

Prof. Ing. Rodolfo Mebus B.

# Química nuclear

TRANSMUTACION DE LOS ELEMENTOS.—RADIOACTIVIDAD ARTIFICIAL

## PRÓLOGO

Los avances que en los últimos tiempos han efectuado la Química y Física son sorprendentes, tanto en el aspecto teórico y experimental, como en el práctico.

En lo que a la Química se refiere, muchos de los adelantos teóricos, se transforman con el transcurso del tiempo en adelantos prácticos, que se traducen finalmente en nuevos procedimientos industriales.

Un punto del cual siempre se ha hablado mucho, puesto que se han esperado resultados en gran escala, ha sido el de la transmutación de los elementos, objeto principal de la alquimia, que como sabemos perseguía obtener la transformación de cuerpos corrientes, en el oro, mediante un procedimiento adecuado, cuyo eje era la piedra filosofal.

En los tiempos actuales la transmutación no es una quimera, sino que una realidad, pues ella se ha deducido teóricamente y comprobado experimentalmente.

El campo que se ha abierto con estas nuevas experiencias es fructífero e interesante en sumo grado. No sólo es posible transformar un elemento en otro, sino que sabemos transformar una substancia corriente en otra radioactiva, es decir, que posea las mismas propiedades que el radio, elemento tan útil y a la vez tan caro.

He creído de interés dar a conocer estos temas, que han sido la base de una serie de conferencias dadas en la Escuela de Verano de la Universidad de Chile, ya que en nuestro idioma no se encuentra una obra de esta índole, y las que en el extranjero se han escrito sobre el tema, son demasiado especializadas y difíciles de obtener en nuestro país.

Lo que indico en esta obra es el resultado de las experiencias recogidas durante parte del año 1936 y 1937, en mi jira a través de los países en que con especial interés se estudian y desarrollan estas materias, como ser Inglaterra, Francia, Alemania, Italia, Estados Unidos, donde he tenido ocasión de visitar sus laboratorios y universidades, oyendo personalmente o conociendo la obra de autoridades como Rutherford, Hahn, Meitner, Fermi, Joliot, Curie, Lawrence, etc.

He estimado conveniente resumir, al principio, ciertas nociones generales,

necesarias para mejor comprender la química nuclear, y he desarrollado el tema, con ejemplos comparativos, y cálculos, en forma que al final de él se tenga una noción clara de los diferentes fenómenos, y una idea sobre la posibilidad de su aplicación práctica y de la ganancia de energía contenida en el núcleo de la materia.

---

## INDICE DE MATERIAS

- CAPITULO I.—Generalidades.—Hipótesis de Proust.—Clasificación periódica de los elementos.
- CAPITULO II.—*La teoría atómica.*—Generalidades.—Estados de la materia.—Características de los átomos y moléculas.—El cero absoluto.
- CAPITULO III.—*Descubrimiento de la Radioactividad.*—Generalidades.—Los Rayos X.—La Radioactividad.—Radiaciones de los cuerpos radioactivos.
- CAPITULO IV.—*Energía.*—Generalidades.—Propagación de la energía.—Espectro de radiación.
- CAPITULO V.—*Materia y Radiación.*
- CAPITULO VI.—*Constitución del Atomo.*—Generalidades.—Modelo de Rutherford.—Teoría de Bohr-Sommerfeld.—Isótopos.—Isóbaros.
- CAPITULO VII.—*Transformaciones Radioactivas.*—Generalidades.—Duración de la desintegración.—Equilibrio radioactivo.—Propiedades de los cuerpos radioactivos.—Revelación de las radiaciones y de las partículas rápidas; cámara de ionización; contador; cámara de Wilson.
- CAPITULO VIII.—*El Núcleo.*—Generalidades.—Neutrón.—Positrón.—Constitución del núcleo.—Energía del núcleo.—Teoría de Gamow.—Neutrino.—Electrones emitidos por el núcleo.—Anti-neutrino.—Protón negativo.—Núcleo isómero.
- CAPITULO IX.—*Química Nuclear.*—Generalidades — Electrón-Volt — Equivalencia entre masa y energía.—Energía y masa en las transmutaciones.—Conservación de la masa y energía.—Energía de unión.—Defecto de masa.—Fración de empaque.—Aceleración de las partículas (ciclotrón, etc.).
- CAPITULO X.—*Transmutación Artificial.*—Generalidades.—Primeras transmutaciones empleando rayos alfa.—Mecanismo de la transmutación con rayos alfa.—Diferentes transmutaciones mediante partículas alfa.—Otras partículas empleadas en las transmutaciones.—Transmutaciones empleando neutrones.—Transmutaciones mediante protones.—Transmutaciones mediante deuterones.—Transmutaciones mediante rayos gamma.—Producción de positrones mediante rayos gamma.—El núcleo como fuente de energía.—Energía nuclear que llega a la tierra.
- CAPITULO XI.—*Radioactividad Artificial.*—Generalidades.—Revelación de la radioactividad artificial.—Empleo de protones y deutones.—Empleo de neutrones.—Diferentes transformaciones para el mismo núcleo.—Bombardeo del uranio.—Neutrones lentos.
- CAPITULO XII.—*Conclusiones e Importancia de la Química Nuclear.*
-

## CAPITULO I

## GENERALIDADES

La concepción universalmente aceptada respecto a la constitución de la materia, es la concepción atómica; debido a la manera lógica como explica los hechos y al sinnúmero de pruebas que ella ha dado, ya no se la considera como una simple teoría, sino que como una realidad.

Si nos remontamos a tiempos muy antiguos, y estudiamos las ideas que, respecto a la constitución de la materia se han tenido, vemos que, hasta no hace mucho, la mayor parte de ellas se han basado en elucubraciones filosóficas.

En los primeros tiempos se consideraba, tanto a la substancia de los objetos, como a la energía en ellos contenidos, evidencias de la presencia de los dioses o demonios, seres similares a los hombres, y que para sus actos se regían sólo por su voluntad arbitraria; en aquella época, aun los rudimentos de las ciencias, en la forma que hoy los entendemos, no existían.

De aquellos tiempos prehistóricos, los pueblos evolucionaron y llegamos a razas de alta inteligencia como los samarios y egipcios, que ya empleaban nociones matemáticas no del todo simples. Después tenemos a los griegos, que produjeron filósofos eminentes, cuyas teorías abarcaban a la mayor parte de las actividades humanas de aquellos tiempos.

En la época de los griegos, no se trataba de verificar experimentalmente las diversas teorías que sobre la constitución de la materia existían, para decidir cual era la verdadera, sino que todas esas teorías filosóficas conducían a discusiones que trataban de probar por la fuerza de los argumentos, si la última substancia que componía la materia era continua como el agua, o discontinua como la arena.

Leucipo (500 A. C.) y Demócrito (460 A. C.) dieron una teoría de la materia muy semejante a la sustentada en el siglo XIX. Ellos suponían que la materia estaba compuesta de sólidos, indivisibles, tan pequeños que eran invisibles e infinitos en número; estas partículas en continuo movimiento, se combinaban en diferentes formas con otras para originar los diversos cuerpos.

Mucho más tarde, en el siglo XVI, tenemos al célebre filósofo inglés Francisco Bacon (1561-1626) quien, efectuando estudios experimentales sobre la compresión del aire, llegó a la conclusión de que la materia debe estar construída por partículas separadas por espacios vacíos. Sir Isaac Newton (1642-1727) participó de esta misma idea.

Las ideas sobre la existencia de los átomos que Newton profesaba, no estaban apoyadas por hechos experimentales que le dieran una base efectiva de soporte.

Estaba reservado a Dalton (1766-1844), profesor de Matemáticas y Filosofía en Manchester, Inglaterra, el colocar la teoría atómica de la materia, sobre bases experimentales y cuantitativas, y explicarla en forma lógica y exacta, el año 1803. A Dalton, con razón se le ha llamado «el padre de la teoría atómica».

Dalton admite que cada elemento está formado por un enorme número de partículas todas iguales entre sí, llamadas átomos, las que pueden soportar todas las acciones físicas o químicas, sin que sus propiedades se modifiquen. Agrupando un

número bien determinado de átomos, se obtiene la molécula; el elemento simple está constituido por uno o varios átomos iguales, y el compuesto químico por la unión de átomos diferentes. Respecto a las dimensiones de los átomos y moléculas, Dalton no la indicaba, ponía sólo un límite superior, diciendo que esas partículas no eran visibles ni con los medios más potentes de aumento.

Por otro lado los físicos, por diversas consideraciones, llegaron a establecer la teoría cinética de la materia, basada sobre el hecho de que las partículas que constituyen la materia no se encuentran inmóviles, sino que se mueven con velocidades que dependen de su energía.

De todas estas ideas nació la teoría atómica, que explicaremos en el capítulo siguiente.

*Hipótesis de Proust.*—A principios del siglo XIX, cuando las determinaciones de los pesos atómicos no eran muy precisas, Proust propuso su hipótesis de que los pesos atómicos de los elementos eran múltiplos enteros del más liviano de ellos, el hidrógeno, y que los átomos de los elementos estaban constituidos por la unión, en diferente número, de átomos de hidrógeno. Al determinarse con mayor precisión los pesos atómicos, se vió que la mayoría de ellos no eran números enteros, y en consecuencia, la hipótesis de Proust se abandonó. Veremos más adelante que en la actualidad esta idea, aunque en forma algo diferente, ha tomado interés nuevamente.

*Clasificación periódica de los elementos.*—Al abandonarse la teoría de Proust, siempre quedó la idea de que debía existir cierta relación fundamental entre los diferentes átomos. Se han ensayado varias clasificaciones de los elementos, con el objeto de dejar en evidencia estas relaciones, siendo la clasificación periódica de Mendelejeff, enunciada en 1869, la que, con algunas modificaciones ha persistido y presta grandes servicios en la actualidad. La base de esta clasificación está en el hecho de que las propiedades de los elementos son funciones periódicas de sus pesos, o más propiamente, de sus números atómicos.

Ordenando los elementos de acuerdo con sus pesos atómicos crecientes, y colocándolos en las casillas correspondientes, lámina 1, se observa que en las columnas verticales se encuentran los elementos de propiedades semejantes.

Volveremos nuevamente sobre esta clasificación.

## CAPITULO II

### LA TEORIA ATOMICA

*Generalidades.*—Todos los experimentos, efectuados hasta hace poco tiempo, llevaron a la conclusión de que los objetos en el Universo estaban formados por un número limitado, noventa y dos, de substancias elementales llamadas «elementos químicos»; entre estos elementos tenemos gases como hidrógeno, helio, oxígeno, etc., metales como oro, plata, cobre, fierro, etc., y no-metales como azufre, arsénico, etc. Estos elementos están formados por «átomos», indivisibles por procedimientos químicos y característicos para cada elemento, principalmente por su peso.

