
INVESTIGACIONES QUIMICAS

F. OBERHAUSER B.

I. COMO NACIO Y COMO HA EVOLUCIONADO LA CONCEPCION DE NUCLEO ATOMICO Y ESTRUCTURA ATOMICA¹

RARAS veces una rama de la investigación ha crecido con tanta rapidez y ha entrado tan ampliamente en Biología, Medicina, Agricultura, Química y Economía Energética como la Física del átomo. Se ha desarrollado como una ciencia auxiliar y como un instrumento indispensable en varias disciplinas. Existe así, especialmente en nosotros, el deseo de orientarnos periódicamente sobre las nociones y leyes fundamentales y los progresos alcanzados en esta ciencia.

Hemos considerado por esto de interés referirnos ahora a este tema.

Fué Sir JOSEPH J. THOMSON, Director del famoso Laboratorio Cavendish en Cambridge, Inglaterra, uno de los primeros físicos que se planteó el problema de la estructura del átomo. Las investigaciones experimentales de THOMSON se referían a la ionización de los gases, es decir, a la producción de moléculas o átomos cargados eléctricamente, sobre la base de partículas neutras.

Las experiencias realizadas demostraron claramente lo que antes se había deducido de las leyes de la electrólisis, o sea, que átomos y moléculas neutras deben poseer en sí cargas eléctricas positivas y negativas en igual cantidad. El año 1895, THOMSON descubrió durante sus experimentaciones los electrones libres y encontró, al mismo tiempo que otros investigadores, que estas nuevas partículas —los electrones— en contraposición con los iones que antes se habían observado, tenían una masa miles y miles de veces inferior que los iones; este descubrimiento fué de extraordinaria importancia para el desarrollo futuro. No se encontraron electrones positivos. La carga

positiva estaba unida siempre a las masas de dimensiones atómicas y así se explicó pronto que las cargas negativas de los átomos deben constar de electrones, que ellos experimentalmente pudieron sacar de los átomos, mientras que el papel de las cargas positivas de los átomos quedó aún en la obscuridad.

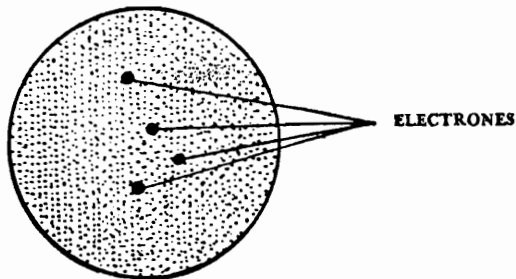
Sobre la base de estos conocimientos, el físico holandés H. A. LORENTZ, desarrolló su famosa teoría electrónica, que permitió explicar ampliamente no sólo las propiedades eléctricas, sino también ópticas de la materia con la hipótesis que en todos los átomos hay electrones como componentes unidos, más o menos, íntimamente con el resto de la materia. La teoría más importante que se tuvo que aceptar es la siguiente: los electrones en los átomos pueden moverse en ondas de determinada frecuencia. Con ayuda de éstas, LORENTZ explicó la emisión o la absorción de la luz por los átomos de la materia y, además, la magnitud del índice de refracción de materias transparentes y su dependencia de la frecuencia, es decir, la llamada dispersión. La coronación de la teoría de LORENTZ fué la interpretación cuantitativa, por lo menos del caso más simple del efecto "Zeeman" de la separación de las líneas espectrales ópticas mediante un campo magnético exterior. En esta forma demostraron también que son los electrones los que hacen estas ondas en el átomo. Lo que no era claro era la distribución de estos electrones y en qué relación se encontraban frente a la carga positiva del núcleo.

Este problema se planteó THOMSON. Supuso que los electrones deben ser capaces de hacer un movimiento vibratorio armónico. Para eso deben tener posiciones estables de equilibrio alrededor de las cuales ellos puedan moverse. Tales posiciones se consiguen cuando se supone que los electrones están en una nube en forma de

¹Conferencia dictada por el doctor F. Oberhauser B., al inaugurarse el año académico de 1957, en la Escuela de Química y Farmacia. Universidad de Chile.

esfera de cargas positivas, similar a las "pepas en una baya semejante a la sandía".

ESFERA ATOMICA POSITIVA
DE MAGNITUD DE 10^{-8} CMS.



MODELO ATOMICO DE THOMSON

Fig. 1

Esta era la idea de THOMSON, reconocida por los físicos contemporáneos de su época como modelo atómico de THOMSON (Fig. 1). Este modelo atómico era un modelo estático; sin duda fué necesario tomar en cuenta esta nube de cargas positivas, aun cuando no se comprendía su unión estática, pero aceptando esto podía existir la posibilidad de una ordenación de electrones en un equilibrio estable en el interior de la nube y la posibilidad de la formación de ondas alrededor de estas posiciones de equilibrio. La magnitud de la nube positiva que tenía que representar la parte esencial de la masa del átomo, debía —según THOMSON— corresponder a 10 milésimas de mm. de diámetro. Esta magnitud era ya más o menos conocida en este tiempo.

Esta magnitud exige que las esferas atómicas deban estar en la materia sólida apretadas unas contra otras, sin espacio intermedio. La compresibilidad extraordinariamente pequeña de la materia sólida muestra que estas esferas atómicas concebidas por THOMSON como nubes de cargas positivas se comportan casi como esferas rígidas, sin penetrarse mutuamente.

