

Química nuclear ⁽¹⁾

SEGUNDA PARTE ⁽²⁾

CAPITULO VIII

EL NÚCLEO

Generalidades.—Para la determinación de las dimensiones de los átomos, y la distancia a que ellos se encuentran en las moléculas, se hace uso de la difracción e interferencia que sufren los rayos X, al pasar a través de materia; hemos visto que estos rayos tienen una longitud de onda de 10^{-8} cms., y esta dimensión es comparable con las dos indicadas más arriba.

Cuando se trata de establecer las dimensiones de los núcleos de los elementos, los rayos X son de longitudes sumamente grande. Pero, cuando se emplean rayos alfa, emitidos por las sustancias radioactivas, estos son difractados por la materia, como si ésta estuviera concentrada en puntos con carga eléctrica positiva y ejerciera acción de repulsión sobre los rayos alfa de acuerdo con la ley de Coulomb; vimos que estas experiencias indujeron a Rutherford a establecer su modelo atómico. Conclusiones sobre las dimensiones del núcleo se establecieron, cuando se llegó al resultado de que los rayos alfa, que habían logrado penetrar al interior del átomo, hasta el núcleo, sufrían brusco cambio de dirección, que no era regido por la ley de Coulomb.

Después de haber comprobado la existencia del núcleo en los átomos, y de conocer los fenómenos de desintegración espontánea (radioactividad), se trató naturalmente de efectuar desintegraciones artificiales y de estudiar la constitución del núcleo.

En el año 1919, Rutherford demostró que era posible desintegrar artificialmente el núcleo de elementos ligeros, exponiéndolos a la acción o bombardeo de rayos alfa, y obtener la emisión de protones.

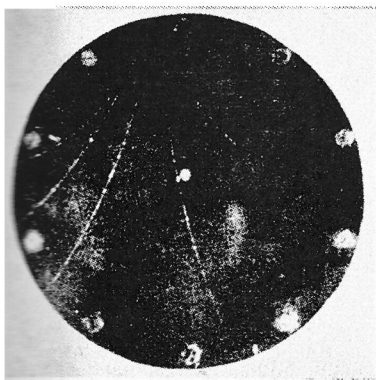
Las experiencias indicadas despertaron gran interés y varios investigadores continuaron esa clase de estudios.

Neutrón.—Bothe y Becker, en 1931, efectuaban experiencias bombardeando berilio con rayos alfa, y observaron que el berilio emitía al lado de los rayos gamma,

(1) Los artículos sobre Química nuclear del autor han sido recopilados en un folleto que se vende en el Instituto de Ingenieros.

(2) Véase ANALES de Julio de 1938 para la primera parte.

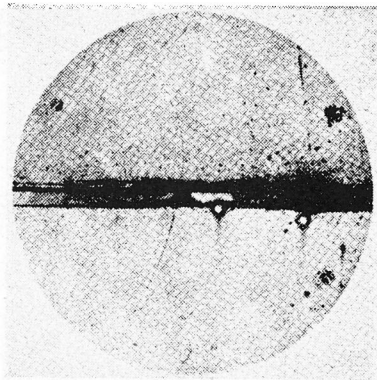
Lámina XII



Anderson

Los cósmicos desviados por un campo magnético: a la izquierda electrones, a la derecha positrones.

Lámina XIII



Anderson

El positrón, al atravesar una lámina de plomo, disminuye su velocidad y sufre mayor desviación.

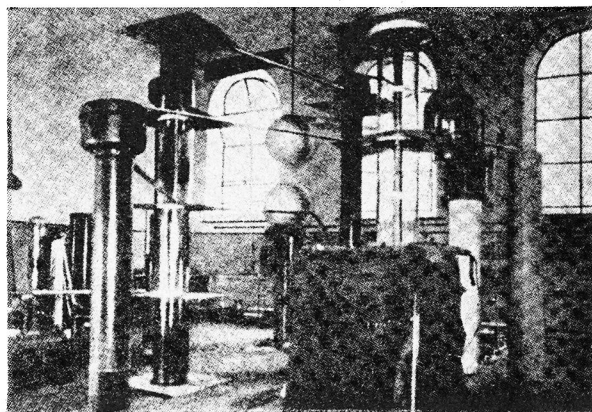
Lámina XIV



Joliot-Curie

Los rayos gamma, al actuar sobre el gas, originan un par positrón-electrón.

Lámina XVI



Instalación para acelerar partículas empleadas en las transmutaciones.

una radiación de mayor poder penetrante que los rayos gamma más penetrantes del radio.

Los esposos Joliot-Curie, efectuaron la misma experiencia, empleando una cámara de ionización, y observaron que al emplear como pantalla para la absorción de las partículas poco penetrantes, agua o parafina (substancia que contienen hidrógeno), aumentaba notablemente la corriente en la cámara. Llegaron a la conclusión que la radiación penetrante debía tener una energía inmensamente grande para poner en movimiento los protones de la parafina o agua, y producir el aumento de corriente en la cámara.

Chadwick descartó la idea que las radiaciones tan penetrantes observadas al bombardear el berilio con rayos alfa, fuesen de naturaleza electro-magnética, pues, a más de los resultados ya encontrados, observó que esas radiaciones eran capaces de comunicar gran velocidad a núcleos de mayor masa que el protón. Dedujo que eran radiaciones constituidas por partículas materiales, de masa casi igual a la del protón; no tenían carga eléctrica, por lo cual al corpúsculo se le llamó «neutrón».

No poseyendo el neutrón carga eléctrica, no sufrirá acción de repulsión al pasar cerca de un núcleo que es positivo, lo que acontece con los rayos alfa, y en consecuencia tendrá mayor poder penetrante que éstos; además, no produce ionización en su trayecto, en consecuencia, no podrá ser detectado mediante la cámara de Wilson, y será necesario usar otros procedimientos para ello, como veremos más adelante.

Positrón.—En el año 1932, el americano Anderson efectuaba estudios sobre los rayos cósmicos, que consisten de quantas o fotones de gran energía, y que vienen de los espacios, verticalmente a la tierra; se sabía que estos rayos, al chocar a gran velocidad con materia, originan electrones.

Empleando una cámara de Wilson y un campo magnético potente, encontró que a más de las trayectorias características de los electrones se observaban algunas cuya desviación era contraria a la de los electrones, lo que indicaba que tenían carga positiva (lámina 12); el largo del camino de la partícula después de atravesar una lámina de plomo colocada dentro de la cámara, era unas diez veces mayor que el que pudiera dar un protón; o sea que su masa era muy inferior a la del protón; además, después del paso a través de la lámina de plomo, la velocidad ha disminuído, y la partícula sufre mayor desviación (lámina 13), con lo que se prueba que se trata en realidad de una partícula positiva y no de un electrón que va en dirección invertida.

La partícula así encontrada, llamada electrón positivo o «positrón», tiene, pues, carga positiva, y una masa de magnitud semejante a la del electrón.

El positrón, a más de observarse en fenómenos debido a los rayos cósmicos, se encuentra en muchos casos. Interesante es su obtención por la materialización de la energía. Poseyendo el positrón y el electrón la misma masa, deben poseer energía semejantes; sus cargas pueden neutralizarse. Se ha observado que empleando rayos gamma de gran energía, actuando sobre el núcleo de elementos de peso atómico elevado, se emite un par positrón-electrón (lámina 14); inversamente, cuando un positrón se encuentra con un electrón (es absorbido por materia), se destruyen originándose energía radiante en forma de rayos gamma de dirección contraria.

El descubrimiento del positrón fué un triunfo para la física teórica, pues Dirac había indicado, por deducciones teóricas, su existencia antes de 1933.

Constitución del núcleo.—Vemos, pues, que ahora conocemos cuatro partículas diferentes: protón, electrón, positrón y neutrón; con el descubrimiento de estas dos últimas partículas, se tuvo antecedentes para construir un modelo de núcleo que era capaz de aclarar gran parte de los problemas que con él se relacionaban.

La teoría más aceptada sobre la constitución del núcleo es la propuesta por Heisemberg, quien supone que «el núcleo está formado por protones y neutrones». Teniendo sólo el protón carga eléctrica, la carga del núcleo se debe exclusivamente a él, mientras que su masa se debe a los protones y neutrones que en él se encuentran; el núcleo de helio, que tiene carga 2 y masa 4, tendrá, pues, 2 protones, los que aportan 2 unidades de carga y 2 de masa, y en consecuencia debe tener también 2 neutrones, para completar la masa de 4 unidades.

En general, si ponemos para el núcleo:

Z = número atómico (N.º de cargas positivas);

A = peso atómico;

entonces:

N.º de protones en el núcleo = Z

N.º de neutrones en el núcleo = $A - Z$

El núcleo más sencillo es el del hidrógeno, o sea el protón, que tiene carga unitaria y masa unitaria; para él tendremos:

N.º protones = $Z = 1$

N.º neutrones = $A - Z = 1 - 1 = 0$;

Le sigue el «deuteron»; este es el núcleo del deuterio, o hidrógeno pesado, de símbolo D , e isótopo del hidrógeno; el deuteron tiene carga 1 y masa 2, luego:

N.º protones = $Z = 1$

N.º neutrones = $A - Z = 2 - 1 = 1$

se compone, pues, de 1 protón y 1 neutrón.

El núcleo de tritium tiene carga 1 y masa 3; el tritium es isótopo del hidrógeno; para él:

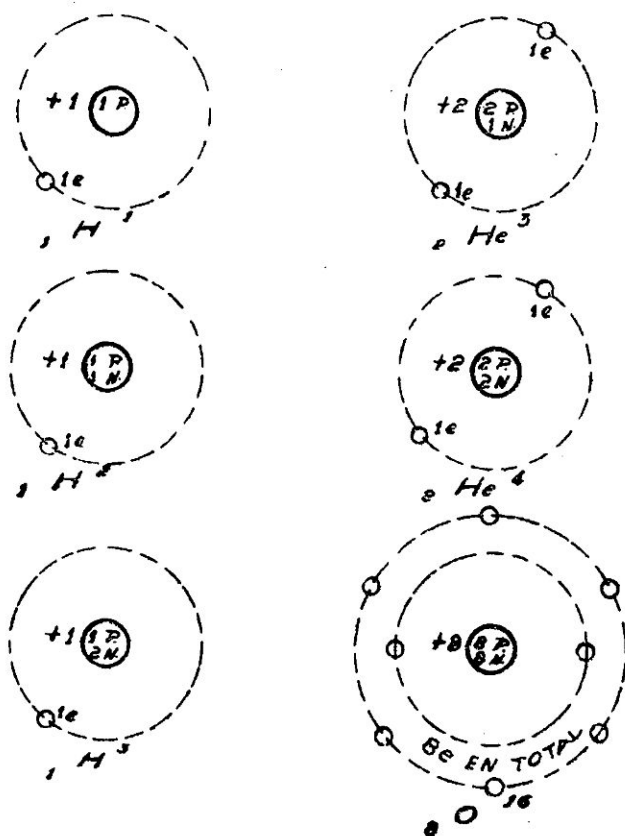
N.º protones = $Z = 1$

N.º neutrones = $A - Z = 3 - 1 = 2$

En la lámina 15, podemos ver la constitución de varios núcleos; en ella indicamos al núcleo por el símbolo del elemento a que pertenece, afectado de un índice a la izquierda arriba que indica el peso atómico redondeado a número entero (y en consecuencia la clase de isótopo que es), y de un índice a la izquierda abajo, que corresponde a la carga nuclear o número atómico.

Si efectuamos una representación gráfica de los núcleos existentes, llevando

Lámina XV



en un eje el número de protones, y en el otro el de electrones, obtendremos un trazo casi rectilíneo, a 45° del origen (fig. 15).

Energía del núcleo.—Estando el núcleo constituido por partículas neutras y partículas cargadas positivamente, estas últimas ejercen acciones de repulsión entre sí y la consecuencia debería ser que el núcleo se desintegrara.

El alemán Heisenberg y el italiano Majorana, aceptan que en el interior del núcleo existe una fuerza de interacción entre los protones y neutrones, y cuyo valor determina que el núcleo sea más o menos inestable; si esta fuerza es superior a la de repulsión electrostática de los protones, el núcleo es estable, si es menor el núcleo se desintegra.

Para efectuar la desintegración de un núcleo, o sea sacarle un protón o neutrón, debemos vencer a esa fuerza de inter-acción, siendo necesario gastar cierta energía; esa energía queda dada por «el defecto de masa» o «efecto de empaque» reducido a energía mediante la relación de Einstein, como veremos más adelante.

Teoría de Gamow.—Estando el núcleo cargado positivamente, una partícula alfa, también de carga positiva, al acercarse a él, sufre una acción de repulsión,

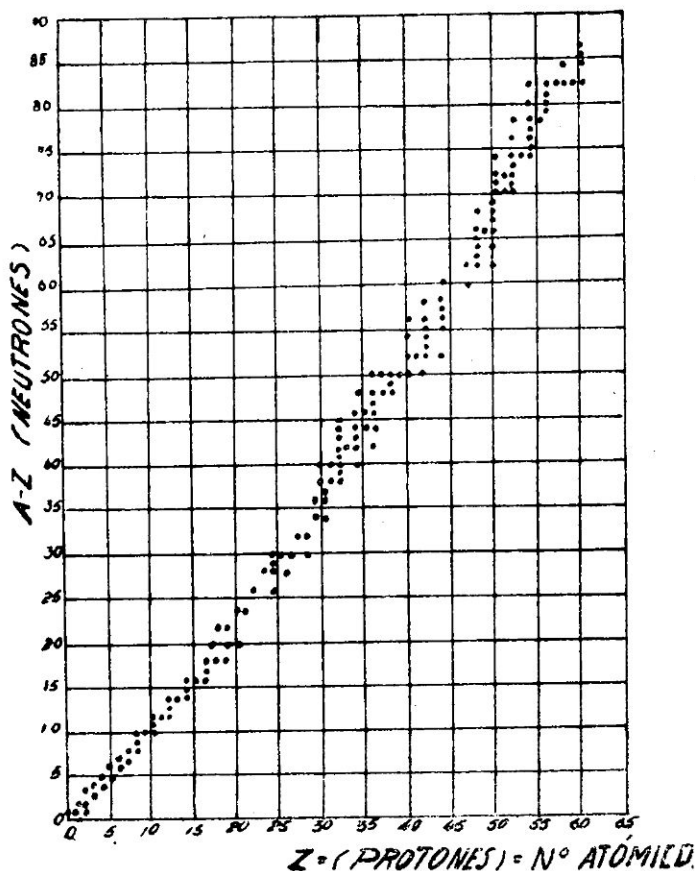


Fig. 15.—Representación del núcleo de los diferentes elementos, en función del N.º de protones y neutrones.

que es mayor mientras menor sea su distancia al núcleo; estas partículas podrían, pues, entrar al núcleo siempre que tuviesen una energía (o velocidad) suficiente para vencer esa fuerza de repulsión o «barrera de energía», como se la llama, y que para los elementos pesados alcanza a 20 millones de electrones-volts (forma de medir la energía, y que explicaremos más adelante).

