

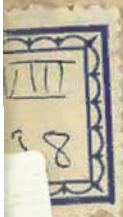
UNIVERSIDAD DE MURCIA

Materia y Radiación

F. Ramón y Ferrando

DISCURSO INAUGURAL

leído en la solemne apertura de curso académico
de 1924 a 1925



A-8
T-1
N. 5

MATERIA Y RADIACION

UNIVERSIDAD DE MURCIA



1628116

EDV

1120

43984

14-VII

4.058

Nº Rº 1,109

UNIVERSIDAD DE MURCIA



Materia y Radiación

F. Ramón y Ferrando

DISCURSO INAUGURAL

leído en la solemne apertura de curso académico
de 1924 a 1925



MADRID.—Imprenta Clásica Española.
Glorieta de la Iglesia de Chamberí.—Teléf. J. 430-



ILUSTRISIMO SEÑOR:

SEÑORES:

L A misión que se nos ha encomendado para el solemne día de hoy es impropia de nuestro temperamento y excesiva para nuestro valer; pero un deber tácitamente marcado nos obliga, aun siendo nuestros estudios poco adecuados para salir airoso de este trabajo.

Por eso que no podremos deleitar al auditorio ni a los lectores con un asunto sugestivo elegido en el campo del Arte, de la Historia, de Sociología, etc., uno de estos temas que sólo el enunciado despierta el interés de millares de lectores. El terreno científico donde estamos afiliados es poco prolífico, y los escasos frutos en él obtenidos no despiertan la emoción que una producción artística, ni el interés inmediato del Derecho y de la Medicina, ni el profundo sentido filosófico que nos cautiva en la Historia. La Ciencia pura verdadera se elabora con la investigación, siempre dolorosa, de la que huye la mayoría de los iniciados; sólo los dotados de la Voluntad persisten en la ruta emprendida; los demás nos limitamos a recoger los materiales por ellos elaborados y darles forma o exponerlos con mayor o menor claridad.

En esta exposición es donde aparece lo que tiene la Física de variable, de capricho o, si se quiere, de adorno: El Arte y la Filosofía, que el espíritu humano pone hasta en sus cosas más nimias. Cuando el afán, el entusiasmo por la Ciencia, es mayor que lo permitido por las disponibilidades científicas, se hace Filosofía. Otras veces es la forma de exposición que, careciendo de armazón, permite amoldarla a un estilo literario. Estas dos mo-

dalidades son las que matizan la Ciencia con un color y un aspecto que dependen de la época histórica en que se trabaja, que no modulan, como cree Spengler, a la Ciencia pura, sino al ropaje con que ella se viste. Tanto es así, que a medida que se hizo más densa la trama científica, el físico se ha visto obligado a concentrar todas sus facultades en su propio terreno, con tal intensidad, que hoy no sería posible a los científicos del Renacimiento cultivar a la vez la Filosofía, ni a Lucrecio encerrar en un poema la descripción del mundo físico, no por su extensión, sino por su consistencia impropia para ser adaptada a la fluidez literaria.

Nos creemos, pues, con lo dicho, excusados de dar a este trabajo el carácter de discurso para el gran público, reduciéndolo a una exposición de materias cuyo interés sólo puede ser asequible a los profesionales del estudio. A ellos va dedicado.

Antes de empezar, dirigiremos un saludo a los compañeros que, obedeciendo a motivos de índole diversa, dejaron de pertenecer a este Claustro durante el curso pasado, que son: El doctor Valls Taberner, cuyas investigaciones sobre nuestra Historia son de un valor inestimable; en el poco tiempo que estuvo entre nosotros, supo con su bondad y simpatía captarse el afecto de todos. El doctor Lomba de la Pedraja: con decir que su vida entera la lleva consagrada al estudio de la Historia Literaria, creemos innecesario indicar aquí sus trabajos, así como su ecuanimidad, sólo adquirible por quien conoce el espíritu humano dibujado por los maestros de la Literatura universal. El doctor Font y Puig, de quien no sabemos si admirar más: sus grandes dotes en saber o su maestría en exponer; ocho generaciones de alumnos se beneficiaron de tan buen maestro, y nosotros nos nutrimos un poco de su ciencia en aquellos asuntos de dominio común. Por fin, para nosotros la pérdida más sensible, por pertenecer a nuestra Facultad, es el doctor Ipiéns Lacasa, de quien nuestra íntima amistad nos priva de encomiar su valer, no reñido con su sencillez, y ponderar aquella actividad y voluntad

prodigiosas que le hicieron indispensable para toda clase de misiones en nuestra Universidad, las que desempeñó tan recta y delicadamente; ocho cursos de labor ejemplar le debe Murcia y nuestra Facultad. De estos compañeros, el primero abandonó la cátedra, como excedente, y los otros tres se trasladaron por concurso a las Universidades de Oviedo, Barcelona y Valencia, respectivamente. Además, dejó de pertenecer voluntariamente a este claustro, donde desempeñaba el cargo de profesor auxiliar temporal, el señor López-Mesas Llanos, después de una intensa y meritoria labor.

A la vez aprovechamos esta ocasión para dar la bienvenida al doctor Díez Lozano, cuyo traslado por concurso a esta Universidad, desde la de Salamanca, nos llevará un elemento que por su mayor experiencia en la cátedra, dada por los años que en ella lleva, será guía y consejo para los que empezamos a vivir la vida universitaria. También enviamos la bienvenida a los señores Hernán-Sáez Meoro y Rubio Esteban, cuyos nombramientos de auxiliares provisionales deseamos que sean elevados a definitivos, de lo que son acreedores por sus méritos.

Podríamos citar la copiosa labor de ampliación universitaria llevada a cabo por nuestro Centro docente con elementos propios y con otros de gran valor procedentes de toda la nación y aun del extranjero, entre ellos el profesor Ettore Pais, quien nos dió un admirable cursillo de historia romana. También en su régimen interior lleva esta Universidad una labor de mejoramiento y ampliación bajo la acertada dirección de la autoridad que la rige.

El progreso actual de la Física

Hemos elegido tema en nuestra propia asignatura porque de sobra existe asunto que pueda interesar a todo intelectual, cualquiera que sea su orientación en el campo del estudio, desde el terreno de la Filosofía hasta el de la ciencias aplicadas. Aun abundando las publicaciones de divulgación referentes a distintos asuntos de Físico-química, es tan rápido el progreso científico de estos últimos años, que con este trabajo pretendemos no ir a la zaga de tales publicaciones. Hace seis años nuestro compañero el doctor Ipiéns elegía un tema análogo; con los perfeccionamientos científicos aportados desde aquella fecha intentaremos nosotros cumplir, aunque modestamente, nuestro cometido.

En este breve lapso de tiempo se ha llegado al conocimiento definitivo de la existencia de dos gránulos de electricidad, positivo y negativo, y con ellos formar el edificio atómico, sin otros materiales complementarios. Puede decirse, pues, que las partículas o corpúsculos ideados por los primeros pensadores son una realidad; por lo menos en cuanto abarea a los medios experimentales de que hoy disponemos. A partir de este resultado, el Universo, en cuanto se trata de materia, es únicamente un juego de los mismos, y casi algo análogo puede asegurarse para la radiación. El descubrimiento de la indivisibilidad de tales corpúsculos, así como de sus constantes características, son los primeros datos para elaborar una síntesis del mundo físico.

Es verdad que el concepto de discontinuidad del mundo exterior, o mejor las ideas *atomísticas*, tienen un arraigo muy antiguo; pero la exposición de las mismas fué siempre meramente especulativa, y la mayor parte de las veces se notaba en ellas

que el impulso que las dió origen fué el afán de separar las causas sobrenaturales de los fenómenos del mundo físico. Hoy, los admirables experimentos hechos en lo que va de siglo, han convertido una especulación filosófica en un colección de datos concretos respecto a los corpúsculos, que iluminan el camino a seguir para formar en época no muy lejana toda una teoría de la Física, desarrollada sistemáticamente a partir de estos datos.

En este sentido puede decirse que la Física alcanzó su época clásica, precedida por el clasicismo de la Mecánica del siglo XIX. El camino recorrido ha sido largo: Galileo, Descartes y Newton abrieron las primeras brechas. Difícil es luego marcar los puntos culminantes de la evolución, la que ha consumido mucho más esfuerzo y ha sido más lenta que la de la Geometría: primero, porque necesitó de ésta para su desarrollo, y segundo, porque los griegos pudieron con sólo la meditación dejarla casi en el estado en que hoy la conocemos; en cambio, sólo nos legaron una Física rudimentaria por causa de que sus medios de experimentación eran casi nulos, y únicamente la Naturaleza, observada groseramente con los sentidos, sirvió de fuente para sus especulaciones.

La radiactividad con sus partículas α y β , lo mismo que con sus rayos γ , y los rayos X en general, usados como instrumento de análisis, han sido los agentes más fecundos de investigación en estos veintitrés años últimos. Comparados los trabajos experimentales de fin del XIX con los efectuados modernamente, se observa un cambio brusco de orientación que ha conducido rápidamente al conocimiento de la estructura de la materia y de las radiaciones; lo que sólo era posible empleando medios de análisis tan sutiles y delicados como son las partículas y rayos antes citados.

Podríamos decir que los experimentos y observaciones del siglo pasado verificados en los laboratorios de Física son *macroscópicos*. A base de ellos se construye una enorme cantidad de cálculo, fecundísimo en sus primeros momentos, pero que culmina en la esterilidad en los últimos años. Luego, el descubrimien-

to de los corpúsculos, la investigación con el espectroscopio, hecha cada vez con más precisión, y los delicadísimos experimentos interferenciales, han llevado al físico al conocimiento ultramicroscópico del Universo, respectivamente en sus tres aspectos de materia, radiación y éter. El salto dado es de gran magnitud, mucho mayor que al enunciar Newton su postulado fundamental de la Dinámica.

Nosotros trataremos de exponer el estado actual de la ciencia, en cuanto se refiere a la radiación, a la materia y a sus relaciones, procurando ponerlo al alcance de lectores que seguramente aportarán distinta preparación. La dificultad estriba principalmente en prescindir de muchas cuestiones que sólo a los físicos pueden interesar, así como de un criterio personal. Sin embargo, la mayor y más difícilmente eludible consiste en despojar todo este discurso de las expresiones algébricas inherentes a gran parte de las cuestiones que en él se tratan; un detalle insignificante da a veces margen a escribir un catafalco de matemáticas. Nosotros, dada nuestra poca competencia para manejarlas, y teniendo en cuenta que este trabajo se dirige en general a lectores cultos, pero no especializados, prescindiremos casi en absoluto de ellas. Nos abona y justifica nuestro proceder el abuso de cálculo, a la moda, hasta para los asuntos más triviales, lo que tiene por origen, más que el afán de claridad, el prurito de encubrir unas muletas con un marchamo de erudición.

Insistiremos antes de entrar en materia, dando una ligera idea del asunto-tema que hemos elegido.

* * *

De muy antiguo se ha intentado reducir la complejidad del Universo a sencillos términos, o mejor a juego de corpúsculos. Frente a esta forma de representación del mundo exterior se levantó en el siglo pasado la escuela idealista o energética. Para ella no hay más que unas leyes o postulados que rigen los fenómenos, reductibles casi siempre a expresiones matemáticas; se

trata solamente de descubrirlas y precisar cada vez con más exactitud el enunciado de las mismas.

Pueden deslindarse las dos tendencias diciendo que la una tiende a hallar un número o varios números que indican alguna de las constantes del corpúsculo que se busca, y la otra una expresión algébrica, en forma diferencial o finita, que relaciona las variables y constantes que intervienen en un fenómeno. La primera tiene en su contra la carencia de una sensación dada directamente por uno de los corpúsculos; puede creerse que las constantes o números representativos de éstos son parámetros que nos dan los aparatos de medida. La segunda nos conduce a una engorrosa acumulación de ecuaciones, las más de las veces de difícil interpretación para el lenguaje vulgar y también para su significación física. Mas, en el estado actual de los conocimientos científicos, es tan decisiva la evidencia de la estructura granular o corpuscular, que las mismas leyes de forma matemática tienen que introducir modificaciones basadas en estos corpúsculos.

Hoy es un hecho indiscutible que, en último grado de división, la materia se reduce siempre a dos elementos constitutivos, llamados *electrón* y *protón*, los que representan, respectivamente, los gránulos indivisibles de electricidad negativa y positiva. Todo el edificio atómico y molecular es únicamente combinación de estos *quantas*; la disposición y número de los mismos es lo que da origen a la multiplicidad de formas de la materia. Para siempre ha quedado demostrado que las dos modalidades de la electricidad son los únicos materiales que entran a formar parte de la arquitectura del mundo físico.

Hay otro aspecto de la Naturaleza, la *radiación*, que por su delicadeza y sutilidad escapó durante mucho tiempo a la observación del hombre, excepto en su forma luminosa. Pero a partir de Hertz, no queda duda sobre la homogeneidad de todas las radiaciones. Desde las ondas hertzianas hasta los rayos X, no hay más diferencia que la rapidez o frecuencia del movimiento vibratorio que representan, aunque este hecho no suele destacarse ni prestársele la importancia debida al hablar de ellas. Desgra-

ciadas las ciencias que tienen historia, dice Campbell al lamentar la resistencia ofrecida por muchos físicos a la teoría de la relatividad. Lo mismo ocurre con las radiaciones: ha transcurrido una generación desde Hertz y se tratan como cosa distinta; sólo accidentalmente se cita su homogeneidad.

Así como la estructura de la materia es un asunto definitivamente aclarado, no ocurre lo mismo con la radiación. Hechos al parecer contradictorios, se presentan en conflicto para resolver de una vez sobre su estructura. Los esfuerzos de los científicos tienden, a causa de una intuición unitaria del Universo, a suponer en la radiación una composición bieléctrica a igual que la materia, con unos gránulos constitutivos, muy inferiores a los ordinarios; cosa que, de llegar a confirmarse, supondría la existencia de un sub-electrón, un sub-protón y un sub-átomo de radiación.

Aun siendo este último punto de vista meramente especulativo, o por lo menos en gestación dentro del terreno teórico, permite ver el carácter o cualidad común a la radiación y a la materia a la vez; es la *energía*. Será objeto de nuestra atención explicar cómo la radiación y la materia no son receptáculos de energía, sino la energía misma; según la distribución que tiene en el espacio, es como da origen a la radiación o a la materia. Esa es una idea difícilmente asequible, por la misma inercia a variar los conocimientos impuestos por la Historia, como antes dijimos: la materia y la energía, con los postulados de su conservación, fueron hasta ahora dos conceptos tan bien deslindados, que es necesario un gran esfuerzo para reducirlos a una idea común.

La idea conducente a una concepción energética del Universo emana del físico inglés Faraday, quien sentó por primera vez que las masas eléctricas eran tensiones en el éter, aunque la aplicación definitiva de esta idea se debe, como luego veremos, a Maxwell. Para Faraday, decir que en un punto existe una carga eléctrica, equivale a decir que en todo el espacio hay una deformación del éter, deformación que es máxima en las proximidades del centro de dicha carga. La energía es esta misma de-

formación, y sabiéndose hoy definitivamente que la materia y la radiación poseen una estructura eléctrica, a ellas es aplicable la concepción de Faraday.

Lo más sugestivo de esta visión unitaria de la Naturaleza es que todas las transformaciones de la misma adolecen de una simplicidad, como era de esperar tratándose de un problema de tal magnitud, que permite establecer el proceso evolutivo total del Universo con relativa sencillez. Cuando un átomo emite radiación, es energía que pierde aquél en beneficio de ésta; cuando la absorbe, es energía que gana. En todas estas transformaciones es la primera la que lleva ventaja; a la larga, en las transformaciones del Universo salen beneficiadas las radiaciones, y éstas tienden a su vez a difundirse y a degenerar en forma de vibraciones lentas.

Este proceso evolutivo sería rapidísimo si no existieran restricciones y aun limitaciones a la emisión. La teoría de los *quanta de acción* de Planck es la que restringe las circunstancias según las cuales un átomo puede emitir, y limita la cantidad máxima de energía radiante que puede ceder. Esta limitación va impuesta por el descubrimiento de una nueva magnitud física cuyas dimensiones son *energía $\times$ tiempo* y cuyas variaciones se verifican por incrementos finitos representados por la letra *h*, o quanta elemental de acción. Al aplicarlo al proceso emisor y absorbente, nos indica un verdadero aislamiento entre la materia y la radiación; sólo de cuando en cuando se abre el conglomerado atómico y deja escapar un quanta de energía radiante, cerrándose nuevamente al ambiente que lo rodea.

Con la aplicación del quanta de acción se explican una multitud de hechos, de los cuales nosotros elegiremos el más sencillo: el proceso emisor del átomo de hidrógeno; pero entendiendo que no hay cuestión física que se sustraiga a la influencia del descubrimiento de Planck, y aun la Química, y quizás en su día la Biología, fecundarán su contenido con este factor universal.

Un hecho interesante, que explica a la vez la teoría de los quanta de Planck aplicada por Bohr, es la limitación de número

en los cuerpos simples existentes. Pues, según impone esta teoría, la parte nuclear del átomo debe aumentar de volumen con el peso atómico, y correlativamente las trayectorias de los electrones corticales deben disminuir de radio. Ambas variaciones conducen a la imposibilidad de la coexistencia del núcleo y los electrones corticales al llegar a cierto peso atómico; este límite corresponde al Uranio; más allá de este cuerpo no es posible una separación entre la corteza y el núcleo.

La teoría de los quanta impone a la vez, para el equilibrio de los elementos que integran el átomo, el movimiento continuo de los mismos con un mínimo de velocidad areolar; de modo tal, que las distancias que conservan entre sí son muy grandes en relación con su tamaño. Queda, pues, esta consecuencia confirmando la idea de Kant: la materia no llena el espacio merced a su existencia; son las fuerzas y leyes que la rigen, cuya combinación, manteniendo los elementos constitutivos a gran distancia, da origen al edificio material.

Finalmente, queda como asunto candente el problema del *éter*, soporte de la energía, y, por tanto, de la materia y radiación, a lo cual se refiere la teoría de la Relatividad. Es ésta asunto todavía en formación; según parece, nuevos experimentos obligan a modificar el primer postulado de Einstein; en cambio, el segundo, el que se refiere a la gravitación, sostiene una posición más sólida, aunque los hechos por él explicados lo son a su vez por otras teorías. La experiencia, con observaciones cada vez más precisas, dirá la última palabra. Por eso creemos erróneo afirmar, como suele hacerse, que el problema del *éter* está en una fase de desarrollo comparable al de la Mecánica con Newton. A lo más, se atisba un poco la verdad, como cuando Galileo estudiaba la caída de los cuerpos en la torre de Pisa.

Materia

Clases de corpúsculos.

En el proceso seguido por la investigación científica, la atomística antigua ha sido confirmada en tres aspectos distintos, correspondientes a tres gradaciones corpusculares: *moléculas, átomos y quantas de electricidad*; cualquiera de estos gránulos satisface más o menos adecuadamente las ideas atomísticas primitivas. La existencia de los primeros, las moléculas, fué postulada como necesaria a una porción de teorías de Física que nacieron en el siglo pasado; la de los átomos se ideó como expresión cómoda de formulismo en Química; en cambio, la de los últimos fué un fruto experimental de los trabajos verificados en lo que va de siglo.

Cómo se llega a demostrar la existencia de las moléculas.

La teoría molecular fué planteada por Clausius y Maxwell. No obstante un siglo de existencia, aun explicando muchos hechos, no lograba arrancar una constante numérica característica de los corpúsculos o moléculas. Un primer paso en este sentido lo dió Perrin al medir el número de moléculas contenido en un volumen dado de un gas cualquiera (1). Formaba una emulsión de gránulos de goma-gutapercha, los que participan de la agitación molecular del líquido, con velocidades muy pequeñas en comparación con las correspondientes a las moléculas de éste. Medía luego la velocidad de rotación de un gránulo, por donde se deduce inmediatamente el valor de la fuerza viva o energía cinética del mismo. Como, en virtud del principio de equiparti-

(1) Rapport de Perrin al «Congrès Solvay de Bruxelles», pág. 153, 1912. Perrin: *Les atomes*. Libro sencillo. Reseña de sus experimentos. 1921.

ción de la energía, ésta debe distribuirse por igual entre todos los elementos libres de un fluido, líquido o gas, y además se conoce la energía total de una masa gaseosa, fácil es hallar entonces el número de moléculas que la integran, que vale 68.10^{22} para 22,5 litros de un gas a 0 grados y una atmósfera de presión.

Con el procedimiento de la emulsión, Perrin llegó a formar una verdadera atmósfera de gránulos de gutapercha, en la que éstos representaban las moléculas. Las leyes de esta pequeña atmósfera resultan idénticas a las de una atmósfera gaseosa, con las constantes impuestas por la enorme masa de los gránulos de emulsión enfrente las moléculas. Por eso dice Perrin que ha llegado a demostrar la *realidad* molecular. Lo que en verdad demuestra Perrin es que la agitación de los gránulos de sus emulsiones *puede ser producida* por la agitación molecular; pero no que sea necesariamente producida por la realidad molecular. Si se tratase de hallar hipótesis supletorias para explicar los experimentos de Perrin, se encontrarían probablemente muchas que satisfarían las condiciones impuestas por la Mecánica sin acudir a la teoría molecular.

A pesar de los movimientos brownianos y de la observación ultramicroscópica de los coloides, que confirman la teoría molecular, y otra serie de hechos que aquí no citamos, no puede decirse por ahora que se haya aislado de una manera definitiva una molécula, como se ha hecho con el electrón. Mas son tantas y tan variadas las confirmaciones experimentales de esta teoría, son tan fecundos los resultados de la aplicación de la misma, que bien puede decirse que la estructura molecular es una verdad incontestable y su estudio indispensable en cualquier libro de Física, aun siendo de carácter elemental.

La existencia del átomo fué planteada por los químicos, primero como medio de expresión. Ha sido confirmada en todas las combinaciones químicas; en ellas siempre la cantidad en masa de un cuerpo simple que pasa a formar parte de uno compuesto, admite *un mínimo*, que representa el átomo, o bien un múltiplo de este mínimo. Confirman, además, la teoría atómica, gran parte de los hechos de la teoría molecular. Sin embargo, hasta ahora

La teoría atómica.

no se ha obtenido un átomo aislado, si bien en algunos casos aparezcan corpúsculos poco diferentes del átomo, como las partículas α de los cuerpos radiactivos. En éste y en otros casos no es el átomo el que se aísla, sino un ión del mismo.

Los dos cuan-
tas de electri-
cidad.

Si bien el átomo y la molécula no han podido ser aislados, en cambio, otros corpúsculos constitutivos de todos los cuerpos y, por consiguiente, de los mismos átomos, han sido obtenidos aisladamente y determinadas las constantes que los caracterizan de una manera directa, alcanzándose con ello el último grado de división de la materia. Son estos corpúsculos dos nuevos individuos que entran a formar parte de la teoría de la discontinuidad, aclarándola y explicando de una manera definitiva la existencia de distintos cuerpos simples a base de una síntesis o combinación de ellos; se llaman *electrón* y *protón*: el primero es la mínima carga eléctrica negativa que puede obtenerse; el segundo, la mínima carga eléctrica positiva.

Cómo aparece
el electrón y
sus caracte-
rísticas.

Aparece el electrón por primera vez en los rayos catódicos de los tubos Crookes y en los rayos β de los cuerpos radiactivos. Su naturaleza eléctrica se demuestra porque obedecen a la acción de un campo eléctrico en el mismo sentido que una carga eléctrica negativa, y a la acción de un campo magnético lo mismo que una corriente eléctrica de sentido contrario. A la vez, aparece la naturaleza mecánica del electrón, o sea su *masa* mecánica o inerte, porque presenta una resistencia a seguir la dirección impuesta por un campo, sea magnético, sea eléctrico; del mismo modo que una bala de cañón no sigue la dirección de la gravedad, sino que describe una parábola que se aproxima a ella, el electrón tiende parabólicamente a seguir el campo. De la curvatura de esta parábola se dedujo inmediatamente el valor relativo de la carga eléctrica del electrón al valor de la masa mecánica del mismo; lo que también puede deducirse del fenómeno de la electrolisis.

Otros fenómenos, como las temperaturas elevadas y la incidencia de la luz ultravioleta, son causa de que aparezcan los electrones aislados de la materia. Pero en cualquiera de estas circunstancias no es un electrón solo, aislado, lo que se obtiene.

Para lograrlo, se han valido una serie de físicos, como Thomson, Wilson, Millikan, de la propiedad que tienen dichos corpúsculos de condensar sobre ellos gotitas líquidas procedentes de un vapor sobresaturado.

Una corriente de aire (1) se electriza por frotamiento, o sea deja libres algunos electrones; éstos son capturados en una cámara donde existe un vapor sobresaturado, el que se condensa en forma de gotitas sobre cada electrón. Dos paredes opuestas de la cámara están colocadas a distinto potencial, con lo que se forma un campo eléctrico tal, que las gotas líquidas, en virtud del electrón que llevan, se someten al movimiento impuesto por aquél, obedeciendo dócilmente a las variaciones de potencial, cuyo manejo permite hacer avanzar, parar y retroceder a una gota. De estas experiencias se saca la consecuencia de que la carga eléctrica de estas gotitas se presenta siempre según un valor, e , o un múltiplo del mismo, que es $e = 1,591 \cdot 10^{-20}$ unidades electromagnéticas. Y como se conocía la relación de la carga eléctrica a la masa m del electrón, de ahí resulta $m = 0,899 \cdot 10^{-27}$, en gramos.

El aislamiento definitivo del electrón.

Esta carga es, pues, la encontrada como valor mínimo, o sea el electrón. Hasta ahora han fracasado las experiencias dedicadas a buscar un subelectrón, es decir, una carga aislada inferior a la anterior.

Desde luego, se consigue aislar el electrón; pero no se hace posible la visibilidad del mismo más que condensando un líquido sobre él, puesto que un electrón, por sí solo, no puede emitir un quanta de luz que impresione la retina; y aun iluminándolo, no hay retina sensible a la débil dispersión que sobre la luz del espectro visible produce un electrón, dispersión que crecería cuando se tratase de rayos X, los cuales, en cambio, nuestra vista no percibe.

Aparece el *protón* en toda disolución que contenga el *ión de hidrógeno*, pues no es otra cosa la mínima carga eléctrica positi-

Cómo aparece el protón.