Sorprendente fueron los resultados que, a principios de este siglo, consiguió el físico alemán PHILIPP LENARD. Este investigador encontró que los rayos catódicos, es decir, electrones libres y muy rápidos, pueden pasar muy bien a través de capas delgadas de sustancia sólida, por ejemplo, a través de varios miles de capas atómicas.

Como se suponía que los átomos están uno al lado del otro, empaquetados, era imposible que los electrones pasaran por los espacios interatómicos. Los electrones que, sin cambios esenciales de dirección, llegan al otro lado de la hoja tenían que haber pasado los cuerpos de miles de átomos sin la más mínima desviación y sin ser retenidos.

Al suponer que los electrones chocan con los átomos como esferas rígidas, los electrones tenían que describir un camino complejo en forma de zig-zag y tenían que salir desparramados en cualquier dirección. El haz electrónico tenía que estar repartido en igual forma en todas direcciones, tal como ocurre con un rayo de luz que llega a un vidrio opaco (Fig. 2). Lo que

DISPERSION UNIFORME

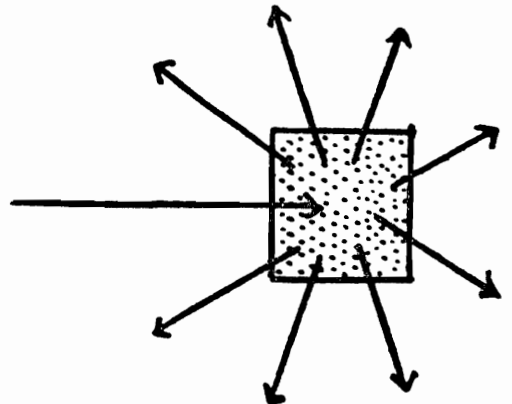


Fig. 2

LENARD observó, sin embargo, fué sólo una desviación insignificante en un campo de ángulo estrecho (Fig. 3). LENARD conside-

PEQUEÑAS DESVIACIONES
EN ANGULOS ESTRECHOS

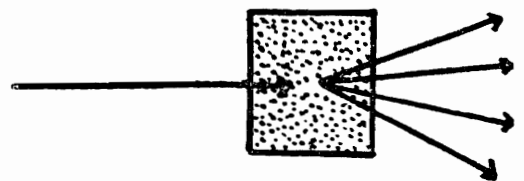


Fig. 3

ró este resultado tan extraordinario, que lo estableció como fundamento de otro concepto de la estructura del átomo. El supuso, que la mayor parte del volumen ató-

mico es completamente penetrable (por lo menos para electrones rápidos) y supuso también que la sustancia misma del átomo se encuentra en campos de grandes fuerzas, muy estrechos, que él llamó *Dynamide*, donde los electrones pueden pasar perfectamente sin sufrir influencias; pero llegó sólo hasta aquí. No pudo llegar a consecuencias cuantitativas.

Mientras tanto, se observaban otros hechos muy curiosos. En el año 1896, BECQUEREL descubría la radiactividad y en 1898 el matrimonio CURIE, el radio. Entre las radiaciones de los preparados radiactivos llamaron poderosamente la atención los rayos alfa, partículas de gran masa. El físico que se preocupó de la naturaleza de las propiedades de los rayos alfa fué ERNEST RUTHERFORD, entonces en Montreal, Canadá. El había sido antes discípulo durante tres años de J. J. THOMSON en el Laboratorio de Cavendish, en Inglaterra, y estaba en la idea de THOMSON. El sospechó ya —lo que se demostró en 1908— que los rayos alfa no son otra cosa que iones de helio, es decir, átomos de helio con doble carga positiva. RUTHERFORD y otros físicos encontraron sorprendente que también estas partículas alfa, que son unas 7.000 veces más pesadas que los electrones de LENARD, pudieran atravesar libremente hojas delgadas de metales; por lo menos, la mayor parte pasó sin un cambio apreciable de dirección. Sin embargo, algunas partículas sufrían una desviación brusca y, a veces, se reflejaban hacia atrás. Si antes fué posible aceptar esta penetración de los electrones a través de la esfera atómica, ahora ya no podría aceptarse lo mismo con los rayos alfa.

Así llegó RUTHERFORD en 1911, y ahora en Manchester, a la concepción que la masa del átomo y su carga positiva, que sin duda estaban en contacto estrecho, no podían ocupar una esfera atómica de algunas 10 millonésimas de mm. de diámetro, sino que estarían concentradas en una fracción diminuta de este volumen. La masa de carga positiva tiene que estar situada como en un punto en el centro del átomo, tiene que formar el núcleo del átomo y los electrones no pueden estar en el interior como en el modelo de THOMSON, sino que tienen que estar alrededor del núcleo. El tamaño del átomo total queda determinado por la extensión de la capa electrónica. Este es el modelo del átomo de RUTHERFORD y el nacimiento de la idea de núcleo atómico con la carga positiva, que representa casi la masa total del átomo, pero, en comparación con

el átomo total ocupa un espacio extraordinariamente pequeño en cada átomo.

Así se pudo explicar la capacidad de penetración de las partículas alfa a través de sustancias sólidas. La partícula alfa es un átomo de helio con doble carga positiva. El átomo de helio contiene normalmente 2 electrones y el ion positivo carece de ambos. La partícula alfa no es, por lo tanto, un átomo completo, sino que está constituida solamente de núcleo atómico y, a pesar de su masa mucho mayor, es tan diminuta como el electrón. Puede, entonces, atravesar el espacio casi vacío que forman los átomos de materia sólida. Tampoco los electrones planetarios pueden molestarla; ellos son demasiado livianos para desviarla en forma apreciable. Sólo en el caso que se acerque demasiado al núcleo de un átomo —y eso ocurre muy raras veces— se desvía en un ángulo grande (Fig. 4).