Se ha observado, sin embargo, que hay casos en que bordeando núcleos con partículas alfa, estas entran al núcleo y originan la emisión de un protón, sin que tengan la energía necesaria para vencer la barrera de energía; se ha alcanzado cier-

tos estados en que la velocidad de las partículas alfa se aumenta, pero entre estos estados la desintegración es pequeñísima.

Este hecho lo explica el ruso Gamow, suponiendo que cuando la partícula alfa se encuentra al exterior del núcleo, sufre acción de repulsión de parte de éste, pero que cuando se encuentra dentro de él, sufre una acción de atracción. Representando gráficamente este hecho, colocando la distancia entre el centro del núcleo y la partícula alfa en un eje, y la fuerza que se ejerce entre ellos en el otro, vemos (fig. 16) que cuando la distancia se hace igual al radio del núcleo, la fuerza que era de repulsión o positiva, se transforma bruscamente en fuerza de atracción o negativa.

Se supone la existencia de «niveles de resonancia en el núcleo», y cuando la partícula alfa posee energía igual a uno de estos niveles, puede entrar en el núcleo;

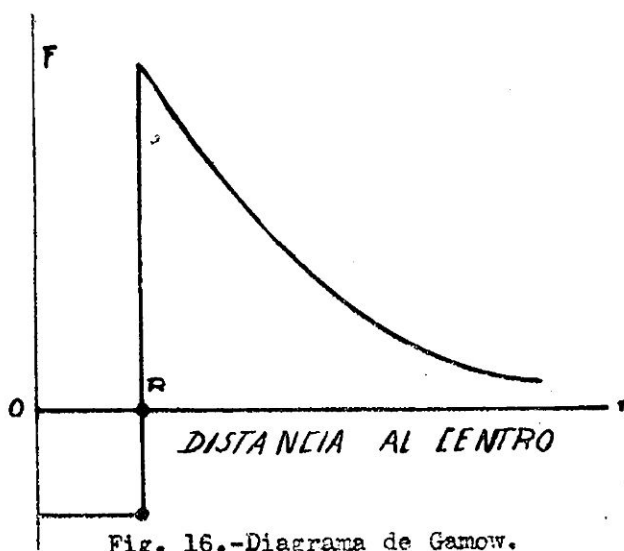


Fig. 16.-Diagrama de Gamow.

naturalmente que cuando ellas poseen energía superior a la correspondiente a la barrera de energía entonces pueden entrar todas al núcleo, y la desintegración aumenta con la velocidad.

Se ha encontrado p. ej., que con Mg se observa emisión continua de protones, si la energía de las partículas alfa empleadas para el bombardeo, es superior a $6.5 \cdot 10^6$ electrones-volts, valor que corresponde a la barrera de energía; para valores inferiores sólo se observa desintegración apreciable, si las energías corresponden a $6.3 \cdot 10^6$ o a $5.7 \cdot 10^6$ electrones-volts; el núcleo de Mg posee, pues, niveles de resonancia correspondiente a esos dos valores.

Inversamente, una partícula que se encuentra en el interior del núcleo puede salir de él, si posee energía suficiente para vencer la fuerza de atracción que obra sobre ella en ese interior; al alcanzar esa energía, será expulsada con una fuerza que disminuye a medida que se aleja del núcleo.

La teoría indicada explica, pues, la emisión de partículas alfa del núcleo. La diferencia enorme que se observa en la vida media de las sustancias radioactivas,

se debe a que las de menor vida emiten partículas alfa de mayor energía, y en consecuencia de mayor velocidad.

De acuerdo con la teoría de Gamow, la partícula alfa se encuentra en el núcleo en estado cuántico, tal como vimos para los electrones planetarios de un átomo; el pasaje de la partícula alfa, de un estado cuántico a otro produce la emisión de rayos gamma, tal como el pasaje del electrón de una órbita a otra producía emisión de radiaciones electro-magnéticas.

Neutrino.—Cuando un núcleo radioactivo se desintegra bajo emisión de rayos beta, la teoría de las quantas establece que la energía debe ser constante siempre que se cumpla la ley de la conservación de la energía; o sea, que teniendo el átomo primitivo y el originado energía determinada, la partícula emitida debe tener energía de un solo valor. Sin embargo, se observan energías de todos los valores posibles, hasta cierto valor máximo, alrededor de los electrones, y a esta continua distribución de energía se la llama «espectro de los rayos beta».

Pauli y después Fermi, para explicar esta dificultad, supone que la emisión de electrones está acompañada por la emisión de partículas de masa muy pequeña, tal vez menor que la del electrón, eléctricamente neutros, a la que llaman «neutrino».

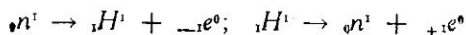
De acuerdo con esta teoría, la diferencia de energía entre el átomo original radioactivo y el originado, no la lleva sólo el electrón, sino que se dividirá entre el electrón y el neutrino en una proporción cualquiera; existirán, pues, electrones y neutrinos con cantidad variable de energía, siempre que para cada par electrón-neutrino, la energía total sea igual a la diferencia indicada; como el neutrino no se puede observar, aparecen sólo los electrones con energías de todos los valores posibles.

Debido a sus propiedades, será muy difícil observar experimentalmente al neutrino, si es que existe, y las experiencias hechas en este sentido han sido negativas.

Electrones emitidos por el núcleo.—Hemos visto que el núcleo está formado sólo de protones y neutrones; entonces, ¿cómo es posible que los núcleos radioactivos emitan electrones, o sea partículas que no tienen?

El italiano Fermi explica este hecho, suponiendo que el electrón se forma en el núcleo radioactivo en el momento de su emisión, tal como en el caso del átomo, cuando un electrón pasa de una órbita externa a otra interna emite un cuanto de luz que se crea en ese momento, pues no existía con anterioridad.

Según Fermi, en el núcleo, un protón puede transformarse en un neutrón y viceversa; ambos no serían más que dos estados cuánticos diversos de la partícula pesada. Al transformarse un neutrón (que no tiene carga eléctrica) en un protón (que tiene carga unitaria positiva) habría emisión de carga negativa (con lo cual el neutrón quedaría cargado positivamente o sea se tendría al protón), que se crearía en ese instante, en forma de un par electrón-neutrino. A la inversa, cuando un protón se transforma en un neutrón, habría emisión de electrones positivos o sea de positrones, lo que se observa también con algunas sustancias radioactivas artificiales, como veremos luego.



Anti-neutrino.—En la emisión de positrones por ciertos elementos inestables, se ha observado una distribución continua de energía, tal como en el caso del espectro de los rayos beta.

De Broglie supone la existencia de una partícula análoga al neutrino, que llama el «anti-neutrino».

Se supone que el anti-neutrino tiene para con el neutrino, la misma relación que el positrón para con el electrón, pero el significado físico de esta idea no es claro.

Así como hay emisión de energía en la destrucción de un positrón por un electrón, igualmente pueden desaparecer un neutrino y un anti-neutrino con emisión de uno o más cuantos de radiación.

Protón negativo.—Gamow ha llegado a la conclusión de que el «protón negativo» existe, pero que su relación para con el protón corriente, positivo, no es la misma que la del electrón para con el positrón, ya que ambos no pueden destruirse mutuamente.

Núcleo isómero.—La suposición de la existencia del protón negativo, permite la del «núcleo isómero», o sea de núcleos que tienen el mismo número atómico y la misma masa atómica; pero propiedades radioactivas diferentes.

Dos ejemplos de este hecho extraordinario parece se han establecido: a) el uranio Z y el uranio X_2 , provenientes ambos del uranio X_1 por un proceso de desintegración con emisión de rayos beta y b) el radio D , isótopo inactivo del plomo $210 Pb$, que se encuentra en el plomo ordinario en un 0,008%.

Si un par de neutrones ha sido reemplazado en un núcleo por un protón positivo y uno negativo, entonces la carga nuclear y la masa atómica quedarán las mismas, obteniéndose núcleos isómeros que tendrán diferente estabilidad, y en consecuencia diferentes propiedades radioactivas.

CAPITULO IX

QUÍMICA NUCLEAR

Generalidades.—Hemos visto hasta ahora que unos pocos elementos naturales se desintegran espontáneamente, dando origen a otros; es el caso de las transformaciones radioactivas, a las cuales podemos estudiar, pero no controlar; la temperatura, elevada o baja, la presión, etc. no tienen influencia sobre estos fenómenos. El hombre trató de producir artificialmente este fenómeno y estudiarlo de cerca.

Por otra parte, en la química corriente se llevan a cabo reacciones entre los átomos, o sea se efectúa intercambio entre los electrones periféricos. Se pensó si no sería posible llevar a cabo reacciones entre los núcleos de los átomos, llevando a tales núcleos tan cerca como fuere necesario.

Ambas cosas se han conseguido en la actualidad, y tenemos así la «Química nuclear» que podremos dividir en dos partes: la que se refiere a reacciones nucleares, en las cuales se obtienen núcleos estables, o sea la «transmutación artificial», y aquella en que se obtienen núcleos inestables, o sea la «radioactividad artificial».

Antes de entrar en el estudio de estas reacciones, tenemos que adelantar algunas ideas que usaremos continuamente.

Electrón-Volt.—Para el estudio de las reacciones nucleares, se ha introducido como medida de energía una nueva unidad, el *electrón-volt*, que corresponde a la energía que adquiere un electrón que se acelera bajo la diferencia de potencial de un volt. Esta unidad se le abrevia a *E. V.* y aun algunos la llaman sencillamente volt. Si se dice que una partícula tiene una energía de 10 millones *E. V.*, significa que posee la energía que tomaría un electrón al acelerarse en un campo eléctrico, cuya diferencia de potencial fuese 10 millones de volt.

Valiendo en el sistema *C. G. S.*, la masa de un electrón:

$$e = 4,77 \cdot 10^{-10} \text{ ergs};$$

y además:

$$1 \text{ volt} = \frac{1}{300} \text{ ergs.}$$

tenemos:

$$1 \text{ E.V.} = 4,77 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{1}{300} \text{ ergs.}$$

$$1 \text{ E.V.} = 1,59 \cdot 10^{-12} \text{ ergs.}$$

Ejemplo.—Supongamos que queremos calcular la energía del rayo alfa emitido por el *Ra c*, sabiendo que su velocidad es de $1,92 \cdot 10^9 \text{ cm/seg.}$

Sabemos que el rayo alfa es átomo de helio; siendo el peso atómico del helio aproximadamente 4, y existiendo $6,05 \cdot 10^{23}$ átomos por átomo-gramo, la masa de cada partícula será:

$$\frac{4}{6,05 \cdot 10^{23}}$$

su energía valdrá:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{6,05 \cdot 10^{23}} \cdot (1,92 \cdot 10^9)^2$$

$$= 12,3 \cdot 10^{-6} \text{ ergs.}$$

o sea:

$$= \frac{12,3 \cdot 10^{-6}}{1,59 \cdot 10^{-12}} \text{ E.V.}$$

$$= 7,7 \cdot 10^6 \text{ E.V.}$$

2) Calculemos ahora la energía que corresponde a la radiación gamma del torio c , sabiendo que su largo de onda es de $5,10^{-11}$ cm.

Sabemos que la energía ondulatoria obra como si ella estuviera formada por granos separados, llamados fotones, cada uno de los cuales posee una energía.

$$h \cdot \nu \text{ ergs.}$$

siendo:

$$h = \text{cte. de Planck} = 6,5 \cdot 10^{-27}$$

$$\nu = \text{frecuencia de la radiación.}$$

Pero:

$$\nu = \frac{c}{l}$$

en que:

$$c = \text{velocidad luz}$$

$$l = \text{largo onda de la radiación;}$$

luego la energía buscada valdrá:

$$\begin{aligned} & h \cdot \frac{c}{l} \text{ ergs.} \\ & = 6,5 \cdot 10^{-27} \cdot \frac{3 \cdot 10^{10}}{5 \cdot 10^{-11}} = 3,9 \cdot 10^{-6} \text{ ergs.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & = \frac{3,9 \cdot 10^{-6}}{1,59 \cdot 10^{-12}} \text{ E.V.} \\ & = 2,45 \cdot 10^6 \text{ E.V.} \end{aligned}$$

Equivalencia entre masa y energía.—En la actualidad se admite que la masa se puede transformar en energía, y viceversa. La relación entre ambas está dada por la igualdad de Einstein:

$$m = \frac{E}{c^2}$$

en que:

$$m = \text{masa;}$$

$$E = \text{energía equivalente a la masa } m;$$

$$c = \text{velocidad de la luz} = 3 \cdot 10^{10} \text{ c/seg.}$$

de aquí resulta:

$$1 \text{ gr} = 9 \cdot 10^{20} \text{ ergs.}$$

La escala de pesos atómicos está basada en el átomo de oxígeno, al cual se le asigna el valor 16, o sea se dice que corresponde a 16 unidades de masas; siendo la masa del átomo oxígeno igual a $2,64 \cdot 10^{-22}$ grs., resulta que:

$$1 \text{ unidad de masa} = \frac{2,64 \cdot 10^{-22}}{16} \text{ grs.}$$

En consecuencia, la energía que corresponde a 1 unidad de masa valdrá:

$$\begin{aligned} \text{energía 1 u. masa} &= m \cdot c^2 = \frac{2,64 \cdot 10^{-22}}{16} \cdot 9 \cdot 10^{20} \\ &= 1,49 \cdot 10^{-3} \text{ ergs.} \end{aligned}$$

y siendo:

$$1,59 \cdot 10^{-12} \text{ ergs} = 1 \text{ e V.}$$

resulta:

$$\begin{aligned} 1 \text{ u. masa} &= 1,49 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{1,59 \cdot 10^{-12}} \\ &= 931 \cdot 10^6 \text{ e. V.} \end{aligned}$$

o aproximadamente:

$$1 \text{ u. masa} \approx 1000 \cdot 10^6 \text{ e. V.}$$

Ejemplo.—1).—Calculemos las unidades de masa que corresponde a una radiación cuya energía sea 10^6 e V.

Tenemos:

$$\begin{aligned} E &= 10^6 \text{ e. V.} \\ &= 10^6 \cdot 1,59 \cdot 10^{-12} \text{ ergs.} \end{aligned}$$

luego:

$$m = \frac{E}{c^2}$$

$$= \frac{10^6 \cdot 1,59 \cdot 10^{-12}}{9 \cdot 10^{20}}$$

$$= 1,77 \cdot 10^{-27}$$

La radiación corresponde, pues, a $1,77 \cdot 10^{-27}$ unidades de masa.

2) Calculemos la energía propia de un electrón cuya masa sabemos que vale:

$$9 \cdot 10^{-28} \text{ grs.}$$

tendremos:

$$E = m \cdot c^2$$

$$= 9 \cdot 10^{-28} \cdot 9 \cdot 10^{20}$$

$$= 81 \cdot 10^{-8} \text{ ergs.}$$

$$= \frac{81 \cdot 10^{-8}}{1,59 \cdot 10^{-12}} \text{ e. V.}$$

$$= 509,000 \text{ e. V.}$$

Energía y masa en las transmutaciones.—Las transmutaciones, como veremos, se llevan a cabo, bombardeando los núcleos de los átomos, mediante diversas clases de partículas, o energías, que vienen a desempeñar el papel de proyectiles.