(1) Millikan: *The Electron*. Libro sencillo que resume los trabajos hechos hasta el año 1917.

va. Sin embargo, no es posible aislarlo de ninguna disolución, y si solamente calcular la relación de la carga eléctrica del mismo a su masa mecánica. No obstante, el descubrimiento y aun la existencia del protón como corpúsculo positivo indivisible y separable de restos materiales, ha ido muy en retraso del conocimiento del electrón. El físico inglés Rutherford (1) logró por primera vez aislarlo y determinar sus constantes características, y a él se debe la palabra protón para designarlo. Pero en realidad fué precedido por otras experiencias de Marsden, emprendidas con distinto objetivo.

Marsden (2) envía un haz de partículas α procedentes de un cuerpo radiactivo contra una masa gaseosa de hidrógeno, con lo cual lo ioniza; es decir, separa un electrón, quedando un resto positivo. Ambos productos de esta desintegración adquieren gran velocidad, pero sólo uno, el resto positivo, consigue atravesar grandes cantidades de gas, alcanzando una pantalla de blenda, la cual produce una centella por cada partícula que la incide; los electrones y las partículas α quedan detenidos en el camino por la resistencia del gas. Las partículas o restos positivos que llegan sobre la blenda son precisamente los *protones*, o sea *átomos de hidrógeno que han perdido un electrón*; su gran penetrabilidad a través del gas hidrógeno indica su pequeño tamaño.

Medida de las
característi-
cas del pro-
tón.

Por el mismo método del centelleo y de la acción de las partículas α sobre el hidrógeno, estudia Rutherford los protones obtenidos, haciéndolos sufrir la acción de un campo magnético que los desvía como partículas eléctricas positivas. La desviación, comparada con la que por la misma causa sufren las partículas α , le da elementos para calcular la carga eléctrica y la masa mecánica del protón, cuyos valores corrobora luego sometiendo dichos corpúsculos a la acción magnética y eléctrica a la vez. El resultado es que el protón lleva la misma carga eléctrica que el electrón, pero positiva, y posee una masa mecánica 1.845 veces mayor que éste.

(1) Rutherford: *Philosophical Magazine*, vol. 37, págs. 537 y 562, 1919.

(2) Marsden and Lantsberry: *Phil. Mag.*, vol. 30, pág. 240, 1915.

Hemos citado las dos constantes características, carga eléctrica y masa mecánica, del protón y del electrón, sin hablar de sus dimensiones, porque creemos que éstas tienen un sentido vago. Los cuerpos suelen tener sus dimensiones apreciables dentro de los errores de los aparatos de medida, porque poseen superficies de discontinuidad que los limitan en comparación con la sensibilidad de dichos aparatos; pero estas superficies de discontinuidad, producidas precisamente por el acoplamiento de quantas eléctricos, no tiene razón de ser cuando se trata de estos mismos quantas. Lo probable es que la densidad eléctrica de un protón o de un electrón disminuya en forma exponencial a partir del centro del mismo, como ocurre con una atmósfera planetaria. No obstante los ya clásicos experimentos de Bragg para medir la penetrabilidad de las partículas α en el aire atmosférico, los de Marsden y los de Rutherford en el hidrógeno (1) permiten asegurar que dichas partículas se aproximaban del centro del núcleo atómico (el protón, en el caso del hidrógeno) a una distancia del orden de 10^{-13} centímetros. De ahí que se atribuya al protón un diámetro no superior a este valor, valor que por otra parte viene corroborado (2) por la teoría electromagnética, la que permite hallar el radio de una carga eléctrica conocida su masa mecánica, a base de que se cumpla la ley de Coulomb para distancias tan pequeñas. Pero la penetración de las partículas bien pudiera ser análoga a la de un aerolito en la atmósfera, y el cálculo del radio tendría un significado análogo al que tiene el cálculo de la altura de una *atmósfera reducida*. De todos modos, aceptando el valor dado para radio del protón, en virtud de la teoría electromagnética, que indica que a igualdad de carga eléctrica la masa mecánica es inversamente proporcional al radio, resulta para el electrón un radio 1.845 veces mayor.

Por lo dicho, resulta haberse hallado dos cargas eléctricas

Las dimensiones de los dos quantas eléctricos, y su significado.

(1) Rutherford and Wood: *Phil. Mag.*, vol. 31, pág. 379, 1916.

(2) Beim: *Das chemische element*, pág. 74, 1920. Libro con gran cantidad de datos y bibliografía, de exposición extensa y sencilla.

indivisibles de igual valor y de distinto signo, que pueden reemplazar a los antiguos flúidos eléctricos. La electricidad ya no es algo cualitativo, modificativo de la materia, sino que es el resultado de la descomposición o desintegración de la misma. En el caso más sencillo del hidrógeno, este elemento da origen en su desintegración a un protón y a un electrón. Por lo demás, hablar de diferencia entre la electricidad y la materia es hablar de la diferencia entre varias cosas y la composición de las mismas. El problema, pues, de actualidad es hacer la síntesis de todos los cuerpos simples por medio de estos elementos o *quantas* eléctricos fundamentales, problema que parece está perfectamente resuelto en relación al número de quantas eléctricos que intervienen en cada átomo, pero que presenta enormes dificultades en lo que se refiere al conocimiento de la disposición que dichos elementos guardan en el seno de aquél.

* * *

Modelo del átomo de hidrógeno.

El caso más sencillo se presenta con el átomo de hidrógeno, el cual viene constituido por un electrón que al caer dentro del campo electrostático creado por un protón es retenido por él, describiendo el primero una trayectoria elíptica alrededor del segundo, análogamente a lo que ocurre en una órbita planetaria. La magnitud del radio vector de esta trayectoria es del orden de 10^{-8} cms.; es decir, cien mil veces mayor que el diámetro supuesto del protón. Tal forma del átomo de hidrógeno corresponde a lo que Bohr designa por *estado normal*; es decir, el átomo aislado de toda materia y alejado de toda radiación de energía; puesto que lo mismo la presencia de la materia que de la energía hacen variar la forma y las dimensiones de esta trayectoria.

Lo que representan el núcleo y corteza del átomo.

Para la descripción de otros átomos debe observarse que en todos ellos quedan bien claramente delimitadas dos partes: el *núcleo* y la *corteza*. El primero, compuesto de un acoplamiento de protones y electrones; la segunda, de electrones únicamente, en número tal, que sumados con los que ya contiene el núcleo, resulta un número igual al de protones, de modo que el átomo-

queda eléctricamente neutro. Los electrones corticales describen órbitas cerradas alrededor del núcleo, con gran analogía al sistema planetario, donde aquél sería representado por el Sol, y los electrones de la corteza por los planetas. Así, el átomo de helio consta de cuatro protones y dos electrones que forman su núcleo, y de otros dos electrones corticales que giran alrededor del primero.

Del núcleo dependen las propiedades radiactivas y la masa mecánica, de la corteza, el resto de las manifestaciones físico-químicas del átomo. Dejando para más adelante hablar de las propiedades radiactivas, reseñaremos primero lo referente al peso atómico, o sea a la masa mecánica.

Siendo la masa de los electrones muy inferior a la de los protones y residiendo éstos en el núcleo, es en éste donde se acumula la casi totalidad de la masa del átomo o peso atómico, quedando una pequeña parte que no llega a $\frac{1}{2 \cdot 1845}$ de la tota-

La masa de un átomo es la suma de las masas de sus elementos constituyentes.

lidad, para los electrones corticales. De todos modos, la masa total de un átomo cualquiera, siendo éste un compuesto de n electrones y n protones, debería valer n veces la masa de un átomo de hidrógeno, puesto que éste consta de un protón y un electrón. Aplicando esta regla sencilla, los pesos atómicos de todos los cuerpos serían números enteros si se tomase el del hidrógeno como unidad de medida, lo que está en contra de la conocida fraccionalidad de los mismos. Dos razones explican a satisfacción esta anomalía: el *empaquetamiento* y la *isotopía*.

El primer caso anómalo lo presenta el helio, el cual, poseyendo cuatro veces más quantas eléctricos que el hidrógeno, tiene un peso atómico algo inferior a cuatro veces el de éste, lo que se explica por medio del empaquetamiento de los electrones y protones nucleares, los que en virtud de su aproximación han perdido masa mecánica, como razonaremos más adelante. Así resulta que, tomando el peso atómico del helio como equivalente a cuatro unidades, el peso atómico del hidrógeno vale 1,008, algo más que la cuarta parte.

La anomalía de los pesos atómicos fraccionarios.

Esta pérdida de masa por empaquetamiento se repite en to-

dos los demás elementos químicos, porque todos ellos tienen en su núcleo gran número de quantas de electricidad de ambos signos aglomerados en el pequeño volumen nuclear; de aquí que el peso atómico de tales elementos sea un número entero casi exacto, tomando el helio como 4 en comparación; ejemplos presentan el carbono, oxígeno y otros cuerpos, pues las pequeñas discrepancias que tienen de los números enteros bien pueden atribuirse a un mayor o menor empaquetamiento. Pero en otros elementos como el cloro, de p. a. 35,5, las cinco décimas de fracción no pueden ser efecto de la pérdida de masa nuclear; entonces es la *isotopia* la que aclara y resuelve de una vez la anomalía de los pesos atómicos fraccionarios.

Los isotopos de los elementos químicos estables, explican el peso atómico fraccionario.

Se llaman *isotopos* dos cuerpos cuando poseyendo las mismas propiedades químicas, tienen distinto peso atómico. Creyóse primeramente que tal particularidad sólo era peculiar a los elementos inestables o radiactivos, pero Aston (1) consiguió demostrar que era común a gran número de elementos estables, aun a los de peso atómico muy bajo. Para ello somete átomos y moléculas del elemento químico en cuestión, previamente electrizados, a la acción de un campo magnético y eléctrico superpuestos. Los átomos que llevan igual carga eléctrica se desvían tanto más cuanto menor sea su peso atómico. Así ocurre, como ejemplo, que el cloro presenta dos tipos de átomos químicamente idénticos, pero cuyos pesos atómicos valen 35 y 37; siendo así que el peso atómico del cloro, determinado por procedimientos clásicos, resulta valer 35,5, bien puede educirse que este último valor fraccionario es el resultado de una mezcla de átomos de pesos 35 y 37, con un porcentaje de 3 es a 1, respectivamente. La constancia con que se presenta este porcentaje en la Naturaleza, indica un estado final del cloro como resultado de una descomposición radiactiva.

Además del cloro, son muchos los elementos que poseen

(1) Aston: *Isotopes*. Monografía reseña de sus experimentos, muy sugestiva en la parte complementaria. 1922.

Aston: *Phil. Mag.*, vol. 47, pág. 385, 1924.

la isotopía, con la particularidad de que el peso atómico de los isotopos es siempre un número entero.

Así, bien puede decirse, continuando para el átomo de cloro, que se presenta unas veces compuesto de 35 pares de quantas eléctricos, protones y electrones, y otras veces de 37. ¿Cómo, pues, químicamente no hay diferencia entre estos átomos de cloro? Porque ambos poseen la misma carga nuclear: para el primero, el núcleo consta de (prot., 35; elec., 18), lo que da una carga eléctrica positiva equivalente a 17; para el segundo, el núcleo tiene (prot., 37; elec., 20), lo que da la misma carga eléctrica 17 también; esta carga eléctrica viene neutralizada en ambos casos por 17 electrones corticales o planetarios, a los cuales se atribuyen, por ahora, las propiedades químicas del cloro. Este resultado nos indica que el peso atómico es un dato poco adecuado para catalogar los elementos químicos; debe recurrirse a una constante más fija, que es el *número atómico*, descubierto por el físico inglés Moseley, muerto en la guerra en plena juventud.

Moseley, al obtener rayos X de distintos materiales por medio del bombardeo de los mismos por los rayos catódicos, observa que, ordenados los cuerpos simples según la dureza de los rayos X emitidos por ellos, se obtiene casi el mismo orden de sucesión que si se disponen con arreglo a sus pesos atómicos, excepto la inversión de orden en la sucesión de níquel-cobalto y potasio-argón; con la particularidad de que el crecimiento en dureza de la radiación emitida de un elemento al siguiente obedece a una ley matemática sencilla; mientras que el crecimiento en peso atómico, como sabemos, presenta grandes anomalías. Como más adelante veremos, la teoría de Bohr explica que la gradación de dureza en los rayos X emitidos depende de una gradación en la carga nuclear, correspondiente a los átomos emisores (la frecuencia de la radiación emitida es proporcional al cuadrado de la carga nuclear), *carga nuclear que crece por unidades a partir del hidrógeno hasta el uranio.*

La regularidad del crecimiento de la carga nuclear en la serie de elementos químicos.

Por lo expuesto, a todo elemento químico le corresponde una carga nuclear positiva que vale un número entero de quantas

eléctricos: el núcleo del hidrógeno posee un protón; el núcleo del helio (4 prot., 2 elec.), lo que equivale a 2 cargas; al litio, que posee dos isótopos de pesos atómicos 6 y 7, le corresponden dos núcleos que valen, respectivamente, (6 prot., 3 elect.) y (7 prot., 4 elect.), ambos con la misma carga nuclear 3. Así, pues, las cargas 1, 2, 3... representan los *números atómicos* de los elementos citados, números que se suceden por intervalos de una unidad hasta el molibdeno, al que le corresponde el número 42; más allá algunos números no tienen elemento químico correspondiente.

El número atómico lleva, además, la ventaja de ser el mismo para los distintos isótopos de un elemento químico; así, a los 6 isótopos del kriptón le corresponde la misma carga nuclear o número atómico (36); mientras que sus pesos atómicos son: 78, 80, 82, 83, 84, 86. Aún más, cabe preguntar si dos elementos de distinto número atómico pueden presentar el mismo peso atómico, lo que es un hecho, como veremos en los elementos inestables radiactivos; pero sólo existe posibilidad teórica en los elementos estables, si bien en algunos casos el peso atómico de un isótopo de un cuerpo está comprendido entre los pesos atómicos de los isótopos de otro cuerpo, como el isótopo 85 del rubidio está comprendido entre los números anteriores del kriptón.

El número atómico y los electrones corticales.

Pero la verdadera importancia del número atómico estriba en que, al señalarnos la carga positiva del núcleo, obliga a que la corteza del átomo posea una carga negativa equivalente para neutralizar la primera; como dicha corteza está sólo constituida por electrones, de ahí que el número de electrones corticales de un átomo sea igual al número atómico del mismo.

La corteza del átomo es la que interviene en los fenómenos.

Con esta consecuencia entramos ya en la descripción de la *parte cortical* del átomo, de la cual depende la afinidad, la valencia, la radiación, las fuerzas de cohesión y, en fin, todas las propiedades físicas y químicas, menos el peso y la radiactividad; tanto es así, que en los fenómenos hoy conocidos se llega a alterar la disposición de la corteza atómica; pero el núcleo sigue invariable en todas las transformaciones de la Naturaleza y laboratorio, menos en la radiactividad y en la desintegración de la

materia. Para la descripción de la corteza admitiremos como más adecuada la teoría de Lewis-Langmuir.

Tal teoría tiene como exclusivo objeto satisfacer los hechos de carácter químico, aunque hoy interviene en aclarar el mecanismo de la emisión. Asigna a la corteza una serie de capas concéntricas con el núcleo o pisos, sobre los cuales pueden moverse girando alrededor del núcleo los electrones corticales; estos electrones, a partir del interior, pueden estar situados: 2 en la primera superficie o primer piso, y 8, 8, 18, 18, 32, sucesivamente, en las otras; de modo que los distintos átomos, en el orden de su número atómico, contienen 1, 2, 3, 4... electrones corticales, elegidos en los pisos antes dichos en la disposición citada a partir del primero. Aplicando esta regla al átomo de litio, cuyo número atómico es 3, se le suponen 2 electrones corticales en la primera capa y 1 en la segunda.

La teoría de Langmuir satisface el comportamiento de la corteza atómica.

Esta disposición supone el átomo en su estado normal, o sea alejado de todo centro material y toda radiación. Aun así, el equilibrio mecánico de estos electrones entre sí y con el núcleo, a base de la ley de Coulomb y de las acciones electromagnéticas, es de una dificultad insuperable, de mucha más complicación que la Mecánica del sistema planetario. En cambio, nos explica la valencia de los elementos: *ésta depende de los electrones corticales, situados en el último piso del átomo*. El litio tiene un electrón en su último piso (segundo); por tanto, es monovalente. El fluor, de número atómico 9, tiene 7 electrones en su último piso (segundo); su valencia se entiende que vale también 1, en el sentido que tiende a apoderarse del electrón de análogo piso del litio para formar entre los dos átomos un segundo piso común con 8 electrones. El magnesio, por ejemplo, de número atómico 12, tiene una valencia 2, porque en su último piso (tercero) posee 2 electrones, suficientes para completar hasta 8 el número de electrones del último piso de dos átomos de cloro, que consta de 7 electrones.

Confirma lo expuesto (1) la unión de varios elementos que

De cómo explica los radicales.

(1) Rius y Miró: *Revista de Física y Química*, pág. 496, 1922.

no compensan sus electrones: entonces se forma un radical con una valencia representada por los electrones no compensados en el acoplamiento de los últimos pisos; el amoníaco supone la unión de 5 electrones del nitrógeno con los cuatro correspondientes a los cuatro átomos de hidrógeno, que dan por resultado un piso de 8 con un electrón sobrante, el que caracteriza el radical amonio como un elemento monovalente metálico.

Donde falla la
teoría de
Langmuir.

El átomo de Langmuir-Lewis responde bien al comportamiento de la valencia de la serie natural de elementos químicos hasta llegar al titano, de número atómico 22. En virtud de la disposición de Langmuir, los 22 electrones corticales se distribuyen en cuatro pisos, correspondiéndoles en orden ascendente 2, 8, 8 y 4 electrones a cada piso. Por ser cuatro los del último, este número debiera representar la valencia del titano; mas este elemento no se porta siempre como tetravalente, sino que se combina también con carácter trivalente y bivalente. Este hecho, repetido para átomos de número atómico superior, obliga a modificar la disposición ideada por Langmuir en el sentido de que los nuevos electrones añadidos, para pasar de un átomo a otros de orden superior, ingresan a veces en zonas más profundas que el último piso.

Lo que son los
magnetones.

Precisamente a estos electrones se atribuyen las cualidades paramagnéticas de algunos átomos (1), fenómeno interpretado por Weis como debido a la existencia de un nuevo elemento en la constitución del átomo, el *magnetón*, o sea un quanta de magnetismo; es decir, que los cuerpos paramagnéticos presentan un momento magnético variable de unos a otros, pero aproximadamente múltiplo de un valor que sería el *quanta* de magnetismo. De ser los electrones en rotación alrededor del núcleo los que crearan el magnetismo, la teoría de Bohr da un mínimo para el momento magnético del magnetón cinco veces mayor que el encontrado por Weis y Cabrera. En cambio, otros experimentos de Gerlach hallan para la plata un valor que coincide con el de Bohr, y el mismo autor trata (2) de poner de acuerdo de una vez

(1) Ver B. Cabrera: *El paramagnetismo y la estructura del átomo*, pág. 88.

(2) *Physikalische Zeitschrift*, vol. 24, pág. 275, 1923.

ambos valores. Pero nosotros no seguiremos en este asunto, que por el momento se presenta aún un poco obscuro.

El átomo de Langmuir no satisface una serie de condiciones electromagnéticas, dificultad solventada en parte por la teoría de Bohr, la que nos da a la vez elementos para calcular los radios de las trayectorias descritas por los electrones corticales de cada átomo y pretende incluso describir la génesis de los átomos (1), teoría que constituirá objeto aparte en nuestra exposición.

Descrita la corteza del átomo, más difícil es conocer la *disposición* de los protones y electrones que forman su núcleo, cuya composición hemos visto ya. La dificultad estriba en la falta de medios para actuar sobre el núcleo y en la carencia de manifestaciones espontáneas del mismo, excepto la que presenta por su peso, siempre, y su radiactividad, algunas veces.

No obstante, la teoría de Bohr permite entrever la disposición intranuclear a base del siguiente lema: si se supone un electrón en reposo y un protón que describa una trayectoria kepleriana a su alrededor, el radio vector de esta trayectoria es 1.845 veces menor que el que se tendría invirtiendo la posición del protón y del electrón, o sea formando el átomo de hidrógeno; porque en ambos casos el quanta elemental de giro resulta el mismo. Este lema permite imaginar complejos nucleares a base de situar los electrones en el interior y los protones girando a su alrededor. Así, Lenz imagina para el núcleo del helio (4 prot., 2 elec.) cuatro protones sobre una misma trayectoria circular, mantenidos en equilibrio por la atracción electrostática de dos electrones situados en los extremos de un segmento, que sirve de eje de rotación de dicha trayectoria. Neuburger (2) imagina para el núcleo del isotopo 6 del litio formado de un electrón central, alrededor del cual giran dos *complejos* de composición (3 prot., 1 elec.), por tanto, positivos. Pero aun a base del lema citado, las dimensiones de los núcleos obtenidos resultan mayo-

Iniciación a una
estructura nu-
clear.

(1) *The Theory of Spectra and Atomic Constitution*, pág. 61, 1922.

(2) *Annalen der Physik*, vol. 68, pág. 574, 1922.

res que los valores dados por los experimentos. Para compaginar este desacuerdo se acude a desviar la ley de Coulomb, en el sentido de aumentar el exponente 2 del divisor, lo que da fuerzas atractivas mayores y permite por esta causa trayectorias más pequeñas. De todos modos, es este asunto sobre el cual insistiremos al hablar de la teoría de Bohr.

Modelo sencillo
de molécula y
de ión de hidrógeno.

En la síntesis de la materia por sus quantas eléctricos, una vez conocida la estructura del átomo se presenta la de la molécula, lo que dejamos como más adecuado a la exposición según la teoría de Bohr, que sigue más adelante, sin perjuicio de indicar aquí los dos casos sencillos de la molécula de hidrógeno, neutra e ionizada. Un par de electrones que se mueven sobre una circunferencia, colocados en los extremos del diámetro, y un par de protones situados en los extremos de un segmento perpendicular en el punto medio a aquella trayectoria, forman la molécula neutra de hidrógeno; las atracciones y repulsiones electrostáticas entre dichos corpúsculos y la fuerza centrífuga son suficientes para explicar el equilibrio del sistema. La molécula ionizada de hidrógeno (1) en estado normal, o sea que ha perdido un electrón, estaría compuesta de dos protones formando un eje de rotación, alrededor del cual giraría en el plano ecuatorial el electrón restante. La inestabilidad de este sistema sería tal, que el choque con un electrón exterior sería suficiente para disociar la molécula.

Aun suponiendo que la estructura intramolecular, sobre todo en las moléculas sencillas, tiene ya los jalones fijados para obtener una topografía definitiva de sus elementos, quedan al margen de estos descubrimientos territorios enormes sin explorar, pues hasta ahora únicamente el estado gaseoso de ciertos cuerpos, la mayor parte de las veces disociados, es lo que se conoce. Del resto está en formación la teoría del estado cristalino a base de la aplicación del método experimental de Laue, de los quantas de acción y de los fundamentos teóricos sentados por Born (2).

(1) Pauli: *Ann. der Phy.*, vol. 68, pág. 177, 1922.

(2) *Die Kristallgitter*. Libro de regular dificultad. Necesita una relativa preparación matemática.

Quedan casi ignoradas la arquitectura íntima de las moléculas líquidas, de los coloides, del estado mesomórfico, etc. A pesar de ser tan vasto el terreno a explorar, los medios de que se dispone son mucho más fecundos que los de fin de siglo pasado, y es de esperar la construcción rápida de un plano definitivo de la arquitectura de la materia en todas sus manifestaciones. La gloria del hecho corresponde a Millikan, Moseley, Aston, y sobre todo a Rutherford, quien disparando partículas α contra las moléculas, las ha reducido a sus más mínimos componentes, protones y electrones. La labor para el porvenir consiste únicamente en acoplar estos materiales.

II

Radiación

Establecidos de una manera definitiva los elementos constitutivos de la materia, falta todavía la descripción de algo más para que sea completa la exposición de los materiales que constituyen el Universo. Se trata de la *radiación*, mucho más sutil y menos asequible a la observación del hombre, salvo en su forma luminosa. No obstante haber escapado durante siglos a la investigación científica, se puede decir que sus dominios son infinitamente mayores que los de la materia, puesto que llena todo el Universo, aun el interior de los cuerpos.

Nos proponemos indicar primero los postulados de una radiación estudiados desde Kirchhoff a Planck, exponiendo sólo aquello que permite la carencia de rigor científico y la ausencia de lenguaje matemático. Téngase en cuenta que, a diferencia de los estudios de atomística, las fuentes experimentales aprovechables para construir una teoría de la radiación, son de escasísima importancia. La comprobación de la ley de Stefan, por medio del radiómetro, está a la altura del descubrimiento de la ley de

Por qué el retraso del conocimiento de las radiaciones respecto a la materia.

Mariotte para los gases, hace tres siglos. Por eso la teoría corpuscular de los gases, de numerosas consecuencias, siempre confirmadas por los hechos, no pudo tener inmediata y paralelamente una teoría corpuscular de la radiación. Siendo, pues, la estructura de una radiación una cuestión científica no resuelta definitivamente, como lo es la de la materia, presenta a la zaga de ésta dos aspectos, de continuidad y discontinuidad, distinguidos con los nombres de *teoría electromagnética* y *teoría de los quanta*.

Homogeneidad
de todas las
radiaciones.

A partir de los experimentos de Hertz, en 1888, quedó en pie la afirmación hecha por el mismo Hertz, que las ondas luminosas, las caloríficas y las hertzianas, eran distinta variedad de ondas electromagnéticas. Más tarde, Laue aprovecha redécillas moleculares de un cristal de cloruro sódico para experimentos interferenciales con rayos X, con lo que consigue demostrar que éstos se comportan como ondas electromagnéticas; lo que queda además confirmado por otros muchos experimentos ulteriores: entre ellos el de Kapzoff, en Moscou (1), quien, construyendo un cristal macroscópico con hilos metálicos y proyectando sobre él un haz de ondas hertzianas de 3,5 cms. de longitud de onda, obtiene los máximos y mínimos de las experiencias ordinarias de cristales, con lo cual la analogía es completa.

Contando, además, que los rayos γ de los cuerpos radiactivos tienen un comportamiento semejante a los rayos X, puede indicarse una gradación de ondas electromagnéticas, según la frecuencia media de vibración (2), o sea su número de vibraciones por segundo: ondas hertzianas, 10^6 ; luz ultrarroja (llamada calorífica) 10^{13} ; luz amarilla, $5,10^{14}$; ultravioleta, $3,10^{15}$; rayos X, 10^{18} ; rayos γ , 10^{21} . Todas estas radiaciones, según la teoría de Maxwell, aplicada por Hertz, no son otra cosa que un campo magnético y eléctrico que se propagan, ondulando, con la velocidad de la luz, por lo que se llaman *ondas electromagnéticas*.

