



Ciencias de la materia:
génesis y evolución de sus conceptos fundamentales

Evolución de los conceptos de la física hasta el siglo XIX



Con un lenguaje claro y preciso, Ignacio Campos y Luis de la Peña, destacados investigadores universitarios, analizan la evolución de los conceptos de la física, desde sus orígenes hasta el siglo XIX.

Este ensayo conduce al lector a un recorrido por el Renacimiento europeo, los inicios de la revolución metodológica, el surgimiento de la física clásica con las aportaciones de Newton, las teorías del electromagnetismo, la noción de campo físico, y la naturaleza del calor y de la estructura de la materia. Estas teorías clásicas, en muchos aspectos, constituyeron las bases para el desarrollo de la física de nuestro tiempo.

Ignacio Campos

Es maestro en ciencias por la UNAM. Ha sido profesor de física y encargado del Seminario de Mecánica Clásica y Electrodinámica en el posgrado de la Facultad de Ciencias de la misma universidad. Ha publicado dos títulos de la colección "La Ciencias desde México".

Luis de la Peña

Estudió ingeniería en comunicaciones eléctricas y electrónica en la ESIME del IPN. Obtuvo el doctorado en ciencias físico-matemáticas en la Universidad Lomonosov de Moscú. Es profesor de licenciatura y posgrado en la Facultad de Ciencias (UNAM). Es también investigador emérito nacional.



EVOLUCIÓN DE LOS CONCEPTOS
DE LA FÍSICA HASTA
EL SIGLO XIX

Videoteca de Ciencias y Humanidades

Colección

Aprender a Aprender

Serie

Ciencias de la materia: génesis y evolución
de sus conceptos fundamentales

COORDINADORES DE ÁREAS Y ESPECIALIDADES:

Luis de la Peña
CIENCIAS DE LA MATERIA
Pablo Rudomín
CIENCIAS DE LA VIDA
Pablo González Casanova
CIENCIAS HUMANAS
Rolando García
TEORÍA Y METODOLOGÍA
Beatriz Garza Cuarón
CIENCIAS DEL LENGUAJE
Raymundo Bautista
MATEMÁTICAS
Hugo Aréchiga
CIENCIAS DE LA SALUD
Felipe Lara Rosano
INGENIERÍAS Y TECNOLOGÍAS

EVOLUCIÓN DE LOS CONCEPTOS
DE LA FÍSICA HASTA
EL SIGLO XIX

Ignacio Campos
y
Luis de la Peña



Universidad Nacional Autónoma de México

Centro de Investigaciones Interdisciplinarias
en Ciencias y Humanidades
Coordinación de Humanidades
México, 1998

IGNACIO CAMPOS FLORES

Maestro en Ciencias por la UNAM. Ha sido profesor de física y encargado del seminario "Mecánica clásica y electrodinámica" en el posgrado de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Ha publicado dos capítulos de la colección "La Ciencia desde México": uno sobre Schroedinger y otro sobre Faraday, así como diversos artículos en revistas de divulgación científica.

LUIS DE LA PEÑA

Primera edición, 1998

Edición científica:

Rogelio López Torres

Diseño de portada:

Ángeles Alegre Schettino y Lorena Salcedo Bandala

D.R. © 1998

Universidad Nacional Autónoma de México

Centro de Investigaciones Interdisciplinarias
en Ciencias y Humanidades

Ciudad Universitaria, 04510, México, D.F.

Impreso en México/Printed in Mexico

ISBN: 968-36-7365-1

Realizó sus estudios de ingeniero en Comunicaciones Eléctricas y Electrónica en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional. Obtuvo el doctorado en Ciencias Físico Matemáticas en la Universidad Estatal Lomonosov de Moscú. Ha sido profesor de licenciatura y posgrado en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Es investigador emérito nacional. Distinguido con la Medalla Académica de la Sociedad Mexicana de Física y con el Premio Universidad Nacional en Investigación en Ciencias Exactas.

EVOLUCIÓN DE LOS CONCEPTOS DE LA FÍSICA HASTA EL SIGLO XIX

*Si Aristóteles hubiera guisado,
mucho más hubiera escrito.*

Sor Juana Inés de la Cruz

EL SURGIMIENTO DEL ESPÍRITU CIENTÍFICO

Atraída en ocasiones por la curiosidad, pero movida más frecuentemente por los apremios de la sobrevivencia, la humanidad ha observado, desde los más remotos tiempos, la naturaleza y actuado en ella y sobre ella. Nuestra civilización actual descansa en el conocimiento de la naturaleza que se ha acumulado a través de milenios de experiencia, observación y raciocinio. Asimismo, el ejercicio de la imaginación y la discusión (con frecuencia entre individuos que no se han conocido, y que pudieron pertenecer a generaciones muy separadas) de las ideas formuladas al respecto han jugado un papel difícil de sobrevalorar.

De los objetos que nos rodean, las estrellas, el Sol y la Luna fueron sin duda algunos de los que más pronto y permanentemente atrajeron la atención del hombre. De esto atestigua, por ejemplo, un cuerno de venado europeo antiguo de 30 mil años con grabados de las fases de la Luna; asimismo, los registros más antiguos de los principales astros, realizados por las culturas asiria y babilónica, datan de hace aproximadamente 6 mil años. La astronomía

occidental tiene su origen remoto en Egipto y Mesopotamia; los asirios y babilonios desarrollaron la astrología, convencidos de que los movimientos de los astros determinaban el destino de los hombres.¹ Con el tiempo la astronomía de Babilonia evolucionó hacia lo que constituye el primer estudio sistemático del mundo físico, merecedor del calificativo de científico; y del cual emergió en su momento toda una técnica aritmética para predecir las fechas de la Luna Nueva. Estos conocimientos y métodos pasaron a formar parte del acervo cultural heredado por los griegos, aunque entre ellos la astrología nunca ocupó un lugar central.

El interés en el estudio de los cielos surgió de la observación de que sus sucesivos ciclos están ligados a los ciclos terrestres (diarios, estacionales y anuales), cuya correcta predicción era determinante para la agricultura y la organización civil y religiosa, además de ayudar a la navegación lejos de las costas, requerida por las demandas del comercio. De manera muy lenta —el proceso requirió de muchos siglos— se pasó de la idea de recurrencia natural al concepto de tiempo, cuya cuenta y registro se ha llevado a cabo en diversas civilizaciones, aunque con variantes características. El calendario romano, del que emergió el gregoriano hoy en uso en gran parte del occidente, deriva del egipcio antiguo, cuyo año solar constaba de 12 meses de 30 días, más 5 días extra al año, más un día adicional cada 4 años. A su vez, el calendario musulmán es puramente lunar, con años que varían entre 354 y 355 días; por lo tanto, las estaciones y los meses no tienen conexión directa (hay aproximadamente 33 años musulmanes cada 32 años gregorianos). El calendario maya y azteca tenía

un año de 365 días dividido en 18 periodos (semanas) de 20 días, más cinco días adicionales al final.²

También la medición y deslinde de la tierra, así como la construcción de obras civiles y religiosas, requieren de trazos y medidas para calcular distancias y ángulos y el uso de instrumentos y herramientas. De los conocimientos prácticos derivados de estas actividades surgieron no sólo técnicas, sino que, transformados en conocimientos abstractos, dieron lugar, a la larga, al desarrollo de la geometría alrededor de 300 años antes de nuestra era (a.n.e.) y a las primeras teorías físicas, como la de las máquinas simples (la palanca, la cuña, el plano inclinado, etc.). Esta transformación de la acción cotidiana en actividad teórica, estimulada por el afán de conocer la naturaleza y sus cosas, aislada en buena medida de su origen y cultivada por sí misma, es lo que constituye el surgimiento del espíritu científico, fenómeno que se da de manera soberbia en la cultura griega a partir del siglo VI a.n.e. con Tales de Mileto como su primer representante, algo así como el primer científico, geómetra y filósofo del mundo occidental —Tales introdujo el término *kosmos*, orden, para referirse al universo.³ El compendio de geometría de Euclides (c. 365-300 a.n.e.) pronto se convirtió no sólo en instrumento poderoso para obtener más conocimientos del mundo, sino en modelo para la sistematización, presentación y enseñanza de ellos. Se trata de un texto que ha sobrevivido más de

¹ Una visión semejante se desarrolló más tardíamente entre las culturas mesoamericanas, las que también alcanzaron buena precisión en la observación y predicción de los movimientos celestes, particularmente la maya.

² La complejidad del calendario surge del hecho de que la Tierra efectúa su revolución alrededor del Sol en 365 días, 5 horas 48 minutos y 46 segundos (que es la duración del año solar), mientras que las fases de la Luna tienen un período de 29.5 días. Por lo tanto, 12 ciclos (meses) lunares (un año lunar) se dan en 354 días 8 horas y 48 minutos. Armonizar estos dos años fue el problema más importante en la elaboración de los calendarios.

³ La palabra griega *kosmos* tiene el doble significado de orden y belleza, lo que dice mucho del espíritu griego. De aquí se deriva *cosmético*.

dos mil años, del que se han hecho miles de ediciones y traducciones a todas las lenguas generales del mundo.

De esta manera, sobre la base de los conocimientos acumulados lentamente, surge en Grecia alrededor de los años 600 a.n.e. una nueva actitud hacia la naturaleza (la *físis*): se trata de comprenderla en sí misma, al margen de la intervención de dioses o espíritus. Esto no quiere decir que todos los que compartían este punto de vista fuesen ateos o impíos —aunque a menudo por tales se les tomó— sino que eran personas convencidas de que existe un orden y un propósito definido para cada parte de la naturaleza, al que los mismos dioses tenían que ajustarse, y se impusieron como tarea buscarlo. Este punto de vista *teleológico* (que asigna un fin a cada cambio o movimiento natural) permeó el pensamiento griego y se mantuvo vigente, particularmente en la biología, hasta no hace mucho tiempo.

La creencia en un orden natural, derivada de la regularidad de los movimientos celestes y estacionales, se reforzó cuando los pitagóricos, alrededor de 500 años a.n.e, descubrieron que los sonidos armónicos están relacionados con la longitud de cuerdas iguales sujetas a la misma tensión mediante fracciones simples, como $1/2$, $2/3$, $3/2$ y sus potencias. Resultaba así, que no sólo los procesos naturales tienen un orden, sino que este orden es expresable mediante relaciones (leyes) matemáticas simples. Esas fracciones o *razones* simples eran para los pitagóricos la *explicación* de la armonía; en breves palabras, razón era a la vez una fracción simple y una explicación. Desde entonces la convicción de la *armonía* como ley de la naturaleza forma parte de nuestra tradición científica, aunque en el caso de los pitagóricos, embelesados con su descubrimiento, la elevaron a la categoría de la ley fundamental. Así, por ejemplo, postularon que las distancias entre la Tierra, el Sol, la Luna y los planetas se ajustaban a la ley armónica, aunque no te-

nían manera de comprobarlo.⁴ Por cierto, los pitagóricos imaginaron también que estos astros giraban alrededor de un “fuego central”, invisible desde la Tierra, que iluminaba al Sol y la Luna. Finalmente concluyeron que la realidad última eran los números, y lo observado, una mera ilusión.

Un momento culminante se da con la fundación de la Academia de Atenas (alrededor de 387 a.n.e.) por Platón,⁵ institución dedicada al desarrollo sistemático de la enseñanza y la investigación, en la que se desarrolló prácticamente todo el trabajo matemático importante de la época y que en sus 250 años de existencia tuviera como más destacado discípulo a Aristóteles. Platón y su escuela desarrollaron una visión semejante a la pitagórica, que postulaba que la realidad esencial de las cosas consiste en ciertas *formas abstractas* que sólo se pueden captar mediante el razonamiento y no por los sentidos. También a semejanza de los pitagóricos, Platón vio en el círculo y la esfera las formas perfectas, por lo que consideró que, dada la perfección de los cielos, los planetas deberían moverse en círculos y las estrellas sobre esferas de cristal. Si tomamos las estructuras numéricas de los pitagóricos y las formas platónicas como análogas a nuestros modernos modelos

⁴ Siglos más tarde, el joven Kepler intentaría fijar las distancias relativas de los planetas al Sol a partir de ajustar sus órbitas a los sólidos platónicos (los sólidos regulares) de la geometría.

⁵ Es interesante señalar que, como es el caso de Cicerón, el Greco o Tartaglia, Platón (que significa ancho, por sus hombros) era un apodo; su verdadero nombre era Aristocles. La palabra *academeia*, a su vez, viene del nombre del héroe ático Academus (o Hekademos), y recuerda que la escuela se construyó sobre terrenos que alguna vez fueron de él. Aunque con una vida modesta, la Academia de Atenas sobrevivió hasta el año 529 de n.e., cuando Justiniano, emperador romano de Oriente, mandó cerrarla para acabar con su paganismo.

matemáticos, diríamos que los platónicos consideraban a la naturaleza como una realización burda y aproximada de los modelos, que vienen a ser lo verdaderamente real. ¿Qué puede ser más perfecto que un número natural? Esta visión, aunque básicamente superada por la ciencia, no ha desaparecido del todo, pues físicos idealistas contemporáneos como Heisenberg han llegado a expresar opiniones semejantes. Sin embargo, es importante mencionar que Aristóteles (384-322 a.n.e.), sin duda el más eminente de los filósofos naturales de la antigüedad, metódico y cuidadoso observador biológico y creador de multitud de ramas del conocimiento, entre ellas la lógica, consideró, contra los conceptos dominantes de racionalidad científica, a la descripción matemática como innecesaria e, incluso, abogó por no emplearla en la descripción del mundo. El pensamiento de Aristóteles, convertido en el curso de los siglos en dogma, dominó la cultura occidental hasta el advenimiento del Renacimiento temprano y en algunos casos, como es el de la lógica (que no sufrió cambio mayor hasta el advenimiento de la lógica simbólica de Boole en 1847-1854) o de la biología, siguió dominando hasta entrado el siglo XIX.