DESVIACION DE PARTICULAS ALFA AL ATRAVESAR UN ATOMO, SEGUN EL MODELO DE RUTHERFORD

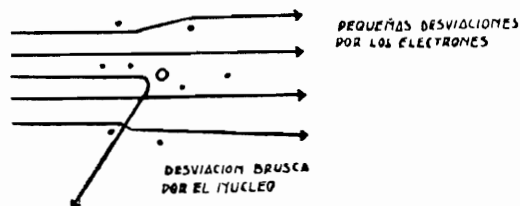


Fig. 4

Pero todo eso debía colocarse sobre una base cuantitativa. RUTHERFORD calculaba y calculaba obsesionado de su idea. Ya antes encargó a sus dos ayudantes GEIGER (que más tarde construyó el contador y que antes fué docente en las Universidades alemanas de Kiel, Tübingen y Berlín), y a MARSDEN, experimentos para averiguar la distribución de los ángulos de la partícula alfa al atravesar la hoja metálica.

El 9 de febrero de 1911, RUTHERFORD comunicó primeramente al físico W. H. BRAGG el resultado de sus cálculos de la distribución de los ángulos que forman las partículas alfa, tomando en cuenta la fuerza de repulsión eléctrica de los núcleos. Las experiencias confirmaron cálculos y predicciones.

La Fig. 5 representa en escala logarítmica el número relativo de las partículas alfa con los diferentes ángulos de desviación, según la fórmula de distribución de RUTHERFORD. El aspecto de la curva en O, es

DISTRIBUCION DE LOS ANGULOS RELATIVOS DE LAS PARTICULAS ALFA DESPARRAMADAS SEGUN FORMULA DE RUTHERFORD

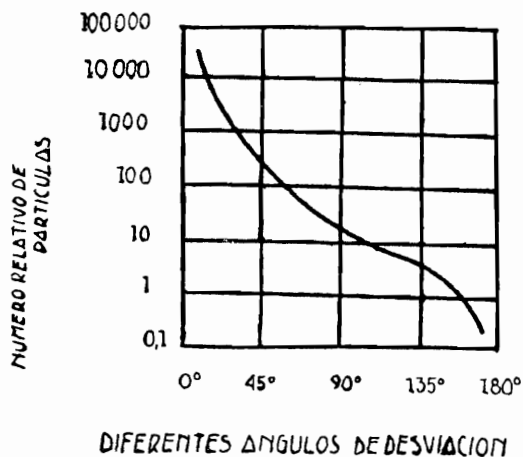


Fig. 5

decir, en el punto correspondiente al número relativo de las partículas no desviadas, no se explica, porque este número depende de factores especiales (tales como forma y grosor de la hoja). Al aceptar el número relativo de las partículas en un ángulo de 10° con 10.000 partículas que atraviesan, éste disminuye para 45° a solamente 110, para 90° a 13 y para 135° a sólo 3 partículas.

Las experiencias de GEIGER y MARSDEN dieron la confirmación cuantitativa completa de la teoría de RUTHERFORD sobre el núcleo atómico.

El concepto de E. RUTHERFORD del año 1911, naturalmente no expresa las propiedades particulares del núcleo atómico, solamente se refiere a su masa y carga. Todavía no considera la estructura de los núcleos atómicos con respecto a protones y neutrones, a la transmutación debida a inestabilidad interior (radiactividad) o a influencias exteriores; tampoco considera las cantidades enormes de energía que se ponen en libertad en tales transmutaciones. Todo eso quedó para el estudio ulterior que cada vez progresó más y más rápidamente. A pesar de eso, el descubrimiento de RUTHERFORD en el año 1911 es el nacimiento de la Física Nuclear propiamente tal, que creció tan inmensamente durante los últimos decenios.

El físico danés NIELS BOHR formuló en 1913 la hipótesis de que los electrones gi-

ran alrededor del núcleo en órbitas concéntricas, cuyos radios son fijos y sólo pueden tener valores determinados, invariables. El electrón gira a enormes velocidades. Como no se puede saber con precisión la posición del electrón en cualquier instante dado, las órbitas se consideran como niveles de energía.

A. SOMMERFELD modificó la teoría de BOHR al suponer que algunos electrones se mueven en ondas elípticas.

El átomo de BOHR servía bien para explicar muchas de las propiedades químicas de los átomos, pero no servía para entender la Física del átomo. El nacimiento de una nueva Física Cuántica vino en auxilio y los físicos alemanes HEISENBERG en un aspecto y SCHRÖDINGER en la mecánica ondulatoria desarrollada sobre la base de las ideas de LOUIS DE BROGLIE, GAMOV y DIRAC intentaron resolver de una manera general los problemas que se presentan en la constitución del átomo y de la materia.

Actualmente se explica la estructura del átomo sobre la base del modelo de BOHR, modificando el concepto de radio fijo de BOHR por las infinitas posibilidades de camino que tiene el electrón dentro de un campo determinado. Establecieron la ecuación de onda aplicable a cualquier partícula en movimiento.

Problema de la energía nuclear. Todos los experimentos llevaron a la conclusión que el núcleo es el responsable de los fenómenos radiactivos y la sede de la entonces misteriosa *energía atómica*.

