las partículas involucradas. La transferencia de calor y la conductividad de la electricidad sólo se podían comprender del todo una vez que quedara claro que dependían de un modelo atómico de la materia. Para que la electricidad viaje por un conductor,

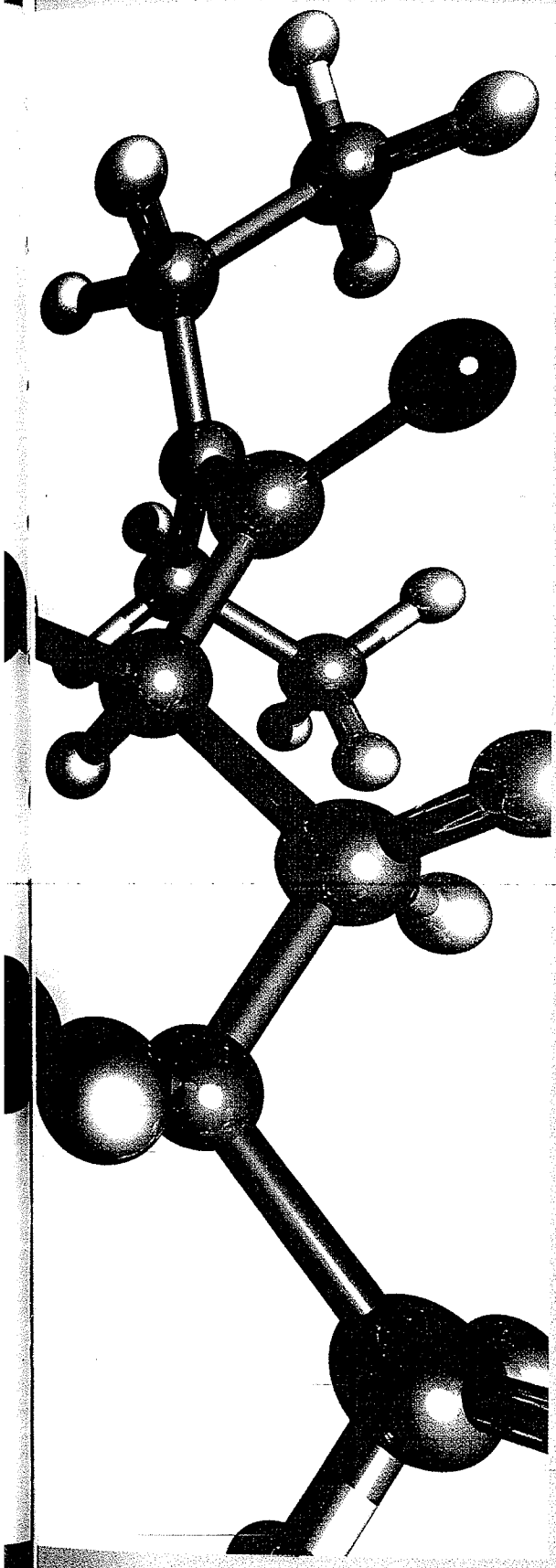
los electrones deben pasar entre los átomos; para que el calor se mueva de un lugar a otro por conducción o convección, las partículas se deben mover. La aceptación del modelo atómico de la materia al inicio del siglo XX abrió la puerta a explorar el interior del átomo y eso, a su vez, condujo a una mayor comprensión de cómo la energía se comporta y se transmite.

Marie Curie (Manya Sklodowska, 1867-1934)

Nacida en Varsovia, en la Polonia ocupada por los rusos, Manya Sklodowska no tenía oportunidad de acceder a una educación universitaria en su país, así que se fue a la Sorbona en París para estudiar. Ahí conoció y se casó con Pierre Curie, quien estaba trabajando ya con materiales magnéticos. El embarazo retrasó su doctorado, que fue en el tema de los "rayos de uranio". Ella tenía que trabajar en un cobertizo con corrientes de aire, ya que los académicos temían que la presencia de una mujer en el laboratorio causara tanta tensión sexual que no se haría nada de trabajo, al menos por parte de los hombres. En 1898 empezó a trabajar en aislar los elementos radiactivos desconocidos en la pechblenda (mena de uranio). Su marido Pierre abandonó su propia investigación para ayudarla. Descubrieron dos elementos radiactivos, polonio (nombrado en honor a Polonia) y radio. En 1903 otorgaron a Marie y Pierre Curie el Premio Nobel de Física, el cual compartieron con Henri Becquerel. Sólo tres años después murió Pierre, después de que resbalara en una calle de París y que la rueda de una carreta arrastrada por caballos que pasaba le aplastara el cráneo. Pudo haber estado sufriendo de periodos de mareo, síntoma de la enfermedad por radiación. Marie murió de leucemia en 1934, también víctima de la exposición a la radiación. Sus cuadernos de notas siguen siendo tan radiactivos que incluso en la actualidad se les debe guardar en una caja fuerte recubierta con plomo. Es la única mujer que ha recibido dos Premios Nobel (el segundo fue por química en 1911, también por su trabajo de radiactividad).







CAPÍTULO 5

DENTRO DEL **ÁTOMO**

La creencia de que los átomos son como bloques de construcción de la materia tiene una historia antigua. Algunos pensadores budistas en el siglo VII a.C. creían que toda la materia estaba formada por átomos, a los que consideraban como una forma de energía. En Europa, preatomistas como Empédocles y Anaxágoras también habían concebido partículas invisiblemente diminutas de la materia. Estos primeros filósofos-científicos llegaron a esa creencia sólo mediante un proceso de pensamiento deductivo. Aunque el atomismo dejó de ser favorecido por muchos siglos, al final fue el modelo que prevalecería, apoyado por experimentación y observación. Pero los primeros atomistas no tenían toda la razón. Sus ideas de que los átomos eran las partículas más pequeñas e indivisibles de la materia demostraron ser incorrectas, ya que los átomos están formados por partículas subatómicas. Conforme los científicos hacían pruebas dentro del átomo, éste demostraría ser un lugar extraño e impredecible.

El descubrimiento de la estructura atómica de la materia abrió la puerta a un mundo totalmente nuevo para los físicos.



Disección del átomo

John Dalton describió su teoría atómica en 1803, diciendo que los elementos están formados por átomos idénticos que se combinan en proporciones de números enteros para formar compuestos químicos. No todos aceptaron la teoría, hasta que el físico francés Jean Perrin (1870-1942) midió el tamaño de una molécula de agua más de un siglo después, en 1908, aunque muchos científicos aceptaban y trabajaban con la teoría antes de esta fecha. Pero incluso antes de que se confirmara la teoría como un hecho, la premisa de que los átomos no se pueden subdividir se estaba viniendo abajo.

El físico británico Joseph John (J. J.) Thomson (1856-1940) descubrió el electrón en 1897, durante su trabajo con rayos catódicos y tubos de Crookes (ver página 109). Thomson descubrió que los rayos catódicos viajan con mucha más lentitud que la luz y, por lo tanto, no podían ser parte del espectro electromagnético, como se sospechaba antes. Llegó a la conclusión de que un rayo catódico es en realidad una corriente de electrones. El concepto de que el electrón era una parte del átomo que podía liberarse y actuar por su lado derribó la teoría de que el átomo era indivisible. En 1899, Thomson midió la carga de un electrón y calculó su masa, llegando a la sorprendente conclusión de que es de alrededor de una dosmilésima parte de la masa de un átomo de hidrógeno.

Aunque a Thomson le otorgaron el Premio Nobel por su trabajo en el electrón en 1906, su importancia no fue evidente de inmediato. En realidad, los físicos no podían ver la trascendencia que tendrá el electrón y, de hecho, el brindis en la comida anual en el Laboratorio Cavendish, en Cambridge, fue: "Al electrón: Que nunca sea útil para alguien".

Budines de ciruela y sistemas solares

Al modelo del átomo de J. J. Thomson, propuesto en 1904, se le ha llamado "budín de ciruela" ya que se parece a una bola de budín de carne adornado con pasas. Describió al átomo como una nube de carga positiva salpicada en todas partes con electrones. En un ejemplo algo confuso de reciclar terminología, los llamó "corpúsculos". La parte con carga positiva se mantuvo bastante nebulosa, mientras que los electrones eran pasas bien definidas pegados en ella, tal vez orbitando en anillos fijos.

El modelo de budín de ciruela se refutó en 1909 mediante un experimento que llevó a cabo el físico alemán Hans Geiger (1882-1945) y el neozelandés Ernest Marsden (1889-1970) en la Universidad de Manchester, mientras trabajaba bajo la supervisión de Ernest Rutherford. Su experimento implicaba dirigir un rayo de partículas alfa hacia una hoja muy delgada de lámina de oro rodeada por una hoja circular de sulfuro de zinc. El sulfuro de zinc se encendía cuando lo golpeaban

> "La suposición de un estado de la materia más finamente dividido que el átomo es en alguna forma asombrosa".
>
> J. J. Thomson

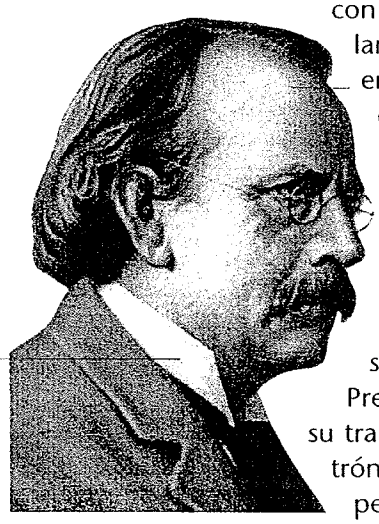


las partículas alfa (núcleos de helio). Los experimentadores esperaban ver que las partículas alfa pasaran a través de la lámina con poca refracción, y que el diseño que hicieran después de pasar por la lámina les diera información sobre la distribución de la carga dentro de los átomos de oro. Los resultados los sorprendieron. Fueron muy pocas las partículas que se refractaron, pero las pocas que lo hicieron se refractaron a ángulos mucho mayores a 90°. Rutherford esperaba que el experimento apoyara el modelo de budín de ciruela y no estaba nada preparado para este resultado. La única conclusión que pudo establecer fue que la carga positiva en el átomo estaba concentrada en un centro diminuto, no distribuida por todo el átomo.

A Rutherford le quedó la tarea de presentar un nuevo modelo para la estructura del átomo que remplazara al desacreditado "budín de ciruela". Lo que produjo fue un modelo con un núcleo diminuto y denso, rodeado por gran cantidad de espacio vacío, y salpicado por electrones en órbita. No estaba seguro de si el núcleo tenía carga positiva o negativa, pero calculó que su tamaño era de menos de 3.4×10^{-14} metros de diámetro (ahora se sabe que es alrededor de la quinta parte de esto). Se

J. J. Thomson (1856-1940)

Joseph John (J. J.) Thomson fue hijo de un encuadernador. Era demasiado pobre para tener un periodo de aprendizaje como ingeniero y, por lo tanto, en lugar de eso fue al colegio Trinity, Cambridge, para estudiar matemáticas con una beca. A la larga se convertiría en rector de ese colegio, establecería el Laboratorio Cavendish como el laboratorio de física más destacado en el mundo y se le otorgaría el Premio Nobel por su trabajo con el electrón. Gracias a la experimentación con los rayos catódicos, Thomson pudo identificar al electrón como partícula en 1897 y entonces midió su masa y carga en 1899. En 1912 mostró cómo usar los rayos positivos que se podían producir, empleando un ánodo perforado en un tubo de descarga para separar átomos de diferentes elementos. Esta técnica forma la base de la espectrometría de masas, que se emplea comúnmente en la actualidad para analizar la composición de un gas u otra sustancia. Thomson destacaba por su torpeza. No sólo dependía de sus asistentes de investigación para manejar experimentos delicados, sino que ellos incluso trataban de mantenerlo fuera del laboratorio para que no afectara su equipo. Pero lo querían bien y era una inspiración; siete de sus asistentes de investigación y su propio hijo siguieron adelante y pasaron a ser ganadores con el Premio Nobel. Hicieron Caballero a Thomson en 1908.



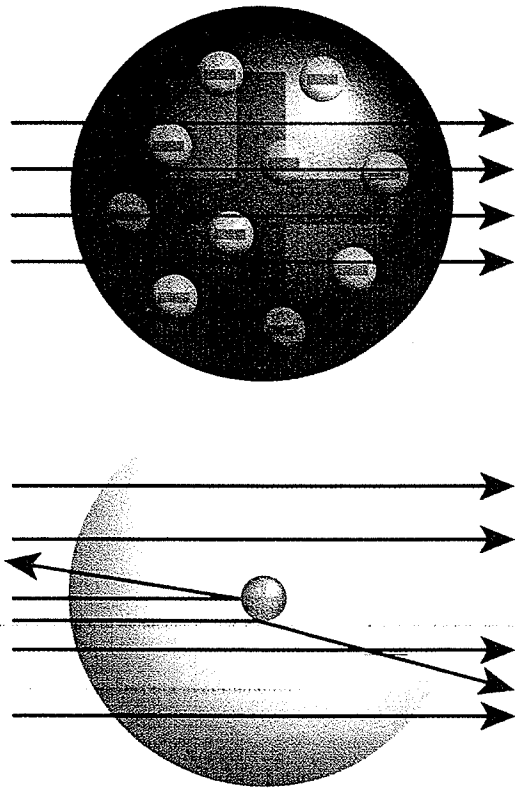


"Los átomos de los elementos consisten en cierta cantidad de corpúsculos con electrificación negativa encerrados en una esfera de electrificación positiva uniforme".

J. J. Thomson, 1904

El diagrama de arriba muestra el resultado esperado del experimento con lámina de oro de Rutherford, donde las partículas alfa pasan a través del átomo; el diagrama de abajo muestra el resultado sorprendente; algunas partículas salen muy refractadas.

sabía que el átomo de oro tenía alrededor de 1.5 X 10^{-10} metros de radio, lo que hacía que el núcleo fuera menos de 1/4000 del diámetro del átomo.



El modelo saturnal

El físico japonés Hantaro Nagaoka en 1904 propuso un modelo del átomo basado en Saturno y sus anillos. Esto daba al átomo un núcleo macizo y electrones en órbita que se mantenían en su lugar por un campo electromagnético. Se le ocurrió la idea después de escuchar a Ludwig Boltzmann hablar de la teoría cinética de los gases y el trabajo de James Clerk Maxwell sobre la estabilidad de los anillos de Saturno mientras viajaba por Alemania y Austria en 1892-1896. Nagaoka abandonó la teoría en 1908.

Rutherford no había acabado con el átomo. Propuso una estructura en la que el núcleo del átomo contenía partículas de carga positiva: Protones, los cuales descubrió en 1918, y algunos electrones. Pensó que el resto de los electrones orbitaba el núcleo.

El físico danés Niels Bohr (1885-1962) perfeccionó el modelo de Rutherford en 1913 de tal manera que se permitía a

"Fue el evento más increíble que jamás me hubiera sucedido en la vida. Era casi tan increíble como si dispararas un proyectil de 15 pulgadas a una hoja de papel de seda y volviera y te golpeara. Al considerarlo, me di cuenta de que esta dispersión hacia atrás debía ser resultado de una sola colisión, y cuando hice cálculos, me di cuenta de que era imposible tener algo de esa magnitud a menos que tomaras un sistema en el cual la mayor parte de la masa del átomo estuviera concentrada en un núcleo diminuto. Fue entonces que tuve la idea de un átomo con un diminuto centro macizo, que tenía carga".

Ernest Rutherford



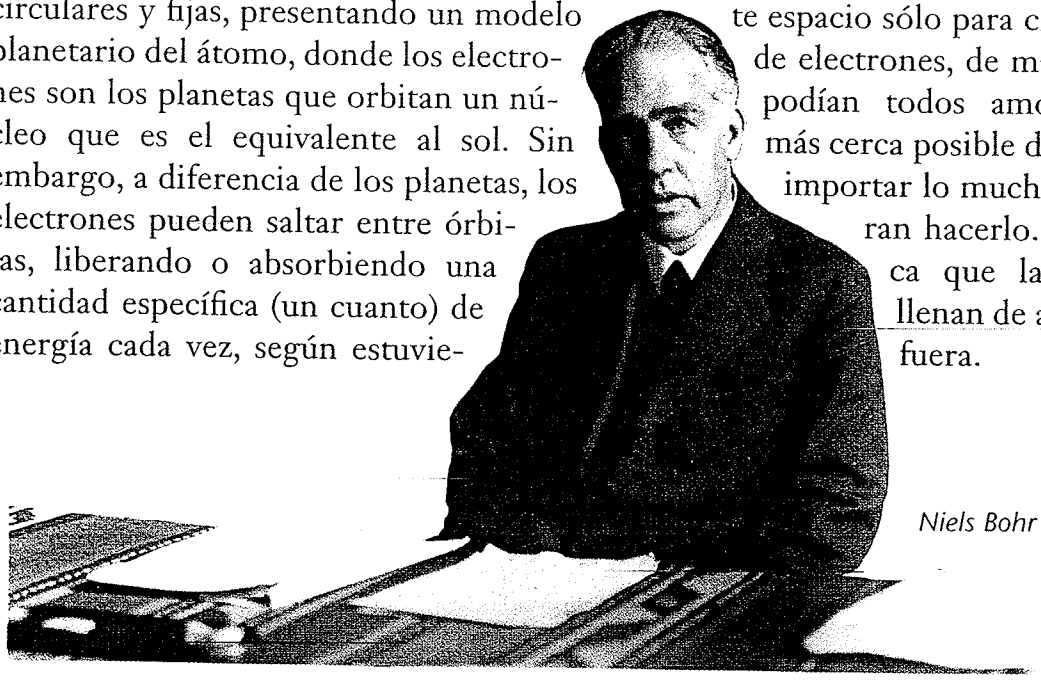


Los anillos de Saturno proporcionaron un modelo para el átomo de Nagaoka.

los electrones mantenerse en órbita. Sugirió que en lugar de vagar en el espacio fuera del núcleo, siguiendo cualquier camino que quisieran, los electrones estaban restringidos a órbitas particulares y que son físicamente incapaces de emitir radiación todo el tiempo (lo que podrían hacer si se aplicaran las leyes de la física clásica). Bohr creía que estas órbitas eran circulares y fijas, presentando un modelo planetario del átomo, donde los electrones son los planetas que orbitan un núcleo que es el equivalente al sol. Sin embargo, a diferencia de los planetas, los electrones pueden saltar entre órbitas, liberando o absorbiendo una cantidad específica (un cuanto) de energía cada vez, según estuvieran moviéndose hacia el núcleo o alejándose de él.

Por ejemplo, de acuerdo al modelo de Bohr, el electrón único del hidrógeno puede existir sólo en un número limitado de órbitas. Cada órbita representa un nivel particular de energía. Al nivel más bajo se le llama el estado basal y es el punto más cercano al que llega el electrón del núcleo. Cuando el átomo de hidrógeno absorbe un fotón de luz, el electrón salta a una órbita de radio más grande (nivel de energía más elevada). A qué órbita o nivel salta, depende de la energía que contiene el fotón. Cuando el átomo emite ese fotón, el electrón salta de vuelta a su órbita previa (nivel de energía menor).

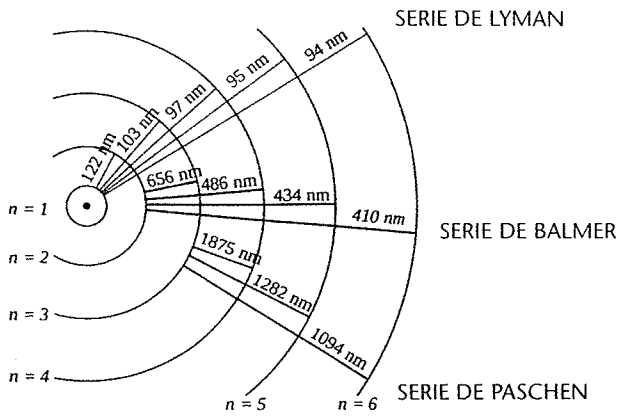
Sostuvo que cada órbita tenía suficiente espacio sólo para cierto número de electrones, de manera que no podían todos amontonarse lo más cerca posible del núcleo, sin importar lo mucho que quisieran hacerlo. Esto significa que las órbitas se llenan de adentro hacia fuera.



Niels Bohr en 1935.



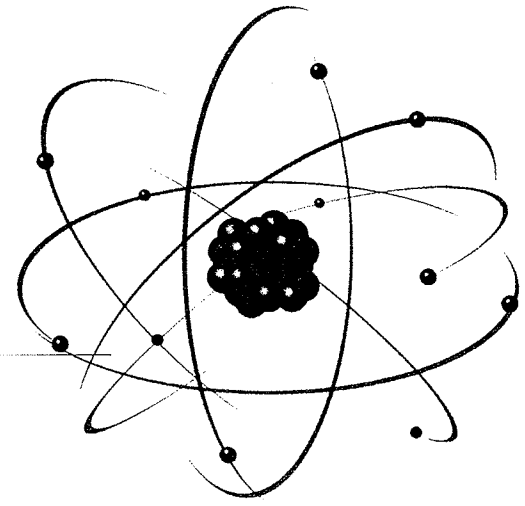
El electrón absorbe o libera un fotón o cuanto de energía sólo cuando hace un "salto cuántico" entre órbitas. La cantidad de energía, o longitud de onda de la energía absorbida o liberada, está determinada por la órbita. Parecía una diestra prestidigitación, pero cuando Bohr puso a prueba su teoría, descubrió que los átomos de hidrógeno emiten energía en la longitud de onda que predecían sus matemáticas si los electrones podían saltar entre sus órbitas prescritas, a las que llamó capas. Lo que es más, el modelo de Bohr explicaba por qué el hidrógeno, y de hecho todos los elementos, produce un espectro único de absorción y emisión. Este principio es la base de la espectroscopía, empleada por los astrónomos para revelar la composición química de las estrellas.



Las transiciones de la capa de electrones del hidrógeno, con sus energías asociadas.

Solaz cuántico

Cuando Max Planck habló de cuantos como forma de mover la energía en pequeños paquetes, no tenía la intención de que alguien tomara en serio el cuanto; era una solución teórica que suponía que pronto sería remplazada en el momento en que alguien desarrollara las matemáticas que explicaran lo que en realidad sucedía. Pero había encontrado algo que al parecer resultó ser cierto, sin importar lo improbable que pareciera. Y no sólo era cierto, sino que era la base de un tipo completamente nuevo de física que actúa en el extraño mundo de las partículas subatómicas. La mecánica cuántica, que explica el comportamiento de las partículas en una escala diminuta de la forma en que la mecánica newtoniana explica el comportamiento de sistemas más grandes, empezó con la solución rápida de los cuantos de Planck. Es un reino al revés de lo que parecen imposibilidades y sugerencias alucinantes.

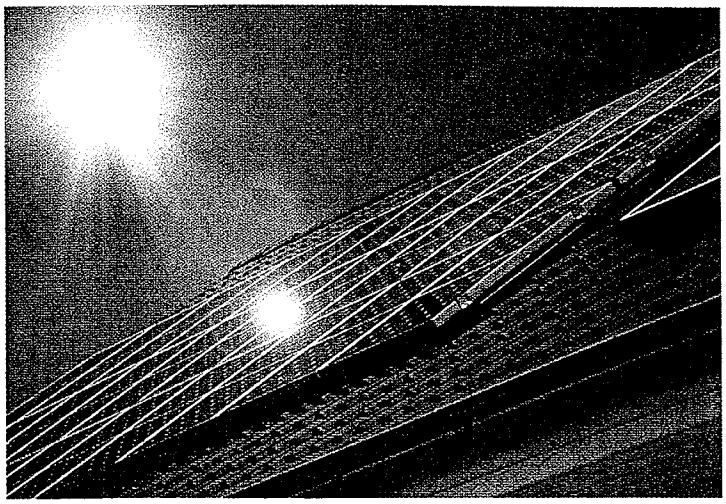


En el modelo del átomo de Bohr, los electrones por lo general se mantienen firmemente en las capas asignadas que orbitan al núcleo.

Einstein tomó en serio los cuantos. Su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico (ver página 55) recurrió al uso de Planck de los cuantos, pero lo aplicó a la luz. Einstein



Los paneles solares emplean el efecto fotoeléctrico para producir electricidad a partir de fotones que chocan con un semiconductor.



sugirió que un fotón podía tener suficiente energía para arrancar un electrón de un átomo; una corriente de electrones arrancados producía una corriente eléctrica. Su idea fue impopular al principio, ya que desafiaba las ecuaciones de Maxwell y la sabiduría recibida de que la luz era una onda. Aquí, por primera vez, la física se enfrentó a la dualidad onda-partícula, algo que a veces actuaba como onda y a veces como partícula.

Luz inteligente

Fue aún más intrigante el descubrimiento de que la luz parece "saber" cómo com-

Niels Bohr (1885-1962)

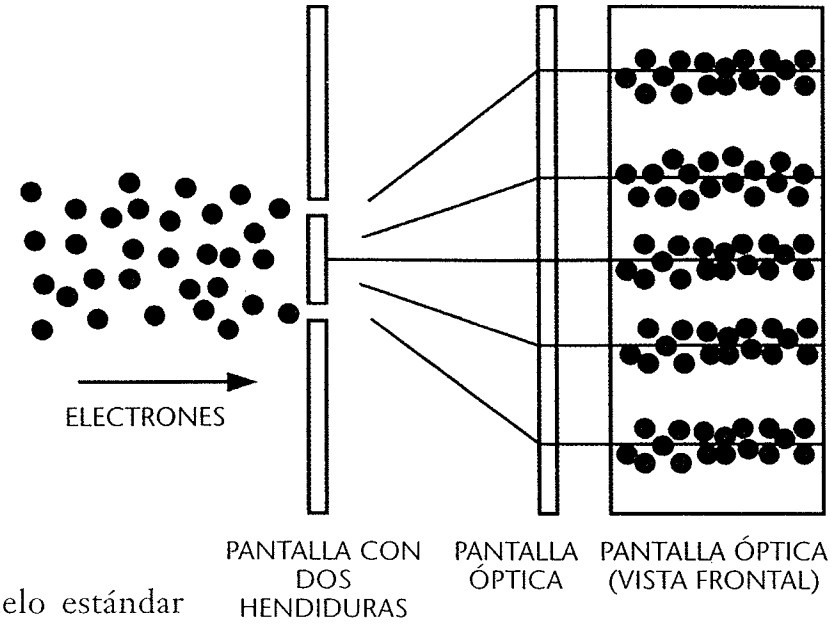
La obra del físico y filósofo danés Niels Bohr fue clave para el avance de la mecánica cuántica, convirtiendo una hipótesis poco precisa en un concepto funcional. Mediante la física cuántica explicó la teoría de la estructura atómica de Rutherford y explicó el espectro del hidrógeno. Pero nunca subestimó las complejidades que involucraba, afirmando una vez que: "Nunca comprendemos la física cuántica, sólo nos acostumbramos a ella". Bohr empezó sus estudios en la Universidad de Copenhague antes de mudarse a Inglaterra para trabajar en Cambridge y Manchester. Luego volvió a Copenhague para fundar el Instituto de Física Teórica. En 1922 le otorgaron el Premio Nobel de Física. Durante la Segunda Guerra Mundial se unió al equipo que creó la bomba atómica. Su carrera pudo haber seguido un camino muy diferente. En 1908 estuvo a punto de ser seleccionado como portero en el equipo nacional de futbol de Dinamarca. La pérdida del futbol fue la ganancia de la física.

Albert Einstein (izquierda) con Niels Bohr





portarse para complacer a los experimentadores. Cuando se diseña un experimento para poner a prueba el comportamiento de la luz como onda, la luz actúa como onda. Cuando un experimento pone a prueba el comportamiento de la luz como partícula, la luz se comporta como partícula. Si un rayo de luz brilla en dos hendiduras hacia una pantalla, se produce el modelo estándar de interferencia, con bandas oscuras y claras. Conforme la luz se hace cada vez más débil, llega a un punto en que los fotones individuales pasan uno a la vez a la pantalla, haciendo un destello cada vez que aparece uno. Sin embargo, en forma colectiva, la imagen que se acumula es todavía el diseño de interferencia. Los fotones parecen "saber" si están abiertas una o dos hendiduras y si están abiertas dos hendiduras, todavía se forma el borde de interferencia, sin importar la lentitud con que se disparen los fotones a la pantalla. Cada fotón individual parece ser capaz de pasar por ambas hendiduras al mismo tiempo. Si se cierra una hendidura, incluso después de que un fotón ha iniciado su viaje, los fotones sólo pasan por la hendidura abierta. Llevándolo más allá, si hay un detector en una de las hendiduras para descubrir si el fotón ha pasado por esa hendidura o la otra, los fotones, como si estuvieran reacios a que los atraparan, dejan de producir modelos de interferencia (de repente actúan como partículas).



El experimento de doble hendidura que produce patrones de difracción con la luz también se puede producir esparciendo electrones, lo que muestra que también ellos pueden comportarse como ondas.

Como si eso no fuera bastante extraño, en 1924 el físico francés Louis-Victor de Broglie (1892-1957) sugirió que las partículas que forman la materia también se pueden comportar como ondas. Esto significaría que la dualidad de onda-partícula está en todas partes y que toda la materia tiene una longitud de onda. En 1927, su extraña idea tuvo el apoyo de electrones que parecían actuar como ondas y que se difractaban en la forma en que lo hace la luz. Desde entonces, también se ha visto a partículas más grandes, protones y neutrones, actuar como ondas.

El trabajo de De Broglie fue su tesis de doctorado. En él sugirió que los electrones eran ondas que se movían en las órbitas que se les permitía ocupar, y los niveles de energía de las órbitas permisibles eran



armónicos de la onda, de manera que las ondas siempre se reforzaban unas a otras. Dijo que la teoría se podía poner a prueba mostrando que una red de cristal difracta a los electrones. Esto se demostró con éxito en 1927 mediante dos experimentos separados, uno en Estados Unidos y otro en Escocia. Se otorgó a De Broglie y a dos de los tres hombres que llevaron a cabo los experimentos el Premio Nobel de Física en 1937 por su labor.

Gigantes y sus hombros

La física clásica empezó en serio con Newton y su "año milagroso" (*annus mirabilis*) de 1666. El renacimiento de la física que dio inicio a la mecánica cuántica comenzó con la publicación de la teoría especial de la relatividad de Albert Einstein en 1905. Ambos científicos estaban construyendo, basados en el trabajo de muchos científicos anteriores que habían hecho posible estos momentos de revelación. Sus descubrimientos brillaron en los años que siguieron.

La importancia del trabajo de De Broglie fue que mostraba que la dualidad de onda-partícula se aplica a toda la materia. Su ecuación expone que el momento de una partícula (de lo que sea), multiplicado por su longitud de onda, es igual a la constante de Planck. Como la constante de Planck es muy pequeña, la longitud de onda de todo lo que es más grande que una molécula es pequeña en comparación con su tamaño real. Por ejemplo, no nos preocuparíamos por la longitud de onda de un camión o de un tigre. Conforme consideramos partículas más y más peque-

Ondas y partículas

La dualidad de onda-partícula se refleja a la perfección en la historia de los Premios Nobel de física. Uno de los hombres que compartieron el Premio Nobel con De Broglie (retratado a la derecha) por demostrar las propiedades de onda de los electrones fue George Thomson. Era el hijo de J. J. Thomson, al que habían otorgado el Premio Nobel en 1906 por demostrar que los electrones eran partículas. No se considera que ninguno estuviera equivocado; ambas explicaciones todavía se aceptan (no se permite que los ganadores del Nobel estén equivocados).





ñas, sus propiedades de onda se vuelven más importantes.

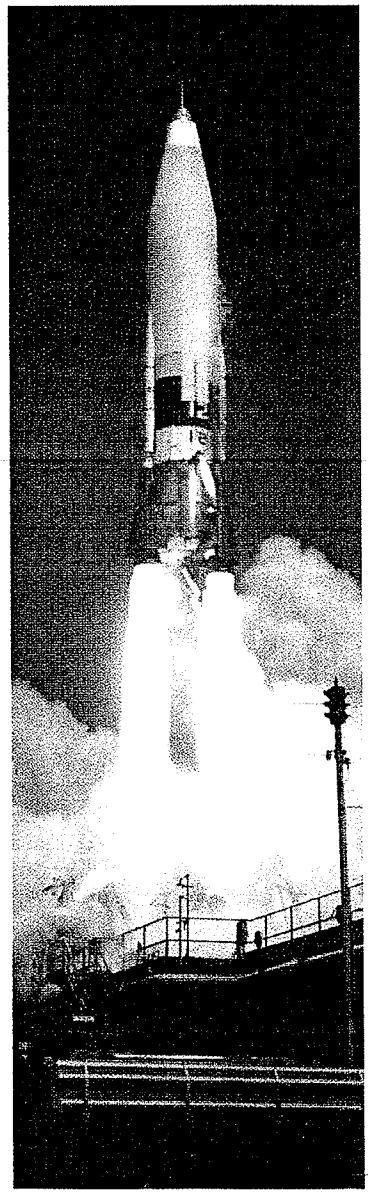
Otro momento newtoniano

Que las partículas pudieran actuar en verdad como ondas no parece tan imposible después de que Einstein explicara el por qué en 1905.

En un apéndice a su teoría especial de la relatividad, Einstein incluyó una forma anterior (menos sucinta) de esta ecuación, que se traduce en palabras reales como:

Energía = masa × la velocidad
de la luz al cuadrado
que en la actualidad
es más familiar como
$E = mc^2$

Éste es un resultado que cambia al mundo, tan importante como *Principia* de Newton. La ecuación de Einstein estaba diciendo que la energía *es lo mismo* que la materia, pero en una forma diferente. La materia se puede convertir en una cantidad muy grande de energía. En esto se encuentra el fondo de la energía nuclear y de las armas nucleares, las cuales operan con la energía que se puede liberar al meterse con los núcleos de los átomos.



Los cohetes espaciales emplean la energía nuclear para producir las enormes cantidades de energía que necesitan.

Había un problema fundamental con los modelos de Rutherford y Bohr del átomo que no se podía resolver dentro del jardín amurallado de la física newtoniana. Como el electrón tiene carga negativa, lo debe atraer el núcleo, el cual tiene carga positiva. Debe acelerar con el fin de mantenerse en órbita, pero entonces gastaría energía para hacerlo, emitiéndola todo el tiempo como radiación electromagnética. Al perder energía de esta forma, el electrón pronto caería en espiral hacia el núcleo y el átomo se colapsaría. De hecho, "pronto" es quedarse corto, sucedería en alrededor de un diezbillonésimo de segundo.

La solución a este enigma requería el aporte de muchos físicos, pero una de las contribuciones más importantes procedió del físico teórico austriaco Erwin Shrödinger (1887-1961).

¿Onda o partícula?

Si una partícula actúa como onda, ¿podemos decir en realidad dónde está? Ésta es la cuestión que Schrödinger planteó y trató de responder. Abandonó la idea de que los electrones se movían en órbitas fijas, basándose en que con la mecánica cuántica era imposible decir con exactitud dónde estaba el electrón. Su



Albert Einstein (1879-1955)

Einstein nació en Ulm, Alemania, pero también vivió en Suiza e Italia cuando era niño, ya que las dificultades de negocios de su padre obligaron a la familia a trasladarse a otros lados. A pesar de que después se le aclamara como genio, Einstein no fue un estudiante prometedor. Su padre consultó con un experto porque sospechaba que su hijo era retrasado y Einstein al principio no pudo entrar al Politécnico en Zúrich porque sus matemáticas no estaban a la altura. No pudo conseguir un puesto académico y, por lo tanto, tomó un trabajo en la oficina de patentes en Berna, Suiza. Resultó ser una excelente medida, ya que era bueno en el trabajo, pero tenía suficiente tiempo y energía intelectual para continuar su interés en la física. Fue mientras estaba en la oficina de patentes, y estudiando física en su tiempo libre, que publicó los cinco artículos que cambiarían al mundo, abarcando el efecto fotoeléctrico, el movimiento browniano y la teoría especial de la relatividad. Gracias a su investigación publicada, aseguró un puesto académico en Zúrich en 1909. Su Premio Nobel, que le otorgaron en 1921, fue por este trabajo inicial. Insatisfecho con las limitaciones de la teoría especial de la relatividad, que se aplicaba sólo a cuerpos en movimiento constante y consistente y no explicaba la gravedad, se propuso crear una teoría de la relatividad que abarcara todo. Encontró el trabajo más difícil de lo que esperaba. Luchó con las matemáticas, pero al final publicó la teoría general de la relatividad en 1916. Sus teorías de la relatividad redefinieron lo que pensamos de espacio, tiempo, materia y energía. Cuando el astrónomo Arthur Eddington confirmó parte de la teoría de Einstein al mostrar que la gravedad puede doblar la luz (ver página 62), Einstein se convirtió en superestrella científica internacional. Einstein se trasladó a Estados Unidos para escapar a la persecución nazi de los judíos. Pasó el resto de su vida en Estados Unidos, con base en la Universidad de Princeton.

Aunque Einstein al principio ayudó a iniciar la investigación de las bombas atómicas, llegó a lamentar su participación y más adelante abogó por el desarme nuclear. También trabajó para lograr el establecimiento del estado de Israel. Continuó trabajando como físico teórico hasta el final de su vida, luchando pero sin poder encontrar una teoría de campo, unificando una teoría única o grupo de teorías relacionadas que explicaran todo en el Universo. Nunca aceptó del todo los avances en la mecánica cuántica (ver página 131).

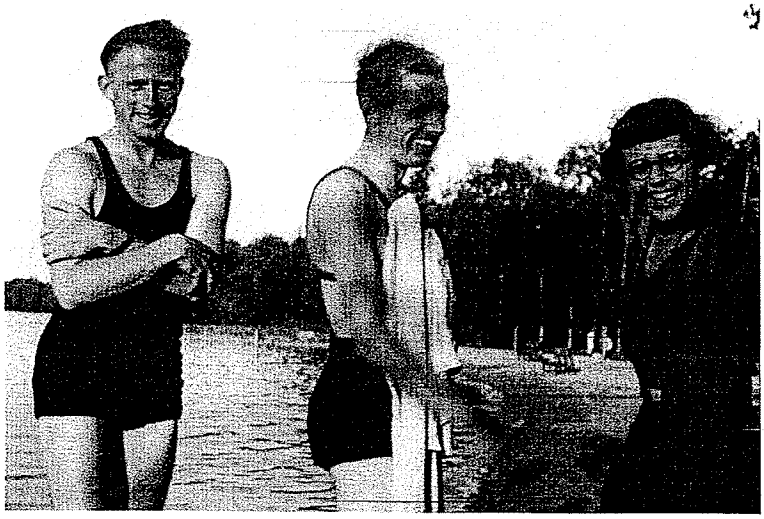
conclusión es que podemos dar una probabilidad de dónde está una partícula, basándonos en nuestro conocimiento de ondas y de probabilidad matemática, pero no podemos dar su posición precisa. A esto se le llegó a conocer como la ecuación de Schrödinger. Al aplicar la ecuación a los electrones, podemos declarar que existe una probabilidad de tal vez 80-90 por ciento de que el electrón está en un área particular, pero existe una pequeña posibilidad de que esté en alguna otra parte. Con lo que terminamos es con una "función de onda" que expresa la probabilidad de que la onda y la partícula estén en un lugar particular.

Si tomamos un ejemplo más grande que un electrón, si una mosca entra a una caja



Grandes físicos se reunieron en Chicago, en 1929: (desde la izquierda) Arthur Compton, Werner Heisenberg, George Monk, Paul Dirac, Horst Echardt, Henry Gale, Robert Mullinken, Friederich Hund y Frank Hoyt.

cerrada, la función de onda de la mosca da la probabilidad de que esté en algún lugar particular de la caja. La función de onda tiende a cero en lugares donde la mosca no puede estar. Así que si parte de la caja es demasiado angosta para que entre la mosca, la función de onda se colapsa en ese punto (y fuera de la caja, siempre y cuando no haya agujeros por los que pudiera escapar). Schrödinger formuló su ecuación en 1926,



Werner Heisenberg, izquierda, nada con amigos. Incluso los físicos nucleares se relajan a veces.



sólo dos años después del trabajo inicial de De Broglie sobre la dualidad de onda-partícula.

El modelo de Schrödinger muestra al electrón como que está en alguna parte en una nube de probabilidad que representa todos los lugares en que podría estar. La nube era más densa donde era más probable que estuviera el electrón y menos densa donde era menos probable que estuviera. Cada vez que se hace una medición, se puede encontrar un resultado diferente. Pero si se hace suficientes mediciones, algunas, las más probables, aparecerán con más frecuencia que otras. Estos resultados más probables semejan los niveles de energía que Bohr sugirió. El resultado es que el modelo de Schrödinger da resultados precisos sin las limitaciones inherentes al modelo de Bohr. Sin embargo, remplazar certeza con probabilidad causó confusión entre los físicos cuánticos.

Al mismo tiempo que Schrödinger estaba buscando el modelo de electrón como onda, el físico alemán Werner Heisenberg (1901-1976) estaba haciendo su propio modelo matemático del electrón, pero favoreció sus propiedades de partícula mientras hacía saltos cuánticos entre orbitales. Él, como Schrödinger, publicó en 1926. El físico británico Paul Dirac (1902-84) desarrolló un tercer modelo, más matemático y teórico al mismo tiempo. De hecho, Dirac continuó para mostrar que los otros dos modelos, de Heisenberg y de Schrödinger, eran en realidad equivalentes, y que los tres estaban diciendo lo mismo en formas un poco diferentes. Los tres hombres ganaron el Premio Nobel por sus contribuciones a la mecánica cuántica.

¿Adónde puedo ir de aquí? el acertijo del electrón

La totalidad de la mecánica cuántica se puede armar comenzando con el principio de incertidumbre. Al recordar el problema original con el modelo atómico que presentó la mecánica newtoniana, de por qué los electrones no sólo caen en el núcleo y acaban con él, el principio de Heisenberg presenta una explicación. Si se conoce el momento de una partícula en una órbita particular, entonces la posición no se puede saber con precisión, está tan sólo en alguna parte de la órbita. Sin embargo, si la partícula cayera en el núcleo, se conocería su posición, pero también su momento, ya que sería cero. Al caer en el núcleo, el electrón violaría el principio de incertidumbre. Es tan sólo que no se permite hacer eso. De hecho, la órbita más pequeña en un átomo (~~mira~~ la órbita del electrón en un átomo de hidrógeno) es tan pequeña como es posible que sea sin violar el principio de incertidumbre (las matemáticas funcionan). El tamaño de los átomos y, de hecho, su existencia misma, están determinados por el principio de incertidumbre.

¿Podemos tener la certeza?

El principio de incertidumbre de Heisenberg, planteado en 1927, afirma que no podemos saber todo sobre una partícula. Se dio cuenta de que una consecuencia de la mecánica cuántica es que es imposible medir todos los aspectos de una partícula al mismo tiempo. Si medimos su posición y velocidad, podemos saber ambos bajo ciertos límites, pero aumentar la exactitud de una medición hace que la otra sea menos cierta. El acto mismo de observar su posición hace que su velocidad sea



"Cualquiera que no quede horrorizado por la teoría cuántica no la ha comprendido".

Niels Bohr

menos cierta. Es una propiedad fundamental de la descripción cuántica de medición y no se pueden evitar cambiando el método o herramientas de observación.

Heisenberg al principio sostuvo el principio de incertidumbre, empleando una disquisición teórica. Por ejemplo, podemos medir la posición de una partícula en movimiento haciendo brillar una luz en ella, y en ese caso se causará uno de dos resultados. Se podría absorber un fotón de luz, causando que el electrón en el átomo salte a otro nivel de energía, en cuyo caso hemos alterado el átomo y nuestra medición es falsa. Por otro lado, no se absorbe el fotón, sino que pasa a través de él, en cuyo caso no hemos hecho medición alguna.