El aspecto de la tradición científica que hemos discutido contrasta con otro, también derivado del pensamiento griego y que se refiere a la creencia de que existe una sustancia común a todos los objetos, que sobrevive a todos los cambios que en ellos ocurren. La idea surge por vez primera con Tales, que ve en el agua (por presentarse en los tres estados sólido, líquido y gas) el elemento universal. A lo largo de los siglos la obtención de nuevos y diversos materiales como metales, vidrio y otros mediante transformaciones por calentamiento, enfriamiento, destilación, etc., condujo finalmente a considerar no uno sino cuatro elementos primordiales o materias primas: el fuego, el agua, la tierra y el aire, como fue propuesto por Empédocles (490-430 a.n.e.). A partir de uno o varios de

estos “elementos” se constituirían todos los objetos del mundo sensorial.⁶

Una controversia surgida respecto a la composición de los objetos fue si sus elementos primordiales se encontraban en ellos en cualquier proporción, lo que llevado a su límite equivale a preguntar si los elementos son infinitamente divisibles. En el contexto de esta discusión surgió la visión de los atomistas, quienes postularon que los objetos están compuestos de átomos, pequeñas partículas indivisibles de diversas formas geométricas y colores, y vacío. El primer atomista fue Demócrito (470-380 a.n.e.), quien concebía a los átomos como las partículas más pequeñas imaginables, eternas, inmutables, indestructibles —el término átomo significa precisamente indivisible. Fuera de ellos, sólo el vacío existía para Demócrito y sus seguidores, como Epicúreo. Este último concepto, el vacío, ha sido desde entonces tema recurrente de la física, que le ha asignado diversos roles según han dictado las necesidades conceptuales del momento.

La herencia cultural que recibimos de los griegos, y que forma parte de la tradición científica, consiste en la convicción de que los fenómenos naturales pueden relacionarse entre sí mediante leyes matemáticas (que incluyen las geométricas), así como la creencia de que la multitud de objetos que pueblan este mundo están hechos de unos cuantos elementos que constituyen los demás. Aparte de esta visión general, la herencia griega incluye algunos resultados iniciales de su programa para la com-

⁶ A cada uno de los cuatro elementos se les atribuían dos de las cuatro propiedades: seco, húmedo, frío, caliente. Aristóteles agregaba a estos elementos un quinto, el éter, incorruptible y etéreo, que llenaría el espacio más allá de la esfera lunar. El término *quinta esencia* se refiere en general a este elemento, etéreo y divino, común entre los filósofos de la antigüedad y que perdurará, con la natural evolución del concepto, hasta el Renacimiento. El misticismo budista toma como quinto elemento al espacio.

prensión de la naturaleza. Por ejemplo, la geometría se aplicó para obtener la razón de las distancias Tierra-Luna y Tierra-Sol y para determinar el radio de la Tierra, si bien en los dos primeros casos con una aproximación muy burda. También conocieron la ley de la reflexión de la luz y fueron capaces de producir tablas de datos sobre la refracción de la luz en el agua. Arquímedes (c. 287-212 a.n.e.), en quien podemos ver una síntesis pionera del matemático y el ingeniero, encontró el principio que explica la flotación de los cuerpos, elaboró con detalle la ley de la palanca, desarrolló el concepto de centro de gravedad e hizo importantes descubrimientos en matemáticas, como su método para encontrar el área bajo ciertas curvas, que representa un antecedente del cálculo integral. La utilización por Arquímedes de métodos cuantitativos para la determinación de pesos y distancias en observaciones científicas representó un paso enormemente avanzado, cuya trascendencia se hizo mayor con la traducción de su obra al latín en 1544, lo que influyó directamente en las investigaciones de la época, en particular, en Galileo.

EL RENACIMIENTO EUROPEO

Este saber casi desapareció de Europa occidental tras la caída del Imperio Romano de Occidente, alrededor del año 500 n.e., con la ayuda de las invasiones de los llamados pueblos bárbaros. Con ello se inicia en Europa la Edad Media y el predominio institucional y cultural de la iglesia católica, que vivía un proceso de desarrollo desde la adopción del cristianismo como religión oficial del imperio romano alrededor del año 300 n.e. Sin embargo, los conocimientos de los clásicos continuaron infiltrándose desde el Imperio Romano de Oriente; en particular, Platón era detalladamente conocido por el gran pensador cristiano San Agustín (354-430, obispo de Hippo, al norte de África,

desde 396), como por los otros padres de la iglesia. San Agustín es importante no sólo por su profundo pensamiento que fundió en una doctrina novedosa la tradición platónica con la religión del Nuevo Testamento, transmitida hasta el protestantismo renacentista, sino porque su actitud ante la fe y la razón abrió el camino a otros pensadores que se apoyaron en él para lidiar con la frecuente intolerancia de la iglesia. San Agustín consideraba que la razón juega un importante papel en la aceptación de las verdades reveladas por la fe, pues no se puede creer lo que no se entiende. Sus reflexiones sobre la naturaleza del tiempo tienen relevancia para la física, pues representan el surgimiento del punto de vista relacional, es decir, de la noción que ve en el tiempo un sistema de relaciones entre los movimientos de objetos. Por lo tanto, si no hay objetos en movimiento no hay tiempo.⁷ San Agustín consideraba que Dios creó el tiempo al crear el mundo, pero que Dios no existe en el tiempo y en el espacio, como si fuera un objeto más. Algunos siglos más tarde Newton tomaría el punto de vista opuesto para fundamentar las nociones de espacio y tiempo absolutos, como arenas de los acontecimientos.

Hacia el siglo XIII de nuestra era ya se había rescatado prácticamente todo el saber clásico, gracias entre otras cosas a las traducciones de los árabes, quienes mantuvieron vivo el interés por el conocimiento e hicieron aportaciones originales, algunas muy importantes en aritmética, álgebra y ciencias naturales.⁸ Esto propició que se renovara el estu-

⁷ En éste y similares contextos, debe entenderse que el término *movimiento* significa cambio en general, el que puede ser o no directamente visible para nosotros.

⁸ El término *álgebra* viene del título de uno de los libros de los grandes matemáticos y astrónomos musulmanes del medioevo, Muhammad Ibn Musa al-Khwarizimi (780-c. 850), *Kitab al-jabr wa al-muqabalah* (El libro de integración y de las ecuaciones), traducido al latín en el siglo XII.

dio de la naturaleza bajo los lineamientos del pensamiento griego, aunque dentro de los límites impuestos por la iglesia. Este movimiento cultural inspirado en los clásicos griegos y latinos se conoce como el Renacimiento y abarca en su última etapa el periodo que se extiende de 1450 hasta alrededor de 1570, en el que ocurren grandes acontecimientos, como el descubrimiento y conquista por Europa del Continente Americano, la circunnavegación de la Tierra y la emergencia en el norte de Europa del protestantismo. La imprenta, desarrollada entre 1460 y 1480, contribuyó de manera importante a la expansión de este movimiento.

Hacia el final de la Edad Media se inicia un nuevo fenómeno con la aparición de pensadores que estudian con espíritu crítico las teorías de Aristóteles, adoptadas en sus principales aspectos por la iglesia, gracias sobre todo a la obra de Santo Tomás de Aquino (1225-1274). Las concepciones de Aristóteles representan un compromiso entre las de los pitagóricos y platónicos por un lado, con su énfasis en la estructura o la forma, y las de los materialistas, con su énfasis en la sustancia de la que están hechos los objetos. La filosofía de Aristóteles propone que todos los objetos están constituidos por materia y forma;⁹ asimismo, para explicar el cambio introduce la distinción entre potencia y acto. Un objeto cambia porque sus propiedades presentes o actuales se van sustituyendo por sus propiedades posibles o potenciales debido a cuatro tipos de causas: materiales, formales, eficientes y finales. Únicamente Dios no cambia porque es acto puro, sin cualidades potenciales. No necesitamos entrar en los detalles de esta concepción; basta notar que se trata de una explicación amplia de todo, desde los cambios más simples que ocurren en los seres inanimados, hasta la

naturaleza de Dios. Sin embargo, esta explicación genérica tiene el gran mérito de que se da en términos de causas naturales y con gran apego al sentido común.

De las diversas críticas a las nociones aristotélicas, una de particular interés es la que se refiere a la noción de movimiento local, o cambio de lugar de un objeto respecto a la Tierra. Nuestro planeta tradicionalmente era considerado el centro mismo del cosmos y, por lo tanto, absolutamente inmóvil. La física aristotélica clasifica estos movimientos en *naturales* y *violentos*. Entre los primeros destaca el curso de los astros en círculos alrededor de la Tierra, que considera como los únicos cambios que pueden experimentar, pues los cielos, más allá de la esfera de la Luna, son inmutables. Existen además los movimientos de los objetos hacia sus "lugares naturales", como el de una piedra que cae hacia la Tierra, o el fuego elevándose hacia la región etérea. Por su lado, los movimientos violentos requieren siempre de un motor (una fuerza motriz) en contacto con el móvil. El movimiento violento dependerá entonces del motor y de la resistencia del medio, pues no es lo mismo mover un objeto contra la resistencia del aire que contra la resistencia del agua.

Las dificultades comienzan cuando estas ideas se aplican al movimiento de proyectiles, estudios cuyos se realizaron con gran empeño durante el Medioevo y después, por su importancia militar. Como los proyectiles se mueven aun cuando el motor ha dejado de tener contacto con el móvil, la explicación aristotélica tuvo que completarse con la proposición de que no puede existir el vacío. Es el aire que va apartando el proyectil en su movimiento y que pasa rápidamente a ocupar el espacio dejado libre por éste, el que le proporciona el impulso necesario para continuar su movimiento. Los críticos señalaban que si esto fuese cierto entonces el medio en que se mueve el proyectil sería a la vez motor y resistencia al movimiento, además de que este tipo de movimiento sería más eficiente en los medios más densos, lo cual

⁹ La teoría aristotélica según la cual todo cuerpo natural consta de dos principios, uno potencial (la materia primaria) y otro actual (la forma sustancial) se conoce como *hilomorfismo*, del griego *hyle*, materia, y *morphe*, forma.

es contrario a la experiencia. Ésta y otras críticas fueron preparando el terreno para una nueva visión del movimiento local o mecánico, como ahora lo llamamos.

La contribución de algunos pensadores medievales, como el obispo francés Nicolás de Oresme (1325-1382) y el profesor de la Universidad de París Jean Buridan (c. 1300-c. 1385) entre otros, permitió aclarar y precisar los conceptos de velocidad uniforme y de movimiento uniformemente acelerado, así como tratar de explicar el movimiento de proyectiles mediante el concepto de ímpetu. Buridan, en particular, concluyó correctamente que sólo el ímpetu inicial es necesario para generar y mantener un movimiento, en ausencia de fricción (empleando nuestro lenguaje actual). A su vez, el movimiento uniforme se definió como el recorrido de distancias iguales en cada intervalo igual de tiempo, mientras el movimiento uniformemente acelerado se definió como aquél en que se adquiere un incremento igual de velocidad en todo intervalo igual de tiempo. Éstos son ya los conceptos actuales, faltando únicamente las ideas de velocidad y aceleración instantáneas que requieren del cálculo diferencial, desarrollado varios siglos más tarde por Newton y Leibniz. Los conceptos cinemáticos avanzaron lo suficiente como para que se llegara, a partir de las definiciones anteriores, al teorema de la velocidad media, que afirma que un móvil con aceleración constante en un tiempo dado recorre una distancia igual a la que recorrería un móvil que lleva velocidad uniforme igual a la velocidad media del movimiento acelerado, es decir, la mitad de la velocidad final si parte del reposo.

Sin embargo, discusiones como las anteriores se daban todavía dentro del espíritu escolástico, es decir, como posibilidades lógicas, más que como referentes a conceptos aplicables a los movimientos reales. La física de esa época y hasta principios del siglo XVII continuaba siendo esencialmente cualitativa y explicativa, y más de naturaleza libresca que observacional. La sed de explicaciones moti-

vada en la noción de que la física es “la ciencia que nos enseña las razones y causas de todos los efectos que produce la naturaleza”, condujo a la debilidad de introducir causas *ocultas* para explicar fenómenos como el magnetismo y la electricidad, lo que dificultó la requerida separación entre la ciencia y la magia, que seguía siendo considerada por algunos como verdadera ciencia aplicada.