(1) *Revue des Sciences*, 30 marzo 1923.

(2) Datos sacados de Broglie: *Les rayons X*, pág. 19, 1922.

Como consecuencia natural de los delicados y precisos experimentos de interferencias y difracción luminosas, parecía que a lo largo del trayecto recorrido por la radiación, la fuerza eléctrica y magnética variaban con *continuidad*, según función que depende de la calidad de la radiación. Pero de aplicarse a la radiación la teoría cuantística, que Planck ideó primero para los recintos materiales y energéticos, y que Bohr aplicó luego al proceso de la emisión, no se podría hablar de la continuidad de las fuerzas eléctrica y magnética en el seno de una radiación si las medidas se llevaran a distintos puntos cuyas distancias fueran inferiores a ciertos límites, como no se puede hablar de la densidad de un gas si ésta se refiere a volúmenes suficientemente pequeños para ser comparables a los espacios intermoleculares. En resumen, que de la misma manera que la materia se presenta en gránulos llamados moléculas, la radiación se acumularía en otros gránulos llamados *quantas de energía*.

Del criterio de continuidad y discontinuidad para las radiaciones.

Antes de aparecer la teoría cuantística o de discontinuidad de la energía, la teoría electromagnética explicaba una multitud de hechos confirmados con sorprendente exactitud. Como hemos dicho anteriormente, esta teoría supone que una onda electromagnética o radiación, propagándose en una región del espacio, significa que en dicha región, en el instante considerado, existe un campo eléctrico y un campo magnético superpuestos; es decir, que lo mismo una masa eléctrica que un polo magnético introducidos en dicha región, quedarían sometidos a acciones medibles o no por los aparatos o por los medios de que el físico dispone; tales campos se propagan con la velocidad de la luz. Como ondas electromagnéticas posibles, las hay infinitas en número, tantas como distribuciones arbitrarias pueden imaginarse de las intensidades de los campos eléctrico y magnético a lo largo de la dirección en la que la onda se propaga, con la sola condición de que las fuerzas magnéticas y eléctricas sean perpendiculares entre sí y a la vez a la dirección de propagación.

Lo que es una onda electromagnética o radiación.

En la variedad de radiaciones imaginables hay dos tipos notables: las radiaciones *simples* y la radiación *negra*. Radiaciones *simples* son, por ejemplo, las hertzianas emitidas por un aparato

Lo que son las radiaciones simples.

de telegrafía sin hilos, una luz monocromática, parte de los rayos X producidos por el bombardeo catódico de un elemento de peso atómico determinado. Todas estas radiaciones indican una distribución sinusoidal del campo eléctrico y magnético a lo largo de su dirección de propagación, con una diferencia de fase de 90° ; se caracterizan por una longitud de onda propia y por una frecuencia de vibración perfectamente definida; el producto de las dos da la velocidad de la luz. Son lo que los sonidos simples en acústica. Puede darse una gradación de frecuencias de distintas radiaciones, como hicimos más arriba, así como existe una gradación de tonos de sonidos simples.

Lo que es una radiación compuesta.

Además de las radiaciones simples, infinitas en número, porque hay una infinidad de frecuencias posibles, existen otra infinidad de radiaciones que no poseen una distribución sinusoidal de los campos eléctrico y magnético, a las cuales no es posible atribuirles una longitud de onda y una frecuencia determinada. Estas radiaciones compuestas son siempre equivalentes a la superposición de otras varias simples, elegidas según indica un teorema de Fourier. Una radiación compleja es análoga en acústica a un ruido; un ruido producido pulsando a la vez todas las cuerdas de un piano, es la superposición de los sonidos simples correspondientes a cada una de las cuerdas.

Lo que es una radiación negra.

Pero entre todas las radiaciones complejas que pueden imaginarse hay una, llamada *radiación negra*, cuya formación por síntesis de ondas simples ha sido un problema de dificultades a vencer, resuelto hoy con el auxilio de los experimentos y de los postulados de Termodinámica. Sin perjuicio de que más adelante insistamos en el problema completo de la radiación negra, tal como lo dejaron Stefan y Wien, de momento es necesario indicar que tal radiación es la que existe en el interior de una esfera hueca con la cara interior ennegrecida y mantenida a temperatura constante; sólo un orificio, pequeño en comparación con las dimensiones de la esfera, puede permitir la salida de la radiación interior para ser examinada.

Para explicar el significado de esta radiación adelantaremos que los cuerpos negros, tales como el negro de humo, poseen la

particularidad de absorber todas las radiaciones que sobre él inciden, a la vez que emiten siempre, y a todas temperaturas, una radiación peculiar suya, que es la que llamaremos negra. Mas este comportamiento del cuerpo negro es solamente aproximado, pues los distintos cuerpos negros difunden y reflejan en una pequeña parte las radiaciones que reciben. Precisamente esta difusión y reflexión se anulan en el interior de la esfera antes citada; cualquier rayo que entre en ella sufre una serie de reflexiones y difusiones sobre la pared interior de la misma que acaban por agotarlo; en cambio, estas mismas paredes emiten su radiación peculiar, que aunque sufre pequeñas difusiones en el interior, acaba por salir a través del orificio.

Definida la radiación negra, debemos indicar que tiene distinta composición según sea la temperatura del cuerpo negro que la produce. Aunque más adelante precisaremos las leyes según las cuales las radiaciones simples llegan a formar una radiación negra, podemos de primer intento indicar que a medida que la temperatura de un cuerpo negro aumenta, posee, en la radiación que produce, un porcentaje mayor de radiaciones simples de frecuencia elevada; de ahí que los cuerpos negros se pongan incandescentes a medida que se eleva su temperatura a causa de las radiaciones luminosas que entran a formar parte de la radiación emitida.

Difícil es conocer el mecanismo según el cual los cuerpos negros emiten su radiación peculiar; éste será el último jalón a partir de la teoría de emisión del átomo de hidrógeno según Bohr. Sólo puede asegurarse que el mecanismo de la emisión no es un fenómeno meramente superficial; más importante que la radiación emitida es la radiación reinante en el interior del cuerpo negro; de modo que la radiación exterior es a la interior lo que un vapor es a su líquido: algo que se escapa constantemente y que llegaría a agotarse a no recibir por absorción nuevas cantidades de radiación que los elementos del cuerpo elaboran y transforman en radiación negra.

Tal es la importancia de la radiación interior de los cuerpos en el mecanismo de la emisión, que a distancias largas de su

El mecanismo de formación de la radiación negra es desconocido.

superficie contienen radiación negra (1) todos los cuerpos sólidos, salvo casos excepcionales de transparencia. Por este motivo puede asegurarse que en una cavidad cerrada del interior de la Tierra existe una radiación negra, la que no es luminosa a causa de su poca temperatura. Por lo mismo, en el interior del Sol existe una radiación negra que es luminosa a causa de su elevada temperatura. Las dos radiaciones negras citadas escapan constantemente del Sol y de la Tierra; por su enorme intensidad domina la primera, aunque algo alterada por la cromosfera solar; una vez la radiación solar entra en la atmósfera terrestre y sufre difusiones sobre la superficie de la Tierra, varía de composición y pierde, por tanto, su carácter de negra para ser una *cierta radiación compuesta*. Un tipo de estas radiaciones compuestas es la existente entre nubes espesas y la Tierra durante el día; tal radiación contiene un porcentaje lumínico mayor que el correspondiente a una radiación negra que posea la temperatura de la atmósfera.

Carácter energético de todas las radiaciones.

Todavía, antes de entrar en la exposición de la estructura de una radiación, es necesario indicar el carácter energético de la misma, aunque sea éste un asunto ya maduro y, por tanto, muy conocido. Que una radiación negra como la solar transporta energía, bien claro está desde el momento que calienta los cuerpos sobre los que incide. De otras radiaciones simples como las hertzianas, el efecto mecánico sobre el cohesor de Branly indica una cantidad de energía, aunque pequeña; de las luminosas se sabe que mueven un radiómetro; de los rayos X se conocen los efectos destructores sobre tejidos vivos. Toda esta energía, desde que parte el foco emisor, es transportada por las radiaciones. Por eso se dice, del espacio en el cual se propaga esta radiación, que contiene una *densidad* de energía, densidad que es calculable y representable por un vector ideado por Poynting.

El valor de la densidad de la energía radiante es interesante

(1) No se confunda con el color negro; una radiación negra posee todos los colores del espectro en su composición en distinto porcentaje, según la temperatura; al crecer ésta, tiende a las frecuencias elevadas.

para nosotros cuando la radiación es negra, precisamente porque se nos presenta la primera relación entre la radiación y su temperatura, que luego hemos de aprovechar como concordante con una teoría granular. Pero antes de establecer esta relación o dependencia es preciso indicar primero que se entiende como temperatura de una radiación la misma que la del cuerpo negro con el cual está en equilibrio térmico.

Tal definición de temperatura no tiene nada de extraña ni de arbitraria si se considera la definición de temperatura que se da para los demás cuerpos materiales, los cuales deben estar un buen rato en presencia de un depósito termométrico para ponerse en equilibrio térmico con éste antes de leer su temperatura. Por esta causa es por lo que sólo se puede hablar de la temperatura de una radiación negra y no de la de otras radiaciones, pues salvo en una cavidad dentro de un cuerpo negro, donde introducido un termómetro se pone en equilibrio térmico con la radiación que reina en esta cavidad, en otros casos no tiene sentido. Trátese, por ejemplo, de un termómetro introducido en el vacío de una campana neumática para medir la temperatura de la radiación que allí reina: el resultado será distinto según sea la substancia que envuelva la pared del depósito termométrico, porque la radiación exterior no es negra, pues aun actuando la radiación solar, de carácter aproximadamente negro, el depósito termométrico emite otras radiaciones de distinta dirección y de distinta composición que la solar, lo que da por resultado una radiación compuesta *no negra*.

Lo que es la temperatura de una radiación negra.

Definida la temperatura de una radiación negra, podemos ya enunciar la ley de Stefan, a la cual antes nos referíamos sin mencionar el artificio teórico (1), según el cual se llega a ella a base de la aplicación de los postulados de termodinámica. Dicha ley indica que la cantidad u de energía contenida en un cm^3 de radiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura

Ley de Stefan.

(1) Ver Planck: *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, página 59. Libro fundamental para el estudio de las radiaciones y de los quanta de acción. De regular dificultad. Edición 1921.

Dificultades
para medir la
temperatura
de una radia-
ción.

absoluta, según un coeficiente a de proporcionalidad $u = a T^4$. La constante a tiene un valor muy pequeño, $a = 7,64 \cdot 10^{-15}$ ergs. por centímetro, por grado. De ahí resulta que a la temperatura de 27° (300° absolutos) la radiación negra contenida en un metro cúbico vale solamente $61'9$ ergs. Es tan insignificante este número de ergs., que la energía desprendida en la combustión de un gramo de hulla (8.000 ep. $= 382.10^{12}$ ergs.) necesitaría un espacio de cerca de siete billones de metros cúbicos para ser almacenada en forma de radiación negra. Esto nos explica la dificultad que existe para medir la temperatura de una radiación no negra, pues además de que para tal radiación no tiene sentido la definición de temperatura, para calentar el depósito termométrico serían necesarios millones y millones de metros cúbicos de radiación. No obstante estos números, la densidad de la energía crece rápidamente con la temperatura a causa del exponente 4: de ahí que en el centro del Sol, por su elevada temperatura, exista una densidad comparable a la de la energía material.

Presión de las
radiaciones.

Una vez explicada la ley de Stefan, podemos ya enunciar el primer hecho que da a la energía un aspecto material: *una radiación produce una presión sobre un obstáculo que se oponga a su paso*. Esta proposición, que destila de la teoría electromagnética de las radiaciones de Maxwell, ha sido comprobada experimentalmente ya en el siglo pasado por Stefan y Boltzmann por medio del radiómetro. El mecanismo de esta presión se verifica por intermedio de los electrones componentes de la materia; cuando el cuerpo sobre el cual la radiación incide es metálico, los electrones libres del metal sufren una acción combinada de los campos magnético y eléctrico, componentes de la radiación que en promedio tienden a arrancarlos del metal; cuando se trata de un cuerpo no metálico, los electrones más alejados de los núcleos atómicos, a los cuales pertenecen, son los más sensibles a la acción de la radiación. En total, se produce un efecto mecánico sobre estos electrones, que es la presión.

Analogía y anomalía de esta presión con la de un gas.

El cálculo de esta presión da un resultado análogo al de la presión de una masa gaseosa, con la diferencia de que la presión de una radiación vale *un tercio* de la densidad de energía que

posee, mientras que la presión de una masa gaseosa vale *dos tercios* de la densidad de energía cinética correspondiente a sus moléculas. La explicación de esta anomalía, dentro de la analogía indicada, no resultará clara mientras no se conozca el mecanismo electromagnético del choque de una molécula contra la pared del vaso que la contiene.

Sin embargo, una ampliación del concepto de energía, introducido por el Electromagnetismo primero, y por el Relativismo después, permite establecer un paralelo entre la presión de una masa gaseosa y la presión de una radiación. Según ello, la energía total de una masa gaseosa está compuesta de una parte correspondiente a la velocidad de sus moléculas, *de cuyo valor depende la presión*, y de otra parte, enormemente mayor, representada por la masa mecánica de los protones y electrones que constituyen estas moléculas, cuya equivalencia en energía veremos luego que se halla multiplicando dicha masa por el cuadrado de la velocidad de la luz. Si admitimos, como veremos luego, que la *mitad* de la energía radiante es debida a la masa mecánica de *ciertos corpúsculos neutros que la formaran*, y la otra mitad a la energía cinética de estos mismos corpúsculos, quedaría aclarada la anomalía citada en el sentido de que la presión de una radiación sería debida a la fuerza viva de los corpúsculos que la formaran.

Explicación de la anomalía anterior.

Si la presión de una radiación es proporcional a la densidad de energía, y esta densidad, según la ley de Stefan, crece proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura, bien puede deducirse que la presión de una radiación negra crece proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura. Por tal motivo, a temperaturas no muy elevadas la presión de una radiación negra es despreciable; a la temperatura ordinaria de 27° vale 0,0000206 dinas por cm.². Pero aumenta rápidamente a medida que la temperatura se eleva, por lo que se comprende la inconsciencia con que se asignan temperaturas muy crecidas a la superficie solar. Tomemos como ejemplo una de ellas: 300000°. Es tan inverosímil que, de ser verdad, la energía de la radiación en su superficie valdría $61,88 \cdot 10^{12}$ ergs. por metro cú-

Algunas aplicaciones concretas de la ley de Stefan.

bico, y la presión $206 \cdot 10^5$ dinas por cm^2 , o sea una presión de 20 kgs. por cm^2 , lo que equivale a decir que la cromosfera solar estaría sometida a una presión superior a 20 atmósferas terrestres en sentido contrario a la atracción del Sol, presión suficiente para arrancarla y precipitarla en todas direcciones del sistema planetario. Más acentuada sería esta inestabilidad si se atribuyeran las temperaturas de Ericsson y el Padre Séchi, de 4 y 7 millones de grados, respectivamente.

No obstante, no se puede negar que en el interior del Sol existe una temperatura enormemente elevada. Según la teoría de M. See (1), construída a base de las leyes físicas correspondientes a las temperaturas usadas en los laboratorios terrestres, y admitiendo que las moléculas solares son todas monoatómicas, la presión gravítica de la masa solar vale en el centro del Sol 11.215 millones de atmósferas y la temperatura 90 millones de grados. Pero calculada la presión de la radiación a esta temperatura, resulta 16.000 millones de atmósferas, valor suficiente para compensar la presión gravítica, haciendo explotar el Sol.

Pero estos números tienen un valor muy relativo, ya que tenemos un desconocimiento completo de la estructura de la materia en el interior del Sol, y por eso no podemos aplicar ninguna ley terrestre en este caso. Con indicar que la densidad de energía radiante en el interior del Sol, a la temperatura dada por See, vale $4986 \cdot 10^{14}$ ergs. por cm^3 , cuya masa equivalente es 5/9 de miligramo, es suficiente para comprender el papel importante que juega la radiación en el seno del Sol lo mismo por su peso que por su presión. Los razonamientos de See deben, pues, ser corregidos. Y dejamos para más adelante insistir sobre este asunto.

De la teoría
electromagné-
tica y la expe-
riencia.

En lo que va dicho de las radiaciones, no ha sido necesario suponer la existencia corpuscular de las mismas para esta exposición sucinta. Parece, pues, muy adecuada la teoría electro-

(1) Ver Bosler: *Le Soleil*, pág. 206.

magnética o de continuidad. Mas el mejor argumento a favor de esta teoría existe en la multitud de experiencias de difracción y de interferencias, cada vez hechas con más precisión (1), ya no solamente en el terreno de las radiaciones visibles, sino que, a partir de las experiencias de Laue, Bragg, Broglie, etc., en el terreno de los rayos X, por lo que la teoría electromagnética ha recibido nuevas confirmaciones. Teniendo en cuenta que se ha logrado hacer interferir dos rayos luminosos que llevan una diferencia de marcha de 1 dm., podemos asegurar, por lo menos, que en un trayecto de 1 dm. existe una continuidad en el campo electromagnético que forma el rayo luminoso.

De propagarse la energía radiante en forma de gránulos, el experimento anterior exige que estos gránulos tengan por lo menos 1 dm.³; pero como, además, en 1 dm.³ de radiación existirían gran número de gránulos, número que dependería de intensidad de la radiación, estos *gránulos tendrían que penetrarse mutuamente*. Esta consecuencia parece rara por el hábito creado a causa de la aparente impenetrabilidad de los objetos de la naturaleza; pero esta impenetrabilidad tiene como origen una superficie de discontinuidad en la delimitación de los cuerpos impuesta por nuestros groseros medios de medida, discontinuidad que no existe en los elementos protón y electrón, y es probable que ocurra lo mismo con los gránulos de energía radiante.

De existir gránulos de radiación, éstos deberían penetrarse.

El primer fenómeno que lleva al ánimo la aplicación de un criterio de discontinuidad para las radiaciones, es la carga fotoeléctrica de un conductor, o sea el arranque o separación de electrones de la superficie de un metal, provocado por la incidencia de luz ultravioleta y rayos X, lo que ocasiona un defecto de electricidad negativa en el conductor equivalente a una carga positiva.

El fenómeno fotoeléctrico.

Ensayada para un mismo metal la descarga por medio de distintas radiaciones, ésta sólo se consigue a partir de una radiación de frecuencia mínima, sin ninguna limitación para frecuencias superiores; con la particularidad que una frecuencia defi-

(1) Ver Lorentz: *Rapport au Congrès de Bruxelles*, pág. 12.

ciente no puede compensarse con una mayor intensidad de la radiación. Si añadimos a eso que los electrones separados parten de la superficie del metal con una velocidad creciente con la frecuencia de la radiación incidente, resulta que la descarga de cada electrón necesita un acopio de energía necesario para tres operaciones: arrancarlo del átomo, separarlo del metal y comunicarle fuerza viva, cuyo *valor es proporcional a la frecuencia de la luz o radiación incidente.*

La relación restrictiva de la carga fotoeléctrica.

Este último detalle se expresa hoy ya en la forma generalizada $\epsilon = h \cdot n$, donde ϵ indica el valor del elemento de energía necesaria para liberar un electrón; h , el factor de proporcionalidad, cuyo valor es $6,55 \cdot 10^{-27}$ ergs. segundo, y n la frecuencia de la radiación incidente. Esta relación no da un mínimo de energía, como suele decirse, sino un mínimo de h , cantidad nueva compuesta de las dimensiones *energía $\times$ tiempo*. En cuanto a ϵ y n , son dos valores variables paralelamente, cuyo mínimo para excitar la descarga de un electrón depende del metal que se someta a la experiencia.

La teoría electromagnética no explica el fenómeno.

¿Cómo explicar el efecto fotoeléctrico con la teoría electromagnética o de continuidad? Esta teoría concordaría con el fenómeno si la liberación de electrones dependiese de la intensidad de la radiación y no de su frecuencia. Aún más: si se tiene en cuenta el tamaño de un electrón, la energía que recibe en su pequeña superficie, trasladada por la radiación excitatriz, es inferior a veces a la necesaria para arrancarlo del metal, admitido que la densidad de la radiación es homogénea.

Es necesario imaginar una teoría granular para explicar el efecto fotoeléctrico.

Supóngase ahora que la energía de la radiación está localizada formando núcleos o gránulos; entonces todo electrón, para escapar del metal, absorbe por entero un gránulo de esa energía independientemente del volumen que éste ocupa. Supóngase, además, que el valor del gránulo de energía ϵ viene dado por la relación del párrafo anterior, es decir, proporcional a la frecuencia de la radiación a que pertenece; entonces, al apoderarse el electrón adquiere una energía también proporcional a la frecuencia. Según eso, existiría una gradación de gránulos de energía de menor a mayor, desde los que formarían las ondas hertzianas

hasta los que formarían la luz ultravioleta y rayos X; son los gránulos correspondientes a estos últimos los que, por su enorme valor enfrente a los otros, no sólo consiguen arrancar los electrones del metal, sino que a la vez les comunican velocidades equivalentes a las de los rayos catódicos.

Hay otro fenómeno que es la emisión de una radiación, cuyo desarrollo presentamos más adelante, el cual se verifica por quantas o cantidades finitas de energía, las que obedecen a la sencilla relación apuntada antes. Pero tanto la absorción fotoeléctrica como la emisión de rayos espectrales no se refieren a la radiación en marcha, sino a los límites de su vida. Los quantas o gránulos de energía emitidos bien pueden compararse a los volúmenes de agua vertidos por unos cangilones en un canal; el agua cae por quantas, pero el canal los reúne y forma con ellos un todo continuo de sección constante. Del mismo modo la energía pudiera ser emitida por cantidades discretas; éstas se reunirían luego, formando una radiación continua y compatible con la teoría electromagnética. O bien sería el átomo emisor de energía el agente excitador de *un éter*, a golpes, y éste vibraría como lo hace una barra metálica excitada a martillazos.

La emisión por discontinuidad no obliga a una teoría granular.

Más difícil es explicarse cómo una radiación continua puede ser absorbida por saltos bruscos. El mismo Planck (1), en su teoría general de los quanta, presenta un segundo punto de vista de esta teoría, en la que admite la continuidad en el proceso de la absorción; pero esta absorción se refiere a un proceso intratómico, mientras que en el efecto fotoeléctrico la absorción de la radiación incidente se verifica por otro mecanismo, que no explica cómo un electrón puede recoger la energía residente en un volumen de radiación mayor que él más que suponiendo que esa energía forma *una unidad* indivisible, es decir, un gránulo.

Otro punto importante en contra de un criterio de continuidad es la aplicación del principio de equipartición de la energía: la energía de un elemento libre en contacto físico con otros muchos, es igual a una constante por el número de libertades de

La equipartición de la energía en pugna con la teoría electromagnética.

(1) *Wärmestrahlung*, pág. 188.

movimiento que posee dicho elemento. En consecuencia, un sistema compuesto de materia y éter acabaría por acumular toda la energía en forma de radiación soportada por este último, ya que por razón de su perfecta continuidad posee un número infinito de libertades de movimiento. Esta radiación sería una radiación compleja que abarcaría toda clase de radiaciones simples, desde las de onda más larga hasta las de onda más corta; principalmente estas últimas formarían la casi totalidad de la energía radiante.

La objeción del párrafo anterior utiliza como base el mecanismo emisor absorbente entre la materia y la radiación, de modo que reduce la cuestión a lo que será en otro capítulo expuesto más adelante; allí se verá qué restricciones existen para que una radiación en equilibrio con la materia contenga un número infinito de radiaciones simples. Además, aplica un principio de carácter más bien mecánico a algo de carácter tan vago y tan problemático como es el éter.

Verdaderamente que por lo dicho la estructura de una radiación no es un asunto que haya eliminado la duda del mundo científico. ¿Cabe asegurar que una radiación pura, es decir, alejada de toda materia, necesita de la restricción introducida por la teoría de los quanta de Planck para explicar todos los fenómenos que ocurren en su propagación?

Hay todavía otros hechos para ilustrar la pregunta planteada; entre ellos, el corrimiento de las rayas espectrales hacia las frecuencias bajas, cuando aquéllas proceden de cuerpos situados en campo gravitatorio muy intenso, como es el campo solar.

El corrimiento de las rayas espectrales en favor de una teoría granular.

En Relatividad se explica este fenómeno como consecuencia del retraso que la variable tiempo sufre en un campo gravitatorio. Los elementos productores de los colores espectrales vibran más lentamente; por lo tanto, el color emitido corresponde a una frecuencia interior que la que daría el mismo elemento vibrando fuera del campo gravitatorio solar, donde el tiempo se desliza más rápido. Mas este mismo resultado saca Bucherer (1) por la

(1) *Ann. der Phys.*, vol. 68, pág. 1, 1922.

teoría de los quanta de acción. Al salir del campo solar un elemento de radiación que componga un quanta, la energía potencial ganada por este elemento alejándose del Sol, la atribuye Bucherer a la pérdida de la propia energía que posee dicho elemento de radiación: como la energía ϵ de un quanta vale hn , siendo h una constante universal, un decremento en ϵ lleva un decremento en n , o sea un corrimiento hacia el color rojo.

Queda con eso claro que las teorías de relatividad y de los quanta conducen a un mismo resultado, con muchísima más sencillez la segunda. La diferencia entre las dos consiste en que para la primera sale la frecuencia elaborada en el átomo emisor, y en la segunda es la fuerza de gravitación, que, actuando sobre el quanta, mientras éste se propaga, retrasa su período de vibración.

No obstante, el corrimiento de las rayas espectrales del espectro solar no es un hecho claramente observado (1). Las dificultades para que el fenómeno resulte incuestionable, son debidas a la serie de causas perturbadoras que modifican el mecanismo de la emisión, causas en las que van comprendidas todas aquellas que modifican la primitiva teoría de Bohr y que exponemos más adelante.

Como se ve, los argumentos en favor de la teoría de la discontinuidad de la radiación en *plena marcha* no son definitivos; es la teoría de la emisión de Bohr la que influye a decidir en su favor. En este estado se trata de soldar dos teorías tan antagónicas para formar una sola; algo así como una amalgama del electromagnetismo y de la teoría del estado gaseoso, de lo que es un ejemplo el trabajo de Broglie (2): supone que una radiación es la superposición de *cierta onda*, que no dice de qué naturaleza, y de gránulos de energía; la primera viaja con una velocidad ligeramente superior a la de la luz, por lo que en virtud de la relatividad no transporta energía; los segundos, en cambio,

Cómo se pueden soldar las dos teorías.

(1) Ver *Revue des Sciences*, 15 diciembre 1923. Un buen resumen del estado actual de este problema.