El proceso fundamental de la Química reside en las capas electrónicas que producen la emisión y absorción de la luz, los rayos Roentgen, y la asociación de átomos para formar moléculas.

El año 1919, RUTHERFORD descubrió la transmutación artificial del átomo al bombardear núcleos de N mediante rayos alfa y consiguió así la síntesis de núcleos de O^{17} , un gemelo del O^{16} , acompañada de emisión de protones.

Con respecto a la energía nuclear, PIERRE CURIE y LABORDE determinaron como promedio en el año 1903 la energía calorífica del Ra, y RUTHERFORD calculó que 1 Kg. de la emanación de Ra sólo vive 100 horas, emitiendo una energía total de 1 millón de KWH.; hoy día se sabe que 1 Kg. de U produce 25 millones de KWH., es decir, millones de veces más energía que cualquiera reacción química. Solamente en un aspecto se equivocó RUTHERFORD. El

consideró el aprovechamiento de la energía nuclear como una utopía hasta el último momento de su vida —1937—, mientras que su discípulo OTTO HAHN ya estaba ocupado en Berlín en el problema de libentar artificialmente la energía atómica.

El año 1932 es el *annus mirabilis* de la Física Nuclear. Hasta aquella fecha, las partículas de mayor energía disponibles eran las partículas alfa de sólo 9 millones de eV, que no podían atravesar la barrera del potencial de los núcleos de los átomos pesados; había además pocos preparados radiactivos disponibles. Se buscaron proyectiles atómicos más ricos en energía. LAWRENCE inventó el ciclotrón, que se perfeccionó con el sincro-ciclotrón y protón-sincrotón, alcanzando en 1932 unos 5 MeV, en 1938 se llegó a 32 MeV, después de la segunda guerra mundial a 400 MeV, en 1953 en el cosmotrón a 3.000 MeV, en 1954 con el bevatrón a 6.000 MeV; el fasotrón ruso pretende obtener 10.000 MeV y el dispositivo acelerador de protones que se construye actualmente en Ginebra debe alcanzar 25.000 MeV.

UREY descubrió el agua pesada, empleada ahora como substancia auxiliar en la producción de la energía atómica. En febrero de 1932, CHADWICK anunció el descubrimiento del neutrón, un descubrimiento de inimaginables proyecciones. Este hallazgo favoreció el desarrollo futuro en tres direcciones: ante todo como proyectil muy eficaz para las diversas transmutaciones nucleares, alcanzando los núcleos más pesados; en seguida, especialmente como proyectil para efectuar la fisión del U y provocar así la reacción en cadena, condición indispensable para la libertad práctica de energía atómica, y, por último, como componente de los núcleos atómicos desde el deuterón hasta el núcleo de U, formando así la base de la futura teoría nuclear.

En otoño del mismo año, ANDERSON descubrió en la ultrarradiación cósmica una nueva partícula elemental: el positrón, anticuerpo positivo del electrón ordinario de carga positiva, que pronto se produjo en el laboratorio mediante rayos gamma duros, formando siempre un par electrónico: un electrón y un positrón. Llegó la época de la radiactividad artificial con el matrimonio JOLIO-CURIE, que a fines de 1933 obtuvo 3 isótopos radiactivos artificiales: un fósforo radiactivo, un nitrógeno radiactivo y un silicio radiactivo. Veinte años más tarde, el número de los

núcleos atómicos radiactivos alcanza ya a mil.

Los métodos de reconocimiento de las partículas se perfeccionaron: contador de Geiger y cámara de Wilson son instrumentos habituales para identificar individualmente las partículas. Por otra parte, se destacaron métodos microquímicos basados en el progreso de la radiactividad artificial.

Particularmente sobresalió en este aspecto el Instituto Kaiser-Wilhelm para Química en Berlín, bajo la dirección de OTTO HAHN y LISE MEITNER, quienes aplicaron nuevos métodos de la "Química de lo Imponderable". Mientras tanto ENRICO FERMI en Roma aprovechó las noticias llegadas de París sobre la radiactividad artificial. Bombardeó incansablemente y con éxito todos los elementos conocidos empleando neutrones como proyectiles e informó el mismo año sobre 23 elementos transmutados, más tarde describió 47 de 68 elementos estudiados. Descubrió el efecto especial de los neutrones lentos; pero lo sensacional estuvo en otro descubrimiento. Mediante el bombardeo de los núcleos pesados Th y U obtuvo isótopos nuevos, radiactivos, que no correspondieron a los elementos cercanos. El sospechó haber obtenido transuranios, es decir, isótopos de elementos que estaban más allá del elemento N^o 92 —uranio. Aquí se equivocó; no adivinó que los elementos formados no eran transuranios, sino que se había producido otro proceso que conmovió a todo el mundo científico y que posteriormente realizara e interpretara por primera vez OTTO HAHN.