La elaboración de conceptos como los de velocidad y aceleración demandó de la previa clarificación de lo que debe entenderse por espacio (al menos como distancia) y de tiempo. De estos dos, el de tiempo es el más elusivo y su significado difiere en los niveles filosófico, físico, biológico o psicológico. En la física clásica se le trata como la variable independiente por excelencia, en el curso del cual ocurren los eventos; Newton, por ejemplo, lo consideró como algo que fluye de manera uniforme, por sí mismo y en una sola dirección. Sin embargo, se trata realmente de una noción derivada y abstraída de las relaciones de ordenamiento (antes o después) de los eventos; debe ser claro que sólo elementos materiales fluyen, por lo que una expresión como la newtoniana es meramente una metáfora utilizada para expresar una experiencia psicológica, no un hecho físico. No es de extrañar que en la física moderna el tiempo haya perdido su carácter absoluto, como se verá más adelante. La medición del tiempo se realizó, hasta alrededor del año 1000, con relojes de arena, clepsidras (relojes de agua) y cuadrantes solares, cuando aparecieron los primeros relojes mecánicos, aún muy primitivos e inexactos.¹⁰

¹⁰ El reloj de pesas se inventó aparentemente en el siglo IX; a Gerbert de Aurillac (c. 945-1003), un monje francés que se convirtió en el Papa Silvestre II, se le acredita con frecuencia la invención del reloj mecánico (c. 996). En la catedral de San Pablo de Londres se instaló en 1286 un reloj que daba las horas con una campana; el cuadrante de los relojes se agregó en el siglo XIV. La construcción

LOS INICIOS DE LA REVOLUCIÓN METODOLÓGICA

A partir de la publicación en 1543 de *Las revoluciones de las esferas celestes* del astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473-1543) se van delineando los rasgos de la física como la ciencia que ahora conocemos. Por un lado este trabajo retoma el modelo heliocéntrico del (ahora llamado) sistema solar —propuesto por diversos astrónomos donde destaca el filósofo y matemático alemán Nicolás de Cusa (1401-1464)— en el que el Sol ocupa el centro del universo, con los planetas girando a su alrededor en círculos o en movimientos compuestos por círculos. Esta concepción introduce un debate acerca de la naturaleza del conocimiento científico, pues mientras algunos argumentan que dada la inalcanzabilidad de los objetos celestes sólo es posible inventar esquemas de cálculo que permitan predecir los movimientos de estos cuerpos, esquemas que resultan así en esencia arbitrarios, otros conciben el Sol y sus planetas como un sistema real de objetos en interacción, cuyas leyes han de ser develadas. A la primera visión de la ciencia se le conoce como *instrumentalismo* y a la segunda como *realismo*, y el debate sobre estas visiones continúa hasta nuestros días.

Por otra parte, la nueva concepción retoma la tradición pitagórica de relacionar los fenómenos naturales por medio de leyes matemáticas. El mismo Copérnico realizó extensos cálculos para mostrar la enorme simplificación que se obtenía con su modelo, comparado con el modelo geocéntrico propuesto por los astrónomos griegos Hiparco y Ptolomeo (127-151). Por ejemplo, al concluir de sus aná-

lisis que las órbitas de Mercurio y Venus son internas respecto a la de la Tierra, mientras que las de Marte y Júpiter resultan externas, Copérnico pudo explicar de manera simple y natural la existencia de movimientos aparentemente retrógrados de estos planetas, que aparecen al ser vistos desde ciertas posiciones de la Tierra. Así, el astrónomo alemán Johann Kepler (1571-1630), utilizando los excelentes y extensos datos del astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601) y algunos propios, pudo demostrar que los planetas se mueven alrededor del Sol siguiendo meticulosamente tres leyes. Su primera ley encerraba ya una revolución por sí misma, al establecer que los planetas se mueven en elipses, no en círculos, y que el Sol ocupa uno de los focos, no un hipotético centro. El enunciado rompía con el dogma, profundamente arraigado desde Platón, de considerar el movimiento circular como el perfecto y, por ende, el natural, que rige en las regiones perfectas de este mundo, es decir, más allá de la Luna. El rompimiento es tan profundo que resultó difícil de aceptar, incluso para pensadores como Galileo, amigo de Kepler y partidario del sistema heliocéntrico.

Lo que plantea Kepler en lugar del prejuicio del movimiento circular y sus ajustes y reajustes mediante los epiciclos de Ptolomeo,¹¹ es la búsqueda de las leyes que gobiernan los fenómenos tal y como ocurren en la naturaleza, y la idea de que es posible hacer esto tanto con los movimientos terrestres como con los celestes.¹² Éste es el embrión de la idea de una física *universal*, aplicable en todas las regiones del cosmos. Dando un paso adelante, considera la posibilidad de que el magnetismo sea la fuer-

de relojes públicos está íntimamente ligada a la divulgación y propagación entre la población en general de la noción de tiempo, la que aún durante el Medioevo era muy limitada, como lo era también la visión de un futuro.

¹¹ Los epiciclos son arcos de círculo con centro en una circunferencia de mayor diámetro.

¹² El término *ley*, aplicado a las leyes naturales, es moderno y aparece mucho después de Newton. Estos autores usaban términos como *teorema* o *axioma*, según el caso.

za que mueve al sistema solar. En un esfuerzo por colocarnos en la posición en que se encontraba Kepler, podemos sentir la profunda emoción que debió haberle causado descubrir, a partir de sus números en el papel, que los planetas obedecen leyes matemáticas: no sólo que existen leyes de la naturaleza que los cuerpos obedecen, sino que tales leyes son expresables en términos matemáticos y son simples. El de Kepler es uno de los más grandes descubrimientos de la ciencia, que posteriormente Galileo pondría en célebres palabras: "El libro de la naturaleza está escrito en lenguaje matemático".¹³

Otro elemento que se introduce en la tradición científica moderna es la visión mecánico-corpúscular del mundo, elaborada sobre todo por el gran filósofo y matemático francés René Descartes (1596-1650) y aceptada y difundida por Robert Boyle (1627-1691) y Robert Hooke (1635-1703), entre otros. Descartes identifica la materia con el espacio y por lo tanto coincide con Aristóteles en la imposibilidad del vacío. Sin embargo, para él la materia-espacio es corpúscular, sólo que las partículas pueden tener cualquier tamaño, incluso infinitesimal, y llenan todo intersticio posible. En consecuencia el único movimiento posible es en forma de remolinos, uno de los cuales gira precisamente alrededor del Sol, arrastrando a los planetas, mientras otro más pequeño arrastra a la Luna alrededor de la Tierra.

No obstante lo cualitativo de sus modelos, Descartes extrae de su análisis una novedosa ley de conservación: la

cantidad de movimiento¹⁴ se conserva de acuerdo con las leyes de la naturaleza, de forma tal que los movimientos son deterministas; es decir, a partir del impulso inicial (divino para Descartes) el mundo evoluciona siguiendo leyes definidas, por lo que se vuelve predecible. Estas nociones conllevan un principio de inercia y un esbozo de la noción de fuerza, que considera que todo cuerpo en movimiento tiende a seguir una trayectoria recta, de la cual es desviado por la colisión con otros cuerpos. Esta visión mecanicista fue extendida por Descartes a los propios seres vivos, con lo que reduce todos los fenómenos naturales a efectos causados por la materia en movimiento. El mundo se vuelve un mecanismo enorme que Dios puso en movimiento al crearlo, pero de ahí en adelante se mueve por inercia, sin intervención del creador.¹⁵ Ideas análogas se encuentran en Nicolás de Oresme, como consecuencia de su teoría del ímpetu y, más adelante, en Giordano Bruno (1548-1600), el gran filósofo renacentista italiano.¹⁶

¹⁴ La *cantidad de movimiento* se define (en magnitud y dirección) como el producto de la masa del móvil por su velocidad; también se le conoce con el nombre de *momento lineal* o *ímpetu*. Ésta es la cantidad que es directamente afectada por las fuerzas que obran sobre los cuerpos. Que los cambios que se dan en la naturaleza ocurren sujetos a la condición de que algo permanece constante, es decir, a la existencia de *leyes de conservación*, constituye uno de los grandes descubrimientos generales de la ciencia.

¹⁵ Debe quedar claro que la visión mecanicista es, en su momento, muy avanzada, pues representaba un intento serio de explicar las relaciones causales observadas a través de un mecanismo específico. Su limitación es histórica, más que conceptual: en la época de su popularidad las interacciones importantes eran todas mecánicas o reducibles a modelos mecánicos.

¹⁶ En realidad, el único movimiento por inercia es el *uniforme* (de traslación o rotación), y se da sólo en el caso ideal de inexistencia de fricción. En el primer caso se conserva el momento lineal,

¹³ Kepler demostró que la combinación de sus dos primeras leyes de los planetas con la mecánica de Aristóteles (que consideraba erróneamente que la velocidad es proporcional a la fuerza) conduce a que el Sol ejerza sobre los planetas una fuerza que cambia inversamente con la distancia. La mecánica de Newton (con la aceleración proporcional a la fuerza) permitió corregir esto e inferir que tal cambio ocurre en realidad con el cuadrado de la distancia. Lo importante con Kepler no es la ley misma, sino la trascendental intuición de que el movimiento de los astros se puede expresar con leyes matemáticas simples, que nos es dado descubrir.

Otro elemento que pasa a formar parte fundamental de nuestra tradición científica es la experimentación. La introducción del argumento experimental en el discurso científico se atribuye principalmente a Galileo (1564-1642), aunque en Roger Bacon (c. 1214-c. 1294) se encuentra ya un pregonero de este método.¹⁷ Sin embargo, mientras el primero utiliza el experimento controlado para poner a prueba las hipótesis (y, ocasionalmente, sus consecuencias) —procedimiento que con frecuencia se identifica como parte esencial del “método científico”— el segundo aboga por un tipo de experimento que más bien puede servir para sugerir hipótesis. Este último tipo de experimento, casi lúdico, adquiere gran popularidad durante el siglo XVII, que ve surgir también las primeras sociedades científicas. Las actas de estas sociedades, como la Royal Society de Londres,¹⁸ contienen descripciones detalladas de estos “hechos

mientras que en el segundo, es el momento angular el que se conserva. Giordano Bruno se distingue también por haber sido el primero en enunciar claramente el carácter relativo del movimiento. Afirmó, por ejemplo, que para un observador, el punto desde el que observa aparece siempre como fijo.

¹⁷ Roger Bacon era poseedor de una mente universal y enciclopédica y, un ferviente convencido de que el camino al conocimiento científico pasa por la experimentación y las matemáticas, pero la condena eclesiástica de sus libros limitó mucho su influencia. Entre sus contribuciones están el uso de los anteojos para corregir la vista, la proposición de la posibilidad de circunnavegar la Tierra, etc. Debe evitarse confundirlo con esa otra contradictoria personalidad que fuera el jurista y canciller inglés Francis Bacon (1561-1626), autor del *Novum Organum*, libro en que intentaba presentar un nuevo método de razonamiento, en contraposición al lógico discutido por Aristóteles en su *Organon*. Su argumento central era que las leyes de la ciencia deben ser inducidas (no lógicamente deducidas), es decir, abstraídas como generalizaciones realizadas a partir de un conjunto de observaciones particulares.

¹⁸ La Real Sociedad de Londres fue fundada en 1660 y representa una de las primeras sociedades científicas del mundo.

de la naturaleza”. Por otra parte la experimentación estimula la creación y perfeccionamiento de instrumentos, como el telescopio, el microscopio, el termómetro, el barómetro y, por supuesto, los relojes, que alcanzan gran precisión.¹⁹ A su vez, el contar con más variados y mejores instrumentos amplía la capacidad de observación y experimentación, y conduce a mayores y mejores conocimientos.

Una de las contribuciones más importantes de Galileo al desarrollo científico es la extrapolación del experimento a situaciones límite, experimentalmente inalcanzables. Por ejemplo, mediante la disminución sistemática de la fricción llega a la conclusión de que si se eliminaran todas las posibles influencias sobre un móvil, éste se movería con velocidad constante y en línea recta, como lo había afirmado Descartes en su visión general del mundo. Esta afirmación es tan importante que en manos de Newton pasa a constituir poco más tarde la primera ley general del movimiento. De manera análoga Galileo, adoptando las definiciones propuestas por Buridan y Oresme, afirma que si se eliminara la fricción con el aire, entonces todos los cuerpos caerían con la misma aceleración constante, independientemente de su forma, masa o tamaño. Ésta viene a ser la primera ley de la dinámica de los cuerpos que fuera establecida.

¹⁹ Ejemplo de un resultado muy importante obtenido a partir de una observación simple es el invento del reloj de péndulo, que marcó un cambio significativo en la precisión de la medición del tiempo. Galileo observó casi por azar que las oscilaciones (de pequeña amplitud) de un péndulo son isócronas, es decir, que su duración es la misma aunque cambie la amplitud de oscilación (lo que inevitablemente sucede debido a la fricción), y utilizó este hecho para medir intervalos de tiempo contando el número de vaivenes de un péndulo. Poco más tarde (en 1656) el físico y astrónomo holandés Christian Huygens (1629-1695) agregó un péndulo a los relojes de pesas y diseñó un soporte apropiado para mejorar la isocronía, con lo que nació el reloj de péndulo, aún vigente.

En suma, Galileo le da a la tradición pitagórica y platónica un nuevo giro, pues, aceptando que la naturaleza se expresa en el lenguaje de las matemáticas, para él no son éstas la realidad última a la que la realidad captada por los sentidos imita burdamente. Más bien ve en esta última algo extremadamente complejo, a cuyos rasgos más simples se refieren nuestras leyes. A partir de Galileo, es éste el papel principal que juega el experimento en el desarrollo de la ciencia, ligado íntimamente con los esquemas teóricos que se ponen a prueba. Tenemos así, épocas en que el experimento adelanta a la teoría y épocas en que la teoría sugiere experimentos que permiten calar más profundamente dentro de ciertos aspectos de la realidad.²⁰ Sin embargo, la experimentación, o incluso la observación, sin la guía de al menos una conjetura, es prácticamente imposible o estéril.