(2) *Philosophical Magazine*, febrero 1924, pág. 446.

se propagan con velocidad ligeramente inferior a la de la luz, y son los que transportan la energía, influidos en sus movimientos vibratorios por la onda sobre la cual viajan.

No podemos, dada la índole de nuestro trabajo, explicar la teoría de Broglie; es bastante artificiosa, y si bien en la exposición matemática no llega a las dificultades de otras teorías, en cuanto a los conceptos que maneja resultan confusos y en ninguna manera comparables, por ejemplo, con la elegancia de la teoría de Bohr. Sin embargo, el camino está emprendido y es una necesidad científica creciente cada vez más, soldar de una vez el electromagnetismo de Maxwell y los quanta de Planck.

III

La energía en la materia y en la radiación

Hecha ya una reseña escueta de lo que son la materia y la radiación, trataremos de exponer ahora el carácter *energético*, común a ambas cosas, e indicar cómo en este carácter reside un sentido evolutivo que representa el segundo principio de Termodinámica con las restricciones introducidas por la teoría cuántica de la emisión.

Los conceptos
de materia y
energía.

Anteriormente llevamos dicho que una radiación transporta energía y que por ella se mide. Sin embargo, la materia se mide por su *masa*, que es la de los quantas eléctricos que la forman. Por eso la manifestación energética de la materia es de más difícil inteligencia. La dificultad en la exposición, así como la resistencia a la admisión de tal idea, reside, más que en el propio asunto, en el conocimiento del esquema clásico de los materiales de que estaba constituido el Universo, *materia y energía*; tan perfectamente delimitados ambos conceptos, que para los dos se aplicaba el principio de su conservación o invariancia por separado.

No es de extrañar el criterio clásico de diferenciación entre materia y energía, por cuanto, para llegar al que nosotros pretendemos exponer, hacía falta dar un paso definitivo en el conocimiento de la estructura de la materia. Descubierta la composición eléctrica de la misma, resulta una consecuencia inmediata la fusión de los conceptos energía y materia, puesto que esta última equivale a masas eléctricas, las que a su vez representan energía. Pero empaquetadas como van las masas eléctricas en la formación de los átomos, desaparecen sensiblemente los campos eléctricos que de ellas dimanan a causa de la absorción mutua de líneas de fuerza que protones y electrones verifican entre sí; sólo a distancias comparables a las moléculas son sensibles dichos campos; por lo que hasta ahora pasaron desapercibidos, puesto que sus manifestaciones en forma de cohesión, adherencia, capilaridad, etc., no eran lo suficientemente sencillas para levantar el velo que cubría la constitución eléctrica de la materia.

Por qué hasta ahora representaban cosas distintas.

En cambio, el concepto de carga eléctrica se presta mejor a identificarla con una acumulación de energía, la que en realidad está depositada en todo el espacio que rodea dicha carga y cuya densidad aumenta hacia el centro de la misma. De cómo una carga eléctrica equivale a energía es aplicado por primera vez por Maxwell al idear la corriente de corrimiento, a base de la importancia concedida al medio ambiente por su precursor Faraday.

Aquel físico, creador de la Electricidad clásica, necesita, para redondear su obra, introducir la equivalencia de una corriente eléctrica con una corriente energética, o sea la llamada corriente de corrimiento; sólo mediante esta idea genial, dado el desconocimiento que se tenía entonces del asunto, pudo establecer las ecuaciones que rigen un campo electromagnético. Esta equivalencia tiene una buena explicación en la descarga de un condensador por medio de un conductor que ponga en comunicación sus dos platillos; por el conductor circulan masas eléctricas mientras dura la descarga, y a través del medio que separa los dos platillos circula una corriente de energía. Ambas corrientes forman un circuito cerrado, a lo largo del cual, para Maxwell, ha circulado la *misma cosa*.

Cómo la carga eléctrica y la energía juegan un mismo papel.

De la coexistencia de una carga eléctrica y de la energía.

Prescindiendo de la idea de Maxwell, la fusión de los conceptos carga eléctrica y energía es fácilmente explicable con los conocimientos de Física elemental. Imagínese dos masas eléctricas de distinto signo, que bien pueden ser un protón y un electrón, las cuales, abandonadas a su acción atractiva, tienden a juntarse neutralizando sus cargas, con lo que en el espacio circundante desaparecería toda acción o campo eléctrico. Ahora bien: para separar estas masas es necesario efectuar un trabajo, *gastar energía* en el concepto clásico, gasto de energía que crece a medida que las masas se separan y tiene su mayor valor cuando la distancia entre las dos es infinita. Correlativamente con la separación de las masas se produce el restablecimiento de los campos eléctricos pertinentes a ambas. De ahí que podemos decir que la creación de un campo eléctrico se puede hacer por suministro de energía, y que tal operación va aneja a una separación o alejamiento de masas eléctricas de distinto signo. Inversamente, la desaparición de dicho campo eléctrico nos devuelve el trabajo antes indicado, mientras se verifica la aproximación de las cargas, hasta llegar al aniquilamiento de las mismas, suponiendo que ellas fueran antitéticas. Con lo dicho queda, pues, claro que *carga eléctrica*, *campo eléctrico* y *energía* son tres manifestaciones de la Naturaleza que van invariablemente unidas.

En verdad que no se puede decir que tal energía pertenezca a la carga eléctrica o a su campo, ya que ambas cosas son un mismo factor físico, puesto que la existencia de la primera se educe como consecuencia de las manifestaciones del segundo; tanto es así que, si se tuviese que optar por la elección de una de las dos cosas, se diría que existe un campo convergente hacia un punto, prescindiendo de nombrar o citar una masa en este punto. Tal campo convergente es lo que constituye la *cabellera* de líneas de fuerza representativas de la masa eléctrica.

El cálculo de la energía total de un quanta

El cálculo (1) del valor total de la energía distribuida en el espacio, por causa de la presencia de la carga *electrón* y repre-

(1) Languevin: *La Physique depuis vingt ans*, pág. 376, 1923.
Becquerel: *Principe de la Relativité*, pág. 107, 1922.

sentada por esta cabellera de líneas de fuerza, da un valor a la energía total del campo que está en la relación de $2/3 : 1/2$ con el valor del producto de la masa mecánica del electrón por el cuadrado de la velocidad de la luz, contada ésta en unidades cegesimales; de modo que aun cambiando la unidad energética, dividiéndola por $(3 \cdot 10^{10})^2$, resulta que la energía del campo creado es más pequeña que la masa de carga eléctrica total del electrón.

coincide con el valor de su masa.

Para salvar esta diferencia, Langevin añade a la energía del campo creado la energía resultante de la presión ideada por Poincaré para contrarrestar la repulsión electrostática que las distintas partes del electrón sostienen entre sí, cuyo valor compensa exactamente la diferencia antes indicada. Esta presión bien puede compararse a la necesaria para comprimir una masa gaseosa en contra de la expansividad del gas contenido.

Sin acudir a la presión de Poincaré puede explicarse la discrepancia antes fijada, teniendo en cuenta que la integración de la energía correspondiente al campo eléctrico se hace suponiendo la exactitud de la ley de Coulomb. Pero esta ley, que lleva más de un siglo de confirmaciones, al ser aplicada a distancias comparables con las dimensiones de los quantas eléctricos, no satisface a la experiencia; así resulta, por ejemplo, que las dimensiones supuestas al núcleo del átomo de litio no son compatibles con la ley de Coulomb y la teoría de Bohr a la vez (1), por lo que se atribuye a la distancia que interviene en dicha ley un exponente que oscila entre -2 y -3 . Se ve claramente que este exponente indica un intensidad del campo eléctrico en las cercanías de la masa que lo produce mayor que la dada por la ley de Coulomb; de ahí, pues, que al hacer la integración del campo eléctrico, según los nuevos exponentes, pudiera resultar la compensación de la diferencia antes indicada.

Análogo a lo dicho para el electrón es aplicable al protón, pues si bien su masa mecánica es 1.845 veces mayor que la del primero, la integración de la energía que compone su campo

(1) Neuburger: *Annalen der Physik*, vol. 68, pág. 576, 1922.

llega a puntos más cercanos al centro de su masa, donde la fuerza eléctrica crece enormemente, lo que importa una acumulación de energía muy grande en las proximidades de su centro.

Modificaciones
que experimenta el valor energético de un quanta al ponerlo en movimiento.

Admitida la equivalencia de la masa de un quanta eléctrico, protón o electrón, con la energía electrostática que su presencia impone al espacio, teniendo en cuenta que si la primera se cuenta en gramos y la segunda en ergs, el factor de equivalencia vale $(3.10^{10})^2$, nos ocuparemos ahora de lo que ocurre cuando un quanta eléctrico se pone en movimiento uniforme de velocidad pequeña comparada con la de la luz.

Para comunicar un movimiento uniforme a un quanta eléctrico es necesario aplicarle una aceleración que le preste velocidad durante un intervalo de tiempo. Una vez conseguido el movimiento uniforme del elemento eléctrico en cuestión, el espacio circundante habrá sufrido las dos siguientes modificaciones:

1.^a La cabellera radial de líneas de fuerza electrostática seguirá al quanta eléctrico en su movimiento, sin deformarse sensiblemente, para velocidades pequeñas comparadas con la de la luz. Además de este campo eléctrico, por causa del movimiento habrá nacido un campo magnético compuesto por líneas de fuerza magnéticas que forman círculos perpendiculares a la dirección del movimiento y con centro en esta dirección; la energía electrostática representa la masa del quanta; la totalidad de la energía correspondiente al campo magnético representa la energía cinética de dicho quanta.

2.^a Otra modificación del espacio es la onda electromagnética o *radiación compleja* producida por efecto de la aceleración (1) o sacudida necesaria para comunicar al quanta eléctrico su movimiento uniforme; del mecanismo de formación de esta

(1) Es necesario observar que para producir prácticamente una aceleración deben aplicarse al quanta eléctrico en cuestión la acción de otros quantas eléctricos, lo que en resultado viene a ser una *aproximación*. Valga esta observación por las veces que en el transcurso de este discurso aseguramos que la emisión de radiaciones se verifica por aproximación de elementos eléctricos.

onda nos abstendremos de exponerlo, principalmente porque en la emisión de radiación la teoría quantística introduce restricciones a la teoría electromagnética que dependen de cada caso concreto, algunas veces desconocidas. Sólo diremos que la radiación emitida dura lo que dura la aceleración o sacudida, y su composición depende de la forma de esta sacudida.

En resumen: la energía suministrada al quanta eléctrico para ponerlo en movimiento queda distribuida en dos porciones: una ha enriquecido en un campo magnético al electrón, quien lo arrastra en su movimiento; otra pertenece a la onda o radiación, la que se aleja con la velocidad de la luz del quanta que la produjo. La última se ha formado, como veremos luego, a expensas de un aumento de entropía, o sea el fenómeno es irreversible.

Propongámonos ahora esquematizar lo que ocurre si al quanta eléctrico, ya en movimiento uniforme, se le comunica un incremento de velocidad: ello equivale a acelerar toda la energía correspondiente a los campos del mismo, electrostática y magnética. Prescindiremos de la carga elemental que produce dichos campos, porque para nosotros la realidad de lo que pretendemos mover no es el quanta eléctrico, sino las fuerzas eléctrica y magnética creadas por éste en el espacio, que son a la postre lo directamente acusable por los aparatos de medida; la aceleración propuesta equivale, pues, a distribuir una aceleración para cada elemento de energía eléctrica y magnética contenido en cada celdilla del espacio. Para nosotros, la *inercia* del movimiento reside en la energía contenida en esta celdilla mejor que en el centro del quanta, donde van a converger las líneas del campo electrostático.

Recordaremos al lector ahora, acudiendo a un conocimiento de electricidad, que una traslación de una fuerza eléctrica se verifica a expensas de una creación de una fuerza magnética; que una traslación de una fuerza magnética lleva consigo la creación de una fuerza eléctrica. La energía suministrada en las dos traslaciones indicadas equivale, pues, a la energía correspondiente a las fuerzas magnética y eléctrica creadas. Por con-

siguiente, el efecto total de la aceleración propuesta será enriquecer el espacio con dos nuevos campos, magnético y eléctrico, que se superpondrán a los ya existentes, aparte la emisión de una onda o radiación más o menos compleja, como antes se ha indicado.

Cómo la masa o energía de un quanta se acrecientan indefinidamente al acercarse a la velocidad de la luz.

Una vez adquirido por el quanta el incremento de velocidad propuesto, seguirá con movimiento uniforme, *llevando consigo un campo eléctrico y magnético más intensos que al iniciarse el movimiento; la energía total que traslada el quanta en su movimiento es mayor que la que poseía en reposo*. De ahí que la masa o inercia que presenta el quanta eléctrico a una nueva aceleración es mayor. Pero una aceleración acrecentaría nuevamente, por el mecanismo antes descrito, la energía electromagnética del espacio, lo que supone otro acrecentamiento de la masa o inercia del quanta. Así prosiguiendo los incrementos de velocidad, con esfuerzos cada vez mayores a causa de la mayor inercia del quanta, se conseguiría aumentar la totalidad de la energía electromagnética más allá de todo límite cuando nos aproximáramos indefinidamente a la velocidad de la luz.

Como los incrementos de fuerza eléctrica obtenidos con las sucesivas aceleraciones son siempre normales a la dirección del movimiento, la forma del campo electromagnético para velocidades crecientes se achata, tendiendo a transformarse en un campo radial, plano, perpendicular a la dirección del movimiento cuando el quanta se aproxima a la velocidad de la luz. En esta forma la inercia o masa del quanta o, lo que es lo mismo, su energía, son infinitas. Es imposible, pues, superar la velocidad de la luz, y si recordamos que la materia es una síntesis de quantas eléctricos, *la velocidad de la luz se nos presenta como una frontera infranqueable, a la cual el hombre no podrá llegar nunca, aun aplicando las reservas más enormes de energía a los cuerpos más pequeños*.

Esquemmatizada la forma cómo la masa material de los quantas de electricidad, y por tanto de los átomos que ellos forman,



puede representarse por un valor energético, es necesario para establecer definitivamente el criterio de *unidad* en la estructura del Universo, proceder a lo mismo para las radiaciones. Evidentemente que una radiación, por su mismo carácter electromagnético, equivale a una corriente de energía dada por el vector de Poynting; ¿cómo explicarse lo mismo si aceptamos la teoría granular?

Toda teoría granular debe admitir el carácter neutro de las radiaciones, sin que esto suponga rechazar una constitución eléctrica a base de las dos características, negativa y positiva, sino lo contrario, entender que en la composición de los gránulos entran las dos modalidades de electricidad en cantidades iguales. Precisamente la emisión de una radiación se verifica siempre a causa de una aproximación de cargas eléctricas de distinto signo, lo que lleva en sí una desaparición de parte de las líneas de fuerza correspondientes a ambas cargas; esta pérdida es lo que constituye el quanta o gránulo de radiación que, de consiguiente, poseería un carácter neutro *bieléctrico*. Equivaldría a un *átomo pequeño* procedente de la desmembración de otro muchísimo mayor.

De una composición bieléctrica, neutra, de los gránulos de radiación.

De confirmarse el carácter granuloso, a la vez que neutro, de las radiaciones, ¿por qué no se aplica a ellas la teoría del estado gaseoso? La diferencia que existiría, desde el punto de vista energético, entre el átomo de un cuerpo simple y el átomo de una radiación sería por un lado en cantidad; el valor total de la energía, representada por un átomo material, sería enorme comparado con el correspondiente a un quanta o átomo de radiación. Pero así como en el átomo material casi toda la energía va almacenada en forma de campo electrostático, aunque muy ceñido a él por efecto del empaquetamiento de sus cargas, en el átomo de radiación, por motivo de su mucha velocidad, adquiere valor importantísimo la energía cinética depositada en forma de campo magnético; es decir, que al valor de la energía electrostática correspondiente a una carga en reposo deben añadirse valores cada vez más crecientes de energía electrostática y magnética adquiridos a medida que aumenta la velocidad,

Las diferencias energéticas entre un gránulo de radiación y un átomo material.

tales que llegan a ser incomparablemente mayores que el primitivo.

En el primer caso se encuentra la materia ordinaria, pues aunque posee a veces pequeñas velocidades en comparación con la de la luz, éstas suponen una cantidad de energía cinética o magnética despreciable. En el segundo se encuentran las radiaciones, de forma que *la cantidad de energía representada por un gránulo se puede dividir en dos partes iguales: magnética y eléctrica*; desde luego, la suma de las dos es enormemente mayor a la que correspondería a un quanta de radiación en reposo, si esto fuera posible; lo que es lo mismo, la masa o la energía de un gránulo de radiación son debidos casi en su totalidad al acrecentamiento producido por su gran velocidad por el mecanismo antes descrito.

Es de observar que en este resultado coinciden a la vez la teoría electromagnética y la teoría granular. También aquélla da un valor total de la energía de un campo electromagnético compuesto de *dos sumandos iguales*, correspondientes al vector magnético y al vector eléctrico. Es éste un detalle de suma importancia por donde mejor se presta a ensayar un acoplamiento de las dos teorías.

Las dificultades de la concepción granular de una radiación.

Claro está que admitiendo la estructura antes dicha para un gránulo de radiación, es imposible que se propague con la velocidad de la luz, porque entonces su masa sería infinita. Y aquí está el mayor escollo, porque precisamente la luz es una radiación. Como expusimos ya, Broglie desvía este dilema suponiendo una onda y unos gránulos que viajan en ella con velocidad ligeramente inferior a la de la luz. Pero esta onda auxiliar lleva en sí las mismas dificultades que tratamos de explicar.

Con eso se ha llegado a un terreno para nosotros inextricable. Con las disponibilidades científicas actuales no podremos más que bordear este asunto. Indicaremos sólo la analogía de comportamiento energético entre los gránulos de radiación y los gránulos atómicos o moleculares.

Analogías energéticas entre la materia y la radiación.

La primera analogía, que ya expusimos en el capítulo anterior, consiste en que la presión de una radiación y de una masa gaseosa es proporcional exclusivamente a la densidad de ener-

gía que las dos representan, con la diferencia que a las radiaciones les corresponden, para igualdad de presión, doble densidad de energía. Si al hacer la comparación contamos únicamente la energía cinética o magnética de la radiación, que es la que sólo se cuenta en una masa gaseosa, como equivale a la mitad de la total, resulta una analogía perfecta.

Otra analogía existe en el crecimiento energético que sufren lo mismo las moléculas gaseosas y los gránulos de radiación al chocar contra una pared móvil. El trabajo gastado por esta pared contra la presión de estos corpúsculos se transforma en ambos casos en aumentar la energía total que ellos representan. Pues bien: según la teoría electromagnética (1), lo mismo que la relatividad (2), los gránulos de radiación experimentan un aumento de frecuencia proporcional a la energía que reciben, lo que en combinación con la relación fundamental del capítulo anterior $\varepsilon = hn$, equivale a decir que el número de gránulos se conserva constante cualquiera que sea el mecanismo del choque; es la cantidad de energía que cada uno posee la que se acrecienta con el choque. Análogamente ocurre con el choque de las moléculas gaseosas.

Con reciprocidad, las mismas ecuaciones rectoras de las transformaciones de una radiación son aplicables a los gases perfectos tratándolos como recintos de energía, con las discrepancias procedentes de que la presión para los segundos vale el doble que para los primeros. Sustituído este doble valor en la ecuación diferencial que Planck usa para las radiaciones, salen un conjunto de ecuaciones finitas referentes a los gases y concordantes con las ordinarias. Las discrepancias con sus homólogas de las radiaciones no tienen otro fundamento que la discrepancia en la calidad de la energía de las radiaciones y de los átomos.

(1) Planck: *Wärmestrahlung*, pág. 77.

(2) Becquerel: *Le principe de la Relativité*, pág. 93.

IV

Transformaciones de la energía

Los valores energéticos de la materia antes tratados, se refieren exclusivamente a protones y electrones situados aisladamente en el espacio, o por lo menos a distancias muy grandes de otros elementos o quantas eléctricos. Sin embargo, no es así como se nos presenta en la Naturaleza, pues sólo en casos rarísimos, por ejemplo, en los rayos β y en los rayos catódicos, aparecen aquellos quantas un poco separados. Precisamente la materia no es otra cosa que el resultado del acoplamiento de tales quantas. Por eso conviene fijarnos en las variaciones energéticas anejas a tal acoplamiento.

La pérdida de masa mecánica por causa de una aproximación de cargas eléctricas.

Es un conocimiento elemental de electricidad que, al introducir en un campo eléctrico creado por una masa eléctrica otra masa eléctrica de distinto signo, queda modificado el valor y dirección del campo en todos los puntos del espacio: *gran parte de las líneas de fuerza salen de una masa y son absorbidas por la otra.* Esta absorción de líneas de fuerza supone una disminución de la energía correspondiente al campo eléctrico de cada una de las masas; tal es precisamente la deformación del campo eléctrico creado por un protón en presencia de un electrón: gran parte de las líneas de fuerza de un elemento son absorbidas por el otro, tanto más cuanto menor sea su distancia. La pérdida de energía que de esto se deriva equivale, según lo dicho anteriormente, a una pérdida de masa inerte o mecánica de dichos elementos.

Este resultado es trascendental para nuestra exposición, puesto que nos hace ver que la masa inerte o mecánica, que ha sido hasta ahora la característica invariable de la materia ponderable, depende de las distancias que los elementos constituti-

vos de la misma guardan entre sí: toda aproximación de elementos de distinto signo contribuye a una pérdida de masa mecánica del cuerpo de que forman parte. Dicha pérdida de masa, según el principio de Hamilton, viene compensada por la emisión de energía radiante, a la vez que por un aumento de energía cinética de dichos elementos; ambos sumandos son equivalentes.

Hasta ahora en ningún caso se ha hecho sensible la pérdida de masa por causa de emisión de radiación. Pues si bien, como veremos luego, la emisión de radiación va siempre acompañada de una aproximación o acoplamiento de electrones y protones, el número total de electrones que en un instante dado están radiando es insignificante; además, en virtud del proceso de emisión, en cuya descripción no entramos ahora, otros electrones se separarán de los núcleos positivos, compensando así la pérdida de masa correspondiente a los primeros, siempre que la energía radiada sea suministrada al cuerpo.

Más importancia tiene la pérdida de masa en los fenómenos radiactivos, y en general en todos los que aparece una desintegración de la materia. En eso hemos de insistir más adelante, porque tiene un interés grande para estudiar el sentido de las transformaciones energía-materia una vez que se haya visto su equivalencia.

Una prueba más concluyente de lo expuesto creemos que reside en el hecho de los pesos atómicos fraccionarios con relación al helio y al oxígeno. En muchos casos dicha fraccionalidad es explicable por la existencia de los isótopos, los que se presentan mezclados en concentración constante, salvo el caso de cuerpos procedentes de descomposiciones radiactivas, como el plomo; pero en otros cuerpos la carencia de isótopos no permite dicha explicación. Tal es el caso del hidrógeno y del helio, que en los interesantes trabajos de Aston para separar sus isótopos (1) han dado siempre un resultado negativo. ¿Cómo entonces es compatible con la constancia de la masa mecánica de electrones y protones en

Por qué no se hace sensible la pérdida de masa en la emisión.

Los pesos atómicos fraccionarios son una prueba de la pérdida de masa por empaquetamiento.

(1) *Isotopes*, pág. 70.

reposo, que un electrón, más un protón, formando un átomo de hidrógeno, pesen 1,0077, y que cuatro protones, más cuatro electrones, cuando forman un átomo de helio, pesen *cuatro* exactamente? Verdaderamente la masa del helio no llega a ser cuatro veces mayor que la del hidrógeno, según indica el número de elementos eléctricos que contiene dicho cuerpo: *hay, pues, una pérdida de masa mecánica al pasar del hidrógeno al helio*. En este hecho existe la prueba de la pérdida de masa o materia.

Efectivamente: el núcleo positivo del helio debe estar formado de cuatro protones y dos electrones, los cuales entre sí deben guardar distancias pequeñísimas en relación a las distancias que los separa de los electrones corticales; se dice de ellos que forman un *paquete*. La aproximación de los electrones y protones nucleares supone una absorción de líneas de fuerza de unos elementos por otros, absorción que redundará en una pérdida de masa; por tanto, el paquete formado por los seis elementos antes dichos tiene menos masa que si estos elementos guardaran las distancias que guardan los constitutivos del hidrógeno.

Este último resultado es aplicable, no solamente al átomo de helio, sino a todos los cuerpos simples conocidos. En ellos el empaquetamiento de protones y electrones en el núcleo ha sido una de las causas de que la ley aditiva de Prout, respecto a los pesos atómicos, fuese abandonada a poco de haber aparecido. Pero debe tenerse en cuenta que el empaquetamiento no es el mismo para todos los átomos, puesto que, de ser así, el peso atómico de los mismos, cuando no presentan isotopía, debiera resultar un número entero, tomando como patrón el átomo de helio; así ocurre que para el nitrógeno, que no presenta isotopía, es ligeramente superior a 14, lo que indica una menor aproximación o empaquetamiento de los elementos que forman el núcleo. Esto se presta a atribuir al núcleo de nitrógeno la existencia de dos núcleos de hidrógeno relativamente separados del resto nuclear, los cuales le prestarán este exceso de masa; pero nosotros no insistiremos por este camino, porque no es nuestro objeto por ahora la estructura nuclear.

Siguiendo nuestra exposición energética, diremos que las diferencias de peso atómico causadas por el empaquetamiento son enormes si se cuentan en unidades de energía. Tanto es así, que la pérdida de masa que sufriría un gramo de hidrógeno al transformarse en helio (operación por el momento puramente teórica) equivale a $1'66 \cdot 10^{11}$ calorías, como demuestra un cálculo sencillo, basándose en que dicha pérdida de masa, multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz, es igual a la energía cedida en la transformación. Por lo menos, la experiencia no ha dicho nada respecto a este caso, y la teoría sólo nos puede guiar por el segundo postulado de termodinámica; pero tal postulado no es aplicable, porque por ahora no se conoce la función entropía aplicada aisladamente al átomo de hidrógeno o de helio. Si se conociera dicha función, podría saberse si uno de los dos cuerpos supone una mayor cantidad de entropía; entonces éste sería la transformación final a la cual podría tenderse suponiendo que el equilibrio que guardan entre sí es metastable, equilibrio que podría ser destruido por un pequeño aditamento de energía incomparablemente menor que el suministrado en la transformación.

Insistiendo, para el caso concreto del helio, calculado el empaquetamiento necesario para producir una pérdida de masa con respecto al átomo de hidrógeno, coincide con las dimensiones del núcleo. Este hecho parece, pues, una buena confirmación de la realidad de la transformación masa-energía. Hay aún otra cuestión que lleva al ánimo tal afirmación: se trata de la radiación solar.