HAHN, MEITNER y STRASSMANN repitieron los bombardeos con neutrones que FERMI había dejado a un lado. Había contradicciones e incongruencias entre los resultados de sus experiencias y aquellos de JOLIO en París y de FERMI en Roma. Después de tres años de trabajos incansables, encontraron que en este bombardeo de U con neutrones no se formaban transuranios ni radio; sus estudios analíticos confirmaron cada vez más el elemento bario. Este fué el hecho que trajo las consecuencias más espectaculares, porque un núcleo de bario con un peso atómico más o menos igual a la mitad del U, sólo podría formarse por una descomposición completa por fisión nuclear del uranio y no por una de las transmutaciones ordinarias realizadas hasta entonces. HAHN y STRASSMANN publicaron el 22 de diciembre de 1938 con sumo cuidado sus observaciones: "Llegamos a la

conclusión que nuestros isótopos de Ra tienen las propiedades del Ba, como químicos tenemos que confesar que no se trata de Ra, sino de Ba; otros elementos no se pueden aceptar. Pero como químicos nucleares no nos atrevemos todavía a hacer un salto tan extraordinario en Física Nuclear". Más tarde se publicó la verdad: se ha formado realmente Ba y eso significa que el núcleo de U ha sufrido la fisión, durante la cual se forman neutrones nuevos. Esa fué una reacción en cadena capaz de suministrar los proyectiles necesarios para conseguir la transmutación del núcleo y obtener así la liberación práctica de energía nuclear.

Lo trágico fué que este acontecimiento, este avance en una región completamente nueva y sorprendente, cayó en los meses críticos del año 1939 al principio de la segunda guerra mundial y se forjó inmediatamente un arma gigante para la destrucción: la bomba atómica.

Empieza rápidamente la carrera de la energía atómica. Se construye ante todo un reactor atómico. En marzo de 1942 los físicos alemanes en Leipzig hicieron el primer ensayo en grande con 740 Kg. de U metálico y 220 litros de agua pesada como moderador y alcanzaron un factor de reproducción de alrededor de 1,1. Pero los físicos norteamericanos consiguieron extraer U 235, que se encuentra en el uranio ordinario en una cantidad de sólo 0,7%. En 1940, Mc Millan y Seaborg descubrieron un verdadero transurano: el plutonio. Son estas dos substancias las que hacen posible la reacción en cadena. Ya en el mes de julio de 1942 Fermi obtuvo en Chicago con una pila de U y empleando grafito como moderador un factor de multiplicación igual a 1. ¿Qué es el factor de multiplicación?

Se llama factor de multiplicación $-K-$ la relación entre el número de neutrones secundarios y el de los neutrones primarios. Se llaman neutrones primarios los neutrones que en un momento dado existen en un sistema; un cierto número de esos neutrones provocará fisiones que darán nacimiento a nuevos neutrones; designamos a éstos, que han reemplazado a los neutrones primarios, con el nombre de neutrones secundarios.

Si, por ejemplo, 100 neutrones primarios son reemplazados por 105 neutrones secundarios, la relación K es igual a 1,05. El factor de multiplicación debe ser igual a

la unidad para que se establezca una reacción en cadena en un reactor.

Fermi construyó más tarde un reactor de 6 toneladas de U con 40 toneladas de óxido de uranio y casi 400 toneladas de grafito y el 2 de diciembre del mismo año consiguió el "estado crítico" del reactor y por primera vez se produjo energía en forma continua. Se entiende por *estado crítico* del reactor aquel estado en que la puesta en marcha ocurre espontáneamente, sin necesidad de desencadenar la reacción mediante el envío de neutrones. Hay para esto bastante neutrones errantes, que provienen sea de la desintegración espontánea del uranio, sea de los productos originados por acción de los rayos alfa del uranio sobre impurezas, o de origen cósmico.

En 1952 funcionaban, en la planta de Hanford en EE. UU., 3 reactores gigantes con un total de 1 millón de kilowatt que diariamente produjeron más o menos 1 Kg. de plutonio para la explosión de una bomba atómica en Alamogordo el 16 de julio de 1945, bajo la dirección de Robert Oppenheimer, y sobre Hiroshima y Nagasaki en agosto de 1945. En agosto de 1949 explotó la primera bomba atómica rusa. En mayo del año 1951, bajo la dirección del físico norteamericano Teller, se produjo en la isla Eniwetok la detonación de la primera bomba de hidrógeno, una reacción termonuclear, es decir, liberación de energía por fusión de los núcleos atómicos más livianos, que es además la fuente de energía del sol, de las estrellas fijas y así también de la energía del carbón y de las fuerzas hidráulicas, en contraposición con la fisión de los núcleos atómicos más pesados que forman la base de los reactores nucleares y de la primera bomba atómica. Fuera del desarrollo de bombas atómicas y de reactores, la industria se dedica actualmente a la producción de isótopos radiactivos. Se abren así dos caminos posibles: la amenaza de la autodestrucción de la humanidad y la esperanza de un paraíso en la tierra.

La Física Nuclear no sólo ha aclarado la existencia de los átomos y su estructura, no sólo ha descubierto muchos isótopos y partículas elementales en la primera mitad de este siglo, sino ha encontrado nuevos caminos para la producción industrial de energía.

La posibilidad de acelerar muchas de estas partículas fundamentales en campos eléctricos, es decir, agregando energía cinética, al final con elegantes ciclotrones,

ha contribuído esencialmente a nuevas aplicaciones en Química, Medicina y Biología. Actualmente la discusión de reacciones atómicas y de la existencia de micropartículas da ideas nuevas también a la Filosofía futura, la cual por su parte hace dos y medio milenios empezó con las primeras especulaciones que fueron la génesis del concepto átomo.

¿Qué son las partículas elementales de la materia o campos corpúsculo-ondulares fundamentales?