LA APORTACIÓN DE NEWTON

Después de milenios de experiencia y de argumentaciones y con base en los conocimientos acumulados, particularmente en la obra magna de Galileo, Isaac Newton (1642-1727) crea el poderoso esquema teórico que ahora llamamos mecánica clásica. Esta teoría es presentada por Newton a la manera de la geometría de Euclides, estableciendo ciertas definiciones y proposiciones fundamentales que han de jugar el papel de axiomas, a partir de las cuales se pueden deducir todos los posibles movimientos, tanto de objetos terrestres como celestes. Generalmente se considera que la revolución científica culmina con Newton,

²⁰ También ha ocurrido que un experimento sea motivado por la posibilidad instrumental de llevarlo a cabo, sin que exista una previa sugerencia teórica concreta.

hacia el final del siglo XVII, pues a partir de entonces y hasta comienzos del siglo XX la física se desarrolla bajo las pautas establecidas por los pioneros de la revolución científica. Este periodo corresponde a la física clásica, al que sigue el desarrollo de la física moderna en nuestro siglo.

Los conceptos principales de la mecánica clásica son tiempo, espacio (al que se le asigna la estructura de la geometría euclidiana), masa y fuerza. La masa es una medida de la inercia, que Newton concibe como una fuerza de resistencia al cambio de estado de movimiento, el cual a su vez, se refiere tanto al reposo como al movimiento con velocidad constante en línea recta. La inercia es una propiedad general de los objetos, como lo es la de ocupar cierto espacio, y para una materia dada, crece con la cantidad de ella. Por otra parte, por fuerza se entiende cualquier agente capaz de alterar el estado de movimiento de un cuerpo, es decir, el estado de reposo o de movimiento uniforme. La fuerza describe la interacción de un cuerpo con los elementos de su entorno.

Los axiomas que establece Newton son sus tres leyes del movimiento. La primera de ellas es la ley de inercia de Descartes y Galileo; la segunda ley es la que permite determinar los movimientos debidos a la acción de una fuerza dada, y establece que el cambio en la cantidad de movimiento (medida por el producto de la masa por la velocidad) es igual a la fuerza total que actúa sobre el cuerpo. Por último, la tercera ley establece que a toda acción corresponde una reacción igual y en sentido opuesto (las que actúan sobre el cuerpo actuado y el actuante, respectivamente). Newton demuestra que con estos elementos es posible emprender la investigación de los movimientos de partículas, cuerpos y fluidos. Cuando agrega a ellos la ley universal de la gravitación, es decir, la ley que determina la fuerza gravitatoria entre dos masas puntuales, se encuentra en condiciones de determinar los movimientos de los planetas alrededor del Sol y recu-

perar, como consecuencia de su teoría matemática, las leyes de Kepler.²¹

De acuerdo con la teoría que propone Newton, sobre los planetas *debe* de actuar una fuerza, pues de no ser así se moverían en línea recta y con velocidad constante hasta perderse en las profundidades del espacio, según su primera ley, y no siguiendo trayectorias curvas, como se observa que sucede. Esta fuerza, conjetura Newton, es la misma que hace caer los objetos pesados hacia la Tierra, cuya acción se extiende hasta la Luna y más allá, disminuyendo en intensidad en proporción inversa al cuadrado de la distancia entre los objetos. Aunque otros filósofos antes de Newton habían propuesto ideas semejantes, Hooke entre ellos, es Newton quien, armado con el poderío de su enorme talento y tenacidad y del cálculo infinitesimal que él mismo se había fabricado, demuestra que de esta suposición se pueden deducir las leyes empíricas de Kepler. Y, yendo adelante, explica el origen y comportamiento de las mareas, el movimiento de los cometas y tantos otros fenómenos naturales, terrestres y celestes. Hubiera sido imposible comprobar mejor que las leyes del mundo se escriben con el lenguaje de las matemáticas.

Sin embargo, las ideas de Newton no fueron aceptadas fácilmente, sobre todo por los partidarios de Descartes, para quienes era indispensable una *explicación* que pusiera en claro la *causa* del movimiento planetario, que ellos veían

en los vórtices que llenaban el espacio, mientras que la teoría de Newton propone una ley matemática, pero no una explicación, puesto que descartaban por inaceptable la noción de acción a distancia.²² Esto no significa que no hubiera buscado tal explicación, más bien no la había podido encontrar, por lo que advierte en los *Principia*:²³ “Hasta aquí he explicado los fenómenos celestes y los de la mar por la fuerza de la gravitación, pero no he tratado en parte alguna la causa de esta gravitación.” Y líneas adelante explica: “No he podido todavía deducir de los fenómenos la razón de estas propiedades de la gravedad, y no hago hipótesis alguna.”²⁴

Una vez más nos encontramos ante la vieja disyuntiva: ciencia explicativa o ciencia descriptiva. Muchos han interpretado las opiniones de Newton en el sentido de favorecer una concepción instrumentalista de la ciencia, aunque en su otra obra fundamental, *Opticks* parece opinar que primero se tiene que conocer cómo se comporta la naturaleza para investigar después las razones o causas de este comportamiento. Dice, por ejemplo, que “...es de

²² Esta demanda de *explicación causal* condujo a que en la Universidad de Cambridge —donde Newton produjera su obra— se continuara enseñando la teoría de Descartes aún 40 años después de la publicación de los *Principia*.

²³ La obra mecánica de Newton, que es uno de los libros más influyentes que se han escrito, se intitula *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*; su primera edición se inició en 1687.

²⁴ La afirmación newtoniana de que no hay lugar para las hipótesis en la filosofía experimental debe entenderse en el sentido de que de la observación de los fenómenos se infieren proposiciones particulares, las que se generalizan por inducción. Equivale, por lo tanto, a negar la posibilidad de introducir hipótesis libres, lo que, llevado al extremo, puede limitar la capacidad creativa del investigador. De hecho, Newton mismo no se apegó a su sentencia y en su *Opticks*, por ejemplo, hipotetiza con frecuencia respecto a la naturaleza o causa de los fenómenos que observa.

²¹ Aunque el paso dado con la mecánica newtoniana es muy grande, debe quedar claro que este avance no resolvió el problema que más inquietaba a Kepler, es decir, el de la armonía de las esferas celestes o, en nuestro lenguaje actual, el de especificar qué determina las distancias de los planetas al Sol. Estas distancias están fijadas por las condiciones iniciales en la mecánica de Newton, y éstas son arbitrarias. La respuesta la puede dar sólo una teoría de la formación y evolución del sistema solar en su conjunto. El tema es muy complejo y de actualidad para la cosmología contemporánea, pero aún está en espera de solución.

los fenómenos de la naturaleza de los que debemos aprender cuáles cuerpos se atraen recíprocamente, y cuáles son las leyes y las propiedades de esta atracción, antes que investigar cuál es la causa que produce la atracción..." Y más adelante señala "...Sobre este fundamento no veo dificultad en proponer los principios del movimiento mencionados arriba, pues son de una extensión muy general, y dejo a otros el cuidado de descubrir sus causas..." Por otra parte, encontramos en sus cartas y escritos no científicos que intenta una explicación en términos de un éter, o bien, remite la causa de la gravitación a la actividad de Dios, y rechaza enfáticamente la posibilidad de que un pedazo de materia pueda actuar a distancia sobre otra materia.²⁵

Durante el siglo XVIII brillantes mentes desarrollarán y extenderán las nociones y aplicaciones de la mecánica newtoniana,²⁶ con lo que va emergiendo y conformándose una visión mecanicista del mundo diferente de la cartesiana, pues ahora se admitirán fuerzas de atracción y repulsión que actúan a distancia. En esta concepción, que se convirtió en la visión científica dominante hasta el siglo XIX, todos los fenómenos naturales se pueden reducir en principio a partículas cuyo movimiento está determinado por

la acción de las fuerzas de atracción y repulsión, en conformidad con las leyes de Newton. Este punto de vista se vio reforzado por los notables y numerosos éxitos de la mecánica newtoniana, como la predicción de la existencia de un nuevo planeta, Neptuno, por el astrónomo francés Urbain Le Verrier (1811-1877) en 1846.²⁷ No obstante algunos cabos quedaron sueltos, como la precisión del perihelio de Mercurio, cuyo valor preciso evadía la teoría newtoniana y tendría que esperar hasta nuestro siglo para su elucidación.

LA GRAN ECLOSIÓN: LA FÍSICA CLÁSICA DESPUÉS DE NEWTON

La obra de Newton *Principios matemáticos de la filosofía natural* representa el nacimiento de la física teórica; en esta rama los físicos intentan relacionar diversas leyes matemáticas de fenómenos naturales generales dentro de un esquema matemático deductivo, similar al de la geometría euclidiana. El resultado es que a partir de un número reducido de principios y conceptos fundamentales se hace

²⁵ La fuerza de gravedad de Newton actúa instantáneamente entre dos cuerpos, cualquiera que sea la distancia que los separa, por lo que implica la acción a distancia entre cuerpos, es decir, sin contacto directo. La necesidad de eliminar esta acción instantánea a distancia fue una de las motivaciones que condujeron a la física relativista, como veremos más adelante.

²⁶ De hecho, Newton emplea sólo argumentos geométricos para sus demostraciones, como era usual en su época; en los *Principia* no aparece nunca una variable que represente al tiempo. El paso de esta visión geométrica a la mecánica como hoy la conocemos, cimentada en el análisis matemático, se debe en mucho al gran matemático suizo Leonhard Euler (1707-1783). En el trabajo con el que creó la dinámica de los cuerpos rígidos (como un trompo o un giróscopo, por ejemplo), a los que Euler representaba como un conjunto de puntos masa ligados entre sí, para simplificar la descripción del movimiento el autor

introdujo un sistema cartesiano de referencia (es decir, tres ejes perpendiculares x, y, z que se cortan en un punto y que se consideran fijos en el espacio) y descompuso los vectores (como los de posición, velocidad, fuerza, etc.) en sus componentes cartesianas. Obsérvese que este paso esencial para el desarrollo de la teoría se dio más de 60 años después de la publicación de los *Principia*. Es en este mismo trabajo donde Euler introdujo por vez primera un símbolo específico para denotar al tiempo y escribió (¡por fin!) la segunda ley de Newton en la forma $dp = f dt$, donde dp representa el cambio en el momento, f la fuerza aplicada y dt un pequeño intervalo, un *tempusculum* en su lenguaje.

²⁷ A fines del siglo pasado los astrónomos Percival Lowell y William H. Pickering predijeron la existencia de otro planeta lejano, Plutón, el que fue observado a pesar de su pequeñez en 1930 tras largas búsquedas.

posible deducir lógicamente las leyes de multitud de fenómenos particulares, conocidos o por conocer; en el segundo de estos casos se habla de una predicción teórica, y su validez se estudia mediante el experimento. Un ejemplo histórico de este procedimiento es el descubrimiento de Neptuno por Le Verrier recién citado.

La influencia de la obra monumental de Newton es múltiple. Por un lado la mecánica celeste estimuló el desarrollo de las matemáticas para tratar los detalles de los movimientos del sistema solar. Hay que recordar que la ley fundamental de la gravitación se refiere a la interacción entre dos cuerpos, mientras que el sistema solar está compuesto por muchos cuerpos, lo que conduce a un problema matemático de gran complejidad. Por ejemplo, uno de sus aspectos, el de la estabilidad del sistema planetario, ocupa hasta la fecha a los matemáticos y ha dado lugar a resultados muy importantes en los últimos años.

Por otra parte la mecánica de Newton, que en su forma inicial se refiere a partículas en interacción, tuvo que ser generalizada para tratar el movimiento de cuerpos rígidos y fluidos (tarea que inició el propio Newton). Además, la misma mecánica de partículas se fue reformulando de manera cada vez más abstracta y general para poder tratar sistemas más complejos; en la búsqueda de estas reformulaciones se llegó al concepto de energía mecánica, tanto cinética como potencial, lo que abrió la posibilidad de hacer un análisis complementario al que se obtiene usando las fuerzas, las que poco a poco fueron desplazadas a un segundo plano.²⁸ Otra

reformulación de gran importancia es la iniciada por el joven matemático irlandés William Rowan Hamilton (1805-1865) y desarrollada por el matemático alemán Carl Gustav Jacobi (1804-1851), con la que establecieron una analogía entre la mecánica y la óptica geométrica, según la cual las trayectorias de las partículas pueden asimilarse a rayos de unas hipotéticas ondas. Lo esencial de esta reformulación es que la función única que determina todos los movimientos (y que viene a ocupar el lugar del

más adelante. En su formulación de la mecánica, Lagrange observó la posibilidad de eliminar las fuerzas constrictivas (debidas a las constricciones que operan sobre el sistema), aprovechando que ellas actúan perpendicularmente a las trayectorias de las partículas, por lo que no hacen trabajo y no cambian la energía del sistema. Éste, el sistema, queda completamente caracterizado por una sola función (aún hoy en día llamada *lagrangiana*), la que determina todos los movimientos y que en los casos más usuales se reduce a la diferencia entre las energías cinética y potencial instantáneas. A partir del lagrangiano se construye una nueva función, llamada *acción*, que tiene la propiedad de tomar un valor mínimo precisamente para las trayectorias que siguen los cuerpos. En otras palabras, si la acción se determina para todos los movimientos concebibles, el que arroje el valor menor será el que corresponde al movimiento real. Esto parece introducir un elemento *finalista* en la mecánica, pues ¿cómo sabe el cuerpo cuando está en un punto A, que su destino es un cierto punto B, que puede estar a 100 km y dos horas de distancia, y por lo tanto, “decidir” el camino que optimiza la acción entre A y B? La respuesta es que el cuerpo no sabe nada, sino que sigue a cada instante las leyes de la mecánica; es de éstas de donde sigue como *consecuencia* matemática la propiedad de mínima acción. El valor teórico de este hecho matemático es de primera importancia, pues permite formular la mecánica lagrangiana como un cuerpo teórico de gran generalidad y elegancia. El ejemplo muestra a la vez la diferencia central que existe entre lo que puede tomarse como un principio físico (las leyes de Newton) y uno matemático (la mínima acción) para describir el comportamiento de un sistema físico. Una anécdota refuerza el valor de esta distinción. El primer principio minimal de la mecánica fue descubierto por el físico francés Pierre-Louis de Maupertuis (1698-1759); Maupertuis vio (1752) en el (aparente) finalismo de su enunciado una demostración matemática definitiva de la existencia de Dios.