Según la constante de Pouillet, el Sol irradia $1'763$ calorías pequeñas por cm^2 y por minuto, de donde resulta que el calor emitido por año en todas las direcciones del espacio vale $2'6 \cdot 10^{33}$ calorías, equivalentes a $10'9 \cdot 10^{40}$ ergs. ¿De dónde sale esta formidable cantidad de energía? No nos salimos del asunto propuesto en este discurso indicando esta cuestión, que tantas teorías ha tenido para ser explicada satisfactoriamente. Dicha energía se ha atribuido a combustiones solares; a la caída de asteroides o meteoritos sobre el Sol, donde pierden su fuerza viva; a una

El valor energético representado por una pérdida de masa.

La radiación solar no explicable por las teorías hasta ahora propuestas, por causa de un desconocimiento de la física del Sol.

contracción continua en el volumen del Sol, la que implicaría una pérdida constante de energía potencial de gravitación de todas las capas solares al aproximarse hacia el centro del astro; a cambios de estado y a la disociación; y, finalmente, a la radiactividad.

Todas estas teorías tienen el grave inconveniente de aplicar una clasificación de fenómenos hecha según las temperaturas terrestres de laboratorio a los fenómenos que se observarían en el interior del Sol, donde las temperaturas caen fuera de los límites imaginables. Con estas temperaturas, ¿qué significado tendrían todas las reglas de fases de Gibbs, la teoría del estado vítreo y cristalino de Tammann, si todos los cuerpos tienen una temperatura superior al punto crítico, si las curvas de cristalización y de vitrificación no tienen cabida en el gráfico presión temperaturas sacado de una región interior del Sol; si, en fin, los estados de la materia sólido, líquido, gaseoso, cristalino, vítreo, mesomórfico, etcétera, no tienen sentido al aplicarlos a dicha región, cómo hablar entonces de cambios de estado y de disociación? La misma radiactividad, que en la Tierra indica un gradiente enorme de energía o, mejor, de tensión, como veremos, entre el cuerpo radiactivo y el ambiente que le rodea, nadie puede asegurar que, dada la presión enorme que tiene la energía en el interior del Sol, no sea un fenómeno reversible en el seno de dicho astro, como en la Tierra lo es, por ejemplo, un cambio de estado.

Mejor sería apoyarse en la estructura de la materia, tan perfectamente conocida con el esfuerzo de estos últimos años. De la misma manera que la presión atmosférica, o la de los tubos Geissler, es suficiente para que desaparezcan muchas de las trayectorias del electrón del átomo de hidrógeno, observadas en algunas nebulosas, ¿qué ocurriría al modelo atómico de Bohr, situado en el interior del Sol? ¿Qué deformación no supondría allí el efecto Star? Lo probable es que, no solamente ninguna trayectoria sea posible, sino que este átomo no pueda subsistir ni formar nuestros complejos moleculares ordinarios. Aún más: las presiones y velocidades son tan grandes, que es muy posible que un choque de un elemento cualquiera, protón, electrón o grupo

formado por ellos, desintegre grupos nucleares de átomos o moléculas, de la misma manera que, como veremos, las partículas α sirven para desintegrar la materia en nuestros laboratorios, ya que aquellos elementos pueden poseer velocidades comparables a dichas partículas; o bien puede ocurrir el fenómeno inverso: que se integre materia a base de cesión de energía. Puede asegurarse, pues, por lo dicho, que todas estas transformaciones no caben en el marco de clasificación de los fenómenos hechos ordinariamente; sólo al llegar a la superficie solar se aproximan, aunque muy poco, las condiciones según las cuales se verifican las transformaciones a las usadas en los laboratorios.

Sin embargo, el criterio negativo antes expuesto no impide que se pueda presentar un origen de carácter más general que los anteriores como explicativo de la radiación solar: *toda creación de energía radiante tiene por origen una aproximación de masas eléctricas de distinto signo*. No es otra cosa que una aproximación de cargas eléctricas, la teoría de Bohr con todas sus ampliaciones para explicar la emisión de rayos espectrales. En resumen: la energía radiante emitida por la fotosfera solar procede de la región interior del Sol, donde se producen fenómenos de empaquetamiento cuya clasificación no cabe en los fenómenos ordinarios de la Física.

Tiene una explicación a base del empaquetamiento

Con lo dicho no hacemos más que exponer una teoría propuesta por Perrin, pero de un empaquetamiento más concreto. Atribuye la energía radiada a una formación de átomos pesados a base del acoplamiento de otros de hidrógeno. Como este cuerpo es el de mayor masa relativa conocido, cualquiera que sea el modo de formación propuesto, siempre llevaría consigo una pérdida de masa, causante de una creación de una formidable cantidad de energía radiante. Aunque es en este sentido como se verifica la evolución interior del Sol, no sabemos hasta qué grado es correcto hablar de los complejos moleculares terrestres como existentes a millones de grados de temperatura y millares de millones de atmósferas de presión.

De producirse la radiación solar por el empaquetamiento antes descrito, se ocasionaría una pérdida de masa del Sol por año equivalente a $1,2 \cdot 10^{20}$ gramos, o sea 120 billones de toneladas

La pérdida de masa solar por esta causa no es apreciable.

anuales. Esta pérdida de masa se traduciría a su vez por una atenuación del campo gravitatorio solar, que permitiría a los planetas alejarse cada vez más del Sol, describiendo sus trayectorias con más lentitud. La observación astronómica da un resultado contrario, pues el período de revolución de la Tierra alrededor del Sol aumenta en rapidez a razón de 0,2 segundos por año, hecho explicable por una caída de asteroides que producen un aumento de masa suficiente para compensar y aun sobrepasar el efecto de empaquetamiento.

Claro que a lo expuesto puede añadirse que si bien la energía radiante posee *masa*, eso no implica que la emisión de una radiación se verifique a expensas de una pérdida de masa del cuerpo emisor; porque la masa de la radiación bien puede residir en el mismo medio que la transmite, como la masa de la energía que transporta una onda sonora reside en el aire o medio que la propaga. Mas el concepto de pérdida de masa por empaquetamiento está demasiado claro para abandonarlo por una sencilla conjetura.

* * *

Queda a determinar el sentido preferente de la transformación *materia-radiación*, o mejor dicho, aplicar el segundo principio de Termodinámica a este caso. Aun no se ha construido una teoría respecto al particular, a causa de que los materiales que la experiencia y la observación nos deparan son insuficientes para escudriñar de una vez este territorio científico. No obstante, dos hechos permiten adoptar una orientación que probablemente resulte definitiva: son la *radiactividad* y la *desintegración de la materia*, cuya descripción haremos someramente para aplicarlos luego a nuestro cometido.

La radiactividad como fenómeno intranuclear.

A la temperatura ordinaria todos los fenómenos físicos y químicos conocidos, excepto la inercia de la materia, sólo interesan los electrones corticales de los átomos, y aun entre ellos los situados en el piso más elevado del modelo atómico de Langmuir. El núcleo atómico supone un campo de fuerzas tan intenso en

comparación con el de la corteza, que atravesar ésta para llegar al primero, supone disponer una enorme cantidad de energía concentrada en un pequeño volumen. Mas, en virtud del principio de equipartición de la energía, la dosis correspondiente a un elemento libre, molécula, átomo, quanta eléctrico, es inferior, a la temperatura de la Tierra, a la necesaria para atravesar dicha corteza y llegar al núcleo. De ahí que no se pueda esperar por medio de choques de estos elementos libres llegar al núcleo atómico, *ni tampoco contrarrestar o impedir cualquier fenómeno que del núcleo procediera* Tal fenómeno se llama *radiactividad*.

Del núcleo atómico de varios cuerpos llamados *radiactivos*, proceden los rayos α , β y γ . Los primeros son átomos de helio doblemente ionizados, desprendidos a gran velocidad, o sea núcleos de helio sin corteza electrónica, que constan, por tanto, de (4 prot. 2 elec.); los segundos son electrones desprendidos a mayor velocidad aún; los terceros forman una radiación compleja de frecuencia elevadísima, mayor que la de cualquier radiación obtenida por los medios ordinarios, algo así como una radiación negra de temperatura incomparable con las por nosotros conocidas.

Hasta ahora parece que todos los cuerpos radiactivos son resultado de la desintegración nuclear espontánea de dos primitivos, uranio y torio, según el siguiente mecanismo: Cuando el núcleo de un cuerpo radiactivo emite partículas α (4 prot. 2 elec.) se transforma en otro situado dos lugares más atrás en la clasificación natural de Mosseley, puesto que en resultado el núcleo posee dos cargas positivas menos; a la vez, el peso atómico disminuye en cuatro unidades a causa de los cuatro protones perdidos. Cuando el núcleo de un cuerpo radiactivo emite una partícula β , un electrón, se transforma en otro en lugar más avanzado en la clasificación de Mosseley por causa del aumento en una unidad de la carga positiva del núcleo; a la vez, el peso atómico del átomo sufre una pequeña pérdida no apreciable. La emisión de radiaciones γ se presenta únicamente acompañando algunas veces la emisión de partículas β ; pero nunca junto con la emisión de partículas α , ni tampoco aisladamente.

Ley de las transmutaciones radiactivas.

La desintegración de la materia.

En cuanto a la *desintegración de la materia*, ya Rutherford, en 1919 (1), al medir el poder penetrante de las moléculas de nitrógeno a gran velocidad, producida por el choque de partículas α , observó una anomalía, pues mientras gran número de moléculas atravesaban el aire seco a una distancia límite, conforme con el resultado de una teoría previamente elaborada, otras partículas llegaban mucho más allá; estas últimas eran núcleos de hidrógeno, o sea protones, arrancados del núcleo del nitrógeno.

En experimentos posteriores (2) se llega a la desintegración artificial de varios elementos, la que puede suplir a la *transmutación* soñada por la Alquimia. En realidad no se consigue la transformación de unos elementos en otros, sino la descomposición parcial del núcleo atómico, o sea arrancar de éste uno de los protones que lo constituyen. El mecanismo experimental consiste en dirigir una partícula α de una sal radiactiva contra el cuerpo o sal del mismo que se quiere desintegrar; los protones arrancados del núcleo atómico de dicho cuerpo van a parar a gran velocidad contra la pantalla de blenda, donde se percibe una centella por cada partícula que llega. El número de centellas se cuenta fácilmente con un microscopio. Para comprobar que las partículas que llegan sobre la blenda son protones, es decir, núcleos de hidrógeno, se someten a la acción de un campo magnético: el sentido y valor de la desviación que sufren dichas partículas, corresponden a las constantes del protón.

El resultado del experimento indicado es el aislamiento del quanta de electricidad positiva procedente del núcleo de los átomos sometidos a la experiencia, lo que confirma la existencia de protones en dicho núcleo, según habíamos expuesto ya al hablar de la estructura de la materia. Se dice generalmente que en la desintegración de la materia se obtiene hidrógeno; éste es un resultado secundario, puesto que el hidrógeno que puede formarse es siempre debido al encuentro de dos elementos dis-

(1) *Philosophical Magazine*, vol. 37, pág. 581, año 1919.

(2) *Idem id.*, vol. 24, pág. 809, año 1921.

persos, electrón y protón, que al acercarse sus campos de fuerza se retienen mutuamente formando el sistema atómico más sencillo.

Definidos ya los fenómenos de radiactividad y de desintegración artificial de los elementos, intentaremos esbozar el sentido preferente de la transformación materia-radiación.

Si aplicásemos rígidamente la teoría electromagnética junto con la estructura eléctrica del átomo, resultaría como consecuencia el aniquilamiento de la materia. Cualesquiera que sean las trayectorias que los quantas eléctricos describen en sus movimientos relativos en el interior del átomo, sólo por su mera condición de curvas implican una aceleración; mas la aceleración de un quanta eléctrico, como antes indicamos, produce una radiación, y a la vez este quanta, aparte la fuerza atractiva de Coulomb, arrastra un campo electromagnético que lo precipita contra el resto del átomo. En resumen: que los quantas eléctricos de signo contrario tienden a aproximarse, o mejor a empaquetarse; no sabemos si hasta llegar al aniquilamiento, porque por ahora no se puede decir que el electrón y el protón sean dos cosas *antitéticas*; pero sí tienden a un grado de acoplamiento incompatible con el estado actual de la Naturaleza. Es decir, que la cantidad total de materia del Universo tendería a disminuir rápidamente en beneficio de la radiación.

En contra de esta transformación influiría la radiación existente en el espacio, que actuaría en el sentido de separar las masas eléctricas elementales del átomo, a costa de una merma en su intensidad, o sea el proceso de absorción. Pero no se puede prever hasta qué grado podría compensar esta absorción a la emisión citada en el párrafo anterior, porque en ello intervendría la idea de la finitud del espacio, de la que nosotros huímos.

Pero la teoría electromagnética de Maxwell es incompleta para regir todas las transformaciones. Los movimientos de los elementos libres de la Naturaleza se verifican a base de un mínimo de velocidad areolar, mínimo que tiene mayor valor a medida que el elemento libre posee menos masa. Por eso que este

De la rapidez del proceso emisor, según la teoría electromagnética.

La teoría electromagnética necesita de restricciones.

mínimo tiene una influencia capital en los movimientos intraatómicos; lo contrario, es despreciable en los movimientos macroscópicos estudiados hasta fin de siglo. De consiguiente, en los razonamientos del párrafo anterior debe introducirse la restricción de este mínimo de velocidad areolar, que impide la precipitación de electrones sobre protones y evita la transformación total en radiación. Esta restricción es lo que constituye la teoría de los quanta de emisión en la forma dada por Bohr, lo que será objeto del siguiente capítulo.

La emisión de rayos γ indica un cambio de estructura intranuclear.

Arroja luz sobre este asunto el fenómeno de radiactividad, en cuanto por su espontaneidad indica el paso a un estado de mayor probabilidad en la Naturaleza: *la emisión de rayos γ por los cuerpos radiactivos va siempre asociada a la emisión de electrones*. De aquí que, así como los cambios de estructura en la parte cortical de las moléculas da origen a un espectro de bandas, la salida de un electrón del núcleo cambia profundamente la estructura de éste, originándose una radiación γ . Para que el núcleo radiactivo recuperase su estructura, sería necesario someterlo a un ambiente de rayos γ , de dureza igual o superior a los que emite. Como no disponemos fácilmente de ellos, de ahí la irreversibilidad de los fenómenos radiactivos, los que suponen una creación constante de energía radiante en algunos grupos.

Analogía entre la emisión de una partícula α y la de un electrón cortical.

Otro aspecto de la radiactividad que aquí nos interesa es la emisión de partículas α o núcleos de helio, la que se presenta separadamente de la emisión de rayos β y γ . La carencia de radiación adjunta a los rayos α indica que ellos no se han formado en el momento de ser proyectados al exterior; una relativa inestabilidad, como la de los electrones corticales de los cuerpos muy metálicos, permite que abandonen la trayectoria intranuclear a que pertenecen, así como éstos se separan del último piso del átomo de Langmuir; el resultado para el primero es un núcleo con dos cargas positivas menos, y para el segundo un átomo ionizado.

Los núcleos atómicos de distintos cuerpos, formados por partículas α .

De formarse las partículas α en el instante de ser proyectadas, sería a base de sus elementos eléctricos constituyentes, lo que significaría un empaquetamiento anejo a una pérdida de masa, y de consiguiente la producción de energía radiante, que

hasta ahora no se ha observado. No queremos con esto afirmar la teoría que supone a los núcleos atómicos de carga par compuestos de núcleos de helio exclusivamente; pero sí que en la topografía interior del núcleo radiactivo se destacan como regiones más o menos independientes las partículas α , con movimientos relativos que la teoría de Bohr tendrá que aclarar.

Corrobora lo dicho la abundancia con que los elementos químicos de número atómico par se presentan en la Naturaleza, especialmente el oxígeno. Para tales elementos es de conjeturar una estructura nuclear a base de superposición de partículas α ; la dificultad estriba en buscar el campo aglutinante de las mismas. Pero el hecho importante que queda en pie es que estos cuerpos tienen un peso o masa nuclear múltiplo del correspondiente al helio, lo que supone un gran empaquetamiento, probablemente el máximo compatible con la teoría de Bohr, en cuanto exige un mínimo de velocidad areolar a cada elemento en movimiento. Esto enseña que la energía radiante emitida en la formación de los mencionados elementos tienen el mayor valor posible. Observemos a la vez que en nuestro planeta hay gran escasez de elementos radiactivos, y fácil es deducir que en cuanto al proceso de transformación materia-radiación hemos llegado casi al grado de mayor probabilidad, es decir, de mayor entropía.

Otro fenómeno que ilustra respecto a este asunto es la desintegración de la materia, antes citado. Los seis cuerpos que han dado resultado, boro, nitrógeno, fluor, sodio, aluminio y fósforo, poseen una carga nuclear o número atómico impar. De ello se supone que contengan, además de ciertos núcleos de helio, algunos complejos más sencillos, los que circulan a una relativa distancia del resto del núcleo; de ahí el ligero aumento de peso atómico del nitrógeno y el fósforo sobre un entero. Este elemento o complejo independiente es un protón, el que en opinión de Nauburger (1) circula en una región atractiva, de donde es preciso sacarlo con una energía suministrada por la partícula α ;

La desintegración de la materia y su analogía con la descarga fotoeléctrica.

(1) *Annalen der Physik*, vol. 70, pág. 139. 1923.

una vez el protón se aleja un poco del núcleo, el campo de éste, por su repulsión, ayuda a la obra de desintegración.

Cualquiera que sea el mecanismo de la desintegración, es fácil reconocer una analogía entre este fenómeno y la descarga fotoeléctrica. En este último son gránulos de energía (gránulos de radiación), del orden del ultravioleta, los que se necesitan para arrancar el electrón sometido a campos muy débiles; en la desintegración de la materia, el protón está sometido a los campos intranucleares de una intensidad enormemente mayor que los corticales, por lo que correlativamente se precisan gránulos de energía mucho mayores que los usados en la descarga fotoeléctrica. De las radiaciones conocidas, los rayos γ , a pesar de su elevado valor energético, no llegan a poseer el suficiente para arrancar el protón del campo intranuclear; únicamente acudiendo a la energía cinética de la partícula α puede sobrepasarse el valor necesario para esta operación. Aparte de eso, no podemos usar, por ejemplo, la energía correspondiente a un proyectil ordinario ni de otro mecanismo de los usuales; cualquiera de ellos representa una cantidad enorme de energía; pero repartida entre los diferentes gránulos que la forman, no llegan en mucho a la correspondiente a una partícula α .

* * *

Dada la unidad que se observa en la estructura del Universo; dado que un átomo sencillo, lo mismo que un gránulo de radiación, parecen de la misma naturaleza bieléctrica, forzoso es admitir que correlativamente los principios reguladores de sus transformaciones deben obedecer a enunciados más unitarios también. En cuanto a los postulados referentes a la conservación de la masa material y de la energía, quedan reducidos a uno solo: *la cantidad total de radiación, más la cantidad total de materia existentes en un recinto físicamente cerrado, medidas en unidades coherentes, dan una suma constante.*

La temperatura
y la frecuencia

Falta determinar la posibilidad de las transformaciones y su grado de probabilidad. El lector, aun con elementales conoci-

mientos de Física, sabe que la mayor parte de los fenómenos verificados en recintos materiales están regulados por la variable *temperatura*, y ésta, aunque como valor estadístico, viene representada por la energía cinética de las moléculas de una masa gaseosa. Para encontrar la variable homóloga en la radiación, recordemos que las *frecuencias* componentes de una radiación negra (1) crecen con la temperatura. Por consiguiente, puede decirse que la temperatura, que es una definición puramente algébrica, corresponde a dos realidades físicas, que son la fuerza viva o energía cinética, y la frecuencia de vibración, según se trate de materia o de radiación.

cia son variables homólogas.

Fácil es ahora aplicar esta generalización a los fenómenos tan sencillos como son el efecto fotoeléctrico y la desintegración de la materia. En ambos casos se necesitan, respectivamente, una frecuencia de una radiación y una fuerza viva de una partícula suficientes para arrancar el electrón cortical o el protón nuclear; de ningún modo puede sustituirse la energía de uno de estos elementos, gránulos de radiaciones y partículas α , por la suma de las energías correspondientes a otros elementos de más baja frecuencia o de menos fuerza viva. Aplicando, pues, arbitrariamente el concepto de temperatura a un elemento libre único, podemos asegurar que los fenómenos de ionización, descarga fotoeléctrica y termiónica y desintegración de la materia corresponden a temperaturas elevadísimas, especialmente este último, tanto, que no tenemos en nuestros laboratorios radiación capaz de producirlo.

Aplicación al efecto fotoeléctrico y a la desintegración.

En todos estos casos se trata de vencer una tensión eléctrica, o sea un potencial electrostático, mucho más intenso para llegar al núcleo en demanda de un protón, que para vencer la relativamente débil tensión de un electrón cortical. Con eso queda bien claro que una fuerza viva, una temperatura y una frecuencia son equiparables a una tensión; de ahí que se les llama factores de *tensión*, aunque esta palabra no ha nacido por las

Lo que es un factor de tensión.

(1) Más exactamente: crece en proporción con la temperatura la frecuencia de cada radiación componente y el intervalo que separa a dos sucesivas.

consideraciones precedentes. Dadas, pues, las enormes tensiones con que son retenidos los elementos del núcleo en relación con las que retienen los electrones corticales, puede decirse que la Física conocida por el hombre se refiere únicamente a estos últimos; el estudio de la Física del núcleo correspondería a tensiones-temperaturas fuera del alcance de nuestros medios de experimentación y prepararía el soñado fenómeno de la transmutación de unos cuerpos en otros.

La pérdida o degradación de la tensión.

En los cambios de elementos energéticos antes citados, observaremos que en el efecto fotoeléctrico la energía del gránulo de radiación incidente se distribuye, parte en vencer la tensión con que el metal retiene al electrón, y otra parte en comunicar fuerza viva a este último. Por tanto, el gránulo de energía incidente se descompone en dos valores más pequeños; es imposible o, mejor dicho, *improbable* que mediante una reversión del proceso se obtenga el gránulo primitivo. Análogamente, en la desintegración de la materia el valor energético (1) de la partícula α se distribuye en varios sumandos difíciles de precisar; pero es improbable obtener, mediante la reversión del proceso, una integración del núcleo devolviendo a la partícula α su velocidad inicial.

De estos dos hechos es de deducir, pues, que la energía tiende a dividirse en gránulos cada vez menores; si son de radiación, perderán frecuencia; si son de materia, se reducirá su fuerza viva, o sea su temperatura. En ambos casos es la *tensión* la que se pierde. Se dice que la energía se *degrada*.

No sólo en los dos sencillos ejemplos citados, sino que en otros cuyo mecanismo es desconocido, la experiencia halla la misma ley de degradación. Uno de ellos nos lo suministra la conocida ley de Stokes sobre la fluorescencia, que nos enseña

(1) Se refiere al valor de la energía cinética o magnética de la partícula en movimiento, no contando en ella el valor correspondiente de los protones y electrones que la forman con sus trayectorias relativas, pues ésta, por ser un campo magnético especial, no emite radiación. También para un elemento de radiación se cuenta únicamente la energía magnética correspondiente a su gránulo.

cómo al incidir una radiación de cierta frecuencia sobre un cuerpo, excita en éste la emisión de radiaciones de frecuencia inferior a la incidente; esta ley (aun con sus excepciones), que fué enunciada para el terreno de las radiaciones visibles, se puede hacer extensiva también a los rayos X. Otro ejemplo nos lo da la expansión adiabática de una radiación en presencia de una partícula de un cuerpo negro; aun conservándose el valor total de la energía, queda transformada en frecuencias inferiores. Por fin, en el importante terreno de la emisión no es éste un punto perfectamente definido para que nos suministre razones aclaratorias de este criterio (1).

Todos estos fenómenos son el resultado de colocar en contacto físico dos recintos a distinta tensión; la fluorescencia de un cuerpo indica que la radiación incidente posee una tensión-frecuencia superior a la tensión-temperatura de los elementos del cuerpo; de lo contrario, de poseer el cuerpo elevada temperatura, emitiría radiaciones de tensión-frecuencia superior a las incidentes.

Por consiguiente, las diferencias de tensión son las que producen los fenómenos físicos, sea ésta en forma de tensión eléctrica, de temperatura o de frecuencia. Entre la menor tensión local de $0,9^{\circ}$ de temperatura absoluta alcanzada por Kammerling-Onnes (2), y las tensiones enormes que supone la emisión de partículas α y los procesos radiactivos, en general, existen todas las manifestaciones energéticas de la superficie terrestre; de ahí la imposibilidad de contener el proceso radiactivo, y la dificultad enorme de mantener el helio líquido a la temperatura de $0,9^{\circ}$. El límite superior de tensión varía para el sol aumentando enormemente, y lo que en nuestro planeta es un término superior de tensión, como la radiactividad, en este astro puede resultar un término medio, y, por tanto, un proceso reversible.

Aparte los casos sencillos antes considerados, debe tenerse en cuenta que cuando son muchos los elementos que entran en

Las diferencias de tensión como productoras de los fenómenos.

El desorden como perturbador de un

(1) Seeliger: *Physicalische Zeitschrift*, vol. 25, pág. 56. 1924.

(2) *Revue des Sciences*, 30 mayo 1923.

recinto equi-
tensional.

juego, pueden producirse elevaciones de tensión de algunos de estos elementos, a causa de lo que pudiéramos llamar el *desorden*. Imagínese el siguiente proceso, puramente teórico: se colocan millones de moléculas en filas en un cubo de paredes perfectamente reflectoras, con velocidades iguales y exactamente paralelas a una arista del cubo; estas moléculas, en sus choques mutuos y contra la pared, conservarían constantemente sus velocidades; es decir, su tensión. Pero es suficiente una desviación infinitamente pequeña de estas condiciones, ya sea en la perfección de las paredes del cubo, ya sea en el valor y dirección de las velocidades iniciales, para que un choque ligeramente oblicuo favorezca la velocidad de una molécula en perjuicio de otra; este hecho, repetido sucesivamente, desorganiza por completo el movimiento ordenado y *equitensional* inicial. Las moléculas tienden a poseer una distribución de velocidades, la *más probable*. Insistir en este punto sería entrar en la termodinámica.