Los átomos tienen cierta tendencia a unirse entre sí, formando grupos llamados «moléculas». Los gases nobles, helio, argón,—criptón, neón, son mono-atómicos,

LAMINA I

SISTEMA PERIODICO

|   | A I B            | A II B           | A III B          | A IV B           | A V B            | A VI B         | A VII B         | A VIII B        |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 1 H<br>1.008     |                  |                  |                  |                  |                |                 | 2 He<br>4.00    |
| 2 | 3 Li<br>6.94     | 4 Be<br>9.02     | 5 B<br>10.82     | 6 C<br>12.00     | 7 N<br>14.01     | 8 O<br>16.00   | 9 F<br>19.00    | 10 Ne<br>20.18  |
| 3 | 11 Na<br>23.00   | 12 Mg<br>24.32   | 13 Al<br>26.97   | 14 Si<br>28.09   | 15 P<br>31.02    | 16 S<br>32.06  | 17 Cl<br>35.46  | 18 Ar<br>39.94  |
| → | 19 K             | 20 Ca.           | 21 Sc            | 22 Ti            | 23 V.            | 24 Cr.         | 25 Mn           | 26 Fe           |
| 4 | 39.10            | 40.08            | 45.10            | 47.90            | 50.95            | 52.01          | 54.93           | 55.84           |
|   | 29 Cu<br>63.57   | 30 Zn<br>65.38   | 31 Ga.<br>72.60  | 32 Ge<br>72.60   | 33 As.<br>74.93  | 34 Se<br>79.2  | 35 Br<br>79.92  | 36 Kr<br>82.9   |
| 5 | 37 Rb<br>85.44   | 38 Sr.<br>87.63  | 39 Y<br>88.92    | 40 Zr.<br>91.22  | 41 Nb<br>93.3    | 42 Mo<br>96.0  | 43 Tc           | 44 Ru<br>101.7  |
|   | 47 Ag.<br>107.88 | 48 Cd<br>112.41  | 49 In.<br>114.8  | 50 Sn.<br>118.70 | 51 Sb.<br>121.76 | 52 Te<br>127.5 | 53 I<br>126.93  | 54 Xe<br>130.2  |
| 6 | 55 Cs.<br>132.81 | 56 Ba.<br>137.36 | Tierras<br>raras | 72 Hf.<br>178.6  | 73 Ta.<br>181.4  | 74 W<br>184.0  | 75 Re<br>186.31 | 76 Os<br>190.8  |
|   | 79 Au.<br>197.2  | 80 Hg.<br>200.61 | 81 Tl<br>204.39  | 82 Pb<br>207.22  | 83 Bi<br>209.00  | 84 Po<br>210   | 85              | 77 Ir.<br>193.1 |
| 7 | 87               | 88 Ra<br>225.97  | 89 Ac.<br>226 +  | 90 Th.<br>232.12 | 91 Pa.<br>230.   | 92 U<br>238.14 |                 | 78 Pt<br>195.23 |

TIERRAS RARAS

|                 |                 |                 |                 |                |                 |                |                |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 57 La<br>138.90 | 58 Ce<br>140.13 | 59 Pr<br>140.92 | 60 Nd<br>144.27 | 61 Pm<br>146.  | 62 Sm<br>150.43 | 63 Eu<br>152.0 | 64 Gd<br>157.3 |
| 65 Tb<br>159.2  | 66 Dy<br>162.46 | 67 Ho<br>163.5  | 68 Er<br>167.64 | 69 Tm<br>169.4 | 70 Yb<br>173.5  | 71 Lu<br>175.0 |                |

su molécula se compone de un átomo, al igual que algunos metales al estado de vapor; otros elementos, como el hidrógeno, oxígeno, etc., son bi-atómicos, su molécula se compone de 2 átomos,—otros son tri-atómicos, etc.

Hay que observar que en algunos cuerpos, el número de átomos de la molécula varía con la temperatura; por ejemplo, el azufre a baja temperatura corresponde a  $S_8$ ; los vapores de azufre contienen  $S_6$ . Átomos de diferentes clases se unen entre sí para formar las moléculas de los cuerpos compuestos; la sal común, cloruro de sodio, está constituida por moléculas compuestas cada una de un átomo de sodio y uno de cloro. Cada «compuesto químico» está constituido por moléculas características, todas iguales entre sí.

Los átomos y las moléculas ejercen respectivamente entre sí acciones de atracción, debido a la fuerza de cohesión, la que, hasta cierto límite es tanto mayor mientras menor sea la distancia. Dijimos ya, que según la «teoría cinética», las partículas que constituyen la materia, se mueven constantemente con velocidad proporcional a su energía. Si el cuerpo se calienta, aumenta su energía y en consecuencia aumenta también la velocidad de sus moléculas, y viceversa, si se enfría, disminuye esa velocidad; de aquí que el movimiento molecular se llama también agitación térmica.

*Estados de la materia.*—El estado más simple de la materia es el «estado gaseoso» en el cual las moléculas, en término medio, están separadas y se mueven tan despacio, que no ejercen entre sí atracciones apreciables, y la energía molecular es grande con respecto a la fuerza de cohesión; las moléculas tienen la tendencia a difundir y alejarse a no ser que estén contenidas en un recipiente. Si se encuentran contenidas en un recipiente, las moléculas chocarán contra las paredes de él; el efecto aislado de cada una es insignificante, pero debido al enorme número de ellas, el efecto resultante es grande, y aparece como si fuera continua: es la «presión» del gas sobre el recipiente. Si el recipiente contiene aire a la presión ordinaria, la fuerza total sobre cada centímetro cuadrado es de 1 atmósfera; estando el aire presente a ambos lados de la pared del recipiente, las fuerzas interiores y exteriores se equilibran, y no se nota efecto, pero si se elimina el aire de uno de los lados de la pared del recipiente, por algún método adecuado, el recipiente se quebraría a no ser que fuera sumamente sólido. La presión del gas aumenta al aumentar el número de moléculas (o sea, la concentración), y la velocidad de ellas (o sea la temperatura).

Si la temperatura y en consecuencia la velocidad se disminuye, y se acercan las paredes del recipiente comprimiendo las moléculas, la fuerza de cohesión aumenta, las moléculas se acercan unas a otras y no tienen la tendencia a alejarse espontáneamente; tenemos el «estado líquido»; el volumen del líquido como sabemos no varía, pero la forma de su superficie depende de la forma del recipiente que lo contiene.

Continuando el enfriamiento y compresión, las moléculas del líquido se acercan más, y se encuentra más firmemente atraídos entre sí, pues la fuerza de cohesión resulta grande respecto a la energía molecular; las moléculas podrán vibrar sólo en torno a una posición de equilibrio, el conjunto toma una forma definida, la que se conserva aún retirando el recipiente que lo contiene: tenemos el «sólido».

El cambio de estado de un cuerpo, a gas, líquido o sólido, se interpreta como una variación en la razón entre la energía molecular que tiende a separar las moléculas y la fuerza de cohesión, que tiende a acercarlas. El sólido puede convertirse en lí-

quido y éste en gas, o viceversa, como lo vemos en el caso del agua, que existe en los tres estados, y que puede hacerse pasar del uno al otro, por simple calentamiento. Supongamos que tenemos un pedazo de hielo (estado sólido), en que la fuerza de cohesión es grande respecto a la energía molecular, y las moléculas en consecuencia quedan ligadas a la posición de equilibrio; si lo calentamos, se fundirá, pasando al estado líquido, y entre 0° y 100° las moléculas van adquiriendo una energía siempre mayor, suficiente para vencer la cohesión y se moverán con velocidad creciente a través del líquido. Si se aumenta el calentamiento, el agua comenzará a hervir y el vapor escapará del recipiente; las moléculas, debido a la gran energía adquirida, se pueden mover libremente en cualquier dirección.

*Características de los átomos y moléculas.*—Para estudiar cuantitativamente la propiedad de un gas, se podría pensar en observar el comportamiento de cada molécula; si esto se quisiera hacer, ello no sería posible, por cuanto cada molécula choca continuamente con otra, en forma violenta, desviándose su trayectoria en forma brusca, desordenada e irregular, y resultando en consecuencia de un aspecto complicadísimo. Sin embargo, las leyes a que obedecen los gases son simples y se han determinado de una manera relativamente fácil. Para ello se estudia el comportamiento de un gran número de moléculas en conjunto, y se toma el valor medio de los resultados; mientras mayor es el número de moléculas observadas, tanto más quedan atenuadas las irregularidades.

Mediante diferentes métodos de estudio se ha llegado a conclusiones precisas sobre las características de las moléculas y átomos.

Los átomos de los diferentes elementos difieren entre sí en tamaño, pero en término medio se puede decir que el radio atómico es de  $10^{-8}$  cms., o sea  $\frac{1}{100.000.000}$  centímetros; esto significa que, si pusieramos en fila, un átomo a continuación del otro, en 1 cm. de largo tendríamos 50.000.000 de átomos. La masa del átomo de hidrógeno es de unos  $1.67 \cdot 10^{-24}$  grs.

Las moléculas tienen, como dijimos, una dimensión pequeñísima; vimos que las de los gases nobles se componían de un átomo, la de los otros elementos inorgánicos de pocas, y las de los compuestos orgánicos pueden contener algunas decenas de átomos.

Para darnos cuenta de las dimensiones de las moléculas, nos basta con saber el número de átomos que contiene la molécula, y el tamaño de aquéllos. Con el objeto de formarnos una idea sobre el orden de magnitud, consideramos el caso de la molécula de agua,  $H_2O$ , que se compone de 3 átomos (1 de oxígeno y 2 de hidrógeno). Se ha calculado que en 1 gota de agua entran  $10^{21}$  moléculas, o sea: 1.000.000.000.000.000.000.000 moléculas; esto significa que en una gota de agua hay tantas moléculas, como gotas de agua hay en el mar Adriático.

Las moléculas, y en consecuencia los átomos que las componen se encuentran, como vimos, en continuo movimiento, y su velocidad media depende de su masa y de la temperatura, siendo más rápida la molécula de menor masa y mayor temperatura. En las condiciones normales una molécula de oxígeno tiene una velocidad de 425 m/seg.; como continuamente choca con otras moléculas, dado el número enorme que de ellas hay en un pequeñísimo espacio, cambia continuamente de dirección. Se llama «camino medio libre», el término medio del camino que puede

recorrer una molécula sin recibir choque; este valor depende naturalmente de la distancia que hay entre las moléculas, o sea de la presión a que se encuentra el gas; si éste se encuentra a la presión atmosférica, el camino medio libre de la molécula es alrededor de  $\frac{1}{100.00}$  cms. o sea, que dá 100.000 choques antes de recorrer

1 cm., y recibe cerca de  $4 \times 10^6$  choques por segundo; para darnos cuenta de este último número, basta pensar que si un hombre se pusiera a contar continuamente tanto de noche como de día, se demoraría 32 años para contar hasta  $1 \cdot 10^6$ .

*El cero absoluto.*—Hemos visto que la velocidad de las moléculas aumenta con el calor y disminuye con el frío. Disminuyendo la temperatura de un cuerpo más y más, la velocidad de las moléculas disminuye más y más, y a la temperatura de  $273^\circ$  C bajo cero, la velocidad es nula, y un gas a esta temperatura no ejerce presión (suponiendo que quedara gaseoso a  $273^\circ$  C, pues sabemos que ya a temperatura cercana a ésta, se ha verificado la licuefacción o solidificación de todo gas).