²⁸ La noción de *energía potencial* (es decir, energía debida a la posición o forma del objeto) fue introducida por Louis de Lagrange (1736-1813); el término general de *energía* se debe a Thomas Young, pero limitado aún al ámbito de la mecánica. La noción de energía como referido a algo capaz de transformarse y manifestarse en diversas formas (mecánica, térmica, luminosa, eléctrica, etc.) se debe a Mayer (alrededor de 1842), de quien nos ocuparemos

lagrangiano²⁹ es el llamado hamiltoniano del sistema, que para los casos usuales se reduce a su energía. En esta forma se dispone de una formulación en la cual la energía instantánea de cada una de las partes de un sistema es la que determina su comportamiento, con total independencia del origen de las energías involucradas.³⁰

Pero mucho más allá de los desarrollos y generalizaciones de la mecánica newtoniana, esta teoría jugó un enorme papel catalizador al servir de estímulo, modelo e inspiración para dar a otros campos de la física una estructura deductiva similar a la que Newton diera a la mecánica. Esta influencia se generalizó y acabó por penetrar profundamente en la mente de los investigadores y filósofos de la época, dando lugar a la emergencia de una visión mecanicista del mundo, según la cual es posible reducir todos los fenómenos naturales a la interacción de partículas mediante fuerzas atractivas o repulsivas que dependen sólo de su distancia de separación. Newton mismo hizo un modelo de este tipo en un intento de explicar lo que se llamaba entonces la “elasticidad del aire”, cuyas predicciones, sin embargo, no concordaban con la ley experimental de Boyle. La explicación correcta de esta ley tendría que esperar el desarrollo de la teoría cinética de los gases, hasta

el siglo XIX.³¹ Durante el transcurso de los siglos XVIII y XIX se fueron creando y desarrollando poco a poco los conceptos e ideas fundamentales que darían lugar con el tiempo a las teorías del electromagnetismo, la óptica y la termodinámica, las que sirvieron de base sólida para el salto a la física de nuestro siglo y la erradicación de la visión puramente mecánica del mundo físico.

ELECTRICIDAD, MAGNETISMO Y ELECTROMAGNETISMO

Los fenómenos eléctricos y magnéticos más elementales se conocen desde la antigüedad, pero bajo la inspiración del nuevo espíritu científico anunciado por Francis Bacon se desató el estudio experimental de estos fenómenos. Uno de estos primeros estudios es la obra *De Magnete*, publicada en 1600 por William Gilbert (1544-1603), médico de Isabel I de Inglaterra y contemporáneo de otro notable isabelino, Francis Bacon, en la que su autor describe diversos fenómenos como la atracción y repulsión de imanes y de cuerpos electrizados, distinguiéndolos claramente. Una de las aportaciones más importantes de Gilbert es el

²⁹ La noción de lagrangiano se discute brevemente en la nota anterior.

³⁰ Aquí aparece la raíz de una corriente que floreció entre los físicos y filósofos del siglo XIX, que consideraba que es posible deshacerse totalmente del concepto de fuerza, y reconocer en la energía y sus transformaciones la causa (no el efecto) de los movimientos. Esta escuela se conoce como *energeticismo* y se vinculó de manera estrecha con el positivismo y el antiatomismo. Algunos de sus creadores —como el destacado químico alemán Wilhelm Ostwald— llevaron esta concepción más lejos, al considerar que la energía es la sustancia primaria de que está hecho el mundo.

³¹ Es más exacto decir que la primera teoría cinética fue propuesta en 1738 por el científico suizo Daniel Bernoulli (1700-1782), quien consideró los gases como compuestos por un número “prácticamente infinito” de partículas en rápido movimiento. Con su teoría Bernoulli pudo derivar la ley experimental de los gases de Boyle y demostrar que la temperatura del gas depende de la velocidad media de sus moléculas, mientras que la presión depende del valor medio del cuadrado de la velocidad, es decir, de la energía cinética de las moléculas del gas. Sin embargo, en la época en que esta teoría fue enunciada la hipótesis molecular de la materia era poco popular y al calor (que no se distinguía con claridad de la temperatura) se le identificaba con un fluido; todo esto, asociado a otros factores, contribuyó a que la teoría cinética de Bernoulli cayera en el olvido.

estudio del campo magnético de la Tierra mediante un modelo que constaba de un imán tallado en forma de esfera (y que Gilbert llamaba *terella*, tierrecilla) y una pequeña brújula para determinar la dirección en que se orienta a lo largo de sus meridianos. Con este modelo Gilbert desechó la idea de que la brújula se orienta hacia el norte porque hay material magnético en la vecindad del polo norte, dando al mismo tiempo una explicación de la inclinación del campo magnético de la Tierra, es decir, del hecho de que una brújula que puede girar sobre un eje horizontal permanece horizontal en el ecuador pero se inclina cada vez más hacia el suelo conforme aumenta la latitud, hasta que en los polos apunta directamente al suelo.³² Con éste y otros trabajos, Gilbert se convirtió en un pionero del método experimental, una especie de Galileo del magnetismo.³³

Por otra parte, la electrización de objetos por frotación, también descrita por Gilbert, fue estudiada de manera sistemática por varios investigadores, quienes distinguieron dos tipos de electricidad (que tomaban usualmente como dos fluidos); una era la electricidad vítrea, asociada con el frotamiento de vidrio, cristal de roca y piedras preciosas, y la otra la electricidad resinosa, asociada con el frotamiento del ámbar, goma laca, seda y copal. Esta distinción entre dos estados de electrización dio lugar a los conceptos

modernos de electricidad positiva y negativa, introducidos por Benjamín Franklin (1706-1790) alrededor de 1750, aunque este investigador era partidario de la teoría de un solo fluido eléctrico, interpretando el estado negativo como la ausencia del fluido. Franklin demostró también con su famoso experimento de la cometa realizado en 1752, la naturaleza eléctrica del rayo, sospechada tiempo atrás, con lo que abrió el campo de investigación de la electricidad atmosférica.

Un invento, la llamada botella de Leyden, que no es sino un condensador o capacitor primitivo, permitió el almacenamiento barato y fácil de la electricidad generada por frotación, con lo cual se avanzó más en la exploración de estos fenómenos.³⁴ Por la misma época se construyeron los primeros electrómetros, lo que permitió avanzar en la cuantificación de los principales conceptos electrostáticos como cantidad de carga, tensión y capacidad, antecedentes de los conceptos modernos de carga, diferencia de potencial y capacitancia.³⁵

Con éstas y otras experiencias como antecedentes el trabajo se dirigió hacia la búsqueda de la ley fundamental de interacción electrostática. Por analogía con la ley newtoniana de la gravitación, se sospechó que la fuerza debe ser proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación. Así fue demostrado experimentalmente por

³² En realidad, la aguja de una brújula no apunta hacia el Polo Norte, sino hacia el polo norte magnético, que no coincide con el anterior. Este hecho fue observado por vez primera por Cristóbal Colón, quien lo reporta en la bitácora de su primer viaje a América, pero lo mantuvo oculto a la supersticiosa tripulación.

³³ Fue Gilbert quien introdujo el término *eléctrico*, tomado del griego *elektron*, para los materiales que hoy consideramos electrizables, como el ámbar. Gilbert propuso asimismo que los planetas (incluyendo la Tierra) son guiados en sus órbitas por la fuerza magnética del Sol, y que mantienen su movimiento gracias a la energía recibida con la luz.

³⁴ El capacitor (o condensador) fue inventado en 1745 en forma independiente y casi simultánea por el científico prusiano Ewald Georg von Kleist y el físico holandés Pieter van Musschenbroek en Leyden. Un juego popular en esa época era recibir el choque eléctrico de una jarra de Leyden.

³⁵ Hacia 1782 Volta propuso la relación $Q = CV$, donde Q es la cantidad de carga, C la capacitancia y V la diferencia de potencial a la que se carga un condensador dado. Por cierto, la distinción entre conductores y aislantes también requirió de ingeniosos experimentos realizados por Stephen Gray (1696-1736).

Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) en 1785, aunque se tenían ya evidencias de ello, ya que esta ley implica que dentro de una esfera conductora hueca no se debe sentir la influencia de la fuerza eléctrica. Observaciones hechas previamente por Franklin, Priestley y Cavendish apuntaban en esta dirección, pero no convencieron tanto como las mediciones directas de Coulomb.

Pasar de la electrostática al estudio de la corriente eléctrica requería de nuevos recursos, pues los chispazos de las botellas de Leyden no permitían hacer gran cosa.³⁶ El paso se dio con la invención en 1794 de la pila eléctrica por el físico italiano Alessandro Volta (1745-1827), a partir de las experiencias realizadas por Luigi Galvani (1737-1798) en 1791, en las que observó que el contacto de metales diferentes hacía contraer ancas de rana utilizadas para sus estudios de fisiología. Galvani interpretó sus observaciones como evidencia de una “electricidad animal”, diferente de la electricidad común almacenada en jarras de Leyden. Volta encontró que en realidad el efecto ocurre siempre que dos metales diferentes se ponen en contacto a través de un electrolito, por ejemplo agua salada, y nada especial tenían las ancas de rana, que simplemente servían de electroscopio, es decir, de recurso para evidenciar el paso de la corriente. Con esto Volta no sólo mostró que se trata de un fenómeno físico que no tiene nada que ver con la vida o los tejidos biológicos, sino que de paso inventó la pila eléctrica.³⁷

³⁶ En realidad, además de las botellas de Leyden se contaba con otros dispositivos acumuladores de electricidad estática, como el electróforo de Volta, inventado en 1775.

³⁷ Ambos términos, *pila* y *batería*, vienen del hecho de que se trata de verdaderas baterías de celdas eléctricas en serie, apiladas una sobre otra en su versión original; cada una de ellas produce una tensión de alrededor de un voltio (término derivado de Volta). Pronto se dispuso de baterías capaces de producir hasta 100-200 voltios, o incluso más.

La pila eléctrica pronto se convirtió en un instrumento indispensable de investigación. En 1800 Nicholson logró la electrólisis del agua, es decir, la separación de este compuesto químico en sus elementos (hidrógeno y oxígeno) mediante el paso de la corriente eléctrica. El químico inglés Humphry Davy (1778-1829) pronto aplicó este método al análisis químico y con ello descubrió muchos nuevos elementos, como el sodio y el potasio, que no habían podido aislarse por los medios químicos usuales. Pero sin duda el descubrimiento más notable realizado con la pila eléctrica fue el del físico danés Hans Christian Oersted (1777-1851), quien durante una clase en 1819 observó que una corriente eléctrica desvía la aguja de una brújula. La existencia de una relación entre electricidad y magnetismo se sospechaba desde antes, pues se había observado que a veces los objetos de fierro a los que les caía un rayo se magnetizaban; sin embargo existía el prejuicio de que la brújula debía orientarse en la dirección de la corriente. Oersted observó que en realidad se orienta en la dirección perpendicular.³⁸ Poco después el físico y matemático francés André Marie Ampère (1775-1836) demostró que entre dos hilos conductores paralelos por los que circulan corrientes eléctricas aparecen fuerzas y pudo determinar la ley cuantitativa para esta fuerza, en lo que representa el primer ejercicio de aplicación de las matemáticas superiores a los fenómenos eléctricos y magnéticos. Una consecuencia de la existencia de estas fuerzas es que un circuito con corriente sufre un giro si se encuentra en un

³⁸ En la actualidad es un ejercicio común de laboratorio de secundaria mostrar con limaduras de fierro que las líneas del campo magnético generado por la corriente eléctrica forman círculos alrededor del conductor, descubrimiento debido a Ampère y hecho una semana después de conocer los resultados de Oersted, y que inspiró a Faraday precisamente la noción de *líneas de fuerza* (del campo magnético), iniciándose el proceso de romper con la noción de un mundo puramente mecánico.

campo magnético cuando el plano del circuito no es perpendicular a las líneas del campo. En este efecto se basa el funcionamiento de los motores eléctricos, el primero de los cuales fue construido por Faraday en 1821.