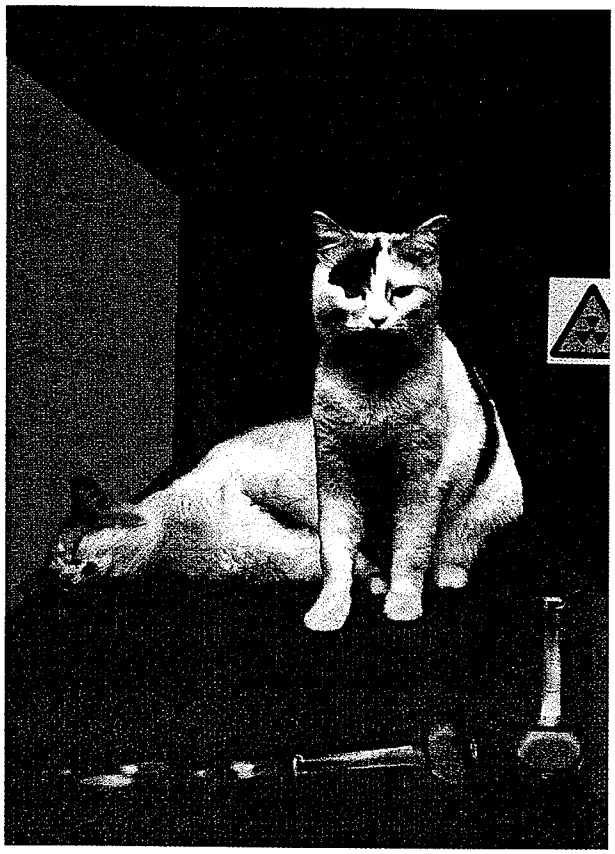
El principio de incertidumbre se complica más si intentamos tratar la "partícula" y el fotón como ondas-partículas. Heisenberg se dio cuenta de que el principio de incertidumbre afectaba no sólo el presente, sino también el pasado y el futuro. Como una posición siempre era y es sólo una colección de probabilidades, determinar el camino de una partícula no es lo que parece. Como Heisenberg dijo: "El camino existe sólo cuando lo observamos". De la misma manera, no se puede predecir con certeza el camino futuro.

La física newtoniana trata con certezas, con causa y efecto un modelo determinista en el que el conocimiento permite la predicción. La nueva mecánica cuántica apareció para anular todo eso, al menos en el nivel atómico. Distaba mucho de ser popular en algunos círculos; incluso Einstein desconfió, diciendo: "Dios no juega a los dados", aunque tuvo que aceptar las matemáticas. De hecho, desde el inicio del siglo XX, el uso de los modelos matemáticos había estado apoderándose a ritmo constante de la física experimental que se podía poner a prueba en el laboratorio. La disquisición teórica, apoyada por cálculos matemáticos, se ha convertido en el pilar principal de la nueva física, en su mayor parte teórica.

La interpretación de Copenhague

Mientras Schrödinger tendía a concentrarse en los aspectos de onda de la dualidad de onda-partícula, Heisenberg se concentró más en la partícula. Presentó su trabajo en forma de matrices, mientras que Schrödinger trabajó con la teoría de la probabilidad. En torno a estos dos enfoques surgieron dos capos separados de físicos, cada uno pensando que el otro enfoque estaba equivocado.

En 1927, Bohr, Heisenberg y el físico nacido en Alemania, Max Born (1882-1970) trabajaron juntos para producir la síntesis de los aspectos al parecer contradictorios de la teoría cuántica, a lo que se conoce como la "Interpretación de Copenhague". Dice que no es que las partículas atómicas o los fotones "escojan" si actúan como onda o partícula en algún punto, o que en realidad sean uno o el otro; en lugar de eso, las características que hacen que parezca que actúan como uno o el otro son dos lados de la misma



El gato de Schrödinger, muerto y vivo, en una caja con y sin veneno.

moneda. Cuál vemos y cómo interpretamos su comportamiento, depende de lo que estemos buscando y cómo los observamos. La luz existe como onda y partícula al mismo tiempo, pero sólo aparece como una u otra cuando la medimos. El acto de medir u observar determina el resultado por el tipo de observación que decidamos llevar a cabo. En el punto en que la medición se hace y la condición de onda o de partícula que se determine, se dice que se colapsa la función de onda. En forma más precisa, en forma instantánea y discontinua cambia a la función de onda que se asociaría con el resultado de la medición.

Bohr reconoció la importancia del principio de incertidumbre, pero fue más allá que Heisenberg al señalar que no es un problema que surja de la interferencia física que se relaciona con la medición, sino un asunto más fundamental (el acto mismo de hacer una medición cambia la situación [o sistema] que se está examinando). Esto pone en duda a toda la premisa del método científico. No puede haber un observador objetivo si el acto de la medición o la observación en sí afecta el resultado.

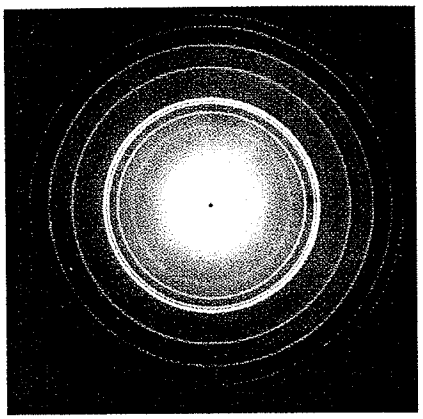
Un gato en una caja

La explicación de Bohr no convenció a todos. Schrödinger mostró su desdén al describir una disquisición teórica para de-



Erwin Schrödinger

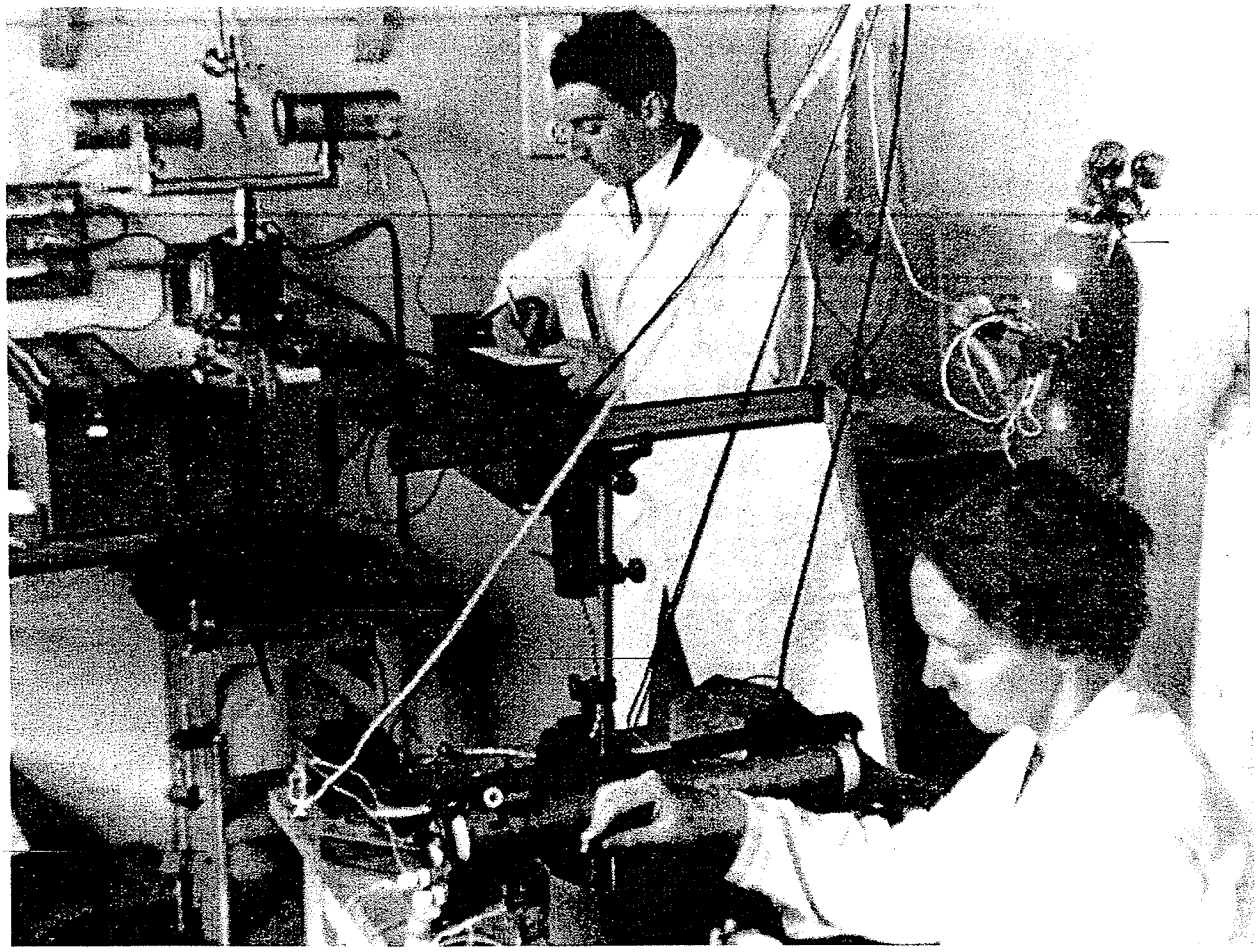




El patrón de difracción del electrón del berilio.

mostrar lo absurdo de la Interpretación de Copenhague. En el experimento de Schrödinger, se encierra un gato en una caja con un dispositivo que cosiste en una diminuta cantidad de sustancia radiactiva, un contador Geiger, un pequeño frasco de ácido cianhídrico y un martillo. El equipo está dispuesto de manera que si un átomo de la sustancia radiactiva se desintegra, la detección de la partícula liberada causará que el martillo rompa el frasco y el gato muera envenenado por el gas. Existe la misma posibilidad de que un átomo se desintegre o no y el gato no puede interferir con el equipo. Se deja al gato en la caja por una hora. Para el final de la hora, la probabilidad es de 50:50 de que esté vivo (o muerto). De

Frédéric Joliot e Irène Joliot-Curie trabajan en su laboratorio.





James Chadwick se ganó el Premio Nobel por su trabajo con el neutrón que llevó a cabo en febrero de 1932.



acuerdo al argumento de Bohr y de la Interpretación de Copenhague, el estado (vivo o muerto) del gato no es algo seguro hasta que se examinase la caja. Dijo que esto era ridículo.

Muchos universos

Otra respuesta a la idea desagradable de que todo existe en una nube de probabilidad hasta que se observe, fue el modelo de "muchos mundos" propuesto en 1957 por el físico estadunidense Hugh Everett III (1930-82). Éste sugiere que existe un número infinito de universos paralelos que explican todos los posibles resultados a todas las posibles preguntas. En los puntos de toma de decisión (o de observación), un nuevo universo se divide. Si no ayuda en nada más, nos ayuda a aceptar el infinito. Si se tiene que dividir un nuevo universo cada vez que escoges entre té o café, o si un renacuajo nada a la izquierda o a la derecha, o si una rama se cae o no en un techo, deben existir muchísimos universos en alguna parte.

Enredo cuántico: La paradoja Einstein-Podolsky-Rosen

Albert Einstein fue uno de los que no querían aceptar la Interpretación de Copenhague. En 1935, Einstein, los físicos estadunidenses Boris Podolsky (1896-1996) y Nathan Rosen (1909-1995) prepararon la llamada paradoja EPR. Supón que una partícula estacionaria sufre desintegración, produciendo otras dos partículas. Deben tener un momento angular igual y opuesto de manera que se cancelen uno al otro (conservación del momento angular), y todas sus demás propiedades cuánticas deben balancearse de la misma manera para conservar las propiedades de la partícula madre. Este vínculo entre las partículas debe continuar existiendo después de que se emitieron y siguieron caminos separados. Si medimos una propiedad de una partícula, colapsamos la función de onda para la misma propiedad en la otra partícula (la afecta al instante y en forma inevitable).

Al igual que el gato de Schrödinger, las partículas entrelazadas de Einstein se plearon con cuidado para mostrar lo ab-



Candidatos para ser neutrones

Dos años antes de que Chadwick reclamara el nombre "neutrón" para su partícula sin carga en el núcleo, el físico austriaco Wolfgang Pauli (1900-1958) había usado el mismo nombre para una partícula teórica que sugirió que se emitía del núcleo durante la radiación beta. Su idea tuvo tan poco impacto en ese tiempo que Chadwick pudo robar el nombre sin problema. La existencia de la partícula de Pauli se confirmó por fin en la década de 1950 y en la actualidad se llama neutrino (ver página 143).

surdo de la Interpretación de Copenhague, pero terminaron fortaleciéndola.

Se ha demostrado ya que existe el entrelazamiento de las partículas, con partículas separadas por muchos kilómetros. Incluso se puede dar uso práctico al entrelazamiento, ofreciendo nuevos métodos rápidos para computar (empleando "cubits" o bits cuánticos), comunicación instantánea y criptografía. De hecho, el entrelazamiento ofrece una forma de trasmitir información con más rapidez que la velocidad de la luz.

La roca de los tiempos

En 1920, Frederick Soddy previó que la forma en que un isótopo cambia (se desintegra) en otro isótopo o elemento tenía un uso potencial para fechar las rocas. Este método se emplea en forma general actualmente. Por ejemplo, el carbono-14 cambia a nitrógeno-14 mediante la desintegración beta a una velocidad conocida (le toma 5730 años desintegrarse a la mitad [su vida media]). Al medir la proporción de carbono-14 y nitrógeno-14 que quedan en una roca, es posible, en consecuencia, deducir la edad de la roca. A esta técnica se le llama fechado por carbono.

La búsqueda de más partículas atómicas

Por largo tiempo se ha sabido que los electrones se podían sacar del átomo con bastante facilidad, ya que así fue como se les descubrió en 1897. A principios de la década de 1930, Walter Bothe (1891-1957), Irène Joliot-Curie (1897-1956, hija de Marie y Pierre Curie) y su marido Frédéric Joliot-Curie (1900-58), descubrieron que disparar radiación de partículas alfa al berilio producía otro tipo de radiación. Este tipo de radiación era buena para sacar algo de otros elementos, pero no quedó claro de inmediato qué cosa. Los Joliot-Curie anunciaron sus resultados en enero de 1932. El físico inglés James Chadwick (1891-1974) repitió los experimentos de inmediato y explicó el efecto, sugiriendo que las partículas alfa estaban sacando "pedazos" fuera del núcleo de los átomos de berilio. Al principio, había pensado que estos "pedazos" eran pares protón-electrón, ya que no tenían carga eléctrica (o una carga balanceada).

Durante toda la década de 1920, Chadwick había estado buscando una partícula neutra, que esperaba que tomara la forma de un protón y un electrón, unidos. Pero su trabajo más importante, por el que le otorgaron el Premio Nobel en 1935, fue al final metido en unos días agotadores de febrero de 1932. Las mediciones que hizo en 1934 anularon su primera conclusión,



ya que las partículas eran demasiado pesadas para ser un solo protón y un solo electrón unidos. Llegó a la conclusión de que debía haber un tipo nuevo de partícula subatómica, una que no tenía carga, a la que llamó neutrón. Esto significaba que las variantes de los elementos químicos con diferentes pesos atómicos, llamadas isótopos, se podían explicar en forma muy simple. Todos los isótopos de un elemento particular debían contener el mismo número de protones y electrones, pero diferente número de neutrones.

El neutrón es como una superestrella atómica. Hace posible las reacciones en cadena que impulsan las estaciones de energía nuclear y las bombas atómicas, y también se puede emplear para investigar la estructura de otros átomos, ya que los neutrones no se desvían por cargas positivas o negativas.

Mantenerse unido

Protones y neutrones están muy apretados en el núcleo, el cual ocupa sólo una diminuta proporción de todo el átomo (más o menos un cienmilésimo de él). Si el átomo fuera del diámetro de un estadio de futbol, el núcleo sería del tamaño de un grano de arena. Si el átomo fiera tan grande como la Tierra, el núcleo sería de 10 kilómetros de diámetro. Sin embargo, los protones deben repelerse entre sí por sus cargas similares. Entonces, ¿cómo pueden mantenerse comprimidos unos con otros en el núcleo de un átomo? La explicación es la llamada fuerza nuclear fuerte, sugerida por primera vez en 1934 por el físico japonés Hideki Yukawa (1907-1981). Sugirió que la fuerza era transportada por partículas llamadas mesones que se intercambian entre protones y neutrones. Los mesones son partículas de vida corta que sobreviven sólo por unos cienmillonésimos de segundo.

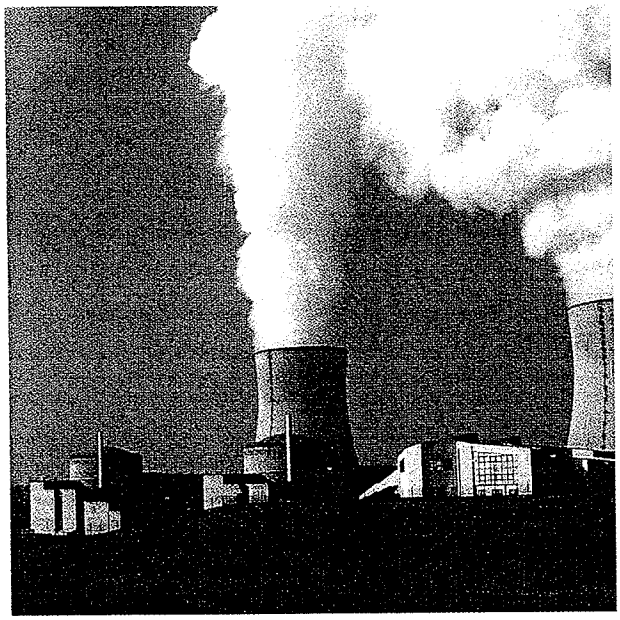
A diferencia de la gravedad, y de las fuerzas eléctrica y magnética, la fuerza nuclear fuerte no sigue la ley del inverso del cuadrado. Es muy fuerte, cien veces más que la fuerza eléctrica, a una distancia muy corta de hasta 13 centímetros, pero a partir de ese momento desaparece del todo, no tiene fuerza a distancias más grandes. En el radio de un núcleo es lo bastante fuerte para superar la repulsión electrostática entre protones. A pesar de todo, la fuerza nuclear fuerte no los presiona tanto como para que se compriman entre sí (retiene una diminuta distancia entre ellos). La esfera de acción de la fuerza limita el tamaño de los núcleos atómicos. Al pi mesón, o pion, el verdadero mediador de la fuerza nuclear, lo descubrieron en 1947 un físico británico, otro brasileño y un italiano, Cecil Powell (1903-1969), César Latter (1924-2005), y Giuseppe Occhialini (1907-1993), mientras investigaban productos de los rayos cósmicos. Yukawa recibió el Premio Nobel de física en 1949 por su predicción.

Todo se hace pedazos

Mientras muchos físicos estaban buscando cómo los átomos se mantienen unidos, otros estaban explorando cómo los átomos se hacen pedazos. Después de que Henri Becquerel descubrió la radiactividad, investigaciones posteriores se realizaron en diversas direcciones. Rutherford y el radioquímico inglés Frederick Soddy



(1877-1956), trabajando juntos elaboraron un modelo de desintegración radiactiva en 1903. Explicaron que un átomo de un elemento pesado podía ser inestable y desintegrarse perdiendo una partícula alfa (núcleo de helio) o tener desintegración de neutrón en protón y emitir una partícula beta (electrón). En ambos casos, cambia el número de protones en el núcleo, así que el átomo se convierte en un elemento diferente. Predijeron que la desintegra-



Planta de energía nuclear en Cattenom, Francia.

Cadena de desintegración radiactiva del uranio-238

Cuando se desintegra un isótopo radiactivo, se convierte en otro elemento, el núclido hija. También puede ser radiactivo, lo que tiene como resultado más desintegración. El tiempo que le toma a la mitad del isótopo desintegrarse se llama "vida media". El uranio-238 se desintegra naturalmente en plomo-206, pasando por 14 etapas como se muestra aquí.

Elemento	Tipo de desintegración	Vida media	Núclido hija
uranio-238	emisión alfa	4.5 miles de millones de años	torio-234
torio-234	emisión beta	24 días	protactinio-234
protactinio-234	emisión beta	1.2 minutos	uranio-234
uranio-234	emisión alfa	240 000 años	torio-230
torio-230	emisión alfa	77 000 años	radio-226
radio-226	emisión alfa	1 600 años	radón-222
radón-222	emisión alfa	3.8 días	polonio-218
polonio-218	emisión alfa	3.1 minutos	plomo-214
plomo-214	emisión beta	27 minutos	bismuto-214
bismuto-214	emisión beta	20 minutos	polonio-214
polonio-214	emisión alfa	160 microsegundos	plomo-210
plomo-210	emisión beta	22 años	bismuto-210
bismuto-210	emisión beta	5 días	polonio-210
polonio-210	emisión alfa	140 días	plomo-206

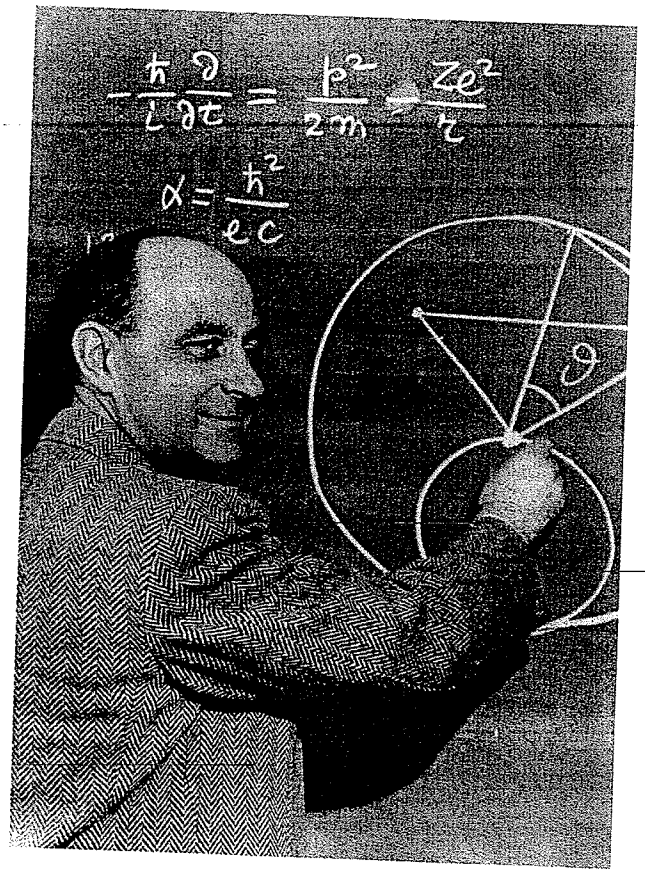


"En estos procesos podríamos obtener mucha más energía de la que suministraba el protón, pero en promedio no podemos esperar obtener energía de esta forma. Era una manera muy pobre e ineficiente de producir energía, y cualquiera que buscara una fuente de energía en la transformación de los átomos estaba diciendo tonterías. Pero el tema era interesante en el aspecto científico, ya que proporcionaba conocimientos de los átomos".

The Times, 12 de septiembre de 1933, discurso de Ernest Rutherford sobre la energía atómica

ción del radio produciría helio, resultado que Soddy logró en 1903, mientras trabajaba con el químico escocés sir William Ramsay (1852-1916) en Londres. En 1913, Soddy declaró que emitir una partícula alfa reducía el número atómico por dos (ya que se perdían dos protones), mientras que emitir una partícula beta lo aumentaba en uno (cuando un neutrón se descompone en un electrón, que se pierde, y un protón, el cual se queda, aumentando el número atómico). Soddy presentó el nombre "isótopos" para describir variantes de un elemento con diferentes masas atómicas.

Enrico Fermi



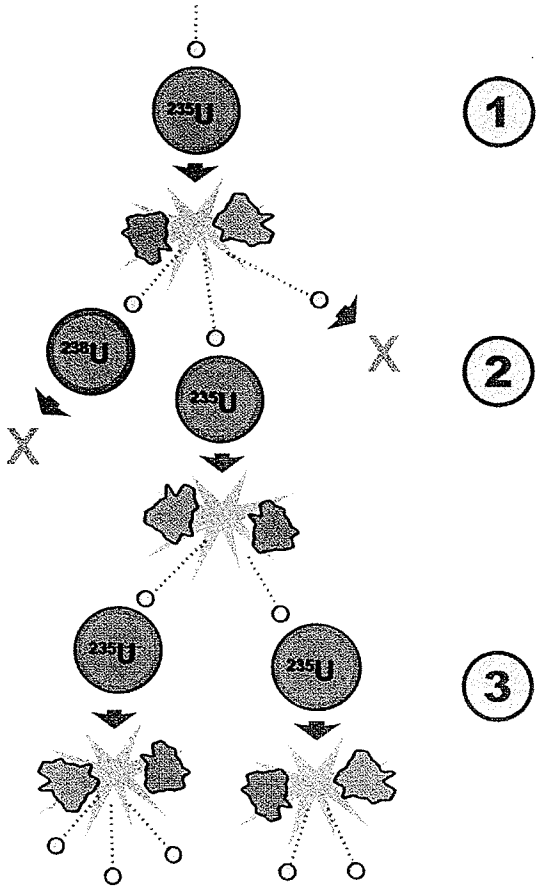
En 1919, Rutherford encontró que al bombardear nitrógeno con partículas alfa, se convertía en un isótopo de oxígeno, perdiendo un núcleo de hidrógeno (un solo protón) en el proceso. Fue la primera transmutación artificial de un elemento en otro, una meta que era apreciada por alquimistas durante todos los siglos, aunque con el objetivo más ambicioso de cambiar metales comunes en oro. Más que el primer paso en un nuevo mundo de alquimia, fue el primer paso en el reino de la física nuclear.

Entre 1920 y 1924, Rutherford y Chadwick demostraron que la mayoría de los elementos más ligeros emiten protones si se les lanzan partículas alfa.

Aprovechamiento de la reacción en cadena

La transformación de un elemento en otro se puede iniciar en forma artificial y puede



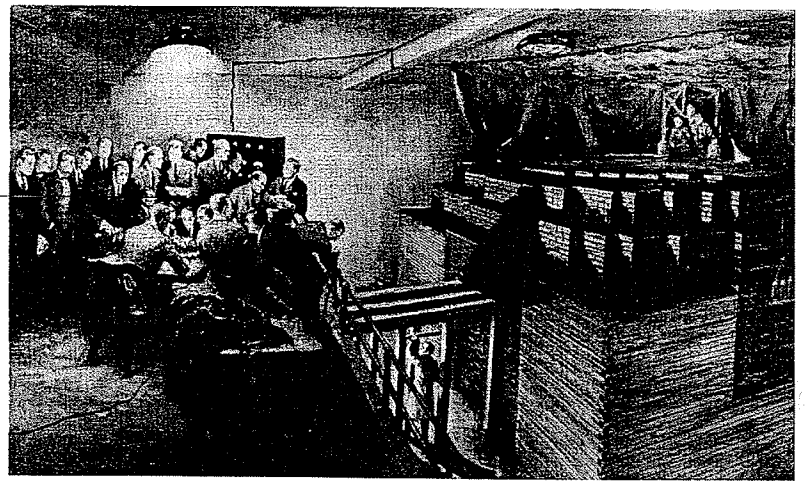


La reacción en cadena producida por la desintegración del uranio-235, inducida por bombardeo con neutrones

ser la fuente de una inmensa fuerza. La energía liberada en la detonación de una bomba atómica, o aprovechada en una estación de energía nuclear, procede de una reacción nuclear en cadena, donde las partículas emitidas por un átomo en desintegración se emplean para iniciar otra.

Irène y Frédéric Joliot-Curie descubrieron la radiactividad inducida en 1934; descubrieron que al lanzar algunos elementos con partículas alfa, podían convertirlos en isótopos radiactivos inestables que luego se desintegrarían. El físico italiano Enrico Fermi (1901-1954) extendió su investigación, empleando neutrones lentos para producir radiactividad inducida más efectiva. Al lanzar neutrones al uranio, Fermi pensó que había creado un nuevo elemento, al que llamó *hesperium*. Sin embargo, en 1938, un grupo de cuatro científicos alemanes y austriacos descubrió que, de hecho, la técnica de Fermi había dividido los núcleos de uranio en dos partes más o menos iguales. Este proceso es la fisión nuclear.

El físico húngaro Leó Szilárd (1898-1964) se dio cuenta de que los neutrones liberados por una reacción de fisión nuclear se podían emplear para desencadenar la misma reacción en otros átomos, lo que conduciría a una reacción en cadena



El primer reactor nuclear del mundo se vuelve autosostenible en Chicago, 1942 (no hubo fotógrafos presentes).



"Encendimos el contacto y vimos los destellos. Los vimos por un rato y luego apagamos todo y nos fuimos a casa. Esa noche tenía pocas dudas en mente de que el mundo estaba encaminado a sufrir".

Leó Szilárd, al comenzar con éxito una reacción en cadena, empleando uranio en la Universidad de Columbia, Manhattan, en 1938

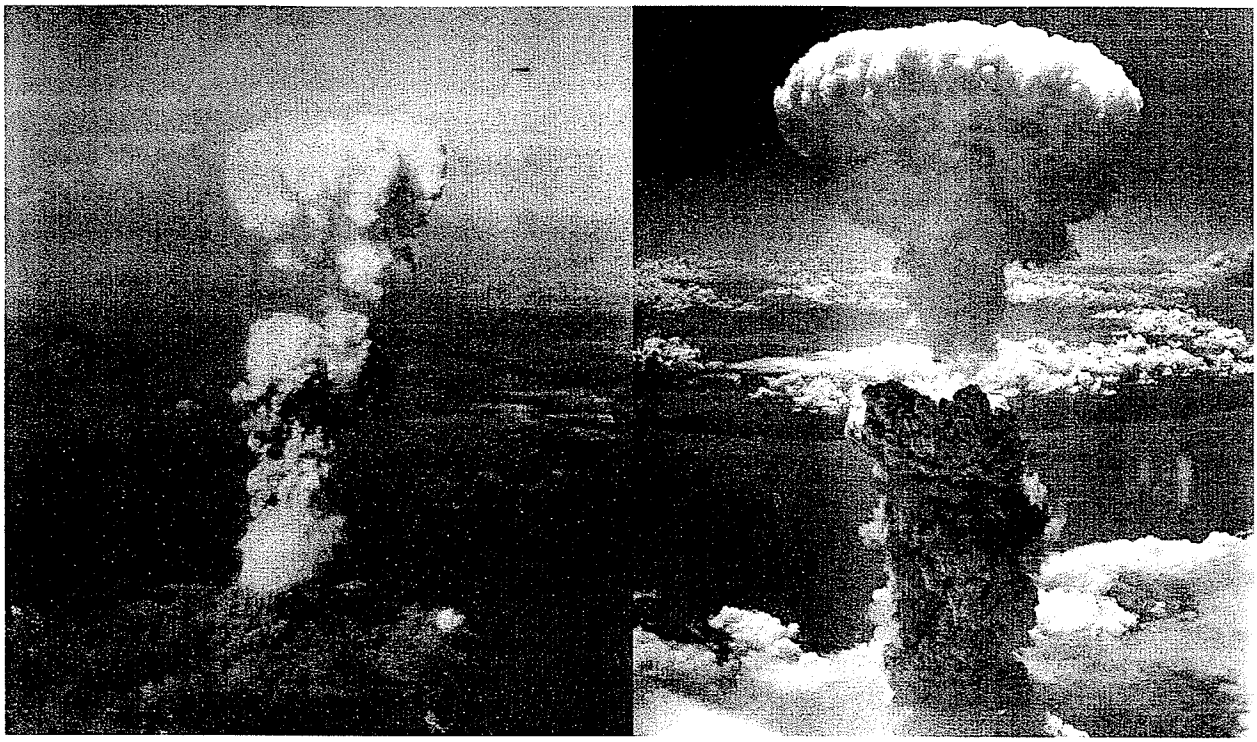
auto-sustentable. Szilárd estaba en Londres cuando lo indignó un artículo en *The Times* que descartaba la posibilidad presentada por Rutherford de que la energía dentro de los átomos se podía aprovechar para usos prácticos. Mientras caminaba al trabajo en el Hospital San Bartolomé y esperaba que las luces de tráfico cambiaran en Southampton Row, en Bloomsbury, Szilárd dedujo cómo podría funcionar una reacción en cadena nuclear. Presentó una patente para ella el siguiente año. De hecho, Szilárd al principio tenía las patentes para la reacción en cadena y para el reactor nuclear (con Enrico Fermi), aunque entregó la patente para las reacciones de cadena nuclear al almirantazgo británico en 1936. Szilárd fue un promotor en el desarrollo de la bomba atómica (ver cuadro).

Frédéric Joliot-Curie produjo evidencia experimental para la reacción en cadena en 1939, y científicos en muchos países (incluyendo Estados Unidos, Reino Unido, Francia, Alemania y Unión Soviética) pidieron a gritos dinero para investigar la fusión nuclear. El primer reactor nuclear en activarse fue Chicago Pile-1, en diciembre de 1942, construido para producir plutonio para usarlo en armas nucleares.

"El mundo se libera"... o no

Leó Szilárd se inspiró en una novela del escritor británico H. G. Wells, llamada *El mundo se libera* (1914), en la cual un nuevo tipo de arma, una "bomba atómica", causó devastación. Las bombas atómicas ficticias de Wells continuaron explotando durante un periodo de días. Esto llevó a Szilárd a empezar a considerar las reacciones en cadena nucleares para hacer una verdadera bomba atómica. Szilárd se trasladó a Estados Unidos en 1938 y un año después persuadió a Albert Einstein a unírsele para escribir al presidente de Estados Unidos, Franklin D. Roosevelt, alentado a su gobierno a establecer un programa de investigación para crear una bomba atómica que contrarrestara el riesgo de que la Alemania nazi creara primero armas nucleares. Se convirtió en el Proyecto Manhattan. Szilárd imaginaba el proyecto como una forma de proteger al mundo de la destrucción descrita por Wells, ya que esperaba que se tendría a la bomba como amenaza y no se usaría en realidad. Se sintió cada vez más angustiado cuando el control de la investigación pasó a los militares y pidió que se hiciera una prueba de muestra de una bomba atómica para demostrar su poder a los japoneses con el fin de garantizar la rendición sin pérdida de vidas, sugerencia que rechazó el gobierno de Estados Unidos. Se lanzaron bombas atómicas a las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki en 1945, causando gran devastación y muchas miles de muertes. Después de la guerra, Szilárd predijo el estancamiento nuclear que caracterizaría la Guerra Fría. Dejó la física para concentrarse en la investigación de la biología molecular.





Detonación de bombas atómicas sobre Hiroshima (izquierda) y Nagasaki (derecha) en agosto de 1945.

El final del átomo clásico

En ese momento, con el modelo de Bohr, era imposible explicar el comportamiento del átomo en términos de física clásica. El diminuto núcleo contiene los protones y los neutrones, mantenidos unidos mediante la fuerza nuclear fuerte; los electrones pasan zumbando a su alrededor en sus capas designadas, nunca alejándose de su órbita, pero son capaces de brincar de una a otra en las circunstancias correctas. Lo que los antiguos hubieran encontrado difícil de comprender no era que el átomo constara de electrones, protones y neutrones, sino que los protones y los neutrones a su vez se pudieran fragmentar más. La segunda mitad del siglo XX vio el descubrimiento de los quarks, que se mantenían unidos por una fuerza mediada por gluones. Es curioso que sea la fuerza nuclear fuerte la misma fuerza responsable de unir a protones y neutrones. De hecho, dicha unión es como un efecto residual. La fuerza nuclear fuerte que actúa en los quarks es, en general, más interesante. En lugar de disminuir con la distancia, las fuerzas se hacen más poderosas hasta que llegan a un máximo que ejerce a todas las distancias considerablemente mayores que el tamaño de un protón o neutrón. Los gluones se detectaron por primera vez en 1979, empleando el colisionador de electrones y positrones PETRA, en Alemania.

Protones y neutrones son ejemplos de hadrones, todos los cuales están formados por tres quarks (bariones) o un quark y un anti-quark (mesones). Experimentos en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford



en 1968 revelaron que el protón no es indivisible, sino que consta de objetos más pequeños como puntos a los que Richard Feynman llamó "partones". Se propuso el modelo del quark en 1964, pero los partones no se identificaron con los quarks de inmediato. Los quarks vienen en seis sabores: "arriba", "abajo", "cima", "fondo", "extraño" y "encantado" (a veces a "cima" y "fondo" se les llama "verdad" y "belleza"). Los quarks de antimateria (los antiquarks tienen antisabores, lo que da lugar a conceptos extraños como el quark "antiextraño" y el quark "antiarriba"). En la vida normal se les podría llamar "mundano" y "abajo", pero en el extraño mundo de los quarks, "abajo" no es lo mismo que antiarriba".

Pero protones y neutrones son bariones y son los únicos hadrones estables, aunque los neutrones sólo son estables dentro del núcleo de un átomo. Existen alrededor de 40 tipos conocidos o predichos de barión y alrededor de 50 tipos conocidos o predichos de mesón. Tienen nombres extraños, como "Omega fondo de doble carga" (un barión de masa o duración desconocidos). Algunos son de vida muy corta (si es que siquiera existen), como el barión delta, que dura sólo 5.58×10^{-24} segundos. (Eso significa que tomaría alrededor de 30 veces tantas partículas delta como hay estrellas en el Universo para durar un solo segundo). Los primeros mesones que se descubrieron fueron los kaones y los piones, que se encontraron en rayos cósmicos en 1947.

El gran número de partículas subatómicas está más allá del alcance de este libro, pero baste decir que existen muchos que todavía están sin descubrir o demostrar, algunos con propiedades y funciones desconocidas.

Materia y antimateria

En 1927, Paul Dirac publicó una ecuación de onda definitiva del electrón que tomaba en cuenta los requisitos de la teoría especial de la relatividad (ver página 129). Sin embargo, es sorprendente que tuviera dos soluciones; una describía al conocido electrón y la otra, algo equivalente al electrón, pero con carga positiva. Al principio, Dirac trató de ajustarla al protón, pero tenía demasiada masa. Otros investigadores sugirieron que si se emplea suficiente energía, se podrían crear un par de partículas con carga eléctrica opuesta, pero con masa idéntica. En 1932 y 1933, Carl Anderson encontró indicios de una partícula de carga positiva como predijo Dirac. La llamó positrón. Otros la reconocieron como la primera partícula de antimateria en ser descubierta. Desde entonces se ha encontrado una aplicación práctica para el positrón en una técnica de formación de imágenes médicas llamada tomografía de emisión de positrones. Ahora sabemos que todas las partículas tienen partículas de antimateria con las que se combinan y que tienen exactamente las propiedades opuestas.

Partículas fantasmas

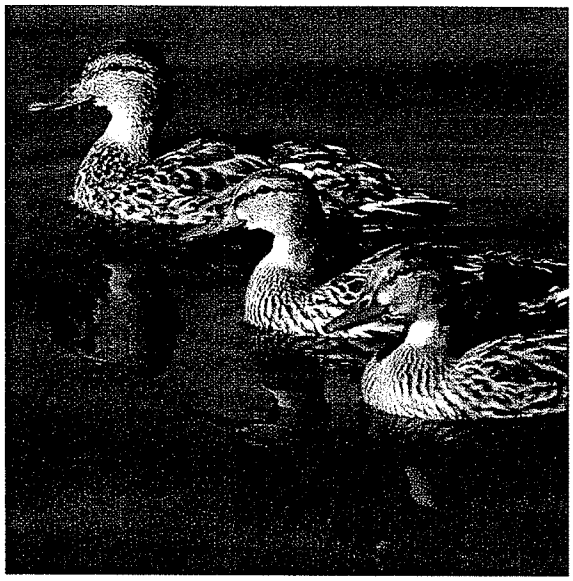
Una de las partículas más fascinantes y escurridizas es el neutrino, sugerido por primera vez por Wolfgang Pauli en 1930. Lo necesitaba para balancear una ecuación. Cuando se desintegra el núcleo de un átomo radiactivo, la energía liberada debe ser



El quark de un pato

Una de las dos personas que propusieron la existencia en forma independiente del quark en 1964, Murray Gell-Mann, fue quien escogió el nombre "quark". Lo nombró en honor al sonido que hacen los patos, deseando que se pronunciara "qwork", pero no pudo decidir de inmediato una forma de escribirlo. Se decidió por "quark" después de encontrar la palabra en *El despertar de Finnegans* de James Joyce:

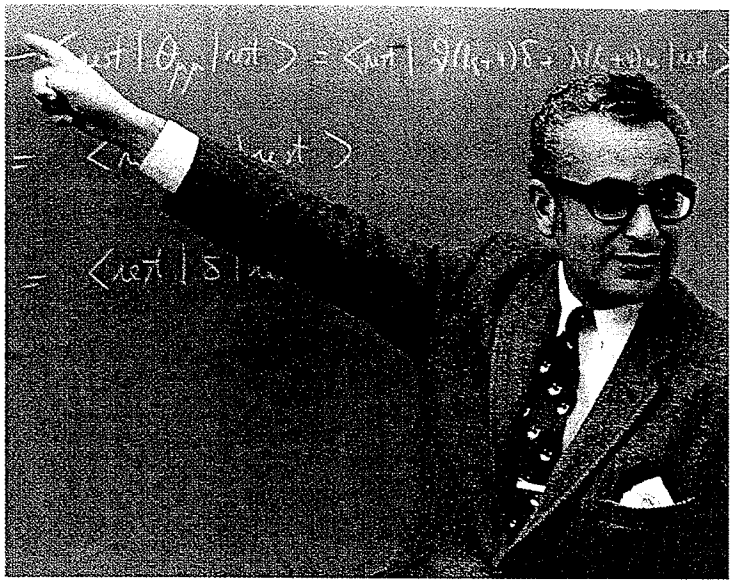
¡Tres quarks para Muster Mark!
Seguro que no es mucho lo que grita
Y seguro que cualquier grito que dé, está errado.



igual a la que estaba presente al inicio. Pero Pauli descubrió que no era así. Se estaba perdiendo más energía de la que se podía medir, lo que significaba que se estaba emitiendo algo que no estaban captando los detectores. Pauli se daba cuenta que durante la desintegración beta los electrones emitidos podían tener al parecer cualquier cantidad de energía hasta un máximo para cada tipo particular de núcleo. Pero si esto era en realidad así, violaría la ley de la conservación de la energía. La solución radical de Pauli iba a sugerir la existencia de otra partícula sin carga que no se cuantificaba y que podía transportar cualquier cantidad de energía cinética hasta un máximo prestablecido. Llamó neutrón a su partícula potencial, aunque dos años después Chadwick tomaría este nombre para la partícula que en la actualidad conocemos como neutrón.

En 1933, Enrico Fermi presentó el nombre "neutrino" para la partícula misteriosa de Pauli. Fermi sugirió que un neutrón se desintegra en un protón y un electrón (lo que también hace si se le saca del núcleo atómico) y *también* un nuevo tipo de partícula sin carga, el neutrino. Luego se emitía el neutrino junto con un electrón durante la desintegración beta.

Los neutrinos siguieron siendo teóricos hasta que los físicos estadunidenses Frederick Reines (1918-1998) y Clyde Cowan (1919-1974) los detectaron en 1953. Emplearon grandes tanques de agua cerca de un reactor nuclear como "colectores de neutrinos". Calcularon que el reactor estaría produciendo diez mil billones de neutrinos por segundo y lograron seguir la pista a tres por hora. Es claro que muchos escapaban, pero los pocos que encontraron proporcionaron la tan necesaria prueba



Murray Gell-Mann dio el nombre a los quarks

de que los neutrinos en verdad existen.

Los neutrinos tienen masa insignificante y ninguna carga, y por eso pasan a través de todo lo que encuentran sin trabas. De hecho, si se disparara un rayo de neutrinos a una pared de plomo de 3000 años luz de espesor, la mitad pasaría sin que los detuviera. Existen neutrinos que quedaron del Big Bang, neutrinos emitidos por el Sol y que surgen en corrientes de estrellas que explotan. De hecho, alrededor de 100 mil billones de neutrinos pasan por tu cuerpo cada segundo. Los átomos son en su mayor parte espacio vacío (recuerda que el núcleo es un grano de arena en un estadio de futbol). Por lo tanto, existe gran cantidad de espacio para que los neutrinos pasen a través de todo y como no tienen carga, no los desvían, ni los distraen los electrones o los protones.

Más o menos diez años después de que se descubriera el primer neutrino, se instaló un detector de neutrinos especializado en una mina de oro en Dakota del Sur. El detector constaba de un vasto tanque lleno con fluido para lavado en seco rico en cloro. Cuando un neutrino choca con un átomo de cloro, crea argón radiactivo. En pocos meses, una búsqueda en el tanque revelaría alrededor de 15 átomos de argón, lo que muestra que 15 neutrinos chocaron con átomos de cloro en ese tiempo. El detector se empleó en forma continua por más de 30 años.