Disminuyendo la velocidad de las moléculas, su energía cinética disminuye, de modo que a  $-273^\circ$  C. no existe esta clase de energía. Lo que llamamos la energía calorífica de un cuerpo, es la suma de las energías cinéticas de cada una de sus moléculas; si no hay movimiento molecular, entonces el cuerpo no contiene calor, y como no puede enfriarse más, a la temperatura a la cual eso ocurre, o sea  $-273^\circ$  C., se le llama el cero absoluto. De paso observaremos que lo que llamamos temperatura de un cuerpo es sólo una medida comparativa de la velocidad de sus moléculas; mientras más energía calorífica contiene un cuerpo, más rápido se moverán sus moléculas, y mayor será su temperatura.

### CAPITULO III

#### DESCUBRIMIENTO DE LA RADIOACTIVIDAD

*Generalidades.*—La creencia en la posibilidad de efectuar la transmutación de la materia se remonta a los principios de la era cristiana. Principalmente en la Edad Media, se buscó con ahinco la «piedra filosofal» que debería tener la propiedad de transformar un elemento en otro, y en especial a los metales comunes en oro y plata. La existencia de esta idea se debía en gran parte a la concepción filosófica de Aristóteles sobre la constitución de la materia, según la cual todos los cuerpos deberían estar formados por las mismas cuatro substancias fundamentales, «aire, agua, fuego y tierra», las que diferían una de otra por poseer en diferente grado la propiedad de «seco, húmedo, caliente y frío»; variando una o más de estas cualidades, las propiedades de la materia también deberían variar. Para los alquimistas era pues muy claro que, encontrando el procedimiento correcto era posible transformar una substancia en otra, y este procedimiento correcto creían encontrarlo en la piedra filosofal. Esta creencia se encontraba apoyada, en aquellos tiempos, en que muy poco se sabía sobre las combinaciones químicas, por los cambios característicos que sufrían las substancias en sus propiedades y apariencia, debido a la acción química de otros cuerpos.

Tras el descubrimiento de la piedra filosofal se lanzaron, tanto los estudiosos

como los ilusos de todo género. Cada cierto tiempo aparecían personas que decían haber encontrado el tan deseado procedimiento, pero no hay duda que ni una ínfima partícula de oro fué producida por los alquimistas.

Aun cuando en el innumerable material que aportaron tales investigaciones, encontramos descubrimientos de valor, que fueron formando la base de la química, no es de extrañarse que los alquimistas encontraran mucha gente incrédula y enemigos. Dante, por ejemplo, coloca a los alquimistas en la última parte del infierno, y la República de Venecia había prohibido la práctica de la alquimia. Se cuenta que cierto alquimista se presentó ante el Papa León X, para explicarle el haber fabricado una piedra filosofal, que daba la posibilidad de producir innumerable cantidad de oro, con la esperanza de obtener una magnífica recompensa; el Papa, después de oírlo atentamente le regaló un gran saco, para que guardara dentro todo el oro que pensaba producir.

Si pensamos en los reducidos medios de experimentación que se disponía en aquellos tiempos, vemos que la transmutación de la materia era una quimera.

Cuando la alquimia evolucionó y tomando bases científicas se transformó en la química, la idea de la transmutación apareció como imposible para los estudiosos, aún cuando quedó flotando en el ambiente del público, encontrándose charlatanes o ilusos, de extraordinaria verbosidad, que hacían creer a más de una persona el disponer de un procedimiento secreto para producir grandes cantidades de oro; veremos que en la actualidad podemos producir pequeñísimas cantidades de oro, por procedimientos costosos, y a partir de otro metal más costoso, el platino.

En el siglo pasado se llegó a la conclusión que la materia se podía reducir a 70 o más elementos diferentes, los átomos de los cuales aparecían como permanentes e indestructibles; las fuerzas físicas y químicas eran incapaces de alterar a los átomos.

Dos importantes hechos acaecidos a fines del siglo pasado, el descubrimiento de los rayos X (1895) y el de la radioactividad (1896) hicieron cambiar a principios de este siglo, debido a sus consecuencias, la idea de la permanencia de los átomos y de la imposibilidad de la transmutación de la materia.

*Los Rayos X.*—En el año 1895, el físico alemán Wilhem Konrad Roentgen, trabajando con una descarga eléctrica verificada en un tubo evacuado, descubrió que éste era la fuente de producción de una radiación invisible, desconocida, que llamó «rayos X» y que tantos beneficios ha producido a la humanidad por sus aplicaciones en medicina; encontró que estos rayos tenían la propiedad de atravesar madera, láminas metálicas de poco espesor, producir la fosforescencia de ciertas sustancias químicas, como el platino-cianuro de bario, y de ennegrecer las placas fotográficas.

Las consecuencias de este descubrimiento fueron revolucionarias. Otros investigadores trabajando con rayos X, encontraron que cuando estos eran dirigidos a un recipiente que contenía aire u otro gas, provisto interiormente de electrodos conectados a una fuente eléctrica, el gas que originalmente era aislador, se transformaba inmediatamente en un buen conductor eléctrico, y la corriente pasaba libremente de un electrodo al otro.

Para explicar este hecho, se supuso que los rayos X quebraban o ionizaban a las moléculas y átomos del gas, en iones positivos y negativos, y que la emigración

de estos iones hacia los electrodos eran la causa del paso de la corriente, tal como en el caso de la electrolisis. Se encontró que este fenómeno se producía también con gases mono-atómicos, o sea se dedujo que el átomo debía tener una constitución y que era posible quebrarlo o dividirlo. Para las partículas positivas se encontró que eran diferentes según la clase de gas empleado, y se dedujo que eran átomos de gas cargados eléctricamente. Respecto a las negativas se vió que eran iguales cualquiera que fuese el gas empleado, y se les llamó «electrones».

Se demostró que los electrones eran verdaderos átomos de electricidad, y no partículas materiales electrizadas como eran los iones positivos, y se dedujo que los átomos y, por consiguiente la materia, debía estar constituídos en parte por electricidad, independiente de lo que esta fuese.

Los electrones se pueden obtener en estado libre, calentando un metal, o exponiéndolo a la acción de rayos ultravioletas; y son emitidas espontáneamente, como veremos luego, por las sustancias radioactivas. Por diversos procedimientos, se ha medido su masa y carga eléctrica. El peso de uno de estos corpúsculos, que es 1850 veces más liviano que el átomo de hidrógeno (el elemento más liviano) es  $9,028 \cdot 10^{-28}$  grs; su carga eléctrica vale  $4,767 \cdot 10^{-20}$  unidades electrostáticas, y su velocidad puede alcanzar valores cercanos a la velocidad de la luz (300,000 Klm/seg.).

Para darnos una idea de la pequeñez de esta carga negativa, basta pensar, que el número de electrones emitidos por el filamento metálico de una ampolleta eléctrica, durante 1 segundo, es posiblemente superior al número de gotas de agua que durante los últimos 50 años han pasado bajo el puente del Mapocho.

*La radioactividad.*—La idea de la imposibilidad de la transmutación de la materia recibió un rudo choque en 1902, cuando se vió que dos sustancias radioactivas, uranio y torio, sufrían un verdadero proceso de transmutación espontánea, si bien muy lento.

La radioactividad, fenómeno que consiste en la transformación espontánea, con emisión de radiaciones, de un elemento en otro, fué descubierta por el físico francés Antoine Henri Becquerel, quien en 1896 efectuando estudios sobre la fosforescencia, llegó a la conclusión de que minerales que contenían el elemento uranio emitían radiaciones de naturaleza desconocida, semejante a los rayos X, y capaces de ennegrecer placas fotográficas.

Los esposos Curie (Pierre Curie y Marie Curie), estudiando la propiedad radioactiva de diversas sustancias, llegaron a la conclusión de que sólo el uranio y el torio eran capaces de emitir radiaciones. En el año 1898 encontraron que un mineral de uranio proveniente de Joachimstal, Bohemia, llamado pechblenda, poseía un poder radioactivo mayor que el uranio metálico (el cuerpo de mayor radioactividad hasta esa fecha), y pensaron que el mineral debería contener un nuevo elemento radioactivo; mediante largas manipulaciones químicas lograron separar un nuevo cuerpo, al que llamaron polonio, en honor a la patria de la señora Curie. Después, los esposos Curie separaron otro elemento, cuyo poder radioactivo era millones de veces mayor que el del uranio, y al cual llamaron «radio».

Poco después, otros investigadores encontraron nuevos elementos radioactivos, como ser al actinio, ionio, etc.

Tanto Becquerel como los esposos Curie emplearon el electroscoipo para deter-

minar cuando un elemento era radioactivo. Este instrumento se compone (fig. 1) de una barra metálica en cuyo extremo inferior se encuentran dos delgadas y livianas láminas de oro, que pueden separarse o juntarse; la barra metálica se encuentra fija mediante substancia aisladora en un recipiente de vidrio u algo semejante. En la posición normal, las láminas de oro se encuentran juntas y verticales; si se carga eléctricamente la barra metálica, p. ej. tocándola con una barra de ebonita que previamente se ha frotado con un pedazo de género, entonces las láminas que quedarán cargadas del mismo signo, sufrirán repulsión entre sí y tenderán a alejarse. Si el electroscopio está bien aislado, las láminas permanecerán separadas; pero, si se le coloca en un medio que conduzca a la electricidad, este se carga, la repulsión entre las láminas disminuye, y su peso hace que se junten.

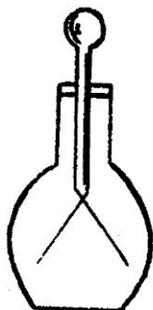


Fig. 1.—El electroscopio.

El aire o un gas se vuelve conductor, o sea se ioniza, mediante rayos X, como vimos, y también mediante las radiaciones emitidas por las substancias radioactivas. La ionización del gas, o sea la cantidad de electricidad llevada por los iones, depende del número de éstos y, por consiguiente, de la capacidad que tiene la radiación de descomponer al átomo en iones; el efecto producido al ionizarse un gas con la misma clase de radiaciones será tanto mayor cuanto mayor sea la cantidad de rayos que atraviesan el gas.

Si dentro del recipiente de un electroscopio cargado, colocamos una substancia radioactiva, el aire se ionizará, las láminas del electroscopio tenderán a juntarse, y tanto más rápidamente, cuanto mayor sea la velocidad con que se ioniza el aire; comparando los tiempos que se demoran las láminas en aproximarse en cierta longitud, se tiene una comparación del poder radioactivo (cantidad de radiaciones emitidas) de diversas substancias, y tomando a una como tipo, se podrá determinar el poder radioactivo relativo de diversas substancias.

*Radiaciones de los cuerpos radioactivos.*—Lord Rutherford, estudiando las radiaciones de las substancias radioactivas, llegó a la conclusión, basándose en sus diversos poderes penetrantes, que tales radiaciones podían dividirse en 3 clases, que fueron llamadas rayos alfa, beta y gamma.