EL SURGIMIENTO DE LA NOCIÓN DE CAMPO FÍSICO

El descubrimiento de Oersted motivó también la búsqueda de un efecto recíproco: si la corriente eléctrica produce efectos magnéticos es de esperarse que un campo magnético pueda producir corriente eléctrica. Este efecto fue buscado arduamente por el químico y físico inglés Michael Faraday (1791-1867) a partir de 1822, pero fue hasta 1831 cuando tuvo éxito. El obstáculo principal para llegar al descubrimiento fue que el efecto se produce únicamente en condiciones no estáticas, pues la corriente se genera sólo cuando *cambia* el flujo de las líneas magnéticas que cortan el circuito eléctrico.³⁹ Este efecto de inducción es el fundamento de la operación de los generadores y de los transformadores eléctricos, cuyo primer prototipo en ambos casos fue construido por el propio Faraday. De hecho, es justo considerar el laboratorio de Faraday en Londres como el semillero donde se gestó la moderna industria eléctrica.⁴⁰

La observación de la inducción electromagnética no fue sino uno de los múltiples e importantes descubrimientos debidos al inigualable talento experimental de Faraday. Otro anterior y muy importante fue el de la ley de la electrólisis, o sea de la descomposición de compuestos químicos por el paso de una corriente eléctrica. Faraday estableció que para liberar un equivalente químico de sustancia es necesario que pase por la celda electrolítica cierta cantidad de electricidad, cantidad que es conocida como constante de Faraday.⁴¹ Este descubrimiento apunta ya al hecho de que todas las sustancias, aunque normalmente neutras, están compuestas de partes eléctricas.

Con el objeto de visualizar lo que sucede alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica, Faraday introdujo el concepto de *líneas de fuerza*, las que son producidas por los cuerpos magnetizados y pasan a ocupar el espacio (en principio, ilimitado) alrededor del material que las genera; al entrar en contacto con los otros cuerpos, estas líneas transmiten la fuerza que tiene lugar. Este concepto fue después ampliado por el propio Faraday al caso eléctrico, por lo que se encontró en condiciones de interpretar que los fenómenos eléctricos y magnéticos son debidos a la comunicación directa de los cuerpos por medio del campo (eléctrico o magnético) que los conecta. Para Faraday desaparecen las acciones a distancia; todos los efectos son mediados por los respectivos campos. Estos conceptos fueron recogidos y generalizados por el físico y matemático escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), quien los usó como punto de partida para introducir el concepto de *campo electromagnético*, idea central en su teoría. A partir de 1856 Maxwell inició su trabajo de matematización de las concepciones cualitativas de

³⁹ Es indiferente si las variaciones se deben a que la posición o la orientación del circuito cambian respecto del imán, o a que el propio campo magnético cambia. El primer caso es típico en los generadores eléctricos y el segundo, en los transformadores (que no contienen partes móviles).

⁴⁰ Es famosa la anécdota de la Reina Victoria preguntándole a Faraday para qué sirve eso, cuando le mostró alguno de sus múltiples inventos científicos (tal vez el generador eléctrico), a lo que contestara: —Majestad, ¿para qué sirve un recién nacido? El laboratorio de Faraday es hoy museo abierto al público.

⁴¹ En términos modernos la constante de Faraday equivale a 96 500 coulomb.

Faraday, para llegar a la conclusión en 1865 de que la luz misma es un fenómeno electromagnético. Un paso esencial para este desarrollo fue la introducción por Maxwell de la *corriente de desplazamiento*; ésta se produce cuando un campo eléctrico varía en el tiempo⁴² y tiene el mismo efecto que una corriente de conducción, en cuanto que ambas generan un campo magnético. De esta observación fundamental de Maxwell sigue que un campo eléctrico que varía en el tiempo produce un campo magnético que varía en el tiempo, que a su vez produce por inducción un campo eléctrico que varía en el tiempo, y así sucesivamente. La consecuente perturbación que se propaga en el espacio es lo que constituye una onda electromagnética, y Maxwell encontró que la velocidad de estas ondas coincide con la velocidad de la luz, con lo que identificó a la luz como una onda electromagnética. La producción y detección de estas ondas en el laboratorio fue lograda por Heinrich Hertz (1857-1894) en una serie de experimentos realizados entre 1886 y 1889 (varios años después de la prematura muerte de Maxwell). Estos experimentos abrieron las puertas a las comunicaciones inalámbricas con que contamos hoy en día, y que constituyen una de las características de nuestra civilización.

La conclusión alcanzada por Faraday y Maxwell de la existencia de los campos como parte integral de la naturaleza es uno de los mayores descubrimientos científicos, y sin duda puede calificársele como el más revolucionario de los descubrimientos de la física del siglo XIX, tan llena de grandes resultados y descubrimientos básicos en

las ciencias.⁴³ Basta que pensemos en el calor que nos brinda un rayo de luz y en los maravillosos colores que vemos cotidianamente a nuestro alrededor para que estemos en condiciones de percibir la realidad —tan real como la de cualquier objeto que podamos tocar— del campo electromagnético. Se trata en este caso de un campo que, para ciertas frecuencias de vibración, es capaz de afectar nuestros sentidos y de ser percibido directamente por nosotros, como también podemos percibir el peso de una piedra colocada en el campo gravitatorio producido por la Tierra. En general, sin embargo, nuestro organismo no nos permite percibir los campos en el nivel de nuestra conciencia, aunque su existencia sea tan real como lo es la de la materia atómica. Ésta es la gran conclusión heredada del siglo pasado: el mundo en que vivimos está formado no sólo por lo que llamamos usualmente la materia, es decir, materia de naturaleza atómica, sino que existen también una serie de campos físicos —como el electromagnético y el gravitatorio— que se manifiestan a través de su interacción con la materia atómica.⁴⁴ Para algunos pensadores este dualismo es inadmisibles de principio, e implica que la física actual no ha profundizado lo suficiente en su

⁴² Este campo eléctrico variable puede darse en el vacío, en un dieléctrico (un aislador) o incluso un conductor; en todos los casos el efecto asociado es un campo magnético en la vecindad. Un ejemplo simple de corriente de desplazamiento es la debida a los cambios en la polarización eléctrica del dieléctrico de un capacitor al cargarlo y descargarlo; obviamente, en este caso no hay corriente de conducción, asociada al flujo de electrones (o de iones si se trata de un electrolito).

⁴³ Tan profundo sentido físico tenía para Maxwell el campo electromagnético, que lo vio como generador de las cargas y las corrientes eléctricas. Más tarde Helmholtz y sobre todo Lorentz, invierten la relación, para considerar las cargas y las corrientes como las generadoras del campo. Éste es el punto de vista actual.

⁴⁴ Además de los dos campos mencionados, la física moderna reconoce otros dos, los que reciben el nombre de *fuerte* (o nuclear) y *débil*, por su intensidad relativa a la de las interacciones electromagnéticas. Se cree —o se espera, al menos— que algún día será posible reducir todos estos campos a cuatro diferentes manifestaciones de un único campo universal. La construcción de una teoría de unificación que logre este propósito constituye el principal programa de la física teórica contemporánea, parte importante del cual ha sido ya alcanzado.

comprensión del mundo físico, el cual debería emerger, en su totalidad de un elemento único: o bien un campo que genera el resto de elementos, incluyendo la materia, o bien un muy reducido número de constituyentes de la materia (las llamadas partículas elementales) que de una u otra forma dan lugar al resto de elementos.⁴⁵

LA NATURALEZA DEL CALOR Y LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA

El fuego es uno de los fenómenos naturales más importantes y no es de extrañar que los primeros filósofos lo hayan considerado como uno de los elementos fundamentales que componen todas las cosas. Mediante el fuego o el calor se funden los metales y se prepara el vidrio,⁴⁶ se evaporan líquidos, se producen algunas reacciones químicas como la combustión y se originan algunos fenómenos atmosféricos.

Como ha sucedido con el resto de la ciencia, los conceptos para comprender los fenómenos asociados al calor se fueron creando poco a poco, con las aportaciones de muchos estudiosos y no sin tropiezos. Dos conceptos clave son los de calor y de temperatura, pero se requirió de mucho tiempo y trabajo para distinguirlos con claridad.

Encontramos ya en 1610 un termoscopio de gas que permitía apreciar los cambios de temperatura, diseñado por Galileo. Este tipo de instrumentos pronto evolucionó hacia los termómetros, para cuya construcción se usaban diversas y arbitrarias escalas; por ejemplo, el físico alemán-holandés Fahrenheit introdujo en 1714 el termómetro de mercurio y su escala, todavía en uso.⁴⁷ Es claro que escalas uniformes en termómetros hechos con diferentes materiales no coinciden en general fuera de las temperaturas de referencia, por lo que se hace necesario un procedimiento teórico que permita *definir* la temperatura independientemente del dispositivo. Esto explica que el concepto de temperatura haya ido evolucionando hasta su forma actual, alcanzada a comienzos de nuestro siglo con el enunciado por Nernst de la llamada Ley Cero de la termodinámica, que define la temperatura como la propiedad que tienen en común sistemas en equilibrio térmico. Por otra parte, el calor queda definido como la energía transferida debido a una diferencia de temperaturas. Con esta terminología contemporánea, no es lo mismo aumentar la temperatura de un cuerpo que calentarlo. Por ejemplo, al

⁴⁵ El principal impulsor contemporáneo de esta línea de pensamiento fue Einstein; en la teoría general de la relatividad el campo gravitatorio es una manifestación de la estructura del espacio-tiempo, la que a su vez está determinada por la distribución de la materia y la energía. La visión (propia de los energeticistas) del mundo físico como manifestación de la energía, es antecedente histórico de las teorías que ven en algún campo universal, el ingrediente fundamental y unificador.

⁴⁶ El vidrio como hoy lo conocemos data básicamente de la época tolemaica (alrededor de 300 años a.n.e.) en Alejandría. En las ruinas de Pompeya hay baños con ventanas de vidrio.

⁴⁷ Newton sugirió utilizar como temperaturas de referencia la de congelación del agua pura y la del cuerpo humano y dividir el intervalo en doce partes iguales; Fahrenheit usó esta norma, pero a partir de una mezcla de agua, hielo y sal para bajar la temperatura, dividiendo el intervalo entre ésta y la temperatura normal del cuerpo humano en 96 partes iguales, que son las 12 de Newton divididas cada una en 8 partes, lo que permitía la mayor precisión alcanzada con los termómetros de mercurio. El astrónomo sueco Anders Celsius usó como referencia (1743) las temperaturas de congelación y de ebullición del agua pura, a las que asignó finalmente los valores 0 y 100 grados, con el intervalo dividido en partes iguales. El resto son ajustes pequeños de la escala. Respecto al termómetro de Celsius hay una anécdota interesante. Su escala inicial asignaba 0 grados al punto de ebullición y 100 al de congelación del agua; se dice que fue su técnico el que, al preparar el dispositivo, protestó por lo antinatural de la selección y la invirtió.

calentar un trozo de hielo su temperatura no sube, sino que la energía suministrada se utiliza para licuarlo. O bien, al suministrar la misma cantidad de calor a un volumen de agua o a su doble, la temperatura se incrementa el doble en el primer caso.

Acerca de la naturaleza del calor coexistieron durante varios siglos dos concepciones en pugna. Una, que discutiremos con detalle más adelante, se remonta a los atomistas, quienes concebían el calor como resultado de un movimiento agitado (y microscópico) de los átomos. La otra surge en el siglo XVIII con el químico francés Antoine Lavoisier (1743-1794), a partir de sus estudios de la combustión y la calcinación de metales. Estos fenómenos eran entendidos desde alrededor de 1700 en términos de una hipotética sustancia, el *flogisto*, que supuestamente se desprendía de los metales al calcinarlos. Mediante la medición cuidadosa de las sustancias reaccionantes y su apropiado confinamiento, Lavoisier infirió la conservación de la masa y concluyó que los metales se combinan con el aire para formar óxidos. Al calcinar un metal, Lavoisier comprobó que no perdía peso como sería el caso al perder flogisto, sino que lo ganaba, debido a la parte del aire adquirida. Fue Joseph Priestley (1733-1804) quien encontró que en la formación de óxidos metálicos no interviene todo el aire, sino un componente que Lavoisier llamó oxígeno, es decir, generador de óxidos.⁴⁸ Con esta comprensión de la combustión y de otras reacciones químicas, Lavoisier estableció que toda sustancia puede, en principio, presentarse como sólido, líquido o gas. La diferencia entre estos estados o fases, la explicaba como debida al contenido de un fluido hipotético que identificaba con el calor y al que llamó

calórico.⁴⁹ Habiendo establecido la conservación de la cantidad de sustancia, o de la masa, Lavoisier supuso la conservación del calórico, aunque éste carecía de peso.⁵⁰

Quedaba por establecer la relación entre calórico y temperatura.⁵¹ La hipótesis más simple es suponer que la cantidad de calor es proporcional a la temperatura, de manera que el calórico pasa de manera natural de los cuerpos de mayor a los de menor temperatura.⁵² Esto parecía confirmarse en los experimentos de mezclas en que se

⁴⁹ Es interesante la frecuencia con que los científicos han recurrido a los fluidos imponderables (calórico, uno o dos fluidos eléctricos, éter) como recurso para explicar diversos fenómenos naturales. El mismo Gilbert sumó sus propios *effluvia* para explicar toda clase de interacciones, incluyendo las que transfieren las infecciones, aunque no el magnetismo, pues éste actúa a través de cuerpos densos sin cambio apreciable. El flogisto puede incluirse en la lista, aunque no se le consideró imponderable. La crítica más frecuente a estas nociones partía precisamente de la supuesta imponderabilidad. Es interesante recordar otro fluido, cuya noción surgió desde Aristóteles y fue particularmente popular en el medioevo; nos referimos al llamado *espíritu*, que se le concebía como un fluido extremadamente volátil que servía de enlace entre el cuerpo y el alma. Descartes consideraba que era la glándula pineal la que ponía en movimiento este espíritu.