En la actualidad existen muchos más detectores de neutrinos construidos a gran profundidad de la Tierra, algunos en viejas minas, otros bajo el océano e incluso bajo el hielo antártico. No es problema que los neutrinos lleguen a los detectores, pero el revestimiento impide que los científicos los confundan con rayos cósmicos (partículas más grandes que detienen la materia intermedia). El detector de neutrinos Super-K, en Japón, emplea 50 000 toneladas de agua en un tanque abovedado con 13 000 sensores de luz. Los sensores detectan un destello azul siempre que un neutrino choca con un átomo en el agua y crea un electrón. Al seguir la pista al camino exacto que toma el electrón a través del agua, los físicos pueden determinar la di-

"He hecho algo muy malo hoy al proponer una partícula que no se puede detectar. Es algo que un teórico no debería hacer jamás"

Wolfgang Pauli, diario, 1930





El detector MINOS (Inyector Principal de Búsqueda de Oscilación de Neutrinos) en la mina subterránea del Parque Estatal de Soudan, Minnesota, empleado para investigar neutrinos

rección en que llegó el neutrino y, en consecuencia, deducir su fuente. La mayoría procede del Sol. En 2001, los físicos descubrieron que los neutrinos se presentan en tres "sabores". Existen muchos más tipos de lo que se habían dado cuenta, pero sólo han estado descubriendo a los que crean electrones cuando interactúan con la materia. El descubrimiento de sabores tiene una implicación más (significa que los neutrinos tienen masa). Un detector para medir la masa de un neutrino entrará en operación en Alemania en 2012.

El trabajo de Feynman sobre el spin y la rotación de los electrones tuvo su origen al ver un plato que giraba y reflexionar sobre la "oscilación" mientras observaba el diseño.

"Mientras estaba almorzando, un chico lanzó un plato al aire en la cafetería. El plato tenía un medallón azul, el símbolo de la Universidad de Cornell; mientras subía y luego caía, lo azul daba vueltas y me pareció que lo azul giraba a más velocidad que la oscilación del plato y me pregunté cuál era la relación entre los dos. Sólo estaba jugando, no le di importancia, pero después me entretuve con las ecuaciones del movimiento de lo que giraba y descubrí que si la oscilación era pequeña, lo azul giraba con el doble de rapidez que el movimiento oscilatorio.

"Comencé a jugar con esta rotación, lo que me llevó a un problema parecido al de la rotación de un electrón según la ecuación de Dirac, y esto simplemente volvió a llevarme a la electrodinámica cuántica, que era el problema en el que había estado tra-

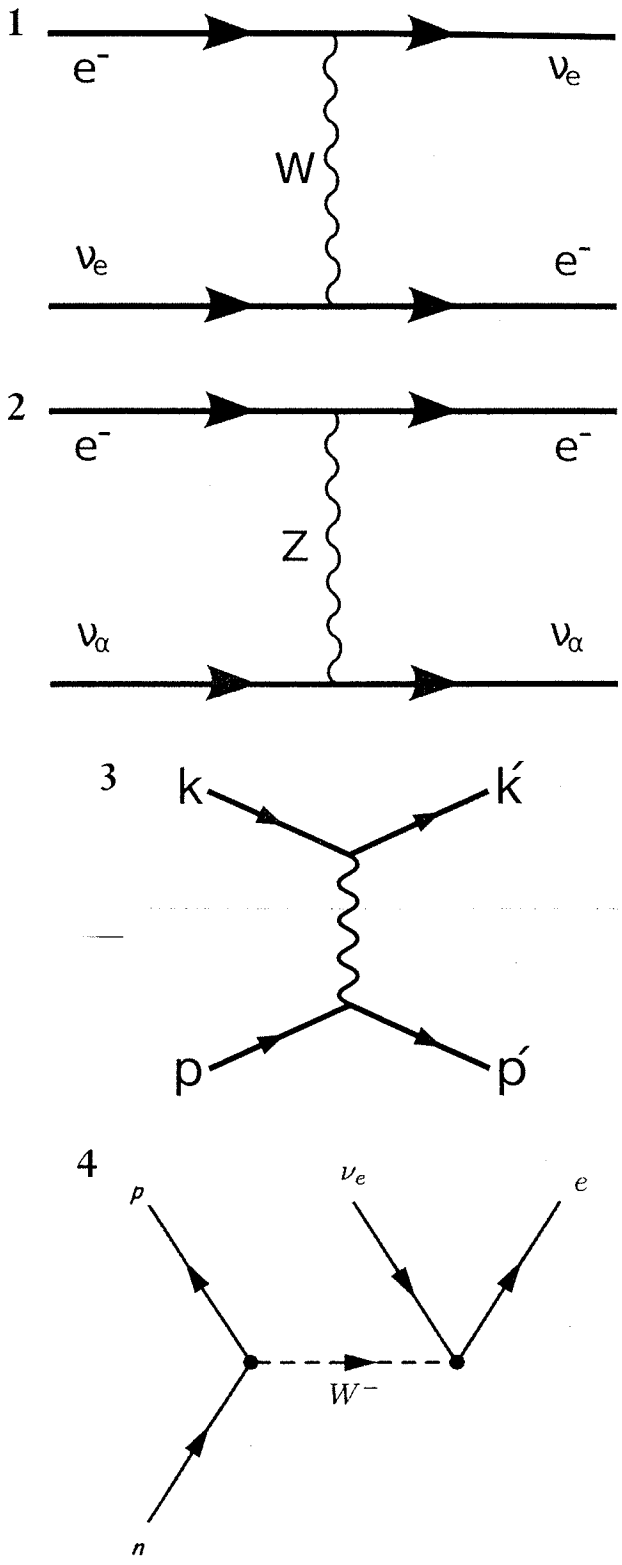
Una ruta indirecta

El Experimento de Neutrinos de Tritio de Karlsruhe (KATRIN), que será utilizado para calcular la masa de un neutrino, se construyó a 400 kilómetros de Karlsruhe, Alemania, donde operará. Sin embargo, era demasiado grande para transportarlo por caminos angostos, así que lo llevaron en bote por el río Danubio, hacia el Mar Negro, por el Mediterráneo, alrededor de España, por el canal de la Mancha, y por el Rin, a Leopoldshafen, Alemania, donde luego continuó por carretera. El viaje tomó dos meses y se recorrieron 9000 km.

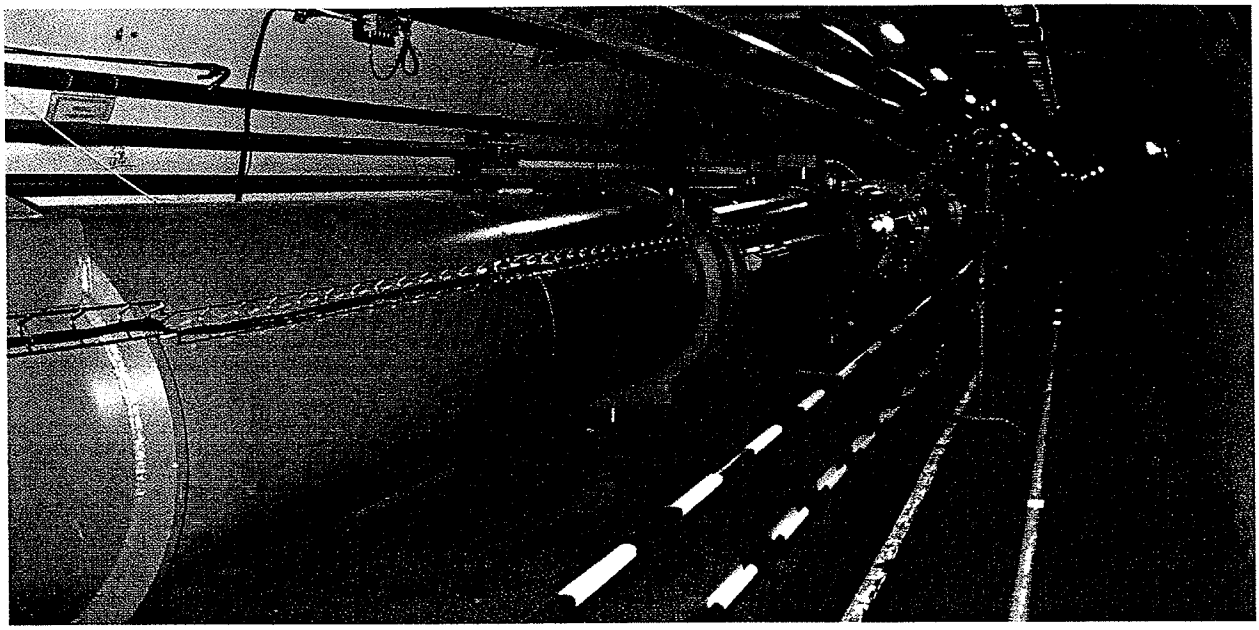


Richard Feynman (1918-1988)

Nacido en Nueva York, a Feynman lo introdujo a corta edad a la ciencia su padre, el cual hacía uniformes como carrera, pero estaba interesado en la ciencia y la lógica. Feynman estudió en el Instituto Tecnológico de Massachusetts y en Princeton antes de trabajar en el Proyecto Manhattan para crear la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial. Más adelante se unió al Instituto de Tecnología de California. Feynman fue un conferencista carismático y popular con variados pasatiempos e intereses, incluyendo tocar bongós en un bar nudista. Elaboró la teoría matemática de la física de partículas y demostró que la interacción entre electrones (o positrones) se puede considerar en términos de electrones que intercambian fotones virtuales y mostró estas interacciones en forma de "diagramas de Feynman". Como es bien sabido, tenía una camioneta decorada con diagramas de Feynman, la cual todavía existe en una cochera en California. También fue pionero de la computación cuántica y presentó el concepto de nanotecnología. Niels Bohr buscó a Feynman para discusiones personales de física porque todos los demás estaban tan intimidados por Bohr que no podían contradecirlo o señalar fallas en sus argumentos.



Diagramas de Feynman de:
(1) interacción de neutrino con materia con corriente cargada, (2) interacción de neutrino con materia con corriente neutra, (3) proceso de dispersión, y (4) desintegración de neutrón



Túnel del Gran Colisionador de Hadrones en el CERN.

bajando. Esta vez continué jugando relajadamente, como había hecho al principio, y fue exactamente igual que quitarle el corcho a una botella: todo salió a raudales y en muy poco tiempo solucioné aquellas cosas por las que luego gané el Premio Nobel".

La última partícula perdida

Se tenía una teoría de antimateria y neutrinos antes de que los encontraran. En la actualidad continúa la cacería de otra partícula teórica, el bosón de Higgs. A veces llamado la "partícula de Dios", el bosón de Higgs es la última partícula en el llamado Modelo Estándar del mundo físico que todavía se tiene que encontrar. El bosón de Higgs no tiene que existir en todos los modelos de la física, y en algunos modelos puede haber más de un tipo de bosón de Higgs. Descubrir si existe o no la partícula ayudará a los científicos a decidir cuál de los modelos sugeridos es más probable que sea correcto. Se piensa que el bosón de Higgs es un componente del campo Higgs. Pasar por el campo Higgs confiere masa a las partículas. Si existe el bosón de Higgs, es parte integral de la materia y está presente en todas partes. La primera descripción completa de la partícula la presentó Peter Higgs en 1966.

La búsqueda del bosón de Higgs requiere el uso de colisionadores de gran envergadura, como el Gran Colisionador de Hadrones

Renombrar lo inexistente

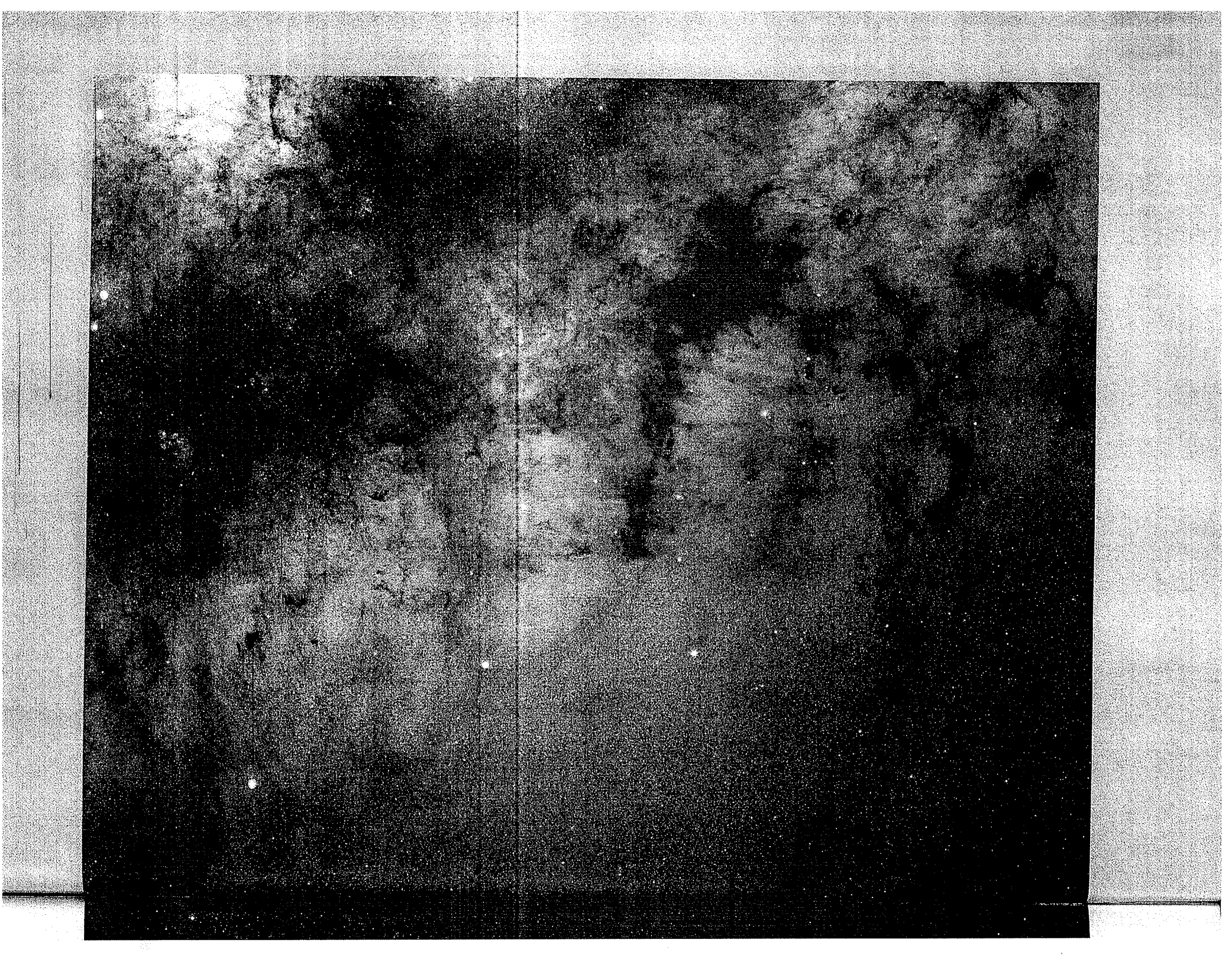
Muchos científicos se oponen al popular término "partícula de Dios" para el bosón de Higgs. La sugerencia más popular en una competencia para renombrarla en 2009 fue el "bosón de botella de champaña", pero otras opciones fueron "mastodonte", "misterión" e "inexistente".



en el Cern, en Suiza, y Tevatrón en el Fermilab, en Estados Unidos. Existen varias formas para que un colisionador de hadrones produzca un bosón de Higgs al aplastar entre sí protones a altas velocidades.

Partículas de las estrellas

Los grandes colisionadores de hadrones tratan de emular las condiciones que existieron cerca del principio mismo del Universo, con partículas que se unían por la fuerza bajo una inmensa presión. El hecho de que tengamos al menos una idea de qué pudo haber sucedido cerca del inicio del Universo es resultado de miles de años de observar y hacer teorías sobre las estrellas y el espacio, actividad que sin duda empezó antes de la historia escrita, cuando uno de nuestros ancestros más antiguos observaba maravillado el cielo y creaba historias para explicar lo que veía.





CAPÍTULO 6

ALCANZAR LAS **ESTRELLAS**

Es imposible saber cuándo los humanos levantaron la mirada a las estrellas y se hicieron preguntas sobre ellas. Algunos se inspiraron para ver imágenes, constelaciones, en el patrón de las más o menos 4000 estrellas visibles a simple vista, y entonces debió ser un pequeño paso el que los llevó a inventar historias que acompañaran las imágenes. Algunas de esas historias se volvieron la base de creencias religiosas y trataban de explicar lo inexplicable: El origen del mundo, la razón de las estaciones, el movimiento de las estrellas y los planetas por el cielo. Parece que otras personas se inspiraron para buscar explicaciones más racionales. Observaron, contaron, midieron y al final, hicieron predicciones. Sin duda pusieron a prueba y refinaron sus predicciones conforme el paso del tiempo presentaba problemas para sus modelos. Estos primeros astrónomos fueron los primeros científicos. No tenían conflictos con las tradiciones religiosas de sus culturas, sino que trabajaban de la mano con ellas, prediciendo el movimiento de los cuerpos celestes para producir calendarios con aplicaciones religiosas, además de prácticas.

La Vía Láctea, nuestro hogar en el Universo, es sólo una de cientos de miles de millones de galaxias.

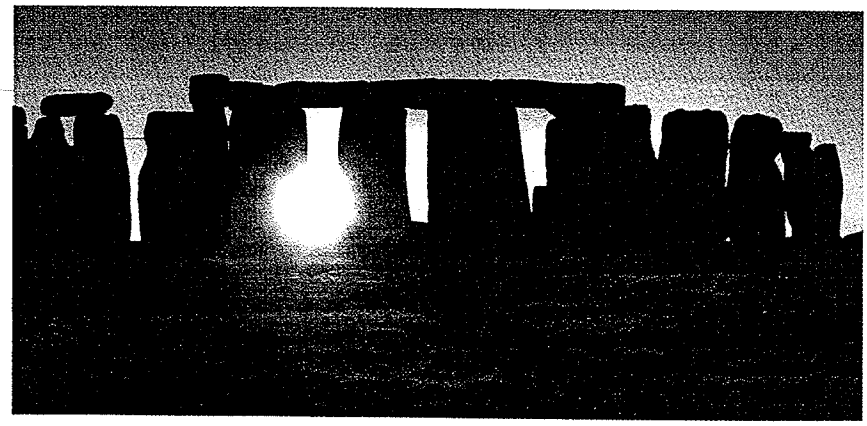


Existen 3000 piedras erguidas prehistóricas en Carnac, Francia.

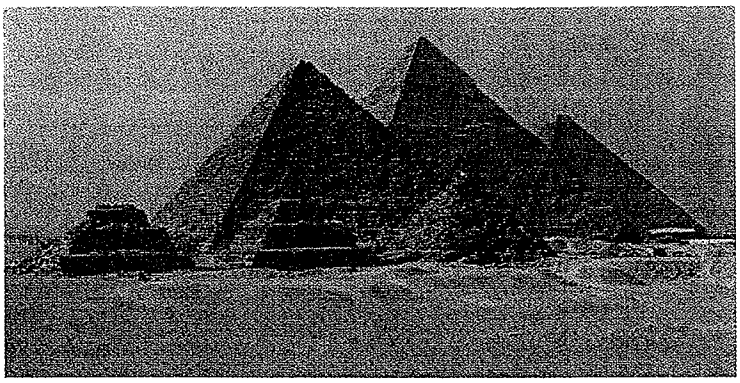
Estrellas y piedras

Algunas de las estructuras humanas más antiguas muestran evidencia de la cuidadosa observación del movimiento de la luna, las estrellas y los planetas en el cielo. Las 3000 piedras de Carnac, en Francia, se remontan al 4500-3300 a.C., y pueden tener un significado astronómico. El círculo de rocas erguidas en Stonehenge, en el sur de Inglaterra, pudo haber servido como observatorio celestial: El sol de mitad del verano se eleva en alineación aproximada con el eje central de Stonehenge. La precesión de la Tierra (la forma en que nuestro planeta oscila en su eje mientras gira) significa que Stonehenge pudo haber estado alineado con menor exactitud hace 4000 años de lo que está en la actualidad, pero de todos modos pudo haber proporcionado datos astronómicos lo bastante exactos para propósitos de agricultura y de veneración. Otros investigadores han encontrado alineaciones mucho más precisas con diferentes movimientos celestiales, incluyendo la luna y los planetas, y han sugerido que Stonehenge es el resultado de décadas o incluso siglos de observación astronómica.

Las Grandes Pirámides en Giza, Egipto, están alineadas con más precisión. Completadas en alrededor de 2680 a.C., los cuatro lados de las tres pirámides están orientados astronómicamente Norte-Sur y Este-Oeste a una pequeña fracción de un grado. Las posiciones de las pirámides pueden reflejar a las estrellas centrales de la constelación de Orión, mientras que otras pirámides tal vez correspondan a otras estrellas en Orión, y el Nilo puede corresponder a la Vía Láctea. La representación más antigua de astronomía del Antiguo Egipto que es segura es el techo



Stonehenge, en Salisbury, Inglaterra, pudo tener usos astronómicos en tiempos prehistóricos.



Las Grandes Pirámides de Giza, Egipto, parecen estar alineadas con las estrellas y los puntos de la brújula.

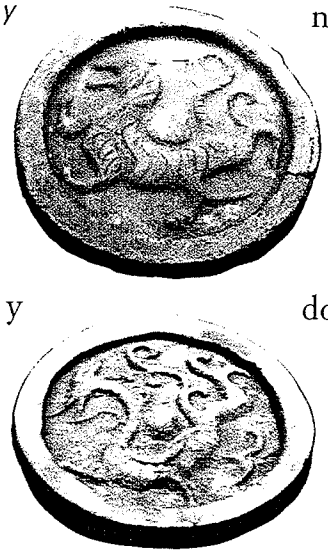
de la tumba de Senenmut, arquitecto en jefe y astrónomo durante el gobierno de la reina Hatshepsut (*aprox.* 1473-1458 d.C.). Varias construcciones que hicieron los pueblos mayas en Centroamérica están alineadas con el cúmulo estelar de las Pléyades y Aldhibain (una estrella en la constelación de Draco).

Primeros observadores de estrellas

No existen registros contemporáneos que apoyen un uso o correlación astronómica para Stonehenge y las pirámides, pero los astrónomos más antiguos que sí dejaron registros se remontan más o menos al mismo periodo. Los astrónomos chinos empezaron a observar el cielo empleando observatorios construidos a propósito desde alrededor de 2300 a.C. El primer informe de un cometa se registró en 2296 a.C., de una lluvia de meteoros en 2133 a.C., y de un eclipse solar en 2136 a.C. La astronomía china sirvió a la astrología, ya que los astrólogos necesitaban predecir eclipses y otros fenómenos celestiales con el fin de escoger momentos propicios para escenificar eventos reales y batallas, y predecir el futuro éxito y salud del emperador. Fallar podía ser fatal (se sabe de al menos dos astrónomos que fueron decapitados en 2300 a.C. por hacer predicciones inexactas de un eclipse solar). Una tumba en Xishuipo, provincia Henan, que se remonta a unos 6000 años, contenía conchas de almeja y huesos que formaban las imágenes de tres constelaciones de la astronomía china, el Dragón Azul, el Tigre Blanco y el Mirlo Acuático. También sobreviven huesos de oráculo de 3200 años de antigüedad que tienen los nombres de estrellas relacionadas con las 28 mansiones lunares. Los chinos creían que las alineaciones en los cielos indicaban o predecían eventos en la Tierra. Desde el siglo XVI a.C., hasta el final del siglo XIX d.C., casi toda dinastía nombró oficiales para observar y registrar eventos y cambios astronómicos, dejando un registro invaluable para los historiadores de astronomía de la actualidad.

El Creciente Fértil de Mesopotamia (ahora Irak) fue hogar de varias civilizaciones antiguas, empezando con los sumerios en alrededor de 2600 a.C. Entre decenas de miles de tabletas de arcilla sumerias que se remontan a 2400 a.C., se encuentra el almanaque más antiguo de los granjeros, el cual explica cuándo sembrar y recoger las cosechas.

Los babilonios ocuparon el área en alrededor de 1600 a.C. Sus astrónomos tenían apoyo del Estado para actividades como elaborar calendarios y hacer predicciones astrológicas. Compilaron catálogos



Las constelaciones chinas Dragón Azul y Tigre Blanco ilustradas en fichas.

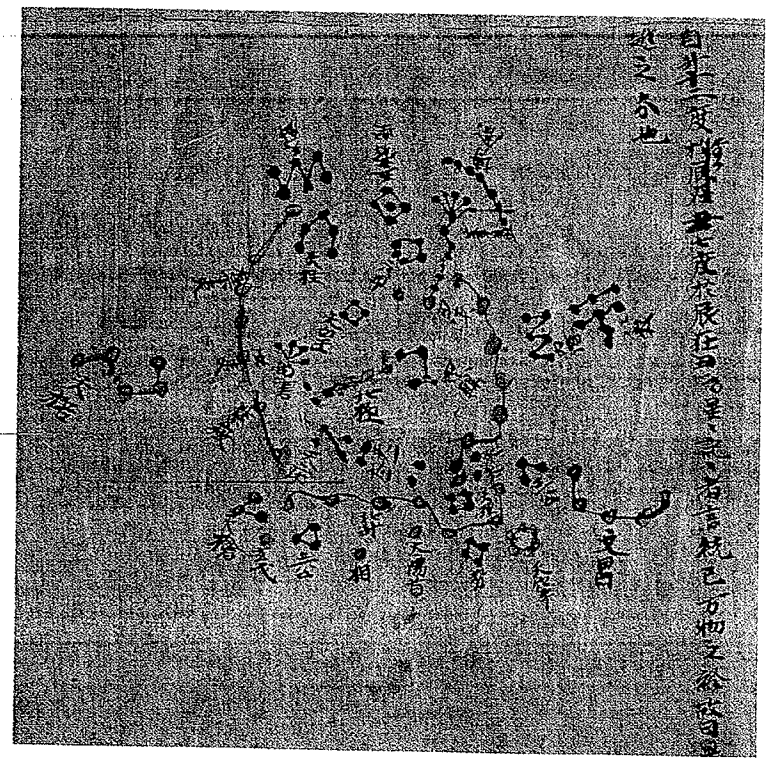
de estrellas, y empezaron a llevar registros a largo plazo de los movimientos planetarios y de los eclipses solares y lunares que los ayudaron a hacer predicciones aproximadas de los eclipses. Parece que descubrieron el ciclo de 223 meses de los eclipses lunares. Para 800 a.C., habían fijado las ubicaciones de Venus, Júpiter y Marte en relación con las estrellas, y registraron el aparente movimiento retrógrado (hacia atrás) de los planetas.

Los babilonios elaboraron un calendario de doce meses con un mes trece de bonificación excepcional que se añadía en ocasiones para mantenerlo constante. En algunas partes de Babilonia, también había una semana de siete días. Los babilonios también dividían el círculo en 360 grados, y de esto derivaron una división del día en doce "kaspu", durante los cuales el sol recorría 30 grados del cielo. Empleaban el arco de un grado como unidad para medir espacio angular.

Tener un sistema para medir ángulos permitió a los astrónomos babilonios medir el movimiento retrógrado de los planetas. Con los registros conservados en tabletas de arcilla durante siglos, podían predecir las posiciones planetarias y los movimientos retrógrados, incluso sin comprender cómo o por qué tenían lugar los movimientos. No intentaron encontrar explicaciones o modelos científicos, ya que sus predicciones servían sólo a propósitos prácticos y religiosos.

De observar a pensar

Mientras que los astrónomos chinos, sumerios y babilonios eran minuciosos al registrar las estrellas y los eventos, los antiguos griegos siguieron un enfoque más



El mapa estelar chino Dunhuang, creado en 700 d.C.



> "Entonces, parece más probable que el ecuador del globo terrestre, en un solo segundo (es decir, en alrededor del tiempo en que alguien que camina con rapidez será capaz de avanzar un solo paso), pueda lograr un cuarto de milla británica (de la que sesenta igualan un grado de un gran círculo de la Tierra), o que el ecuador del primus mobile en el mismo tiempo viaje cinco mil millas con celeridad indescriptible, más rápido que las alas del rayo, si es que mantienen la verdad que en especial ataca al movimiento de la Tierra".
>
> Edward Wright, en la introducción a *De magnete* de William Gilbert (1600), al explicar por qué es más probable que la Tierra gire en su eje a que el Sol gire alrededor de la Tierra cada 24 horas

teórico y científico, intentando explicar y hacer modelos del comportamiento de los cuerpos celestiales.

Más o menos en 500 a.C., Pitágoras sugirió que el mundo es un globo, en lugar de ser plano, y en el siglo V a.C. Anaxágoras propuso que el Sol es una roca muy caliente y que la Luna es un trozo de la Tierra. En 270 a.C., Aristarco dijo que la Tierra gira alrededor del Sol. Antes, la gente creía que la Tierra era el centro alrededor del cual giraban la Luna, el Sol, los planetas y las estrellas. Aristarco hizo el primer cálculo del tamaño del Sol y la Luna, y de su distancia a la Tierra, y llegó a la conclusión de que al ser el Sol mucho más grande que la Tierra es relativamente improbable que el Sol sea el cuerpo subordinado, en órbita alrededor de la Tierra.

Trabajando con el tiempo que se requería para que tuviera lugar un eclipse lunar, Aristarco calculó la distancia de la Tierra a la Luna en alrededor de 60 veces el radio de la Tierra, lo cual se ajusta a la cifra moderna. Decidió que el Sol está diecinueve veces más lejos de la Tierra de lo que está la Luna, y alrededor de diez veces el diámetro de la Tierra, aunque no estuvo tan exacto con estas cifras. Por desgracia, los contemporáneos no aceptaron las conclusiones de Aristarco. Un argumento fue que si la Tierra se movía alrededor del Sol, a veces estaría mucho más lejos de las estrellas y su tamaño parecería variar. Por supuesto, es un hecho que la Tierra está tan lejos de las estrellas que la distancia a la Tierra es diminuta en comparación, y no hace diferencia para el tamaño aparente de las estrellas, pero en lo demás es un punto razonable. Esas distancias eran inconcebibles en ese tiempo y se rechazó el modelo de Aristarco. Pasarían 1800 años antes de que se le favoreciera de nuevo.

Hiparco: ¿El mayor astrónomo de la Antigüedad?

El astrónomo griego Hiparco nació en Nicea, en *aprox.* 190 a.C., pero pasó la mayor parte de su vida en Rodas. Se le ha llamado el mayor astrónomo de la Antigüedad, aunque sobrevive muy poco de sus obras. Lo conocemos en su mayor parte gracias al Almagest (*Almagesto*) de Ptolomeo. Se inspiró en el trabajo de astrónomos babilónicos, creando un puente entre los eruditos babilónicos y griegos en el campo y al parecer empleando algunos de sus métodos, así como los datos reunidos.

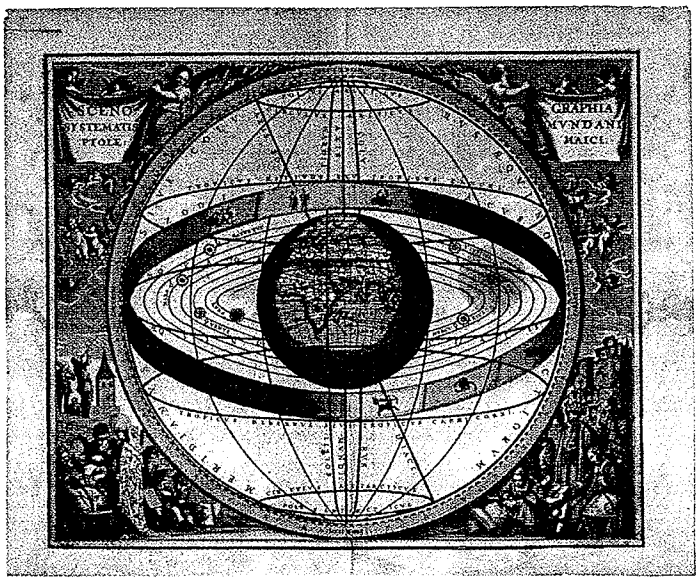
Hiparco fue un gran observador de los cielos y a menudo se le reconoce haber producido el primer catálogo detallado de



Hiparco con la esfera armilar que inventó

las estrellas. La obra china, *El libro Gan y Shi de las estrellas*, escrito durante el siglo IV a.C., registra las posiciones de 121 estrellas. Pero Hiparco anotó las posiciones de 850 estrellas visibles a simple vista, clasificándolas en seis grupos de acuerdo a su brillo. Este sistema todavía se emplea en la actualidad. Preparó una lista de todos los eclipses que habían tenido lugar en los 800 años previos, y observó una nueva estrella en la constelación de Escorpión en 134 a.C. También se le ha acreditado inventar la trigonometría y tal vez el astrolabio planisférico. Ptolomeo dijo que Hiparco explicó el movimiento circular del Sol y la Luna, pero que no tenía un modelo para las trayectorias de los planetas, aunque organizó los datos sobre ellos y mostró que no concordaban con las teorías contemporáneas. Su logro más famoso es su discusión de cómo los puntos de solsticio y equinoccio se mueven con lentitud de Este a Oeste cuando se le establece contra las estrellas fijas (a lo que se conoce como la precesión de los equinoccios).

Hiparco midió primero la duración de un año con exactitud, haciéndolo de 365 días, 5 horas y 55 minutos. Se dio cuenta de que las estaciones eran de diferente duración y calculó lo que dura un mes con tanta exactitud que sólo le falló por un segundo.



Mapa que muestra el universo ptolemaico, con la Tierra en el centro, 1660-1661.



Las esferas de Ptolomeo

Debió ser el modelo heliocéntrico de Aristarco el que nos llegara del mundo antiguo, pero tomó su lugar uno descrito por Ptolomeo en alrededor de 140 d.C. No se originó en él (estaba presentando el consenso de la opinión contemporánea en su *Compilación matemática* [en la actualidad conocida como el *Almagesto* por la corrupción de su título en árabe]). De acuerdo a Ptolomeo, la Tierra se encuentra en el centro de una serie de esferas concéntricas. Una de esas esferas, la Luna, el Sol, los planetas y las estrellas fijas, giran alrededor de la Tierra. Los griegos creían que el círculo era la forma perfecta, y como los cielos eran el reino de la perfección, las órbitas debían ser circulares. Sin embargo, esto no explica el movimiento observado de los planetas.

Para hacer que el sistema funcionara, se debían alejar de la Tierra. Era claro que Venus y Mercurio estaban en órbita alrededor del Sol, así que en el modelo de Ptolomeo estaban siguiendo una trayectoria circular alrededor del Sol, que en sí seguía una órbita circular alrededor de la Tierra. A Marte, Júpiter y Saturno, los otros planetas visibles a simple vista, también se les dio algo alrededor de lo cual girar, pero no era el Sol. Ptolomeo identificó puntos vacíos que formaban el foco para las órbitas de esos planetas, y estos puntos vacíos giraban alrededor de la Tierra, siguiendo una trayectoria circular. Este modelo de órbitas circulares cambiadas explicaba bastante bien la trayectoria un poco vagabunda de los planetas, que a veces parece ir hacia atrás (que sigue una trayectoria retrógrada). Las estrellas fijas eran más fáciles de explicar, estaban salpicadas en una esfera distante que giraba alrededor de la Tierra, proporcionando un fondo para todo lo demás.



Ptolomeo con una esfera armilar.

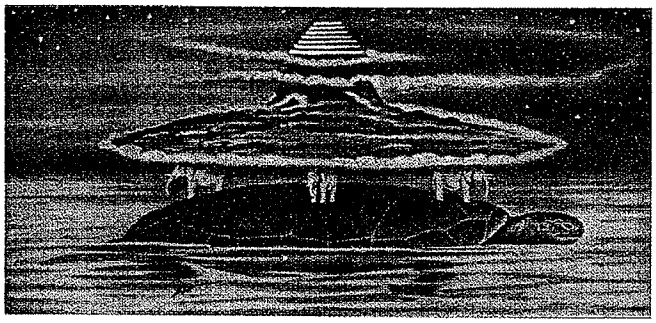
Con observaciones cada vez más exactas del movimiento de los planetas, quedó claro que el modelo ptolemaico no explicaba por completo sus trayectorias. Se añadieron más y más pequeñas correcciones para afinar el modelo y hacer que concordara con las observaciones, pero al final, después de más de mil años, se le tuvo que dejar.

Entrar y salir de la oscuridad

Con la decadencia del mundo helénico, la astronomía entró a su propio periodo de eclipse. No hubo grandes astrónomos romanos y se avanzó poco antes del surgimiento de la ciencia árabe y la fundación de la escuela de astronomía de Bagdad en 813 d.C., por parte de Al-Ma'mun.

Un modelo menos plausible

En la mitología hindú se dice que el mundo está apoyado en el espacio mediante cuatro elefantes, los cuales a su vez están parados sobre el caparazón de una tortuga. No existen observaciones astronómicas que apoyen este modelo. Terry Pratchett tomó prestada la leyenda hindú en sus novelas de Mundodisco. La respuesta a la pregunta obvia de en qué se para la tortuga, a menudo se da como "hay tortugas hasta el fondo", respuesta que se ha atribuido a muchas fuentes.



Mientras que nada sucedía en Europa y el norte de África, los astrónomos hindúes estaban realizando y registrando observaciones que más adelante alimentarían a la astronomía árabe. El texto hindú más antiguo sobre las estrellas, *Vedanga Fyotisha*, se remonta a alrededor de 1200 a.C., pero es una obra astrológica más que astronómica, y sus usos eran en su mayor parte religiosos.

El *Aryabhatiya*, de 476-550 d.C., fue el primer texto astronómico real en circular en la India. Tuvo influencia en escritores árabes posteriores y es el primero en establecer el inicio del día a medianoche. Afirma que el mundo gira en su eje, que es la razón de que las estrellas parezcan moverse a través del cielo, y que la Luna se ilumina mediante la luz reflejada del Sol.

Astronomía árabe

Los astrónomos árabes fueron los primeros en emplear las matemáticas sistemáticamente al movimiento de estrellas y planetas. Los astrónomos islámicos eran impulsados por la necesidad de un calendario confiable, de señalar con exactitud los momentos para las oraciones de la salida del sol, mediodía, tarde, puesta del sol y en la noche, y poder determinar la dirección de su sagrada ciudad de la Meca desde cualquier lugar. Examinaron los cielos para que ayudaran con estas tareas, inducidos por las palabras del Qu'ran (Corán) de emplear las estrellas para la navegación: "Fue Él quien ordenó las estrellas para ti de manera que puedas guiarte de ese modo en la oscuridad de la tierra y el mar". El Qu'ran también alentaba la confianza en los datos empíricos y la evidencia de los sentidos, mientras que los pensadores griegos habían puesto mayor énfasis en la razón. La orden del Qu'ran de observar, razonar y contemplar condujo a una aproximación del método científico.

Por lo general, el Islam se opone al uso de la astrología para propósitos de predicción. Cuando tuvo lugar un eclipse durante la muerte del hijo de Mahoma, disuadió a los espectadores de sacar conclusiones respecto a Dios, diciendo: "Un eclipse es un fenómeno de la naturaleza y no tiene rela-



ción con el nacimiento o la muerte de un ser humano". Esto separó a la astronomía árabe de las tradiciones hindú y china, las cuales aprovechaban la astronomía al servicio de la astrología y la predicción del futuro.

Desde alrededor de 700-825 d.C., la mayoría de los astrónomos árabes se concentraba en asimilar y traducir las obras astronómicas de griegos, hindúes y persas preislámicos (sasánidos). Sus nuevos esfuerzos empezaron más o menos en el momento en que el califa Al-Mamun estableció la Casa de la Sabiduría en Bagdad. La llegada del papel a Irak desde China durante el siglo VIII, mucho antes de que llegara a Europa, facilitó en particular la reunión y diseminación del conocimiento, y de 825 d.C., hasta el saqueo de Bagdad por parte de los mongoles en 1258, la Casa de la Sabiduría fue el centro intelectual del mundo.

El primer trabajo original musulmán importante fue el *Zij Al-Sindh*, escrito por Muhammed ibn Musa Al-Khwarizimi (*aprox.* 780-*aprox.* 850) en 830 d.C. Consta de tablas para los movimientos del Sol, la Luna y los cinco planetas conocidos. Se recuerda a Al-Khwarizimi en particular como matemático (la forma latinizada de su nombre, Algoritmi, nos dio el término "algoritmo"), y los avances árabes en matemáticas con seguridad ayudaron al estudio de la astronomía. También mejoró el reloj solar e inventó el cuadrante, empleado para medir ángulos. En algún momento alrededor de 825-835 d.C., Habash Al-Hasib Al-Marwazi produjo *El libro de cuerpos y distancias*, en el que presentaba cálculos mejorados de algunas distancias astronómicas. Presentaba el diámetro de la luna como 3037 km (en realidad es 3 470 km) y su distancia de la Tierra como 346 344 km (es 384 402 km). En 964, el astrónomo

Brahmagupta (598 -668 d.C.)

El matemático hindú Brahmagupta nació en la ciudad de Bhinmal, en Rajastán, en el noroeste de la India. Fue director del observatorio astronómico en Ujjain, y escribió cuatro textos sobre matemáticas y astronomía, uno de los cuales contiene la primera explicación del número cero. Brahmagupta propuso que la Tierra gira en su eje, y demostró que la luna no está más lejos de la Tierra que el sol, y sostuvo que la Tierra era redonda en lugar de ser plana. Para rebatir las críticas de que si la Tierra fuera un globo todo se caería de ella, describió algo similar a la gravedad (ver cita, abajo). Presentó métodos para calcular la posición de los cuerpos celestes y predecir eclipses. Fue de las obras de Brahmagupta que los astrónomos árabes aprendieron sobre la astronomía hindú. Kanakah, quien llegó de Ujjain en 770 d.C. a invitación del califa Al-Mansur, empleó el *Brahmasphutasiddhanta* de Brahmagupta para explicar la astronomía.

"Todos los cuerpos pesados son atraídos hacia el centro de la Tierra... La Tierra es la misma en todos sus lados; toda la gente en la Tierra se mantiene erguida y todos los objetos pesados caen hacia la Tierra gracias a una ley de la naturaleza, ya que es la naturaleza de la Tierra atraer y conservar las cosas, como fluir es la naturaleza del agua, la del fuego es arder y la del viento ponerse en movimiento... La Tierra es la única cosa baja, y las semillas siempre vuelven a ella, en cualquier dirección que quieras lanzarlas, y nunca se elevan hacia arriba desde la Tierra".

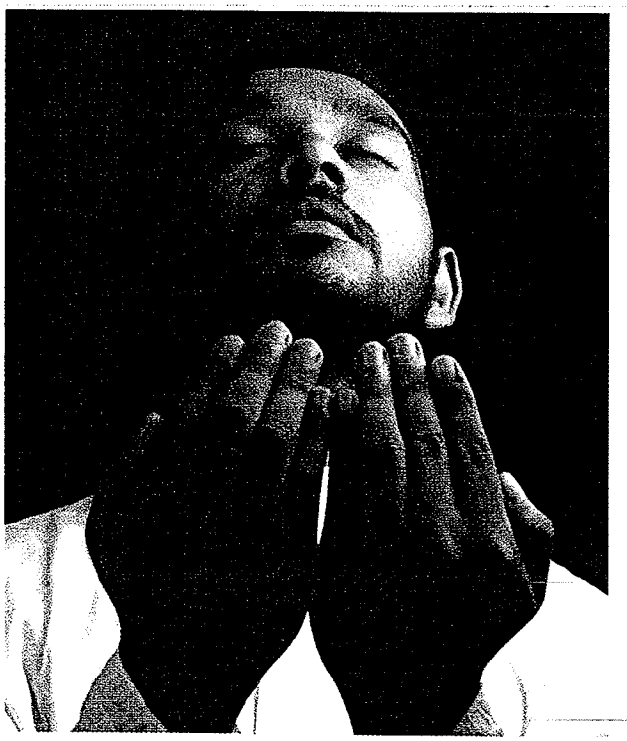
Brahmagupta, *Brahmasphutasiddhanta*, 628 d.C.