Algo semejante podría decirse respecto a las radiaciones. Supóngase un recinto, físicamente aislado, conteniendo únicamente hidrógeno disociado, al que se le añade una radiación simple o monocromática correspondiente a una de las rayas de emisión de dicho gas; esta radiación será emitida y absorbida alternativamente por el hidrógeno, y seguirá indefinidamente monocromática. Supóngase ahora que en tal recinto se introduce la más mínima irregularidad, un campo eléctrico, se asocian dos átomos en forma de molécula, etc.: entonces la radiación monocromática se perturba, se desorganiza. Este desorden aumenta si en vez de un recinto gaseoso se trata de un recinto sólido, y dentro de este caso se acelera más todavía cuando el cuerpo sólido es negro.

Bañado un cuerpo negro por una radiación monocromática, la desorganiza según un mecanismo interior desconocido. Cuando la temperatura-tensión del cuerpo negro es igual a la frecuencia-tensión de la radiación monocromática, se perturba la uniformidad de frecuencia, resultando una radiación desordenada que contiene toda clase de radiaciones simples en distinto porcentaje. El recinto tiende a una distribución de frecuencias la

más probable; todas ellas se acumulan alrededor de una que es la más abundante, cuyo valor crece en exacta proporción con la temperatura.

No ya un cuerpo negro, sino que también un cuerpo sólido cualquiera de *estructura íntima irregular*, tiende a producir un estado general de radiación negra, que es el más probable. Una vez todas las radiaciones en contacto, se llegaría a formar una radiación negra total y en equilibrio con la materia. *Este sería el estado de mayor probabilidad en la Naturaleza, que no permitiría ninguna nueva evolución en el mundo físico.*

V

Teoría restrictiva de la emisión

El mecanismo de la emisión de energía radiante, equivalente a una transformación de materia en radiación, tal como se expuso en capítulo anterior, tiene un grado de generalidad de difícil aplicación a cada uno de los casos concretos que implican el sinnúmero de complejos materiales que pueden imaginarse, sobre todo en cuanto a las restricciones que la teoría de los quanta de acción Planck impone a la dinámica de los quanta de electricidad. Por eso es necesario acudir a hipótesis concretas referentes de momento a los complejos o modelos atómicos más sencillos.

Una vez incipientes las hipótesis sobre la estructura electrónica del átomo, cuando la teoría electromagnética de la radiación estaba ya encerrada en un marco cuyos retoques sólo han sido introducidos por la teoría cuántica, aparecen las primeras tentativas para explicar el mecanismo de emisión y absorción de una radiación. Naturalmente que estas tentativas tenían que ser hechas a base de una aplicación rigurosa de la teoría

electromagnética, puesto que entonces ésta armonizaba todos los hechos, observaciones y experimentos. Los mecanismos ideados fueron de dos tipos: el *oscilador* y el *revolutor* o giróscopo.

El oscilador
como meca-
nismo emi-
sivo.

El *oscilador* es una masa eléctrica, negativa o positiva, que oscila alrededor de una posición de equilibrio con movimiento armónico, producido por una fuerza proporcional a la distancia de dicha posición de equilibrio. La aceleración que tiene una masa eléctrica en tales condiciones, es la causa de una emisión de energía radiante. Razonamientos elementales conducen a explicar cómo tal movimiento crea una onda electromagnética de la misma frecuencia que el oscilador que la da origen, y polarizada en el plano formado por el oscilador y la dirección de propagación. Estas características resultan comprobadas por los experimentos de Hertz, junto con su perfeccionamiento por la telegrafía sin hilos, puesto que la frecuencia de una onda hertziana coincide con la frecuencia de vibración de las masas eléctricas a lo largo de un hilo emisor desprovisto de autoinducción. Mas tal concordancia entre la frecuencia del oscilador y la de la radiación producida en este caso, no es más que una consecuencia del principio de correspondencia de Bohr, que ya expondremos, perfectamente aplicable a bajas frecuencias.

El revolutor.

El *revolutor* indicaba una masa eléctrica describiendo un movimiento circular o elíptico alrededor de una posición de equilibrio. La constante aceleración que supone este movimiento circular es inherente a una constante emisión de energía radiante, la que poseería la misma frecuencia que el movimiento circular que le da origen.

Primer modelo
de Ruther-
ford.

De los dos mecanismos antes expuestos, el revolutor fué el que tuvo más éxito, y cristaliza en el modelo que Rutherford, en 1911, dió de la estructura del átomo cuando ésta no había sufrido el profundo estudio a que se ha sometido en los trece años siguientes. Rutherford fué el primero que supuso al átomo un núcleo central cargado positivamente, rodeado de una atmósfera de electrones, cuyas dimensiones eran del orden expuesto por la teoría atómica actual; esta disposición permitía explicar el ex-

perimento de Geiger y Marsden, mediante el cual una partícula α era violentamente desviada en su camino al chocar con el átomo de un gas; tal partícula sólo podía sufrir una acción tan enérgica penetrando en el campo interior situado entre los electrones exteriores y el núcleo, aproximándose mucho a éste. Este experimento concordaba, pues, con el modelo atómico de Rutherford.

En ambos mecanismos, oscilador y revolutor, la continua emisión de energía tenía que precipitar la masa eléctrica sobre su posición de equilibrio, variando, por tanto, la frecuencia del movimiento generador, hecho que va en contradicción con la constancia del período de vibración de las rayas espectrales. Para explicar tal constancia cabía imaginar un mecanismo situado en el núcleo atómico, almacén o reserva de energía que se la comunicase a la masa vibrante a medida que ésta se la cede al espacio por radiación, de la misma forma que el resorte de un reloj suministra la necesaria al péndulo para compensar las pérdidas que éste sufre por rozamiento.

También pudiera salvarse esta dificultad como lo hace Schott (1), suponiendo que la trayectoria del electrón, es una hipérbola descrita con velocidad tal, que descompuesta en dos direcciones paralelas a los ejes conjugados, resultan dos componentes constantes. El cálculo demuestra que un electrón moviéndose en estas condiciones, no emite radiación alguna. Pero como se comprende, esta solución y la anterior son de difícil acoplamiento a la estructura de la materia, tal como hoy se conoce.

El oscilador nos presenta, además, otra dificultad: ¿cómo conseguir una fuerza proporcional a la distancia a base de la aplicación de la ley de Coulomb? Pero en eso hemos de insistir más adelante.

Por lo dicho, los inconvenientes de la aplicación de la teoría electromagnética resultan mayores aquí que los expuestos al hablar de las radiaciones (II). Ya no solamente los apuntados más arriba, sino que el sencillo razonamiento siguiente nos indica la imposibilidad de aplicarla de plano en cuanto a la emi-

El oscilador y el revolutor no son compatibles con la teoría electromagnética.

La teoría electromagnética implica el aniquilamiento parcial o total de la materia.

(1) *Philosophical Magazine*, vol. 45, pág. 769, 1923.

sión se refiere: Un átomo aislado en el espacio no puede subsistir sin una absorción constante de energía, compensada a la vez por la energía que emite en virtud de la rotación de sus electrones corticales. De no recibir el átomo energía del exterior, la pierde constantemente a medida que sus electrones en rotación se van aproximando al núcleo. En la caída del electrón sobre el núcleo convierte la energía potencial de separación mitad en energía radiante y otra mitad en energía cinética; de esta suerte, al acercarse el electrón al núcleo, adquiriría velocidades que se aproximarían a la de la luz, produciéndose al mismo tiempo emisión de mayores cantidades de energía. Este proceso llevaría a admitir la desaparición de la masa inerte, si se admite la penetrabilidad de las cargas eléctricas. Y aun admitiendo la impenetrabilidad de las mismas, éstas formarían un empaquetamiento que sería incompatible con las teorías de la estructura atómica actual.

Proposición
fundamental
de Bohr.

Bohr salva estas dificultades añadiendo a los dos principios de termodinámica la teoría cuántica de Planck, a la vez que aventurando la hipótesis de que *en el movimiento de un electrón alrededor de un núcleo atómico, no hay emisión de energía radiante*. La proposición suya no es más que la enunciada por Planck en 1900 para los elementos libres materiales, y aplicada en este caso al modelo atómico del hidrógeno. Dice:

La energía cinética de un electrón girando alrededor del núcleo positivo, multiplicada por el periodo de rotación, vale un mínimo h , o bien un múltiplo cualquiera de dicho mínimo. Para explicar el significado de esta proposición, téngase en cuenta que la constante h posee las dimensiones *energía $\times$ tiempo*. Es para nosotros una nueva variable en el campo de la Física: la llamaremos *acción*. La hipótesis de Bohr equivale, pues, a decir que el electrón que gira alrededor del núcleo atómico no puede poseer menos de un mínimo, o sea de un *quanta de acción*.

Equivale a un
mínimo de ve-
locidad areo-
lar.

Un cálculo sencillo demuestra que la nueva variable física, acción, es equivalente al producto de la masa mecánica del electrón giratorio por su velocidad areolar; de ahí que para nuestra exposición elemental sea suficiente de momento indicar que la

proposición de Bohr para el caso de un electrón, supone que *éste posee por lo menos un mínimo de velocidad areolar, o bien un múltiplo de este mínimo.*

Lo teoría de Bohr admite para el movimiento de un electrón alrededor de un núcleo positivo, todas las características de un movimiento planetario, o sea las leyes de Kepler, consecuencia de la ley de Newton, o de su análoga la ley de Coulomb en este caso; pero añade a ellas su proposición restrictiva, la que limita el número de trayectorias posibles. Es decir, que según este criterio, no cabe duda que a medida que el radio de giro del electrón es más pequeño, la velocidad lineal del mismo se hace mayor, a igual que en los planetas respecto al Sol, y llegaría a la velocidad de la luz al aproximarse al núcleo; pero a eso se opone la existencia de un mínimo de área descrita por segundo o un múltiplo de ese mínimo, lo que limita el número de radios de giro posible. Además, en cada una de estas trayectorias posibles hay una carencia absoluta de emisión.

En virtud de lo dicho, resulta que la aproximación de las dos cargas eléctricas que forman el revolutor elemental, o sea el átomo de hidrógeno, puede llegar sólo a un límite que impone la constante de Planck: $h = 6,5 \cdot 10^{-27}$; esta constante indica que la mínima velocidad areolar posible vale 7,38 cms.² por segundo, y de ahí, calculado el diámetro de la trayectoria correspondiente, resulta valer $1,1 \cdot 10^{-8}$ cms.

Nos indica este último número el mínimo tamaño que puede presentar el átomo de hidrógeno. Dado que coincide con las dimensiones atómicas asignadas ordinariamente, puede asegurarse que la trayectoria antedicha es la común a la generalidad de los átomos, de los pocos que a la temperatura ordinaria se presentan disociados. Aun a temperaturas elevadas, cuando la disociación molecular aumenta, esa es la trayectoria que tiene en un momento dado la mayor parte de los átomos; por eso que esta trayectoria se llama *estado normal del átomo de hidrógeno.*

Aparte la trayectoria correspondiente al electrón en *estado normal* del átomo de hidrógeno, existe la posibilidad de una infi-

La teoría de Bohr fija un mínimo al radio del revolutor.

Serie de trayectorias posibles.

nidad discontinua de trayectorias, que, obedeciendo a las leyes de Kepler, suponen además velocidades areolares, dobles, triples, cuádruples... que el valor antes indicado. Todas ellas se distinguen por la serie de números naturales, desde la unidad, correspondiente a la trayectoria o estado normal, a los números 2, 3, 4, ... p ... correspondientes a las distintas velocidades areolares: *Cualquiera de estas trayectorias es posible, pero su probabilidad disminuye con el número de orden.*

Características de estas trayectorias.

Inherente a estas trayectorias va la serie de constantes que las caracterizan, calculables con el auxilio de la mecánica elemental. Los radios vectores de cada trayectoria crecen con el cuadrado del número de orden p correspondiente. La velocidad lineal del electrón revolutor decrece proporcionalmente a p ; en cambio, la velocidad areolar crece proporcionalmente a p , consecuencia que parece contradictoria al primer intento si no se tiene en cuenta que el área descrita depende a la vez del radio vector y de la velocidad lineal. Finalmente, lo más interesante,

la energía cinética del electrón, es proporcional $\frac{1}{p^2}$.

De estas características dependen las rayas espectrales.

Precisamente en esta multiplicidad de trayectorias posibles para el electrón se fundamenta la multiplicidad de rayas posibles en el espectro de emisión del hidrógeno incandescente en un tubo de Geissler, donde se encuentra disociado. Cada trayectoria supone distinto grado de aproximación entre el protón y el electrón, constituyentes del átomo de hidrógeno; según lo dicho en el capítulo anterior, la masa o su equivalente la energía correspondiente a las distintas trayectorias, decrece con el grado de aproximación; su menor valor corresponde al estado normal: *La cantidad de energía perdida por el átomo al pasar su electrón de una trayectoria a otra de menor radio, se transforma mitad en energía cinética del electrón, y otra mitad pasa al espacio que le rodea en forma de radiación.* Las cantidades de energía que por este motivo pasan a radiación, dependen exclusivamente de los valores inicial y final de la energía en las trayectorias del electrón; como éstos varían según $\frac{1}{p^2}$, la energía de la radiación en cues-

tión variará según la diferencia $\frac{1}{p^2} - \frac{1}{p'^2}$: cada uno de los valores posibles es causa de una raya espectral.

De cómo se realiza la transformación de esta energía intratómica, perdida en un cambio de trayectoria, en forma de energía radiante de determinada frecuencia, correspondiente a la posición de una raya en el espectro, es un problema de difícil solución. La teoría electromagnética no nos sirve para ello, porque la hipótesis de una carencia de emisión durante el movimiento giratorio del electrón le quita todo valor para aplicarla al caso concreto del átomo; sólo la ley de Coulomb queda en pie y aun restringida a los electrones corticales. Tampoco nos sirve la radiación, cuya verdadera estructura, según vimos (II), nos es desconocida. Sean las dos hipótesis límites que respecto a ésta se pueden admitir: de una onda electromagnética sin discontinuidad, o bien formada por gránulos neutros, es decir, de carácter material.

Del mecanismo de formación de una radiación.

Para la primera hipótesis, tal como dice Sommerfeld (1), existe un éter continuo susceptible de deformaciones electromagnéticas, el que posee infinidad de resonadores de distinta frecuencia; de ellos responde uno solo al cambio de trayectoria, según sea el acopio de energía que en un instante ceda el átomo, cuya frecuencia de vibración es proporcional a la energía cedida. Otras hipótesis, como las de Bucherer y de Broglie ya citadas, admiten que las radiaciones están formadas de gránulos materiales, de distinta o igual masa, en las cuales hay *algo* que vibra con una frecuencia que es la de la radiación. De toda esta confusión, sólo puede asegurarse que *la frecuencia de la radiación emitida en el cambio de trayectoria es proporcional a $\frac{1}{p^2} - \frac{1}{p'^2}$, o sea a la energía cedida.*

Cualquiera que sea la esencia o estructura de la energía radiante, es necesario introducir la quantización de la radiación producida, lo que a nuestro entender no se deduce como necesi-

Quantización del factor de acción de una radiación.

(1) *Atombau und Spektrallinien*, pág. 323. Edición 1922. Libro magnífico, de distinta dificultad según los capítulos, indispensable para todo estudio serio de la Físico-química moderna.

dad de la quantización de las trayectorias. Difícil será, pues, en este caso conocer cuál es el factor de acción de la radiación, ya que su estructura es desconocida; no obstante, imaginándola como movimiento oscilatorio o vibratorio de algo, y dividiendo la energía ϵ cedida en un cambio de trayectoria por la frecuencia n de este movimiento, se obtiene un cociente cuyas dimensiones físicas son las correspondientes al factor de acción. *Tal factor de acción está sometido a la ley de quantización, o sea es igual a la constante de Planck $h = 6,5 \cdot 10^{-27}$; de modo que*

$\frac{\epsilon}{n} = \text{mínimo} = h$. En virtud de esta última relación, puede asegu-

rarse que la energía ϵ cedida por el revolutor de Bohr en un cambio de trayectoria es proporcional a la frecuencia n de vibración de la radiación emitida; según el valor hallado antes, resulta,

pues, que es proporcional a la diferencia $\frac{1}{p^2} - \frac{1}{p'^2}$. De cómo

las rayas espectrales del hidrógeno, que forman las series de Lyman, Paschen y Balmer, confirman esta consecuencia, no hemos de insistir, principalmente para no alargar demasiado esta exposición.

Frecuencia de
la radiación
emitida.

Téngase en cuenta que la frecuencia n de la radiación emitida no es la misma que la frecuencia del electrón que le da origen; entre las dos existe una relación que no es directa. El caso más sencillo se presenta con el de la radiación emitida al pasar el electrón del infinito a la trayectoria $p = 1$. La energía total radiada por este concepto vale $\frac{h\nu}{2}$, donde ν representa la fre-

cuencia de rotación del electrón; mientras que esta misma energía, expresada en frecuencia n de la radiación, vale hn , lo que indica que la frecuencia de la radiación emitida vale la mitad de la frecuencia de la rotación del electrón.

Este resultado era de prever aplicando la misma teoría de Planck, suponiendo que la energía que traslada la radiación corresponde a la vibración de un oscilador. El caso corresponde a un traspaso de un elemento ϵ de energía de un revolutor, que es el átomo, a un oscilador, que es la radiación; por lo que en el pri-

mero esta energía corresponde a un grado de libertad que es el de rotación, y en el segundo corresponde, a la vez, a la energía cinética y a la potencial. Por consiguiente, el principio de equipartición de la energía impone la división en dos partes del elemento ϵ cedido por el revolutor al oscilador, una para la velocidad de vibración del mismo y otra para la deformación; como de los dos factores h y n , que componen el elemento ϵ , el quanta h es irreducible, la reducción a la mitad debe recaer forzosamente sobre la frecuencia n ; de ahí que ésta es igual a la del revolutor dividida por dos.

Pero la diferencia de frecuencia del átomo de hidrógeno y de la radiación emitida se acentúa cuando las trayectorias finales e iniciales son cualesquiera. No obstante, tiene una relativa sencillez cuando el electrón procede del infinito, es decir, cuando cae desde lejos sobre el núcleo, como en el caso anterior, pero deteniéndose en una trayectoria intermedia p . La energía del revolutor en este caso vale $\frac{ph\nu}{2}$, lo que indica que el revolutor posee p quantas de acción; por otro lado, la energía de la radiación vale hn . La comparación de ambos valores indica, no sólo que la frecuencia n de la radiación vale $\frac{p}{2}$ veces la frecuencia del revolutor, sino que, además, el éter vibra según un quanta de acción único, mientras que el revolutor admite un número entero cualquiera de quantas h .

Cuando las trayectorias inicial y final de emisión no son las antes expuestas, las relaciones de frecuencia entre el sistema emisor y la radiación se complican. Aun no tratándose del átomo de hidrógeno, el *principio de correspondencia*, enunciado por Bohr (1), permite establecer una simplificación que llega a conciliar de una manera puramente formal la teoría electromagnética con la teoría de los quanta, siempre que los estados inicial y final de emisión pertenezcan a números p muy elevados: *Cuan-*

Principio de correspondencia.

(1) Bohr: *The Theory of Spectra and Atomic Constitution*, págs. 27 y 81, 1922. Libro sencillo, interesante, como debido al inventor de la teoría.

do la emisión de radiación se verifica entre dos estados tales que sus números de orden p sean muy grandes y que a la vez difieran en una unidad o en un número entero pequeño, la radiación emitida al pasar de un estado a otro obedece a la teoría electromagnética. De este postulado da Bohr una demostración matemática aproximada, según la cual el enunciado sólo se cumpliría dentro de la precisión que permiten los datos experimentales; pero no significaría tal enunciado una ley exacta en todos los hechos que este postulado puede producir. Según él, no sólo la frecuencia del sistema emisor es igual a la de la radiación emitida, sino inclusive el número de armónicos que llevan ambos. En este caso, entiende Bohr como armónicos del sistema emisor los movimientos correspondientes a estados iniciales que se diferencian en 2, 3, 4, ... unidades del estado p final, siendo p , como hemos dicho, muy grande; a estas distintas transiciones les corresponden en la radiación armónicos con doble, triple, cuádruple... número de vibraciones.

Su confirmación por las ondas hertzianas.

El principio de correspondencia, como su mismo enunciado indica, no es aplicable a la generalidad de las rayas espectrales observables, las que proceden de un estado final del átomo emisor representado por un número p muy bajo. El caso opuesto pertenece a la emisión de ondas hertzianas, que probablemente obedecen a estados de orden p muy elevados. Naturalmente que el proceso de la emisión no es tan sencillo como el expuesto para el átomo de hidrógeno. En vez de un electrón que gira alrededor de un núcleo, se tiene aquí una carga eléctrica que oscila entre los platillos de un condensador (para conseguir sencillez, puesto que el fenómeno es mucho más complicado); tal carga se separa a distancias enormes relativamente de los núcleos materiales de donde procede, razón por la cual el número de quantas de acción p que posee es muy grande. No sabemos si al considerar un quanta, debe hacerse con respecto a cada masa elemental que se mueve en dicha descarga, o bien sumar las masas en total, en cuyo caso el número p de quantas a considerar es más grande todavía. De todo ello, junto con el principio de correspondencia, explica cómo

Las ondas hertzianas confirmaron, al ser descubiertas, la teoría electromagnética de Maxwell.

Por lo que va expuesto y por lo que veremos luego, se comprende que el modelo atómico o revolutor de Rutherford-Bohr satisface las exigencias teóricas y experimentales actuales con sólo la introducción de dos hipótesis supletorias. Pero antes de seguir adelante, no queremos dejar de consignar que el oscilador elemental no puede, por ahora, reemplazar al revolutor sin introducir una complicación apreciable en el mecanismo de la emisión.

El *oscilador*, en la teoría de Hertz, indica una masa eléctrica que describe un movimiento vibratorio; tal ocurre, por ejemplo, en la descarga oscilante de un condensador. La idea del oscilador compuesto de una carga elemental fué aprovechada por Planck como elemento indispensable en la exposición de su teoría general de los quanta. Pero téngase en cuenta que si el movimiento vibratorio es armónico, *supone una fuerza atractiva hacia el centro de vibración proporcional a la distancia*; hipótesis que concordará muy bien con los modelos mecánicos macroscópicos, pero que es poco verosímil al aplicarla a las regiones intraatómicas donde rige la ley de Coulomb, salvo en la región intranuclear. Mas si la ley de fuerza proporcional a la distancia es inverosímil, en cambio permite aplicar la quantización de la acción, mientras que la admisión de la ley de Coulomb obliga a introducir (1) un quanta elemental, mitad del valor h dado por Planck. No solamente la ley de Coulomb, sino cualquiera otra ley en forma de potencia de la distancia, da valores distintos para la constante h , exceptuando el caso de un exponente $-\frac{3}{5}$.

Dificultades para la aplicación del oscilador a la emisión.

Las dificultades para la aplicación del oscilador elemental al proceso de la emisión son mayores todavía al considerar el sis-

(1) Richardson: *Phil. Mag.*, vol. 46, pág. 913, 1923.

tema protón-electrón: el primero, como masa atractiva en reposo, y el segundo, describiendo el movimiento vibratorio. Entonces el electrón debiera atravesar o ser atravesado por el protón en su movimiento, y no sabemos la posibilidad que existe de que esto ocurra; ni si en llegando a coincidir los centros de dichas cargas o quantas eléctricos pudiera ocasionarse un aniquilamiento total de los dos corpúsculos, hecho que ocurriría de ser éstos completamente *antitéticos*, y hasta ahora sólo sabemos que son *distintos*.

Las dificultades se acrecientan si además se aplica la teoría de la relatividad, y aun la misma teoría electromagnética, puesto que entonces debe tenerse en cuenta la variación enorme de masa mecánica que experimenta el electrón al acercarse su centro al del protón con velocidades próximas a las de la luz. A base de la ley de Coulomb, contando con la variación de masa y suponiendo que en la vibración no haya emisión continua de onda electromagnética, halla Nicholson (1) un movimiento vibratorio de distinta elongación por ambos lados del núcleo; de forma que por un lado no llega a separarse el protón del seno del electrón, admitiendo los radios usuales dados para estos corpúsculos. Más se complicaría aún si aplicásemos la teoría de gravitación. Desechamos, pues, por ahora, la hipótesis del oscilador, sin perjuicio de exponer otras que no coinciden exactamente con el primitivo revolutor.

Otros modelos de mecanismos emisores, a base del átomo de hidrógeno.

Una vez la teoría de revolutor simple ha servido para explicar satisfactoriamente la emisión de rayas espectrales del hidrógeno, se ha intentado dar mayor libertad a la trayectoria del electrón, viendo hasta qué punto era posible separarse del modelo primitivo sin que discrepen los resultados experimentales. Este trabajo es debido, principalmente, a Sommerfeld. Estudia primero una trayectoria elíptica del electrón con el protón en el foco, descomponiendo cada trayecto elemental de elipse en otros dos: uno normal al radio vector y otro según la dirección del mismo; para el primero es aplicable la quantización tal como la

(1) *Phil. Mag.*, vol. 45, pág. 801, 1923.

hace Bohr en la trayectoria circular; para el segundo se quantiza lo mismo que en el movimiento oscilatorio. El resultado de este cálculo es la posibilidad de que la trayectoria más estable, o sea de quantización sencilla, es aquella en que la elipse degenera en una recta o en un círculo; las demás trayectorias, correspondientes a quantizaciones de múltiplos p del factor de acción, dan posibilidades de series discontinuas de elipses para cada valor de p , series que aumentan en número al aumentar p .

Mas no solamente esta serie de elipses marcan todas las posibilidades encontradas por Sommerfeld, sino que imaginando una orientación fija en el espacio, relacionada con alguna cualidad física del mismo, resultan una serie de orientaciones posibles, con respecto a esta fija, para el plano que contiene la órbita del electrón, orientaciones que obedecen a una tercera quantización dependiente del área descrita normalmente al plano tomado como fijo, cuya especificación es un poco difícil sin el auxilio del lenguaje matemático. Así resultan posibilidades finitas de orientación del plano de la trayectoria, y dentro de cada plano, posibilidades finitas de varias elipses de distinta excentricidad. A cada número p le corresponden tantas trayectorias posibles como número de sumas de tres sumandos pueden descomponerse. «Cualquiera de estas trayectorias equivale a la misma cantidad de energía atómica; la emisión se verifica siempre al pasar el electrón de una trayectoria de orden p a otra de orden p' .»

En lo expresado se ha supuesto el protón situado inmóvil en el centro de una cualquiera de aquellas trayectorias. Teniendo en cuenta que un sistema abandonado a sí mismo gira alrededor de su centro de gravedad, aunque éste cae cerca del protón, a causa de su gran masa en comparación con la del electrón, no coincide con él; por lo que debe quantizarse la suma de factores de acción de ambos corpúsculos a la vez. Como la masa del protón es relativamente grande, esto obliga a que el otro factor, velocidad areolar, que interviene en el quanta h , sea muy pequeña. En total resulta para el área descrita por ambos elementos a la vez un valor más pequeño; de ahí una mayor aproximación de los mismos, a la vez que una mayor cantidad de energía

emitida, o sea una frecuencia para las rayas espectrales del hidrógeno ligeramente superior a la obtenida teóricamente por Bohr; pero esta discrepancia, en vez de corregir la frecuencia, recae sobre el valor del cociente de las masas del protón y del electrón.