⁵⁰ Como anécdota que no carece de valor actual, resulta interesante recordar la famosa respuesta que se dice recibió Lavoisier del oficial de la Revolución Francesa que lo arrestaba (finalmente se le guillotiné), cuando reclamó que era un científico: "La República no necesita científicos".

⁵¹ El químico escocés Joseph Black (1728-1799) estableció desde aproximadamente 1760 la necesidad de distinguir entre la *cantidad* de calor y su *intensidad*, esta última medida por la temperatura.

⁵² La relación es de la forma $Q = mc \Delta T$, donde Q es la cantidad de calor transferido, m es la masa, c es el calor específico del cuerpo y ΔT el cambio de temperatura producido. El factor m se debe a que se requiere más calor para calentar mayor volumen (mayor masa) y el factor c toma en cuenta la diversidad de comportamiento de los materiales; no cuesta lo mismo calentar agua que el mismo volumen de aceite, por ejemplo.

⁴⁸ Sería mejor decir *generador de ácidos*, pues Lavoisier creía equivocadamente que todos los ácidos contienen oxígeno.

combinan en un recipiente térmicamente aislado dos líquidos de diferente temperatura, si se suponía que la cantidad de calórico cedida por el líquido de mayor temperatura es exactamente la misma que la cantidad de calórico absorbida por el líquido de menor temperatura. Con base en éstos y otros conceptos y los fenómenos en que intervienen, se concluyó que el calórico es un fluido que no puede crearse ni destruirse, sus partes se repelen entre sí pero son atraídas por la materia, y puede elevar la temperatura de un cuerpo o bien combinarse con la materia de forma que queda latente y no produce un cambio de temperatura, como ocurre durante las transiciones de fase (como la fusión, la evaporación, etc.).

Fue el estudio de las máquinas térmicas, creadas por los técnicos sin participación inicial de los científicos, lo que conduciría a los siguientes avances en la comprensión de los fenómenos relacionados con el calor. El primer gran paso lo dio un joven ingeniero militar francés, Sadi Carnot (1796-1832), quien escribió en 1824 su única y gran obra, *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*, en la que proponía varios conceptos para comprender el funcionamiento de las máquinas térmicas y, en principio, hacerlas más eficientes. Uno de estos conceptos es el de *proceso reversible*, que es una idealización de los procesos reales y puede verse como el límite de éstos, a la manera en que Galileo introdujo los movimientos sin fricción. Según Carnot, una máquina en la que todos los procesos son reversibles toma calórico de una fuente caliente, realiza trabajo y pasa la misma cantidad de calórico a una fuente fría, pudiéndose invertir exactamente los procesos de manera que la máquina, funcionando ahora como refrigerador, extrae de la fuente fría, al recibir la misma cantidad de trabajo que antes produjo, la misma cantidad de calórico que antes le cedió y la transfiere a la fuente caliente; de esta manera, la máquina y las fuentes quedan en el mismo estado inicial. En esta obra Carnot introduce el concepto

de *trabajo* (más explícitamente: *trabajo mecánico*) que poco más tarde tomará James Watt (1736-1819), el gran ingeniero escocés constructor de máquinas de vapor, para medir la capacidad de sus máquinas; ambos calculaban el trabajo realizado por una máquina al alzar una carga como el producto de su peso por la altura levantada.⁵³

Razonando por analogía con las máquinas hidráulicas, Carnot estableció que para que una máquina térmica funcione se requieren al menos dos fuentes con diferente temperatura, para que pueda darse una “caída” de calórico de la temperatura mayor a la menor. No es posible que la máquina, que siempre opera en ciclos, tome calórico de una sola fuente y lo convierta en trabajo, de la misma forma que una máquina hidráulica no puede funcionar pasando agua de una parte de un lago a otra. Estas afirmaciones constituyen el embrión del que más tarde surgirá la segunda ley de la termodinámica.⁵⁴ Por otra parte, Carnot demostró que de todas las máquinas concebibles que operen entre dos temperaturas dadas, las reversibles son las más eficientes, tomando la eficiencia como la razón entre el trabajo realizado y el calórico transferido de la fuente

⁵³ Pronto Watt encontró la necesidad de especificar el tiempo que la máquina tarda en realizar el trabajo asignado; de aquí surgió el concepto de *potencia* como el trabajo que puede realizar la máquina en un segundo. La unidad de potencia que adoptó Watt fue el caballo de fuerza (hp), que sigue en uso para caracterizar los motores (aunque la unidad estándar de potencia es el watt, no el caballo de fuerza). El trabajo mecánico es un concepto muy útil para estudiar las transformaciones de energía; sin embargo, debe quedar claro que se trata de una noción mecánica, que no tiene nada que ver con el sentido que este término tiene en otros contextos, como trabajo mental o trabajo socialmente útil, etcétera.

⁵⁴ La primera ley de la termodinámica establece la conservación de la energía en general; la segunda determina la dirección en que proceden los fenómenos naturales. Por ejemplo, el calor fluye de manera espontánea del cuerpo caliente al frío, nunca al revés; o bien, la fricción siempre produce pérdida de energía útil.

caliente a la fría. Por cierto, la noción de fuente es también una idealización introducida por Carnot, quien definió una fuente como un cuerpo al que se puede extraer o dar una cantidad finita de calórico sin alterar su temperatura, razón por la cual ahora se llama también a las fuentes *termostatos*.

Hacia mediados del siglo XIX las dudas que se tenían acerca del calórico abrieron el camino a otras concepciones sobre la naturaleza del calor. Desde 1798 Benjamin Thompson⁵⁵ (1753-1814) había argumentado que difícilmente el calor puede ser una sustancia, pues como responsable de una fábrica de cañones pudo constatar que por la fricción de la broca contra la pieza de un cañón se podía generar tanto calor como se quisiera, mientras no cesara el movimiento del torno; en particular, se podía generar mucho más que el requerido para que el cañón se fundiera por sí solo, si contuviera tanto calórico. Es más, trabajando con brocas desafiladas se produce aún más calor. Concluyó que el calor no está contenido en la pieza antes de perforarla, sino que debe de ser algún tipo de movimiento producido por la fricción. Una visión similar fue propuesta por el químico, astrónomo y escritor ruso Mikhail V. Lomonosov (1711-1765), fundador de la ciencia rusa, quien iba más adelante al identificar el movimiento del calor como agitación de los átomos (además de ver en la luz un fenómeno ondulatorio). Sin embargo las relaciones cuantitativas entre trabajo y calor no fueron obtenidas sino hasta 1849 por el físico inglés James Prescott

Joule (1818-1889), quien desde 1843 estuvo realizando diversos experimentos (en su laboratorio privado, con instrumentos de alta precisión fabricados personalmente) para determinar el llamado *equivalente mecánico del calor*, esto es, la cantidad de trabajo que es necesario realizar sobre

un gramo de agua para aumentar su temperatura un grado centígrado.

La identificación del calor como una forma de energía y de su convertibilidad en energía mecánica (en ambas direcciones), condujo poco a poco a la noción de que los procesos naturales satisfacen una ley (o principio, en cuanto se trata de un postulado muy general) de conservación de la energía, aunque en esa época se hablaba de la interconvertibilidad de las fuerzas de la naturaleza.⁵⁶ Desde luego, hay muchos científicos asociados con el descubrimiento del principio de conservación de la energía y no faltan discusiones acerca de la prioridad del descubrimiento. Es conveniente recordar al menos dos de estos personajes, por razones diferentes. Uno de los primeros enunciados generales de esta ley se debe al médico alemán Julius Mayer (1814-1878),⁵⁷ quien de la observación de algunos fenómenos en seres vivos, infirió que la energía se conserva al intercambiarse, y pudo incluso estimar (aunque burdamente) el equivalente mecánico del calor.⁵⁸ El otro fue el fisiólogo y físico alemán Hermann Helmholtz (1821-1894), quien en 1847 estableció el princi-

⁵⁶ Entre los avances conceptuales más importantes en el terreno de la física ocurridos en el siglo XIX deben contarse el haber logrado distinguir claramente entre los conceptos de fuerza y energía, por un lado, y de temperatura y calor, por otro.

⁵⁷ La diferencia entre los destinos de Mayer y Joule es impresionante. Mientras los trabajos de Joule tuvieron reconocimiento inmediato y sus resultados pasaron a formar parte de los libros de texto durante su vida, Mayer, aunque recibió algunos reconocimientos importantes, fue relegado y vivió en tal oscuridad, que en una conferencia pública dada en 1858, Liebig discutió el trabajo de Mayer, dando al autor por muerto.

⁵⁸ En la actualidad se conoce con detalle la energía que suministran los alimentos al organismo y que éste usa para crecer y reconstruir sus tejidos, así como para mantener su calor y realizar trabajo. De esta manera se ha podido determinar que es posible describir los procesos

⁵⁵ Benjamin Thompson es más conocido por su título nobiliario bávaro de Conde de Rumford, pese a tratarse de un personaje nacido en Massachusetts.

pio de conservación de la energía como una generalización de la leyes de la mecánica, definiendo la cantidad de calor como la cantidad de energía cinética asociada con el movimiento térmico de los átomos.⁵⁹ El estudio de este movimiento,

vitales desde el punto de vista energético en los mismos términos y con el mismo principio de conservación que se aplican a la naturaleza inanimada. Por ejemplo, hasta alrededor de 20% de la energía calorífica tomada de los alimentos puede ser transformada en energía mecánica por el organismo humano. Asimismo, un individuo gasta cosa de 15 kilocalorías/hora (equivalente a 17 watts aproximadamente) en mantener la temperatura de su cuerpo; su corazón se comporta como una pequeña bomba de unos cuantos watts y, en total, su organismo como una máquina de 60 watts.

⁵⁹ A lo largo de la exposición hemos encontrado varias leyes dinámicas de conservación, como la de la cantidad de movimiento y de la energía. Durante mucho tiempo se trató a cada una de ellas de manera individual y se le consideraba entendida si se le podía enunciar de manera suficientemente general dentro del contexto dinámico apropiado. Por ejemplo, en ausencia de fuerzas la cantidad de movimiento se conserva, pues es la fuerza lo que hace cambiar a esta cantidad. Sin embargo, desde principios del siglo, y gracias en mucho al trabajo de la matemática alemana Emmy (Amalia) Nöther (1882-1935) se conoce un teorema general que establece que cada ley de conservación es el resultado de una propiedad de invariancia, es decir, de una simetría del sistema. Por ejemplo, las simetrías que dan lugar a las dos leyes de conservación mencionadas son: a) la invariancia del comportamiento del sistema respecto a un cambio arbitrario del origen de coordenadas genera la ley de conservación de la cantidad de movimiento; b) la invariancia del comportamiento del sistema respecto a un cambio arbitrario del origen del tiempo (en otras palabras, que las leyes del sistema no dependan del tiempo) da lugar a la conservación de la energía. Un tercer ejemplo es el del momento angular de rotación; esta cantidad se conserva si la descripción del sistema es invariante respecto a rotaciones arbitrarias del sistema de referencia. Esto sucede, en particular, cuando el sistema (incluidas las fuerzas externas) posee simetría de rotación. La gran ventaja de estos enunciados es su generalidad y son un ejemplo simple de la importancia que el conocimiento de las simetrías de un sistema tiene para averiguar sus propiedades dinámicas. En otras palabras, para establecer la relación que existe entre las propiedades geométricas de un sistema (en un sentido general) y su comportamiento dinámico.

concebido como un baile azaroso de átomos y moléculas, es uno de los objetivos de la mecánica estadística, que a partir de esta época comenzó a cultivarse en paralelo con las otras teorías, aplicada al estudio de los gases.⁶⁰

Los resultados de Joule sacudieron a William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907), quien inmediatamente vio una contradicción con las ideas de Carnot, ya que la realización de trabajo en una máquina térmica implica la conversión de una cantidad igual de calor, por lo que a la fuente fría sólo puede pasar *una parte* del calor extraído de la fuente caliente (y no todo, como supuso Carnot). Para resolver esta contradicción Kelvin y Rudolf Clausius (1822-1888) introdujeron la noción de disipación del calor y el concepto de *entropía*. El cambio de entropía se define como el calor transferido dividido entre la temperatura absoluta a la que sucede la transferencia; este cambio puede ser positivo (si el calor entra al sistema) o negativo (si el calor sale del sistema). Un enunciado equivalente a la segunda ley de la termodinámica expresa que cuando un sistema aislado (del medio ambiente) cambia, la suma de los cambios de la entropía de todos sus subsistemas es igual o mayor que cero. En los procesos reversibles la suma es cero, en los irreversibles mayor que cero, pero nunca es menor que cero. Se encuentra además, que la transferencia de calor entre dos subsistemas de un sistema aislado, debida a una diferencia finita de temperatura, va acompañada siempre de un aumento de la entropía.⁶¹ El calor que pasa espontá-

⁶⁰ Esto es lo que constituía la esencia de la Teoría Cinética de los Gases, que representaba la avanzada del pensamiento atomista entre los físicos. Más adelante se regresará a este tema.