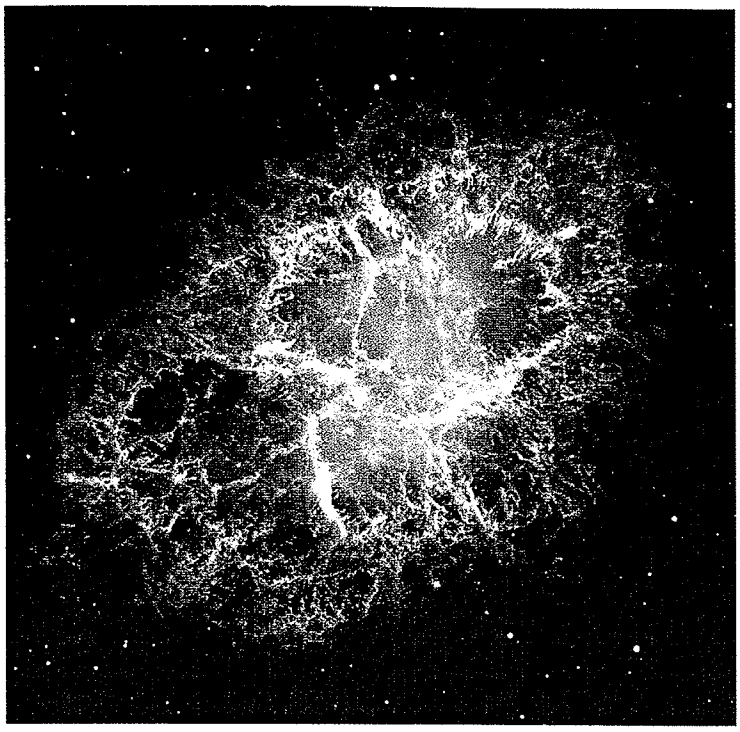
Mapa celeste árabe del hemisferio norte, 1275.

persa Abd Al-Rahman Al-Sufi (903-86) escribió observaciones y dibujos de las estrellas, dando sus posiciones, magnitudes, brillo y color. Su libro incluye las primeras descripciones e imágenes de la galaxia de Andrómeda. En 1006, el astrónomo egipcio Ali ibn Ridwan (988-1061) describió la supernova más brillante de la historia escrita, diciendo que era dos o tres veces más grande que Venus y la cuarta parte del brillo de la Luna. También la describieron astrónomos en China, Irak, Japón, Suiza y tal vez pueblos indígenas de Norteamérica.

Los avances que los astrónomos árabes podían realizar estaban muy limitados por su convicción de que la Tierra era el centro del sistema celestial y que el infinito era imposible. Sin embargo, Ja'far Muhammad ibn Musa ibn Shakir sugirió en el siglo IX d.C. que los cuerpos celestes obedecen las mismas leyes físicas que actúan en la Tierra (al contrario de la creencia de los antiguos), y en el siglo XI Ibn Al-Haytham realizó el primer intento de aplicar el método experimental a la astronomía. Empleó un aparato especial para poner a prueba cómo la Luna reflejaba la luz del sol, variando los ajustes de su equipo y escribiendo los efectos. Sugirió que el medio de los cielos es menos denso que el aire y refutó el punto de vista de Aristóteles de que la Vía Láctea es un fenómeno de la atmósfera alta. Al medir su paralaje, dedujo que estaba muy lejos de la Tierra. Fue Al-Biruni quien descubrió, en el mismo siglo, que la Vía Láctea está formada por estrellas. También describió la gravedad como "La atracción de todas las cosas hacia el centro de la Tierra", y dijo que la gravedad existe en los cuerpos celestes y en las esferas celestiales (trabajaba todavía con el modelo ptolemaico del Universo). Al-Haytham propuso que la Tierra gira en su eje, idea que antes pre-



Las exigencias de rezar en el momento correcto impulsó el avance árabe del calendario y por lo tanto, de la astronomía.



Un evento de supernova que los astrónomos presenciaron en 1054 creó la Nebulosa del Cangrejo.

sentó el hindú Brahmagupta. Al-Biruni no encontró problemas matemáticos con la rotación de la Tierra cuando comentó los escritos de Brahmagupta en 1030.

Como con otros aspectos de la ciencia islámica, se desalentó la investigación rigurosa en astronomía en el Islam si se consideraba que trataba de conocer la mente de Dios. Tal vez la contribución más significativa de los eruditos árabes de los siglos VIII a XII fueron los refinamientos en los instrumentos astronómicos y los avances en matemáticas. Allanaron el camino para los astrónomos europeos del Renacimiento, quienes reescribieron el libro de los cielos.

La gran estrella invitada

Durante 23 días, comenzando en julio de 1054, una estrella tan brillante que se podía ver a la luz del día resplandeció en el cielo. Los astrónomos chinos se refirieron a ella como una "estrella invitada" en la constelación de Tauro, escribiendo que su brillo amarillo era cuatro veces más intenso que Venus. Continuó siendo visible por 653 días. El poeta japonés Sadiae Fujiwara escribió sobre la estrella, y lo registraron en alfarería los artistas nativos americanos anasazi y mimbre. La "estrella invitada" fue la supernova que creó la nebulosa del Cangrejo. Después de la desaparición de la nueva estrella del cielo nocturno, no se le volvió a ver por casi 700 años, cuando el doctor y astrónomo inglés John Bevis (1695-1771) descubrió la nebulosa en 1731, empleando un telescopio.

La tierra se mueve... de nuevo

Casi dos mil años después de que Aristarco sugiriera por primera vez que la Tierra se mueve alrededor del Sol, volvió a surgir la idea. En el mundo cristiano, era una propuesta peligrosa, ya que la iglesia enseñaba que los cielos eran perfectos e inmutables, y que el hombre era el pináculo de la creación y estaba en el centro del plan de Dios. Por lo tanto, ¿la Tierra podía tener un lugar subordinado, moviéndose alrededor del Sol? La idea era herejía y de inmediato auguraba dificultades.

Había problemas con el modelo ptolemaico, de los que el más significativo era que

Las primeras herramientas del oficio

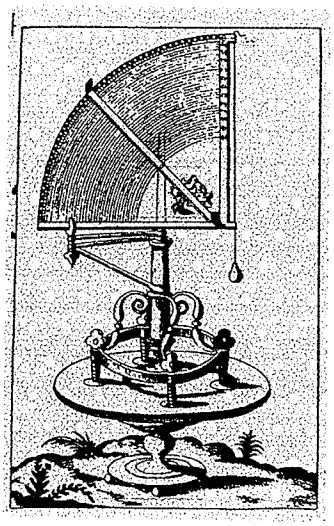
Las herramientas astronómicas más antiguas que se conocen son las tabletas de arcilla babilónicas que muestran tres círculos concéntricos divididos en doce secciones. Cada uno de esos 36 campos muestra los nombres de constelaciones y números simples, los cuales representan los meses del calendario babilónico.

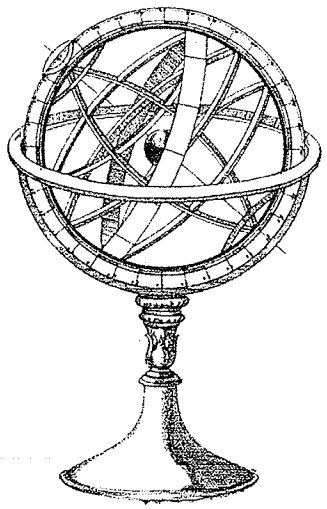
Un astrolabio representa las posiciones de los planetas y las estrellas, basándose en la suposición de que la Tierra es el centro del Universo. Es probable que los astrolabios se crearan en algún momento antes del siglo I d.C., aunque el instrumento más antiguo que ha sobrevivido es árabe y data del 927-28 d.C. La tradición islámica explica el origen del astrolabio: Ptolomeo estaba viajando en burro mientras examinaba su globo celeste. Dejó caer el globo y su burro lo pisó, dejándolo plano y así, dando a Ptolomeo la idea para el astrolabio.



Una esfera armilar es un equivalente tridimensional de un astrolabio, representando a los planetas y a las estrellas en una serie de anillos concéntricos con la Tierra en el centro.

Un cuadrante se emplea para medir la elevación de un cuerpo sobre el horizonte. El primer cuadrante que se registra lo menciona Ptolomeo en alrededor de 150 d.C. Los astrónomos islámicos construyeron grandes cuadrantes, pero el más famoso fue el que usó Tycho Brahe (1546-1601) en su observatorio de Urabiborg, en la isla danesa de Hven.





Herramientas astronómicas antiguas (en el sentido de las manecillas del reloj desde arriba): Astrolabio, esfera armilar, cuadrante.

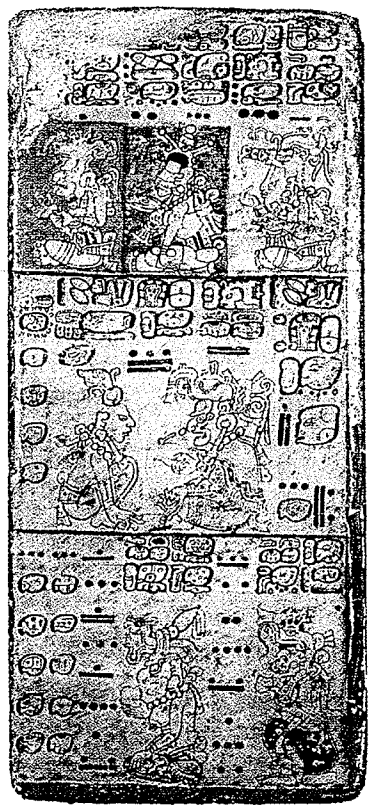


la separación de la Tierra que se requería para el foco de la órbita de la Luna era tan grande que la Luna debía estar mucho más cerca de la Tierra en unas ocasiones que en otras, de hecho, lo suficiente para que se viera perceptiblemente más grande. El matemático y astrónomo alemán Johannes Muller (1436-76), conocido por su nombre latinizado de Regiomantus, reveló en 1496 este problema, y otras observaciones que hacen dudar del modelo de Ptolomeo. El hombre que se atrevió a desafiar el modelo ptolemaico fue Copérnico, Mikolaj Kopernik, astrónomo polaco que no se molestaba con observaciones, pero que decidió que sería una solución más ordenada si la Tierra orbitaba el Sol en lugar de lo contrario. A Copérnico le disgustaban en particular los círculos o miniórbitas llamadas "ecuantes" que los planetas necesitaban para seguir en el modelo ptolemaico para explicar sus movimientos observados, y deseaba un sistema en que hubiera un centro único y fijo del Universo.

Mayas de ojos agudos

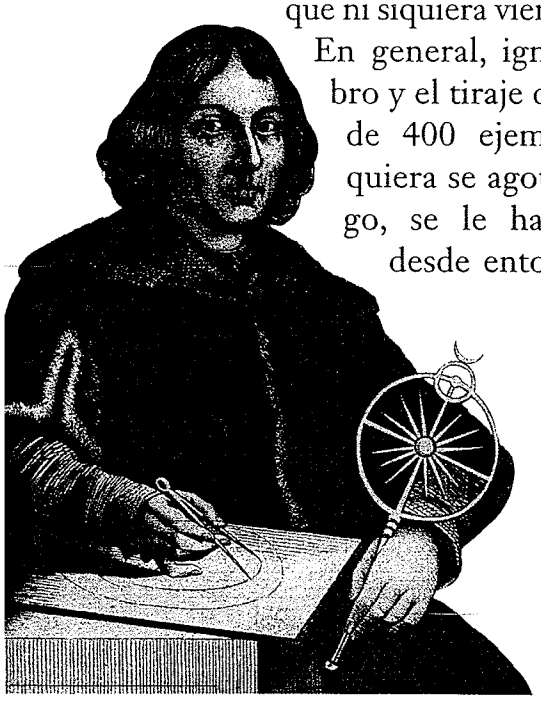
El Códice Dresde es un texto maya producido en Centroamérica en el siglo XI o XII. Registra con sorprendente exactitud observaciones de la Luna y de Venus que tal vez se hicieron 300 o 400 años antes. Venus era el cuerpo celeste más importante para los mayas después del Sol. Los mayas también parecen haber notado la nebulosa borrosa en el centro de la constelación de Orión; aparecía en historias tradicionales y se representaba como el humo de la chimenea. Son la única civilización conocida en haber descubierto esta característica de Orión sin el uso de telescopios.





> *"Dios, cuando creó el mundo, movió cada uno de los orbes celestes como lo deseó, y al moverlos les inculcó sus ímpetus que los movían sin que tuviera ya que moverlos... Y esos ímpetus que inculcó en los cuerpos celestes no disminuyeron ni se corrompieron después, ya que no había inclinación en los cuerpos celestes por otros movimientos. Tampoco había resistencia que pudiera ser corruptora o represiva de ese ímpetu".*
>
> Jean Buridan, filósofo francés del siglo XIV

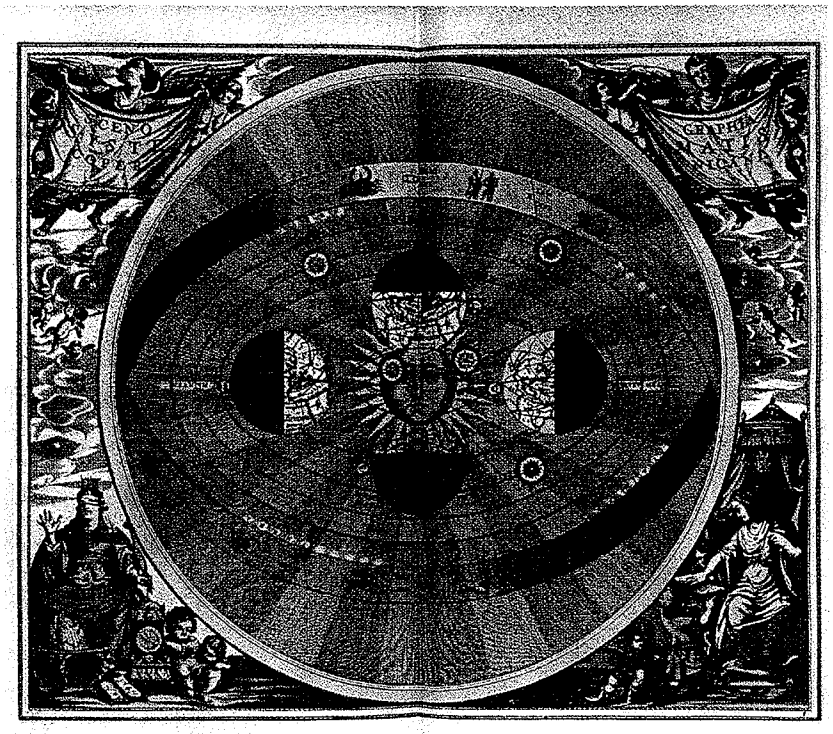
Aunque Copérnico completó su idea sobre el Universo centrado en el Sol, en alrededor de 1510, fue cauto, y se lo comunicó sólo a unas cuantas personas antes de publicar su obra trascendental *De Revolutionibus Orbium Coelestium (Sobre la revolución de las esferas celestes)* en 1543. El impresor, Rheticus, apenas había hecho una parte de la preparación del libro de Copérnico cuando tuvo que marcharse a Núremberg. El trabajo pasó a un luterano, Andreas Osiander, quien añadió un prefacio en que dijo que Copérnico no quería decir que el sol estaba *literalmente* en el centro del Universo y que sólo estaba presentando un modelo matemático que ayudaba a explicar las observaciones. El prefacio tenía la finalidad de calmar cualquier crítica de la iglesia pero, de hecho, la iglesia católica prestó poca atención al libro y sólo los luteranos lo objetaron. Copérnico murió el año en que se publicó el libro y es posible que ni siquiera viera un ejemplar. En general, ignoraron su libro y el tiraje de la imprenta de 400 ejemplares ni siquiera se agotó, sin embargo, se le ha considerado desde entonces como el texto que inició la astronomía moderna y ayudó a desencadenar la revolución científica.



Copérnico

Aunque mejor que las esferas de Ptolomeo, todavía existían algunos problemas con el modelo de Copérnico. Se pensaba que las estrellas fijas estaban en una esfera invisible más allá del planeta más lejano. Sin embargo, para que las estrellas no parecieran moverse, necesitaban estar muy lejos. En la actualidad estamos cómodos con este concepto, pero en el siglo XVI de inmediato planteó la cuestión de por qué Dios desperdiciaría tanto espacio vacío entre el planeta más lejano y las estrellas fijas. Otro problema fue que si la Tierra se estaba moviendo, ¿por qué los océanos no se derramaban y los edificios se sacudían hasta hacerse pedazos? Por otro lado, a diferencia del modelo ptolemaico, el modelo de Copérnico explicaba los movimientos observados de los planetas sin recurrir a complejos disparates.

La explicación de Copérnico puso a los planetas en dos grupos, donde Mercurio y Venus estaban más cerca del Sol que la Tierra, y luego Marte, Júpiter y Saturno más lejos (los otros planetas eran desconocidos en ese tiempo). Copérnico también determinó cuánto le tomaba a cada plane-



El modelo de Copérnico del Sistema Solar, con los planetas girando alrededor del Sol.

ta girar alrededor del Sol y las distancias relativas de los planetas al Sol. Correspondieron con sus agrupamientos respecto a la órbita de la Tierra, proporcionando evidencia sólida a favor de su modelo.

Todo cambia

Tycho Brahe fue un personaje pintoresco, un aristócrata secuestrado cuando era bebé, que más adelante perdió parte de su nariz en un duelo y que usó a partir de ese momento una prótesis de oro y plata. Se obsesionó con las estrellas a corta edad y se dio cuenta deque las observaciones sistemáticas y exactas debían ser la base de cualquier grupo de predicciones. En 1569 mandó hacer un cuadrante gigante, con un radio de alrededor de seis metros. El borde estaba calibrado en minutos y permitía medidas precisas. Lo empleó hasta que lo destruyó una tormenta en 1574.

En 1572, Tycho observó lo que parecía ser una nueva estrella muy brillante en la constelación de Casiopea. Como se suponía que el cielo estaba fijo por toda la eternidad, esto fue motivo de algo de consternación y se decidió a registrar su posición durante un periodo de meses para determinar si era un cometa, el cual se movería en relación con las estrellas fijas. La observó durante 18 meses, tiempo en que perdió intensidad de ser más brillante que Venus al aparecer como una estrella común, pero no cambió su posición. Cuando publicó su informe en *De Nova Stella*, le dio a la astronomía un nuevo término: Nova. Tycho estudió sus datos para buscar evidencia del paralaje que se esperaría si la Tierra se movía alrededor del Sol. El paralaje es el cambio aparente de posición de una estrella cercana contra el fondo de las estrellas más distantes, cuando se ve desde dos puntos de observación diferentes. Como no encontró ninguno, Tycho tomó sus observaciones como algo que refutaba el modelo heliocéntrico de Copérnico.

A pesar de su enfoque científico, Tycho todavía era de la opinión de que los eventos en los cielos presagiaban cam-



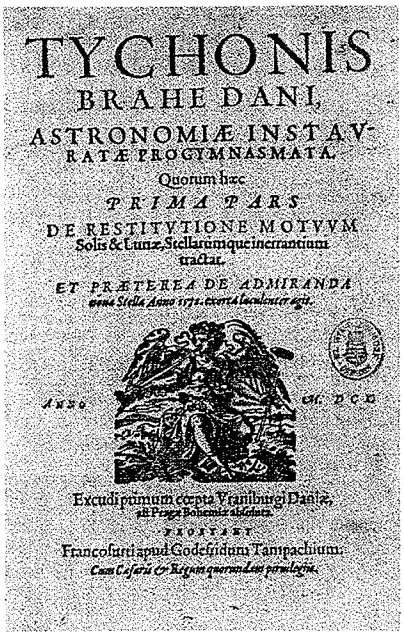
Se expande el Universo, se encoge la Tierra

Todos luchamos por situarnos en el centro de las cosas. Fue enorme el desasosiego que se produjo al descubrir que, después de todo, la Tierra no estaba en el centro del Sistema Solar. Sin embargo, los astrónomos supusieron que el Sistema Solar era importante en el universo. Astrónomos muy posteriores, los cuales habían reconocido que la Vía Láctea era una galaxia, supusieron que el Sol estaba cerca de su centro, y que la Vía Láctea estaba en el centro del Universo (de hecho, que *era* el Universo). El descubrimiento de que la Vía Láctea es sólo una galaxia que contiene miles de millones de estrellas, que el Universo contiene miles de millones de galaxias, que el Sistema Solar no está en el centro de la galaxia Vía Láctea, ni la Vía Láctea es el centro del Universo, fueron golpes adicionales al sentido de identidad de la humanidad. Sin duda somos seres insignificantes en un punto insignificante de un planeta en un Sistema Solar ordinario que es parte de una galaxia ordinaria (nada especial en absoluto).

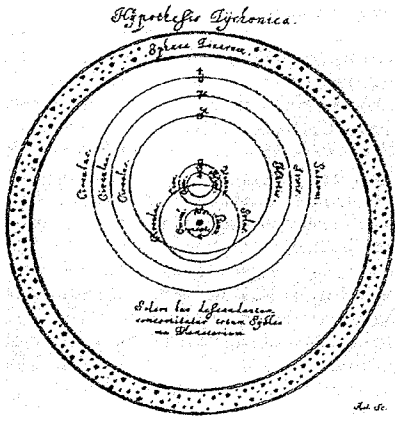
bios importantes en la Tierra, y pensaba que los fenómenos celestes eran responsables de las guerras religiosas que tenían lugar en ese tiempo.

Tampoco podía aceptar una Tierra que se moviera. Sostuvo que si la Tierra se estaba moviendo a través del espacio, una piedra que se tirara desde una torre caería a alguna distancia de la base de la torre porque la Tierra se habría movido, dejando atrás la piedra. Por supuesto, Gassendi refutó esto en 1640 (ver página 77).

Unos años después, en 1577, Tycho hizo otra observación que cambiaría la Tierra, esta vez de un cometa. Sus observaciones revelaron que el cometa no podía ser un fenómeno local, que viajaba muy cerca de la Tierra y tal vez más cerca que la Luna. De hecho, debe viajar entre los planetas. Esto significaba que se tenía que abandonar la idea de Ptolomeo de esferas de cristal que albergaban planetas y estrellas fijas, ya que el cometa se movería rompiéndolas. Era casi tan revolucionario a su


TYCHONIS
BRAHE DANI,
ASTRONOMIÆ INSTAV-
RATÆ PROGYMNASMATA.
Quorum hæc
PRIMA PARS
DE RESTITVTIONE MOTVVM
Solis & Lunæ, Stellarumque inerrantium
tractat.
ET PRÆTEREA DE ADMIRANDA
nouæ Stellæ Anno 1572. exortæ loculentia agit.
ANNO CIↃ. IↃ. LXXX.
Excudi primum cœpta Vraniburgi Daniæ,
PRAGÆ
Francofurti apud Godefridum Tampachium.

Tratado astronómico de Tycho Brahe que muestra un modelo del Sistema Solar.



manera, como el concepto de una nueva estrella.

Tycho publicó su libro en 1587-1588, proponiendo su modelo del Universo. Era un poco un híbrido, mantenía la Tierra estática de Ptolomeo en el centro del Universo, pero haciendo que los demás planetas giraran alrededor del Sol, el cual en sí giraba alrededor de la Tierra.

Acababa con la necesidad de "deferentes" y "epiciclos" que se habían necesitado para hacer que funcionara el modelo de Ptolomeo. Sin embargo, lo más importante es que rechazaba la idea de esferas de cristal y, por primera vez, tenía a los planetas colgando sin apoyo en el espacio.

Johannes Kepler (1571-1630)

Un poco más joven que Tycho, Johannes Kepler fue otro astrónomo prodigioso, pero que se vio obligado a seguir un enfoque diferente. El entusiasmo de Kepler por la astronomía se inició mientras era niño, cuando su madre lo llevó a un lugar elevado para ver el Gran Cometa de 1577 (el mismo que provocó el trabajo de Tycho sobre cometas). Sin embargo, Kepler no podía hacer observaciones astronómicas, ya que su vista era débil, porque la había dañado la viruela. En lugar de eso, aplicó las matemáticas al estudio de las estrellas. Kepler se educó como sacerdote, pero su curso en Tubingen, Alemania, incluyó matemáticas y astronomía, en los que sobresalió. Su tutor, Michael Maestlin, enseñaba el modelo de Ptolomeo en forma oficial, pero en privado presentó a estudiantes favorecidos, incluyendo a Kepler, la astronomía de Copérnico.

Kepler no era rico en forma independiente, y una de las maneras en que ganaba dinero extra era haciendo horóscopos. A diferencia de Tycho, quien tomaba en serio el vínculo entre eventos terrenales y celestes, Kepler consideraba a los horóscopos como puras tonterías y en privado se refería a sus clientes como "estúpidos". De cualquier forma, proporcionaban un ingreso útil y lo estimaban.

Kepler creó su propio modelo del Universo, publicado en 1597, el cual combinaba algo de Copérnico con algo de física griega arcana en una fusión extraña. Kepler sugirió que los seis planetas (incluyendo la Tierra) ocupaban órbitas que estaban determinadas por una serie de esferas que encajan dentro y entre los cinco sólidos geométricos definidos por la geo-

metría euclidiana. Aunque en sí no iba a ser significativo en particular, hizo una sugerencia más importante: Que los planetas eran impulsados por un "vigor" que emanaba del Sol, pero con mejor impacto conforme aumentaba la distancia del Sol. Fue la primera vez que se citó fuerza física como fuente del movimiento de los planetas, a menos que contemos con la idea de que los empujan ángeles.

Dos por uno en astrónomos en Praga

En 1597, Tycho se trasladó a Praga para convertirse en el Astrónomo Imperial oficial para el rey de Bohemia y para el emperador del sacro imperio romano, Rodolfo II. Fue ahí, en 1600, que Kepler se encontró con Tycho por primera vez. Mientras que Tycho había amasado una prodigiosa cantidad de datos, no tenía la destreza matemática para aprovecharlos al máximo. Kepler tenía la habilidad matemática, pero no los datos con los cuales trabajar. Parecía una pareja perfecta, pero su relación no fue fácil. Después de visitar a Tycho, Kepler volvió a su casa familiar en Graz, Austria, mientras se suponía que Tycho arreglaba financiamiento para el trabajo de Kepler con el emperador Rodolfo. Antes de que se completaran las negociaciones, Kepler y otros luteranos fueron desterrados de Graz por negarse a convertirse al catolicismo y terminó en la corte de Rodolfo como refugiado. Al final, Rodolfo proporcionó el apoyo financiero requerido para el puesto de Kepler, el cual tenía que ver con ayudar a Tycho a compilar nuevas observaciones de los movimientos planetarios. Estas observaciones formarían la base de las llamadas tablas rudolfinas. Tycho entregó a Kepler su valiosa información poco a poco, receloso de compartirla con demasiada rapidez, pero a finales de 1601 se enfermó y quedó claro que pronto moriría. En su lecho de muerte, legó sus valiosos datos, sus instrumentos y el proyecto rudolfino a Kepler. En apenas unas semanas, elevaron a Kepler a la posición de Matemático Imperial del emperador del Sacro Imperio Romano, y tenía a su cargo al equipo astronómico más sofisticado en Europa (en poco más de un año de que llegara a Praga como refugiado sin dinero).



Tycho Brahe

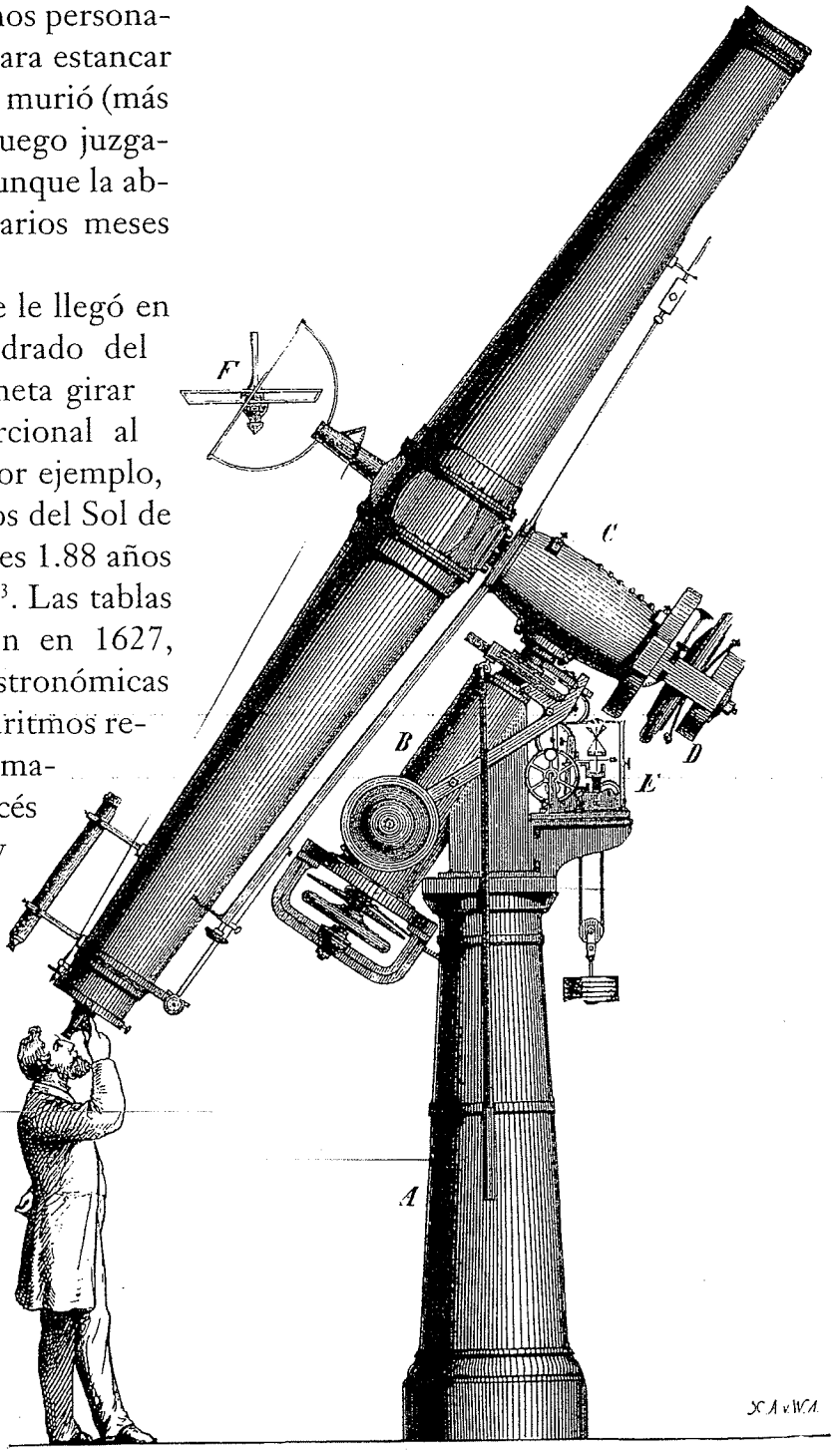
El puesto de matemático imperial implicaba ser astrólogo de Rodolfo, así que Kepler tenía que pasar bastante tiempo en actividades que sabía carecían de sentido y eran pura invención. A pesar de todo, el resto del tiempo Kepler podía trabajar en sus cálculos, lo que lo condujo a sus descubrimientos más importantes: Que cada planeta gira alrededor del Sol, siguiendo una trayectoria elíptica con el Sol en un foco de la elipse, y que los planetas se mueven con más rapidez cuando están más cerca del Sol. Los descubrimientos de Kepler no lo convirtieron en un éxito de la noche a la mañana y, de hecho, tuvo muy poco impacto. Muchas personas todavía no aceptaban que la Tierra no estaba en

el centro del Universo. Fue sólo cuando Isaac Newton tomó el trabajo de Kepler y explicó, empleando la gravedad, por qué los planetas tienen una órbita elíptica cuando en verdad fue claro el significado de su descubrimiento.

Agitación religiosa, trastornos personales y tragedias intervinieron para estancar el trabajo de Kepler. Su esposa murió (más adelante se volvió a casar) y luego juzgaron a su madre por brujería, aunque la absolvieron después de pasar varios meses en la cárcel.

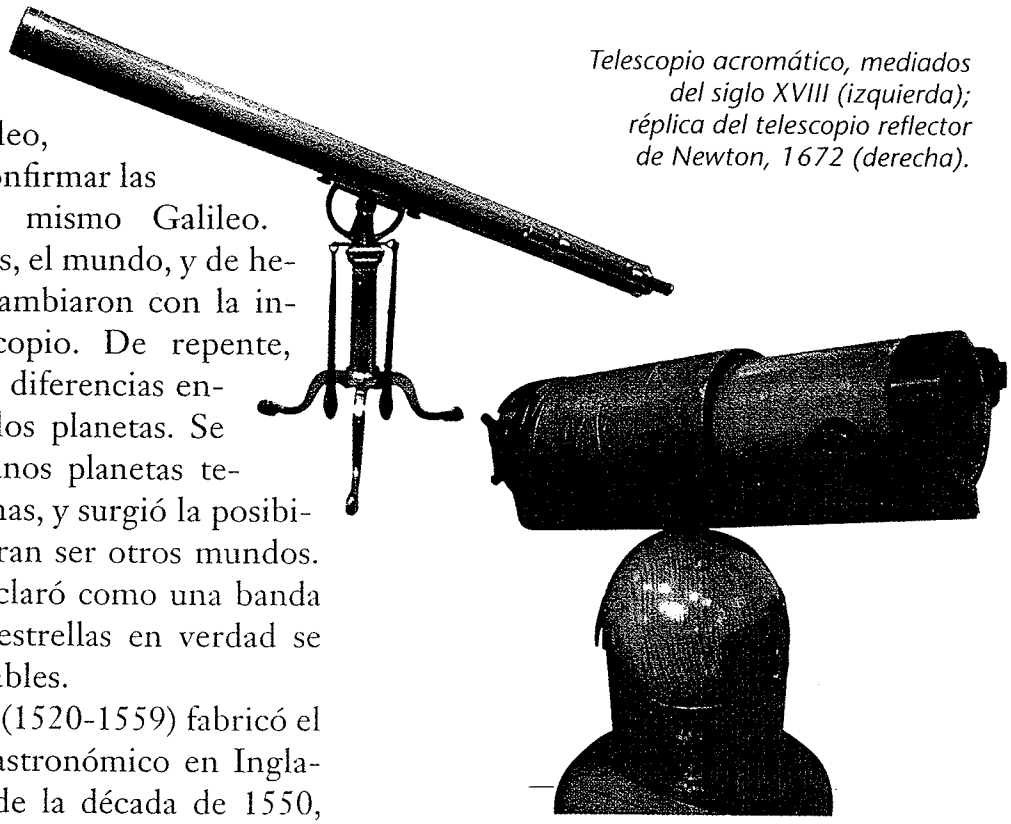
Su tercera y última ley, que le llegó en 1618, describe cómo el cuadrado del tiempo que le toma a un planeta girar alrededor del Sol es proporcional al cubo de su distancia al Sol. Por ejemplo, Marte está 1.52 veces más lejos del Sol de lo que está la Tierra, y su año es 1.88 años terrestres: $1.52^2 = 3.53 = 1.88^3$. Las tablas rudolfinas, publicadas por fin en 1627, fueron las primeras tablas astronómicas modernas; empleaban los logaritmos recién descubiertos que creó el matemático y astrónomo escocés John Napier (1550-1617), y se podían emplear para determinar las posiciones de los planetas en cualquier momento en el pasado o futuro.

Astrónomo del siglo XIX con telescopio óptico.



Lo invisible se hace visible

Mientras que Tycho trabajó sin telescopio, midiendo las posiciones de las estrellas y planetas empleando brújulas y cuadrantes, desde 1610



Telescopio acromático, mediados del siglo XVIII (izquierda); réplica del telescopio reflector de Newton, 1672 (derecha).

Kepler tuvo un telescopio que podía usar; uno que le envió Galileo, para que pudiera confirmar las observaciones del mismo Galileo. Para los astrónomos, el mundo, y de hecho el Universo, cambiaron con la invención del telescopio. De repente, quedaron claras las diferencias entre las estrellas y los planetas. Se descubrió que algunos planetas tenían sus propias lunas, y surgió la posibilidad de que pudieran ser otros mundos. La Vía Láctea se aclaró como una banda de estrellas, y las estrellas en verdad se volvieron innumerables.

Leonard Digges (1520-1559) fabricó el primer telescopio astronómico en Inglaterra a principios de la década de 1550, pero no llegó a la atención del público, hasta que su hijo Thomas (1546-1595) publicó su trabajo sobre él en 1571, 12 años después de la muerte de Leonard. Thomas sólo tenía 13 años de edad cuando su padre murió y pasó al cuidado y tutelaje de John Dee (1527-1609), el matemático, filósofo, alquimista y astrólogo de la corte de la reina Isabel I. Esto dio a Thomas acceso a la magnífica biblioteca de Dee, donde leyó el libro de Copérnico. En 1576, Thomas publicó su obra más importante, una edición revisada de *Pronóstico eterno*. No sólo añadió una explicación del modelo de Copérnico de un Universo centrado en el Sol, sino su propia teoría de que el Universo es infinito. Al rechazar la idea de las estrellas fijas en una esfera distante, Thomas Digges propuso una infinidad de espacio en la que las estrellas continuaban por siempre. No citó evidencia para esta teoría, pero parece probable que su uso del telescopio y el darse cuenta de que la Vía Láctea es una banda de estrellas lo llevaran a esta conclusión. Como Digges publicó en inglés en lugar de latín, sus ideas fueron accesibles para muchas más personas y se extendió la popularidad del modelo de Copérnico.

Sin embargo, más o menos al mismo tiempo, la iglesia católica empezó a darse cuenta de la idea potencialmente herética de un Universo centrado en el Sol. La fuente de su rencor parece haber sido que el modelo tenía el apoyo de Giordano Bruno, quemado en la hoguera por herejía en 1600. Bruno fue seguidor de un movimiento religioso llamado hermetismo, basado en antiguas creencias egipcias de que el Sol es un dios y se le debía venerar. Fue natural que se sintiera atraído a un mode-



Galileo en el espacio

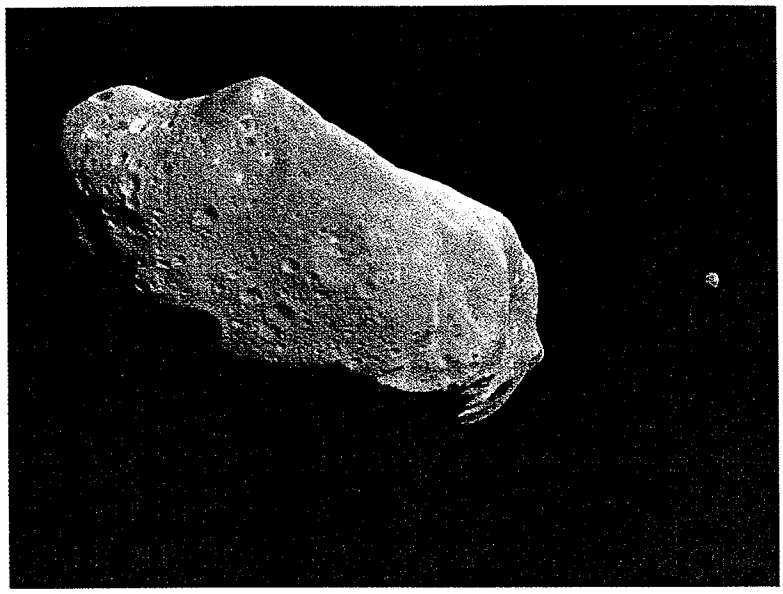
La NASA lanzó una nave espacial nombrada después Galileo en 1989, la cual entró en órbita alrededor de Júpiter en 1995. En ruta, la nave Galileo pasó a través del cinturón de asteroides donde descubrió una luna miniatura, llamada Dactyl, en órbita alrededor del asteroide Ida. En 1994, Galileo fotografió fragmentos del cometa Shoemaker-Levy 9 mientras se estrellaban en Júpiter. Una sonda liberada en la atmósfera de Júpiter registró vientos de alrededor de 720 km/h antes de que lo destruyera la atmósfera de Júpiter. Galileo realizó 11 órbitas, registrando datos sobre el planeta y sus lunas en su misión primaria. La misión de la nave se extendió y estudió la luna volcánica de Júpiter, Ío, y su luna helada, Ganimedes. Destruyeron a propósito a Galileo en 2003, quemándola en la atmósfera de Júpiter.

lo heliocéntrico del Universo. Su apoyo al modelo de Copérnico atrajo la atención de la iglesia, pero la creencia popular de que lo quemaron por apoyar el modelo de Copérnico carece de fundamentos. En realidad lo condenaron por creer que Cristo fue creado por Dios en lugar de ser Dios (arianismo) y por la práctica de la magia. Sin embargo, el apoyo de Bruno del modelo heliocéntrico aumentó la hostilidad de la iglesia contra el modelo y por extensión a la teoría del Universo infinito de Digges. A pesar de sus ideas religiosas más bien estrambóticas, Bruno tenía ideas muy adelantadas para su tiempo como astrónomo. Sugirió que las estrellas distantes podían ser tan sólo como nuestro Sol, tener mundos propios y ser incluso el hogar de seres tan gloriosos como la humanidad.

Galileo, amo del Universo

Sin duda, el mayor usuario antiguo del telescopio fue Galileo, quien dirigió su atención a la astronomía en 1604, estudiando la supernova que Kepler había observado. Determinó que no se movía y, por lo tanto, debía estar tan lejos como las otras estrellas. Galileo hizo sus propios telescopios que eran muy poderosos para ese tiempo (ver página 43). En 1610, tenía un instrumento con un poder de aumento de 30 con el que primero observó las cuatro lunas más brillantes de Júpiter (ahora llamadas las "lunas galileanas"). (Al parecer, la más grande de las lunas de Júpiter, en la actualidad llamada Ganimedes, fue vista por el astrónomo chino Gan De en 364 a.C. a simple vista). Al principio, Galileo pensó que eran "estrellas fijas" cercanas a Júpiter, pero la observación repetida mostró que se mueven. Cuando una desapareció, se dio cuenta de que se había ido detrás de Júpiter y, por lo tanto, giraba alrededor del planeta. Fueron los primeros cuerpos identificados que giraban alrededor de algo que no era el Sol o la Tierra, y el impacto en la cosmología contemporánea fue inmenso. No se encontraron más lunas de Júpiter hasta 1892, aunque ahora existen 63 lunas conocidas con órbitas más o menos estables alrededor del planeta, y todavía es posible que se descubran más lunas pequeñas.

También en 1610, Galileo observó las fases de Venus (similares a las fases de la Luna). Esto demostró en forma concluyente que el planeta debía girar alrededor del Sol y que las fases se debían a la forma en que diversas partes son iluminadas por el Sol durante las etapas de su órbita. Como



El asteroide Ida con su diminuta luna, Dactyl. Ida tiene 56 km de largo y Dactyl sólo 1.6 km de largo.

resultado, la mayoría de los astrónomos cambiaron su lealtad de los modelos ptolemaicos del Universo a los heliocéntricos durante el inicio del siglo XVII.

Sin embargo, esto no fue todo. Galileo también observó los anillos de Saturno, aunque no pudo determinar qué eran. Se dio cuenta que la Vía Láctea en realidad es una banda de un número enorme de estrellas, vio que la Luna tenía cráteres y montañas, observó manchas solares y distinguió entre planetas y estrellas. Afirmó que las estrellas son soles distantes e hizo cálculos de su distancia de la Tierra basándose en su brillo relativo. Aunque puso a las estrellas más cercanas a sólo varios cientos de veces la distancia de la Tierra al Sol, y a las visibles con un telescopio a varios miles de veces la distancia Tierra-Sol (por supuesto, quedándose corto de las distancias reales), estas cifras convirtieron en burla los argumentos contra el modelo de Copérnico de que las estrellas no podían estar muy distantes. También dejó en claro que las estrellas no están todas a una distancia fija, sino que se extienden por el espacio. En *Sidereus Nuncius (Mensajero de las estrellas)*, publicado en 1610, afirmó que los planetas se convierten en discos cuando se les ve a través del telescopio, mientras que las estrellas siguen siendo puntos de luz. Observó a Neptuno, pero no se dio cuenta de que era un planeta. Incluso identificó manchas solares, las cuales también había visto el astrónomo alemán Johann Fabricius (1587-1616) y el astrónomo inglés Thomas Harriot (1560-1621), y llegó a la conclusión de que el Sol gira en su propio eje una vez cada 25 días. Las manchas solares iban a ser más significativas de lo que ameritaban para la vida de Galileo.