Si una partícula de masa m , se lanza con velocidad v , sobre un núcleo de masa M (fig. 17), no sólo hay que considerar la masa m , sino que también, en el fenómeno, la energía $\frac{1}{2} m v^2$ que lleva la partícula y que de acuerdo con la igualdad de Einstein, significa un aporte de masa.

Si es energía la que se lanza sobre el núcleo, habrá que considerarla como un fotón de energía $h \cdot f$.

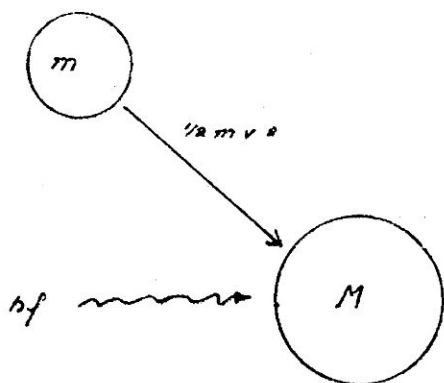
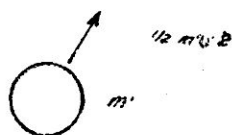


Fig. 17.—Energía y masa antes de la transmutación

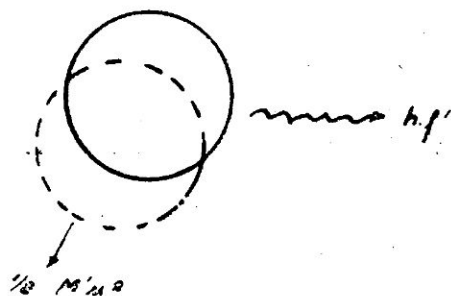


Fig. 18.—Energía y masa después de la transmutación

Después de verificarse el choque de la partícula o energía con el núcleo, transcurre un tiempo muy breve (según Rutherford 10^{-21} seg.) en que pasan en él cosas no esclarecidas; en seguida explota el núcleo y llega a un estado de equilibrio, lanzando

corpúsculos de masa m' , para los cuales hay que considerar también su energía $\frac{1}{2} m'v'^2$, o energía $h \cdot f'$, o ambos.

Por su parte, el núcleo de masa M , se ha transformado en uno de M' que se pone en movimiento debido al choque y para el cual también hay que considerar la velocidad u que toma, o más bien su energía $\frac{1}{2} M' u^2$ (fig. 18).

La explosión del núcleo puede verificarse en un tiempo muy breve, se trata entonces de las transmutaciones ordinarias, o en forma progresiva y tenemos la radioactiva artificial.

Todos los valores indicados deben considerarse, pues, en una ecuación correcta (los fenómenos de desintegración se representan por ecuaciones en forma análoga a las reacciones químicas).

En las ecuaciones nucleares, debiera emplearse para los cálculos, sólo las masas de los núcleos y no la de los átomos, expresadas siempre en unidades de masa; pero siendo la masa de los electrones tan pequeña, y quedando en ambos miembros el mismo número de electrones planetarios (cuya masa hace la diferencia entre la del átomo y del núcleo) los resultados de los cálculos son los mismos en uno u otro caso.

Es conveniente hacer presente que estas reacciones nucleares se efectúan con cantidades de materias pequeñísimas (átomos), y no como las reacciones químicas corrientes en que las cantidades usadas son gramos o miligramos cuando menos. Pero, como hemos visto, los procedimientos empleados para detectar las sustancias en estas reacciones nucleares son sumamente sensibles, incomparablemente más que los de la química corriente.

Además, debemos indicar que en las ecuaciones nucleares, salvo que expresamente se indique lo contrario, las masas no las expresamos en gramos, sino que en unidades de masa.

Conservación de la masa y energía.—La conservación de la masa y energía en las reacciones nucleares ha sido confirmada en una serie de casos, y en la actualidad se emplea para todos los cálculos.

Energía de unión.—Sabemos que el isótopo del litio de peso atómico 6,01664, está formado por 3 neutrones y 3 protones; en consecuencia, su peso atómico debiera ser la suma de los pesos atómicos de:

3 neutrones.....	3 . 1,00845 =	3,02535
y 3 protones	3 . 1,00807 =	3,02421
o sea:.....		6,04956

Se ve que hay una diferencia de:

$$6,04956 - 6,01664 = 0,03342$$

que representa la energía de unión de los protones y neutrones en el núcleo del Li^6 y vemos que corresponde a:

$$0,03342 \cdot 931 = 31,11 \cdot 10^6 \text{ e. V.}$$

Defecto de masa.—Se llama a la diferencia entre el peso atómico exacto y el

número entero más próximo a este peso. También se le llama «efecto de empaque». De paso queremos observar que al número entero más próximo al peso atómico, se le llama, a veces, «número de masa», y representa, como vimos, el número total de partículas (protones y neutrones) que entran en el núcleo correspondiente.

Fracción de empaque.—Se llama al cociente del defecto de masa y el número entero más próximo al peso atómico exacto. Por ejemplo:

$$\begin{array}{rcl} \text{Cl}^{35} & 34,9796 & \\ \hline \frac{34,9796 - 35}{35} & = & -0,00058 \end{array}$$

esta diferencia fraccional, generalmente es expresada en partes de 10,000 o sea $-5,8$, y quiere decir que el peso atómico del Cl^{35} es 5,8 partes en 10,000 menor que el valor entero 35.

Aceleración de las partículas.—Hemos visto que para obtener resultados apreciables en las transmutaciones, es necesario darle a las partículas a usar la velocidad suficiente.

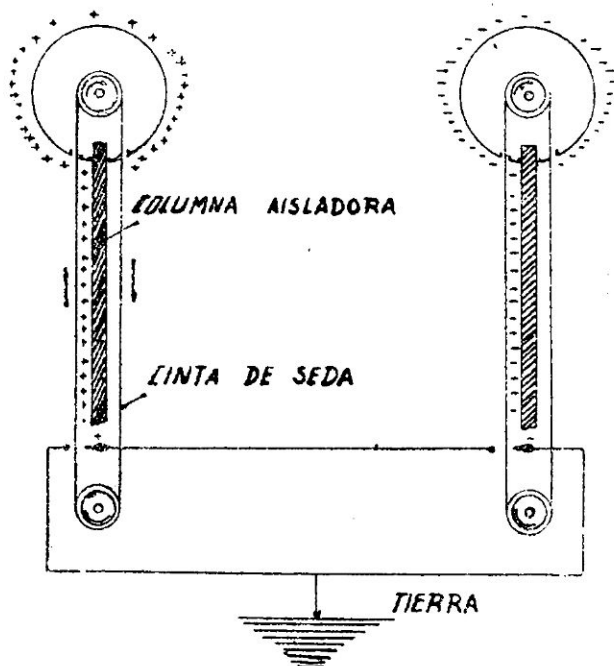


Fig. 19.—Sistema Van de Graaff para producir altas tensiones empleadas en las transmutaciones de los elementos.

Los físicos ingleses Cockroft y Walton obtienen protones suficientemente veloces, haciéndolos pasar por un tubo acelerador al cual se le aplica una diferencia de potencia de un millón de volts producidos en forma especial; un transformador de alta tensión origina una corriente alterna de 300,000 volts, y por medio de conden-

sadores y dispositivos adecuados; es transformada en continua y aumentada unas 2 o 3 veces, (Lámina 16).

Van de Graaff, emplea (fig. 19), dos bandas de seda sin fin, que llevan carga positiva y negativa a dos grandes esferas metálicas aisladas; proporcionando continuamente electricidad a las dos bandas de seda, se puede llegar a obtener una tensión de unos 10 millones de volts.

Lawrence, en EE. UU., emplea un aparato de su invención, llamado «cyclotron» para acelerar los protones y deuterones. Consta de una base metálica dividida en dos mitades, a las cuales se aplica una corriente alterna (fig. 20). En el espacio entre las dos mitades se producen los protones o deuterones mediante un filamento de tungsteno, colocando allí hidrógeno o deuterio; las partículas son atraídas en el espacio indicado, por la diferencia de potencial, y debido al campo magnético perpendicular a la base metálica, describen un semi-círculo; si el período de la corriente alterna es igual al tiempo que demora la partícula en recorrer el semi-círculo, será atraída por la otra mitad, recorrerá otro semi-círculo, y así sucesivamente. En cada vuelta, pasa el corpúsculo de una mitad a la otra, sufriendo la atracción del campo

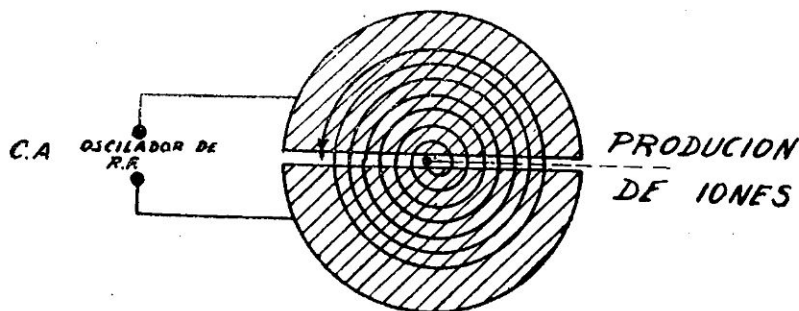


Fig. 20.—Cyclotrón de Lawrence empleado en las transmutaciones.

eléctrico, y en cada vuelta aumenta su velocidad. El cyclotron es más sencillo, pero más costoso que los otros aparatos empleados para efectuar la aceleración; sólo el magneto necesario para producir el campo, pesa 60 toneladas; (lámina 17).

Es posible arreglar el cyclotron de modo que las partículas salgan de la cámara de aceleración; en lámina 18 tenemos una fotografía, obtenida por Lawrence, de un haz luminoso de deuterones que corresponden a 6 micro-amperes y poseen una velocidad equivalente a la que obtendrían al ser acelerados con 6 millones de volts; tal haz corresponde a la producción de $3,8 \cdot 10^{11}$ deuterones por segundo, y equivale a las partículas alfa que cada segundo expelen 1 Kg. de radio.

CAPITULO X

TRANSMUTACION ARTIFICIAL

Generalidades.—Entraremos ahora a estudiar los métodos empleados para efectuar las desintegraciones y reacciones nucleares, y a analizar los resultados que se han obtenido.

Hemos visto que algunos de los electrones planetarios de un átomo pueden ser separados de él en forma fácil, mediante descargas eléctricas u otro procedimiento adecuado; al cabo de algún tiempo, nuevos electrones han ocupado el lugar de los separados, y el átomo se ha reconstruido.

Si deseamos efectuar una transformación permanente de un átomo, vemos que tenemos que atacar su núcleo, para variar su masa, su carga eléctrica, o ambas.

El núcleo de un átomo se encuentra estabilizado por fuerzas enormes, y en consecuencia tendremos que emplear grandes energías concentradas para poder efectuar su desintegración.

Las partículas de mayor energía cinética que antes se conocían, eran las partículas alfa, emitidas espontáneamente por sustancias radioactivas, con gran velocidad, y en consecuencia, energía.

Fué precisamente mediante el empleo de partículas alfa que Lord Rutherford, bombardeó átomos, cuando llegó a las conclusiones que le permitieron emitir su teoría sobre la estructura del átomo, basándose en las deflexiones sufridas por la trayectoria de las partículas.

Siendo el núcleo tan pequeño, no es corriente que una partícula alfa llegue tan cerca de él, para sufrir una deflexión apreciable en su trayectoria. Blackett ha logrado ahora, obtener interesantes fotografías de tal hecho, observando cuando partículas alfa se hacen pasar a través de oxígeno, lámina 19; se trata aquí de simples choques elásticos, sin que se efectúe desintegración o reacción entre la partícula y el núcleo.

Primeras transmutaciones empleando rayos alfa.—Si los elementos que se bombardean son livianos, de carga nuclear baja, entonces las fuerzas de repulsión que

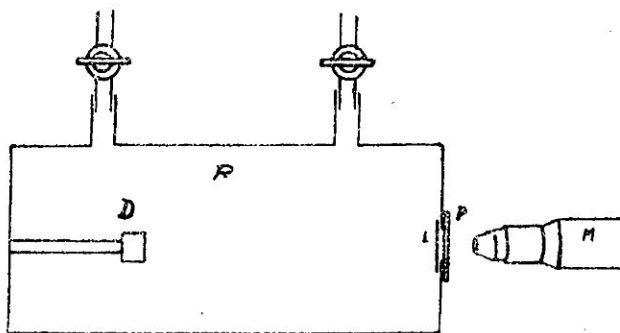


Fig. 21.—Spintaroscopio, mediante el cual se constató la primera transmutación artificial.

se producen entre el núcleo y la partícula alfa no son muy elevadas, y puede suceder que la partícula se aproxime mucho al núcleo, y aun penetre en él; en tal caso, la estructura del núcleo sufre un rudo choque y posiblemente una desintegración.

Corresponde nuevamente a Lord Rutherford, el mérito de haber sido el primero en producir una desintegración artificial, al bombardear en 1919, átomos de nitrógeno mediante partículas alfa.

Lord Rutherford empleaba en sus primeras experiencias el sistema indicado

en la fig. 21. Consta de un recipiente *R*, cerrado, provisto de llaves para introducir y sacar el gas que se va a estudiar; en un extremo tiene una abertura tapada en su parte interior por una lámina de plata, *L*, y en su parte exterior por una pantalla fosforescente *P*, constituida por una placa de vidrio cubierta de sulfuro de zinc; la substancia radioactiva, productora de las partículas alfa que se usan, va colocada en el depósito *D*, el cual puede alejarse o acercarse a la pantalla *P*.

La partícula alfa emitida por la substancia radioactiva, aun cuando ésta se encuentre cerca de la pantalla, no puede alcanzarla por cuanto es absorbida por la lámina de plata, y en consecuencia, a través del microscopio *M*, no se observará nada de especial. Al llenar el recipiente con nitrógeno, Lord Rutherford, después de experiencias y observaciones llevadas a cabo con extraordinaria paciencia, observó por el microscopio que aparecían puntos luminosos en la pantalla; debían haberse producido, pues, partículas de energía suficiente para atravesar la lámina de plata y producir luminosidad. Determinó que esas partículas eran núcleos de hidrógeno, o sea protones.

El átomo de nitrógeno se había desintegrado por la acción de las partículas alfa, y emitía un protón.