Estas tres clases de rayos pueden ponerse en evidencia basándose en su diversa propiedad eléctrica. En un bloque de plomo, al cual se le ha hecho una pequeñísima cavidad, se coloca un grano de substancia radioactiva; el bloque de plomo absorbe todas las radiaciones, de modo que estas sólo pueden salir en dirección rectilínea a través de la abertura de la cavidad. Si colocamos nuestro bloque entre dos láminas metálicas cargadas, una negativa y la otra positivamente, observaremos (figura 2) que el haz de rayos se dividirá en 3: uno se desvía hacia la placa positiva, otro hacia la negativa, y un tercero sigue rectilíneo sin sufrir desviación. Estas desviaciones pueden ponerse en evidencia mediante una placa fotográfica, o bien puede hacerse visible su camino mediante la cámara de expansión de Wilson, que estudiaremos más adelante.

De esto se deduce que el haz que se desvía hacia la placa negativa debe estar

cargado positivamente, el que se desvía en sentido contrario negativamente, y el que no se desvía no debe llevar carga eléctrica.

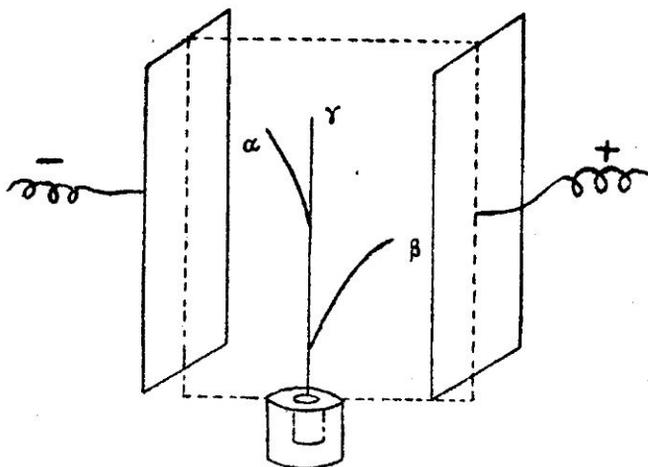


Fig.-2.-Desviación de las radiaciones radioactivas en un campo eléctrico.

El rayo positivo corresponde al rayo alfa, de menor poder penetrante; es un átomo de helio, de masa 4, cargado eléctricamente y animado de velocidades entre 12,000 y 20,000 Km/seg. Es fácilmente absorbido por láminas metálicas delgadas, y tiene un recorrido limitado en el aire (7 cms. los provenientes de  $R_a C'$ ).

El rayo negativo corresponde al rayo beta, de poder penetrante intermedio, no es partícula material, se identifica con el electrón, y posee velocidades cercanas a la de la luz.

El rayo sin carga eléctrica corresponde al rayo gamma de mayor poder penetrante; no es radiación material, sino que consiste de ondas electro-magnéticas, del tipo de las ondas luminosas y de los rayos X, y que estudiaremos más adelante.

Las radiaciones radioactivas tienen una serie de propiedades, que veremos más adelante, y desde luego podemos mencionar que son capaces de producir diversas coloraciones al atravesar sustancias como vidrio, mica, cuarzo y de hacer cambiar de color a sustancias coloreadas como el zafiro.

## CAPITULO IV

### ENERGIA

*Generalidades.*—Un cuerpo posee energía cuando es capaz de producir trabajo en sí mismo, o de comunicárselo a otro cuerpo.

La energía cinética de un cuerpo es la que posee debido a su movimiento; una bala de fusil en movimiento, por ejemplo, tiene tal clase de energía.

La energía potencial es la que posee un cuerpo como resultado de su posición elevada o debido a la tensión del cuerpo proveniente del trabajo que previamente

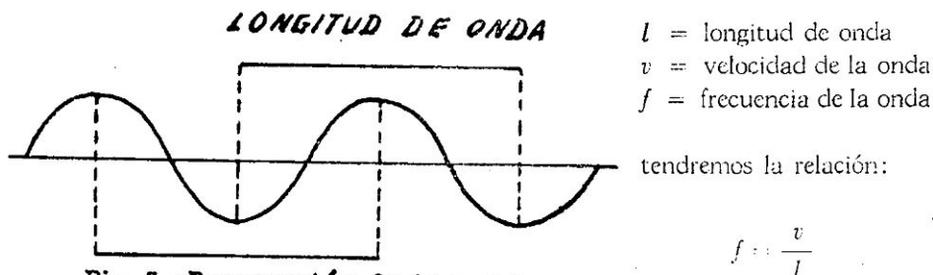
le ha comunicado otro cuerpo: el agua en la cúspide de una caída de agua, o un resorte extendido, tienen esta clase de energía.

Estas dos clases de energía son intercambiables, como puede deducirse fácilmente si pensamos en el caso de la piedra que cae. Supongamos que tenemos una piedra que hemos llevado desde el suelo hasta un cierto nivel; en esta posición la piedra posee una energía potencial. Si dejamos caer la piedra, adquiere velocidades y su energía potencial se transforma en cinética; en el momento en que el cuerpo toca el suelo, la energía cinética se ha hecho igual a la potencial que poseía en el primer instante. Aparentemente, la energía ha desaparecido, pero en realidad ella se ha convertido totalmente en energía calórica (movimiento de las moléculas) que se encuentra distribuida en la piedra y en la parte de suelo bajo ella.

Basándose en diversos hechos, se ha enunciado el «principio de la conservación de la energía», según el cual la energía en un sistema aislado es constante.

Las dos clases de energía que hemos mencionado se encuentran ligadas a la materia. Sin embargo, existen otras clases de energía, llamadas «energía de radiación», que se encuentran separadas de la materia; por ej., la electricidad transmitida por la radio-telefonía, el calor y la luz emanados de cuerpos calientes como el sol, pertenecen a esa clase de energía. Esta clase de energía puede propagarse a través de enormes distancias; así el sol, que se encuentra a unos 148.000.000 kilómetros de nosotros, nos envía cada minuto energía equivalente a 5.000.000.000.000.000.000 calorías ( $5 \cdot 10^{16}$ ) que equivalen a 440.000.000.000.000 HP ( $44 \cdot 10^{13}$ ).

*Propagación de la energía.*—Para comprender la propagación de la energía de radiación, vamos a considerar un ejemplo comparativo. Supongamos que dejemos caer una piedra en el centro de un estanque con agua; la superficie de contacto sufrirá una pequeña depresión momentánea y observaremos en su contorno la formación de sucesivas ondas circulares (círculos concéntricos), las que van aumentando su radio y alejándose del punto de formación; el número de ondas que se forman en un segundo, o sea la frecuencia de la onda, puede ser mayor o menor, podemos saberlo, contando las ondas que en un segundo llegan hasta el borde del estanque, y depende de la velocidad con que se propagan y de la longitud de onda, o sea de la distancia entre una onda y la siguiente. Si ponemos (Fig. 3).



**Fig. 3.—Propagación de las ondas.**

Naturalmente que podremos propagar por el agua una gran variedad de ondas, de diferentes longitudes, lo que dependerá de la frecuencia con que arrojaremos la piedra.

Observaremos que al llegar una onda al borde del estanque, pondrá en movimiento los objetos livianos que allí encuentre, o sea que nuestra energía muscular que comunicamos a la piedra, se ha transmitido a esos objetos livianos; el sistema de ondas en sí mismo contenía la energía, puesto que se ha movido desde el centro hasta el borde del estanque.

En el caso de las ondas electromagnéticas, luz, rayos X, etc., el caso es más complicado, pues la onda no se propaga en un plano como en el ejemplo dado, sino que en el espacio, y será esférica en lugar de circular, pero para ellos vale una ley análoga a la expresada.

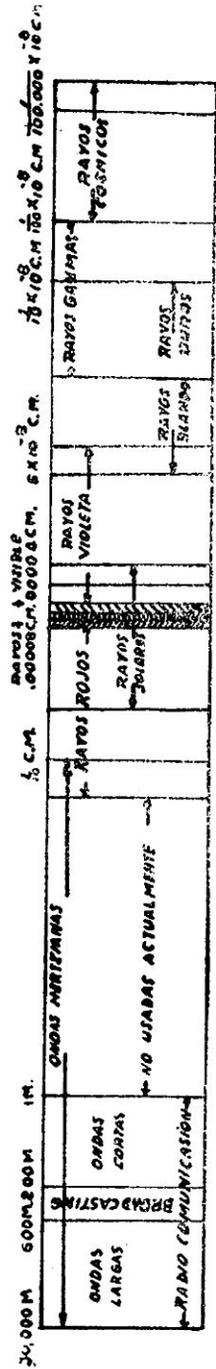
La manera más sencilla para representarse la propagación de la energía solar, es suponiendo la existencia de un medio hipotético, el éter, perfectamente elástico, y que representa al agua de nuestro ejemplo anterior.

En un cuerpo caliente como el sol, sus átomos, y en consecuencia, sus protones y electrones, se encuentran en un intenso movimiento; los movimientos de estas partículas producen perturbaciones en el éter y como el caso de la piedra lanzada al agua, se producen ondas, las que se propagan con una velocidad de 300,000 Km./seg. y llegando a los cuerpos actúan sobre los átomos, tal como las ondas de agua llegaban a los cuerpos livianos de la orilla del estanque, y producen efectos, entre ellos la sensación de luz y calor.

*Espectro de radiación.*—Naturalmente que una gran variedad de rapidísimos movimientos pueden tener los átomos y sus constituyentes, de manera que tenemos en las radiaciones ondas de diferente longitud. Se han medido con gran exactitud estas diferentes longitudes de onda, formándose una lista de ellas; este conjunto se llama «espectro de radiación» (lámina 2).

Las radiaciones electro-magnéticas de mayor longitud de onda, y en consecuencia de menor frecuencia, son las usadas en las radio-transmisiones y se llaman «ondas eléctricas»; las de longitud de 1,000 o más metros se emplean principalmente en radio-telegrafía y en algunas broadcastings europeas; las entre 600 y 200, y entre 70 y 16 son las más corrientes para radio-telefonía, las últimas principalmente para larga distancia, aun cuando actualmente, se está experimentando con ondas ultracortas de 10 a 1 metro.

Lámina II



Espectro de radiación.

A continuación vienen las ondas llamadas de calor o «infra-rojas», que tienen la propiedad de incrementar notablemente la velocidad de movimiento de los átomos, produciendo la sensación de calor, y cuya longitud varía entre 1 mm. y  $\frac{1}{500}$  mm.

En seguida tenemos las «radiaciones visibles» que tienen la propiedad de afectar la retina del ojo, produciendo la sensación de color; entre éstas, las de mayor longitud producen la sensación del rojo, las de menor el violeta, y las intermedias a los otros colores. Este conjunto recibe el nombre de «espectro visible», puesto que actúa directamente sobre nuestro ojo, y constituye la luz corriente. Siendo estas radiaciones de longitud de onda muy pequeña, y en consecuencia, poco práctico el expresarla en cm., se emplea como unidad el Angstrom, que equivale a  $1/100.000.000$  cm. Las radiaciones visibles varían desde 7,500 hasta 4,000 A°.