Cruzar espadas con Dios

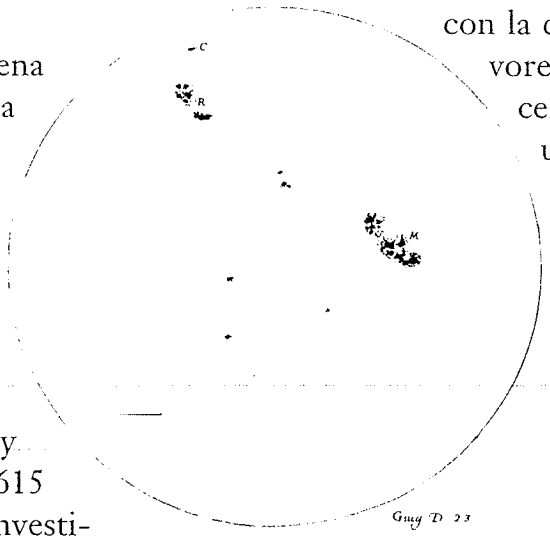
Las observaciones de Galileo proporcionaron amplia evidencia a favor del modelo de Copérnico de un Sistema Solar heliocéntrico y una Tierra en movimiento, pero Galileo evitó el apoyo público para este modelo, sin duda ansioso por el destino de Giordano Bruno. Al principio, la Iglesia estaba interesada e incluso entusiasmada con los descubrimientos de Galileo. Visitó al papa Pablo V en 1611, y un subcomité de sacerdotes jesuitas apoyó sus hallazgos de que la Vía Láctea es una vasta colección de estrellas, Saturno tiene una extraña forma ovalada con bultos a cada

lado (no se les identificó como anillos), la Luna tiene una superficie irregular, Júpiter tiene cuatro lunas y Venus tiene fases. El comité no comentó sobre las implicaciones de los descubrimientos. Mientras estaba en Roma visitando al papa, Galileo se hizo miembro de una de las primeras sociedades científica en el mundo, la Academia Linceana, y en un banquete en su honor el nombre "telescopio" se sugirió por primera vez para el nuevo instrumento astronómico.

Eppur si muove

A menudo se habla de que Galileo, después de renunciar a su creencia de que la Tierra se mueve alrededor del Sol, murmuró: *eppur si muove* ("sin embargo, se mueve"). La fuente más antigua de esto fue un siglo después de su muerte, y es improbable que hubiera dicho algo tan provocador al alcance del oído de la Inquisición.

Sin embargo, la buena relación de Galileo con la Iglesia no iba a durar. Produjo un folleto sobre las manchas solares en el que hizo su única declaración publicada a favor del modelo de Copérnico. Atrajo la atención de la Iglesia y cuando visitó Roma en 1615 el papado convocó una investigación de las creencias de Copérnico y llegó a la conclusión de que eran "tontas y absurdas y formalmente heréticas". Poco después, se le dijo a Galileo que no debía aceptar, defender o enseñar las creencias de Copérnico y que debía enfrentar la Inquisición si desobedecía. Al principio, hizo caso a la advertencia. En 1629, Galileo escribió sus *Dialogue of the Two Chief World Systems* (*Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo*), que presentaba los modelos de Copérnico y Ptolomeo en forma de un diálogo imaginario entre defensores de cada sistema. Lo publicó con el permiso de la Iglesia, con la condición de que no favorecería a Copérnico. El censor papal insistió en un prefacio y una declaración final que dijeran



El mapa de Galileo de las manchas solares observadas (peligrosamente) con su telescopio en 1612.



Papa Pablo V (1552-1621).

Éxito editorial de 1610

Galileo envió un ejemplar anticipado del *Mensajero de las estrellas* a la corte de Florencia el 13 de marzo de 1610. Para el 19 de marzo, la tirada completa de 550 ejemplares se había agotado. El libro se tradujo a muchos otros idiomas de inmediato, ¡y en menos de cinco años estaba disponible incluso en chino!

que el punto de vista de Copérnico se presentaba como hipótesis y diciendo que Galileo podía cambiar la redacción mientras lo esencial siguiera igual. Los cambios que Galileo hizo al prefacio, y el hecho de que el personaje en el libro llamado Simplicio que apoya el modelo de Ptolomeo sea con claridad un bobo, llevaron al papa Urbano VIII a creer que Galileo se estaba divirtiendo a sus costillas y promoviendo el modelo de Copérnico. Llamaron a Galileo a Roma para enfrentar juicio por herejía por "tener como cierta la falsa doctrina enseñada por algunos de que el Sol es el centro del mundo". Persuadieron a Galileo a declararse culpable para evitar la Inquisición y la posible tortura. Estuvo de acuerdo en que había ido demasiado lejos al presentar el caso a favor de Copérnico.

Su castigo fue cadena perpetua, que al final tomó la forma de arresto domiciliario en su propia casa desde 1634 hasta su muerte en 1642.

Durante los últimos años de su vida, Galileo escribió su mayor obra: *Discourses and Mathematical Demonstrations Concerning Two New Sciencies* (*Discursos y demostraciones matemáticas en torno a dos nuevas ciencias*).

El primer libro de texto científico moderno expuso el método científico y presentó explicaciones matemáticas o físicas para los fenómenos que antes se manejaban empleando sólo las herramientas de la filosofía. El libro se sacó de contrabando de Italia y se publicó en Leiden, Alemania, en 1638. Fue muy popular y prestigioso en todas partes excepto Italia.

Catalogar los cielos

La creación del telescopio permitió a los astrónomos hacer mapas mucho más exactos de las estrellas. Impulsados por la rivalidad con los franceses, que habían establecido un observatorio nacional bajo el

Desfasado

El *Diálogo y de Revolutionibus* de Copérnico continuaron en el Índice de Libros Prohibidos de la Iglesia católica, aún después de que se levantara en 1758 la prohibición general de los libros que enseñaban el heliocentrismo. Hasta una fecha tan posterior como 1820, el censor de la iglesia se negó a dar permiso a un libro que trataba el heliocentrismo como un hecho establecido. Una apelación contra la decisión hizo que la anularan y tanto el libro de Galileo como el de Copérnico se retiraron del Índice en la siguiente publicación, en 1835. La Iglesia católica al final pidió disculpas por la forma en que trató a Galileo, pero no hasta 2000. El papa Juan Pablo II citó el juicio de Galileo entre otros errores que se cometieron en los 2000 años previos que la Iglesia aceptó más bien tardíamente.

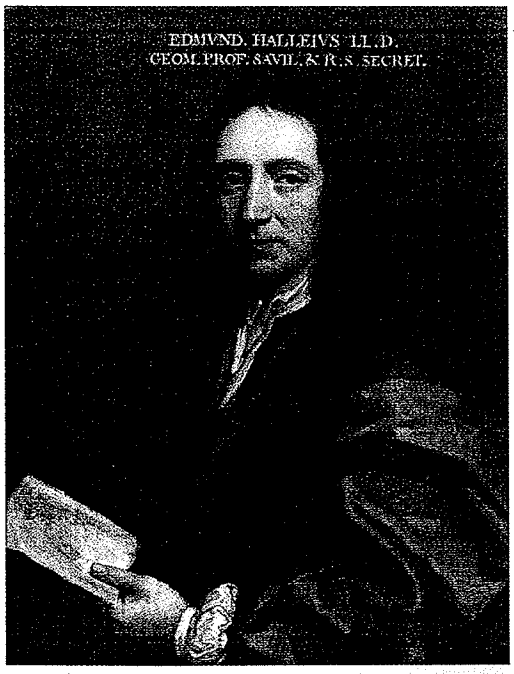
control de la Academia Francesa, la Real Sociedad de Londres presionó para que se fundara un observatorio en Inglaterra. El Real Observatorio se estableció en Greenwich en 1675, con John Flamsteed (1646-1719) como el primer Astrónomo Real (aunque entonces el título era "Observador Astronómico"). Flamsteed pronto estuvo en correspondencia con el joven Edmund Halley (1656-1742), entonces estudiante de Oxford y ya un astrónomo muy bueno llevó consigo un telescopio de más de siete metros de largo a la Universidad de Oxford. Halley escribió primero a Flamsteed, sugiriendo correcciones al catálogo de estrellas que entonces estaba en uso, y pronto se volvió en algo como un protégé de Flamsteed, quien entonces estaba ocupado en hacer un nuevo catálogo de estrellas del hemisferio norte. Halley propuso un estudio paralelo en el hemisferio sur y pronto obtuvo la aprobación real. El padre de Halley la financió, dando a su hijo una asignación que era tres veces el salario real de Flamsteed.

Ver más y más

Conforme el poder de los telescopios continuaba mejorando, los astrónomos podían revelar más y más sobre los misterios que intrigaron a los primeros científicos. Galileo había descubierto los "oídos" de Saturno, los cuales desaparecieron extrañamente unos años después. En 1655, Huygens empezó a trabajar con su hermano Constantijn en un diseño mejorado de telescopio que prevenía la aberración cromática (los bordes coloridos alrededor de las imágenes). Luego dirigió su telescopio de 50 aumentos a Saturno. En 1652 descubrió la luna más grande de Saturno, Titán, y cuatro años después vio que los

Halley como catalizador

Cuando Halley visitó a Newton en Cambridge en 1684, los dos hablaron de una idea que los astrónomos de alto nivel ya habían estado comentando por un tiempo: La relación de la ley del inverso del cuadrado con la atracción que mantiene a los planetas en órbita. Halley la había comentado con Robert Hooke y Christopher Wren en enero del mismo año. Halley le preguntó a Newton cómo pensaba que sería la órbita de un planeta si la fuerza entre él y el Sol era recíproca al cuadrado de la distancia del Sol. Newton contestó que ya la había calculado y que sería una elipse. Como resultado de esta conversación, Newton se decidió a publicar los *Principia*, por fin dando a conocer el libro que había ocultado por años. Se volvió el texto científico más importante que jamás se haya publicado.



"oídos" que Galileo había observado en Saturno en realidad eran un anillo: "El planeta está rodeado por un tenue anillo plano, que no toca ninguna parte y que está inclinado hacia la eclíptica". Sin embargo, no estaba claro de qué estaba formado el anillo. Al principio, los astrónomos supusieron que era sólido o líquido, pero en 1675 Giovanni Cassini descubrió un espacio en el sistema de anillos. Decidir la naturaleza del anillo se puso como tema del Premio Adam de Ensayo en la Universidad de Cambridge en 1855. Lo ganó James Clerk Maxwell, quien demostró que una colección de diminutas partículas sólidas en órbita es la única posibilidad, ya que todo lo demás sería inestable; sólo la distancia de la Tierra a Saturno hacía que el sistema pareciera una masa continua. Se demostró que Maxwell estaba en lo correcto en 1895, empleando técnicas espectroscópicas.

Lejos, muy lejos

Cassini es muy famoso por su trabajo sobre la distancia entre los planetas y el tamaño del Sol. Antes de esto, los únicos cálculos de la distancia del Sol a la Tierra fueron los que proporcionó Aristarco en

Retorno lento

El cometa de Newton, el Gran Cometa de 1680, fue el primero en observarse con un telescopio. Se ha determinado que volverá en alrededor de 11037. Newton empleó sus mediciones de la trayectoria del cometa para poner a prueba las leyes de Kepler.

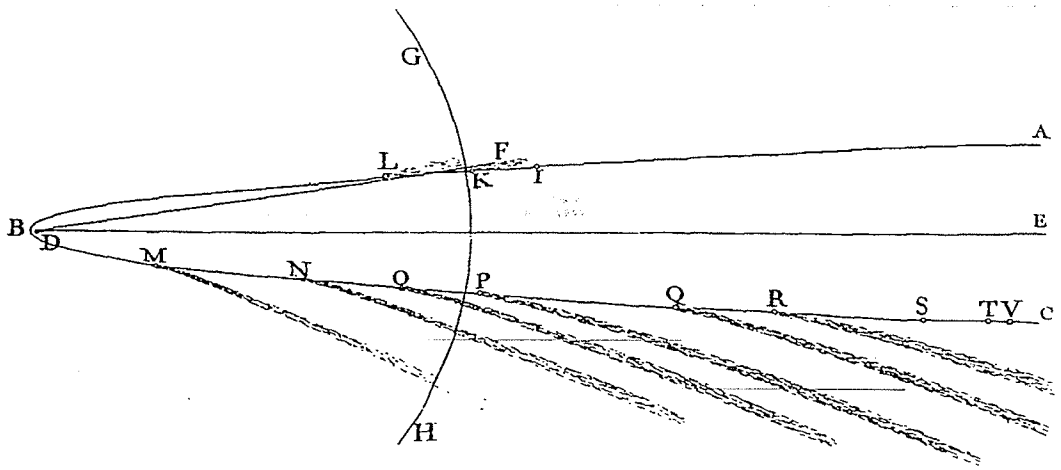
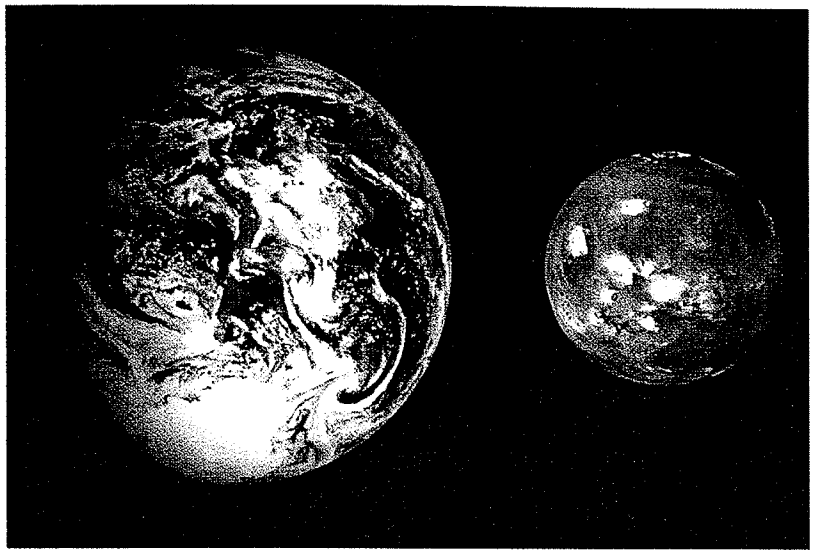


Diagrama de Newton de la órbita del cometa de 1680, mostrando su trayectoria parabólica.



La alineación del Sol, la Tierra y Marte dio a los astrónomos del siglo XVII la oportunidad de calcular el tamaño del Sol y su distancia de la Tierra.

280 a.C. El trabajo de Copérnico hizo posible calcular las relaciones de las distancias de cada planeta al Sol, pero no había una cifra con la cual calcular las distancias absolutas. Una oportunidad perfecta se presentó en 1671 cuando el Sol, la Tierra y Marte se alinearon y la distancia entre la Tierra y Marte estuvo a su mínimo. Como director del Observatorio de París, que se inauguró ese año, Cassini pudo enviar a un colega, Jean Richer, a Cayena en Sudamérica para hacer observaciones, mientras él hacía sus propias observaciones en París. Como el rey en ese tiempo era Luis XIV, el Rey Sol, el proyecto tuvo la aprobación real. Sabiendo que 10 000 kilómetros separaban a París de Cayena, Cassini empleó la trigonometría para calcular la distancia de Marte desde la Tierra, luego aplicó las leyes del movimiento planetario de Kepler para deducir que el Sol estaba a 138 millones de kilómetros de la Tierra. Esto es sólo 9 por ciento menos que la cifra que se acepta en la actualidad de casi 150 millones de kilómetros. Cálculos posteriores revelaron que el Sol tiene 110 veces el tamaño de la Tierra. Después de la publicación de *Principia* de Newton y su descripción de la gravedad, quedó claro que el Sol tiene alrededor de 330 000 veces la masa de la Tierra.

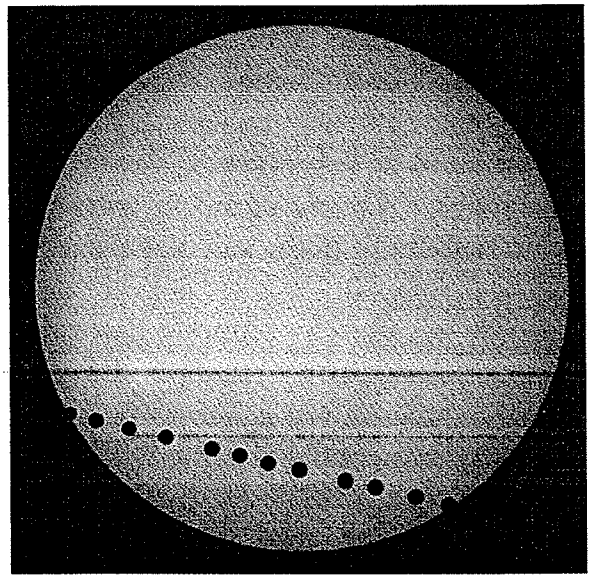
Poner a los cometas en su lugar

La amistad entre Halley y Newton dio frutos en forma de una explicación del movimiento de los cometas. Newton mostró en los *Principia* cómo la trayectoria de un cometa se podía calcular a partir de tres posiciones observadas durante un periodo de dos meses y compiló datos de 23 cometas. Sin embargo, asumió que los cometas seguían una trayectoria parabólica, viniendo de fuera del Sistema Solar, dando vuelta alrededor del Sol y dirigiéndose de nuevo al espacio exterior (trayectoria que ahora se consideraría de un cometa no periódico). Sin ganas de hacer los cálculos de los datos de su cometa, Newton entregó las cifras a Halley. Él también asumió que la trayectoria era parabólica hasta que se dio cuenta de que la trayectoria del cometa de 1607 (observado por Kepler) era muy similar a la del cometa de 1680 que él había visto. Después encontró que también concordaba con la trayectoria de un cometa visto en 1531 y llegó a la conclusión de que los tres eran el mismo objeto, que no seguía una trayectoria parabólica, sino una

Tránsito de Venus

Antes de Cassini, el astrónomo inglés Jeremiah Horrocks (1618-1641) sugirió que midiendo con exactitud la hora del tránsito de Venus (el paso del planeta a través de la cara del Sol), desde diferentes lugares en la Tierra, sería posible calcular la distancia Tierra-Sol. Horrocks había observado el tránsito de Venus en 1639, dos años antes de su muerte. El siguiente tendría lugar en 1761 y de nuevo en 1769. Halley popularizó la idea de emplear la triangulación para calcular la distancia Tierra-Sol, conocida como una unidad astronómica (UA), la cual se podría utilizar para calcular el tamaño del Sistema Solar como se conocía entonces. La triangulación es una forma de calcular la posición de algo, midiendo el ángulo que forma desde dos puntos fijos separados por una distancia conocida. El método se empleaba tradicionalmente para medir la altura de los edificios e incluso de montañas.

Halley murió 19 años antes de que tuviera lugar el siguiente tránsito y, por lo tanto, les quedó a otros poner su idea en práctica. Conforme se aproximaba la fecha, los astrónomos salieron a expediciones alrededor del mundo para registrar las horas. El tránsito demostró ser muy difícil de medir en forma exacta y confiable, pero al juntar las diferentes partes del globo, llegaron a una cifra de alrededor de 153 millones de kilómetros. Por lo tanto, para finales del siglo XVIII, los astrónomos tenían una idea realista del tamaño del Sistema Solar. Se habían puesto las bases para la era moderna de la astronomía, una era en la que se pondría énfasis en la mayoría de los cuerpos celestes distantes.



Durante un tránsito de Venus, el planeta parece como una pequeña mancha negra diminuta que pasa frente al Sol.

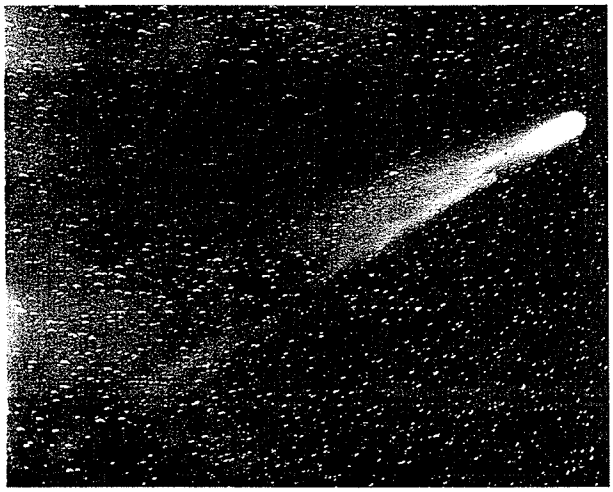
órbita elíptica muy amplia alrededor del Sol. Halley predijo la reaparición del mismo cometa en 1758, después de calcular un periodo de vuelta de 76 años. El cometa, que en la actualidad se conoce como cometa Halley, reapareció como estaba previsto el día de Navidad de 1758, 16 años después de la muerte de Halley.

El cometa Halley en la historia

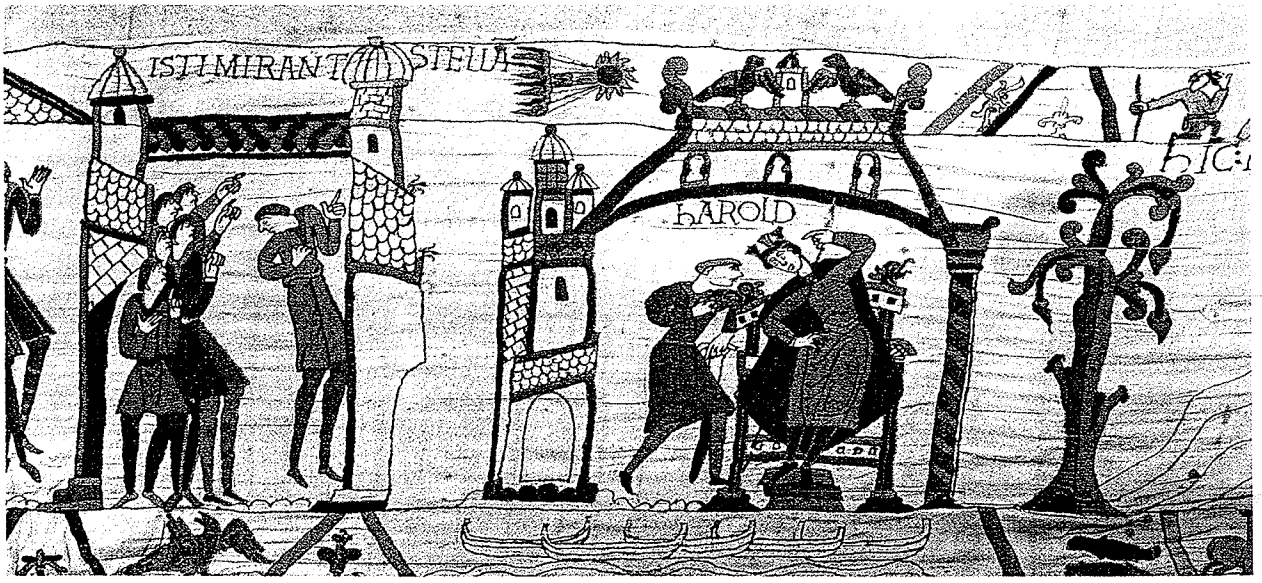
El cometa Halley se pudo documentar ya desde 467-466 a.C., tanto en la Antigua Grecia como en China. Un meteoro del tamaño de una "carga de carreta" que cayó mientras el cometa estaba en el cielo se mantuvo como curiosidad y atracción en

Grecia por 500 años. El primer registro cierto del cometa Halley es chino, de la aparición en 240 a.C. La siguiente observación, en 164 a.C., se registró en una tablilla de arcilla babilónica. Monedas que muestran al rey armenio Tigranes el Grande parecen mostrar al cometa Halley en su corona, registrando su aparición en 87 d.C. Tuvo su mayor aproximación en 837 d.C., a una distancia de sólo 0.03 AU, cuando su cola pudo haberse extendido hasta 60 grados a través del cielo. El cometa Halley se ilustra en el tapiz Bayeux, y tal vez en *La adoración de los magos* de Giotto, como la estrella de Belén (la cual es probable que no fuera, ya que apareció en 12 a.C.).

El cometa apareció en forma espectacular en 1910, con una aproximación más o menos cercana de 0.15 AU. Se le fotografió por primera vez y se estudió su cola mediante espectroscopía (método para analizar la composición química de un cuerpo gaseoso al estudiar el patrón característico de las líneas espectrales que produce, ver página 122). Su espectro reveló (entre otras cosas) que la cola contenía gas tóxico cianógeno. Esto impulsó al astrónomo Camille Flammarion (1842-1925) a decir que pasar por la cola "tal vez mataría a toda la vida (en la Tierra)". Como resulta-



El primer paso del cometa Halley en ser fotografiado, 1910.



El tapiz Bayeux muestra al cometa Halley apareciendo en 1066 cuando se le tomó como presagio.

El cometa da y el cometa quita

"Llegué con Cometa de Halley en 1835. Vuelve de nuevo el próximo año y espero irme con él. Será la más grande desilusión de mi vida si no me marcho con el Cometa Halley. Sin duda, el Todopoderoso ha dicho: 'Aquí están dos fenómenos inexplicables; vienen juntos, se deben ir juntos'".

Mark Twain, autobiografía, 1909

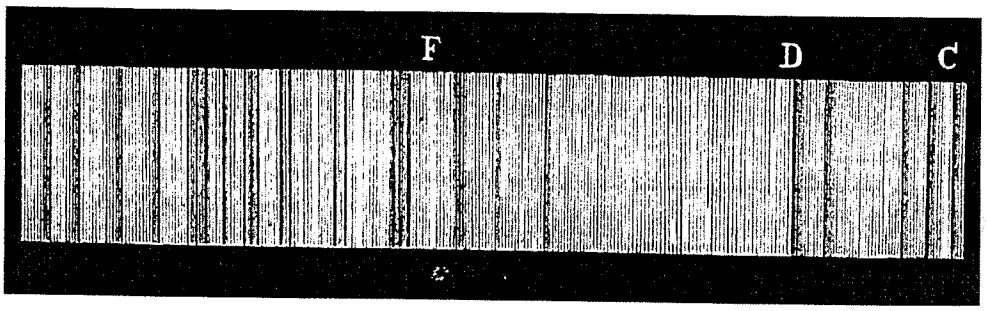
Twain nació el 30 de noviembre de 1835, exactamente dos semanas después de que el cometa Halley tuviera su mayor aproximación al Sol (perihelio). Murió el 21 de abril de 1910, el día que siguió al siguiente perihelio del cometa.

do, timaron al público para que gastara una fortuna en máscaras de gas, "píldoras anticometa" y "paraguas anticometa". No es necesario decir que la vida en la Tierra sobrevivió al encuentro.

La vuelta del cometa en 1994 provocó no sólo fotografía, desde la Tierra, sino una inspección de cerca en el espacio por parte de dos sondas, Giotto y Vega. Éstas descubrieron que el cometa tiene la forma parecida a un cacahuate, tiene 15 km de largo y 8 km de ancho, con una coma (o atmósfera) de 100 000 km de diámetro. La coma se forma cuando monóxido de carbono y bióxido de carbono sólidos en su superficie se convierten en gas (se subliman) con los rayos del Sol. Se piensa que el cometa Halley está compuesto por pequeños pedazos, llamados "pila de escombros", que se mantienen unidos sin mucha rigidez. Giran como cuerpo más o menos cada 52 horas. Las dos sondas hicieron el mapa de alrededor de una cuarta parte de la superficie del cometa, encontrando colinas, montañas, riscos, depresiones y un cráter.

Espectroscopía: Una nueva forma de ver

Al final del siglo XIX, surgió una forma totalmente nueva de observar las estrellas, al estudiar su espectro, empleando una técnica llamada espectroscopía. Mientras la luz pasa por un gas, algunas longitudes de onda se absorben, dejando un patrón característico de líneas espectrales. Cada gas crea su patrón espectral único. Por lo tanto, al analizar la luz de una estrella es posible deducir su composición química. El astrónomo estadunidense Henry Draper (1837-1882), pionero de la astrofotografía, fue el primero en fotografiar el espectro de una estrella, en 1872. Sus fotografías de Vega mostraron líneas espectrales claras. Tomó más de 100 fotografías del espectro de la estrella antes de su muerte en 1882. En 1885, Edward Pic-



Espectro de estrella variable de la constelación Corona Boreal, 1877.



Williamina Fleming

kering (1846-1919) levantó la batuta y empezó a supervisar el uso a gran escala de la espectroscopía fotográfica como director del Observatorio del Colegio de Harvard para producir un catálogo estelar detallado. La viuda de Draper estuvo de acuerdo en donar fondos para la empresa, y se inició la ambiciosa catalogación que a la larga produciría el Catálogo Henry Draper. La primera publicación fue el *Draper Catalogue of Stellar Spectra* (*Catálogo Draper de espectros estelares*) en 1890, la cual clasificaba 10 351 estrellas.



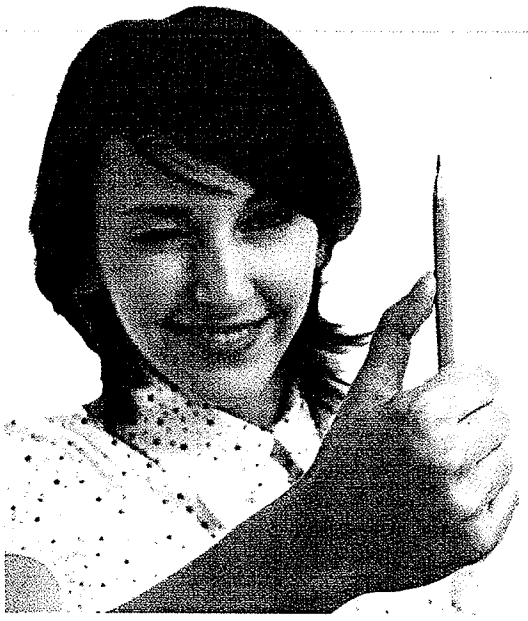
Annie Jump Cannon

Pickering se sintió frustrado por la competencia de sus asistentes de sexo masculino y declaró que su sirvienta podía hacer un mejor trabajo. Su sirvienta era una mujer escocesa, Williamina Fleming (1857-1911), la cual había emigrado con su marido, pero luego éste la abandonó mientras estaba embarazada. Había ido a trabajar para Pickering con el fin de sostenerse ella y su hijo. Fleming se encargó de la tarea de catalogar y clasificar las estrellas; elaboró un sistema en el que les asignaba una letra de acuerdo a cuánto hidrógeno hay en su espectro (con A para la mayoría). En nueve años, Fleming catalogó más de 10 000 estrellas. Ella descubrió 59 nebulosas gaseosas, más de 310 estrellas variables, 10 novas y la nebulosa Cabeza de Caballo. Pickering la puso a cargo de un equipo numeroso de mujeres a las que llamó "computadoras", a quienes empleó para llevar a cabo los cálculos necesarios que implicaban clasificar y catalogar las estrellas (a las mujeres se les pagaba sólo 25-50 centavos por hora, menos de lo que recibían las secretarias en ese tiempo). Fleming y varias mujeres más del equipo, entre ellas Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) y la sobrina de Henry Draper, Antonia Maury (1866-1952), se convirtieron en respetadas astrónomas por derecho propio.

Paralaje

El paralaje es un método para calcular la distancia a un objeto mediante la observación el objeto desde dos posiciones diferentes. En el caso de una estrella, el cielo se fotografía dos veces, con seis meses de separación. Al medir lo lejos que la estrella parece haberse movido en relación con las estrellas del fondo, los astrónomos pueden emplear la triangulación para determinar la distancia de la Tierra a la estrella.

Puedes ver cómo el principio del paralaje funciona sosteniendo un lápiz frente a la cara y mirándolo primero sólo con el ojo izquierdo y luego sólo con el ojo derecho. El lápiz parece moverse en relación con el fondo, ya que cada ojo lo ve desde una posición un poco diferente.

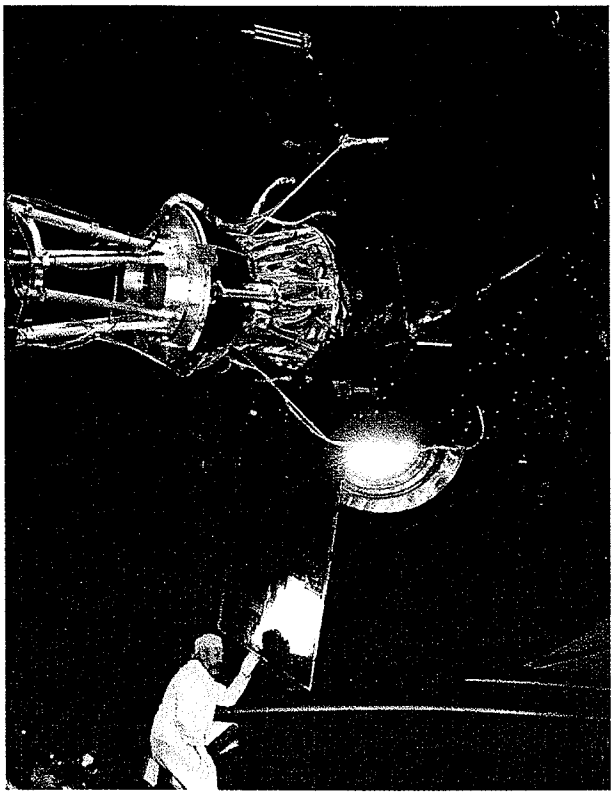


Otra de las "mujeres de Pickering" fue Annie Jump Cannon (1863-1941), quien mejoró el sistema de Fleming e introdujo la clasificación de las estrellas basada en la temperatura. A diferencia de Fleming, Cannon tenía un título en física y ya estaba estudiando astronomía cuando comenzó a trabajar para Pickering. Era sorda casi por completo después de un ataque de escarlatina, sin embargo fue ella quien negoció cuando Maury y Fleming discutieron sobre métodos de clasificación. El nuevo método de Cannon clasificaba a las estrellas como O, B, A, F, G, K, M, sistema conocido como el esquema de clasificación espectral Harvard que todavía se emplea en la actualidad. Un refinamiento del esquema, llamado el sistema Morgan-Keenan, complementa cada letra con los números 0-9 para afinarlo, y añade los números romanos I a V para indicar luminosidad, pero el sistema de Cannon continúa en el fondo. Cannon más tarde asumió el proyecto de catalogación.

Con todos sus complementos, el catálogo Draper ha registrado y clasificado 359 083 estrellas. Cannon en persona clasificó 230 000 estrellas, más que todos los astrónomos previos juntos. Fue la primera mujer a la que se le otorgara un doctorado honorario de la Universidad de Oxford y la primera mujer en ser elegida directiva de la Sociedad Astronómica Estadunidense.

Examen del vacío

El método de triangulación que Cassini empleó en el siglo XVII para calcular la distancia a Marte se podría emplear, con destreza, para calcular la distancia a las es-



El satélite Hiparco, empleado para medir los paralajes de más de 100 000 estrellas.

trellas cercanas. Significa emplear las posiciones de la Tierra con seis meses de separación, es decir, a ambos lados del Sol, para proporcionar la línea base para la triangulación. Como la distancia Tierra-Sol es de una AU, esta línea de base será de dos AU de ancho, una distancia lo bastante grande para las mediciones exactas que se requieren. Durante este tiempo se verá que una estrella cercana ha cambiado de posición al compararla con las estrellas del fondo más lejanas (método conocido como paralaje. Ver cuadro, página opuesta).

Huygens antes había tratado de calcular la distancia de Sirio a la Tierra al comparar su brillantez con la del Sol. Decidió que, si se supone que Sirio es tan brillante como el Sol, estaría 27 664 veces más lejos. Era una tarea difícil, ya que tenía que comparar sus observaciones del Sol realizadas en el día con sus observaciones de Sirio visto en la noche.

Aunque el principio de medir el movimiento aparente de una estrella a través del cielo para calcular su distancia es sensato, la técnica era difícil y requería equipo que tan sólo no estaba disponible para los primeros astrónomos. La primera distancia estelar exacta descubierta por paralaje la calculó el científico alemán Friedrich Bessel (1784-1846) el cual, en 1838, determinó una distancia de 10.3 años luz para 61 Cygni. De hecho, un escocés, Thomas Henderson (1798-1844), ya había medido la distancia a Alfa Centauro en 1832, pero no publicó sus resultados hasta 1839. Al conocer la distancia a una estrella, se hace más o menos sencillo invertir las ecuaciones de Huygens para calcular su brillo.

Sin embargo, las herramientas disponibles todavía no estaban en verdad a la altura de dicha tarea. Las mediciones se tenían que hacer con la vista y la fotografía todavía se tenía que inventar. Para 1900, sólo se habían medido 60 paralajes. Con la llegada de la fotografía, el proceso se pudo acelerar en forma drástica y los siguientes 50 años produjeron 10 000 paralajes más. Entre 1989 y 1993, el satélite Hiparco, de la Agencia Europea del Espacio, midió los paralajes de 118 000 estrellas y el catálogo Tycho-2 de la misma misión proporciona datos de más de dos y medio millones de estrellas en la Vía Láctea.

Telescopios en el espacio

El Telescopio Espacial Hubble, lanzado con el trasbordador espacial en 1990 y nombrado en honor al famoso astrónomo, es un telescopio óptico en órbita alrededor de la Tierra. Como está en el espacio, produce imágenes de extrema claridad, casi sin interferencia de la luz de fondo, ni distorsión por la atmósfera de la Tierra. Los telescopios espaciales se propusieron por primera vez en 1923, mucho antes de que fuera posible construir uno.

La imagen de Hubble de dos galaxias que se están acercando por la mutua atracción gravitacional.



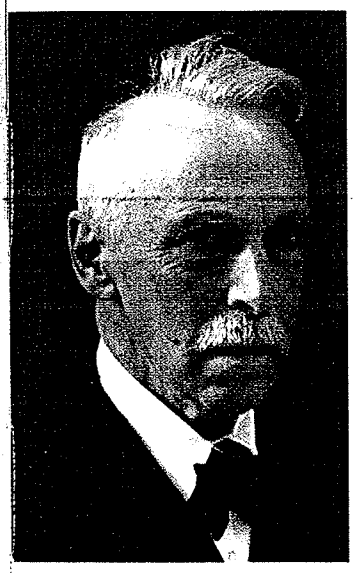
Para las estrellas muy distantes, el paralaje es de poco uso. Henrietta Swan Leavitt, miembro del equipo de "computadoras" femeninas de Henry Pickering, elaboró otro método, que emplea datos de las estrellas llamadas cefeidas. Las cefeidas varían en intensidad, pulsando a intervalos que van de un día a cientos de días. Una vez que se había calculado la distancia a la cefeida, la ecuación de Leavitt que relacionaba periodo-luminosidad con distancia, significaba que se podía deducir la distancia a otras cefeidas. De repente, las distancias en la Vía Láctea, e incluso fuera de ella, se volvieron claras, y se descubrió que el Universo era mucho más grande de lo que se había pensado.

En 1918, el astrónomo estadunidense Harlow Shapley (1885-1972) empleó el método de cefeidas para estudiar cúmulos globulares, que pensaba que estaban dentro de la Vía Láctea. Se dio cuenta de que la Vía Láctea era mucho más grande de lo que se había pensado antes y que el Sistema Solar no estaba ni siquiera cerca del centro, como se había supuesto. En el invierno de 1923-1924, el astrónomo Edwin Hubble (1989-1953) encontró cefeidas fuera de la Vía Láctea, en la galaxia de Andrómeda, y pudo calcular la distancia a la

galaxia en alrededor de un millón de años luz (esta cifra era baja, en realidad es de alrededor de dos y medio millones de años luz).

Bandas de estrellas

El ingeniero químico danés Ejnar Hertzsprung (1873-1967) estaba estudiando astronomía y fotografía en su tiempo libre cuando descubrió una relación entre el color de una estrella y su brillo. Aunque Hertzsprung al final se convirtió en un renombrado astrónomo profesional, todavía era un aficionado cuando publicó sus resultados en 1905 y en 1907 en una publicación fotográfica de poca importancia. Su descubrimiento pasó sin que lo notaran los astrónomos profesionales. El astrónomo estadunidense Henry Norris Russell (1877-1957) también notó la relación entre el brillo y el color de las estrellas, pero publicó su descubrimiento en una publicación astronómica más conocida en 1913. Además, Russell trazó sus resultados como gráfica. La contribución de Hertzsprung se reconoció pronto y la gráfica se conoce en la actualidad como diagrama Hertzsprung-Russell.



Ejnar Hertzsprung

El color de una estrella, o con más precisión la longitud de onda de la luz que

Diagrama de Hertzprung-Russell

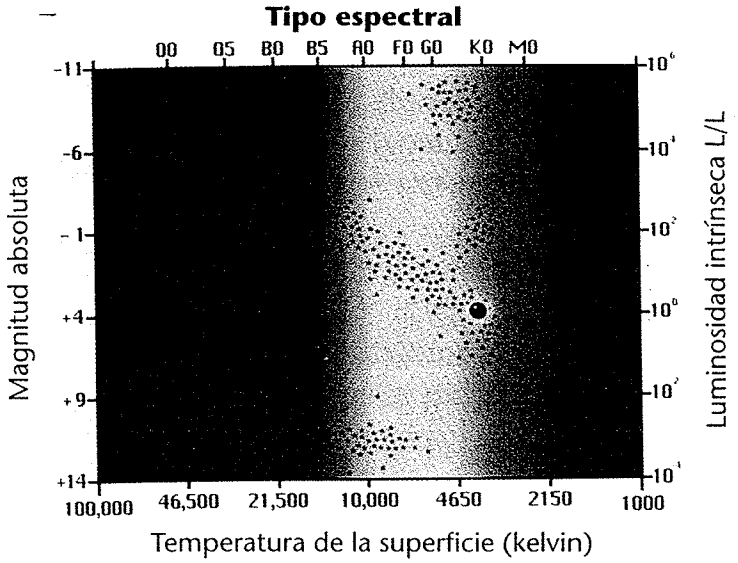
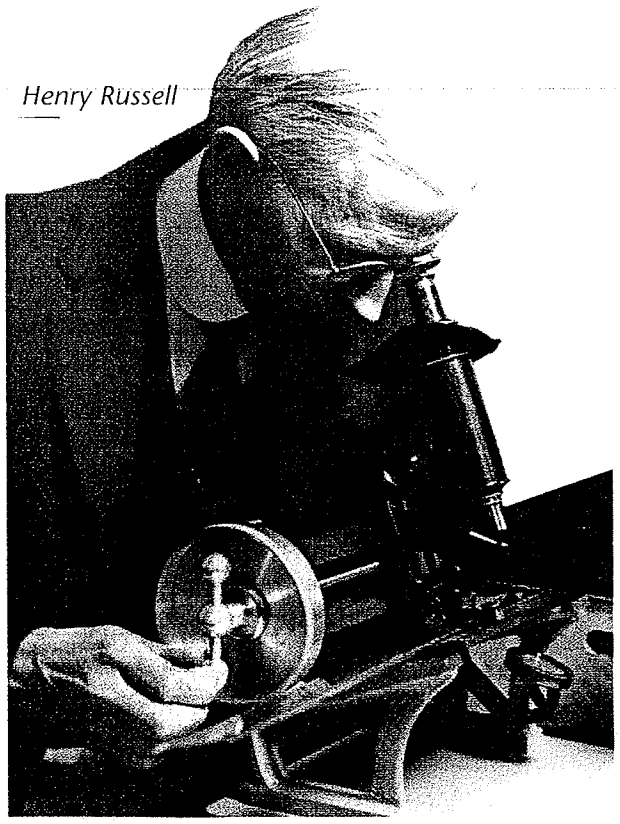


Diagrama de Hertzprung-Russell que muestra el brillo (eje y) y temperatura (eje x) de las estrellas; el color cambia con la temperatura.