Cabe preguntar lo que ocurre cuando se ponen en juego sistemas más o menos complicados que el formado por un protón y un electrón, o sea el átomo de hidrógeno. El caso inmediato más sencillo es el que se presenta con el helio simplemente ionizado, sistema que consta de un núcleo equivalente a dos cargas positivas y de un electrón girando a su alrededor.

Emisión por un
revolutor
cuando la
carga nuclear
aumenta.

De primer intento se comprende que en la caída de este electrón sobre el núcleo adquiere doble fuerza viva, a la vez que emite doble cantidad de radiación que en el caso del hidrógeno. Limitando a una serie discontinua el número de trayectorias posibles, tales que la velocidad areolar sea un mínimo o un múltiplo del mismo, las características de estas trayectorias no pueden ser las mismas que para el átomo de hidrógeno, porque aquí han variado los elementos determinantes de las mismas, menos la constancia de la velocidad areolar. En cuanto a la trayectoria de velocidad areolar mínima, o sea la correspondiente al estado normal del helio ionizado, un cálculo sencillo demuestra que posee un radio mitad de la trayectoria normal del hidrógeno; la pérdida del radio la compensa con una velocidad lineal mayor del electrón, con lo que el área descrita resulta la misma que para el átomo de hidrógeno. Así podría seguirse, sólo teóricamente, para núcleos que tuvieran 3, 4, 5... cargas positivas con un electrón girando a su alrededor, como sucede prácticamente para el átomo de litio doblemente ionizado; se hallarían radios de *trayectorias normales* que decrecen en progresión geométrica con el número atómico, es decir, cuyo tamaño decrece con el peso atómico.

Ley de Mosse-
ley.

Por otro lado, para conocer el valor de la energía radiada al pasar del infinito a la trayectoria normal, teniendo en cuenta

que por el teorema de Hamilton es igual a la cinética del electrón, por valer la fuerza atractiva doble que para el caso del hidrógeno y aproximarse el doble, la energía cinética del electrón vale cuatro veces más. Así podría seguirse con cargas nucleares 3, 4, 5... y la energía cinética, lo mismo que la radiada, valdría 9, 16, 25..., respectivamente. Este es precisamente el descubrimiento de Mosseley: puesto que la energía radiada corresponde a una onda de frecuencia proporcional a su valor, *la frecuencia de la radiación emitida por un átomo al pasar su electrón del infinito a la trayectoria normal es proporcional al cuadrado de su número atómico o carga nuclear.*

Aparte la sencillez de los casos teóricos a que hemos referido la ley de Mosseley, consideraciones que no pueden exponerse sin cálculo demuestran que a base de la quantización de la velocidad areolar de cada electrón aisladamente, cuando son varios los que giran alrededor de un núcleo positivo, hay posibilidad de una serie de sistemas eléctricos confirmados por la experiencia. Efectivamente: tales sistemas son, por ejemplo, el átomo neutro de helio y átomo neutro de litio; ambos formados de dos y tres electrones, respectivamente, que giran alrededor de un núcleo que posee dos y tres cargas positivas.

En cuanto a los sistemas más complicados, o sea átomos de mayor número atómico, las hipótesis sobre la dinámica de sus elementos constitutivos, así como sobre sus características, están reguladas por razones quantísticas y de valencia a la vez, tal como indica el átomo que ya citamos de Langmuir. Cada electrón en su movimiento obedece a la atracción nuclear y a la repulsión de los demás electrones corticales; estos últimos perturban la ley de Mosseley antes indicada. Sin embargo, no es problema aquél resuelto todavía, por su mucha complicación; así, por ejemplo, para el uranio equivaldría su resolución a estudiar la dinámica de 92 planetas, equivalentes a sus 92 electrones corticales, atraídos por un núcleo solar; añadiendo, además, la restricción de que cada electrón, en su movimiento, debe poseer un número entero de quantas de acción.

Límitación del
número de
átomos posi-
bles.

Lo que nos indica el razonamiento precedente es que el radio de las trayectorias de los electrones corticales decrece rápidamente a medida que aumenta la carga nuclear del elemento considerado. Como, por otro lado, el tamaño del núcleo crece con bastante rapidez (1), según dicha carga nuclear, debe existir un límite de posibilidad atómica, probablemente coincidente con el uranio, más allá del cual ni el núcleo podría aumentar de volumen sin invadir la región cortical, ni las trayectorias de los electrones exteriores podrían acortar su diámetro sin penetrar en la región nuclear.

* * *

Dificultades
para conocer
la forma de
emisión de
complejos bi-
polares.

Los sistemas de absorción o emisión monopolares que hemos expuesto, están en pequeña cantidad en la Naturaleza. Abundan las moléculas gaseosas que constan de más de un átomo y los cuerpos sólidos y líquidos cuyo comportamiento pertenece a una complejidad todavía mayor. Al tratar de aplicar la teoría de Bohr a estos sistemas, surge la dificultad de una carencia de información respecto a la disposición y distancias que guardan los elementos que forman la molécula. En consecuencia, la aplicación de los quanta de acción pocas veces da valores numéricos absolutos; llega la mayor parte de las veces sólo a establecer razones y diferencias, comprobadas luego por la experimentación; pero esta última es la que da los números finales.

Forma general
de las molécu-
las bipolares.

No obstante el desconocimiento de la estructura molecular, es necesario intentar algunas disposiciones, aplicar a ellas la teoría de Planck-Bohr y comprobar luego con los datos experimentales. Los sistemas en boga para las moléculas biatómicas siempre se imaginan a base de dos núcleos distanciados, cuya repulsión viene equilibrada por una corona de electrones que giran en un plano perpendicular a la recta de unión de dichos núcleos; además de estos electrones, los cuales probablemente son los procedentes de la valencia del átomo, existe un número residual de los mismos que giran alrededor de sus núcleos respec-

(1) *Annalen der Physik*, vol. 70, pág. 139, 1923.

tivos y cuya disposición es completamente desconocida. Para la molécula de hidrógeno queda simplificada esta estructura, reduciéndose a dos protones distanciados formando dos polos con un plano ecuatorial donde giran en sentido contrario dos electrones.

Obsérvese que un sistema en estas condiciones es de difícil cuantización, porque no se conocen cuáles son los elementos que están sometidos a movimientos periódicos. Lo físicamente probable es que todos los elementos componentes de la molécula, lo mismo los electrones corticales que los electrones y protones nucleares, posean un movimiento propio que equivalga a un cuanto de acción h o a un múltiplo del mismo. Pero de la misma manera que el átomo de hidrógeno sólo abandona su estado normal a temperaturas elevadas, los elementos antes indicados conservan su estado normal ajeno a toda absorción o emisión; sólo las temperaturas elevadas podrían producir un aumento de cuantas para cada elemento; pero al llegar a tales temperaturas, por lo visto sobrevienen cambios de estructura que en realidad son los que producen los aumentos de energía intramolecular, aumentos regulados por incrementos de cuantas de acción. Por lo demás, antes de llegar a tales temperaturas, la emisión que pudieran tener los electrones corticales queda reducida a mera teoría.

En cambio, los movimientos en bloque de la molécula estarán más directamente atacados por los choques debidos a la temperatura, o bien por la absorción de una radiación intensa; de modo que admitiendo para tales movimientos una cuantización, es posible que salgan de su estado normal pasando a poseer dos o más cuantas de acción. Los movimientos de traslación no interesan por no ser periódicos, motivo por el cual caen bajo la teoría de los calores específicos. De los movimientos de rotación son importantes para la molécula biatómica, no los que se verifican alrededor del eje que pasa por los dos núcleos, sino los que tienen un eje perpendicular de rotación a la línea que une aquéllos; pues a causa de la gran masa nuclear, el momento de inercia de los núcleos respecto al último eje es mucho mayor que el de los electrones respecto al primero.

Todos los elementos de la molécula están en movimiento.

Movimientos importantes para cuantizar.

Por eso se pueden reducir los mecanismos de emisión y absorción a dos casos límites: el primero supone un movimiento en bloque de la molécula alrededor de un eje perpendicular a la línea de los núcleos; el segundo añade a estos movimientos cambios de estructura intramolecular, es decir, de la disposición de los elementos que forman la molécula.

Cuando la estructura molecular no varía con la absorción o emisión, los cambios energéticos se verifican por medio de una quantización de la rotación alrededor de un eje perpendicular a la línea de los núcleos y, además, por una quantización de un movimiento vibratorio de los núcleos en la línea que los une. En cuanto al movimiento de rotación, análogamente a lo que hace Bohr para el átomo de hidrógeno, se le supone la posibilidad de poseer un múltiplo cualquiera de quantas de acción h ; por tanto, hay una porción de estados de rotación de las moléculas posibles; con el cálculo numérico se demuestra que la diferencia de energías correspondiente a estos dos estados consecutivos es constante. Del movimiento de vibración se admite que las elongaciones de los núcleos son tan pequeñas con respecto a su distancia, que dicho movimiento puede considerarse como armónico, por lo que se supone que sólo puede dar saltos de una unidad en la pérdida o ganancia de los quanta.

* * *

El proceso de emisión de una radiación compleja es inextricable.

En los pocos casos concretos de emisión que van expuestos, no abarcamos, ni mucho menos, una teoría completa del mecanismo emisor de la materia en sus distintos estados. Si en todos ellos se obtiene un conjunto discontinuo de rayas espectrales, ¿cómo se explica la emisión de una radiación compleja, y si cabe, de una radiación negra? Nosotros sólo nos hemos referido a los cuerpos gaseosos, y aun éstos en ciertas condiciones; por ejemplo, hemos prescindido del efecto de la presión, la que modificando la trayectoria de los electrones, hace variar el espectro de un gas. Imagínese, pues, un sólido incandescente con presiones y tensiones formidables, que por lo menos son siempre superio-

res al coeficiente de ruptura, con una disposición completamente irregular de los electrones que los constituyen, salvo en los cuerpos cristalinos. No cabe un estudio concreto descriptivo en tan difíciles condiciones; entonces se acude a la teoría de Planck, la que a base de suponer para ciertos recintos materiales una infinidad de posibilidades, saca la distribución de frecuencias por radiaciones simples correspondientes a una radiación negra, lo que nosotros no podemos explicar aquí.

Mas si ciertos mecanismos emisores presentan dificultades para su explicación, en cuanto a su complicación, hay otros que los presentan por la falta de datos experimentales que de ellos poseemos; en éstos va incluido el *núcleo atómico*. El campo eléctrico tan enorme que lo envuelve, sólo permite que sea alcanzado por radiaciones de frecuencia elevadísima, del orden de los rayos γ ; inversamente, por la razón que vamos a exponer, de ser el núcleo un centro emisor de radiación, ésta pertenecería al terreno de las frecuencias de los rayos X, por lo menos. Pero estas radiaciones son del dominio de temperaturas elevadísimas, las que no caen dentro de los límites de las usadas en nuestros laboratorios.

La carencia de emisión por parte del núcleo atómico.

Esta misma carencia de emisión por parte del núcleo nos quita la fuente experimental más fecunda y más exacta para el conocimiento de la estructura intraatómica y en este caso intranuclear; nos quedan únicamente, como datos experimentales utilizables, el número atómico o carga nuclear, la masa mecánica de los distintos isotopos y, sobre todo, la penetración de las partículas α y β , lo que permite fijar un límite a las dimensiones de aquél. Con estos datos y aprovechando los resultados obtenidos por Rutherford en la desintegración de la materia, obtiene Neuburger (1) una tabla de radios nucleares calculados como mínimos, desde luego crecientes con el peso atómico.

Una vez establecido un límite para el radio del núcleo, atengámonos a que éste es una asociación de protones y electrones, los cuales no pueden estar en reposo relativo sin precipitarse

La estructura dinámica del núcleo.

(1) *Ann. der Phys.*, vol. 70, pág. 139, 1923.

unos sobre otros, a no ser que se introduzca algún postulado supletorio referente a las acciones mutuas que entre ellos se ejercen; es, por consiguiente, más fácil suponer un movimiento en forma de órbitas keplerianas en el seno del núcleo. Pero ¿qué elementos servirían como planetarios? Los electrones no son utilizables, pues su movimiento a base de un quanta de acción h no permite radios inferiores a los de la corteza atómica. ¿Vamos a admitir, pues, un quanta de acción inferior a h ? A evitarlo se dedica el esfuerzo de algunos científicos, aunque otros se valen de la desviación de la ley de Coulomb para distancias muy pequeñas, y aun de las dos cosas a la vez.

Un modelo nuclear.

Citaremos, como ejemplo muy sencillo, el modelo Nicholson (1). Supone un núcleo compuesto de un electrón en reposo, alrededor del cual giran un par de protones situados en los extremos del diámetro de la circunferencia que describen, lo que vendría a constituir un isótopo del hidrógeno al agregarle un electrón cortical. Fácil es entender que siendo dos factores, el área descrita y la masa inerte, los que componen el quanta de acción h , la masa que gira, compuesta de dos protones, es aquí mucho mayor que la del electrón revolutor del átomo de hidrógeno; por lo que el otro factor, representado por la velocidad areolar, puede ser inversamente menor. De aquí resultan para este modelo órbitas mucho menores, de 1.845 veces más pequeña que la correspondiente al estado normal del átomo de hidrógeno. Otros ejemplos, como el citado en (I) del mismo Neuburger para el núcleo del litio, son ideados siempre a base de protones o asociaciones de los mismos con electrones, que giran alrededor de cargas negativas, lo que permite obtener radios orbitales compatibles con la pequeñez del núcleo atómico.

El núcleo necesitaría un ambiente de más tensión para manifestarse al exterior.

Cualquiera que sean estos modelos nucleares, lo que pretendemos demostrar aquí es que la energía potencial perdida por un elemento de los que entran en rotación al pasar del infinito a su órbita normal, es mucho mayor que para el caso del electrón del átomo de hidrógeno. Esta energía, transformada en ra-

(1) *Phil. Mag.*, vol. 45, pág. 808, 1923.

diación, equivaldría a vibraciones de frecuencia elevadísima que caerían desde los dominios de los rayos X hacia los rayos γ . Claro está que estas radiaciones no se llegan a producir porque lo probable y casi seguro es que dichas trayectorias pertenezcan siempre al estado normal, y el núcleo atómico siga al través del tiempo imperturbable en su estructura dinámica, puesto que las condiciones exteriores no pueden influir en la marcha de sus elementos. Únicamente una temperatura elevadísima que obligara a chocar los átomos entre sí con velocidades comparables a las que poseen las partículas α de los cuerpos radiactivos, o bien la incidencia de radiaciones de extremada dureza, podría alterar las trayectorias nucleares, dando lugar a la emisión de radiaciones, que a su vez nos servirían como medio de investigación de los centros donde proceden.

No solamente una variación de trayectoria podría esperarse al atacar el núcleo con radiaciones de extremada dureza y por temperaturas superiores a las usadas hasta ahora, sino que del mismo modo que éstas pueden producir una ionización y una disociación al aumentar su valor tensional (final de IV), podrían desintegrar el núcleo, tal como lo hizo Rutherford con las partículas α . Pero si bien el físico no dispone por ahora de medios para producir radiaciones y temperaturas de tensión suficiente, en cambio parece que es más fácil conseguir corrientes eléctricas de tensión superior a las radiaciones y temperaturas manejables. Por eso es de esperar que la desintegración del núcleo y, de consiguiente, la transmutación de unos cuerpos en otros, sea una operación que se extenderá pronto a otros límites que los alcanzados por Rutherford, probablemente por medio de corrientes de tensión elevada.

La transmutación de los cuerpos simples.

Así, resulta que las cuestiones que aplica la teoría de los quanta de acción son cada vez más variadas, invadiendo terrenos que hasta ahora quedaban al margen. Naturalmente que todo fenómeno físico o químico supone una modificación más o menos profunda de la materia que está sometida a este fenómeno, y toda modificación tiene que ser a base de una variación de distancias, de posición, de trayectorias, etc., de los elementos eléc-

La teoría de Planck tiene que invadir nuevos terrenos.

tricos que constituyen la materia; tales modificaciones influyen en el valor de la energía potencial correspondiente a dichos elementos; no cabe duda que a estas variaciones de energía potencial es aplicable la teoría de Planck no con menos motivos que al proceso de emisión y otros.

VI

El éter

El problema del
éter.

En todo el curso de esta exposición, y éste ha sido precisamente nuestro objetivo, hemos procurado diferenciar y analizar las dos realidades únicas que presenta el mundo físico: materia y radiación, ambas como depósito de *energía* en el espacio en forma de campo eléctrico y magnético. Mas ¿qué significa una fuerza eléctrica? ¿Una deformación, una singularidad en *algo* que se llama éter! ¿Y la fuerza magnética? ¿Un estado de movimiento de este mismo éter! Sea lo que fuere, los físicos no han podido eliminar la idea del éter, aun con toda la vaguedad que esta palabra encierra. Aparece ya en algunas exposiciones primitivas con una acepción más o menos clara, y usado luego por Huyghens para explicar su teoría ondulatoria de la luz, ha sido un recurso que ha servido más tarde como soporte de toda clase de energía, radiante y material.

El problema del éter, al cual se refiere la teoría de Relatividad (1), está en formación todavía, motivo por el cual es más difícil reducirlo a la sencillez y dimensiones propias de este dis-

(1) Ha sido la cuestión de moda durante estos últimos años, como si otras teorías, la de Planck y la de Bohr, no tuvieran tanta o más trascendencia. Parece que, por fin, cesó ya la algarabía promovida por los osados, los que se ocuparon de la teoría más difícil de la Física con la ligereza que da la carencia absoluta de ideas respecto a esta ciencia. De todo aquel galimatías queda sólo la labor de los pocos que poseían solvencia científica.

curso. Añádase a ello que es un asunto de harta dificultad, para el cual nosotros poseemos deficiente preparación, y quedará excusado que, si bien lo tratamos como complemento necesario de la exposición analítica que de la Naturaleza llevamos hecha, soslayemos las dificultades escatimando nuestra labor. Por demás es asunto tratado en numerosos libros de divulgación, aparecidos en estos años de fiebre relativista, para que nosotros insistamos en el tema; y de querer profundizar el lector que posea suficientes conocimientos de Matemáticas, tiene las obras de Becquerel, Eddington y Weyl.

Ante todo, se nos presenta, dado el análisis que de los elementos constitutivos de la materia llevamos hecho, la cuestión siguiente: ¿Qué es un protón? ¿Qué es un electrón? La existencia de estas dos condensaciones enormes de electricidad, o más bien de energía (III), es incompatible con el electromagnetismo de Maxwell (1), ya se miren como depósitos de energía en todo el espacio, en porcentaje creciente hacia el centro del quanta o como cargas eléctricas (I) encerradas en pequeñísimo volumen: el resultado debiera ser la explosión de estas cargas eléctricas. Es, recordando lo dicho a final de (IV), el primer caso en que una tensión enorme, aun aislada de todo otro elemento material y radiante, es decir, rodeado de una tensión nula, no produce efecto alguno.

Carencia de razones físicas determinantes de la existencia del electrón y del protón.

Desde luego, todo el electromagnetismo está regido por cuatro ecuaciones representativas del campo electromagnético, reducibles a dos, las que nos determinan los valores del vector magnético y el vector eléctrico; pero siempre quedarían indeterminados los valores de las cargas del protón y del electrón, a la vez que la masa de los mismos (2), aunque la existencia de éstos fuera compatible con las presiones electrostáticas. Por consiguiente, los dos quantas de electricidad y la materia, composición de los mismos, contienen dos parámetros que aparecen de

(1) Ver Weyl: *Espace, Temps et Matière*, pág. 187, edición francesa. Libro de difícil lectura.

(2) Ver Cunningham: *Relativity and the Electron theory*, pág. 51. Libro útil sólo para la Relatividad restringida.

un modo caprichoso en la Naturaleza. Conocidos estos parámetros, mediante el auxilio de las leyes físicas hasta hoy conocidas se puede más o menos difícilmente relacionar todos los fenómenos. Nos encontramos, pues, delante del primer hecho no explicable físicamente: los dos gránulos de electricidad se nos presentan como *productos elaborados*, de forma que el método de construcción cae fuera del alcance de la razón humana. Pueden sustituir perfectamente a los *productos manufacturados* de que nos hablaba Clerk Maxwell, como emisores de energía radiante.

Cómo se hace
necesaria una
ley puramen-
te matemá-
tica.

Si las constantes o parámetros de las dos cargas eléctricas elementales, y su existencia misma, no tienen explicación según los hechos y leyes de la Física conocidos, ¿es que se ha llegado al último eslabón de la investigación de la estructura de la materia? Parece que sí. Por eso que las Matemáticas, de cuya fecundidad y precisión se había alimentado la Física, con las limitaciones impuestas por realidades concretas que de la experiencia dimanaban, se encuentran delante de un hecho, la existencia de los cuantos de electricidad, que por no ser referible a otros hechos o leyes no impone restricción alguna a su desarrollo; de aquí que la existencia de dichas cargas elementales se relegue a una *cuestión geométrica*: se trata, no de una realidad física, sino de una *deformación* del espacio que circunda el quanta eléctrico. Este trabajo viene hecho por Weyl, quien encierra la existencia del electrón en una expresión geométrica-algébrica.

Teoría de Weyl.

A partir de este resultado, no es la ley de Coulomb la que regula los movimientos de una carga eléctrica en presencia de un electrón: es el mismo espacio, el que por su deformación obliga a dicha carga eléctrica a seguir una trayectoria que, por no ser rectilínea, la atribuimos nosotros a la existencia de la fuerza de Coulomb. Por ejemplo: en un espacio libre de cargas eléctricas y radiaciones, o por lo menos lejos de ellas, otra carga abandonada a su inercia seguiría con movimiento uniforme sobre una recta; al introducir un electrón, el espacio, como cosa substancial, se deforma y transforma dicha recta en una curva aproximadamente de segundo grado (por ejemplo: aproximadamente una elipse). Esta curvatura de la trayectoria equivale a

una aceleración dirigida hacia el centro de la carga atractiva, lo que significa una fuerza dirigida hacia dicha carga. Para la teoría de Weyl-Einstein, su suprime esta fuerza, y se atribuye a todo el espacio que rodea la carga una aceleración hacia ella; por eso otra carga de distinto signo en su presencia es arrastrada por esta aceleración, precipitándose sobre la primera. Aclarar más esta idea es precisamente la dificultad que lamentamos al empezar, por lo que la dejamos tal cual está.

Es de notar que la teoría de Weyl suprime el concepto de fuerza eléctrica y la refiere a un Geometría especial; en consecuencia, la fuerza magnética, como efecto del corrimiento de aquélla, queda también suprimida en su sentido físico. Con eso desaparecen todas las fuerzas de la Naturaleza, menos la de gravitación; efectivamente: todas las fuerzas de cohesión, afinidad, capilaridad, dureza, etc., de la Física, son resultados de la combinación de las fuerzas eléctrica y magnética entre los elementos eléctricos que componen la materia, a base de la ley de Coulomb. Reducida ésta a la Geometría, las demás pierden también su sentido físico.

Todas las fuerzas naturales pasan a la Geometría.

A causa de la proximidad de los cuantos eléctricos al formar la materia, las fuerzas antes citadas son rápidamente decrecientes con la distancia, siempre con más rapidez que una potencia — 3 de dicha distancia (1), por lo que se hacen imperceptibles todas ellas cuando se trata de dos cuerpos relativamente alejados, como son dos planetas; entonces desaparecen sensiblemente todas las fuerzas que dimanar de la ley de Coulomb o de la de Weyl, y queda un efecto residual llamado gravitación universal. Más claro: la aproximación de cargas de distintos signos atenúa toda manifestación eléctrica de éstas, apareciendo, en cambio, un nuevo efecto, llamado de gravitación, entre los complejos materiales que aquéllas forman.

Del efecto de gravitación.

La gravitación, regulada por la ley de Newton, da curvatura al movimiento de todos los complejos materiales en presencia de otros. Esta curvatura la traduce Einstein, no como un efecto de

La gravitación según Einstein.

(1) Ver la tesis doctoral del autor, pág. 35.

la ley de Newton, sino como una deformación del espacio que rodea a la materia. Por eso los efectos de esta deformación del espacio los sufrirán la materia y además la radiación, y *todo* cuanto pudiere imaginarse situado en dicho espacio. Esta manera de considerar el espacio da origen a otras expresiones algébrico-geométricas, que son las que sustituyen a la ley de Newton.

Ampliación a
las radiacio-
nes.

La deformación del espacio inherente a la presencia de la materia lo es también a la presencia de una radiación. Einstein postula esta consecuencia. A nosotros no nos debe extrañar, habiendo establecido, sobre todo en (III), una analogía tan grande entre las dos, con su carácter bieléctrico y energético a la vez. Así queda también sometida la radiación a un sentido geométrico del Universo: son a la vez la radiación y la materia, o sea la energía, las que producen una deformación en el espacio; son ellas mismas las que en sus movimientos están sometidas a esta deformación. Así, pues, el carácter de *masa* común a la radiación y materia será proporcional a la deformación; como ésta, cuando se refiere a casos posibles, se mide con una regla, de ahí que la masa de un astro se mide en Relatividad por una longitud, por ejemplo, en centímetros; y lo mismo la masa de un gránulo de energía radiante vendría medido por una longitud pequesimísima.

La Geometría y
la Física for-
man una dis-
ciplina sin
discontinui-
dad.

Con esas generalizaciones desaparecen las fuerzas de Coulomb y de Newton. Como las demás fuerzas de la Naturaleza son efecto de la combinación de esas dos, especialmente de la primera, desaparece, se inutiliza para siempre, la idea de fuerza como productora de los fenómenos físicos. Todos ellos quedan relegados a una Geometría, que no es la de tres dimensiones, creada por la abstracción humana a base de un espacio sin materia, sino otra a base de realidades sensoriales, producidas por la energía exterior al sujeto cognoscente y traducidas en un sinnúmero de resultados numéricos, que al culminar forman la teoría de Einstein-Weyl. La Geometría de Riemann y Gauss, y la Física de Einstein y Weyl, *forman, pues, una soldadura autógena de las dos disciplinas*, solamente perceptible por las dificultades que ella encierra.