El concepto de partícula elemental ha experimentado variaciones. En la atomística de tiempos antiguos, inclusive Dalton, fué el átomo la partícula elemental, concebida como corpúsculo indivisible e idéntico uno a otro dentro de un mismo elemento. Hoy día, a la luz de la Física Moderna, esta idea de indivisibilidad no corresponde ya al átomo sino a otra especie de partícula elemental. Lo que actualmente llamamos átomo es una materia sumamente compleja y divisible en partículas elementales. Estas no se pueden dividir, son simples; sin embargo, esto no quiere decir que no sean transmutables, muchas se transmutan espontáneamente según una ley de tiempo bien característica. Se transforman en varias otras partículas, pero no podemos decir qué tenían en sí dichas partículas antes de la desintegración. La partícula elemental es aislada, estable, pero junto con otros tipos de partículas sufre transmutación. No se conoce ninguna partícula elemental que no sea susceptible de transmutarse.

Esta capacidad de transmutación de las partículas elementales es uno de los fundamentos más profundos de la naturaleza en conjunto y constituye la diferencia esencial entre nuestra atomística moderna y la atomística antigua.

Propiedades. Las más importantes son: a) carga eléctrica, y b) masa en reposo. a) *Carga.* De cada partícula elemental hay tres variedades: positivas, negativas y neutras. Toda partícula elemental con carga posee la misma carga eléctrica: $e = 4,083 \cdot 10^{-10}$ unidades electrostáticas C. G. S.

$= 1,602 \cdot 10^{-19} \left(= \frac{96494}{N} \right)$ Coulomb. Para formarnos una idea de esto, pensemos que en el caso de una corriente de 1 Ampère, fluyen en cada segundo 6,24 trillones de tales cargas elementales a través del conductor. Si estas cargas se ponen en serie una tras otra a una distancia de 1 mm, se

forma una cadena que hace 20.000 veces el viaje de ida y vuelta de la tierra al sol.

Se ha encontrado que sólo la masa en reposo tiene una característica dimensional para las partículas elementales. Según la Teoría de la Relatividad, aumenta la masa cuando aumenta la velocidad, haciéndose tanto más grande cuanto mayor sea la velocidad. Si ésta aumenta hasta asemejarse a la velocidad de la luz (300.000 km/seg), el factor de acrecentamiento sobrepasa todos los límites. De ahí que ninguna partícula elemental ni cuerpo material alguno puedan jamás sobrepasar la velocidad de la luz y sólo partículas elementales con una masa en reposo de la magnitud cero pueden y deben moverse con la velocidad de la luz. Todas las demás partículas están incapacitadas de igualar esta velocidad límite y sólo pueden aproximarse, llegando a veces a diferenciarse sólo en una pequeñísima fracción. En cambio, la energía cinética de la partícula elemental no tiene límite. La carga de la partícula elemental sólo puede tener valores $+e$ o $-e$ o 0 . La masa en reposo de las diversas partículas elementales es muy diferente: siendo 0 en el caso del fotón y neutrino, va en aumento con el electrón y positrón, a los que siguen los mesones, mesones pesados, protones y neutrones hasta los hiperones. Como unidad de referencia sirve generalmente la masa en reposo del electrón $M_0 = 9,108 \cdot 10^{-28}$ g. Para formarnos una idea tenemos que pensar que en 1 g hay mil cien cuatrillones de electrones que, puestos en serie a una distancia de 1 mm, forman una cadena que hace 3,7 billones de veces un viaje de ida y vuelta de la tierra al sol, o es capaz de alcanzar hasta una nebulosa espiral a una distancia de 100 millones de años de luz. Los antes mencionados 6,24 trillones de electrones que son transportados por 1 Ampère en un segundo, pesan solamente unas 5 millonésimas de mg; por eso debe aplicarse una corriente de 100 Ampère, durante 3 semanas hasta que 1 g de electrones haya pasado por una sección del conductor.

Fuera de masa y carga, las partículas elementales tienen otras propiedades exactamente determinadas:

a) El spin, que es un momento mecánico de impulso, y

b) un momento magnético.

El spin desempeña un papel extraordinario en la formación y estructuración del núcleo atómico. Corresponde a cero o a la

mitad o a un múltiplo entero de la unidad fundamental $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-27}$ erg/seg (ésta es la 2 pi avá parte del cuántum energético de Planck h). Generalmente se habla de "spin $\frac{1}{2}$ ", "spin 1", etc. Los momentos magnéticos de las partículas elementales son en parte cero y en parte de muy diferentes valores, que no es posible representar como múltiplos enteros de una unidad.

Finalmente, las partículas elementales tienen también otras importantes propiedades, especialmente en el caso de partículas inestables, p. ej.: el tiempo de semi-desintegración. Pertenecen a las partículas elementales las leyes del efecto de la acción recíproca entre las partículas.

¿Cuáles son las partículas fundamentales? Existen tres tipos de partículas fundamentales: a) leptones, b) nucleones, y c) mesones. Cada uno de estos tipos presenta tres subtipos: partículas positivas, negativas y neutras, de masa intermedia entre protón y electrón.

Los leptones son las partículas más livianas, en forma absoluta pesan apenas 10^{-28} g, es decir, una cifra 0,000 1 en total 28 ceros o, en otras palabras, unas cien mil billonésima de billonésima de gramo. El leptón negativo es nuestro conocido electrón y el leptón positivo es el positrón. El leptón neutro es el recién descubierto neutrino. El electrón es estable, a pesar de considerársele como nube; el positrón vive libre apenas 10^{-9} seg, o sea, una mil millonésima de segundo. El electrón es la más vulgar de las partículas fundamentales, pero vive en el campo electromagnético. Le es imposible penetrar en la intimidad del núcleo y vivir allá solo, aislado, vive solamente en asociación. Pese a que es la más chica y la más liviana de las partículas fundamentales, tiene una longitud de onda muy grande, del orden de los 10^{-11} cm (Fig. 6), cuando se acelera hasta la velocidad de la luz. El campo nuclear es del tamaño de 10^{-13} cm, distancia denominada unidad Fermi, o sea, diez billonésimas de cm. El tamaño del núcleo oscila entre 1 y 9 Fermi y a él sólo pueden llegar o en él pueden vivir las partículas fundamentales más pesadas, los nucleones.