Henry Russell





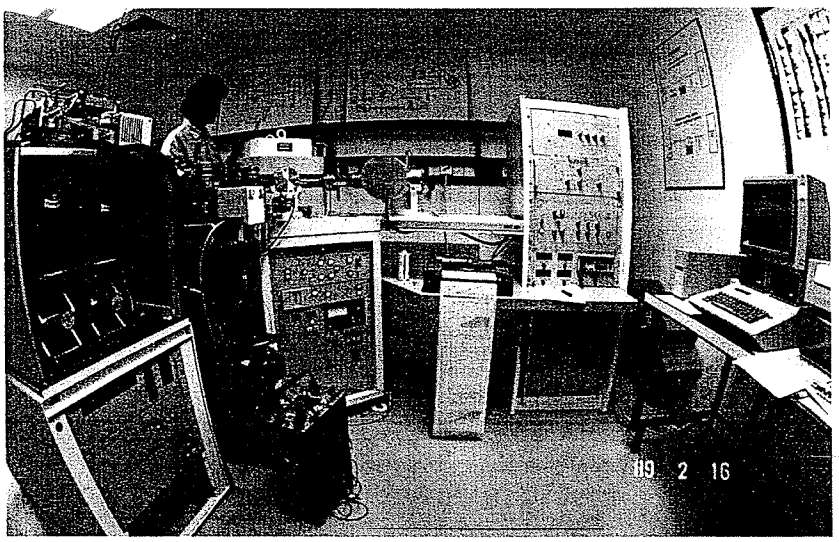
Arthur Eddington

emite, es una indicación de su temperatura. Sin embargo, el brillo general de una estrella depende también de su tamaño. Al igual que un calentador de habitación puede emitir más calor que un cerillo encendido (mucho más caliente), el tamaño de una estrella es igual de importante que su temperatura. Así, una estrella gigante roja puede emitir mucha más energía que una pequeña estrella azul, a pesar de que la temperatura de la superficie de la estrella azul sea más alta. La información del diagrama Hertzsprung-Russell dio a los astrónomos el primer atisbo de lo que podría estar sucediendo dentro de las estrellas.

La vida secreta de las estrellas

Arthur Eddington, el astrónomo británico que dirigió la expedición para observar el eclipse solar en 1917 que confirmó la teoría de la relatividad de Einstein, dio el primer vistazo a lo que podría estar sucediendo en el interior de una estrella. Al combinar la información del diagrama de Hertzsprung-Russell y la masa conocida de algunas estrellas, encontró que las estrellas más grandes son las más brillantes. Esto tiene sentido. Con el fin de impedir que la gravedad jale a la estrella hacia sí misma, debe producir y emitir mucha energía. Entre mayor sea la masa, mayor el jalón de la gravedad y más energía necesita para resistirse. Pronto descubrió que sin importar el tamaño y la temperatura superficial, la temperatura interna de todas las estrellas de la secuencia principal es más o menos la misma. También se dio cuenta de que el combustible que proporciona la energía para una estrella debe ser nuclear (no hay otra forma de que una estrella pueda tener un suministro de combustible lo bastante grande para continuar ardiendo por miles de millones de años).

La primera sugerencia fue que la energía del Sol surgía de isótopos radiactivos como radio, pero la



Espectrómetro de masas, empleado para medir isótopos estables de carbono y oxígeno.

"Una estrella está recurriendo a alguna vasta reserva de energía por medios desconocidos para nosotros. Esta reserva difícilmente puede ser otra que la energía subatómica la cual, como se sabe, existe en forma abundante en toda la materia; a veces soñamos que el hombre un día aprenderá a liberarla y a usarla para su servicio. La provisión es prácticamente inagotable, si sólo se puede explotar. Hay suficiente en el Sol para mantener su producción de calor por 1.5 miles de millones de años".

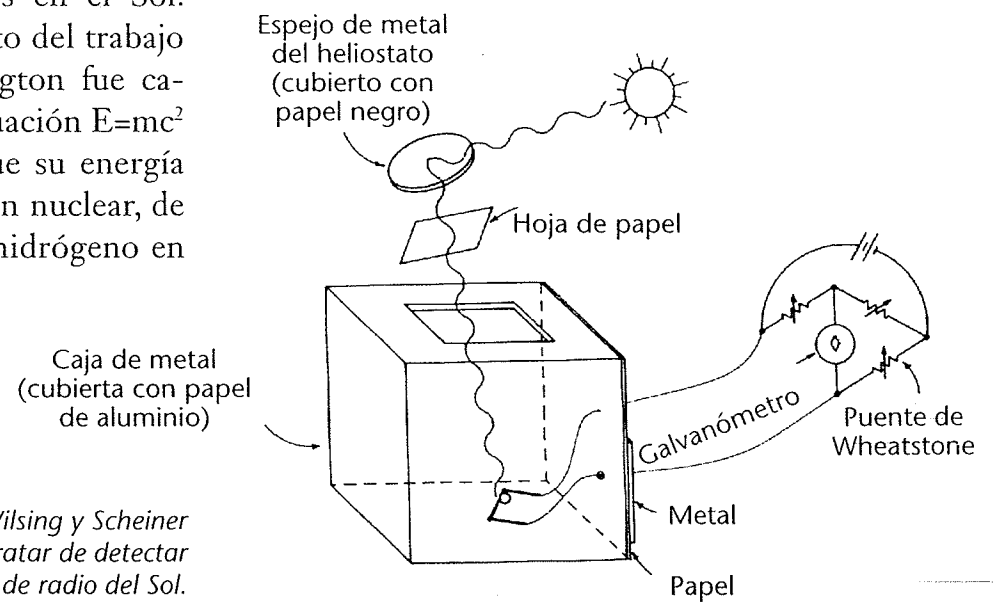
Arthur Eddington, 1920

vida media del radio es demasiado corta. El avance importante surgió del trabajo realizado por el Centro de Investigación Atómica de Cavendish, en Cambridge, Inglaterra. En 1920 el químico y físico británico Francis Aston (1877-1945) empleó un espectrómetro de masas para medir la masa del hidrógeno y del helio. El núcleo de hidrógeno tiene un protón, mientras que el núcleo de helio tiene dos protones y dos neutrones. Aston descubrió que cuatro núcleos de hidrógeno tienen una masa un poco mayor que un núcleo de helio. Eddington sabía que el hidrógeno y el helio eran por mucho los elementos más abundantes en el Sol. Con el conocimiento del trabajo de Einstein, Eddington fue capaz de aplicar la ecuación $E=mc^2$ al Sol y deducir que su energía procedía de la fusión nuclear, de que se fundiera el hidrógeno en helio en el centro del Sol. La ligera diferencia en masa que Aston había notado se convertiría en energía.

Igual que la fisión nuclear transforma elementos más pesados en elementos más ligeros mediante la desintegración del núcleo, la fusión nuclear transforma elementos más ligeros en elementos más pesados por la combinación de núcleos. El enorme volumen de gas involucrado significaba que había suficiente energía liberándose para dar energía al Sol por miles de millones de años. Más adelante se dieron cuenta de que todos los elementos aparte de hidrógeno, helio y algo de litio se formaban por fusión dentro de las estrellas o supernovas.

Escuchar el vacío

Aunque ya manejamos distancias y números de estrellas inimaginables para los pri-

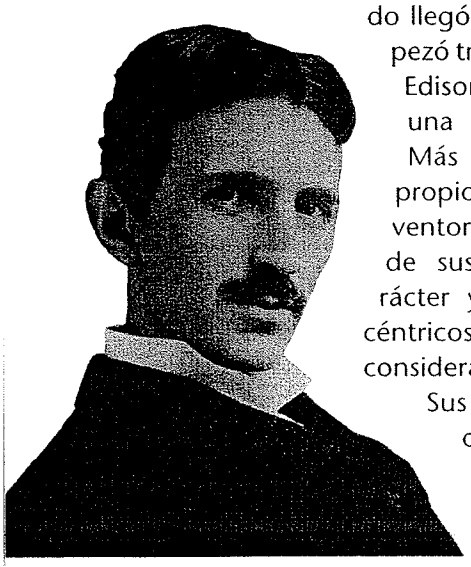


Equipo de Wilsing y Scheiner para tratar de detectar ondas de radio del Sol.

Nikola Tesla (1856-1943)

Nikola Tesla nació en el Imperio austrohúngaro, en un área que ahora es parte de Croacia. Dejó la universidad dos veces y cortó todos los vínculos con su familia y amigos (sus amigos creían que se había ahogado en el río Mura). En 1884 se trasladó a Estados Unidos.

Tesla trabajó en comunicación inalámbrica, rayos X, electricidad y energía. Cuando llegó a Estados Unidos empezó trabajando para Thomas Edison, pero renunció por una disputa sobre la paga. Más adelante estableció su propio laboratorio. Era un inventor prolífico, pero algunas de sus invenciones, su carácter y su actitud eran excéntricos y siempre se le ha considerado un inconformista. Sus afirmaciones de haber detectado trasmisiones de radio de extraterrestres en Venus no ayudaron.



En 1904, la Oficina de Patentes de Estados Unidos le quitó la patente a Tesla por la radio y se la dio en su lugar a Marconi; a Marconi le otorgaron el Premio Nobel por la invención de la radio en 1909. Después de peleas con Marconi y con Eddington, y de la demolición de su estación inalámbrica Telefunken, en Long Island, realizada por la marina, por si estuviera empleándola para espiar durante la Primera Guerra Mundial, la suerte de Tesla empeoró. Se obsesionó cada vez más con el número tres y con las palomas.

El último clavo en el féretro de su reputación fue su campaña para su llamado "rayo de la muerte" que, afirmaba, "envía rayos concentrados de partículas por el aire libre, de energía tan tremenda que harán caer a una flota de 10 000 aviones enemigos a una distancia de 320 kilómetros y causará que los ejércitos caigan muertos ahí mismo". Tesla vivió los últimos diez años de su vida en el hotel New Yorker. Cuando murió, el gobierno de Estados Unidos incautó dos camiones llenos con sus papeles como riesgo de seguridad.

meros observadores de estrellas, todavía hay más que no podemos ver con telescopios ópticos, incluso con los anclados en el espacio. Pero al usar las partes no visibles del espectro electromagnético, como las ondas de radio, ha sido posible investigar aún con mayor profundidad en el cosmos.

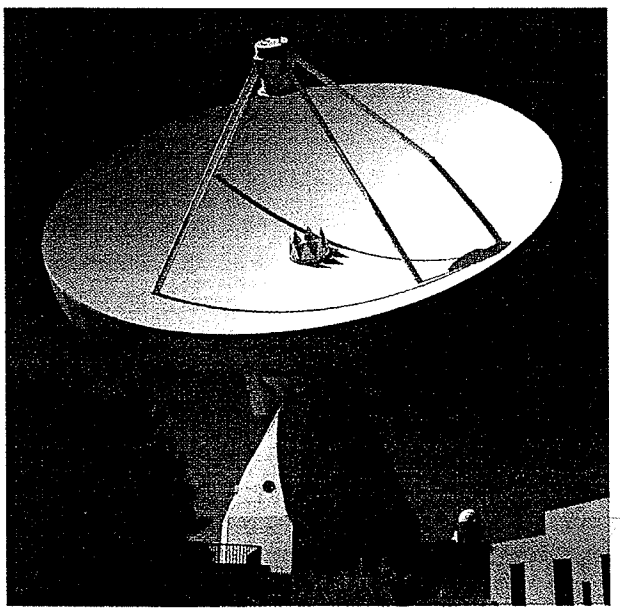
Tal vez los orígenes de la radioastronomía se encuentren en el inventor y empresario Thomas Edison (1847-1931), quien sugirió en una carta escrita en 1890 que él y un colega podrían construir un receptor para captar ondas de radio del Sol. Si hubiera construido alguna vez un dispositivo así, por desgracia no hubiera detectado ondas de radio del espacio. El físico británico sir Oliver Lodge (1851-1940) en realidad construyó un detector, pero no pudo encontrar evidencia alguna de ondas de radio del Sol en 1897-1900. Los primeros científicos en examinar el tema a profundidad fueron los astrónomos Johannes Wilsing (1856-1943) y Julius Scheiner (1858-1913), que trabajaban en Alemania. Llegaron a la conclusión de que la radioastronomía falla porque el vapor de



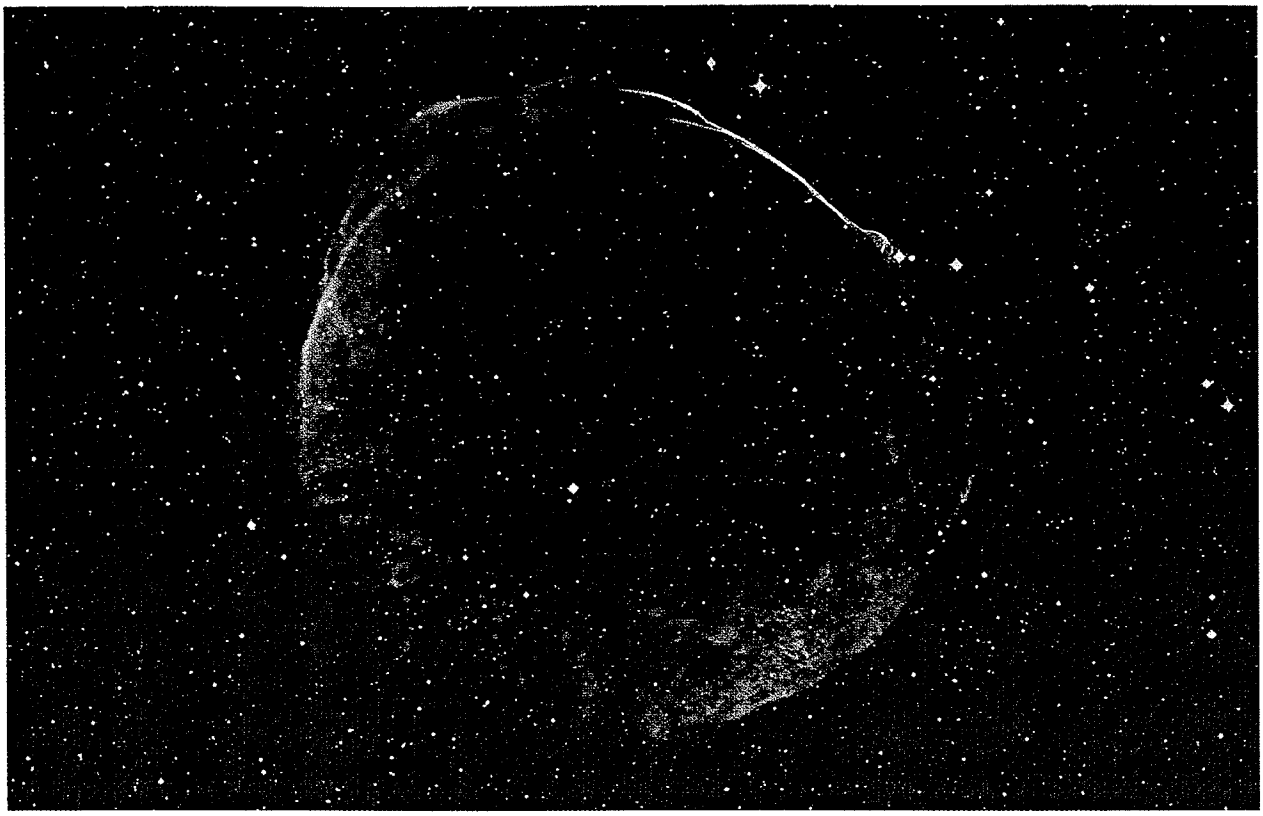
Foto del telescopio Hubble de Sagitario, fuente de la señal de radio detectada por Jansky.

agua en la atmósfera absorbe las ondas de radio.

Un estudiante graduado francés, Charles Nordman, razonó que si la atmósfera estaba bloqueando las ondas de radio del espacio, lo mejor era que pusiera su antena en algún lugar alto para tratar de ponerse encima de ella. La llevó a lo alto del Mont Blanc. También Nordman no pudo captar ondas de radio del Sol, pero en su caso fue por mala suerte. Su equipo hubiera funcionado en un momento de máximo solar, cuando las ondas de radio se emiten a niveles pico. Por desgracia, 1900 fue un periodo de mínimo solar y, por lo tanto, no detectó nada. Pero la obra de Max Planck sobre radiación de cuerpo negro y de cuantos de luz reveló otro problema. Prediciendo con las ecuaciones de Planck la cantidad de radiación recibida del Sol que debería caer en la parte de ondas de radio del espectro (longitud de onda de 10-100 cm), quedó claro que la radiación debía ser muy débil (demasiado débil para que se detectara con el equipo disponible en ese tiempo). Un golpe más llegó en 1902, cuando los ingenieros eléctricos Oliver Heaviside (1850-1935) y Edwin Kennelly (1861-1939) predijeron la existencia de la ionósfera, una capa de partículas ionizadas en la atmósfera superior que podría reflejar las



Antena de radiotelescopio en el centro de astronomía de Yebes, España.



Los restos de la supernova SN 1006, producidos por la explosión de una enorme estrella hace unos 7000 años.

ondas de radio (sin embargo, esta capa ha tenido usos importantes como ayuda para la comunicación de radio. Al hacer rebotar las ondas de radio en la ionósfera es posible trasmitir señales a largas distancias). Estas conclusiones decepcionantes parecen haber desalentado el entusiasmo por la búsqueda, y no se produjeron más intentos de detectar señales de radio del espacio por 30 años.

El avance sensacional tuvo lugar en 1932, cuando el ingeniero de radio estadunidense Karl Jansky (1905-1950) estaba empleado en la compañía telefónica Bell, en Nueva Jersey, Estados Unidos, para investigar interferencias de estática de radio en su servicio telefónico transatlántico. Empleando una antena direccional grande, Jansky encontró una señal de origen desconocido que se repetía cada 24 horas. Sospechó que procedía del Sol, pero se dio cuenta de que la repetición era en realidad cada 23 horas y 56 minutos (menos de la duración de un día). Un amigo astrofísico, Albert Skellett, dijo que parecía proceder de las estrellas. Empleando mapas astronómicos, identificaron la Vía Láctea como la fuente y, más en particular, el centro de la galaxia, alrededor de la constelación de Sagitario, ya que el máximo de esta señal coincidía con la aparición de esta constelación. Jansky sospechaba que la señal procedía de polvo o gas interestelar en el centro de la galaxia. Deseaba continuar su trabajo en ondas de radio de la Vía Láctea,

Pequeños hombres verdes

El primer nombre que se dio a los pulsares fue Pequeños Hombres Verdes por una sugerencia de que los pulsos representaban radiotransmisiones intencionales de una forma de vida extraterrestre. Causó tal alarma que las autoridades universitarias consideraron mantener en secreto el descubrimiento. Entonces Jocelyn Bell descubrió otro pulsar, demostrando que era un fenómeno natural.

pero sus patrones lo pasaron a otro proyecto y tuvo que abandonar su investigación. Su único gran descubrimiento marcó el inicio y el final de su carrera en astronomía. El trabajo de Jansky inspiró al astrónomo aficionado estadunidense Grote Reber (1911-2002), el cual construyó un radiotelescopio parabólico en el jardín en 1937 y llevó a cabo la primera inspección del cielo en frecuencias de radio.

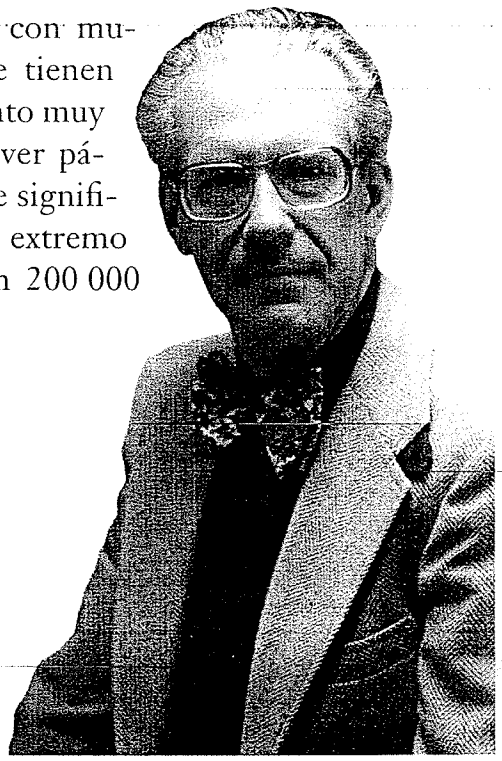
Las ondas de radio del Sol fueron las primeras descubiertas en 1942 por James Hey (1909-2000), oficial de investigación del ejército británico. La radioastronomía ya se estaba volviendo respetable: Los radioastrónomos Martin Ryle (1918-84) y Antony Hewish (1924-) de la Universidad de Cambridge hicieron el mapa de las fuentes de radio del cielo a principios de la década de 1950, produciendo los sondeos 2C y 3C (Segundo y Tercer Catálogos de Cambridge de Fuentes de Radio).

En la actualidad, los radiotelescopios a menudo se disponen en series, sus antenas apuntando a la misma área del cielo y se reúnen los datos de todos ellos. Cada telescopio tiene un gran plato de recolección que enfoca las ondas de radio recibidas en la antena. Empleando una técnica llamada interferometría, creada por Ryle y Hewish, los datos de cada antena se combinan (o "interfieren"). Las señales coincidentes se refuerzan unas a otras, mientras que las señales conflictivas se cancelan. El efecto es lograr el poder colector de un solo plato gigante. Para minimizar los problemas de la ionósfera y del vapor de agua atmosférico, los mejores sitios para los radiotelescopios a menudo están ubicados en grandes alturas de regiones áridas.

Aunque los radiotelescopios se pueden emplear para investigar el Sol y los planetas del Sistema Solar, han sido más útiles al explorar objetos tan distantes que no se pueden ver en absoluto, usando telescopios ópticos. Ha llevado a descubrimientos importantes como cuásares y pulsares.

Cuásares: Poderosos y remotos

Cuásar es la abreviatura de "objeto cuasiestelar" en inglés. Los cuásares son objetos con mucha energía que tienen un desplazamiento muy grande al rojo (ver página 202), lo que significa que están en extremo alejados. Existen 200 000



Maarten Schmidt

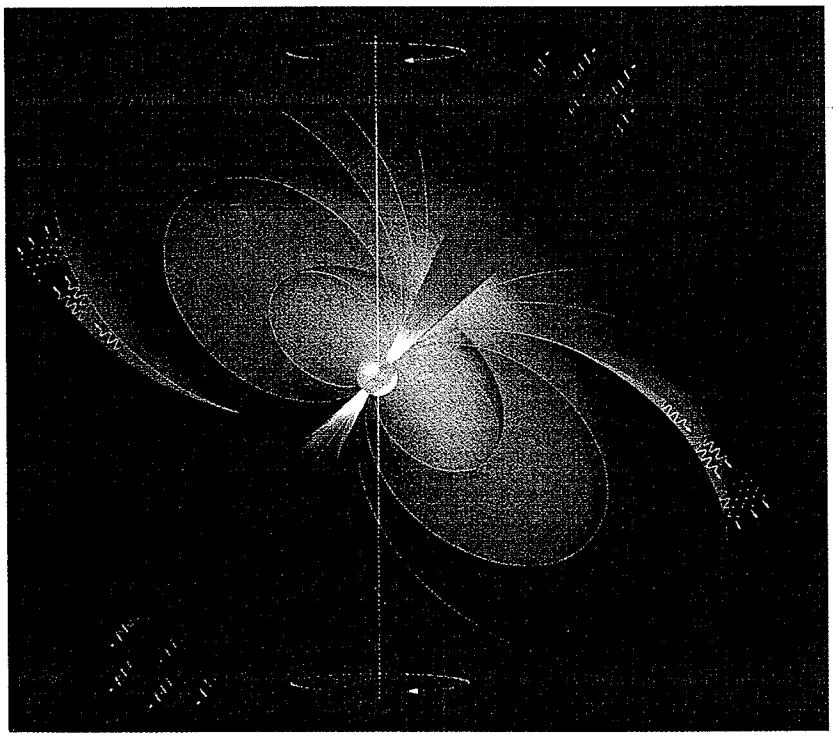
Pulsares: Rayos giratorios de poder

Un pulsar es un cuerpo estelar giratorio muy magnetizado. Se forma cuando se agotan los recursos de combustible de una estrella enorme y su centro se colapsa a un cuerpo increíblemente denso llamado estrella de neutrones. Se llama así al pulsar porque mientras gira emite radiación muy direccional que sólo se puede observar cuando apunta justo a la Tierra (creando un pulso algo similar al rayo de un faro que destella a través del mar). Los intervalos entre los pulsos van de 1.4 milisegundos a 8.5 segundos. La velocidad disminuye hasta que al final se acaba después de un periodo de 10-100 millones de años, así que la mayoría de los pulsares que se hayan formado (99 por ciento) ya no están pulsando.

Una estudiante de doctorado de 24 años de edad, Jocelyn Bell (ahora dame Jocelyn Bell Burnell) descubrió el primer pulsar en 1967. De manera polémica, fue su supervisor Antony Hewish quien recibió el Premio Nobel (en 1974) por el descubrimiento, y no ella. Observaciones en 1974 de un pulsar en un sistema binario (en el cual un pulsar gira alrededor de una estrella de neutrones, con un periodo orbital de ocho horas) proporcionó la primera evidencia de ondas de gravedad, confirmando otra parte de la teoría general de la relatividad de Einstein.



Jocelyn Bell Burnell

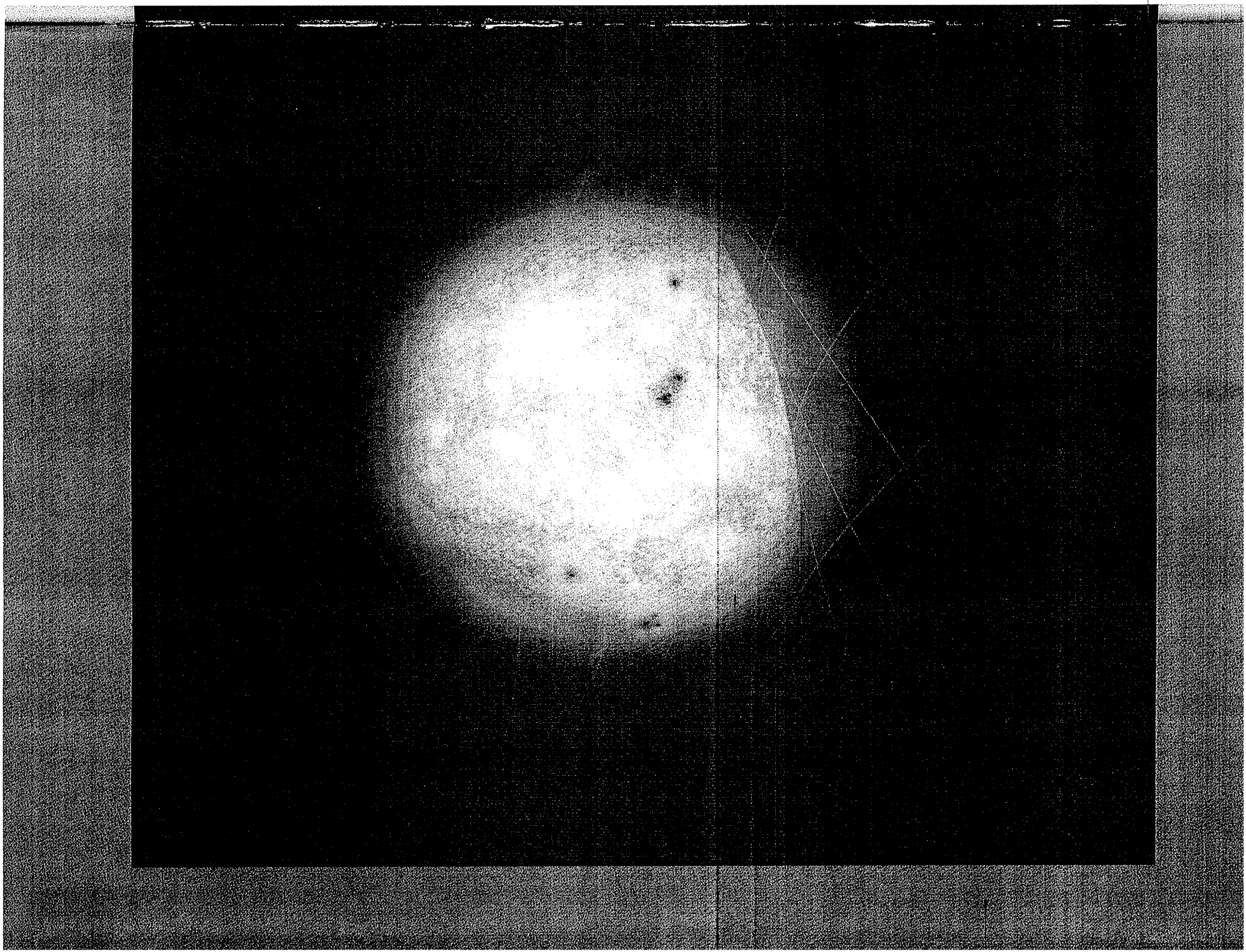


Cuando un pulsar gira, sus emisiones radiactivas sólo se pueden detectar desde la Tierra en pulsos.

cuásares conocidos, todos entre 780 millones y 28 miles de millones de años luz de distancia, lo que los hace los objetos más distantes de los que tenemos algún conocimiento. Los primeros cuásares se descubrieron a finales de la década de 1950 y los describió el astrónomo holandés Maarten Schmidt (1929-) en 1962. Las enormes ráfagas de radiación de los cuásares pueden ser producto de la liberación de energía gravitacional cuando la materia cae hacia un enorme hoyo negro. Hasta diez por ciento de esta masa se convierte en energía que puede escapar antes del horizonte de sucesos (ver página 197). La fusión nuclear que actúa en las estrellas podría no producir suficiente energía para hacer que un cuásar resplandezca con suficiente brillo (con luz visible y otras formas de radiación electromagnética) para que se detecte desde la Tierra a distancias tan vastas. La explosión de una supernova podría producir suficiente energía para que se vea por unas cuantas semanas, pero un cuásar persiste. Para que los cuásares más distantes sean visibles, deben ser dos billones (2×10^{12}) de veces más brillantes que el Sol. O lo eran, ya que esos objetos están a miles de millones de años luz de distancia, así que los estamos viendo cuando estaban cerca del inicio del Universo.

Arriba, arriba y lejos

Nuestra comprensión de la astronomía y de la física del espacio ha cambiado bastante durante todo el siglo XX. Pero tal vez el avance más importante fue el unir el tiempo y el espacio en un solo concepto; el continuo espacio-tiempo, como se comenta en el siguiente capítulo.



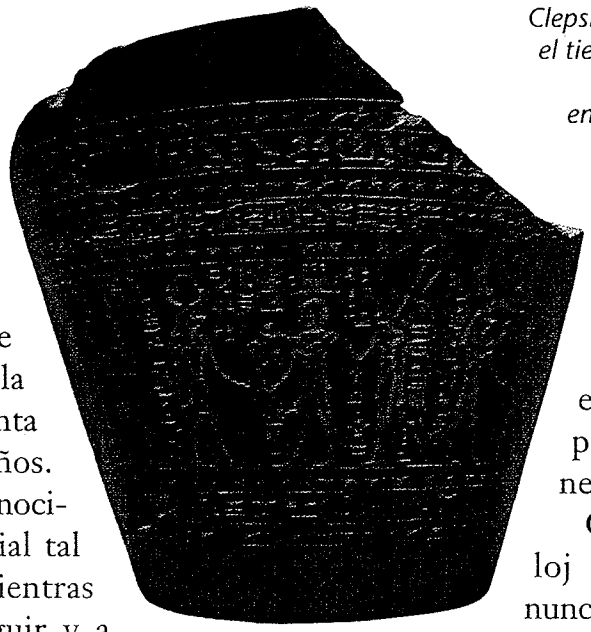
CAPÍTULO 7

CONTINUACIÓN DEL ESPACIO-TIEMPO

Por miles de años, observar el espacio y maravillarse por su extraña geografía fue sólo eso: Era ver hacia afuera, tratar de ver cómo estrellas y planetas, el Sol y la Luna se relacionaban con la Tierra. Los movimientos del Sol y la Luna fueron el reloj celeste de la humanidad, midiendo horas, días, meses y años; al espacio y al tiempo se les consideraba como conceptos separados. Sin embargo, desde principiod del siglo XX empezó a cambiar nuestra relación con espacio y tiempo. Después de Einstein, quedaron entrelazados como el continuo espacio-tiempo, y el estudio del espacio se concentró no sólo en "lo que está allá afuera", sino en el pasado y el posible futuro de nuestro Universo.

Una estrella distorsiona el continuo espacio-tiempo, creando un efecto gravitatorio.

Breve historia del tiempo



Clepsidra, empleada para medir el tiempo en la Antigua Grecia; los relojes de agua se han empleado por miles de años.

Aunque es fácil ver el paso de los días, la pauta de todo un año sólo se vuelve evidente con registros y conteo. La evidencia más antigua de personas que seguían la pista al tiempo se remonta a alrededor de 20 000 años. Las matemáticas y el conocimiento astronómico inicial tal vez surgieron juntos, mientras la gente aprendía a seguir y a predecir los movimientos de los cuerpos celestes.

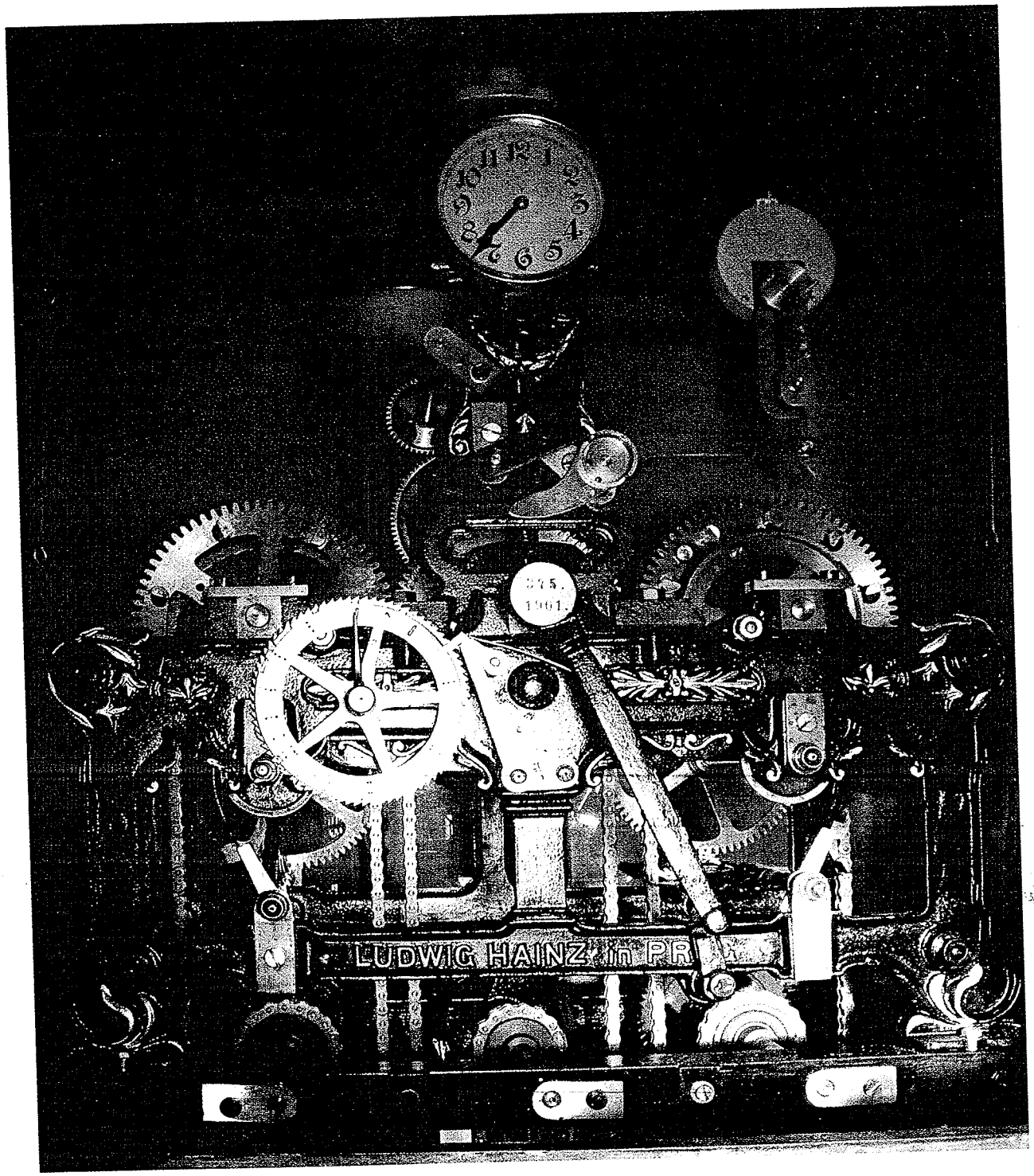
Medir el transcurso de un día se lograba al principio empleando un gnomon, un objeto como el puntero de un reloj de sol que proyecta una sombra para seguir la pista al avance del Sol a través del cielo. Por milenios, se mantuvo como la mejor guía del paso del tiempo. Luego, en el siglo XVII, Galileo comparó una lámpara que se balanceaba con su propio pulso y descubrió el movimiento regular de un péndulo. El péndulo siempre requiere el mismo tiempo para balancearse; conforme disminuye el arco, también se reduce el movimiento del péndulo para mantener regular el intervalo. Galileo diseñó un reloj de péndulo, pero nunca hizo uno. Fue Christiaan Huygens quien construyó el primer reloj de péndulo en 1656. Más adelante, Robert Hooke empleó la oscilación natural de un resorte para controlar el mecanismo de un reloj. La medición del tiempo por medios mecánicos siguió siendo la norma hasta 1927, mientras el ingeniero de telecomunicaciones Warren Marrison, nacido en Canadá, trabajaba en los laboratorios telefónicos Bell, en Nueva Jersey. Descubrió que podía medir el tiempo con exactitud empleando las vibraciones de un cristal de cuarzo en un circuito eléctrico.

"Mi alma anhela saber este enigma de lo más enredado. Te confieso, ¡oh, señor!, que todavía soy ignorante de lo que es el tiempo".

San Agustín

Mañana, mañana y mañana

Los relojes miden el tiempo lineal, lo cual es muy conveniente para las vidas humanas, pero puede no representar toda la historia. Buda y Pitágoras sugirieron en alrededor de 500 a.C., la idea de que el tiempo pudiera no ser lineal. Creían que el tiempo podía ser cíclico y que un ser humano, después de morir, podía renacer. Platón pensó que el tiempo se creó al



El mecanismo del reloj proporcionó la primera forma de decir el tiempo con exactitud.

"...tiempo absoluto, verdadero, matemático por su propia naturaleza, fluye con ecuanimidad sin relación con nada externo".

Isaac Newton



San Agustín

inició de todo. Pero para Aristóteles, el tiempo sólo existía donde había movimiento. Una aparente paradoja, propuesta por el filósofo Zenón (*aprox.* 490-430 a.C.), parece mostrar que no pueden existir el tiempo, ni el movimiento. Si dividimos el tiempo en porciones cada vez menores, la distancia viajada por una flecha en movimiento se vuelve cada vez más corta hasta que, en el instante de "ahora", la flecha no se mueve. Pero en ese caso, no puede existir, ni moverse en absoluto, ya que el tiempo está formado por un número infinito de "ahoras" en los que ningún movimiento tiene lugar. El filósofo cristiano San Agustín (354-430 d.C.) llegó a la conclusión de que el tiempo no existe a menos de que haya una inteligencia que observe, ya que es sólo el recuerdo de las cosas pasadas y la expectación de eventos futuros lo que da al tiempo cualquier existencia fuera del presente.

El matemático francés Nicolás Oresme (1323-1382) preguntó si el tiempo celeste, el tiempo medido por el movimiento de los cuerpos celestes, era proporcional; es decir, si había una unidad en que se pudieran medir en números enteros todos sus movimientos. Sugirió que un creador inteligente con seguridad los haría así, pero se detuvo antes de encontrar que la falta de una medición común significa que no hay Dios.

Unir espacio y tiempo

Nuestra experiencia personal del tiempo es simple. El tiempo se mueve del pasado a través del presente hacia el futuro, sin oportunidad de volver atrás, saltar hacia adelante o congelarse. Se mueve a una velocidad constante en una dirección. Es poco sorprendente que por milenios supusiéramos que era ésta la naturaleza misma del tiempo. Pero tal vez no lo es.

Todo es relativo

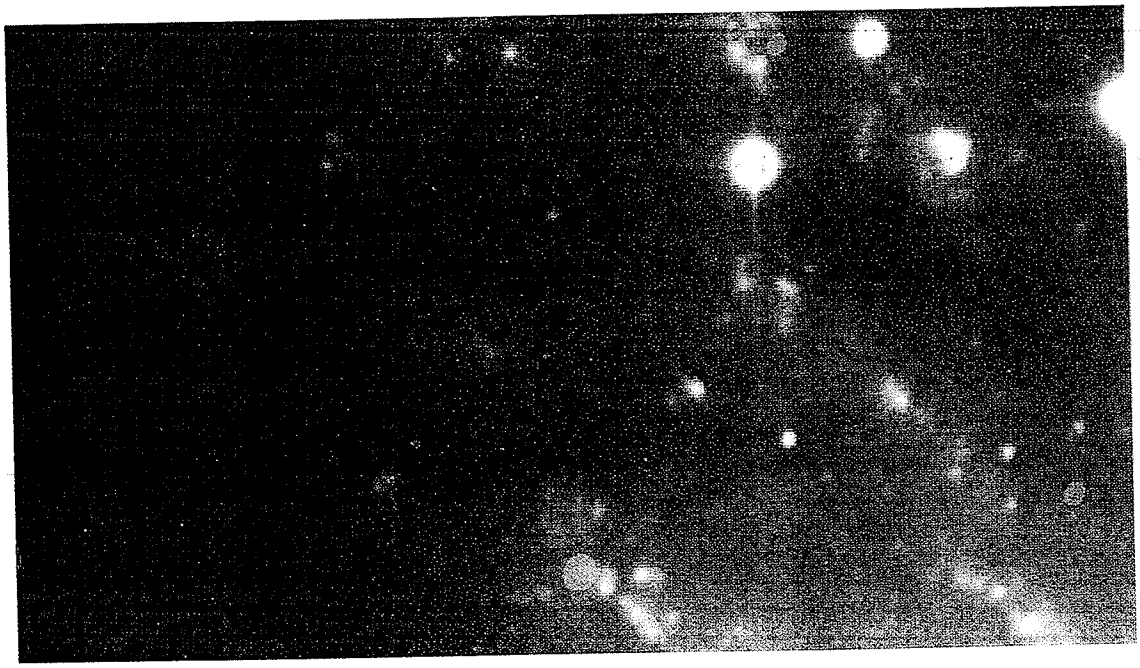
Todo movimiento es relativo a la posición o movimiento del observador. Por lo tanto, podrías caminar cruzando la habitación, y alguien parado en la misma habitación juzgará que tu velocidad es de alrededor de 5 km por hora. Tanto tú como el observador están en realidad en un globo que

Llevar la gravedad a los extremos: Hoyos negros

Los hoyos negros son "singularidades" en el espacio-tiempo. Existen áreas donde la gravedad es tan poderosa que ni siquiera la luz puede escapar, y todo lo que pasa demasiado cerca es absorbido. Los hoyos negros pueden formarse cuando las estrellas se colapsan en ellas mismas para volverse muy pequeñas, en algunos casos no mayores al núcleo de un átomo, y excesivamente densas. La velocidad de escape que se requiere para dejar un hoyo negro es mayor a la velocidad de la luz. El tamaño de un hoyo negro se mide por su horizonte de sucesos, el límite donde nada puede escapar. Aunque un astronauta que cae en un hoyo negro puede no notar nada inusual mientras cruza el horizonte de sucesos, un observador desde el exterior verá que el tiempo para esa persona se hace más lento. Ubicado en el borde del horizonte de sucesos, aparecen congelados en el tiempo.