⁶¹ La energía fluye espontáneamente en una máquina (o en cualquier caso) de la parte caliente a la fría, y nunca en el sentido opuesto; como el suministro de energía reduce la diferencia de temperaturas (pues enfría la parte caliente y calienta la fría), la disponibilidad de energía para realizar trabajo útil se va reduciendo sistemáticamente. La entropía es una medida de esta pérdida de

neamente de un cuerpo caliente a uno frío se dice que es *disipado*, ya que no se obtiene trabajo de él y representa energía inutilizable. Las ideas de Carnot sobre la operación de las máquinas térmicas quedan reinterpretadas de la siguiente manera: la máquina extrae calor de la fuente caliente; una parte la convierte en trabajo y otra parte la disipa en la fuente fría. Lo que se conserva es la energía total, de manera que el trabajo realizado más el calor disipado es exactamente igual al calor extraído.⁶² Por otra parte, en las máquinas reversibles la disminución de entropía en la fuente caliente es exactamente compensada por el aumento de entropía en la fuente fría, de manera que el cambio total es cero, ya que en la máquina no hay cambio porque trabaja en ciclos y regresa a su estado inicial cada ciclo.

Para la segunda mitad del siglo XIX estaban sentadas las bases para formalizar la teoría de los fenómenos térmicos; la termodinámica quedó constituida como una rama muy general (aunque de naturaleza fenomenológica) de la físi-

disponibilidad de la energía para realizar trabajo útil. De esta manera resulta que durante los procesos de conversión de energía, la energía total se mantiene constante, mientras que la entropía crece; ésta es una manera sintética de enunciar en una sola frase las dos primeras leyes de la termodinámica. De esta manera queda determinado el *sentido* en el que se dan los procesos físicos espontáneamente: siempre en la dirección en que se incrementa la entropía. En términos coloquiales podemos decir que la entropía mide la degradación de la energía, entendiendo este término como referido a la capacidad para realizar trabajo útil (mover una máquina, levantar un objeto, etc.), y que esta degradación conduce a la irreversibilidad de los fenómenos naturales.

⁶² Aquí al trabajo se le está tratando como si fuera energía; de hecho, el trabajo suministrado se convierte en energía. Por ejemplo, al levantar una carga se incrementa en la misma cantidad la energía potencial que el cuerpo levantado tiene en el campo gravitatorio de la Tierra. Esto lo comprobamos al dejar caer el cuerpo, que nos devuelve la energía acumulada como energía cinética o de movimiento. Esta interconvertibilidad se ha usado para definir la energía como *capacidad para realizar trabajo*.

ca. Una de las aplicaciones más importantes de esta teoría fue el tratamiento como sistema termodinámico de la radiación electromagnética encerrada en una cavidad mantenida a temperatura fija. La radiación se encuentra en equilibrio térmico con las paredes de la cavidad y por lo tanto se le asigna la misma temperatura.⁶³ El volumen es el de la cavidad; además, de acuerdo con la teoría electromagnética de Maxwell esta radiación ejerce una presión sobre las paredes.⁶⁴ De esta manera el estado de la radiación en la cavidad queda definido por su volumen, presión y temperatura, como si se tratara de un gas, aunque por supuesto la relación entre las variables es diferente en ambos casos, es decir, la ecuación de estado es diferente. Sin embargo, el tratamiento termodinámico de la radiación resultó un problema complejo que requirió de varias décadas para su solución, y condujo finalmente a la fórmula de Planck para la radiación del cuerpo negro (idéntica a la radiación de cavidad), tema con el que se inicia la teoría cuántica.

Simultáneamente como ya se mencionó, se desarrollaba el tratamiento de los fenómenos térmicos basado en la visión atomista de la materia, aunque tal visión era rechazada por muchos físicos y filósofos importantes debido al auge de la filosofía positivista en esa época. Esta filosofía rechaza toda noción que no esté ligada directamente a lo observable, como desconfiando de la capacidad de la mente humana para captar los rasgos estructurales de la realidad. Sin embargo, físicos como Maxwell y Ludwig Boltzmann sentaron las bases de la mecánica estadística,

⁶³ En efecto, un termómetro colocado en la cavidad medirá la temperatura de la radiación, sin necesidad de estar en contacto con las paredes.

⁶⁴ La presión de la radiación, aunque muy pequeña, puede producir efectos fácilmente observables. Por ejemplo, la presión de la radiación recibida del Sol sobre los gases que rodean a los cometas provoca su cauda al acercársele.

de manera que hacia fines del siglo pasado se disponía de una interpretación atomista de los fenómenos térmicos.⁶⁵ Se concebía que el calor transferido a un cuerpo se distribuye entre sus átomos, donde queda como energía cinética de un movimiento aleatorio o como energía potencial a nivel atómico. La suma de estas energías es la energía interna del cuerpo, la cual puede cambiar por transferencia de calor o por la realización de trabajo. Por otra parte, Boltzmann interpretó la entropía como la medida del grado de desorden a nivel atómico. Así, un cristal (que posee una estructura atómica muy ordenada) tiene menos entropía que un líquido (cuyas moléculas están mucho menos ordenadas), y éste menos que el correspondiente gas

(cuyas moléculas se mueven caóticamente). De esta forma es usual considerar que un enunciado equivalente de la segunda ley es que los procesos naturales se producen en la dirección en que aumenta el desorden.⁶⁶

Estos desarrollos conceptuales, junto a hallazgos experimentales como los espectros discretos de los elementos y las líneas espectrales del Sol y otras estrellas, o el descubrimiento de toda una serie de radiaciones durante la última década del siglo XIX, prepararon el terreno para los avances de nuestro siglo.⁶⁷ Esta etapa comenzó a finales del

inagotable e irregular movimiento de los granos de polen suspendidos en el agua (o de humo en el aire, etc.), que constituyen ejemplos simples de movimiento browniano, tenemos la oportunidad de ver el movimiento molecular a través del efecto del golpeteo de las moléculas del agua (o del aire, etc.) sobre las partículas en suspensión, y que del estudio estadístico de estos movimientos se pueden deducir resultados importantes, como el tamaño de las moléculas y el número de Avogadro. Desde el punto de vista conceptual el paso del estudio fenomenológico de las propiedades físicas de los gases (como se hace en la termodinámica) a su estudio estadístico, es enorme, pues representa un viraje central en los métodos de la física. No se trata ya de seguir en detalle el movimiento de un cuerpo, sino de entender cómo el enorme número de cuerpecillos en movimiento caótico que constituyen al gas determina sus propiedades de bulto, estadísticas, que resultan independientes de los detalles de los movimientos individuales. Estas propiedades estadísticas globales son identificadas con las propiedades termodinámicas, como presión, temperatura, energía interna, etc., que resultan así propiedades *emergentes*, que surgen a partir de las propiedades mecánicas estadísticas del conjunto molecular.

⁶⁵ Maxwell y Boltzmann eran vanguardia de una larga tradición. Uno de los más destacados atomistas fue el pensador jesuita (matemático, físico, astrónomo, geodesta, ingeniero y poeta) de Dubrovnik, Rudjer Josip Boscovich (1711-1787), quien en su teoría fundamental de 1758 concebía la materia como formada por partículas puntuales (todas iguales) en interacción por pares, dependiente de su distancia relativa, de tal forma que no requería del espacio absoluto newtoniano. Tan importante fue la teoría de Boscovich en algunos círculos que la *Enciclopedia Británica* dedicó a ella 14 páginas en su edición de 1801. Entre los químicos, fue John Dalton (1766-1844) quien revivió el viejo atomismo, dándole una forma más actual para explicar resultados básicos de la combinación de los elementos, como la ley de las proporciones múltiples (1803); fue Dalton quien reintrodujo el término *átomo* (es decir, indivisible) tomado directamente de Demócrito. La diferencia central entre el viejo atomismo griego y el de Dalton está en que el primero es puramente especulativo, inventado para satisfacer las necesidades de un gran esquema conceptual del mundo, mientras que el segundo está basado en multitud de resultados de la experimentación y observación química. Sin embargo, la hipótesis de la estructura atómica de la materia siguió siendo rechazada por científicos como Ernst Mach (1838-1916) o Friedrich Wilhelm Ostwald (1853-1932), el creador de la físico-química, y fue apenas entrado el presente siglo cuando se logró demostrarla experimentalmente por Jean Perrin (1870-1942) a partir de las consideraciones teóricas de 1905-1907 de Einstein sobre el movimiento browniano. Lo que Einstein demostró fue que en el

⁶⁶ De esta observación surgió a fines del siglo pasado la idea de que el Universo finalmente alcanzará un estado de total desorden, lo que representaría su "muerte térmica". Esta conclusión resulta apresurada desde la perspectiva del conocimiento actual.

⁶⁷ De manera sucesiva y en ocasiones un tanto fortuita, se descubrieron y estudiaron los rayos catódicos, los rayos canales, los rayos X, la radiactividad natural y sus emanaciones α , β y γ , etc. Desentrañar el origen y naturaleza de estas radiaciones requirió décadas de investigación, pero condujo a los inicios de la física atómica y nuclear.

siglo pasado y su apoyo experimental surgió del estudio de las descargas en gases, de las que los anuncios de gas neón son un ejemplo cotidiano actual. Estas descargas, cada vez con mejores vacíos y con voltajes más altos, finalmente llevaron al descubrimiento de los rayos x en 1895 por el físico alemán Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923); la búsqueda de fosforescencia de rayos x condujo al descubrimiento de la radiactividad natural en 1896 por el físico francés Antoine Henri Becquerel. El estudio de la naturaleza de los rayos catódicos —o sea de las cargas eléctricas que pueden hacerse circular entre electrodos en un tubo al vacío— por Crookes y otros investigadores en la década de 1870, llevó finalmente al descubrimiento, por Joseph John Thomson (1856-1940) en 1897, de los electrones y a su identificación como elementos constitutivos de los átomos: así, aquellas estructuras fundamentales tomadas como indivisibles resultaban compuestas al final de cuentas. ¿De qué otros elementos podría estar hecho el átomo, entonces?

Éstos y otros fenómenos fueron delimitando la capacidad de las teorías clásicas para explicar los nuevos aspectos de la realidad. Tan grande fue el cambio que con frecuencia se dice que 1895 es el año de la ruptura, donde termina la física clásica para dar inicio a la física moderna, o bien, cuando se abren las puertas que dan entrada a la segunda revolución científica, después de la de Galileo y Newton y sus seguidores.

LECTURAS RECOMENDADAS

- Blanché, Robert. 1972. *El método experimental y la filosofía de la física*. México: FCE.
- Butterfield, Herbert. 1957. *The Origins of Modern Science*. Nueva York: The Free Press.
- Carmona, Gerardo et al. 1995. *Michael Faraday: un genio de la física experimental* México: FCE (Colección La Ciencia desde México).
- Córdova Frunz, José Luis. 1990. *La química y la cocina*. México: FCE (Colección La Ciencia desde México).
- García Colín, Leopoldo. 1986. *De la máquina de vapor al cero absoluto*. México: FCE (Colección La Ciencia desde México).
- . 1987. *Y sin embargo se mueven... Teoría cinética de la materia: de la máquina de vapor al cero absoluto*. México: FCE (Colección La Ciencia desde México).
- Gillispie, Charles C. 1960. *The Edge of Objectivity*. Princeton: Princeton University Press.
- Grant, Edward. 1983. *La ciencia física en la Edad Media*. México: FCE.
- Holton, G. y S.G. Brush. 1980 *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Lagemann, Robert T. 1968. *Ciencia física. Orígenes y principios*. México: UTEHA.

Mott-Smith, Morton. 1964. *The Concept of Energy Simply Explained*. New York: Dover.

Peña, Antonio y Georges Dreyfus. 1990. *La energía y la vida (Bioenergética)*. México: FCE (Colección La Ciencia desde México).

Pérez Tamayo, Ruy. 1987. *Acerca de Minerva*. México: FCE (Colección La Ciencia desde México).

Rius de Riepen, Magdalena et al. 1989. *Calor y movimiento*. México: FCE (Colección La Ciencia desde México).

Rojas Garcidueñas, Manuel. 1994. *Introducción a la historia de la ciencia*. México: AGT Editor.

Westfall, Richard S. 1977. *The Construction of Modern Science*, Cambridge: Cambridge University Press.

Lecturas más elementales y muy recomendables han aparecido en la Colección Viajeros del Conocimiento, de Pangea Editores, México. Entre ellas, podemos citar las biografías de Nicolás Copérnico, Tycho Brahe, Isaac Newton, James Clerk Maxwell, entre otras.

Evolución de los conceptos de la física hasta el siglo XIX, de Ignacio Campos y Luis de la Peña, terminó de formarse e imprimirse en la ciudad de México, durante el mes de diciembre de 1998, en los talleres de Signum Editores, S.A. de C.V., Calzada del Hueso 140, Col. Exhacienda de Coapa. Se tiraron mil ejemplares sobre papel bond de 90 grs. y en su composición se utilizaron tipos Optima de 12, 10, 9 y 8 puntos. La corrección de estilo estuvo a cargo de Rogelio López Torres; la lectura de pruebas de Rogelio López Torres y Josefina Jiménez Cortés.