Y el espacio o éter, soporte de esta deformación o estructura geométrica, ¿qué es? ¿Es él que por su estructura irregular, curvilínea en un sentido superdimensional, quien da origen a la materia y la radiación, o estas dos las que, albergadas en aquél, lo deforman y lo modifican? Eddington considera «la radiación y la materia, no como causas productoras de los distintos grados de curvatura del espacio, sino como los elementos de percepción de esta curvatura». Einstein (1) dice: «el campo eléctrico-magnético (radiación) y los átomos no son estados de un medio, sino realidades no referibles a otras». De las dos soluciones, la primera nos parece más adecuada y más clara: Hay una Realidad, que puede llamarse indistintamente *espacio o éter*, cuyas modificaciones constituyen la energía en sus dos manifestaciones de radiación y materia.

Pero la energía puede tener dos modalidades: eléctrica y magnética. Parece que es a la primera a la que se refiere la idea del éter antes expuesta. Para la segunda acudamos al fenómeno de Zeeman, en el caso sencillo de un doblete, cuya explicación es la siguiente: al aplicar un campo magnético, todo el espacio donde está situado este campo magnético adquiere un movimiento de rotación alrededor del eje representado por este campo y con velocidad proporcional al mismo. Esta rotación del espacio o del éter arrastra consigo la trayectoria del electrón; por eso el plano de esta trayectoria obtiene un movimiento de *precesión* alrededor de este eje. Con respecto a un observador arrastrado por el movimiento, las características de las trayectorias del electrón son las que indica la teoría de Bohr (V); con relación a un observador en reposo, se conservan el período de rotación y el radio de la trayectoria, pero varía la velocidad, porque a la propia del electrón sobre su órbita debe sumarse vectorialmente la correspondiente al movimiento de precesión. El resultado de esta suma puede dar un valor mayor o menor que el primer sumando, según el signo de la velocidad de precesión. Teniendo en cuenta ahora que una trayectoria viene caracterizada por el

El fenómeno de
Zeeman y el
éter.

(1) Einstein: *Ather und Relativitätstheorie*, pág. 8, 1920.

valor de la energía cinética del electrón, se comprende que un campo magnético crea dos casos de equilibrio posible para cada uno de los ya existentes en la teoría de Bohr, correspondientes, por lo tanto, al desdoblamiento de las rayas espectrales, demostrado por Zeeman.

Además, el efecto Star nos corrobora lo ya dicho respecto a la energía de un campo eléctrico como deformación de este substractum universal o éter. Efectivamente, la aplicación de un campo eléctrico muy intenso deforma las trayectorias de los electrones corticales, lo que demuestra los experimentos de Star.

Resumiendo lo dicho, resulta que la energía correspondiente a la fuerza eléctrica equivale a una deformación del éter o substractum Universal, y la correspondiente a la fuerza magnética equivale a una rotación de aquélla.

Consecuencias
de la teoría a
comprobar
por los expe-
rimentos, y
valor actual
de los mismos.

De la teoría de gravitación de Einstein se desprenden algunas consecuencias, que de momento caían fuera del marco de la Física clásica. Son: el corrimiento hacia el rojo de las rayas espectrales procedentes de un campo gravitatorio intenso; el movimiento del perihelio de una trayectoria planetaria, incluso la de Bohr, en el mismo sentido que el planeta; y la desviación de un rayo luminoso al pasar por el borde del Sol. Los tres han sido confirmados por la experiencia, pero de un modo tal, que no han eliminado la duda del campo científico por dos motivos: los experimentos correspondientes no tienen el valor decisivo necesario para encuadrar una teoría, y sus resultados son explicables a la vez por otras hipótesis.

Respecto al corrimiento de las rayas espectrales solares hacia el rojo, resulta hoy un fenómeno poco claro por las perturbaciones que el ambiente físico del Sol puede producir en el proceso emisor absorbente. Es éste, de los tres hechos citados, el de menos valor heurístico. Es suficiente recordar el efecto Zeeman y el efecto Star para imaginar lo que ocurrirá en el Sol con unos campos electromagnéticos formidables.

En cuanto al movimiento del perihelio de Mercurio de $41''$ por siglo es un hecho indudable; pero dado su pequeño valor, no estará de más, como aconseja Hopmann (1), una revisión de las observaciones hechas estos últimos años.

Queda la desviación de los rayos luminosos al bordear el Sol, cuyo valor es $1,7''$. Es éste un hecho indiscutible, aunque con un error relativo bastante grande, a partir de las dos expediciones inglesas de 1919 para su observación, y de otras, americanas y alemanas, verificadas después. Pero no sabemos si lo que se mide en las placas fotográficas usadas en aquellas observaciones es el efecto de Einstein, o bien la *refracción cósmica*. Si no se conociera el primero, se diría que es la segunda; ahora la duda está entre los dos (1). En efecto: la refracción cósmica, o efecto Courvoisier, ha sido confirmada por muchas observaciones, y explicada como debida a la existencia de una materia cósmica interplanetaria en densidad creciente hacia el Sol, por cuyo motivo la luz se refractaría al penetrar en ella, desviándose hacia él. Las observaciones han sido hechas, para este último fenómeno, desde 3° del Sol hacia afuera, mientras que para el efecto Einstein de 3° hacia adentro. En estas circunstancias es muy difícil compulsar los resultados y asegurar que el efecto de Einstein es una continuación en *crescendo* del efecto Courvoisier al acercarse al Sol. De todos modos, esta materia cósmica *misteriosa* tiene que producir fenómenos de rozamiento con los planetas, los que por ahora no se han observado.

Teóricamente, a partir de la estructura neutra de una radiación expuesta por nosotros (III), era de esperar que las analogías entre ésta y la materia se tradujeran en un comportamiento similar ante la clásica fórmula de gravitación de Newton. Pero ésta da para un rayo de luz una desviación mitad de la que resulta de la teoría de Einstein. No obstante, si la radiación poseyera una estructura granular (II) y (III) tal como expusimos, cabría un aumento de masa de aquélla por causa de un ligerísi-

Otra explicación de la desviación de un rayo luminoso y del corrimiento del perihelio.

(1) Ver Hopmann: *Physikalische Zeitschrift*, vol. 24, pág. 476, 1923.
Además, Kienle y Kopff: *Phys. Zeits.*, vol. 25, págs. 1 y 95, 1924.

mo incremento de su velocidad al ser atraída por el Sol; este aumento de masa se produciría paralelamente con otro igual de la gravitación sobre el quanta de luz; en total, la curvatura del rayo luminoso sería mayor de lo que parece de primer intento y de conformidad con las observaciones astronómicas antes indicadas.

En cuanto al movimiento del perihelio de Mercurio, a él es aplicable lo que acabamos de decir: el incremento de masa sufrido por el planeta (III) al aumentar su velocidad por aproximarse al perihelio, se traduce en un mayor efecto de gravitación que produce un aumento de curvatura, lo que retrasa la intersección de la órbita consigo misma. Mas este aumento de masa, que equivale al que nos da la Relatividad restringida, produce un corrimiento de 7" por siglo, bastante inferior al dado por la observación y por la teoría de gravitación de Einstein, que vale 43" por siglo.

Supuesta propagación del efecto gravitatorio.

Por otro lado, se llega a las mismas fórmulas de Einstein suponiendo que la gravitación, a igual que las fuerzas electromagnéticas, se propaga con la velocidad de la luz. Recíprocamente, la teoría de Einstein saca como consecuencia la propagación del efecto gravitatorio.

En un efecto de propagación cabe sospechar una acción absorbente por parte del medio propagador. A ello va dedicado el experimento del profesor italiano Majorana (1), según el cual la acción de la gravedad terrestre queda un poco apagada al pasar a través de un enorme bloque material. Mas este experimento estaría en contradicción con los movimientos planetarios, los que no acusan tal absorción, cosa que pudiera ser explicable por una difracción. El mismo autor declara que lo repetirá con más garantías.

Teoría de Bucherer.

Quizás la resistencia ofrecida por muchos científicos a las teorías de Einstein se origina en la carencia de sentido físico de las mismas. Por eso toda explicación de los tres resultados numéricos antes indicados por algún procedimiento *tradicional* en-

(1) *Revue des Sciences*. Febrero, pág. 71, 1922.

cuentra favorable acogida. En ello consiste la teoría de Bucherer (1). Acepta la idea de un *superéter* propagador de la gravitación, debida a Lenard. Demuestra que una radiación al alejarse de un campo gravitatorio sufre una pérdida de frecuencia, como indicamos ya (II), por efecto de una ganancia de energía potencial de gravitación. Generalizando este hecho lo aplica a la materia, a la que considera de la misma naturaleza que la radiación, suponiendo que «la pérdida de frecuencia es un hecho que lo mismo concierne a un movimiento periódico de una radiación que de una partícula material». A partir de esta hipótesis por deducciones matemáticas, de rigor lógico dudoso algunas veces, llega a demostrar la desviación de un rayo luminoso al atravesar un campo gravitatorio, el corrimiento del perihelio de Mercurio y la diferencia entre la masa longitudinal y transversal.

En verdad, la teoría de Bucherer no reemplaza a la teoría de gravitación de Einstein; más bien la aclara. Pretende dar un sentido físico a una teoría puramente matemática. Por eso en los cálculos usa algunas veces resultados einsteinianos, como lo es la contracción del tiempo en un campo gravitatorio; llegando muchas veces a fórmulas análogas a las de Einstein, aunque los procedimientos sean distintos.

Dos teorías distintas que explican a satisfacción una misma serie de hechos y que se apoyan sobre fórmulas análogas, no es cosa nueva en Física. Lo mismo ocurrió hace un siglo con la teoría electromagnética y la teoría ondulatoria de la luz. No es la Naturaleza la que decide sobre la validez de ciertas teorías, sino el hombre, según su predisposición, la que depende del caudal, calidad y desarrollo de sus conocimientos. Aquí cabe acudir al criterio de Spengler, según el cual el científico, no sólo pregunta, sino que *persuade y violenta* la Naturaleza.

En este caso concreto, ninguna disciplina científica más completa y más sobrada de recursos para acudir a ella en demanda de soluciones, como lo es la Geometría; así lo ha hecho Einstein. Por otro lado, el cuanto de acción h , de Plank, nace con

(1) *Annalen der Physik.*, vol. 68, págs. 1 y 545, 1922.

independencia absoluta de todo criterio geométrico. Aún más: es por él por cuyo medio el hombre se pone en comunicación con el mundo físico: por lo menos, una teoría quantística de la visión está perfectamente clara (1), por lo que es de esperar que las demás operaciones sensoriales, como diferenciaciones de una primitiva, se verifiquen también por elementos de acción. Aplicando, pues, Bucherer el quanta h , resulta que acude a la Biología para explicar el problema del éter.

Velocidad de
propagación
de las radia-
ciones.

Otro problema se presenta al pasar un elemento de radiación, es decir, un quanta de radiación, del átomo que lo emite a otro átomo que lo absorbe. ¿Cuál es la velocidad de esta radiación? Si los dos átomos están en reposo relativo, fácil es contestar: la velocidad es la misma cualquiera que sea la calidad de los átomos y de la radiación, cuyo valor se llama velocidad de la luz. Pero una vez los dos átomos están en movimiento, ¿a cuál de los dos átomos se refiere esta velocidad?

Desde luego, admitiendo que los elementos o quantas eléctricos, que por su aproximación son causa de una emisión de un quanta de energía radiante, equivalen a una cierta región del espacio, *perfectamente limitada*, cargada de electricidad, y que el *espacio libre* circundante no tiene más relación con estas cargas que el campo eléctrico que de aquélla dimanar, como efecto, se comprende que, una vez la radiación emitida, viaje por el espacio independientemente del átomo que le dió origen y del que lo tiene que absorber.

Pero si nos atenemos a lo anteriormente expuesto, que todo protón, o electrón, o complejo material que ellos forman, representan una deformación que interesa a *todo* el espacio, entonces un elemento de energía radiante emitido por un complejo material no viaja a través de un espacio libre; este espa-

(1) Jolly: *A Quantum theory of vision*, en *Philosophical Magazine*. Febrero 1922.



cio estará interesado a la vez por las cargas de los dos átomos, no como efecto de ellas, sino como ellas mismas; de modo que al ser emitido un gránulo de radiación, se propaga en un *ambiente* formado a la vez por el complejo emisor y por el complejo absorbente, en distinta eficiencia, según las distancias relativas. En presencia de otros complejos materiales, viajará en un medio ambiente interesado por todas las cargas componentes de todos los complejos a la vez. Por tanto, cualquier variación, efecto o particularidad de la radiación, por ejemplo, su velocidad, parece que no puede ser brusco, sino que debe ser *gradual* y *continuo*, como afectado a la vez por la presencia de todos los complejos materiales.

Veamos lo que nos dice la experiencia: El conocido experimento de Michelson-Morley se hizo para buscar una variación de velocidad en la luz, según la dirección de movimiento de la Tierra, con respecto a *cierto éter inmóvil*. El foco, que producía una luz monocromática, el aparato y todo, estaba en reposo relativo con la Tierra y el observador; el resultado fué hallar la misma velocidad para la radiación, cualquiera que fuese la orientación del aparato. Este resultado era de esperar, teniendo en cuenta lo dicho en el párrafo anterior: la radiación viaja en un ambiente debido a todos los complejos materiales en presencia, ambiente que por el reposo relativo de dichos complejos no varía, cualquiera que sea la orientación del aparato; en consecuencia, la radiación no sufre ninguna variación de velocidad. Si recordamos que no hace mucho el éter y la materia eran dos cosas separables, en el sentido que la una no necesitaba de la otra para su existencia, y que la radiación viajaba en un éter independiente de la materia, se comprende que se esperase en el experimento de Michelson una variación de velocidad, según la orientación, por causa del movimiento relativo de la Tierra y del éter.

Experimento de
Michelson.

El experimento de Michelson hace poco lo repitió Tomaschek (1) con focos luminosos extraterrestres. Este físico modifi-

Experimento de
Tomaschek.

(1) *Ann. der Phy.*, vol. 73, pág. 105, 1924.

có el interferómetro de Michelson con objeto de someter a examen la luz del Sol, de la Luna, de Júpiter, de Sirio, de Arturo y de Vega. Con estas observaciones no pudo acusar el movimiento de traslación de la Tierra, ni tampoco del sistema solar, pues si bien el interferómetro daba un pequeño corrimiento de las rayas de interferencia, el valor de este corrimiento no correspondía al esperado, y además entraba dentro de los errores del aparato. Aquí nos encontramos con átomos emisores de los astros dichos en movimiento relativo con respecto a la Tierra. El resultado del experimento es que la radiación viaja con la velocidad de la luz *en el ambiente formado por los complejos materiales terrestres*; es decir, que los astros citados, a causa de su distancia, no intervienen en el ambiente terrestre.

Otro experimento interesante para este asunto es el verificado en las alturas del monte Wilson (California), por Miller (1), con el mismo interferómetro que usó Morley. Aparece un corrimiento de las rayas interferenciales que indica que la luz empleada no viaja con la velocidad conocida hasta ahora, ni con relación a la Tierra, ni con relación al Sol; *equivale a una pérdida de velocidad de una décima de la que tiene la Tierra respecto al Sol*.

Experimento de
Miller.

Como el mismo autor declara, tal experimento presenta a la vez una perturbación periódica en una completa revolución del aparato, cuya causa es desconocida, y que por tanto le resta mucho valor al resultado indicado. No obstante, de buscar alguna interpretación a dicho resultado, pudiera suponerse que en una montaña, algo separada, por consiguiente, del resto de los complejos materiales terrestres, tienen influencia los complejos solares, en el sentido de modificar el ambiente en que viaja la radiación en una décima a favor del Sol.

Lo que indica el
experimento
de Miller.

Es de observar, para interpretar el experimento anterior, que el ambiente, debido a una carga eléctrica aislada, varía más o menos fielmente a la ley de Coulomb; pero no ocurre lo mismo con los complejos materiales. Al aproximarse varias car-

(1) *Physical Review*, vol. 19, pág. 407, 1922.

gas de distinto signo para formar un átomo o una molécula, se conserva el efecto gravitatorio; pero en cuanto al campo eléctrico que ellas significan, sufre una reducción extraordinaria, con un decrecimiento con respecto a la distancia más o menos complicado, pero siempre superior a una potencia de exponente -3 . Es fácil deducir que, con este decrecimiento tan rápido, la influencia del Sol en el experimento de Miller debiera ser muy inferior a la correspondiente por el resultado que da el aparato. Mas si recordamos que los complejos solares poseen un grado de empaquetamiento mucho menor que los terrestres, los campos eléctricos por ellos formados no se cifan tanto a los pares que les dan origen, y por eso son más intensos de lo que se había previsto antes, razón que pudiera compensar la anterior.

Por lo dicho, ni el experimento de Miller está bastante claro, ni tampoco su interpretación. De confirmarse tal experimento, de ningún modo podría atribuirse el corrimiento de las rayas interferenciales a un éter en reposo; pues por el resultado, este reposo debía referirse al Sol, y, por ahora, no comprendemos el motivo de tal preferencia por este astro.

Para ilustrar esta cuestión existe además el experimento de Fizeau, que demuestra la variación de la velocidad de la luz a través de un líquido en movimiento; pero es de difícil interpretación, según el criterio que hemos adoptado, porque la luz, en este caso, viaja en un ambiente intramaterial. Rehusamos, por lo complicado, a insistir en ello.

A principios de siglo dominaba aún la idea del éter universal absoluto de Huyghens. Por eso se esperaba que el experimento de Michelson acusara el movimiento de la Tierra con respecto a este éter. El resultado negativo produce una verdadera desorientación respecto a la idea que de tal fluido se tenía. Entonces, en 1906, publica Einstein el principio de Relatividad restringida, que equivale a decir: «la velocidad de propagación

Postulado de
Einstein.

de una radiación cualquiera es siempre la misma, se mida con relación al foco emisor o se mida con respecto a un sistema de referencia que camina con movimiento uniforme en comparación con dicho foco». Esta proposición deshace, por su mero enunciado, la consecuencia lógica de la suma de velocidades, so pena de acudir al establecimiento de una dependencia mutua entre las categorías espacio y tiempo, en contradicción con el significado mismo de estas categorías.

Hechos que confirman el postulado.

No obstante el inconveniente lógico del postulado, armoniza varios hechos, como son la aberración de la luz, el experimento de Fizeau y los experimentos antes citados, menos el de Miller. A la vez, la aplicación matemática del mismo llega a consecuencias, también propias de la teoría electromagnética, como son la inercia de la energía y el aumento de masa de una carga eléctrica con la velocidad.

La estructura fina.

Precisamente de esta última consecuencia se deduce la estructura fina de las rayas espectrales: De las trayectorias posibles en el modelo atómico de Bohr, las elípticas de fuerte excentricidad son aquellas en que el electrón rotatorio sufre mayor variación periódica de velocidad por cada vuelta, lo que se traduce en una variación de masa de dicho electrón. Así resulta que elipses de distinta excentricidad y correspondientes a un mismo número de orden p (V) se atribuirían una misma raya espectral; pero por efecto de aumento de masa del electrón estas elipses corresponden a rayas espectrales ligeramente separadas, o sea forman la *estructura fina*. El espectroscopio ha contestado afirmativamente a los cálculos teóricos de Sommerfeld; sobre todo (1) en la parte roja del espectro existe una aceptable concordancia, la que disminuye hacia el terreno de los rayos X.

Hechos que quedan al margen del postulado.

El descubrimiento de la estructura fina fué un éxito del postulado de Einstein, aunque podía atribuírselo también la teoría electromagnética. Pero quedan al margen el experimento de Miller, antes citado, y la carencia de aberración por causa del mo-

(1) Ver Lau: *Phys. Zeits.*, vol. 25, pág. 60, 1924. Una reseña del estado actual de este hecho.

vimiento de las estrellas dobles y de los planetas (1). El resultado del primero indicaría una pequeña discrepancia del postulado de Einstein; pero éste, por su enunciado de carácter universal y absoluto, no tolera la más mínima desviación al aplicarlo. De ofrecer, pues, el experimento de Miller más garantías, sería la objeción más fuerte a la Relatividad restringida. Por otro lado, cuando las estrellas dobles se mueven normalmente al rayo visual, y en sentido contrario una de otra, tal movimiento debería acusarse en el plano focal del objetivo por un pequeño corrimiento de las dos imágenes, del mismo modo que se acusa el movimiento de la Tierra respecto al Sol. La diferencia de comportamiento del Sol y de las estrellas dobles, en cuanto a la aberración, no es explicable por la Relatividad.

Las consecuencias de la teoría de la Relatividad restringida y generalizada (gravitación) de Einstein llevan a gran complicación matemática, poco frecuente cuando se trata de leyes de la Naturaleza de carácter tan general; pues si bien la experiencia da a veces resultados muy enredados, el análisis descubre luego en ellos relaciones sencillas, como ocurre con la formación simplista de los átomos a base de protones y electrones, a pesar de la fraccionalidad de los pesos atómicos. No es éste el caso de la Relatividad. Monumentos de cálculo se han edificado para su exposición, y aun ellos necesitan de conocimientos previos de matemáticas poco frecuentes en los físicos formados antes de la aparición de dicha teoría.

Por eso que la teoría de Relatividad tenía que encontrar una resistencia por parte de la gran mayoría de físicos de laboratorio. Así ocurre que mientras los matemáticos creen haber encontrado con los tensores un utensilio de cálculo para hacer la síntesis del Universo, los físicos elaboran postulados sustitutivos del de Relatividad. Uno de ellos es la suposición de un *superéter* por Lenard (2), además de una serie de *éteres locales*, que él los refie-

(1) Ver Tomaschek: *Ann. der Phys.*, vol. 74, pág. 136, 1924. Un estudio de este asunto.

(2) Ver *Über Äther und Uräther*, 1920, de Lenard.

Ann. der Phys., volumen 73, pág. 89, 1924. Insiste sobre el mismo tema.

re a los planetas, y nosotros, para mayor generalidad, los referiremos directamente a los elementos constituyentes de la materia.

Hipótesis del
superéter de
Lenard.

Para este investigador de Heidelberg existe un éter absoluto o superéter que llena todo el Universo, cuya característica es propagar la gravitación y la radiación a la vez. En este éter pueden estar sumergidos, sin modificarlo, los elementos quantas de electricidad, cada uno con su éter propio y limitado, propagador de las radiaciones: *propio* en el sentido de ser arrastrado por el movimiento del quanta eléctrico a que pertenece; *limitado* a la manera que lo es la atmósfera de un planeta, en densidad decreciente, asintótica a cero.

El mecanismo de la propagación de una radiación lo explica Lenard suponiendo que un átomo emisor arrastra consigo el éter de los elementos que lo componen, de modo que cualquier radiación emitida por este átomo se aleja con la velocidad de la luz del mismo hasta llegar a cierta distancia, la que podría asignarse como distancia límite del éter propio del átomo. Una vez la radiación salva el límite del éter propio, pasa a viajar en el superéter, con la velocidad de la luz respecto al mismo, sin perjuicio de entrar en el éter de algún otro cuerpo que arrastrara nuevamente esta radiación.

Teniendo en cuenta que el éter propio no se refiere sólo al de un átomo, sino que también indica el de una masa material, como superposición de los éteres correspondientes a sus elementos componentes, se explica que un planeta como la Tierra no permita, por experimentos hechos en ella, con radiaciones de focos terrestres, demostrar el movimiento del éter, ya que éste es arrastrado por la Tierra en su movimiento del mismo modo que arrastra su atmósfera.

Aun con focos extraterrestres tampoco resulta posible acusar el movimiento de estos focos, puesto que las radiaciones emitidas por los mismos, al entrar en el éter terrestre, son propagados por él con la velocidad de la luz. Precisamente para comprobar esta hipótesis Tomaschek realizó el experimento antes indicado.

Lenard interpreta estos resultados con su teoría del superéter y de los éteres locales, suponiendo que la luz sufre varia-

ciones en su velocidad: primero se propaga a lo largo de la atmósfera etérea de las estrellas; a una distancia relativamente pequeña de ésta entra la luz en el superéter, sufriendo un cambio de velocidad; pasa por fin a la atmósfera etérea terrestre, con lo que sufre una nueva variación de velocidad.

De ser universal la aplicación del principio de Huyghens, las variaciones de velocidad indicadas debieran producir una desviación del rayo luminoso al penetrar oblicuamente en la atmósfera etérea terrestre, desviación que podría llegar a valer, según la teoría, hasta 20'' de arco. La comprobación experimental de esta desviación está todavía en estudio.

Se comprende que de ser cierto el mecanismo de Lenard, nunca sería posible demostrar por la marcha de la luz ningún movimiento, ni absoluto ni relativo, de la Tierra, consecuencia que a la postre no es otra cosa que el primer postulado de Einstein.

Pero no termina aquí el artificio de Lenard, sino que atribuye a la luz un comportamiento *transversal* distinto del *longitudinal*, como si para los efectos transversales la luz tuviese como soporte únicamente el superéter, aun cerca de las masas materiales. Queda así explicado el fenómeno de la aberración de la luz solar, considerando el superéter en reposo con respecto al Sol: un rayo de luz procedente del mismo, al entrar en el tubo del anteojo, se encuentra con que éste se mueve con respecto al superéter, y tal movimiento se traduce en un corrimiento transversal de la imagen en el plano focal del objetivo; de tratarse de la luz de un planeta, se produce la aberración también, pero el corrimiento se verifica con respecto al superéter solar, no con respecto al planeta; lo que indica que el movimiento del planeta no interviene en la aberración, la que reside en el superéter. Corrobora este resultado la ausencia de aberración producida por el movimiento de estrellas dobles; en cambio, el postulado de Einstein no explica cómo la aberración no permite demostrar el movimiento de dichas estrellas dobles.

Por otro lado, la atracción solar sobre la luz la supone Lenard debida al carácter material de ésta; del corrimiento de las rayas espectrales da una explicación análoga a la que dimos de

Bucherer; el experimento de Miller confirmaría la hipótesis de un éter local con densidad decreciente, cediendo de un modo continuo frente al superéter solar. No habla del corrimiento del perihelio de Mercurio ni de la estructura fina, la que a la postre podía explicarse por electromagnetismo.

Por lo dicho se ve que hay mucho artificio en las hipótesis de Lenard, pero armonizan todos los hechos que a la propagación de la luz se refiere; sobre todo en cuanto a la aberración, aventaja la teoría de la Relatividad en que da una explicación completa del fenómeno, y en cuanto a su valor filosófico, conserva las ideas de espacio y tiempo como fundamentalmente independientes. Sin embargo, una intuición unitaria del Universo está en pugna con esta serie de éteres superpuestos a la radiación y materia, ya conocidas. Toda modificación de las teorías de Lenard debe ser a base de conservar los elementos radiación y materia como los únicos constitutivos del Universo físico, de modo algo parecido a lo que hemos dicho nosotros más arriba.