Ondas con menor longitud no afectan a la retina, se llaman «rayos ultra-violetas», producen efectos químicos, actúan sobre las placas fotográficas y sobre el cuerpo humano, y sus longitudes varían desde 3,970 hasta 200 A°.

A continuación tenemos los «Rayos X», cuya longitud varía desde 5 hasta  $1/10$  A°, y están dotados de gran poder penetrante, el que es tanto mayor cuanto más corta es la longitud de onda. El poder de penetración es afectado en proporción inversa por la densidad de los cuerpos y en ello se basa la aplicación de la Roentgenografía. También tienen acción sobre placas fotográficas y sobre el cuerpo humano.

Los «rayos gamma», emitidos por las substancias radioactivas, tienen una longitud de onda entre  $1/10$  y  $1/5000$  A°. Mientras menor longitud tengan, o sea mientras más duros son, tanto mayor es su poder penetrante. Tienen acción sobre placas fotográficas, y son capaces de atravesar planchas de hierro de 30 cms. de espesor.

De mucho menor longitud de onda, alrededor de  $1/100,000$  A° son los «rayos cósmicos» que nos llegan desde los espacios. Poseen un enorme poder penetrante (capaces de atravesar bloques de plomo de 5 metros de espesor) y su estudio se efectúa en los últimos años con gran interés, pues nos darán importantes datos sobre la constitución de la materia.

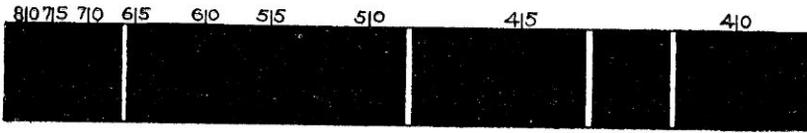
## CAPITULO V

### MATERIA Y RADIACION

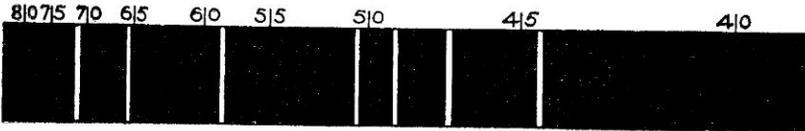
Hemos visto que debe existir una estrecha relación entre la materia y la energía; radiaciones son emitidas por la materia, y la materia absorbe radiaciones, convirtiéndolas en otra forma de energía, calor, por ejemplo.

La interacción entre materia y energía fué aclarada satisfactoriamente por Max Planck, quien en 1903 emitió la «teoría de las quantas», según la cual la energía radiante tiene una constitución corpuscular, o atómica, y no una estructura continua, y la materia al absorber o emitir energía, lo hace sólo en forma discontinua.

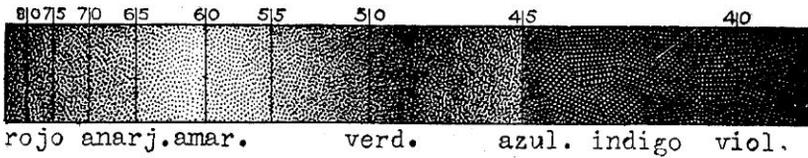
Al átomo de energía, lo llama Planck un «quantum»; la energía de radiación está constituida por quantas, y la cantidad de energía que contiene cada quantum, es proporcional a la frecuencia de la radiación:



Espectro de líneas brillantes, del hidrógeno.

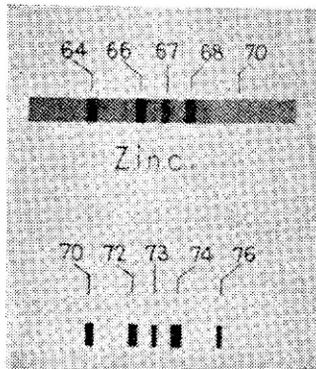


Espectro de líneas brillantes, del helio.



Espectro solar continuo. Las líneas verticales que se observan se deben a la absorción de ciertas radiaciones de longitudes de onda determinada; debido a esto, a menudo se le llama «espectro de absorción».

Las líneas indicadas en estos espectros, corresponden a las del espectro visible, entre 4.000 y 8.000 Å. Existen una serie de líneas características en el infra-rojo e infra-violeta, que no se indican aquí.



Aston  
Isótopos del Zn y del Ge obtenidos con el espectrógrafo de masas.

$$q = h \cdot f \cdot \text{ergs.}$$

$$h = \text{Cte. de Planck.}$$

$$f = \text{frecuencia;}$$

La cte. de proporcionalidad  $h$  se ha determinado experimentalmente y vale  $6,5 \cdot 10^{-27}$  ergs. seg.

La cantidad de energía del quantum es, pues, muy variable, y aumenta al aumentar la frecuencia de la radiación, o sea al disminuir la longitud de su onda; un quantum de radiación cósmica contiene 0,002 ergs, y uno de radiación calorífica solo 0,000.000.000.002 ergs. La energía calorífica tiene como vemos una constitución corpuscular tan fina que aparece como continua, y de ahí las ideas que sobre el particular existían antes de 1903.

Basándose en estos conceptos Planck elaboró una fórmula para representar la forma como la energía calorífica se distribuye de acuerdo con su longitud de onda, en el calor irradiado por un cuerpo, la que estaba perfectamente de acuerdo con todos los hechos experimentales observados.

Una de las experiencias más importantes para comprobar la teoría de Planck, fué aquella en que la energía irradiada era analizada en sus diferentes ondas constituyentes, y determinada para cada longitud de onda. La separación de la energía en sus diferentes largos de onda se efectúa mediante el espectroscopio, que en esencia consta de un prisma triangular de vidrio (para analizar radiaciones luminosas) o de cuarzo (para el ultra-violeta e infra-roja); si un haz de rayos pasa a través de este prisma, ellos son desviados en cierto ángulo que es mayor para ondas cortas que para ondas largas; siendo complejo el haz, formado por ondas de diversa longitud, saldrá del prisma dispersado en sus diversos constituyentes, y se obtendrá un espectro de radiación. La cantidad de energía de cada onda del espectro puede deducirse de la magnitud de ennegrecimiento producido por ella en una placa fotográfica.

La luz ordinaria, producida por un cuerpo incandescente, da origen a un espectro continuo (lámina 3). En cambio con la luz producida por descargas eléctricas a través de un gas contenido en un tubo (aviso luminoso p. ej.) se obtienen rayos brillantes en un fondo negro, llamados espectro de rayos brillantes.

Este último espectro es característico para cada elemento, y la longitud de onda para cada una de sus rayas es siempre la misma, cualquiera que sea la cantidad de elemento usado; en consecuencia, cada elemento puede identificarse, determinando la longitud de onda de las rayas de su espectro, y esta es la base del análisis espectral. Se encontró una relación matemática para la frecuencia de las diferentes rayas del espectro de cada elemento; para el caso del espectro del hidrógeno, esta relación está dada por la fórmula de Balmer-Rydberg.

## CAPITULO VI

### CONSTITUCION DEL ATOMO

*Generalidades.*—Los fenómenos ya expuestos, rayos X y radioactividad, llevaron a la conclusión de que en el interior del átomo debían encontrarse partículas cargadas con electricidad.

Siendo el átomo, en su conjunto, eléctricamente neutro, entonces, algunas de las partículas de su interior deben tener carga positiva y otras negativas, de modo que la carga total sea cero.

Ya indicamos las características del corpúsculo que lleva la carga negativa, o sea del electrón.

Respecto a la carga positiva, muy pocos datos experimentales existían para determinar como ésta estaba distribuída, en que forma actuaba sobre la carga negativa, y cual era la posición relativa de ambas cargas.

En el año 1911, Lord Rutherford estudió la trayectoria que sigue una partícula alfa, que como vimos estaba cargada positivamente, cuando al ser lanzada con gran velocidad por una substancia radioactiva, pasaba cerca de un átomo; la partícula sufrirá acción de atracción por la carga negativa, y de repulsión por la carga positiva. Basándose en la gran deflexión que sufre la partícula, propuso un modelo de átomo, según el cual, la trayectoria calculada teóricamente coincide con la obtenida experimentalmente.

*Modelo de Rutherford.*—Rutherford supone que en el átomo se encuentra un núcleo central, cargado positivamente, en el cual se encuentra contenida casi toda la masa atómica y rodeando a este núcleo un número de electrones tal que neutralicen completamente a la carga del núcleo. Los electrones se encuentran ligados al núcleo por fuerzas de origen eléctrico, y del tipo de la fuerza que se manifiesta entre el sol y sus planetas y los hace rotar en torno de él; igualmente, los electrones deben describir órbitas en torno del núcleo, el cual prácticamente queda inmóvil a causa de su gran masa.

Según el modelo de Rutherford, debemos figurarnos al átomo como un pequeñísimo sistema planetario en el que el núcleo ocupa la posición del sol, y los electrones la de los planetas.

El núcleo de los varios elementos se diferencia por su carga eléctrica y su masa.

Como unidad de carga se considera la del electrón; siendo esta negativa valdrá  $-1$ , y la unidad de carga positiva valdrá  $+1$ . Si se dice que un núcleo tiene la carga  $+10$ , eso significa que su carga es igual, en valor absoluto a la de 10 electrones; en torno de este núcleo deberán rotar 10 electrones para dar el átomo neutro.

El número que representa la carga del núcleo coincide con el número de electrones planetarios, y se llama «número atómico»; este número, entero, varía desde 1 para el hidrógeno hasta 92 para el uranio, el elemento más pesado y complejo que se sabe existe en la tierra.

Como unidad de masa se toma generalmente la masa del protón. El átomo de hidrógeno está constituido por un núcleo central con carga  $+1$ , y por un electrón que gira en torno del núcleo; a este núcleo del átomo de hidrógeno, Rutherford le dió el nombre de «protón». Se considera al protón como una partícula simple, indivisible, y que entra en la constitución de todos los elementos como parte importante. Cuando se dice que un núcleo tiene la masa 4, eso significa que tal núcleo es 4 veces más pesado que el protón. Como puede suponerse, la masa unitaria, o sea la del protón es pequeñísima; si suponemos que cada segundo colocamos sobre una balanza un millón de protones, al cabo de 10 años habremos alcanzado a reunir 1 gramo de protones, trabajando sin interrupción, noche y día.

Siendo la masa del electrón muy pequeña en comparación con la del núcleo:

(vale  $9 \cdot 10^{-28}$  grs, y la del átomo de hidrógeno, el más liviano, es como vimos de  $1,67 \cdot 10^{-24}$  grs.) prácticamente se la puede despreciar, y resulta que la masa del núcleo corresponde a la del átomo.

El elemento más simple que se conoce, el hidrógeno, está constituido de un núcleo central cargado positivamente, en torno del cual gira un electrón. El más complejo, el uranio, tiene un núcleo de peso 238, carga + 62, en torno del cual giran 92 electrones.