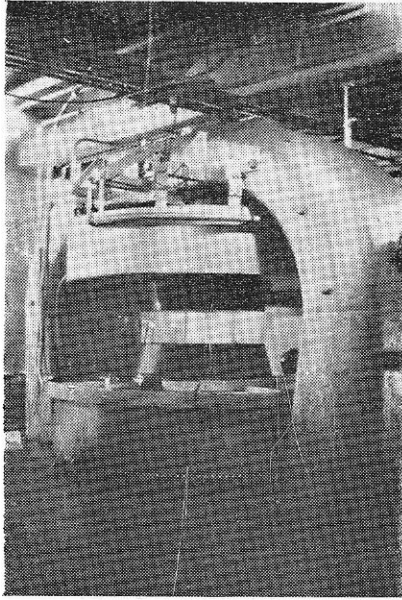
Si en el aparato indicado, eliminamos la lámina absorbente de plata, observaremos luminosidad, retirando la fuente radioactiva hasta a 7,1 cm. de la pantalla, la que se debe a las partículas alfa, cuya energía o alcance corresponde a esa distancia. Si llenamos el recipiente con hidrógeno, obtendremos protones ordinarios, y la fuente radioactiva podrá retirarse hasta una distancia de 28 cms; los puntos luminosos observados en la pantalla se deben a los protones corrientes producidos por el choque de las partículas alfa con los átomos de hidrógeno (ionización de éstos). Al poner nitrógeno en el recipiente, se producen protones de mucho mayor energía, y en consecuencia la fuente radioactiva puede retirarse hasta 40 cms. de la pantalla; esta luminosidad no podrá deberse a protones corrientes producidos por acción de las partículas alfa sobre vestigios de hidrógeno en el recipiente, ya que éstos tienen un alcance de sólo 28 cms.

En lugar de colocar un gas en el recipiente, podemos colocar por ejemplo, una lámina de aluminio, vertical, y observaremos luminosidad, retirando ésta lámina hasta 80 cms. de la pantalla, que se deben a los protones de gran energía obtenidos del núcleo de aluminio.

Mecanismo de la transmutación con rayos alfa.—La experiencia de Rutherford dejó en claro que al bombardear núcleos de nitrógeno con partículas alfa había, emisión de protones. Se pensó que seguramente el núcleo del nitrógeno, después de esa emisión debía transformarse en el núcleo de algún otro elemento, pero no se sabía si la partícula había sido absorbida por el núcleo o no.

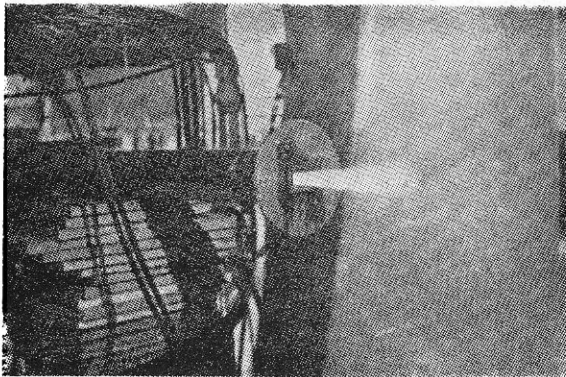
La explicación completa se pudo efectuar debido a las experiencias de Blackett y Harkins, quienes mediante una cámara de Wilson provista de un dispositivo automático capaz de sacar una fotografía cada diez segundos, estudiaron tal desintegración, obteniendo un film con 23.000 fotografías; en éstas aparecían 415.000 trayectorias de partículas alfa, bajo las cuales sólo 8 indicaban la formación de un protón. En tal fotografía, lámina 20, se observa la trayectoria de la partícula alfa, hasta que choca con el núcleo de nitrógeno, y en seguida la trayectoria caracterís-

Lámina XVII



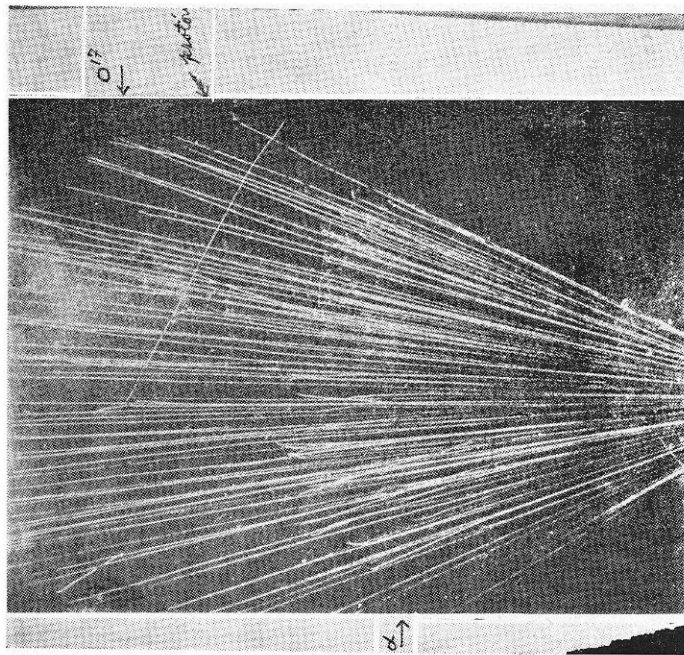
Cyclotrón instalado en la Universidad
de Columbia (New-York)

Lámina XVIII



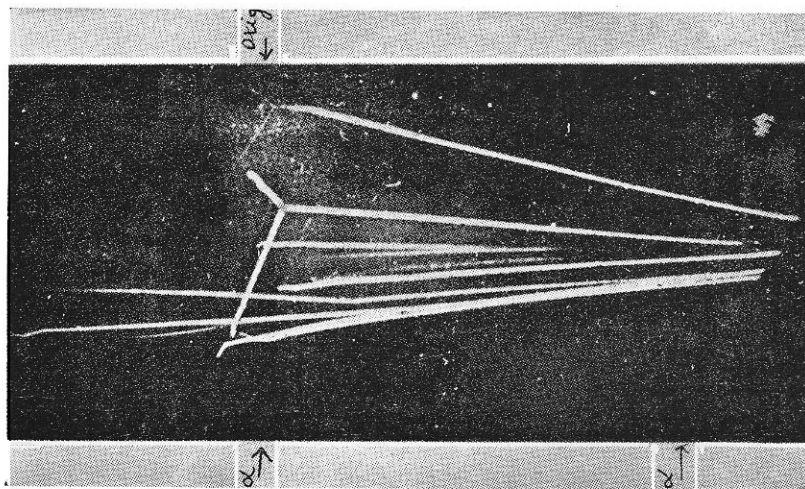
Lawrence

Haz de deuterones de 6 M. V., saliendo del
cyclotrone.



Blackett

Desintegración del nitrógeno
mediante rayos alfa, con
emisión de protones de
gran energía, y obtención
del O^{17} .

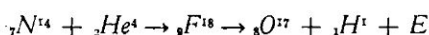


Blackett

Choque de una partícula de alfa con un núcleo
de oxígeno

tica al protón, y una nueva trayectoria que no podía corresponder a partícula alfa, sino que debía ser la de un nuevo núcleo; la partícula alfa había sido absorbida por el núcleo de nitrógeno.

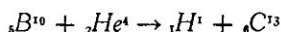
De acuerdo con nuestros conocimientos actuales, la explicación del hecho observado es que la partícula alfa entra en el núcleo, dando origen a un núcleo de fluor, de masa 18 y carga 9, el que es sumamente inestable y se descompone instantáneamente, emitiendo un protón y transformándose en un núcleo estable de oxígeno de masa 17. De acuerdo con las nociones que hemos expresado anteriormente, y debiendo conservarse la carga, representaremos la reacción nuclear indicada por la siguiente ecuación:



en que E representa la masa que corresponde a la diferencia entre la energía inicial y la final, o sea la energía cinética que lleva el oxígeno y el protón, disminuía en la energía que llevaba la partícula alfa.

Diferentes transmutaciones mediante partículas alfa.—Transmutaciones similares ocurren con una serie de elementos livianos.

Así, por ejemplo, para el boro B^{10} se ha obtenido:

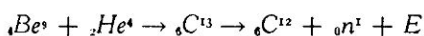


y respecto a la distribución de la energía resultante, se distinguen varios casos:

- 1) Los protones resultantes pueden ser los de mayor alcance y energía, correspondiente a la ecuación estudiada.
- 2) Los protones pueden tener menor alcance y energía, reteniendo el C^{13} algo de la energía, y quedando en consecuencia, en un estado excitado.

De los estudios efectuados se ha llegado a la conclusión de que los protones emitidos en esta clase de transformaciones, están formados por dos o más grupos, cada uno de velocidad determinada. La diferencia de energía de los protones en estos grupos se debe a la emisión de energía en forma de rayos gamma por el núcleo resultante; resulta, pues, que en el núcleo bombardeado hay «niveles de resonancia» que efectúan una absorción selectiva de las partículas alfa de velocidad determinada.

Sin embargo, no todos los elementos al ser bombardeados por partículas alfa emiten protones. Ya indicamos que los neutrones habían sido descubiertos al bombardear berilio con rayos alfa; muy raras veces, una partícula es absorbida por el núcleo Be^9 , formando momentáneamente el núcleo C^{13} con un gran exceso de energía, el que instantáneamente se desintegra en el C^{12} estable y el neutrón,



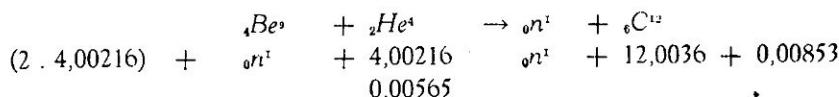
Apareciendo el exceso de energía en forma de energía cinética, repartida entre el núcleo de carbón y el neutrón.

Mediante esta ecuación podemos determinar la velocidad del neutrón. El nú-

cleo del berilio se supone compuesto de dos partículas alfa y un neutrón, luego el peso atómico del isótopo ${}^9\text{Be}$ será:

$$(2 \cdot 4,00216) + {}_0n^1$$

en que 4,00216 es el peso atómico de la partícula alfa, y ${}_0n^1$ el del neutrón. La energía cinética de la partícula empleada equivale a 0,00565 unidades de masa. El peso atómico del ${}^{12}\text{C}$ es 12,0036. Luego se tiene:



en esta ecuación hemos colocado el peso atómico bajo cada elemento y también hemos considerado la energía cinética de la partícula alfa, expresada en unidades de masa; el valor 0,00853 que pusimos en el segundo miembro, es la disminución de masa que se observa de acuerdo con:

$$(2 \cdot 4,00216) + {}_0n^1 + 4,00216 + 0,00565 - ({}_0n^1 + 12,0036) = 0,00853$$

y equivale a:

$$7,8 \cdot 10^6 \text{ e. V.}$$

debiendo aparecer como energía cinética dividida entre el núcleo de C y el neutrón.

Luego la energía máxima que puede tener el neutrón emitido por el Be, puede alcanzar a $7,8 \cdot 10^6 \text{ e V}$. (suponiendo que el C no toma energía cinética); y

$$7,8 \cdot 10^6 \text{ e V} = 3,9 \cdot 10^9 \text{ cm/seg.},$$

siendo la masa del neutrón similar a la del protón, según calcularemos más adelante, es razonable suponer que sus velocidades máximas sean similares; la máxima observada para el protón es de $3,3 \cdot 10^9 \text{ cm/seg.}$, que es similar a la deducida para el neutrón.

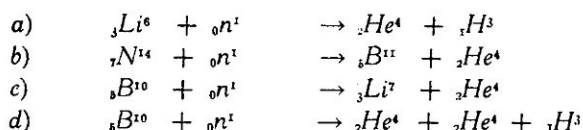
Otras partículas empleadas en las transmutaciones.—Se observó que las partículas alfa eran capaces de efectuar transmutaciones sólo en elementos livianos, y no en los pesados, lo que se debe a que al aumentar el peso de los elementos aumenta, como sabemos, la carga positiva del núcleo y se hace muy grande la fuerza de repulsión entre éste y la partícula alfa (que tiene 2 cargas positivas), la que no es capaz de penetrar en el núcleo, pues, no posee la energía suficiente.

Cuando se descubrió el neutrón, naturalmente se pensó que debiera ser una partícula muy eficaz para efectuar transmutaciones de elementos livianos o pesados y en realidad así se ha demostrado. Siendo neutro, no sufre acción por parte de los electrones planetarios, o del núcleo, y siendo tan pequeño (su diámetro posiblemente es

inferior a 10^{-10} cm.) puede pasar libremente a través de esos electrones y llegar hasta el núcleo, aun cuando vaya con velocidad relativamente baja. Para producir neutrones, basta con colocar en un tubo cerrado berilio en polvo con unos 100 miligramos de una sal pura de radio; se obtienen así, por el bombardeo del berilio mediante las partículas alfa de la sal de radio, alrededor de medio millón de neutrones por segundo; también puede emplearse la emanación en lugar de la sal de radio, pero en este caso la producción de neutrones disminuye con el tiempo en igual forma que decae el poder radioactivo de la emanación.

Disponemos, además, del protón o núcleo de hidrógeno y del deuterón o núcleo del deuterio. Teniendo éstos cargas unitarias, la fuerza de repulsión que actúa sobre ellos por parte de un núcleo al bombardearlo es la mitad de la que actúa sobre las partículas alfa, y en consecuencia el efecto producido sobre elementos livianos es mucho mayor que con aquellas partículas, y aun pueden tener acción sobre núcleos pesados. Se obtienen mediante descargas elécticas a través de hidrógeno y deuterio respectivamente, y se aceleran mediante fuertes campos eléctricos para darles gran energía.

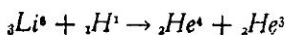
Transmutaciones empleando neutrones.—Entre esta clase de transmutaciones podemos mencionar como ejemplo, entre otras, a las siguientes;



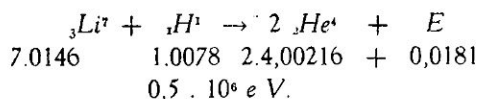
Son interesantes las dos últimas transmutaciones llevadas a cabo usando «neutrones lentos» (véase más adelante). En el primer caso el isótopo B^{10} absorbe un neutrón y se desintegra en un núcleo Li^7 y una partícula alfa. En el otro caso se desintegra, originando un núcleo de tritium H^3 y dos partículas alfa. En la lámina 21, tenemos una fotografía de este último caso, obtenida por Taylor y Goldhaber, exponiendo por varios días a la acción de los neutrones lentos una placa fotográfica, especial, impregnada con una solución de un compuesto del boro; observando la placa desarrollada, con un microscopio de gran aumento (9,000), se ven claramente las trayectorias de las 3 partículas originadas en la transmutación, perteneciendo la más larga al núcleo ${}_1\text{H}^3$.

Transmutaciones mediante protones.—Muy estudiadas han sido las transmutaciones que sufre el litio; Oliphant, Sire y Crowter, mediante pasaje de iones de litio positivos por un campo magnético y electrostático, tal como en el espectrógrafo de masas, lograron obtener separados los isótopos Li^6 y Li^7 , en cantidades de $5 \cdot 10^{-8}$ grs. de cada uno, de modo que se pueden efectuar experiencias bien sea con uno u otro de ellos.

Con el isótopo Li^6 , el protón que ocasionalmente es absorbido por el núcleo, origina el Be^7 inestable, que se desintegra inmediatamente en una partícula alfa y un isótopo ${}_2\text{He}^3$ del helio.