Dos personas sugirieron por primera vez el concepto de hoyos negros (aunque no el nombre) en forma independiente: Pierre Simon Laplace en 1795; y antes de él, el filósofo inglés John Michell (1724-1793) en 1784.

Michell llamó "estrella oscura" al fenómeno de una estrella tan densa y con un jalón gravitacional tan feroz que la luna no podía escapar. El físico alemán Karl Schwarzschild (1873-1916) revivió la idea poco antes de su muerte en 1916, cuando calculó los campos gravitacionales de estrellas y de estrellas colapsadas. El término "hoyo negro" lo acuñó el físico teórico estadunidense John Archibald Wheeler (1911-2008) en 1967, cuando los cosmólogos encontraron la primera evidencia de su existencia.



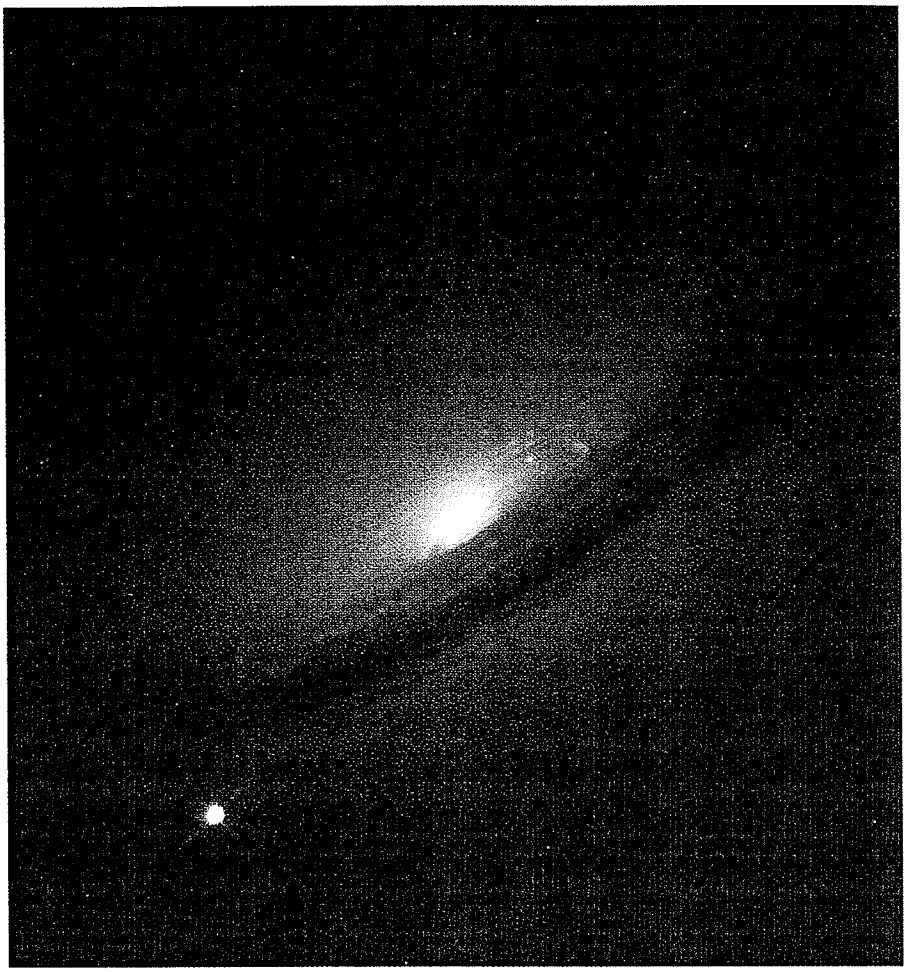


Imagen del telescopio Hubble de una supernova, el punto brillante abajo a la izquierda.

gira, moviéndose por el espacio a casi 30 km por segundo, pero sólo tu movimiento a través de la habitación se puede notar. Sin embargo, un observador en un planeta distante (con un buen telescopio), también verá el giro y el movimiento del globo (Galileo se dio cuenta de esto, aunque él hablaba de una persona en un barco, a la que ve un espectador desde la playa, más que un extraterrestre con un telescopio). Por lo tanto, la velocidad a la que se mueve un objeto depende del marco de referencia; el movimiento sólo se puede medir en relación con otros objetos u observadores. El marco de referencia puede ser la misma habitación, el mismo barco, el mismo planeta o la misma galaxia.

Einstein encontró una excepción a esta regla básica: Dijo que la luz siempre viaja a la misma velocidad sin importar la velocidad a la que se mueve un observador. Explicó que sin importar lo rápido que estés viajando, un rayo de luz pasaría zumbando, alejándose de ti a 299 792 458 metros por segundo. Como la velocidad de la luz es constante, otras cosas no pueden serlo y una de esas cosas es el tiempo. De hecho, al aproximarse a la velocidad de la luz, el tiempo reduce su velocidad y la distancia se contrae. Se demostró que Einstein estaba en lo correcto en este aspecto en 1971. Un reloj atómico que llevaron a un viaje en un avión muy rápido registró un tiempo un poco más corto que un reloj idéntico que quedó estacionado en tierra. Sin embargo, viajar en un avión rápido no es una buena forma de extender tu vida, necesitarías hacer 180 mil millones de circuitos a la Tierra para ahorrar un solo segundo.



La teoría de la relatividad general de Einstein, publicada en 1915, fue más allá, uniendo espacio-tiempo y materia, empleando la gravedad para explicar el efecto de uno en el otro. La materia dobla el espacio-tiempo, algo como una bola que se lanza a una colcha extendida y se hunde en la cobija. Describimos como gravedad la forma en que otros objetos, y la luz, se mueven en respuesta a este doblamiento. Por lo tanto, igual que una bola pequeña girará hacia el hundimiento en una colcha, creado por una bola grande, un cuerpo pequeño en el espacio con naturalidad gravitará hacia uno más grande, restringido por la curvatura del espacio-tiempo. El matemático alemán Bernhard Reimann (1826-1866), cuyas ideas se publicaron después de su muerte en 1867-1868, había propuesto esta curvatura mucho antes que Einstein. Pero Einstein fue mucho más allá de Reimann, ya que proporcionó ecuaciones para explicar y predecir la curva.

Muy lejos y hace mucho

Existe otra forma menos teórica y compleja en la que nuestro interés en el espacio se ha enredado con el tiempo y la velocidad de la luz. Cuando vemos las estrellas, estamos viendo cómo eran en el pasado por el tiempo que le toma a su luz llegar a nosotros. Incluso la luz del Sol tiene 8 minutos de antigüedad para cuando la vemos. Si el Sol se hubiera apagado hace dos minutos, continuaríamos viéndolo brillar, ignorando el inminente desastre, por otros seis minutos.

La luz de la estrella más cercana, Próxima Centauri, necesita cuatro años y tres meses en llegar a nosotros. Una de las estrellas más brillantes que jamás se haya detectado, vista por primera vez en 1988, fue una supernova. Como una supernova representa la muerte de una estrella, una que ha explotado, esa estrella ya no existe. Estaba a cinco mil millones de años luz, de manera que la luz que se vio en 1988 significó la muerte de la estrella hace cinco mil millones de años, antes de que siquiera nuestro Sistema Solar se formara. La supernova que vieron Kepler y Galileo en 1604 está a alrededor de 20 000 años luz de distancia, de manera que la estrella dejó de existir más o menos cuando los mamuts vagaban por la Europa cubierta de nieve.

De vuelta al principio

Por supuesto, cuando nadie sabía qué eran las estrellas y los planetas, era difícil decir cómo llegaron a estar ahí y, con unas cuantas excepciones notables, la mayoría de las culturas dejó esta pregunta a la religión. El arzobispo James Ussher (1581-1656) calculó que la fecha de la creación (de la que se podía calcular la fecha del Universo) era el 22 de octubre de 4004 a.C., basado en las genealogías registradas en la Biblia. Muchas otras sociedades han propuesto sus propias fechas de creación. Los mayas dan una fecha para la creación que se convierte en 11 de agosto de 3144 a.C. El judaísmo puso la creación en el 22 de septiembre o el 29 de marzo de 3760 a.C. La religión puránica hindú se fue en la otra dirección, con una extravagante fecha para la creación de hace 158.7 miles de billones de años. También se presentaron sugerencias de que el Universo siempre ha estado ahí. Por ejemplo, Aristóteles pensaba que el Universo era finito, pero eterno.

"[La mente dictaminó] esta rotación en que ahora giran las estrellas, el sol, la luna, el aire separado y el éter. Y lo denso se separa de lo ligero, lo caliente de lo frío, lo brillante de la oscuridad y lo seco de lo húmedo".

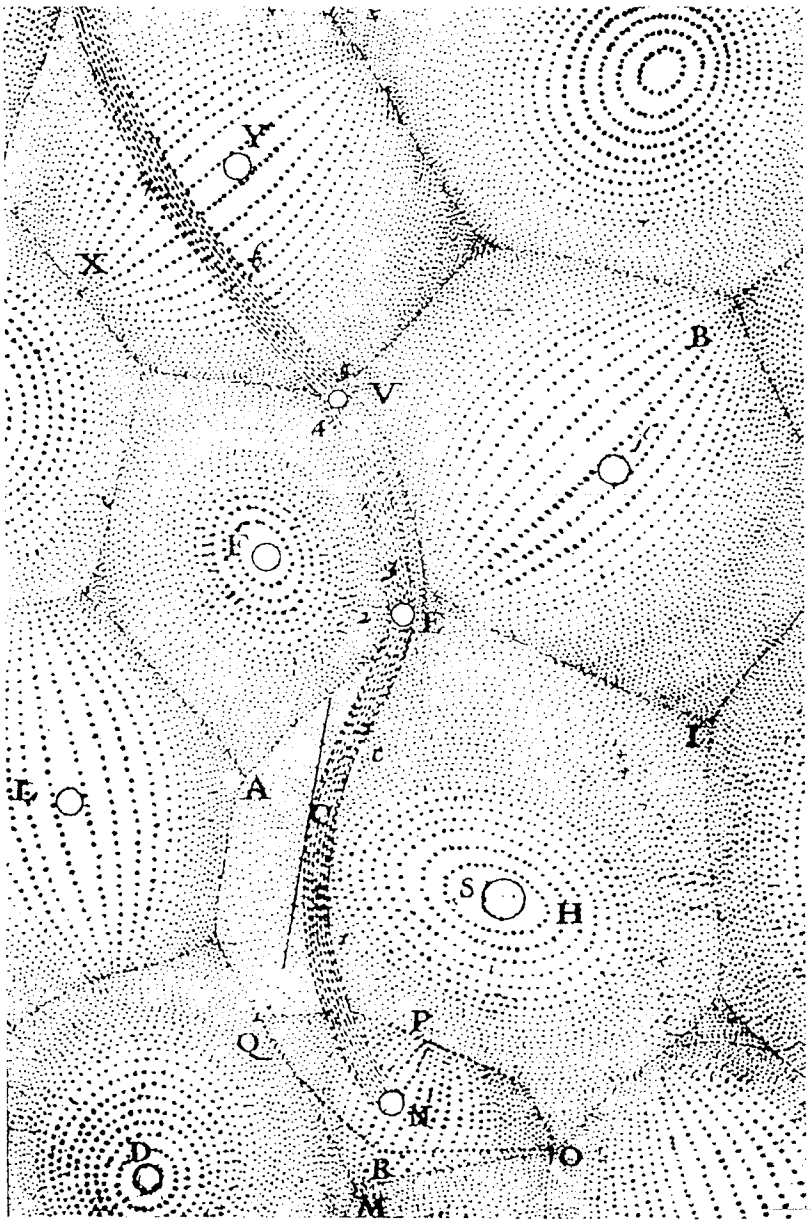
Anaxágoras, fragmento B12

donde los sistemas solares se formaban cuando discos preplanetarios se fusionaban de una vasta nube de polvo y, por la acción de la gravedad y de la fuerza centrípeta, se formaron como planetas. Anaxágoras trabajó sólo con lógica (y mucha imaginación).

Los filósofos Demócrito y Leucipo (siglo V a.C.) creían que el cosmos se formó cuando el movimiento giratorio llevó a los

Fuera del caos

Anaxágoras, en el siglo V a.C., sugirió que el Universo empezó como una pila de materia inerte e indiferenciada. En algún punto, después de un infinito en que nada sucedía, la Mente (su analogía para las leyes naturales del Universo) empezó a actuar en esta materia e inició un movimiento giratorio. Como consecuencia, la materia más densa se aglomeró y la menos densa se dispersó al exterior de los cuerpos que se formaron así, o flotó entre ellos. No es muy diferente al modelo que los astrónomos modernos tienen del desarrollo del Universo,



División de Descartes del espacio en regiones que contienen partículas girando alrededor de un centro, 1644.



Los filósofos estoicos griegos en el siglo III a.C. creían que el Universo era como una isla rodeada por un vacío infinito y que estaba en estado constante de flujo. El Universo estoico pulsa, cambiando de tamaño y sufriendo trastornos y conflagraciones en forma periódica. Todas las partes están interconectadas, de manera que lo que sucede en un lugar afecta lo que sucede en todas las demás partes, una idea que curiosamente se refleja en el enredo cuántico (ver página 133).

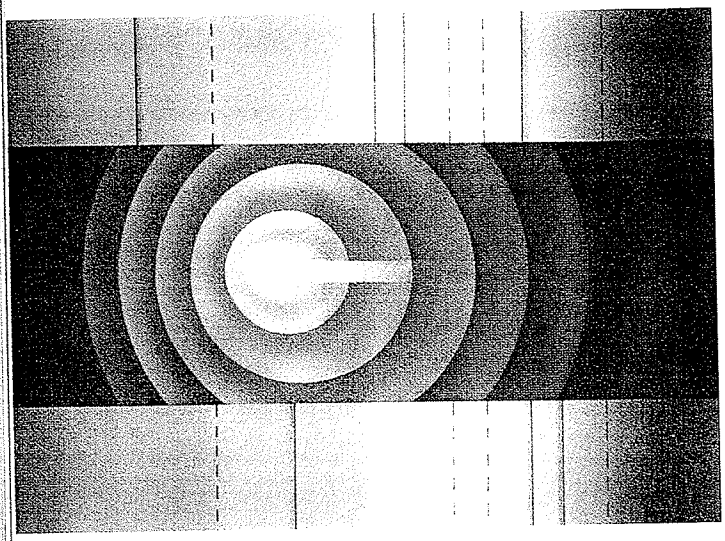
átomos a unirse formando la materia. Como el Universo es infinito en tiempo y espacio, y contiene una cantidad infinita de átomos, existirán todos los mundos y configuraciones de átomos posibles y, así, la existencia de nuestro mundo y de la humanidad no es especial, sino más bien inevitable. Como todo está en flujo constante, aparecerá un cosmos y al final se desintegrará y sus átomos indestructibles se reutilizarán en un nuevo cosmos. Incluso en un periodo más corto, sabemos que los átomos en un sistema estelar que muere, al final se reciclan.

René Descartes describió un Universo "vórtice" en el cual el espacio no estaba vacío sino lleno de material que giraba en torbellinos o vórtices que producían lo que más adelante se llamaría efectos gravitacionales. En 1687 Newton propuso un Universo estático, infinito, de estado estacionario, en el que la materia está distribuida en forma uniforme (a gran escala). Su Universo estaba balanceado en cuanto a la gravedad, pero era inestable. Resistió como modelo científico hasta el siglo XX. Incluso Einstein lo aceptó como una verdad indisputable, hasta que los descubrimientos demostraron que no lo era.

El Universo moderno

Una característica de las ecuaciones de la relatividad general de Einstein es que no pueden funcionar en un Universo estático sin un "compromiso". Como Einstein creía con firmeza que el Universo era estático, añadió una "constante cosmológica" a sus ecuaciones para hacer que funcionaran. Pero otros interpretaron sus ecuaciones en forma diferente. El cosmólogo y matemático ruso Alexander Friedmann (1888-1926) fue el primero en proponer un Universo en expansión. Empleando las ecuaciones de la relatividad de Einstein, Friedmann presentó un modelo matemático de un Universo en expansión en un artículo publicado en 1922. Murió de tifoidea al año siguiente, a la edad de sólo 37 años, enfermedad que contrajo mientras estaba de vacaciones en Crimea y en su mayor parte se pasó por alto su trabajo. Einstein fue uno de los pocos que leyeron el artículo de Friedmann, pero lo rechazó sin pensarlo dos veces. Sin embargo, Einstein se vio obligado a rechazar su modelo anterior y a abandonar la constante cosmológica después de que surgió evidencia de que Friedmann había tenido razón.

El astrónomo estadunidense Edwin Hubble (1889-1953) demostró en 1929 que las galaxias distantes se estaban alejando de nuestra región del espacio en todas direcciones. Hubble había analizado esas galaxias con el espectroscopio, y se dio cuenta de que sus espectros tenían corrimiento hacia el extremo rojo del espectro, el lla-



Las ondas de luz se corren hacia el extremo rojo o azul del espectro dependiendo de si la fuente se mueve hacia el observador o se aleja de él.

Corrimiento al rojo

Si se analiza la luz de una estrella empleando la espectrometría, se verá que su espectro se "aprieta" hacia las longitudes de onda de azul si se mueve hacia el observador (corrimiento al azul) y "se estira" hacia las longitudes de onda rojas si se aleja (corrimiento al rojo). A esto se le llama efecto Doppler. Ocurre un efecto similar con las ondas de sonido; la sirena de una patrulla tendrá un tono más alto cuando se aproxima a quien escucha, ya que se comprimen las ondas de sonido, y un tono más bajo cuando se aleja, ya que las ondas de sonido se estiran. Sin embargo, el corrimiento al rojo que Hubble observó no es resultado de un efecto Doppler causado por el movimiento de las estrellas de las galaxias (aunque esto causará un corrimiento al rojo). En lugar de eso, es resultado de que se expanda el espacio entre nuestra galaxia y las galaxias distantes, que es cómo se expande el Universo. La longitud de onda de la luz que viaja a través de ese espacio que se estira, también es estirada y extendida. La luz con una longitud de onda más grande es más roja, de ahí el corrimiento al rojo. Es por lo que la existencia del corrimiento al rojo es evidencia de un Universo en expansión. Vesto Slipher (1875-1969) midió por primera vez el corrimiento al rojo de algunas galaxias distantes y lo describió en 1917. Pero fue Hubble quien descubrió que el corrimiento al rojo era universal y que las galaxias más distantes se estaban alejando más rápido. Lo publicó como la "Relación entre la distancia y la velocidad radial en nebulosas extragalácticas".

mado "corrimiento al rojo" (ver cuadro, arriba). Estos descubrimientos se tomaron como evidencia de que el Universo en verdad se está expandiendo. Einstein después siguió en líneas generales el modelo de Friedmann, pero adoptó el punto de vista de que el Universo oscila entre expansión, de acuerdo al Big Bang, y luego contracción, ya que a la larga la gravedad jala toda la materia de nuevo, lo que tiene como resultado una Gran Implosión y una singularidad, que explotará en otro Big Bang. El ciclo continúa por siempre, pero como el tiempo es lo mismo que el espacio, tanto espacio como tiempo carecen de principio o de fin (o tienen infinitos principios y fines, dependiendo de cómo se desee considerarlo).

Del huevo cósmico al Big Bang

El punto de vista moderno del Universo surgió con las teorías del sacerdote y físico belga Georges Lemaître (1894-1966). Lemaître expresó que el universo comenzó como un punto infinitamente pequeño e infinitamente denso, ahora llamado singularidad, pero que Lemaître llamó átomo primitivo o "huevo cósmico". Un evento de poder inimaginable al que ahora llamamos el Big Bang hizo explotar esta singularidad, transformando toda la materia del Universo y haciéndola volar por el espacio.

Lemaître presentó su idea de un Universo en expansión en la Conferencia sobre Física de Solvay, en Bélgica, en 1927,

George Gamow (1904-1968)

George Gamow nació en Odessa, en el Imperio Ruso, área que en la actualidad es parte de Ucrania. Gamow fue un físico versátil con enorme éxito que hizo gran cantidad de descubrimientos e hipótesis importantes. Sus dos padres eran maestros, aunque su madre murió cuando Gamow tenía sólo nueve años de edad. Su educación se interrumpió por la destrucción de su escuela por un bombardeo durante la Primera Guerra Mundial, y como consecuencia, era autodidacta en gran medida. Gamow trabajó con algunos de los físicos europeos más importantes de su tiempo, incluyendo a Rutherford y a Bohr. Intentó dos veces escapar de la URSS, la primera en kayak, cruzando 250 km a través del mar Negro a Turquía, y la segunda mediante un viaje de Múrmansk a Noruega. Ambos intentos fallaron por mal clima. Gamow al final huyó, junto con su esposa, mientras asistía a la Conferencia sobre Física de Solvay, en Bélgica, en 1933, y se estableció en Estados Unidos en 1934.



El trabajo de Gamow se extendió de la mecánica cuántica a la astronomía; creó el modelo de "gota líquida" del átomo, en el que se considera al núcleo una gota de un fluido nuclear incompresible; describió el interior de las estrellas gigantes rojas, determinó la desintegración de la partícula alfa y explicó que la razón de que 99 por ciento del Universo esté formado por hidrógeno y helio es por las reacciones que tuvieron lugar en el Big Bang. Predijo la existencia de la radiación cósmica de microondas de fondo, especulando que el resplandor del Big Bang todavía persistiría después de miles de millones de años. Su cálculo era que en la actualidad se habría enfriado alrededor de cinco grados por encima del cero absoluto. Cuando Penzias y Wilson descubrieron la radiación cósmica de microondas de fondo en 1965 (ver cuadro, página 204), encontraron que la temperatura es en realidad de 2.7 grados sobre el cero absoluto.

Un premio nobel por accidente

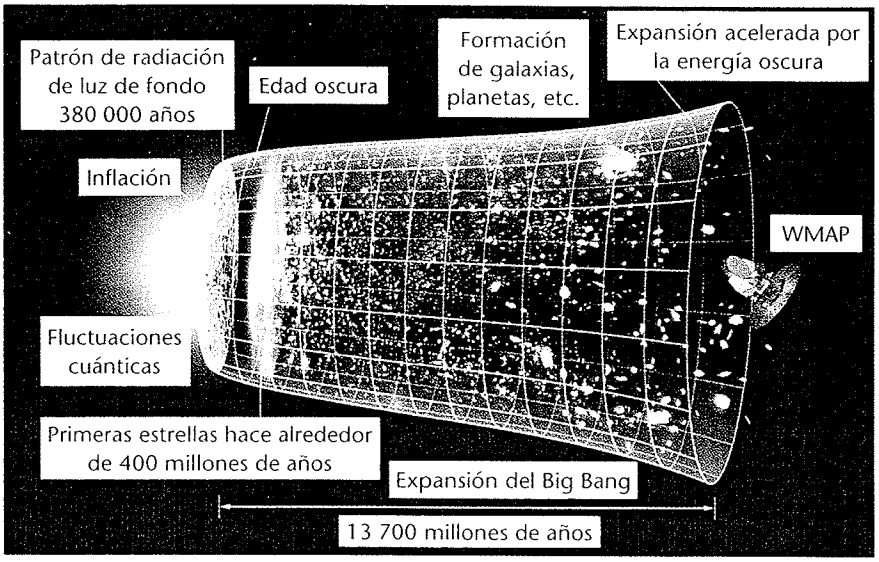
En 1978, Arno Penzias y Robert Wilson compartieron el Premio Nobel de Física por su descubrimiento de la radiación cósmica de microondas de fondo. De hecho, no la estaban buscando, y al principio no la reconocieron. Penzias y Wilson estaban perfeccionando una sensible antena de microondas en los laboratorios telefónicos Bell, en Holmdel, Nueva Jersey, para usarla en radioastronomía, cuando captaron una interferencia que estaba interrumpiendo su trabajo. No podían deshacerse de ella. Era constante y procedía de todas partes del cielo por igual. De hecho, habían tropezado con la radiación cósmica de microondas de fondo. No lejos, en la Universidad de Princeton, el equipo de Robert Dicke, Jim Peebles y David Wilkinson estaban construyendo un equipo con el fin específico de buscar la radiación cósmica de microondas de fondo y de inmediato se dieron cuenta de lo que Penzias y Wilson habían encontrado. Al enterarse de la noticia, Dicke se volvió hacia los otros y dijo: "Chicos, nos han ganado".

cuando presentó la primera exposición de lo que más adelante se volvería la Ley de Hubble: La velocidad de los objetos distantes que se alejan de la Tierra es proporcional a su distancia de la Tierra. Lemaître lo comentó con Einstein en la conferencia, pero Einstein de nuevo rechazó la teoría. Le dijo a Lemaître: "Tus matemáticas son correctas, ¡pero tu física es abominable!". Sin embargo, el descubrimiento de Hubble confirmó la física de Lemaître, demostrando que el corrimiento al rojo en la luz de galaxias lejanas es proporcional a su distancia de la Tierra.

A pesar de su éxito, se burlaron de la teoría de Lemaître del "huevo cósmico", incluso Eddington, quien había apoyado su modelo del Universo en expansión. El nombre Big Bang se originó como un comentario sarcástico del astrónomo británico Fred Hoyle (1915-2001) en 1949. Hoyle continuó favoreciendo un modelo de "estado estacionario" del Universo, mucho después de que el consenso general era que Lemaître tenía razón. Aunque el Universo de Hoyle, que describió en 1948, se expandía, incluía la inserción de material nuevo para mantener estable la densidad general. El principal argumento contra la teoría del Big Bang era que debía quedar algo de energía de calor del evento original, que debería ser detectable. El físico George Gamow (ver cuadro, página 203) había especulado que con la expansión del Universo esta energía de calor se habría enfriado, corriéndose a la banda de las microondas. La confirmación llegó en 1965 con el descubrimiento accidental de la radiación cósmica de microondas de fondo por parte de dos radioastrónomos, Arno Penzias y Robert Wilson (ver cuadro, arriba). Con esta evidencia, la mayoría de los inconformistas se pasó al lado del Big Bang.

¿Cuántas estrellas?

Los catálogos de estrellas más antiguos sólo podían listar las estrellas visibles a simple vista. Conforme mejoró la tecnología, primero con el telescopio ocular y luego con radiotelescopios, se multiplicó el número de estrellas detectables en forma continua y luego exponencial. El catálogo de estrellas de Draper (ver página



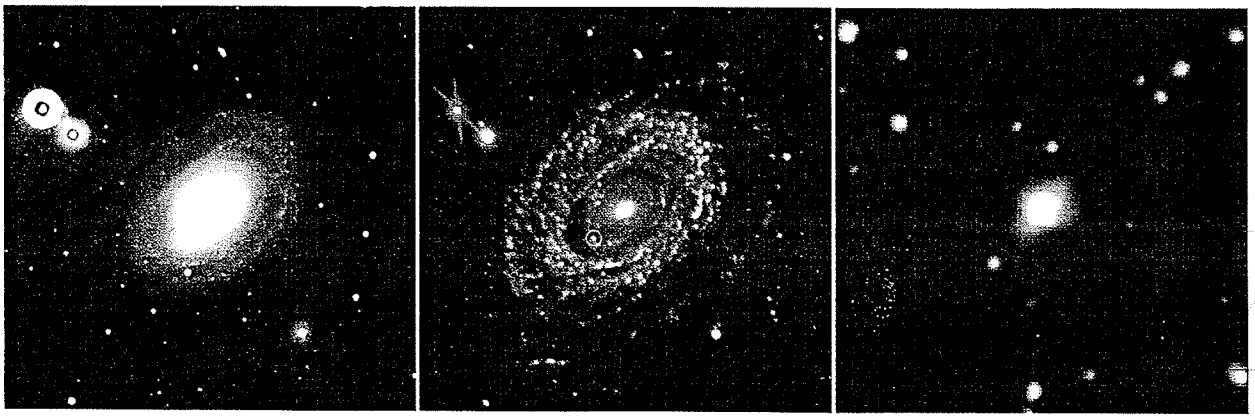
Cómo ha evolucionado el Universo desde el Big Bang.

179) con el tiempo llegó a ser una lista de 359 083 estrellas. Sin embargo, el número calculado de estrellas en el Universo supera con mucho cualquier catálogo y, al igual que el Universo, tiende a expandirse. Hasta finales de 2010, el cálculo aceptado por lo general estaba entre 10^{22} y 10^{24} estrellas. Entonces un equipo de investigación encabezado por Pieter van Dokkum del observatorio Keck, en Hawái, descubrió en 2010 que debía haber tres veces más estrellas de las que se pensaba antes, debido a la proliferación de estrellas enanas rojas que antes eran invisibles (tal vez 20 veces más que cálculos previos en algunas galaxias).

El Universo observable

Ahora tenemos diversas formas de calcular la edad del Universo: Al medir la abundancia de isótopos radiactivos, como uranio-238 y sus productos de desintegración (nucleocosmocronología), al medir la velocidad de la expansión del Universo y calcular hacia atrás para determinar cuándo debió empezar, y al buscar cúmulos globu-

La explosión de una supernova se muestra en longitudes de onda óptica (izquierda), ultravioleta (centro) y de rayos X (derecha).



lares de estrellas y deducir su edad por los tipos de estrellas que contienen. En la actualidad, se piensa que la cifra más exacta para la edad del universo es de 13 700 millones de años. Se basa en datos de la Sonda Anisotrópica de Microondas Wilkinson (WMAP por sus siglas en inglés), una nave espacial que mide la radiación cósmica de microondas de fondo.

Que el cuásar más distante que se conoce está a unos 28 mil millones de años luz de distancia (ver página 189) puede parecer imposible si el Universo sólo ha estado aquí por 13 700 millones de años. Se explica la anomalía mediante la expansión del espacio-tiempo entre la Tierra y el cuásar. La luz que ahora recibimos del cuásar se emitió tal vez hace 12.7 miles de millones de años luz, cuando el cuásar estaba más cerca de la Tierra, pero como el espacio entre los dos ha aumentado desde entonces, el cuásar se encuentra mucho más lejos. Aunque ni la luz, ni un cuerpo pueden viajar por el espacio a velocidades mayores a la velocidad de la luz, el espacio-tiempo se puede expandir a cualquier velocidad. Se piensa que el Universo observable (ése que se puede observar en teoría si tenemos la tecnología correcta) es de alrededor de 93 mil millones de años luz de diámetro. Eso no pone un límite al tamaño de todo el Universo. Aparte de eso, puede haber materia que ahora está separada de la Tierra por un espacio intermedio tan grande que su luz todavía no nos ha alcanzado.

¿Cuántos Universos?

Aunque la palabra "Universo" significa que sólo hay uno, unos cuantos científicos han sugerido que en realidad es un multiverso en que nuestro Universo sólo es uno de muchos. Los físicos teóricos Hugh Everett III y Bryce DeWitt (1923-2004) sugirieron un modelo de "muchos mundos" en las décadas de 1960 y 1970, y el físico rusoestadunidense Andrei Lindre (1948-) describió en 1983 un modelo en el que nuestro Universo es una de muchas "burbujas" formadas en un multiverso sujeto a inflación eterna.

Big bangs

Hasta 2010 no había evidencia para sugerir que el Big Bang pudiera ser uno en una serie de universos en expansión y contracción, pero entonces sir Roger Penrose (1931-) y Vahe Grzadyan (1955-) descubrieron círculos concéntricos claros dentro de la radiación cósmica de microondas de fondo, lo que sugiere que regiones de la radiación tienen valores de temperatura más pequeños que en otras partes. Sostienen que esto sugiere un Big Bang previo, más antiguo, conservado como un tipo de fósil en la radiación cósmica de microondas de fondo.

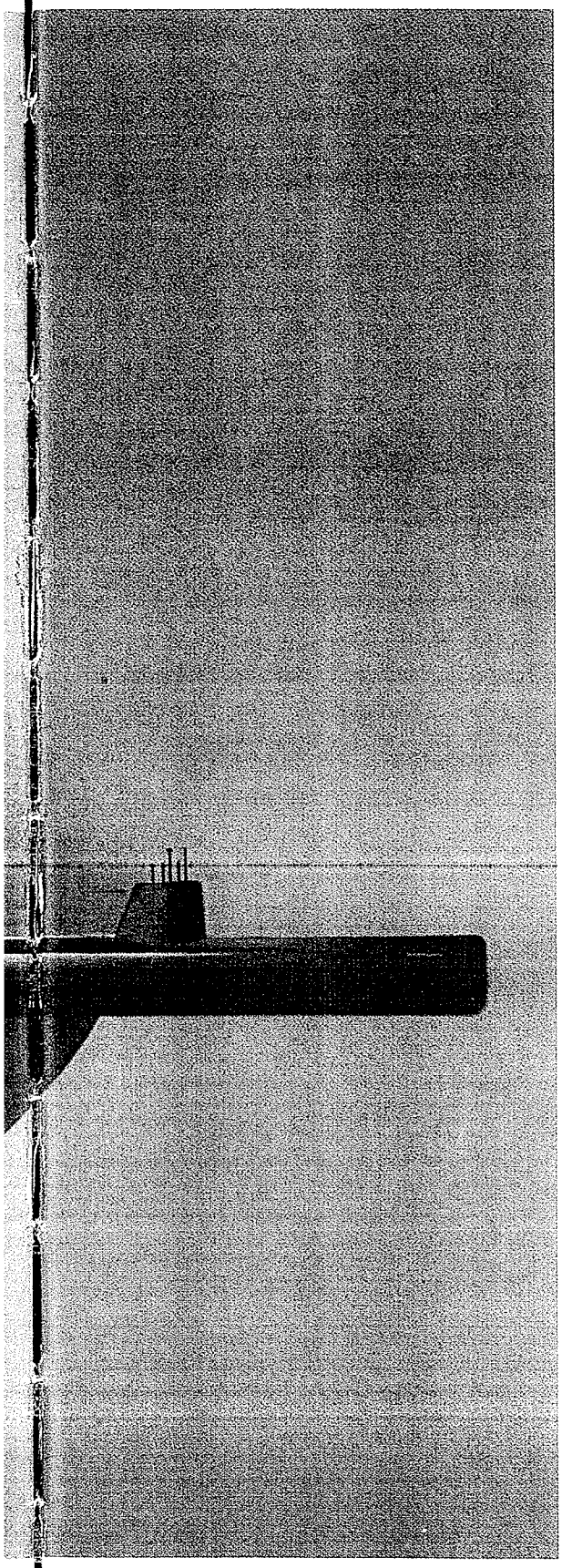
Todo va colina abajo desde aquí

Nuestro propio Sol está más o menos a medio camino de su vida probable. Se puede esperar que dure todavía unos cuantos miles de millones de años antes de que siga el patrón que se observa en otras partes del Universo de expandirse para ser una gigante roja, luego colapsarse como enana blanca y que por último se enfríe.

Aunque es claro que no estaremos aquí para verlo, el fin del Universo, si alguna vez hay uno, interesa a los cosmólogos.



¿Se expandirá por siempre, hasta que sea una sopa de materia muy poco densa, ya incapaz de formar sistemas planetarios útiles? ¿O todo volverá a ser succionado de vuelta a la Gran Implosión, listo para explotar en un nuevo Big Bang? De ser así, este ciclo puede ser eterno (aunque la palabra no tenga significado en un sistema en que el tiempo, junto con el espacio, se aplastan para no quedar nada y se recrean para comenzar desde el principio). El principio y fin del Universo son en realidad las fronteras de la ciencia, áreas que exploramos con lógica y matemáticas, pero incluso aquí existen métodos experimentales que ayudarán a refinar nuestras teorías mientras moldeamos la física del futuro.



CAPÍTULO 8

FÍSICA PARA EL FUTURO

Cuando Max Planck dijo en 1874 que deseaba especializarse en física, su tutor le aconsejó escoger un tema diferente, ya que no quedaba nada por descubrir en las ciencias físicas. Por suerte, Planck lo ignoró. Casi 150 años después, todavía queda mucho por descubrir en física. No podemos reconciliar la gravedad y la mecánica cuántica; no podemos explicar la mayor parte de la masa del Universo, hay partículas que no podemos detectar, pero que sospechamos que están ahí, en alguna parte para que las encontremos; no podemos explicar del todo qué es la energía y no sabemos cuál será el destino de nuestro Universo, o si es único o sólo uno entre muchos. Éstas son algunas de las preguntas que están listas para que físicos del futuro las aborden, los cuales todavía están en nuestras escuelas y auditorios de universidad.

Las aplicaciones prácticas de la física aprovechan las leyes naturales del Universo para nueva tecnología.

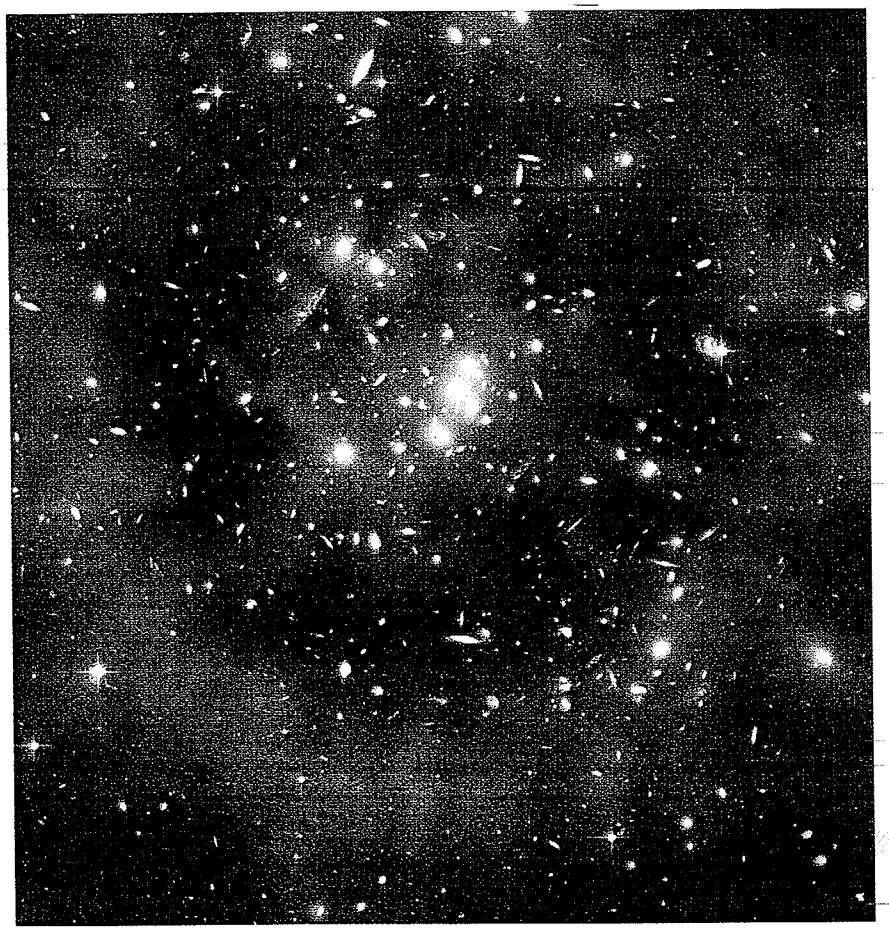
Despedazarlo y comenzar de nuevo

La física del siglo XX llevó a una revaluación fundamental de gran parte de lo que había sucedido antes, combinando espacio y tiempo en el continuo espacio-tiempo, lo que remplaza las certezas con incertidumbre y probabilidades, convirtiendo partículas y ondas en dualidades onda-partícula e introduciendo otras ideas que, aunque extrañas, no se pueden rechazar. De hecho, no fue tanto que las nuevas teorías anularan lo que había sucedido antes, sino que lo incluyeron en algo más grande. Sin embargo, ese algo más grande todavía no explica todo, y en última instancia también se le debe incorporar en un conjunto de teorías o modelos que expliquen todo lo que hemos descubierto hasta el momento, además de lo que todavía está sin explicar.

¿Eso es todo?

Parece algo así como un fracaso para la física, pero uno de los mayores problemas pendientes es cómo explicar 96 por ciento de la densidad de masa-energía del Universo. El Universo que podemos ver, porque refleja o emite luz, sólo representa una diminuta cantidad de lo que se sabe que está ahí, alrededor del 4 por ciento. El término "materia oscura" se acuñó para describir materia que sabemos que está ahí, pero que no podemos ver. El astrónomo búlgaro-suizo Fritz Zwicky (1898-1974) fue el primero en proponer la idea de la materia oscura en 1933.

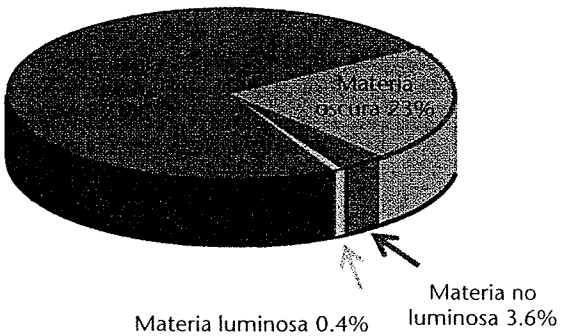
Zwicky aplicó cálculos que surgían de las teorías de la relatividad de Einstein a las interacciones gravitacionales que se observaron en el cúmulo de galaxias Coma, y encontró que el cúmulo debía contener cientos de veces más masa de lo que



Un anillo de materia oscura formado por la colisión de dos galaxias, fotografiado por el telescopio Hubble en 2004.

sugería su luminosidad general. Propuso que el restante estaba formado por materia oscura.

Por lo tanto, ¿qué es esta misteriosa sustancia? La teoría actual más aceptada divide la materia oscura en materia bariónica y no bariónica. La materia bariónica es materia ordinaria formada por protones, neutrones y demás. Todos los objetos visibles en el Universo deben emitir o reflejar luz. Eso podría parecer bastante obvio, pero es muy significativo. Si un planeta vaga donde no lo ilumine ninguna estrella o si una estrella se agota, ya no se puede ver. Es probable que la materia bariónica oscura esté formada por materia invisible como nubes de gas, estrellas agotadas y planetas sin iluminar. Se les llama Objetos Masivos y Compactos del Halo (MACHO, por sus siglas en inglés). La presencia de MACHOS se puede inferir mediante los efectos gravitacionales que tienen; se les encontró primero en la Vía Láctea en el 2000.



Sin embargo, no existen suficientes MACHOS para suministrar toda la materia oscura. Se piensa que la vasta mayoría de la materia oscura contiene Partículas Masivas Débilmente Interactivas (WIMP por sus siglas en inglés). Por definición, estas partículas son difíciles de encontrar, ya que no interactúan con otra materia mediante fuerzas electromagnéticas. Parte de la materia oscura se puede explicar gracias a los neutrinos (ver página 143), pero todavía hay espacio para otras partículas teóricas y sin descubrir, como axión y otras partículas exóticas incluso menos teorizadas.

Energía oscura

Si la existencia de la materia oscura fue difícil de aceptar, a los cosmólogos les esperaba una conmoción mayor cuando se anunciaron los resultados del Proyecto Cosmológico Supernova en 1999. Este estudio había examinado supernovas de Tipo 1a, un tipo de estrella que explota cuya masa y luminosidad se conoce y, por lo tanto, cuyo corrimiento al rojo (ver página 202) se puede calcular con exactitud. Los hallazgos del proyecto revelaron que el Universo no se estaba expandiendo a

Meteoro artificial

Fritz Zwicky tenía un enfoque original y poco convencional de la astronomía y sus contemporáneos no tomaron en serio muchas de sus ideas (incluyendo la materia oscura). En octubre de 1957, Zwicky disparó perdigones de metal desde el cono de proa del cohete Aerobee, haciendo meteoros artificiales que fueron visibles desde el observatorio de Monte Palomar. Se piensa que uno de los perdigones escapó al campo gravitacional de la Tierra y se convirtió en el primer objeto hecho por el hombre en entrar en la órbita solar.