En la figura 4 tenemos una representación esquemática del átomo de hidrógeno, para darnos cuenta aproximada de la relación de magnitudes; si suponemos agrandado el núcleo hasta el tamaño de una lenteja, entonces el electrón tendría el tamaño de la cabeza de un alfiler y debería colocarse a una distancia de unos 30 metros, del núcleo. El átomo aparece como vacío, pero el espacio en él está ocupado por un potente campo eléctrico, proveniente del movimiento e interacción del protón y electrón.

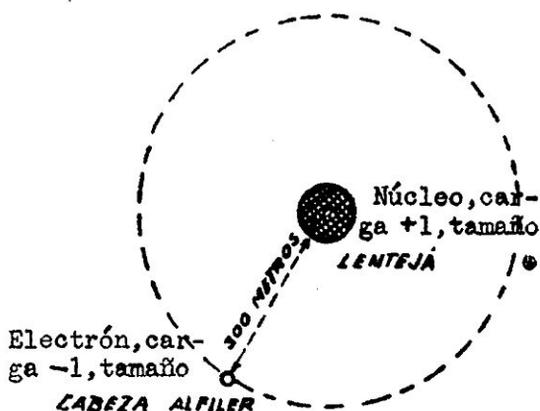


Fig.4.-Átomo de hidrógeno. Relación aproximada de las magnitudes.

*Teoría de Bohr-Sommerfeld.*—El modelo propuesto por Rutherford nos indicaba la constitución del átomo, pero no nos indicaba las leyes bajo las cuales se movían los electrones. Comparando al átomo con un sistema planetario, era lógico suponer primeramente que las leyes que rigen a tal sistema, o sea las de la mecánica clásica, regirían también para los electrones del átomo. Sin embargo, esto no es posible, pues estando cargados eléctricamente, el núcleo y electrón, de acuerdo con esas leyes, este último en su movimiento debería perder continuamente masa y acercarse al núcleo hasta confundirse con él, destruyéndose el átomo, y este fenómeno no acontece; luego, deben regir para el interior del átomo leyes diferentes a las supuestas. Estas leyes fueron enunciadas primeramente por el danés Niel Bohr en 1913, y completadas luego por el alemán Arnold Sommerfeld.

Según esta teoría los electrones satélites pueden recorrer, de acuerdo con cierta ley, alguna órbita determinada de forma elíptica, sin irradiar energía; estos estados determinados se llaman «estados estacionarios», pues la energía no sufre variación, se encuentra estacionaria. El electrón tiene diversa energía, diverso estado cuan-

tístico, según que rote sobre una u otra órbita; la energía menor corresponde a la órbita más interna, y aumenta a medida que aumenta el radio de la órbita. El «estado normal» del átomo es aquél en que el electrón se encuentra en la órbita de menor radio. Cuando algún electrón ocupa una órbita más externa que la normal, se encuentra en posición inestable, y el «átomo está excitado».

Al conjunto de órbitas de energía casi igual se le llama «un estrato o un anillo electrónico»; partiendo del estrato más interior hacia los exteriores, se les designa con las letras K, L, M, etc. Cada estrato contiene un número determinado de órbitas, y en consecuencia de electrones; el K puede contener a 2, el L a 8, el M a 18 electrones. Así, el hidrógeno, que posee un electrón, lo contendrá en el primer estrato; el helio, número atómico 2, que posee dos electrones, los contendrá también en el primer estrato; el litio, número atómico 3, con 3 electrones, contendrá a dos de ellos en el primer estrato, y al tercer electrón en el segundo estrato, ya que el primero se encuentra completo; así para los demás elementos.

Consideremos el caso del hidrógeno. Si por cualquier causa externa el electrón pasa de la primera a la segunda órbita, debe adquirir energía en forma de quantum, equivalente a la diferencia de energía en ambas órbitas; ha sido necesario entregarle esa cantidad de energía, ha absorbido esa cantidad de energía; si se le hace pasar de la 2.<sup>a</sup> a la 3.<sup>a</sup> órbita absorbe una cantidad de energía igual a la diferencia de energía en la 3.<sup>a</sup> y 2.<sup>a</sup> órbita. Pero el electrón se encuentra en posición inestable, y tenderá a volver a su posición primitiva, estable. Llamando  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  las energías del electrón en cada una de las órbitas, al saltar de la 2.<sup>a</sup> a la 1.<sup>a</sup>, emitirá una cantidad de energía, en forma discontinua, o sea como «gránulos de energía, o quantos de energía, o fotones», como se les llama a los átomos de energía para recordar su estructura, y en forma entera, o sea 1, 2, 3, ... fotones, que vale

$$W_2 - W_1 = h \cdot f_1$$

siendo  $f$ , la frecuencia de la radiación emitida; si salta de la 3.<sup>a</sup> a la 2.<sup>a</sup>, emitirá (fig. 5):

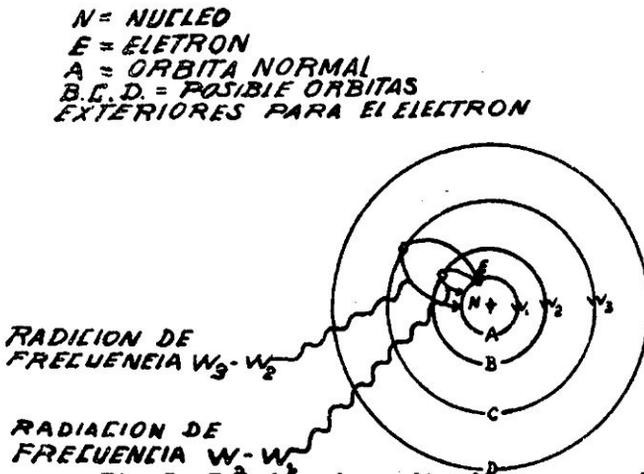


Fig. 5.- Emisión de radiaciones por el átomo de hidrógeno.

$$W_3 - W_2 = h \cdot f_2$$

y estas energías deben naturalmente ser iguales a las correspondientes absorbidas. Si va de la 3.<sup>a</sup> a la 1.<sup>a</sup> la energía emitida valdrá:

$$W_3 - W_1 = h \cdot f_3$$

y tendrá que verificarse que:

$$h f_3 = h f_2 + h f_1$$

Lo dicho para el electrón del hidrógeno se puede repetir para los electrones de los diversos elementos a condición naturalmente de que la órbita que va a ocupar un electrón, se encuentre libre.

En esto consiste la emisión de la energía radiante, sea ella calorífica, luminosa, rayos X, etc., bajo la forma de onda electro-magnética, siendo la frecuencia mayor, mientras mayor sea la energía del quantum.

Si se le proporciona energía suficiente a un átomo, un electrón puede no sólo saltar hasta la órbita más externa, sino que puede llegar a abandonar al átomo, el que quedará cargado positivamente, con carga de valor igual a la del electrón; el átomo que así queda recibe el nombre de «ion», y en esto consiste la ionización. Naturalmente que si el ion recupera al electrón perdido, su carga se neutraliza y se obtiene el átomo neutro primitivo.

Si recordamos la tabla de la clasificación periódica de los elementos (véase lámina 1), veremos que la teoría expuesta nos da una excelente confirmación de ella. Para ello, representaremos gráficamente a los elementos que inician y terminan los seis primeros períodos de tal clasificación; en esta representación, para mayor sencillez y claridad, supondremos que las órbitas son circulares y están situadas en un mismo plano, ya que este error no afecta en nada a las conclusiones a que llegaremos. Recordaremos que el número de electrones es igual al número atómico del elemento que los electrones de la órbita exterior son los responsables por las propiedades químicas del elemento, y se les llama electrones de valencia, pues el número de electrones que sobran a la envoltura del átomo para formar configuración estable representa la valencia positiva del elemento, el número de electrones que falta para formar configuración estable representa la valencia negativa; así, en figura 6, tenemos representados el átomo de Al e indicadas las valencias correspondientes.

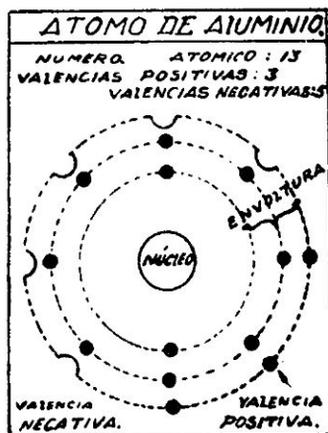


Fig. 6.-

En la figura 7 vemos que el hidrógeno y los metales alcalinos tienen un electrón en su órbita exterior, y en consecuencia poseerán propiedades químicas semejantes; además no tienen completas sus órbitas con electrones, y en consecuencia, presentarán afinidad química y podrán combinarse con otros elementos.

La columna del helio y gases inertes, comprende a elementos cuya órbita externa se encuentra completa, tendrán, pues, propiedades semejantes; por otra parte, todas sus órbitas están completas, no pueden agregar más electrones, son, pues, inertes, y no se combinarán con otros átomos.

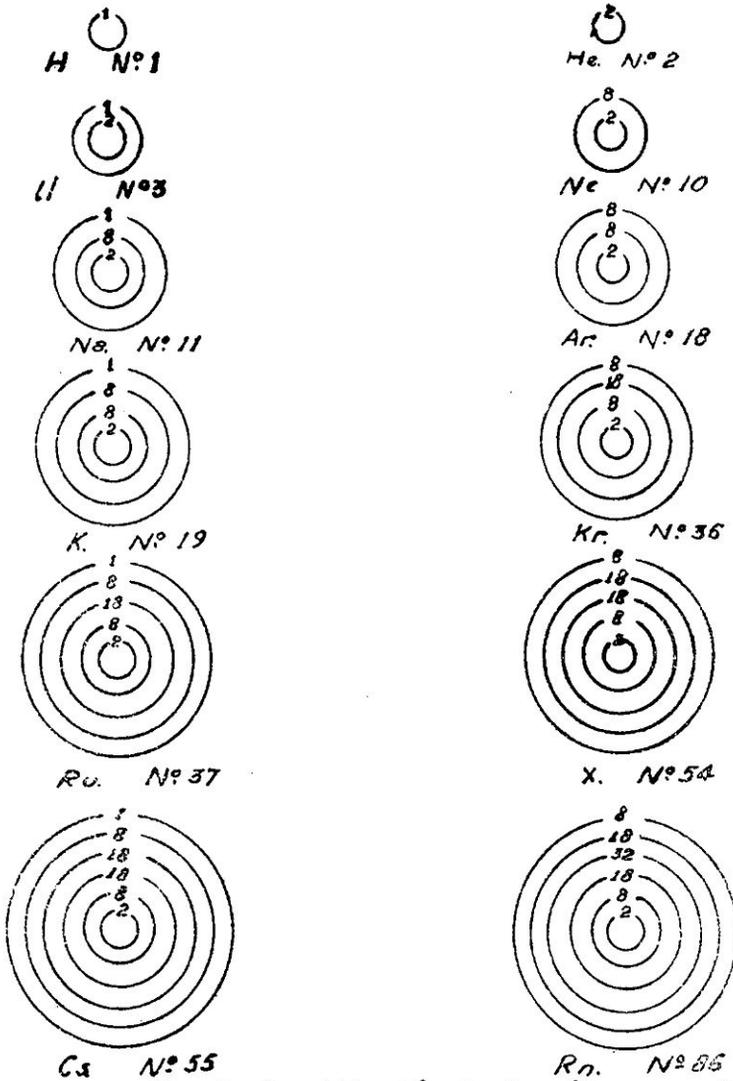


Fig. 7.-Constitución de los átomos y clasificación periódica de los elementos.