El nucleón positivo o protón, que es al mismo tiempo el núcleo del elemento hidrógeno y cuya masa es 1836 veces la masa de un electrón, y el nucleón neutro, el famoso *neutrón* que posee una masa 1838 veces la masa del electrón, son los constituyentes normales del núcleo. Han podido

llegar a vivir en su seno porque al ser acelerados, disminuyen su longitud de onda y descienden al nivel nuclear, alcanzando el rango de los 10^{-13} cm. El tercer nucleón —el negativo— fué descubierto sólo en 1955 y es el *antiprotón*; esta partícula no puede vivir normalmente en el núcleo, porque su

ARBOL GENEALOGICO DE LA MATERIA

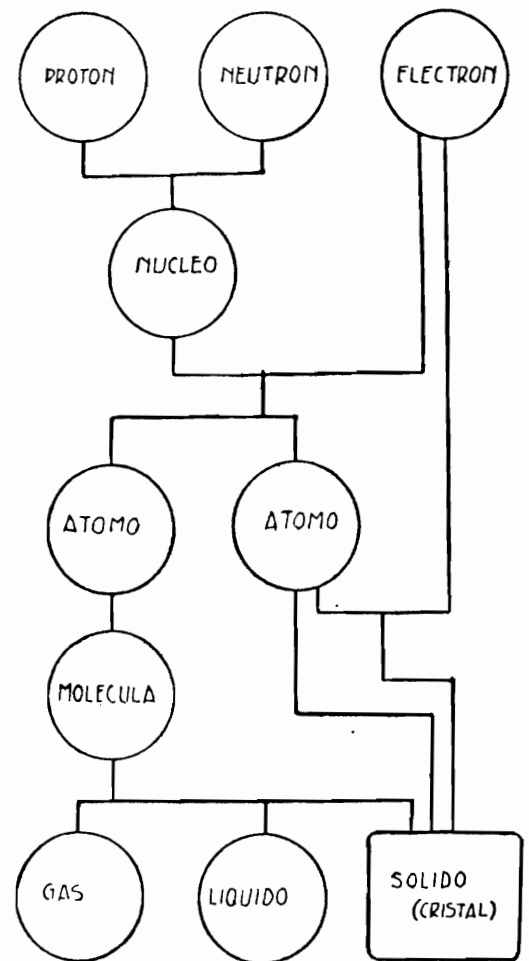


Fig. 6

función es destruir el protón, es decir, la materia. Ha sido creada artificialmente con los sincrotrones de protones de la Universidad de California y vive apenas unas cien millonésimas de seg, desintegrándose y poniendo en libertad enormes cantidades de energía.

Finalmente, tenemos el tercer tipo de partículas fundamentales: los mesones de masa intermedia entre electrón y protón. Sus masas van de los 207 del μ - mesón a los 1000 del τ - mesón, aunque existen mesones más pesados aún que los nucleones. Los hiperones son partículas de masa 2000 veces superior a la del electrón. Los hiperones y los nucleones constituyen una clase de partículas a las que se da el nombre de *baritrones*. Todas estas partículas son inestables y viven apenas billonésimas de segundo. Sus funciones están destinadas al transporte de la energía entre los nucleones en el interior del núcleo.

Todas estas partículas son interdependientes, se transforman entre sí. El protón se puede transformar en neutrón, éste a su vez puede transformarse en protones, neutrones y neutrinos. El antiprotón se desintegra al terminar su vida en un gran número de mesones. En suma, todas las partículas manifiestan interdependencia, la masa se transforma en energía y ésta a su vez se puede reconstituir en materia o en partículas fundamentales.

¿Cuántas diferentes partículas elementales existen? Hasta la fecha se conocen unas dos docenas de partículas elementales (Véase tabla).

TABLA DE PARTICULAS ELEMENTALES

Grupo de partículas	Partícula	Símbolo	Carga	Masa en reposo	Spin	Periodo de vida media
Partículas sin masa	Cuántum de luz	γ	0	0	1	estable
	Neutrino	ν	0	0	$\frac{1}{2}$	estable
	Antineutrino	$\bar{\nu}$	0	0	$\frac{1}{2}$	estable
Leptones	Positrón	e^+	+ e	m^0	$\frac{1}{2}$	estable
	Electrón	e resp. e^-	+ e	m^0	$\frac{1}{2}$	estable
Mesones livianos (L)		μ^\pm	$\pm e$	207 m_e	$\frac{1}{2}$	$2,15 \cdot 10^{-6}$ seg
		π^\pm	$\pm e$	273 m_e	0	$2,5 \cdot 10^{-8}$ seg
		π^0	0	264 m_e	0	10^{-14} seg
Mesones pesados (K)	$\tau^\pm, \kappa^\pm, \Theta^\pm, \Theta^0$		$\pm e$ 0 0	cerca de 965 m_e	0	10^{-10} - 10^{-9} seg
Nucleones	Protón	p	$\pm e$	1836,1 m_e	$\frac{1}{2}$	estable
	Neutrón	n	0	1838,6 m_e	$\frac{1}{2}$	19 min.
	Antineutrón	n'	0	1838,6 m_e	$\frac{1}{2}$	19 min.
	Antiprotón	p^-	- e	1836,1 m_e	$\frac{1}{2}$	estable
Hiperones	$\Lambda^0, \Sigma^\pm, \Xi^-$		$\pm e$ 0 0	2200 m_e hasta 2500 m_e	?	cerca de 10^{-10} seg

Genealogía de la materia. Del gran número de partículas fundamentales indicadas en la tabla, sólo 3 desempeñan un papel inmediato en la constitución de la materia: el protón, el neutrón y el electrón.