Cuando el isótopo Li^7 es bombardeado, se forma primeramente el núcleo inestable Be^8 , que se desintegra inmediatamente en dos partículas alfa, las que son expedidas en dirección aproximadamente opuestas; en la lámina 22 vemos claramente la trayectoria de dos de tales partículas, fotografiadas por Kirchner mediante la cámara de Wilson. La reacción es:



en que E representa la energía liberada expresada en unidades de masa, y cuyo valor resulta ser, según el cálculo efectuado 0,0181, y equivale a $17 \cdot 10^6 \text{ e V}$; la energía del protón usada es inferior a $0,5 \cdot 10^6 \text{ e V}$. La energía total de las dos partículas producidas será pues:

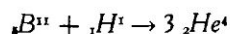
$$< 17 \cdot 10^6 + 0,5 \cdot 10^6 \text{ e V.}$$

lo que concuerda con lo observado, pues del largo del camino de las dos partículas alfa emitidas en la cámara de Wilson se calcula que la energía liberada es de $17,1 \cdot 10^6 \text{ e V}$.

Bajo ciertas condiciones se ha observado (Crane, Laritsen) que la transmutación del Li^7 se efectúa bajo producción de rayos gamma de dos clases, con energías de 4 y de $12 \cdot 10^7 \text{ e V}$; siendo esta suma semejante al valor $17 \cdot 10^6 \text{ e V}$ recién calculado, se deduce que en el núcleo resultante de la absorción de un protón por el ${}_3Li^7$, las partículas alfa pueden formarse bajo dos estados:

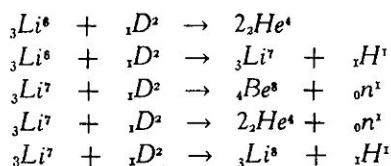
- a) En su estado base, cuando la energía aparece como energía cinética;
- b) O en un estado excitado, el que pasa al estado base en dos etapas, emitiéndose la energía en dos fotones de 4 y $12 \cdot 10^6 \text{ e V}$.

Si se bombardea el boro B^{11} con protones, tenemos:



Una fotografía en que aparecen las trayectorias de las 3 partículas, obtenidas por Dee y Gilbert, tenemos en lámina 23.

Transmutación mediante deuterones.—Si deuterones actúan sobre el litio, tenemos:



Si se bombardean deuterones mediante deuterones, se observan las dos reacciones:

Lámina XXI

Taylor-Goldhaber

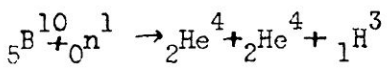
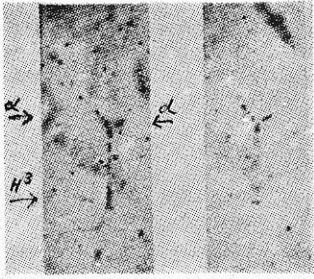
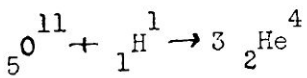
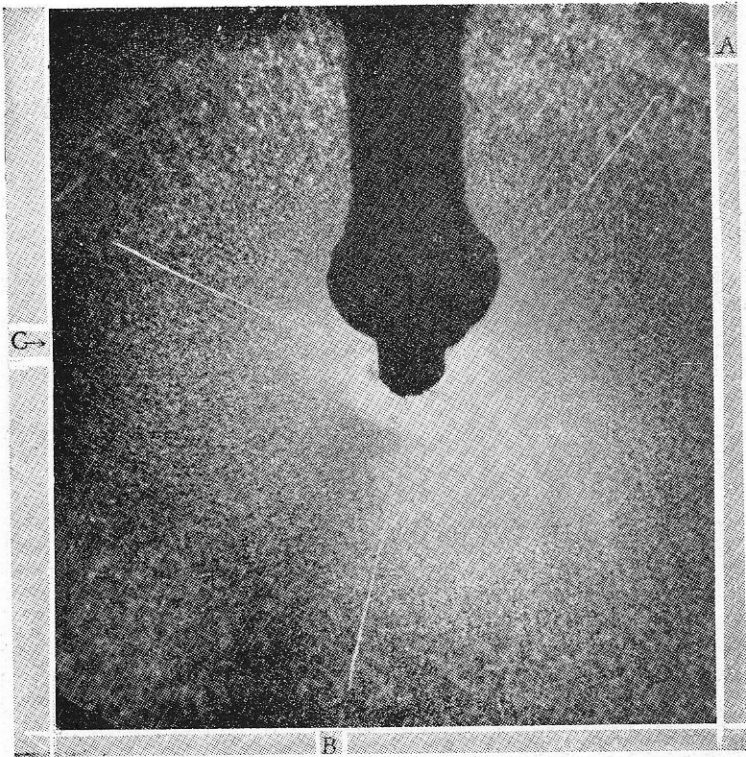
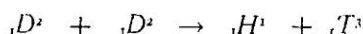
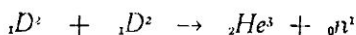


Lámina XXIII

Dee-Gilbert



y



Si la energía de los deuterones empleados para el bombardeo en estas dos últimas reacciones, es pequeña en comparación con la obtenida, las dos partículas en cada reacción, serán expelidas en direcciones aproximadamente opuestas. Estas transformaciones se verifican ya, empleando deuterones acelerados sólo con 20,000 e. V.

Si deuterones rápidos (100,000 volts) actúan sobre cloruro o sulfato de deuterioamonio, ND_4Cl o $(ND_4)_2SO_4$, se produce el tritium en cantidad suficiente para ser detectado en el espectrógrafo de masas; se encuentra 1 parte de él en 10^5 partes de hidrógeno ordinario.

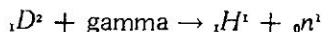
El peso atómico del tritium T^3 , es:

$$3,0163 \mp 0,002$$

es menor que el del He^3 que vale 3,01699; en consecuencia el núcleo del T^3 es algo más estable que el del He^3 , y la energía de unión, determinada por la pérdida de masa en la formación del núcleo a partir de protones y neutrones, es mayor para el tritium.

Transmutaciones mediante rayos gamma.—No sólo se han efectuado transmutaciones, empleando para el bombardeo partículas materiales, sino que también se han obtenido tal clase de reacciones, sometiendo los núcleos a la acción de radiaciones de energía suficiente, las que sabemos se componen de una serie de gránulos de energía o fotones.

Si se someten deuterones a la acción de rayos gamma del torio C^{232} , de energía $2,62 \cdot 10^6$ e V, se obtiene (Chadwick-Goldhaber)



Podemos aprovechar esta reacción para determinar la masa del neutrón.

Se encontró que la energía del protón resultante era aproximadamente $0,25 \cdot 10^6$ e V; por diversas consideraciones se llega a la conclusión de que la masa del neutrón (x) debe ser semejante a la del protón; luego deberá tomar también una energía de $0,25 \cdot 10^6$ e V; tenemos:



$$\begin{array}{rcl} 2,0136 & + & 2,62 \cdot 10^6 \\ & & \rightarrow 1,0078 + x \\ & & \quad 0,25 \cdot 10^6 \quad 0,25 \cdot 10^6 \end{array}$$

de aquí:

$$\begin{array}{l} x = 2,0136 - 1,0078 + (2,62 \cdot 10^6 - 0,5 \cdot 10^6 \text{ e V.}) \\ x = 2,0136 - 1,0078 + 0,0022 \end{array}$$

luego la masa valdrá:

$$x = 1,008$$

el valor 0,0022 unidades de masa corresponde a la energía necesaria para desintegrar el D^2 y equivale como vemos a $2,12 \cdot 10^6 \text{ e V}$.

Producción de positrones mediante rayos gamma.---Interesante es la producción de positrones por la acción de rayos gamma del torio C, con energía de $2,6 \cdot 10^6 \text{ e V}$, sobre plomo; al ser absorbido tales rayos por este metal, se observó que la energía máxima de las partículas positivas emitidas, estimada por la deflexión en el campo magnético, era de $1,6 \cdot 10^6 \text{ e V}$, y que muchas tenían una energía menor que la mitad de tal valor; no pudiendo corresponder esa energía a electrones provenientes del exterior del núcleo, pues estos tienen energía superiores a $2,6 \cdot 10^6 \text{ e V}$, la energía máxima de un par positivo-negativo será la suma de la correspondiente a cada partícula (la mayoría de las partículas vimos tenían energías de $0,8 \cdot 10^6 \text{ e V}$, o menos), o sea:

$$0,8 \cdot 10^6 + 0,8 \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 10^6 \text{ e V}.$$

Chandwick, Occhialini y Blackett observaron en 1934, que al emplear plomo, la energía máxima de la partícula positiva o positrón emitida era de:

$$(1,55 \pm 0,03) \cdot 10^6 \text{ e V}.$$

Estos datos nos sirven para calcular la masa del positrón. Llamando:

$$m_1 = \text{masa electrón} = 9 \cdot 10^{-28} \text{ grs.}$$

$$m_2 = \text{masa positrón.}$$

$$c = \text{velocidad luz} = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/seg.}$$

tenemos que la energía necesaria para producir simultáneamente un par positrón-electrón es; (equivalencia de Einstein):

$$(m_1 + m_2) \cdot c^2$$

Siendo $h \cdot f$ la energía del rayo gamma, cuya absorción produce al par, el exceso de energía (la no gastada en la producción) será:

$$h \cdot f - (m_1 + m_2) c^2$$

y corresponderá a la energía máxima que puede adquirir un positrón o un par positrón-electrón, que según vimos era de $(1,55 \pm 0,003) \cdot 10^6 \text{ e V}$. Reemplazando valores en la última ecuación, tenemos:

$$\begin{aligned}
 2,62 \cdot 10^6 &= (m_1 + m_2) c^2 = (1,55 \pm 0,03) \cdot 10^6 \\
 (m_1 + m_2) c^2 &= (1,07 \pm 0,03) \cdot 10^6 \text{ e V.} \\
 (9 \cdot 10^{-28} + m_2) \cdot 9 \cdot 10^{20} &= (1,07 \pm 0,03) 10^6 \\
 m_2 &= (1,10 \pm 0,06) m_1
 \end{aligned}$$

luego, de acuerdo con los datos de la experiencia mencionada, resulta ser la masa del positrón un 10% mayor que la del electrón, y la energía total para producir el par positrón-electrón vale $(1,07 \pm 0,03) \cdot 10^6 \text{ e V}$; es posible que experiencias más precisas den para este último valor el resultado de $1,02 \cdot 10^6 \text{ e V}$, o sea:

$$2 \cdot 0,51 \cdot 10^6 \text{ e V}$$

lo que indicaría que:

$$m_1 c^2 = m_2 \cdot c^2$$

o sea que:

$$m_1 = m_2$$

la masa del electrón sería igual a la del positrón.

El núcleo como fuente de energía.—El núcleo del oxígeno ^{16}O se compone de 8 protones y 8 neutrones, que corresponden a la masa:

8 protones.....	8 · 1,00807 =	8,06456
8 neutrones.....	8 · 1,00845 =	8,06760
		16,13216

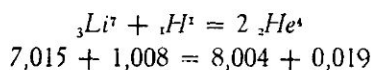
y siendo su masa real de 16, se ve que hay una diferencia de:

$16,13216 - 16 = 0,13216$ unidades de masa; en consecuencia, al producirse un átomo de oxígeno por unión de sus elementos, a partir del hidrógeno, hay la disminución indicada de materia, que como sabemos corresponde a una energía radiante, cuyo valor es de:

$$\begin{aligned}
 &123 \cdot 10^6 \text{ e V.} \\
 \text{o} &47,5 \cdot 10^{13} \text{ calorías.}
 \end{aligned}$$

Luego, si por una reacción nuclear entre neutrones y protones, fabricásemos 264 grs. de oxígeno a partir del hidrógeno, obtendríamos una energía equivalente a 600,000 toneladas de carbón de 8,000 cal., y cuyo valor es de unos 120 millones de pesos.

Examinemos ahora el caso de la reacción:



que se produce empleando protones de unos cientos de miles de volts, y cuya energía cinética es sólo equivalente a diez milésima de unidad de masa. En consecuencia, tenemos en esta reacción nuclear una ganancia de energía correspondiente a 0,019 unidades de masa, o sea alrededor de $18 \cdot 10^6$ e V, por cada 7,0015 unidades de masa de Li^7 que desintegrásemos, o sea de 8,004 unidades de masa de helio que produjéramos.

Si a partir de litio fabricamos por reacción nuclear con hidrógeno, 240 grs. de helio, obtendríamos una energía de 15 millones de kilowatts-hora.

Al bombardear Li^6 con deuterones, obtenemos una energía de 22,5 millones de e V; como esta reacción se puede producir ya con deuterones acelerados por una diferencia de potencial de 20,000 volts, obtenemos una ganancia de energía en el proceso individual.

Desgraciadamente, no tenemos medios para efectuar estas reacciones en forma eficiente, de manera que en realidad se tenga una ganancia efectiva de energía. En el último caso, por ejemplo, de 10^{18} deuterones que se emplean, sólo 1 da en el núcleo del Li^6 y produce reacción, de modo que debemos entregar al sistema una energía muchísimo mayor que la que obtenemos de él; aun empleando deuterones con mayor energía, no hay esperanza de una ganancia efectiva de energía en el proceso.

Es posible que bajo las condiciones reinantes en las nebulosas, estrellas, o interior del sol, los átomos se transformen continuamente según estos procesos, explicándose así parte de la energía irradiada por tales cuerpos.

Energía nuclear que llega a la tierra.—Estudiemos ahora el caso extremo de desintegración; supongamos que el protón y el electrón planetario del hidrógeno se unan, neutralizándose así las dos cargas, y desapareciendo el átomo de hidrógeno el que se transformaría en energía radiante.

El átomo de hidrógeno, de masa $1.66 \cdot 10^{-24}$ grs. corresponde a una energía de 0,0015 ergs; llamado f la frecuencia de la energía obtenida, tenemos

$$0,0015 = h \cdot f$$

y de aquí resulta la longitud de onda de la radiación:

$$1.3 \cdot 10^{-13} \text{ cm.}$$

Esta longitud de onda corresponde por otra parte a la radiación cósmica más penetrante. Por esta razón, se ha supuesto que los rayos cósmicos provienen de la destrucción de la materia, llevada a cabo en el universo por aniquilamiento de un protón con un electrón.

Millikan, por su parte, basándose en experiencias efectuadas, llega a la conclusión de que la radiación cósmica nos viene en 4 grupos, con longitudes de ondas comprendidas entre $5,3 \cdot 10^{-12}$ y $2,1 \cdot 10^{-12}$ cms. El quanta calculado de acuerdo con estos valores es muy pequeño para deberse a la destrucción de un protón por un electrón; en cambio corresponde para el primer grupo de radiación a la energía de transmutación del hidrógeno en helio, y para los otros tres, a las energías de forma-

ción del oxígeno o nitrógeno o carbón, del silicio o magnesio o aluminio, y del hierro o níquel o cobalto, respectivamente, a partir del hidrógeno. O sea, que los rayos cósmicos corresponderían a la formación de elementos en el universo, y no a la destrucción de ellos.

Compton llega a la conclusión de que los rayos cósmicos son electrones dotados de enorme velocidad, cuya energía varía entre 7 mil millones y 30 mil millones *e V*.