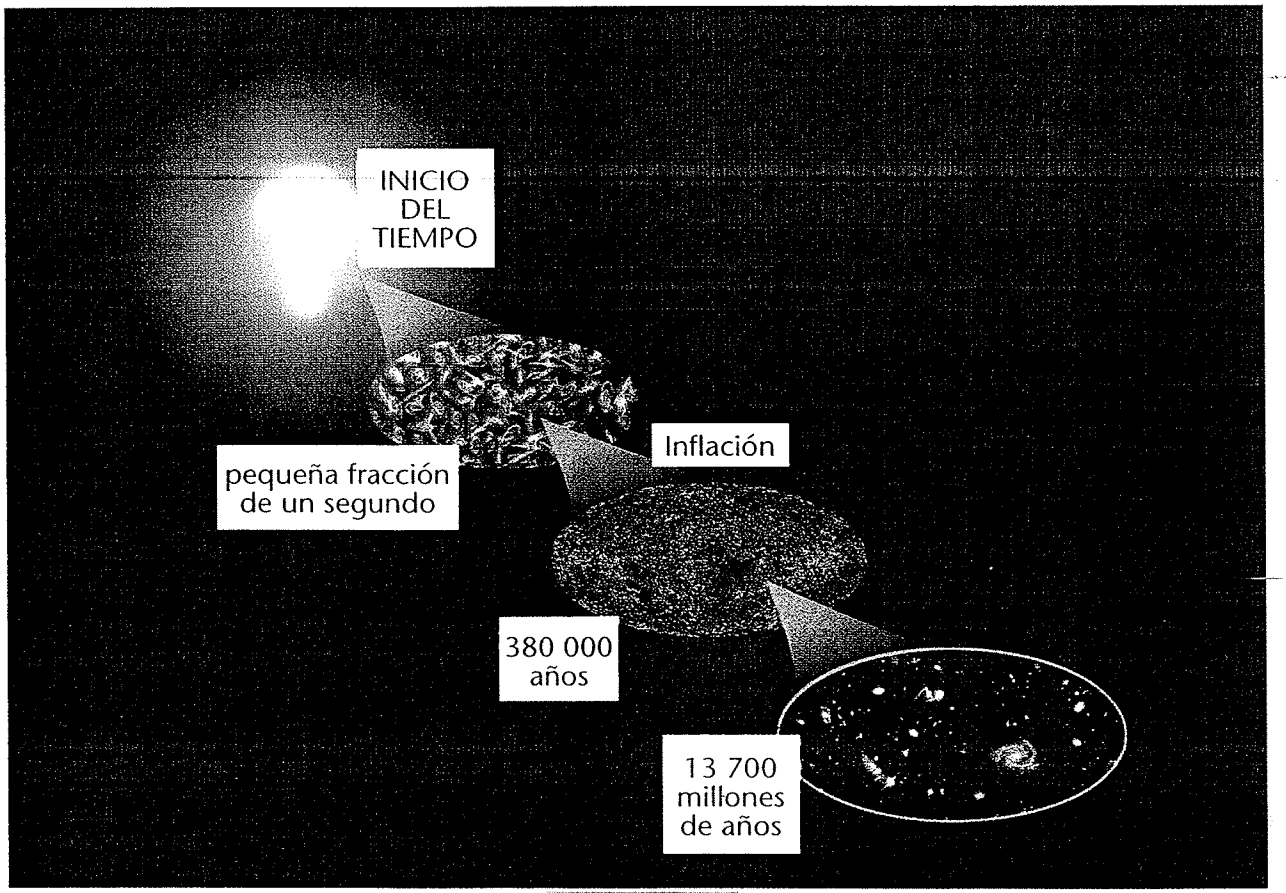
"El Universo está formado en su mayor parte de materia oscura y energía oscura, y no sabemos qué es cualquiera de ellas".

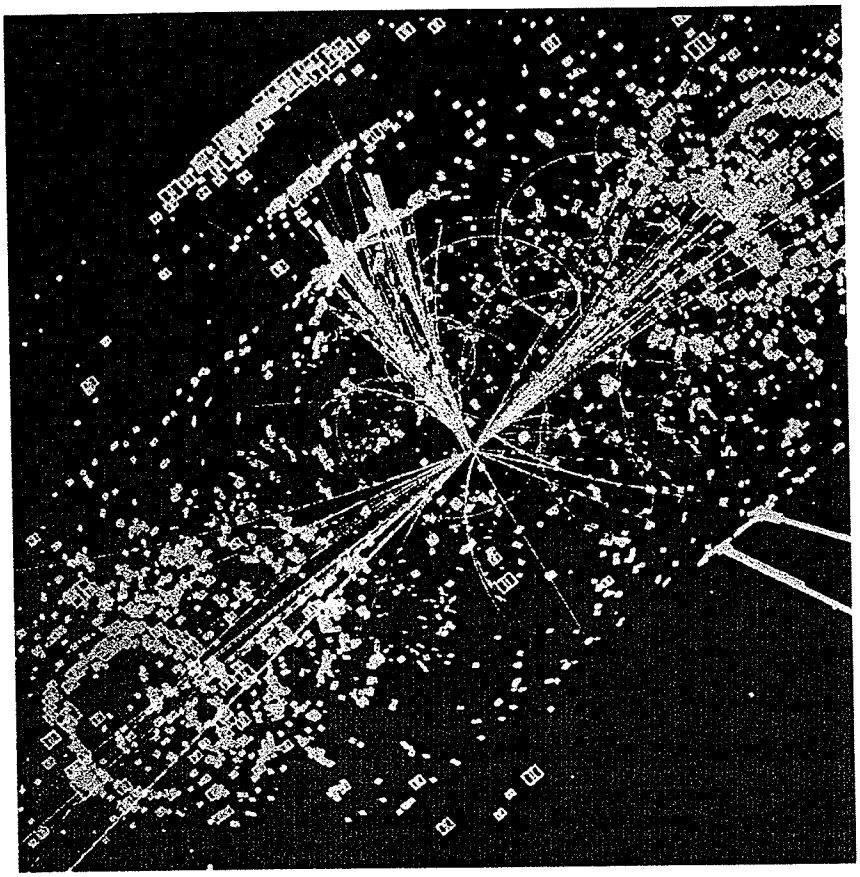
Saul Perlmutter, del Proyecto Cosmológico Supernova, 1999

una velocidad constante o disminuyendo su velocidad, como se había supuesto, sino que estaba acelerando. Desde entonces se ha confirmado esta aceleración por otras investigaciones, incluyendo estudios detallados de la radiación cósmica de microondas de fondo. Para explicar este fenómeno, los científicos acuñaron un término nuevo: Energía oscura.

Incluso con MACHOS y WIMPS, el presupuesto de masa-energía del Universo tiene un enorme déficit. En la actualidad se calcula que casi tres cuartas partes (alrededor de 74 por ciento) de la masa-energía del Universo se explica por la misteriosa energía oscura, y con la materia oscura se explica la mayor parte del resto. Se piensa que la energía oscura tiene fuerte presión negativa y, por lo tanto, demuestra la expansión acelerada del Universo. Tal vez sea homogénea, no muy densa, pero presente en todas las partes que se

Cómo se ha visto el universo desde el Big Bang.





Simulación de la creación y desintegración de un bosón de Higgs; produce dos chorros de hadrones y dos electrones.

consideran espacio vacío en todo sentido. Un contendiente para el título de energía oscura es la constante cosmológica, que Einstein añadió originalmente como compromiso en las ecuaciones generales de la relatividad para explicar por qué el Universo no se estaba colapsando bajo la fuerza de la gravedad. Einstein más adelante abandonó la idea, pero ahora se está resucitando para explicar estos nuevos descubrimientos.

Una teoría es que la constante cosmológica actúa como antigravedad, impidiendo que la gravedad jale al Universo hacia sí mismo. En este momento se piensa que la fuerza de la constante cosmológica es un poco más grande que la fuerza de la gravedad, pero no se sabe si siempre ha sido la misma, si siempre será la misma o si en verdad es una constante. No todos los cosmólogos aceptan la idea de una constante cosmológica y han presentado otras ideas, más esotéricas, como la "teoría de las cuerdas" (ver página 216). No se ha encontrado evidencia convincente para hacer que alguna teoría particular parezca abrumadoramente probable.

¿Qué sigue para la materia?

El modelo estándar de la materia dice que los átomos están formados de partículas compuestas como neutrones y protones y que éstos están compuestos por partículas elementales como quarks (ver página 140). Se han teorizado gran cantidad de partículas más, pero todavía no se demuestra que existan o que no puedan existir ya. Explorar esas partículas en forma experimental más que como modelo matemático es algo complejo y costoso, que requiere equipo muy sofisticado, en especial porque muchas tienen un periodo de vida muy corto.

El postulado bosón de Higgs (o "partícula de Dios") es la única partícula elemental predicha por el modelo estándar de la materia que todavía no se ha detec-



Stephen Hawking en gravedad cero abordo de un avión Boeing 727 modificado.

tado. Se piensa que imparte masa a la materia y la sugirió por primera vez el físico teórico inglés Peter Higgs (1929-) en 1964.

Para comprenderlo, es necesario examinar por un momento las partículas que median las cuatro fuerzas fundamentales: el electromagnetismo es mediado por fotones virtualmente sin masa, los gluones vinculan a los quarks mediante la fuerza nuclear fuerte, y los bosones W y Z portan la fuerza nuclear débil y son muy pesados; hablando en forma relativa, alrededor de 100 veces la masa de un fotón. El problema para los físicos es explicar la diferencia en masa de estas partículas que median la fuerza. La solución es un modelo que tiene a algunas de las partículas vadeando por melaza.

El campo Higgs es algo parecido a un campo de fuerza por el que la materia se tiene que mover en el espacio. Algunas partículas cuánticas son detenidas más que otras cuando pasan por él. La reducción de la velocidad de una partícula en efecto le imparte masa. El campo no inhibe los fotones y tienen muy poca masa, pero el campo detiene bastante a los bosones W y Z y por lo tanto tienen masa significativa. El campo de Higgs es mediado por el bosón de Higgs. Si se pudiera demostrar que

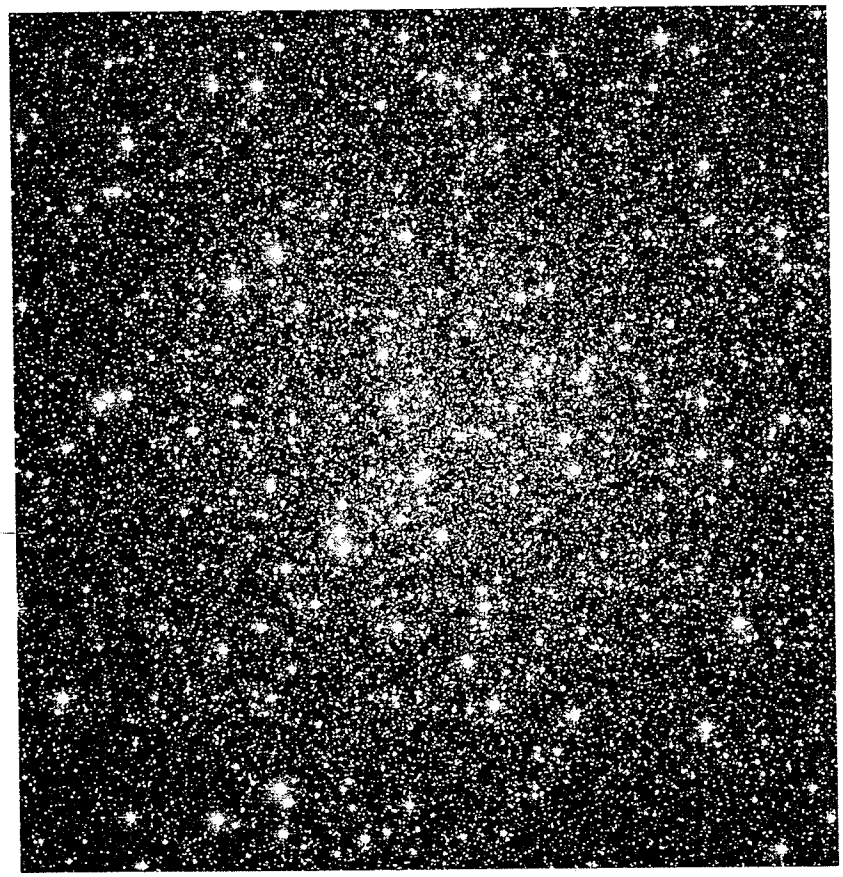
existe el bosón de Higgs, estaría completo el modelo estándar.

Sin embargo, ¿cómo buscamos una partícula así? En la actualidad, los físicos están tratando de hacer explotar una para que sea visible, empleando enormes aceleradores de partículas como el Gran Colisionador de Hadrones en el CERN, en un túnel cerca de Ginebra, y en el Tevatrón de Fermilab, cerca de Chicago. La existencia de quarks "cima" se confirmó en el Fermilab en 1995. Estos aceleradores disparan rayos de partículas a velocidades en extremo elevadas en direcciones opuestas alrededor de un círculo de manera que choquen. El Gran Colisionador de Hadrones es la máquina más grande de este tipo, con un túnel circular de 27 km de circunferencia. El Gran Colisionador de Hadrones dispara rayos de protones once meses del año e iones de plomo un mes del año.

"La Teoría M es la teoría unificada que Einstein estaba esperando encontrar Si se confirma la teoría con observaciones, será la conclusión exitosa de una búsqueda que se remonta a hace más de 3000 años. Habremos encontrado el gran diseño".

Stephen Hawking, *El gran diseño*, 2010

Se aceleran los rayos de protones a menos de tres metros por segundo de la velocidad de la luz y accionan en ráfagas de manera que las colisiones no suceden en forma continua, sino siempre con una separación de al menos 25 nanosegundos. Le toma a un protón acelerado sólo 90 microsegundos en completar un circuito del túnel del colisionador equivalente a 11 000 circuitos por segundo. El programa de investigación en el Gran Colisionador de Hadrones empezó en 2010. Los físicos esperan que, si el mo-



El cúmulo de estrellas Messier 13, observado por Halley: "Esto es sólo una pequeña Zona, pero se muestra al Ojo desnudo, cuando el cielo está sereno y la Luna está ausente".

delo estándar es correcto, un bosón de Higgs se producirá cada pocas horas; se necesitarán los datos de dos o tres años para confirmar que ha sucedido.

¿Separar al bebé del agua para bañarse?

Einstein luchó, y falló, por encontrar una teoría unificadora que explicaría todo, uniendo gravedad y mecánica cuántica en un conjunto completo de ecuaciones. Anaxágoras pudo haber dicho lo mismo. Deseaba una única explicación para el movimiento y el cambio de estado que pudiera explicar todos los cambios que ocurren en el mundo físico. Insistió en que no debía tener ningún componente de superstición o de divinidad y que debía ser lógico por completo. En su modelo, la Mente cósmica supervisaba, regulaba y manejaba todo el tiempo los cambios infinitos que tienen lugar con el fin de que todos estuvieran en orden. Lo que quería decir es que había una ley, que no había descubierto o explicado, que controlaba el flujo de toda la materia. Fue una explicación insatisfactoria, como hicieron notar sus sucesores, pero que no era muy diferente a las creencias de Einstein y Hawking de que debía existir una teoría unificadora, si sólo la pudieran descubrir. Al final de su vida, Einstein reconoció que no iba a tener éxito y que debía dejar el trabajo a otros. Todavía no se ha logrado y sigue siendo un enigma importante para los físicos el abismo entre la teoría cuántica y la relatividad general, a pesar de la evidencia experimental de que ambas son correctas.

Un enfoque a este problema ha sido el desarrollo de la teoría de cuerdas. No es todavía una sola teoría coherente, no se puede poner a prueba y tal vez no se acepta en todas partes, pero intenta unir la teoría cuántica y la relatividad general al proporcionar una descripción más profunda de ambas. En la teoría de cuerdas, todas las partículas subatómicas son diminutos fragmentos de "cuerda", sean de extremo abierto o de lazo, que vibran en muchas dimensiones. La diferencia entre partículas no procede de su composición, que es toda la misma, sino de lo armónico de sus vibraciones. Y estas vibraciones tienen lugar no sólo en las tres dimensiones de espacio y una de tiempo con que estamos familiarizados, sino en diez dimensiones. Algunas se pueden rizar sobre ellas mismas o durar sólo un tiempo muy corto, de manera que no somos conscientes de ellas. La teoría de cuerdas es en extremo especulativa, e incluso sus proponentes tienen diferentes versiones de ella.

La teoría M es un avance de la teoría de cuerdas que lleva a la física teórica a nuevas fronteras. La adición de una onceava dimensión es su contribución más modesta. A las cuerdas que vibran, añade partículas punto, membranas bidimensionales, formas tridimensionales y entidades en más dimensiones que son imposibles de visualizar (p-branes, donde p es un número en el rango de cero a nueve). La forma en que los espacios internos están doblados determina las características que consideramos leyes inmutables del Universo, como el cambio en un electrón o cómo funciona la gravedad. Por lo tanto, la teoría M permite diferentes universos con diferentes leyes, de hecho, hasta 10^{500} de ellos. No sólo no hay formulación de la

teoría M, sino que no hay consenso de qué tipo de cosa es, ¿una teoría individual, una red de teorías conectadas o algo que cambia de acuerdo a las circunstancias? Nadie está siquiera seguro de qué representa la M. Lo que Anaxágoras llamaba Mente (*nous*) y Einstein llamaba teoría de campo unificado ahora podría llamarse teoría M, pero aunque estamos un poco más cerca de saber cuál es esa respuesta, en realidad todavía hay gran cantidad de física que falta por hacer.

Índice

A

Abhaya, rey 68
Academia de ciencias 13
Academia de Experimentos 11
aether 23, 24, 45-46, 49, 54-58
Agustín, San 198
Alberto de Sajonia 72-73
Al-Biruni, Abu Rayhan 9, 160, 162
Al-Farisi, Kamal Al-Din 40
Al-Ghazali 25
Al-Haytham, Ibn Al-Hassan Ibn 8-9, 39-40, 59, 160
Alhazen 8-9, 39-40, 41
Al-Khwarizimi, Muhammed ibn Musa 159, 160
Al-Marwazi, Habash Al-Hasib 160
alquimia 27, 28
Al-Rahwi 9
Al-Shirazi, Qutb Al-Din 40
Al-Sufi, Abd Al-Rahman 160
Amontons, Guillaume 99
Ampère, André-Marie 9, 107
Anaxágoras 18-20, 21, 62, 81, 201
Anaximandro 7
Anderson, Carl 143
Antigua Grecia
  astronomía 154-157
  e ideas de la luz 38-39
  e ideas de la materia 18-24
  e ideas de los átomos 20-24
  e ideas del magnetismo 106
  física 7-8
  mecánica 69-71
antimateria 142-143
Aristarco 154-155
Aristóteles 8, 201
  e ideas de la mecánica 69-70, 71
  e ideas del tiempo 196
  y método científico 13
  y velocidad de la luz 59
  influencia en la Europa medieval 10, 26, 42
  e ideas de la materia 22, 23-24
Arkwright, Thomas 83-84
Arquímedes 70
Arrhenius, Svante August 105, 108
Aryabhatiya 158
Aston, Francis 185-186
Astrolabio 161
astronomía *ver también* continuo espacio-tiempo
  e Isaac Newton 174, 175, 176
  en China 153
  en el mundo árabe 158-160, 162
  en el periodo prehistórico 152
  en la Antigua Grecia 154-157
  en la India 157, 158
  en Mesopotamia 153-154, 161
  espectrocopía 180-182
  instrumentos 161
  mediciones 176-177, 182-184
  supernova vista 162-163
  y brillo de las estrellas 184-185
  y cometas 176-179
  y cuásares 189
  y energía en las estrellas 185-186
  y Galileo 171-174, 175-176
  y Johannes Kepler 167-169
  y modelo de Copérnico 163-164, 170
  y modelo ptolemaico 157, 163, 164, 166
  y pulsares 190, 191
  y radioastronomía 186-190
  y Tycho Brahe 165-166, 167
  y uso del telescopio 169-170, 171-172, 175-176, 183
  y Vía Láctea 184
átomos
  descripción 21
  desintegración 136, 137-138
  disputa sobre su existencia 35
  e Interpretación de Copenhague 132-135
  fuerza 136-137
  ideas de estructura de Bohr 122-124
  ideas de la Antigua Grecia 20-24
  ideas del mundo árabe 25-26
  ideas del siglo XVII 28-31
  ideas hindúes 24-25
  modelo de budín de ciruela 120-122
  y antimateria 142-143
  y compuestos 33-34
  y corpuscularismo 27
  y electrones 120, 122-124, 126, 127, 128-131
  y elementos 31-34
  y fisión nuclear 139-140
  y mecánica cuántica 35, 124-137, 141-145, 147
  y neutrinos 135, 143-145
  y neutrones 135-137
  y partícula bosón de Higgs 145, 147, 214-216
  y termodinámica 34-35
Aubrey, John 46, 50
Averroes 26, 72
Avicena 9, 59, 71-72
Avogadro, Amedeo 33

B

Bacon, Francis 10, 59
Bacon, Roger 9-10, 40, 42-43, 59
Baliani, Batista 81
Becquerel, Alexandre 55, 112-113, 114, 137
Becher, Johann 5
Beeckman, Isaac 75
Bernoulli, Daniel 82-83, 94
Berti, Gasparo 81
Bessel, Friedrich 182
Bevis, John 163
Bhaskara 91
Big Bang, teoría del 204-205, 207
Bohr, Niels 122-124, 125, 133, 146
bola que gira 75-76
Boltzmann, Ludwig 35, 122
Bonaparte, Napoleón 13
Bothe, Walter 135
Boyle, Robert 11, 12, 27, 29, 31, 51, 99
Brady, Nicholas 61
Brahe, Tycho 31, 161, 165-166, 167
Brahmagupta 158
Brentano, Franz 35
Broglie, Louis-Victor de 126, 127
Brown, Robert 34
Browne, Thomas 103
Brueghel el Viejo 17
Bruno, Giordano 170
budín de ciruela, modelo atómico de 120-122
Buridan, Jean 72, 73, 163
Burnell, Jocelyn Bell 191

C

Calculadores de Oxford 74
calor
  e ideas del fuego 91-92
  modelo calórico 94-95, 97
  modelo mecánico 94, 95-96
  y cero absoluto 98-99
  y luz 99-101
  y termodinámica 94-99
cámara oscura 41
Cannon, Annie Jump 180, 181-182
Carnot, Nicolas Sadi 96-99
cartesiana, geometría 47
Cassini, Giovanni 59-60, 176
Catálogo Draper de Espectros Estelares 180, 181-182
Cavendish, Henry 104
cefeidas 183-184
Ceres y los cuatro elementos (Brueghel el Viejo) 16-17
cero absoluto 98-99
Cesi, Federico 11, 12
científico, método 8, 9, 10-11, 13, 28, 41
cinética, energía 102
Clausius, Rudolf 96, 97
Códice Dresde 162
cometas 176-179
compuestos 33-34
continuo espacio-tiempo *ver también* astronomía
  y corrimiento al rojo 203
  y energía oscura 213-214
  y hoyos negros 199
  y materia oscura 212-213
  y multiversos 207
  y número de estrellas 205-207

y orígenes del Universo 201-202
y teoría de la relatividad 198, 200
y teoría del Big Bang 204-205, 207
y Universo en expansión 202-204
y velocidad de la luz 200-201
Conversaciones de sobremesa de Pingzhou (Zhu Yu) 106
Copenhague, Interpretación de 132-135
Copérnico, Nicolás 163-164
Coriolis, Gustave-Gaspard de 102
Corpuscularismo 27, 49-50
corrimiento al rojo 203
Cowan, Clyde 143-144
cuadrante 161
cuántica, mecánica 35, 124-137, 141-145, 147
cuásares 190, 206-207
cuerdas, teoría de 216-217
Curie, Marie 113-114, 115
Curie, Pierre 114, 115
Chadwick, James 135-136, 138, 143
Châtelet, Emile du 91, 93
China
astronomía 153
e ideas de magnetismo 106
mecánica 69

D

Dalton, John 33-34, 99, 120
Davy, Humphry 94, 95, 111
De aspectibus (Sobre la perspectiva) (Al-Haytham 39
De Magnete (Gilbert) 106, 155
De Nova Stella (Brahe) 166
Dee, John 170
Demócrito 9, 20, 21, 23, 201
Desaulx, J. 34
Descartes, René
describe el Universo 202
e ideas de la materia 24, 27, 29, 29-30
e ideas de la mecánica 75, 76
e ideas de óptica 44, 45-46
y geometría cartesiana 47
y velocidad de la luz 59, 62
DeWitt, Bryce 207
Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo (Galileo) 173-174
Dicke, Robert 205
Digges, Leonard 45, 169
Digges, Thomas 169-170
dinámica 71-76, 78
Dirac, Paul 130-131, 142-143
Discursos y demostraciones matemáticas sobre dos ciencias nuevas (Galileo) 174
Dokkum, Pieter van 206
Draper, Henry 180
Du Shi 69
dualidad onda-partícula 125-135

E

Eck, Johannes 11
Eddington, Arthur 62-63, 185, 186
Edison, Thomas 186
Einstein, Albert 129
e Interpretación de Copenhague 133-135
y aether 24
y dirección de la luz 62
y dualidad onda-partícula 127-128
y efecto fotoeléctrico 54, 55
y electromagnetismo 109
y método científico 13
y movimiento de moléculas 34-35
y paradoja EPR 133-135
y Proyecto Manhattan 140
y teoría de la relatividad 198, 200
y teoría del Big Bang 204
y teoría unificada 216
y universo en expansión 201-202
y velocidad de la luz 62
electricidad 102-107
electromagnetismo 53-54, 63, 107-110
electrones 120, 122-124, 126, 127, 128-131
elementos 31-34
Empédocles 22, 23, 38, 49, 59, 91
empirismo 28
energía
conservación 90
conversión 90-91, 95
energía cinética 102
energía oscura 213-214
energía potencial 102
y calor 91-92
y electricidad 102-107
y electromagnetismo 53-54, 63, 107-110
y magnetismo 106-107
y movimiento perpetuo 91
y radiación 112-115
y rayos X 110-111, 112-113
y termodinámica 94-99
Epicuro 20-21
esfera armilar 161
espectroscopía 180-182
estrellas
brillo 184-185
cefeidas 183-184
distancias 182-184
energía 185-186
número 205-207
y espectroscopía 180-182, 203
Euclides 38
Euler, Leonard 84
Everett III, Hugh 133, 207
Exner, Felix Maria 34

F

Fabricius, Johann 172
Faraday, Michael 53, 96, 107, 108, 110, 111
Fay, Charles du 105
Fermat, Pierre de 62
Fermi, Enrico 138, 139, 140, 143
Feynman, Richard 90, 141, 145, 146
Filópono, Juan 71
física
descripción 6-7
ideas de la Antigua Grecia 7-8
ideas del mundo árabe 8-9
ideas de la Europa medieval 9-10
y crecimiento de las sociedades científicas 11-13
fisión nuclear 139-140
Fizeau, Hippolyte 61
Flammarion, Camille 179
Flamsteed, John 174-175
Fleming, Williamina 180-181
flogisto 91-92
fotoeléctrico, efecto 54, 55
Foucault, Léon 61-62
Foucault, péndulo de 13
Franklin, Benjamin 103-104, 105
Fresnel, Augustin-Jean 52
Friedmann, Alexander 202-203
fuego 91-92
Fujiwara, Sadiae 163

G

Galilei, Galileo 77
conflicto con la iglesia 172-174
describe la física 6
e ideas de mecánica 75-76, 81
miembro de la Academia Linceana 11
y el experimento de bola que gira 75-76
y medición del tiempo 196
y método científico 10-11
y uso del telescopio 43, 45, 77, 171-172
y velocidad de la luz 59
Galileo (nave espacial) 170
Galvani, Luigi 105
Gamow, George 204, 205
Gan De 171
Gassendi, Pierre 27, 49, 78, 166
Gay-Lussac, Joseph Louis 97, 99
Geber 9
Geiger, Hans 120
Gell-Mann, Murray 106-107, 155
Gilbert, William 141
gluones 34
Gout, Louis Georges 91
gravedad 79, 169
Gravesande, Willem 79, 169
Gray, Stephen 106-107
Guericke, Otto von 29, 33, 103
Gurzadyan, Vahe 207

H

Halley, cometa de 178, 179
Halley, Edmund 174, 175, 176-178

Hamilton, sir William Rowan 84, 85
Hargreaves, James 83
Harroit, Thomas 172
Hartsoeker, Nicolaas 30-31
Hawking, Stephen 35, 216, 217
Heaviside, Oliver 188
Heisenberg, Werner 130-131, 132
Henderson, Thomas 182
Henry, Joseph 107-108, 109
Herón de Alejandría 38-39, 81
Hertz, Heinrich 35, 110, 113
Hertzsprung, Ejnar 183, 184-185
Hertzsprung-Russell, diagrama de 184, 185
Hewish, Antony 189
Hey, James 189
Hidrodinámica (Bernoulli) 82, 94
Higgs, partícula bosón de 145, 147, 214-216
Higgs, Peter 215
Hiparco 71, 155-156
Hipócrates 22
Hittorf, Johann Wilhelm 110
homeómeros 21
Hooke, Robert 11, 12, 51, 174, 196
  e ideas de la luz 47
  e Isaac Newton 48-49, 51
  y astronomía 182
  y Micrografía 11, 12, 48-49
  y microscopio 48-49
Horrocks, Jeremiah 177
Hoyle, Fred 205
hoyos negros 199
Hubble, Edwin 184, 203, 205
Hubble, telescopio espacial 183
Huygens, Christiaan 45
  construye reloj de péndulo 196
  e ideas de la luz 50, 52, 59, 60
  y uso del telescopio 175-176

I

Ilustración, La 27
ímpetu 71-74
India
  astronomía 157, 158
  e ideas de los átomos 24-25
  e ideas de la luz 38
índice de refracción negativo 61
inercia 76, 78

J

Jansky, Karl 188-189
Joliot-Curie, Frédéric 134, 135, 139, 140
Joliot-Curie, Irène 134, 135, 139
Joule, James Prescott 95-96, 99

K

Kanada (Kashyapa) 24, 25
Karlsruhe, Experimento de Neutrinos de Tritio de (KATRIN) 145
Kelvin, lord 56, 96, 99
Kennelly, Edwin 188
Kepler, Johannes 43-44, 72, 77, 79, 167-169
Kleist, Georg von 103

L

Lagrange, Joseph-Louis 33, 84
Lambert, Heinrich 99
Laplace, Pierre Simon 80, 97, 199
Lattes, César 135
Lavoisier, Antoine 18, 31-33, 92, 94-95, 99
Leavitt, Henrietta Swan 181, 183
Leeuwenhoek, Antoine van 45
Leibniz, Gottfried 80, 91
Leigh, David 98
Lemaître, Georges 204-205
lentes 45
Leucipo 20-21, 201
Leyden, botellas de 103
Libro de cuerpos y distancias (Al-Marwazi) 160
Libro del maestro del valle del demonio 106
Linceana, Academia 11-12, 100
Lodge, sir Oliver 186-187
Lorentz, Hendrick 24
luz *ver también* óptica
  como línea recta 62-63
  dualidad onda-partícula 125-135
  elaboración de la teoría de onda 51-54
  ideas de Isaac Newton 49-50
  ideas de la Europa medieval 40-43
  ideas de los siglos XVI y XVII 43-46
  ideas del mundo árabe 39-40
  ideas hindúes 38
  velocidad 59-62, 200-201
  y aether 45-46, 49, 54-58
  y calor 99-101
  y efecto fotoeléctrico 54, 55
  y fotones 54, 55
  y radiación electromagnética 53-54, 63

M

M, teoría 217
Mach, Ernst 85
Magiae naturalis (della Porta) 100
Manhattan, Proyecto 140
Marrison, Warren 196
masa, conservación de la 18, 32
materia
  ideas de la Antigua Grecia 18-24
  ideas de la Europa medieval 23, 26-27
  ideas del mundo árabe 25-26
  ideas hindúes 24-25
  y Anaxágoras 18-20, 21
  y atomismo 20-26
  y teoría elemental 22-23
Maury, Antonia 181
Maxwell, James Clerk 24, 53-54, 96, 98, 108-109, 112, 176
mayas 161
Mecánica analítica (Legrange) 84
mecánica celeste 79-80, 85
mecánica de fluidos 82-85, 86
mecánica
  e ímpetu 71-74
  e Isaac Newton 78-79
  en China 69
  en la Antigua Grecia 69-71, 72
  en la Revolución Industrial 83-84
  en Mesopotamia 68-69
  en Sri Lanka 68
  experimento del túnel 73-74
  ideas de los siglos XVI y XVII 74-76
  ideas de los siglos XVIII y XIX 84-85
  ideas del mundo árabe 78
  inercia 76, 78
  mecánica celeste 79-80, 85
  mecánica de fluidos 80-83, 84
  mecánica estática 72
  momento 76, 78
  y Calculadores de Oxford 74
  y dinámica 71-76, 78
  y Galileo 75-76
  y velocidad 74
medieval, Europa
  e ideas de la luz 40-43
  e ideas de la materia 23, 26-27
  e ideas de la mecánica 74
  física 9-10
  influencia de Aristóteles 10, 26, 42
Mendeleev, Dmitri 32
Mensajero de las Estrellas (Galileo) 172, 173
Mersenne, Marin 59
mesones 135
Mesopotamia 68-69, 153-154, 161
Micrografía (Hooke) 12, 48-49, 51
Michelson, Albert 56-58
Michell, Albert 199
Mill, John Stuart 44
momento 76, 78
Morley, Edward 56-58
movimiento *ver* mecánica
multiversos 207
Muller, Johannes 163
mundo árabe
  astronomía 158-160, 162
  e ideas de la luz 39-40
  e ideas de la materia 25-26
  e ideas de la mecánica 78
  física 8-9
Musschenbroek, Pieter van 103

N

Nagaoka, Hantaro 122
Nernst, Walther 98
neutrinos 135, 143-145
neutrones 135-137
Newton, Isaac 80
  describe el Universo 202
  e ideas de la luz 49-50, 60-61
  e ideas de los átomos 30, 33

e ideas de mecánica 78-80
e ideas de óptica 46-49
e ideas de tiempo 197
y astronomía 174, 175, 176
y corpuscularismo 27
y electricidad 103
y gravedad 79, 169
y leyes del movimiento 78-79
y razonamiento deductivo e inductivo 8
y Robert Hooke 48-49, 51
Nicolás de Autrecourt 26-27
Nordman, Charles 187
Nuevo Órganon de las Ciencias, El (Bacon) 10
Nuevos Experimentos y Observaciones Respecto al Frío (Boyle) 99

O
Occhialini, Giuseppe 136
Ohm, Georg 105
Ohm, ley de 105-106
Óptica (Bacon) 42
óptica *ver también* luz
ideas de Isaac Newton 46-50
ideas de René Descartes 44, 45-46
y creación de lentes 45
y trabajo de Robert Hooke 48-49
Oresme, Nicole 198
Ørsted, Christian 107
oscura, energía 213-214
oscura, materia 212-213

P
paradoja EPR 133-135
Parakrambahu, rey 68
paralaje 181, 182, 183
Parménides 18, 23
partículas subatómicas *ver* mecánica cuántica
partones 141-142
Pascal, Blaise 82
Pauli, Wolfgang 135, 143, 144
Peebles, Jim 205
Penrose, sir Roger 207
Penzias, Arno 205
Perlmutter, Saul 214
perpetuo, movimiento 91
Perrin, Jean 35, 120
Pickering, Edward 180-181
Pitágoras 7, 154
Planck, constante de 126-127
Planck, Max 54, 55, 102
y mecánica cuántica 124
y radiación de cuerpo negro 100-101, 187-188
Platón 8
e ideas de átomos 20, 22, 23
e ideas de la luz 38
e ideas del tiempo 196
Plinio el Viejo 45
Podolsky, Boris 133
Poisson, Siméon-Denis 97
Pope, Alexander 46
Porta, Giambattista della 11, 100
positrón 143
potencial, energía 102
Powell, Cecil 136
Prévost, Pierre 95
Principia (Newton) 174, 177
Pronóstico Eterno (Digges) 170
Pseudo-Geber 26
Ptolomeo, Claudio 39, 62, 156, 157, 161
pulsares 190, 191

Q
quarks 140
químico escéptico, El (Boyle) 26

R
racionalismo 28
radiación 112-115
radiación de cuerpo negro 100-101, 187-188
radioastronomía 186-190
Ramsay, sir William 138
Rankine, William 110
rayos X 110-111, 112-113
Razonamiento deductivo 8
razonamiento inductivo 8
Real Observatorio 174
Real Sociedad 12
Reber, Grote 189
refracción de la luz 62-63
Regiomantus 163
Reimann, Bernhard 200
Reines, Frederick 143-144
Richer, Jean 176
Ridwan, Ali ibn 160
Rodolfo II, emperador 167, 168
Rohault, Jacques 30
Rømer, Ole 59-60
Röntgen, Wilhelm Conrad 110-111, 114
Rosen, Nathan 133
Rumford, Benjamin conde Rumford 95
Russell, Henry 184-185
Rutherford, Ernest 114, 120, 122, 137-138
Ryle, Martin 189

S
Sahl, Ibn 62
samkhya, escuela 38
Scheiner, Julius 187
Schmidt, Maarten 190
Schwarzschild, Karl 197
Shakir, Ja'far Muhammad ibn Musa ibn 160
Shapley, Harlow 184
Shrödinger, Erwin 128-131, 132-133
Skellett, Albert 188
Slipher, Vesto 203
Snell, ley de 62
Snellius, Willebrord 62
Sobre la revolución de las esferas celestes (Copérnico) 163-164
Sobre un método general en la dinámica (Hamilton) 84
sociedades científicas 11-13
Sócrates 19, 20
Soddy, Frederick 136, 137-138
Sri Lanka 68
Stahl, Georg Ernst 91-92
Stonehenge 152
Szilárd, Leó 139-140

T
Tales de Mileto 7, 8, 18, 106
Telescopios 43, 44-45, 77, 169-170, 171-172, 175-176, 183
teoría de onda 51-54
teoría elemental 22-23, 91
termodinámica 34-35, 94-99
Tesla, Nikola 187
Thomson, George 127
Thomson, Joseph John 35, 120-122
tiempo
medición 196-198
y paradoja de Zenón 196, 197
Tomás de Aquino 71
Torricelli, Evangelista 12, 82
Transacciones filosóficas 12
Twain, Mark 179

U
unificada, teoría 216-217
Ussher, James 201

V
vacío, descubrimiento de 29
Vaisheshika, escuela de 38
Vasaba, rey 68
Vedanga Jyotisha 158
velocidad 74
Vía Láctea 184
Vishnu Purana 38
Viviani, Vincenzo 12
Volta, Alessandro 105

W
Wheeler, John Archibald 199
Wilkinson, David 205
Wilsing, Johannes 187
Wilson, Robert 205
Wren, sir Christopher 12, 174
Wright, Edward 155

Y
Young, Thomas 53
Yukawa, Hideki 136-137

Z
Zenón, paradoja de 196, 197
Zhang Heng 69
Zhu Yu 106
Zij Al-Sindh (Al-Khwarizimi) 159
Zwicky, Fritz 212, 213

Créditos por las fotografías

Shutterstock: 6, 7, 17 (x2 abajo), 18,21 (x2 arriba), 43(1), 57 (arriba), 59, 61, 70, 88 (abajo), 89, 122 (abajo), 123 (arriba), 142, 150 (arriba), 158 (abajo), 160, 164, 180

Photos.com: 11, 17 (arriba), 20, 27

Corbis: 14, 36, 58 (abajo), 63, 86, 115, 116, 125, 133, 155, 203, 208

Bridgeman: 21 (abajo), 31, 46, 64, 162 (abajo), 177 (abajo)

Science Photo Library: 30, 32, 39 (arriba), 55 (arriba), 56, 79 (arriba), 92, 96, 100 (abajo), 106, 128 (abajo), 131 (arriba), 132 (arriba), 132 (abajo), 143, 154 (arriba), 171 (centro), 171 (abajo); 183 (arriba), 183 (abajo), 188, 189, 190 (abajo), 192, 197, 200, 202

British Museum: 45 (abajo)

Mary Evans: 156

Topfoto: 68 (1), 83, 84, 158 (arriba), 170

Getty: 75

Clipart: 69, 94

The Nuremberg Chronicle: 8; Rita Greer: 12; Arnaud Clerget: 13 (arriba); *Historia pictográfica* de Joseph G. Gall (1996): 13 (abajo); Rebecca Glover: 24, 47, 179 (arriba); Monfredo de Monte Imperiali, siglo XIV: 25; Johann Kerseboom: 28; Instituto Smithsonian (The Dibner Library Portrait Collection): 34; Girolamo di Matteo de Tauris para Sixtus IV: 38; Nino Pisano: 39 (abajo); Noé Lecocq: 40 (arriba); billete iraquí: 40; Gnangarra: 41 (arriba); Stefan Kühn: 41 (abajo), 136; Biblioteca Apostólica Vaticana: 42; René Descartes: 44 (d); Isaac Newton: 47 (abajo), 48 (arriba), 77, 174; Hooke: 50; Wenceslas Hollar: 51; Christiaan Huygens: 52 (arriba); Gaspar Netscher: 52 (abajo); James Clerk Maxwell: 54 (abajo); Alain Le Rille: 57 (abajo); Falcorian: 58 (arriba); Giulio Parigi: 60; manuscrito de Ibn Sahl: 62; Antoine-Yves Goguet: 66; Tamar Hayardeni: 68 (d); Bill Stoneham: 73; Justus Sustermans: 76; Sir Godfrey Kneller: 79 (abajo); Danielis Bernoulli: 81; Nicolas de Largilliére: 91; *Harper's New Monthly Magazine,* no. 231, agosto 1869: 93; V. Bailly (1813): 95; Peter Gervai: 97; ESA/NASA: 98, 187 (arriba), 198; Scott Robinson: 100 (arriba); Otto von Guericke: 101 (arriba); L. Margat-L'Huillier, *Leçons de Physigue* (1904): 102 (abajo); *Natural Philosophy for Common and High Schools* (1881), p.159 de Le Roy C Cooley: 103; Ryan Somma: 105; Museo Nacional de Arqueología de España: 105 (abajo); Nevit Dilmen: 108 (abajo); *Experimental Researches in Electricity* (vol. 2, lámina 4): 108 (arriba); Arthur William Poyser (1892) *Magnetism and Electricity:* 109; Harriet Moore: 110; George Grantham Bain Collection (Biblioteca del Congreso): 114, 184 (arriba); NASA/JPL: 121 (arriba), 175; Paul Ehrenfest: 123 (abajo); *inductiveload:* 124; Fuerza Aérea de EE.UU.:126; Gerhard Hund: 128 (arriba); Berlin Robertson: 131 (abajo); Instituto Smithsonian: 137; Gary Sheehan (Comisión de Energía Atómica): 138 (abajo); Julian Herzog; 146; ESO/Stéphane Guisard; Simon Wakefield: 150 (abajo); Brian J. Ford, *Images of Science* (1993): 152 (abajo); J. van Loon (c.1611-1686): 154 (abajo); NASA: 159, 214; Dresden Codex: 161; Andreas Cellarius: 163; *Die Gartenlaube:* 167; Museo de Historia y Ciencia Whipple: 168 (d); Thomas Murray: 173; Antonio Cerezo, Pablo Alexandre, Jesús Merchán, David Marsán: 176; Observatorio Yerkes: 177 (centro); *Popular Science Monthly,* Vol. 11: 178; Archivos del Instituto Smithsonian: 179 (abajo); Michael Perryman: 181; NASA/HST: 182 (arriba); Hannes Grobe: 184 (abajo); Napoleon Sarony: 186; Yebes: 187 (abajo); Instituto Astronómico, Academia de Ciencias de la República Checa: 190 (arriba); Museo Barracco: 194; Sandro Botticelli: 196; NASA/WMAP Equipo de Ciencias: 205 (arriba), 212; NASA/Swift/S Immler: 205 (abajo); NASA/ESA, M.J. Lee y H. Ford (Universidad Johns Hopkins): 210; Lucas Taylor: 213; ESA/Hubble y NASA: 215

Wikiuser: Didier B: 74; Tamorlan: 80 (abajo); rama: 90 (arriba); Fastfission: 120; orangedog: 122 (arriba): SkakataGaNai: 144

Autor desconocido: 26, 43, 44 (1), 53(1), 54 (arriba), 104, 121, 162, 165 (d)

Colección Orum

- Breve historia del mundo
- Historia ilustrada de los nazis
- Hitler. "El comandante"
- La historia de la física
- La historia de la medicina
- La historia de la S. S.
- Los Tudor
- Titanic