El protón es por sí solo el núcleo atómico del átomo más ligero, del átomo normal o liviano de hidrógeno. Todos los otros nú-

cleos atómicos se componen de protones y neutrones. Los núcleos atómicos positivamente cargados, junto con los electrones negativos de las capas forman los átomos. En el átomo normal eléctricamente neutro, la capa contiene tantos electrones como protones contiene el núcleo, y así la carga

CUADRO COMPARATIVO DE ALGUNOS RAYOS INDICANDO LONGITUD DE ONDA, FRECUENCIA Y ENERGIA DEL CUANTUM

	<i>Especie de radiación</i>	<i>longitud de onda</i>	<i>frecuencia en Hertz</i>	<i>energía del cuántum en eV</i>	
Ondas eléctricas		10.000 Km	$3 \cdot 10^1$	$12,4 \cdot 10^{-14}$	
		1.000 Km	$3 \cdot 10^2$	$\cdot 10^{-13}$	
		100 Km	$3 \cdot 10^3$	$\cdot 10^{-12}$	
		10 Km	$3 \cdot 10^4$	$\cdot 10^{-11}$	
	frecuencia baja	ondas largas	1 Km	$3 \cdot 10^5$	$\cdot 10^{-10}$
		ondas medias	100 m	$3 \cdot 10^6$	$\cdot 10^{-9}$
		ondas cortas	10 m	$3 \cdot 10^7$	$\cdot 10^{-8}$
	frecuencia alta	ultra-ondas	1 m	$3 \cdot 10^8$	$\cdot 10^{-7}$
			10 cm	$3 \cdot 10^9$	$\cdot 10^{-6}$
		micro-ondas	1 cm	$3 \cdot 10^{10}$	$\cdot 10^{-5}$
1 mm			$3 \cdot 10^{11}$	$\cdot 10^{-4}$	
100 micrones			$3 \cdot 10^{12}$	$\cdot 10^{-3}$	
Luz	luz infrarroja	10 micrones	$3 \cdot 10^{13}$	$\cdot 10^{-2}$	
		1 micrón	$3 \cdot 10^{14}$	$\cdot 10^{-1}$	
	luz visible	1000 Å	$3 \cdot 10^{15}$	$\cdot 10^0$	
	luz ultravioleta	100 Å	$3 \cdot 10^{16}$	$\cdot 10^1$	
Ultrarradiación rayos X y gamma	rayos Roentgen	10 Å	$3 \cdot 10^{17}$	$\cdot 10^2$	
		1 Å	$3 \cdot 10^{18}$	$\cdot 10^3$	
		0,1 Å	$3 \cdot 10^{19}$	$\cdot 10^4$	
	ultrarradiación				

externa se halla compensada. Si la capa contiene menos o más electrones que este número, entonces tenemos en lugar del átomo neutro un ion positivo o negativo, o mejor dicho un átomo-ion.

Átomos se juntan para formar moléculas. Al mismo tiempo las capas electrónicas constituyen una nube más o menos común, mientras que los núcleos tienen una ubicación geométrica determinada.

La materia misma se compone en su estado gaseoso directamente de tales moléculas, que ejercen solamente mínimas fuerzas entre sí.

En estado líquido, la estructura es semejante, solamente que las moléculas, que ya se han acercado más, ejercen una acción

recíproca. El estado sólido de la materia está casi siempre caracterizado por el hecho de que los componentes tienen una disposición espacial regular, una red cristalina. Podemos decir que la materia sólida es casi siempre cristalizada, por lo menos, en pequeña zona. Los componentes de la red cristalina, sin embargo, representan sólo en ciertos casos las moléculas, en otros casos representan simples átomos y muchas veces iones positivos y negativos. En los metales, el sitio de los iones negativos es ocupado por electrones que se mueven libremente dando así lugar a la conductibilidad eléctrica y a otros efectos especiales de los metales.

BIBLIOGRAFIA

- | | | |
|--|------------------|---|
| BLACKWOOD, Oswald H., "An Outline of Atomic Physics" (1955). | ROUSSEAU, Pierre | "Histoire de l'atome". |
| OSGOOD, Thomas H. & RUARK, Arthur E. | BRAUNBEK, W. | Atomkernenergie 1/88/1956; 1/324/1956; 2/67/1957. |
| BLATT, John M. & WEISSKOPF, Victor F. | BRAUNBEK, W. | Kosmos 52/581/1956. |
| BOUZAT, Albert | HANLE, W. | Atomkernenergie. 1/84/1956. |
| RUCHLIS, Hyman & LEMON, Harvey B. | | |

Conferencia Internacional de Ginebra de 1955, Documentos Oficiales sobre Aplicaciones Pacíficas de la Energía Nuclear.