Experiencias efectuadas parecen demostrar que al pasar a través de materia, son absorbidos por los núcleos de los átomos, resultando en muchos casos en la desintegración de ellos. Pasando a través de nuestro cuerpo, en un término medio de 15 por segundo, y teniendo un poder penetrante muy elevado, los rayos cósmicos deberán descomponer muchos átomos y producir posiblemente efectos fisiológicos no sospechados.

CAPITULO XI

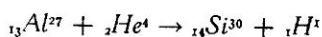
RADIOACTIVIDAD ARTIFICIAL

Las transmutaciones artificiales que hasta ahora hemos visto, conducían todas al núcleo de un elemento estable.

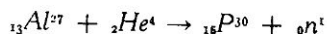
A fines de 1933, los esposos Joliot-Curie, estudiando el bombardeo del aluminio mediante rayos alfa, observaron en la cámara de Wilson, que al lado de la trayectoria del protón resultante, había también una trayectoria correspondiente a un positrón. Encontraron además, que alejando la fuente productora de partículas alfa, la emisión de positrones seguía por algún tiempo. Se había producido por primera vez, un cuerpo radioactivo en forma artificial.

El núcleo de aluminio, por la acción de los rayos alfa, se transforma primeramente en un núcleo inestable, o sea un cuerpo radioactivo artificial; en seguida, éste emite una partícula para transformarse en un núcleo estable. Las leyes que rigen la transformación espontánea de este núcleo inestable, son las mismas que rigen a la radioactividad natural.

La emisión de protones en esta transmutación se verifica de acuerdo con la reacción:



además, para la emisión de positrones, se tienen las reacciones:



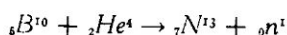
y el fósforo inestable así obtenido se descompone, a su vez, con emisión de positrones:



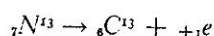
Se comprobó que la radioactividad del núcleo inestable tenía un tiempo de

reducción a mitad de $3\frac{1}{4}$ minuto. Químicamente se vió que esta radioactividad estaba ligada a un cuerpo de propiedades iguales a las del fósforo; así, disolviendo rápidamente en ácido clorhídrico el aluminio expuesto a los rayos alfa, y agregando algo de fósforo en forma de fosfato de sodio, la radioactividad es llevada por el fósforo que sale en forma de hidrógeno fosforado.

Para el boro se observó una transmutación semejante:



el núcleo ${}_7\text{N}^{13}$, inestable, se descompone:



siendo de 14 minutos su tiempo de reducción a mitad.

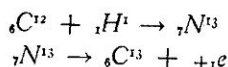
Se comprobó también que varios otros elementos ligeros, litio, fósforo, sodio, zinc, fluor, expuestos al bombardeo mediante rayos alfa, originaban cuerpos radioactivos.

Revelación de la radioactividad artificial.—En general, para el estudio de la radioactividad artificial no se emplea la cámara de Wilson, sino que con más frecuencia se hace uso del contador de hilo, con el que se pone en evidencia cada simple partícula emitida por el núcleo inestable. Siendo el tiempo de reducción a mitad de un elemento una característica constante y determinada para cada elemento, al determinar este valor mediante el contador de hilo, se determina el elemento; así, siendo el tiempo de reducción a mitad para el nitrógeno de 14 minutos, al determinar mediante el contador, que para un elemento este tiempo es de 14 minutos, se sabe que tal elemento es nitrógeno.

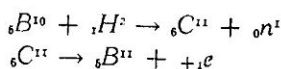
Se ha observado además, que un elemento presenta la actividad máxima, cuando se le ha sometido al bombardeo, por un tiempo semejante al período de reducción a mitad del elemento radioactivo a que da origen; así para el boro, que origina al nitrógeno radioactivo, la actividad máxima se obtendrá exponiéndolo al bombardeo mediante partículas alfa, por unos 14 minutos.

Pero, no solo mediante el contador a hilo, sino que también mediante un procedimiento químico se puede identificar a la substancia radioactiva. Este se basa en el hecho de que la substancia radioactiva, al encontrarse en solución con la substancia semejante, estable, se une a ella, y pasa por las mismas operaciones. Así, la substancia irradiada se disuelve, y se le agrega una pequeña cantidad de aquellas cuyo número atómico es semejante; se las separa en seguida por los procedimientos químicos corrientes, y se acercan sucesivamente al contador de hilo; el elemento que lleva la radioactividad, debe ser isótopo del elemento radioactivo que se ha formado.

Empleo de protones y deutones.—No sólo se estudió la radioactividad producida por el empleo de partículas alfa, sino que también se emplearon protones y deutones, acelerados por adecuadas diferencias de potenciales. Así, para el C se obtuvo:

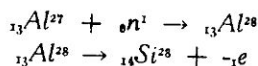


Empleando deutones acelerados con 3 millones de volts, se observa que el núcleo inestable formado se desintegra emitiendo positrones y rayos gamma:

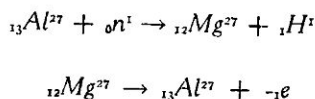


Empleo de neutrones.—Fermi y sus colaboradores en Roma, fueron los primeros en usar neutrones, y observaron que las sustancias radioactivas producidas por el bombardeo mediante partículas neutras, emitían electrones. Los neutrones los obtenían mezclando radio-emanación (hasta 800 millicurie; un curie de sustancia radioactiva es la cantidad de ella que presenta la misma actividad que 1 gr. de radio, y 1 millicurie, la milésima parte) con berilio en polvo, en un tubo de vidrio; en la cercanía se colocaban las diversas sustancias a experimentar, generalmente en la forma de cilindros. Mediante este procedimiento se ha logrado activar más de 40 elementos. En el caso del aluminio tenemos:

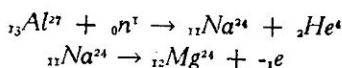
a) tiempo de reducción a mitad, 2,3 minutos.



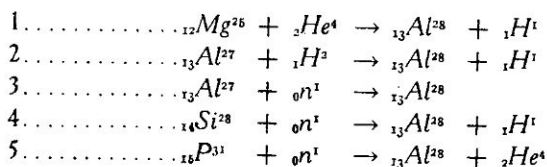
b) tiempo de reducción a mitad 10 minutos:



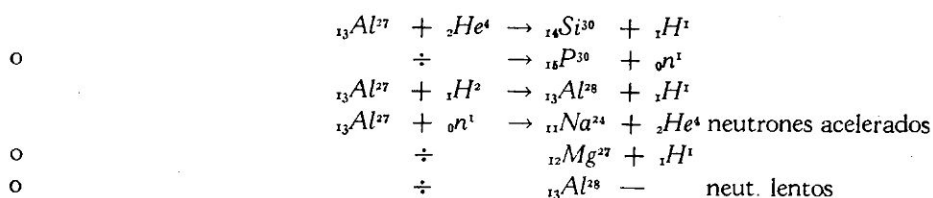
c) tiempo de reducción a mitad 15 horas:



Diferentes transformaciones para el mismo núcleo.—Es interesante observar que un mismo elemento puede obtenerse por diferentes procesos. El aluminio radioactivo puede obtener por cualesquiera de las siguientes reacciones:



Igualmente, un núcleo, por diferentes transformaciones puede dar, como hemos visto, diversos núcleos:



Neutrones lentos.—Fermi y colaboradores, al efectuar las experiencias con neutrones, observaron que el producto radioactivo artificial que obtenían, no poseía siempre la misma actividad; en un caso emitía por ejemplo, 100 electrones por minuto, y en otro sólo 80. Llegaron a la conclusión que ello dependía de la clase de substancia que rodeaba a la fuente de neutrones y al elemento por bombardear, y observaron que el mejor resultado se obtiene, cuando la substancia que rodeaba era agua, parafina, o en general una que contuviese hidrógeno en su molécula. Se explica este hecho, suponiendo que los neutrones, antes de actuar, chocan con los protones de la substancia, cambian de dirección y pierden velocidad, y que para muchas transformaciones nucleares es más eficiente el resultado, si el neutrón tiene cierto tiempo a disposición para ponerse en contacto con el núcleo.

LAMINA XXIV

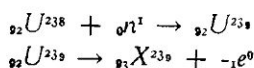
6° REGION	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au
N° ATÓMICO	90	91	92	93	94	95	96	97
7° REGION	Tb	Pa	U	Ek a Re	Ek a Os	Ek a Ir	Ek a Pt	Ek a Au
PESO ATÓMICO 239			U	$\xrightarrow{10''}$ E Re	$\xrightarrow{22''}$ E Os	$\xrightarrow{59''}$ E Ir	$\xrightarrow{3d}$ E Pt	$\xrightarrow{25a}$
238			U	$\xrightarrow{40''}$ E Re	$\xrightarrow{16''}$ E Os	$\xrightarrow{6a}$ E Ir	$\xrightarrow{?}$	
255	Th	Pa	U	$\xrightarrow{23''}$ E Re				

Las elementos obtenidos al bombardear Uranio con neutrones, su colocación en el sistema periódico, y su tiempo de reducción a mitad.

Bombardeo del Uranio.—Muy interesante es el resultado que se obtiene al bombardear el uranio mediante neutrones. Estas experiencias fueron efectuadas originalmente por Fermi y colaboradores, y repetidas últimamente por Hahn y Meitner, quienes empleando neutrones rápidos y lentos, llegaron a interesantes resultados.

Del uranio se obtienen tres diferentes clases de elementos al ser bombardeado con neutrones. Estos elementos se transforman, bajo emisión de electrones, en una serie de otros elementos, los que a su vez emiten electrones (lám. 24).

La primera serie se obtiene del uranio, por simple adición de un neutrón; se rige por las ecuaciones:



y origina a través del elemento ${}_{93}\text{X}$ o Eka-Rhenio, al Eka-Platino, el que a su vez se transmuta en el Eka-Oro, de número atómico 97.

En la segunda serie de transformaciones, no se conocen hasta la fecha los pesos atómicos que tendrán los productos resultantes, pero se va también del uranio 92, a través de los cuerpos de carga nuclear 93, 94, a un Eka-Iridio 95, el que posiblemente emite partículas beta y se transforma en un isótopo del Eka-Platino.

La tercera serie se origina al absorber el uranio a un neutrón y emitir una partícula alfa, originándose primeramente un isótopo del torio (90), el que, a través de un isótopo del paladio y del uranio, se transforma en un tercer isótopo del Eka-Rhenio, con el número atómico 93.

CAPITULO XII

CONCLUSIONES E IMPORTANCIA DE LA QUIMICA NUCLEAR

Hemos visto como ha sido posible obtener una serie de nuevas substancias radioactivas, las que seguramente son isótopos inestables que han existido en el sol, pero que han desaparecido al separarse y enfriarse la tierra. Posiblemente el uranio y el torio son los únicos sobrevivientes, debido a que su período de reducción a mitad, es largo comparado con la edad de la tierra.

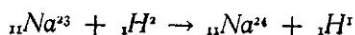
Las transmutaciones se verifican en cantidades pequeñísimas y raras veces en cantidades susceptibles de ser pesadas; pero los procedimientos de medida son tan sensibles, que aun esas pequeñísimas cantidades producen efectos apreciables en los aparatos registradores.

Para los elementos que tienen muchos isótopos, el número posible de transmutaciones debe ser muy grande.

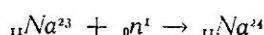
En muchos casos de transmutaciones artificiales, en especial mediante protones y deuterones, la energía emitida es aún mayor que la proveniente de los átomos radioactivos. Sin embargo, la ganancia de energía proveniente de la transformación artificial de los átomos, no parece ser posible, dentro de nuestro estado actual de conocimientos.

Mediante el cyclotron, por acción de los deuterones sobre berilio, es posible obtener neutrones, con los cuales se han efectuado interesantes experiencias biológicas, y se ha encontrado que tienen una acción entre 2 y 5 veces superior a la que se obtiene haciendo actuar rayos X sobre seres animales.

Igualmente mediante el cyclotrón, es posible producir radio-sodio, cantidades equivalentes a $\frac{1}{2}$ grs. de radio por la acción de deuterones sobre sodio:



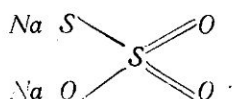
Este radio-sodio ha sido preparado también por Fermi, pero en cantidades muy pequeñas, empleando neutrones lentos:



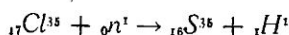
Este sodio radioactivo, en forma de cloruro de sodio, no se diferencia químicamente del sodio corriente, y puede prepararse en forma de solución e inyectarse en el ser viviente, produciendo radiaciones preferenciales sobre la sangre por los rayos beta y gamma que emite. Aun este procedimiento no es de uso clínico, pero presenta ventajas sobre el tratamiento con rayos X y con radio.

De interés es también el empleo de los radios elementos artificiales, como indicadores, lo que permite el estudio de la distribución de elementos diversos en los organismos vivos. La substancia por introducir en el organismo, se mezcla con un isótopo radioactivo; el radio elemento acompaña al isótopo inactivo, y se busca en el organismo las regiones donde se producen radiaciones. Se puede estudiar así la distribución en el ser viviente de una serie de elementos.

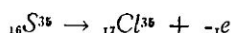
Naturalmente que este uso de los radio-indicadores no está restringido al terreno biológico, sino que tiene gran aplicación en el estudio y comprobación de fórmulas y reacciones de química corriente. Así, por ejemplo, se ha tratado de averiguar si los dos átomos de S en la molécula del hiposulfito de sodio,



pueden intercambiarse. Para resolver esta pregunta, Anderson preparó azufre radioactivo, bombardeando cloro con neutrones, de acuerdo con la reacción:



el que sabemos se descompone bajo emisión de electrones:

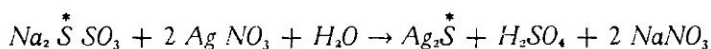


y tiene un período de reducción a mitad de 80 días. Al azufre radioactivo, obtenido de acuerdo con la primera reacción, se le agregó algo de azufre corriente, y se le disolvió en solución de soda, conjuntamente con el cloro activo y el fósforo activo que resultan de la desintegración del azufre, precipitándose en seguida mediante HCl , con la cual se obtuvo todo el azufre en forma de azufre elemental, y completamente separados del cloro y fósforo.

El azufre radioactivo obtenido según la primera reacción, se hizo hervir con sulfito:



obteniéndose el tiosulfato. Se sabe que éste se descompone por la acción del $AgNO_3$ y H_2O a la ebullición, según:



Se verificó esta operación, y el sulfuro y el ácido obtenidos se probaron en lo que se refiere a su radioactividad, con el resultado de que sólo el sulfuro era radioactivo, pero no el ácido. Se deduce que no se verifica un intercambio entre los átomos de azufre en la molécula del tiosulfato, ya que si esto ocurriese, ambos productos azufrados de la descomposición debieran ser radioactivos. En forma semejante, se han estudiado una serie de otras fórmulas y reacciones.

Cuando nuestro conocimiento de las transmutaciones sea más completo, podremos conocer la razón por la cual hay una abundancia mayor de elementos pares que impares y así, mediante el estudio de la constitución del núcleo y el de la química nuclear, no sólo habremos ampliado nuestros conocimientos sobre los diferentes elementos, sino que también sobre su abundancia relativa en el universo.