Si partimos de los elementos alcalinos, y agregamos sucesivamente electrones, pasaremos por todos los elementos de tal línea, hasta llegar al inerte correspondiente.

Ordenando a todos los elementos según su número atómico creciente, y colocando en la misma columna vertical a los elementos que tienen el mismo número de electrones en su órbita externa, obtendremos una tabla que coincide perfectamente con la de la clasificación periódica de los elementos.

La determinación del número atómico de un elemento puede efectuarse mediante la ley de Moseley, quien estudiando la difracción que los elementos producen, cuando un haz de rayos X los atraviesa, encontró que la frecuencia  $f$  de la línea espectral del rayo X, o sea del rayo, que emerge del elemento, era proporcional al número atómico  $N$  de éste, de acuerdo con la relación,

$$\sqrt{f} = c (N - a)$$

en que  $c$  y  $a$  son constantes características para cada elemento, y que dependen de la serie (K, L, M, N) a la cual pertenece la línea espectral estudiada.

*Isótopos.*—Existen elementos que tienen el mismo número de electrones, y el mismo número atómico, teniendo, pues, las mismas propiedades químicas y ocupando la misma casilla en el cuadro del sistema periódico, pero cuyo peso atómico es diferente; tales elementos se llaman «isótopos».

El fenómeno de la isotopía significa p. ej., que no sólo se tiene un núcleo con la carga unitaria positiva, y el peso atómico aproximado 1, sino que la carga unitaria positiva se puede encontrar unida con otras masas, obteniéndose elementos con las mismas propiedades del hidrógeno, las que se deben al electrón, cuyo movimiento se encuentra prácticamente influenciado por la carga del núcleo y no por su masa. Así, conocemos tres clases de hidrógeno con los pesos atómicos aproximados de 1, 2, y 3.

|                    |           |                   |           |             |
|--------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------|
| Hidrógeno. . . . . | ${}_1H^1$ |                   |           |             |
| Deuterio . . . . . | ${}_1H^2$ | o más propiamente | ${}_1D^2$ |             |
| Tritium . . . . .  | ${}_1H^3$ | »                 | »         | » ${}_1T^3$ |

en que los pesos atómicos se indican por los índices a la derecha arriba del símbolo, y el número atómico o carga eléctrica por los índices abajo a la izquierda.

Poseyendo los isótopos las mismas propiedades químicas, no es posible separarlos por procedimientos químicos.

Aston fué el primero en descubrir la existencia de los isótopos y en determinar sus pesos atómicos, empleando el «espectrógrafo de masas».

En principio, el espectrógrafo de masas (fig. 8), consta de un recipiente en el

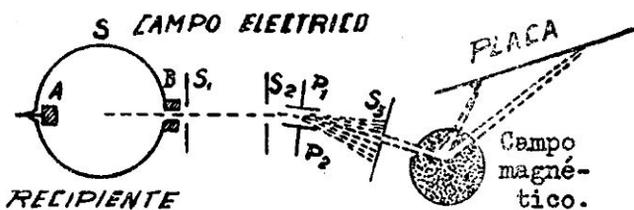


Fig. 8.—Espectrógrafo de masas. A, B, electrodos para ionizar el contenido del recipiente. S, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, diafragmas. P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, campo eléctrico.

cual se coloca el gas por estudiar y que se ioniza mediante descarga eléctrica entre dos electrodos colocados en el recipiente; los iones obtenidos pasan por dos pequeñas

aberturas para uniformar el haz, en seguida entre las placas de un condensador que forma el campo eléctrico, por otro diafragma, y finalmente por un campo magnético; aquí los iones son desviados en proporción a su masa (más el de menor masa), de modo que colocando adecuadamente una placa fotográfica, se obtendrán diferentes trazos correspondientes cada una a un isótopo de peso determinado (lámina 4) y de estas diferentes posiciones se puede calcular el peso atómico correspondiente.

La exactitud que se puede obtener con el espectrógrafo alcanza a 1/10.000.

Se ha encontrado que la mayoría de los elementos no son simples, sino que están formados por una mezcla de isótopos y en la actualidad se tienen sobre 400 elementos en lugar de los 92 clásicamente mencionados.

El elemento oxígeno p, ej., es una mezcla de 4 isótopos:

| Símbolo del isótopo | Masa | Peso atómico | Abundancia en la tierra |
|---------------------|------|--------------|-------------------------|
| Radio oxígeno ..... | 15   | 15.0085      | Artificial              |
| » .....             | 16   | 16.000       | 99,76%                  |
| » .....             | 17   | 17.0040      | 0,04%                   |
| » .....             | 18   | 18.0065      | 0,20%                   |

como unidad de número de masa se toma la del más liviano, o sea la del hidrógeno.

En el caso del plomo, tenemos:

|            | Masa | Peso atómico | Abundancia en la tierra |
|------------|------|--------------|-------------------------|
| Pb .....   | 204  | .....        | 1,52%                   |
| Ra C ..... | 206  | 206 ± 0,01   | 28,03%                  |
| Ac D ..... | 207  | .....        | 20,40%                  |
| Th D ..... | 208  | 208 ± 0,01   | 50,05%                  |
| Ra D ..... | 210  | .....        | Radioactivo natural     |
| Ac B ..... | 211  | .....        | » .....                 |
| Th B ..... | 212  | .....        | » .....                 |
| Ra B ..... | 214  | .....        | » .....                 |

los 4 últimos isótopos son radioactivos, y en consecuencia inestables; los 4 primeros son estables y en mezcla forman el plomo corriente de peso atómico 207,2. Estas 4 formas estables del Pb se obtienen en la naturaleza de los minerales radioactivos correspondientes a las series del uranio actinio y torio; los pesos atómicos determinados para cada uno de estos plomos corresponden a los indicados para ellos y no al del plomo corriente.

Es interesante hacer notar, que si en la clasificación periódica se toma para los elementos como peso atómico no el corriente como lo hizo Mendelejeff, sino que el medio aritmético de los pesos de todos sus isótopos, tanto los naturales como los artificiales, entonces se subsanan las dificultades anotadas para los elementos, que debían colocarse después de otros de mayor peso atómico. Teníamos en la clasificación el siguiente orden:

|       |       |
|-------|-------|
| 18. A | 19. K |
| 39,9  | 39,1  |
| 27 Co | 28 Ni |
| 58,9  | 58,7  |
| 52 Te | 53 I  |
| 127,5 | 126,9 |
| 90 Th | 91 Pa |
| 232,1 | 231   |

considerando el medio aritmético obtenemos:

|       |       |
|-------|-------|
| 18 A  | 19 K  |
| 38,7  | 40,5  |
| 27 Co | 28 Ni |
| 58,7  | 61,9  |
| 52 Te | 53 I  |
| 125   | 127,5 |
| 90 Th | 91 Pa |
| 230,7 | 232,7 |

para los otros elementos el orden queda el mismo, pero naturalmente que para ellos cambia también el valor del peso atómico, pues se toma el medio aritmético.

No tiene importancia que no se tome en cuenta la abundancia de cada isótopo, pues ella, o sea la estabilidad, es sólo una propiedad nuclear que no tiene nada que ver con la ley periódica; además, en algunos casos de sustancias radioactivas la abundancia cambia con el tiempo, así p. ej. el protoactinio en períodos geológicos pasados era más abundante que el radio, y en la actualidad lo es menos.

La posibilidad de descubrimiento de algunos pocos isótopos para los elementos radioactivos principalmente, no afecta lo expuesto.

Con estas ideas de los isótopos, parece, pues, confirmarse para todos los elementos, la idea primitiva de Mendelejeff, de la periodicidad de las propiedades en función de los pesos atómicos crecientes.

*Isóbaros.*—Así como existen los isótopos, existen también otros elementos que teniendo el mismo peso atómico, tienen diferente número atómico (lo contrario de los isótopos) tales elementos se llaman «isóbaros» y tienen diferentes propiedades químicas; p. ej.:

| Elemento  | Símbolo | P. Atómico | N.º Atómico |
|-----------|---------|------------|-------------|
| Radio C'' | R a C'' | 210        | 81          |
| Radio D   | R a D   | 210        | 82          |
| Radio E   | R a E   | 210        | 83          |
| Radio F   | R a F   | 210        | 84          |

## CAPITULO VII

## TRANSFORMACIONES RADIOACTIVAS

*Generalidades.*—Hemos explicado ya lo que se entiende por sustancias radioactivas.

Un átomo de tal clase de sustancia podrá pasar un tiempo largo o corto, conservando sus propiedades, sin sufrir transformación espontánea; llegará sin embargo, un momento, en que el núcleo dispara una partícula alfa o beta, acompañada por la emisión de energía en forma de rayos gamma, obteniéndose un nuevo átomo.

Podemos comparar este fenómeno con un ejemplo aproximado para comprenderlo mejor. Supongamos que estamos disparando balas con un fusil, las que vamos sacando sucesivamente de un montón que de ellas tenemos; una bala determinada, que representa al átomo radioactivo podrá permanecer en el montón un tiempo largo o corto, pero llegará un momento en que la tomaremos y dispararemos con el fusil; observaremos que sale disparado el plomo (corresponde a la partícula alfa, p. ej.), veremos emisión de energía en forma de foganazo y calentamiento del fusil (emisión de rayos gamma), y finalmente nos quedaremos con la cápsula de la bala (átomo resultante) que es diferente de la bala inicial.

Las transformaciones radioactivas son todas nucleares; es del núcleo de donde salen las partículas alfa y beta emitidas.

Podemos imaginarnos el proceso de emisión recordando que el núcleo posee una enorme energía; al disgregarse, sale disparada una partícula de él, y las restantes se agrupan formando un nuevo núcleo, encontrándose con un exceso de energía que emiten como rayo gamma.

La expulsión de una partícula alfa, que lleva 2 cargas positivas y tiene una masa 4, significa una disminución del número atómico en 2 unidades, y de la masa en 4 unidades. La expulsión de una partícula beta, que es electrón o sea, carga negativa unitaria, significa para el núcleo la disminución de su carga en 1 unidad negativa, o sea el aumento en 1 positiva, lo que equivale a que su número atómico aumenta en 1. Emisión de una alfa y dos beta, que el producto resultante tiene el mismo número atómico, pero su peso atómico es 4 unidades inferior; es un isótopo.