ANEXOS

ANEXO 1

ISOTOPOS DE LOS ELEMENTOS (1)

N.º Atómico	Elemento	Símbolo	Símbolo individual del isótopo	N.º masa	Peso atómico. $m^0 = 16,0000$	Fracción empírica $\times 10^6$	Abundancia del isótopo en % del total	Tiempo reducción a mitad	Naturaleza de las partículas emitidas	OBSERVACIONES
0	Neutrón.....	n	.....	1	1.0085	+ 85	.....	.....	B— (3)	
1	Hidrógeno.....	H	H ¹	1	1.00807	+ 80.7	99.98	Estable	.....	
			D	2	2.01423	+ 71.1	0.02	"		
			T	3	3.01610	+ 54	10 ⁻⁷ ?	Artificial		
2	Helio.....	He	.....	3	3.01699	+ 56.6	.....	Artificial		
			Ra-He	4	4.00336	+ 8.4	100	Estable		
				6?	.....	.....	Art.	≈ 1 s (2)		
3	Litio.....	Li	.....	5?	.....	.....	?			
				6	6.01614	+ 26.9	7.9	Estable		
			Ra-Li	7	7.01694	+ 24.2	92.1	"		
				8	8.0185	+ 23.1	Art.	0.5 s	B—	
4	Berilio.....	Be	.....	8?	.....	.....	Art.	Inestable		
				9	9.0135	+ 15.0	100	Estable		
				10?	.....	.....	Art.	Inestable	B—?	
5	Boro.....	B	.....	10	10.0146	+ 14.6	20.6	Estable		
			Ba-B	11	11.0111	+ 10.1	79.4	"		
				12	12.0176	+ 14.7	Art.	0.02 s	B—	
6	Carbon.....	C	Ra-C	11	11.0136	+ 12.4	Art.	21 m.	B+	
				12	12.0037	+ 3.0	99.3	Estable		
				13	13.0069	+ 5.0	≈ 0.7	"		
7	Nitrógeno.....	N	Ra-N	13	13.0095	+ 7.3	Art.	10.0 m.	B+	
				14	14.0076	+ 5.4	99.62	Estable		
				15	15.0053	+ 3.5	0.38	"		
			Ra-N	16	16.0069	+ 4.3	Art.	10.0 s	B—	
8	Oxígeno.....	O	Ra-O	15	15.0085	+ 5.7	Art.	2.1 m.	B+	
				16	16.0000	+ 0.00	99.76	Estable		
				17	17.0040	+ 2.3	0.04	"		
				18	18.0065	+ 3.6	0.20	"		
9	Flúor.....	F	Ra-F	17	17.0077	+ 4.5	Art.	1.2 m.	B+	
			Ra-F	19	19.0000	+ 0.0 ± 1	100	Estable		
				20	.....	.....	Art.	12 s	B—	
10	Neón.....	Ne	.....	20	19.9986	— 0.7	99.0	Estable		
				21	.....	.....	0.27	"		
				22	21.9985	— 0.7	9.73	"		
			Ra-Ne	23	.....	.....	Art.	40 s	B—	
11	Sodio.....	Na	Ra-Na	22	.....	.....	Art.	> ½ a	B+	
				23	.....	.....	100	Estable		
			Ra-Na	24	.....	.....	Art.	14.8 h.	B—	

(1) He creído de interés publicar como anexo esta lista de elementos y sus isótopos, confeccionada en la Universidad de Chicago, EE. UU., a principios de 1937.

(2) a=años; d=días; h=horas; m=minutos; s=segundos.

(3) B—=rayos beta=electrón; B+=positrón; A=rayos alfa,

N.º Atómico	Elemento	Símbolo	Símbolo individual del isótopo	N.º masa	Peso atómico: $0^{16} = 16,0000$	Fración empaque $\times 10^4$	Abundancia del isótopo en % del total	Tiempo reducción a mitad	Naturaleza de las partículas emitidas	OBSERVACIONES
12	Magnesio...	Mg.	....	24	23.9938	— 2.6	77.4	Estable		
				25	....	....	11.5	"		
				26	....	....	11.1	"		
			Ra-Mg.	27	....	....	Art.	10 m.	B—	
13	Aluminio ...	Al	Ra-Al.	26	....	....	Art.	7 s	B+	
				27	26.9909	— 3.0	100	Estable		
			Ra-Al.	28	....	....	Art.	2.3 m.	B—	
			Ra-Al.	29	....	....	Art.	11 m.	B—?	
14	Silicio.....	Si.	Ra-Si.	27	....	....	Art.	6 m.	B+?	
				28	27.9860	— 5.0	89.6	Estable		
				29	28.9864	— 4.7	6.2	"		
				30	29.9845	— 5.2	4.2	"		
			Ra-Si.	31	....	....	Art.	2.5 h?	B—	
15	Fósforo.....	P.	Ra-P.	30	....	....	Art.	3 m.	B+	
				31	30.9844	— 5.0	100	Estable		
			Ra-P.	32	....	....	Art.	14.5 d.	B—	
16	Azúfre.....	S.	....	32	31.9812	— 6.0	97.0	Estable		
				33	....	....	9.8	"		
				34	33.9799	— 6.0	2.2	"		
			Ra-S.	35	....	....	Art.	80 d.	B—?	
17	Cloro.....	Cl.	Ra-Cl.	34	....	....	Art.	40 m.	B+	
				35	34.9796	— 5.8	76	Estable		
				37	36.9777	— 6.0	24	"		
			Ra-Cl.	38?	....	....	Art.	37 m.	B—	
18	Argón.....	A	....	36	35.976	— 6.6 ± 0.5	0.330	Estable		
				38	37.9753	— 6.5	0.05	"		
				40	39.9754	— 6.2	99.62	"		
			Rn-A.	41	....	....	Art.	110 m.	B—	
19	Potasio.....	K	....	39	....	— 7	93.4	Estable		
				40	....		0.01	10 ⁹ a	B—	
				41	....		6.6	Estable		
			Ra-K	42	....		Art.	16 h.	B—	
20	Calcio.....	Ca	....	40	....	— 7.2	96.76	Estable		
				42	....		0.77	"		
				43	....		0.17	"		
				44	....		2.30	"		
			Ra-Ca	45	....		Art.	4 h.	B—?	
21	Escandio...	Sc.	Ra-Sc	42	....	....	Art.	3 h.	B+	
			Ra-Sc.	43	....	....	Art.	4.4 h.	B+	
				45	....	— 7	100	Estable		
			Ra-Sc.	46	....	....	Art.	> 1 a	B—	
22	Titanio.....	Ti	....	46	....	— 8	8.5	Estable		
				47	....		7.8	"		
				48	....		71.3	"		
				49	....		5.5	"		
				50	....		6.9	"		
23	Vanadio.....	V.	....	51	....	....	100	Estable		
			Ra-V.	52	....	....	....	3.7 m.	B—	

N.º Atómico	Elemento	Símbolo	Símbolo individual del isótopo	N.º masa	Peso atómico. 0.º = 16,0000	Fracción empaque $\times 10^4$	Abundancia del isótopo en % del total	Tiempo reduc- ción a mitad	Naturaleza de las partículas emitidas	OBSERVACIONES
24	Cromo	Cr	.....	50	.....	.....	4.9	Estable		
				52	51.948	10 ± 3	81.6	"		
				53	.....	.....	10.4	"		
				54	.....	.....	3.1	"		
25	Manganeso	Mn	.....	55	.....	.....	100	Estable		
			Ra-Mn.	56	.....	.....	Art.	2.5 h.	B—	
26	Hierro	Fe	.....	54	.....	— 10	6.5	Estable		
				56	.....		90.2	"		
				57	.....		2.8	"		
				58	.....		0.5	"		
27	Cobalto	Co	.....	57	.....	.....	0.16	Estable		
				59	.....	.....	99.84	"		
			Ra-Co	60	.....	.....	Art.	20 m.		
28	Níquel	Ni	.....	58	57.942	— 10	67.5	Estable		
				60	.....	.....	27.1	"		
				61	.....	.....	1.7	"		
				62	.....	.....	3.8	"		
			Ra-Ni	63	.....	.....	Art.	100 m.		
				64	.....	.....	0.9	Estable		
			Ra-Ni	65	.....	.....	Art.	3 h.	B—	
29	Cobre	Cu	.....	63	.....	.....	68	Estable		
			Ra-Cu	64	.....	.....	Art.	12.8 h.	B+B—	
				65	.....	.....	32	Estable		
			Ra-Cu	66	.....	.....	Art.	6 m.	B—	
30	Zinc	Zn	.....	64	63.937	— 0.9	50.4	Estable		
				66	.....	.....	27.2	"		
				67	.....	.....	4.2	"		
				68	.....	.....	17.8	"		
				70	.....	.....	0.4	"		
31	Galio	Ga	.....	69	.....	— 0.8	61.5	Estable		
			Ra-Ga	70	.....	.....	Art.	23 h.	B+	
				71	.....	— 0.8	38.5	Estable		
			Ra-Ga	72	.....	.....	Art.	20 m.	B—	
32	Germanio	Ge	.....	70	.....	— 7.7	21.2	Estable		
				72	.....		27.3	"		
				73	.....		7.6	"		
				74	.....		37.1	"		
				76	.....		6.5	"		
33	Arsénico	As.	.....	75	74.934	-8.8 ± 1.5	100	Estable		
			Ra-As.	76	.....	.....	Art.	26 h.	B—	
34	Selenio	Se	.....	74	.....	.....	0.9	Estable		
				76	.....	.....	9.5	"		
				77	.....	.....	8.3	"		
				78	77.938	— 8.0	24.0	"		
				80	79.941	-7.3 ± 2	48.0	"		
				82	.....	.....	9.3	"		
			Ra-Se	?	.....	.....	Art.	35 m.	B—	
35	Bromo	Br.	.....	79	78.929	-0.0 ± 1.5	50.6	Estable		
			Ra-Br.	80	.....	.....	Art.	4.2 h.	B—	
				81	80.926	-8.6 ± 1.5	49.4	Estable		
			Ra-Br.	82	.....	.....	Art.	18 m.	B—	
			Ra-Br.	?	.....	.....	Art.	35 h.	B—	

N.º Atómico	Elemento	Símbolo	Símbolo individual del isótopo	N.º masa	Peso atómico 0 ¹⁶ = 16,0000	Fracción enpaque $\times 10^4$	Abundancia del isótopo en % del total	Tiempo reducción a inicial	Naturaleza de las partículas emitidas	OBSERVACIONES	
36	Kriptón ...	Kr.	....	78	77.926	-9.4 ± 2	0.42	Estable			
				80	79.926	-9.1 ± 2	2.45	"			
				82	81.927	-8.8 ± 1.5	11.76	"			
				83	82.927	-8.7 ± 1.5	11.79	"			
				84	83.928	-8.6 ± 1.5	56.85	"			
				85	85.929	-8.2 ± 1.5	16.7	"			
37	Rubidio ...	Rb.	....	85	....	-8.2	72.7	Estable			
				86	....	....	....	10 ⁸ a	B---		
				87	....	-8.2	27.3	Estable			
38	Estroncio...	Sr.	....	84	....	-8.2	0.5				
				86	....		9.6	Estable			
				87	....		7.5	"			
				88	....		82.1	"			
39	Itrio	Y	....	89	....	....	100	Estable			
				90	....	....	Art.	70 h.	B---		
40	Zirconio	Zr.	....	90	....	-7	48	Estable			
				91	....		11.5	"			
				92	....		22	"			
		Ra-Zr		93	....	-7	Art.	40 h.	B---		
				94	....		17	Estable			
				96	....		1.5	"			
41	Niobio	Nb.	....	93	92.926	-8	100	Estable			
42	Molibdeno...	Mo	....	92	....	....	14.2	Estable			
				94	....	....	10.0	"			
				95	....	....	15.5	"			
				96	....	....	17.8	"			
				97	....	....	9.6	"			
				98	97.946	-5.5	23.0	"			
				99	....	....	Art.	36 h.	B---		
				100	99.945	-5.5	9.8	Estable			
43	.....	.....	....	100	....	....	Art.	30 m.	B---		
				101	....	....	....	....			
44	Rutenio ...	Ru	....	96	....	-5	5	Estable			
				99	....		12	"			
				100	....		14	"			
				101	....		22	"			
				102	....		30	"			
		Ra-Ru		103	....		Art.	40 s	B---		
				104	....		17	Estable			
		Ra-Ru		105	....		Art.	11 h	B---		
45	Rodio.....	Rh	....	101	....	-5.7	99.9	Estable			
				103	....		0.1	"			
				104	....		44 s.	B---			
				104	....		Art.	3.9m.	B---		

N.º Atómico	Elemento	Símbolo	Símbolo individual del isótopo	N.º masa	Peso atómico 0.10 = 16,0000	Fracción empaque $\times 10^4$	Abundancia del isótopo en % del total	Tiempo reduc- ción a mitad	Naturaleza de las partículas emitidas	OBSERVACIONES
46	Paladio	Pd.		102		-5.5	0.8	Estable	B+?	
			Ra-Pd.	103	.....		Art. 60 h			
				104	.....		9.3	Estable		
				105	.....		22.6	"		
				106	.....		27.2	"		
			Ra Pd.	107	.....		Art. 12 h			
				108	.....		26.8	Estable		
			Ra-Pd.	109	.....		Art. 15 m.			
				110	.....		13.5	Estable		
			Ra-Pd.	111	.....		Art. 3 m.			
47	Plata	Ag.		107		-5.3	52.5	Estable	B—	
			Ra-Ag.	108	.....		Art. 2.3 m.			
				109	.....		47.5	Estable		
			Ra-Ag.	110	.....		Art. 22 s.			
48	Cadmio.....	Cd.		106		-6.5	1.4	Estable	B—	
				108	.....		1.0	"		
				110	.....		12.8	"		
				111	.....		13.0	"		
				112	.....		24.2	"		
				113	.....		12.3	"		
				114	.....		28.0	"		
				115	.....		Art. 3.5 h.			
				116	.....		7.3	Estable		
49	Indio	In.		113		-7.4	4.5	Estable	B—	
			Ra-In	114	.....		Art. 13 s			
				115	.....		95.5	Estable		
			Ra-In	116	.....		Art. 54 m.			
50	Estaño.....	Sn		112		-7.3 $\pm$ 2	1.1	Estable	B—?	
				114	.....		0.8	"		
				115	.....		0.4	"		
				116	.....		15.5	"		
				117	.....		9.1	"		
				118	.....		22.5	"		
				119	.....		9.8	"		
				120	119.912		28.5	"		
				122	.....		5.5	"		
			Ra-Sn	123	.....		Art. 18 m.			
				124	.....		6.8	Estable		
			Ra-Sn	125	.....		Art. 8 m.			
51	Antimonio...	Sb.		121		-6	56	Estable	B—	
				123	.....		6	"		
			Ra-Sb.	124	.....		Art. 2 5 d			
52	Teluro.....	Te		120		-5	Muy raro	Estable	B—	
				122	.....		2.9	"		
				123	.....		1.6	"		
				124	.....		4.5	"		
				125	.....		6.0	"		
				126	.....		19.0	"		
			Ra-Te	127	.....		Art. 45 m.			
				128	.....		32.8	Estable		
				130	.....		33.1	"		
53	Iodo	I		127	126.932	-5.3	100	Estable	B—	
			Ra-I	128	.....		Art. 25 m			

N.º Atómico	Elemento	Símbolo	Símbolo individual del isótopo	% masa	Peso atómico: $O^{16} = 16.0000$	Fracción empaque $\times 10^4$	Abundancia del isótopo en % del total	Tiempo reducción a mitad	Naturaleza de las partículas emitidas	OBSERVACIONES
54	Xenón.....	Xe	.....	124 126 128 129 130 131 132 134 136	 133.929	 -5.3 ± 2.0	0.08 0.08 2.30 27.13 4.18 20.67 26.45 10.31 8.79	Estable » » » » » » » »		
55	Cesio.....	Cs.	 Ra-Cs.	133 134	 132.933	 -5 ± 2.0	100 Art.	Estable 1.5 h.		B—
56	Bario.....	Ba	 Ra-Ba	130 132 133 134 135 136 137 138 139	 137.916	 -6.1 ± 2	0.16 0.015 Art. 1.72 5.7 8.5 10.8 73.1 Art.	Estable » » » » » » 80 m.		B—?
57	Lantano....	La	 Ra-La	139 140	..... .....	Cambia desde -6 para La (57) hasta -3 para Lu (71).	100 Art.	Estable 1.9 d.		B—
58	Cerio.....	Ce	.....	140 142	..... .....		89 11	Estable »		
59	Praseodimio	Pr.	 Ra-Pr. Ra-Pr.	141 142 ?	..... ..... .....		100 * Art. Art.	Estable 19 h. 5 m.		B— B—
60	Neodimio ..	Nd.	 Ra-Nd.	142 143 144 145 146 147	..... ..... ..... ..... ..... .....		36 11 30 5 18 Art.	Estable » » » » 1 h.		B—
61	.....	..	.....	147	.....		.....	Estable		Producto de Nd 147.
62	Samario.....	Sa.	 Ra-Sa. Ra-Sa.	144 147 148 149 150 151 152 153 154	..... ..... ..... ..... ..... ..... ..... ..... .....		3 17 14 15 5 Art. 26 Art. 20	Estable » » » » 2 d. Estable 40 m. Estable		B— B—
63	Europio	Eu	 Ra-Eu	151 153 154	..... ..... .....		50.6 49.4 Art.	Estable » 0.2 h.		B—
64	Gadolinio ..	Gd.	 Ra-Gd.	154? 155 156 157 158 159 160	..... ..... ..... ..... ..... ..... .....		Muy raro 21 23 17 23 Art. 16	Estable » » » » 7 h. Estable		Producto de Eu 154 B—

N.º Atómico	Elemento	Símbolo	Símbolo individual del isótopo	N.º masa	Peso atómico. 0 ⁰ = 16,00000	Fración empaque $\times 10^4$	Abundancia del isótopo en % del total	Tiempo redu- cido a mitad	Naturaleza de las partículas emitidas	OBSERVACIONES
65	Terbio.....	Tb.	 Ra-Tb.	159 160	..... .....	..... .....	100 Art.	Estable 3.9 h.	B—	Producto de Tb 160
66	Disprosio ..	Dy	 Ra-Dy.	160? 161 162 163 164 165	..... ..... ..... ..... ..... .....	..... ..... ..... ..... ..... .....	Muy raro 22 25 25 28 Art.	Estable " " " 2.5 h.	 B—	
67	Helmio.....	Ho.	 Ra-Ho.	165 166	..... .....	..... .....	100 Art.	Estable 35 h.	B—	
68	Erbio.....	Er.	 Ra-Er.	165 166 167 168 169 170 171	..... ..... ..... ..... ..... ..... .....	..... ..... ..... ..... ..... ..... .....	36 Muy raro 24 30 Art. 10 Art.	Estable " ? " 12 h. Estable 7 m.	 B— B—	
69	Tulio.....	Tu.	 Ra-Tu.	169 170 171?	..... ..... .....	..... ..... .....	100 Art. Muy raro	Estable 120 d. Estable	B—	Producto de Er 171
70	Yterbio.....	Yb.	 Ra-Yb.	170? 171 172 173 174 175 176	..... ..... ..... ..... ..... ..... .....	..... ..... ..... ..... ..... ..... .....	Muy raro 9 24 17 38 Art. 12	Estable " " " 3.5 h. Estable	 B—	Producto de Tu 170
71	Lutecio.....	Lu	 Ra-Lu Ra-Lu	175 176 ?	..... ..... .....	..... ..... .....	100 Art. Art.	Estable 6-7 d. 4 h.	B— B—	
72	Hafnio.....	Hf.	 Ra-Hf.	176 177 178 179 180 181	..... ..... ..... ..... ..... .....	..... ..... ..... ..... ..... .....	5 19 28 13 30 Art.	Estable " " " " Largo	B—?	
73	Tantalio...	Ta.	.....	181	180.928	— 4	100	Estable		
74	Tungstenio (Wolframio)	W.	 Ra-W.	182 183 184 186 187	 184.00	 0	22.6 17.3 30.2 29.9 Art.	Estable " " " 1 d.	B—?	
75	Renio.....	Re.	 Ra-Re. Ra-Re	185 186 187 188	 186.981	 —1 $\pm$ 2	38.2 Art. 61.8 Art.	Estable 85 h. Estable 20 h.	B— B—	
76	Osmio.....	Os.	 Ra-Os.	186 187 188 189 190 192 193	 189.98 191.98	 —1 $\pm$ 2 —1 $\pm$ 2	1.0 0.6 13.4 17.4 25.1 42.5 Art.	Estable " " " " " 40 h.	B—?	

N.º atómico	Elementos	Símbolo	Símbolo individual del isótopo	N.º masa	Peso atómico (p.e. 16.0000)	Fracción empaque $\times 10^4$	Abundancia del isótopo en % del total	Tiempo reduci- ció a mitad	Naturaleza de las partículas emitidas	OBSERVACIONES
77	Iridio	Ir.	 Ra-Ir. Ra-Ir	191 192 193 194	..... ..... ..... .....	..... ..... ..... .....	38.5 Art. 61.5 Art.	Estable 68 d. Estable 19 h.	B--- B---	
78	Platino....	Pt.	 Ra-Pt.	192 193 194 195 196 197 198	..... ..... ..... ..... ..... ..... .....	..... ..... ..... ..... ..... ..... .....	0.8 Art. 30.2 35.3 26.6 Art. 7.2	Estable 49 m. Estable " " 14.5 h. Estable	B+ B---	
79	Oro.....	Au.	 Ra-Au.	197 198	..... .....	..... .....	100 Art.	Estable 2.7 d.	B---	
80	Mercurio	Hg.	 Ra-Hg.	196 198 199 200 201 202 203 204 205	 200.016	 +0.8±2	0.10 9.89 16.45 23.77 13.67 29.27 0.006 6.85 Art.	Estable " " " " " " " 40 h.	B--- B---	
81	Talio	Tl.	 Ra-Tl. Ra-Tl. A. C'' Th C'' Ra-C''	203 204 206 207 208 210	203.037 205.037	+1.8±2 +1.8±2	29.4 Art. 70.6 Art. Nat. rad. Nat. rad. Nat. rad.	Estable 97 m. Estable 4 m. 4.76 m. 3.1 m. 1.32 m.	B--- B--- B--- B---	
82	Plomo	Pb.	 Ra.G. AcD. ThD. RaD. AcB. ThB. RaB.	204 206 207 208 210 211 212 214	 206.00±0.01 208.00±0.01	 0.0±0.5 0.0±0.5	1.52 28.03 20.40 50.05 Nat. rad. Nat. rad. Nat. rad. Nat. rad.	Estable " " " 19 a 36.0 m. 10.6 h. 26.8 h.	B--- B--- B--- B---	
83	Bismuto ..	Bi.	 RaE. AcC. ThC. RaC.	209 210 211 212 214	..... ..... ..... ..... ..... .....	+0.5±1	100 Nat. rad. y art. Nat. rad. Nat. rad. Nat. rad.	Estable 4.9 d. " 2.16 m. 60.5 m. 19.7 m.	B--- A y B--- A y B--- A y B---	
84	Polonio	Po.	RaF. AcC' ThC' RaC' AcA ThA RaA	210 211 212 214 215 216 218	210.01±0.01	+0.5±0.5	Nat. rad. y art. Nat. rad. " " " " "	140 d. " 5.10 ⁻³ s 1.01 ⁻⁹ s 10 ⁻⁶ s 2.10 ⁻⁸ s 0.14s 3.05 m	A A A A A A	
85	.....	?								

N.º Atómico	Elementos	Símbolo	Símbolo individual del isótopo	N.º masa	Peso atómico $0^{16} = 16.0000$	Fracción enriquecimiento $\times 10^3$	Abundancia del isótopo en % del total	Tiempo reducción a mitad	Naturaleza de las partículas emitidas	OBSERVACIONES
86	Emanación...	Em.	An Tn Rn	219 220 222	 222.04 ± 0.01	 $+1.8 \pm 0.5$	Nat. rad. Nat. rad. , ,	3.92 s. 54.5 s. 3.825 d	A A A	
87	.....	?								
88	Radio.....	Ra	AcX ThX RaI MsTh ₁ A ²²⁹ ₈₈	223 224 226 228 229	 226.05 ± 0.01	 $+2.2 \pm 0.5$	Nat. rad. , , , , , , Art.	11.2 d. 3.64 d. 1590 a 6.7 a. 1 m.	A A A A B—	
89	Actini Ekalantano	Ac (El)	AcI MsTh ₂ B ²²⁹ ₈₉	227 228 229	.... .... ....	.... .... ....	Nat. rad. , , Art.	13.5 a. 6.13 h. 12 m.	B— B— B—	
90	Torio.....	Th	AcRe RaTh Io UY ThI UX ₁	227 228 230 213 232 233 234	 232.070 .... ....	.... .... .... .... .... .... ....	Nat. rad. , , , , , , , , , , , ,	18.9 d. 1.90 a. 83.104 a 24.6 h. 1.8.10 ¹⁰ a. 30 m. 24.5 d.	A A A B— A B— B—	
91	Ekatántalo..	Et	Pa A ²³³ ₉₁ UX ₂₀ Bv UZ	231 233 234 234	231.073 ± 0.01	$+3.2 \pm 0.5$	Nat. rad. Art. Nat. rad. , ,	32.000 a 2.5 m. 1.14 m. 6.7 h.	A B— B— B—	
92	Uranio	U	UII AcU UI 239? 239?	234 235 238 239? 239?	 235.084 ± 0.01 238.088 ± 0.01	 3.6 ± 0.5 $+3.7 \pm 0.5$	Nat. rad. , , 0.4% Nat. rad. 99.6% Art. Art.	3.10 ⁸ a 4.10 ⁹ a 4.45—10 ⁹ a 10 s. 40 s.	A A A B— B—	
93	Ekarenio ...	En	....	237? 239?	.... ....	.... ....	Art. Art.	2.2 ± 2 m. 10 ± 1 m.	B— B—	
94	Ekaosmio ...	Es	....	239?	....	....	Art.	59 ± 2 m.	B—	

ANEXO 2

LA ESTRUCTURA ELECTRONICA DE LOS DIFERENTES ATOMOS

Elemento	Número Atómico	Número de electrones en los estratos electrónicos						
		K	L	M	N	O	P	Q Estratos
H	1	1						
He	2	2						
Li	3	2	1					
Be	4	2	2					
B	5	2	3					
C	6	2	4					
N	7	2	5					
O	8	2	6					
F	9	2	7					
Ne	10	2	8					
Na	11	2	8	1				
Mg	12	2	8	2				
Al	13	2	8	3				
Si	14	2	8	4				
P	15	2	8	5				
S	16	2	8	6				
Cl	17	2	8	7				
Ar	18	2	8	8				
K	19	2	8	8	1			
Ca	20	2	8	8	2			
Sc	21	2	8	9	2			
Ti	22	2	8	10	2			
V	23	2	8	11	2			
Cr	24	2	8	13	1			
Mn	25	2	8	13	2			
Fe	26	2	8	14	2			
Co	27	2	8	15	2			
Ni	28	2	8	16	2			
Cu	29	2	8	18	1			
Zn	30	2	8	18	2			
Ga	31	2	8	18	3			
Ge	32	2	8	18	4			
As	33	2	8	18	5			
Se	34	2	8	18	6			
Br	35	2	8	18	7			
Kr	36	2	8	18	8			
Rb	37	2	8	18	8	1		
Sr	38	2	8	18	8	2		
Y	39	2	8	18	9	2		
Zr	40	2	8	18	10	2		
Nb	41	2	8	18	12	1		
Mo	42	2	8	18	13	1		
Ma	43	2	8	18	14	1		
Ru	44	2	8	18	15	1		
Rh	45	2	8	18	16	1		
Pd	46	2	8	18	18			
Ag	47	2	8	18	18	1		
Cd	48	2	8	18	18	2		
In	49	2	8	18	18	3		
Sn	50	2	8	18	18	4		
Sb	51	2	8	18	18	5		
Te	52	2	8	18	18	6		
I	53	2	8	18	18	7		
Xe	54	2	8	18	18	8		
Cs	55	2	8	18	18	8	1	
Ba	56	2	8	18	18	8	2	
La	57	2	8	18	18	9	2	

Elemento	Número Atómico	Número de electrones en los estratos electrónicos						
		K	L	M	N	O	P	QEstratos
Ce	58	2	8	18	10	9	2	
Pr	59	2	8	18	20	9	2	
Nd	60	2	8	18	21	9	2	
—	61	2	8	18	22	9	2	
Sa	62	2	8	18	23	9	2	
Eu	63	2	8	18	24	9	2	
Gd	64	2	8	18	25	9	2	
Tb	65	2	8	18	26	9	2	
Dy	66	2	8	18	27	9	2	
Ho	67	2	8	18	28	9	2	
Er	68	2	8	18	29	9	2	
Tu	69	2	8	18	30	9	2	
Yb	70	2	8	18	31	9	2	
Lu	71	2	8	18	32	9	2	
Hf	72	2	8	18	32	10	2	
Ta	73	2	8	18	32	11	2	
W	74	2	8	18	32	12	2	
Re	75	2	8	18	32	13	2	
Os	76	2	8	18	32	14	2	
Ir	77	2	8	18	32	15	2	
Pt	78	2	8	18	32	17	1	
Au	79	2	8	18	32	18	1	
Hg	80	2	8	18	32	18	2	
Tl	81	2	8	18	32	18	3	
Pb	82	2	8	18	32	18	4	
Bi	83	2	8	18	32	18	5	
Po	84	2	8	18	32	18	6	
Eka-I	85	2	8	18	32	18	7	
Rn	86	2	8	18	32	18	8	
Eka-Cs	87	2	8	18	32	18	8	1
Ra	88	2	8	18	32	18	8	2
Ac	89	2	8	18	32	18	9	2
Th	90	2	8	18	32	18	10	2
U-X	91	2	8	18	32	18	11	2
U	92	2	8	18	32	18	12	2