Si tomamos un gramo de uranio, (peso atómico 238) unos 24,000 átomos se desintegran por segundo, con emisión de partículas alfa, pero la cantidad de átomos que hay es tan grande, que al cabo de cuatro mil quinientos millones de años, la mitad de los átomos originales, o sea medio gramo de uranio, se habrían desintegrado. Se obtiene átomo de peso atómico 234, que es sumamente inestable y se descompone bajo emisión de partículas beta, obteniéndose un nuevo átomo del mismo peso atómico, el que a su vez se desintegra siguiendo así el proceso hasta llegar a obtener un átomo estable.

El radio es uno de los productos intermedios de la desintegración del uranio. Su serie de transformaciones podemos seguirla mediante la fig. 9. El radio, bajo emisión de partícula alfa, se transforma en su emanación, un gas, llamado «radón» y de símbolo Rn, que es algo estable pero, se desintegra bajo emisión de partículas

alfa, originando al radio A (R a A). Observaremos que obtenemos en esta serie de desintegraciones al Ra B, isótopo del plomo, al Ra C, isótopo del bismuto.

Al Uranio se le llama la «substancia madre» de todos los elementos que origina o sea de toda su «familia radioactiva».

Se conocen tres clases de familias radioactivas que llevan cada una el nombre de su respectiva substancia madre: la familia del Uranio, la del actinio y la del torio. El producto final estable de cada una de estas familias es un isótopo del plomo (fig. 10) de peso atómico diferente, y de cuya mezcla está formado el plomo corriente.

Se observa que algunas substancias radioactivas pueden emitir simultáneamente partículas alfa y beta. Así el R a C emite en su mayor parte partículas beta transformándose en el Ra C' el que por emisión de alfa se desintegra en el Ra C; pero también una pequeña parte del Ra C emite partículas alfa, obteniéndose el Ra D; las dos ramas secundarias de la familia se han unido nuevamente en la principal, (lám. V).

*Duración de la desintegración.*

—La «actividad» de una substancia radioactiva, medida por el número de partículas que emite en cada instante, disminuye con el tiempo de acuerdo con una progresión geométrica; si la actividad decae a la mitad de su valor original en un tiempo T, llamado el «periodo de reducción o transformación a la mitad», decaerá a 1/4

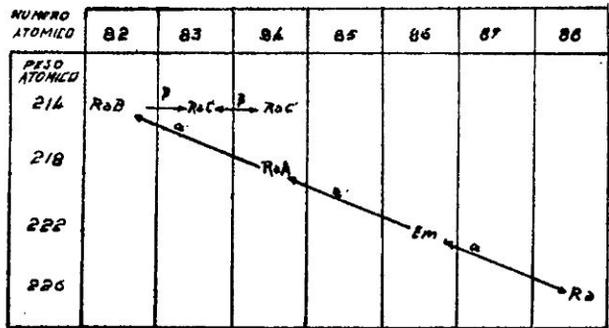


Fig. 9.-Serie de transformaciones del radio.

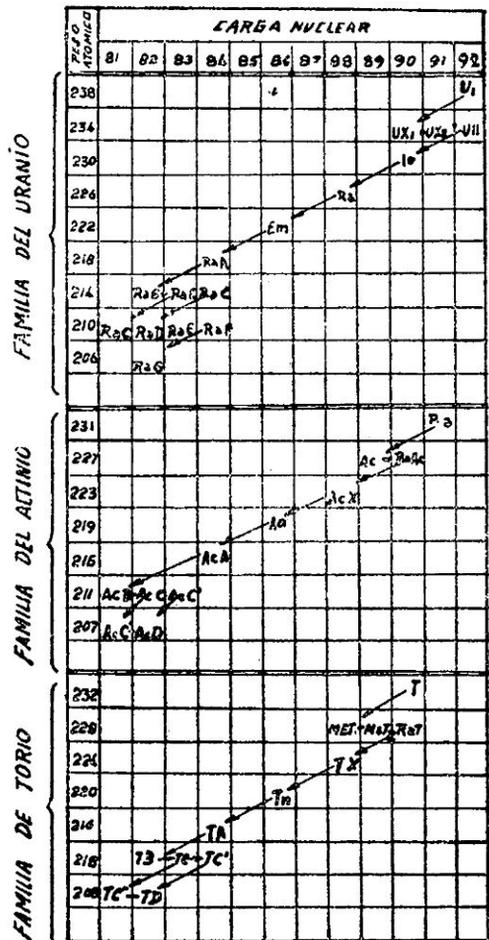
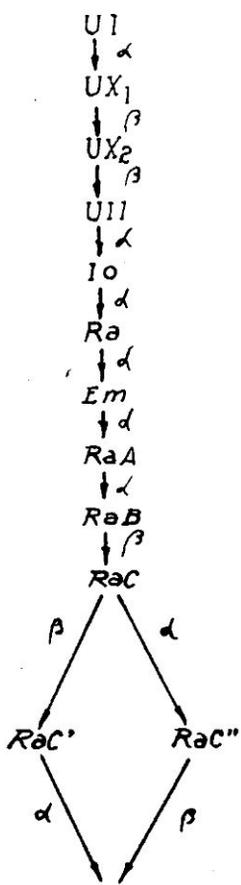


Fig. 10.-Familias radioactivas. La emisión de un electrón queda representada por un trazo horizontal, y la de una partícula alfa, por uno oblicuo.

LAMINA V.

FAMILIA DEL URANIO.

| <u>Elemento y simbolo.-</u> |                 | <u>Tiempo de reducción a mitad.</u> |
|-----------------------------|-----------------|-------------------------------------|
| Uranio I                    | U1              | $4,5 \times 10^9$ años              |
| Uranio X <sub>1</sub>       | UX <sub>1</sub> | 24,5 días                           |
| Uranio X <sub>2</sub>       | UX <sub>2</sub> | 1,14 minutos                        |
| Uranio II                   | U11             | $10^6$ años                         |
| Ionio                       | Io              | $7,6 \times 10^4$ años              |
| Radio                       | Ra              | 1600 años                           |
| Radon                       | Em              | 3,82 días                           |
| Radio A.                    | RaA             | 3 minutos                           |
| Radio B.                    | RaB             | 27 minutos                          |
| Radio C.                    | RaC             | 20 minutos                          |
| Radio C' y Radio C''.       | RaC' RaC''      | $10^6$ segundos<br>1,32 minutos     |
| Radio B                     | RaD             | 25 años.                            |
| Radio E                     | RaE             | 5 días                              |
| Radio F o Polonio.          | RaF (Po)        | 136 días                            |
| Radio G (plomo)             | RaG             | estable.                            |



en un tiempo  $2 T$ , a  $1/8$  en un tiempo  $3 T$ , etc.; al cabo de un tiempo  $20 T$  su actividad se habrá reducido a un millonésimo de la original. Esta ley enunciada por Rutherford y Soddy, significa que «el número de átomos que se desintegra en un instante determinado, es proporcional al número total de átomos no desintegrados, presentes en ese instante» o sea que cada átomo se desintegra de acuerdo con la ley de la probabilidad.

Esta ley es universal para todas las sustancias radioactivas, pero el período de reducción a la mitad, naturalmente es muy diferente para cada sustancia; así (lámina 5) para el radio el período es de 1,600 años.

Para una sustancia radioactiva, la vida, o sea el tiempo que transcurre desde que se origina o nace hasta que se desintegre o muera, es muy variable para cada uno de sus átomos, puede fluctuar desde casi cero hasta cerca de infinito, y sólo el caso decide cual de todos estos valores tomará la vida de un átomo determinado. Por esto se caracteriza a cada sustancia radioactiva, que se compone de una cantidad enorme de átomos, (lo que hace que el fenómeno de la radioactividad aparezca como continuo en lugar de discontinuo), por la vida más probable de todos ellos, o sea por la «vida media» de ellos; esta vida media,  $O$ , es igual al valor inverso de la «constante radioactiva»,  $\lambda$  o sea de la fracción de la masa total que se transforma por segundo:

$$O = \frac{1}{\lambda}$$

La vida media es la misma para los átomos de una sustancia radioactiva determinada, pero es muy diferente para átomos pertenecientes a diversas clases de sustancias. Así, si cierta cantidad de radio se transforma en emanación en un cierto tiempo, esa emanación demora un tiempo muchísimo menor para transformarse en radio A; pero puede suceder que un átomo determinado de la emanación tenga vida mucho más larga que uno del radio.

Podemos comparar estas nociones con la de la vida humana. Una sustancia radioactiva quedará representada por una ciudad muy poblada, los átomos de esa sustancia por los habitantes de la ciudad. Los habitantes de la ciudad podrán tener vida muy diferente, unos podrán vivir dos meses, otros 50 años, otros 80 años; y sólo el caso decide cual o cuales de ellos se mueren a los 2 meses, a los 50 años o a los 80 años; la vida más probable de ellos será la vida media de todos ellos, que se obtiene considerando un determinado período de tiempo y dividiendo la suma de las edades a que mueren los individuos por el número total de individuos observados. La vida media será diferente de una ciudad a otra, podremos obtener p. ej. para una, 45 años y para otra 60 años, según el clima, condiciones de vida, etc., de cada una de ellas; pero se presentará el caso que un habitante de la primera ciudad pueda vivir mucho más que uno de la segunda, que fué lo que indicamos para el caso del átomo de la emanación y para el del radio.

La vida media de una sustancia es igual al tiempo o período de reducción a mitad de esa sustancia, multiplicado por 1,443:

$$O = 1,443 T$$

En algunos casos puede determinarse directamente.

*Equilibrio radioactivo.*—Sabemos que una cantidad dada de uranio origina, por una serie de cambios al radio, en una cantidad prácticamente constante por un tiempo largo, ya que el período del uranio es muy largo; a medida que se van formando los átomos de radio, se van transformando en emanación, y de acuerdo con la ley de Rutherford y Soddy lentamente al principio, pues hay pocos átomos de radio y además la tendencia del radio a desintegrarse es pequeña. A medida que aumenta el número de átomos de radio, aumenta la desintegración de él. Pasado cierto tiempo, el número de átomos de radio que se forman será igual al que se desintegra, la cantidad de radio quedará constante; tenemos, pues, un «equilibrio radioactivo estable».

Lo mismo vale para los otros elementos de la serie.

Al alcanzar un «estado general de equilibrio» cada miembro de la familia radioactiva está presente en una cantidad proporcional a su tendencia a desintegrarse. Los elementos de larga vida estarán en mayor cantidad que los de corta vida, pues cuanto menor es la tendencia a desintegrarse, tanto mayor debe ser el número de átomos presentes para que exista equilibrio entre los que se desintegran y los que se forman. Se encuentra, pues, que la razón entre las cantidades de los diferentes productos es constante; así en una roca uranífera bastante antigua para que el equilibrio se haya alcanzado, la razón entre el Ra y el U es de 3,3 partes para el primero por 10.000.000 para el segundo. En especial el plomo, último producto de esta serie, se forma en una cantidad constante por unidad de tiempo, y siendo estable, se vá acumulando en la roca. Si la cantidad de U y Pb en una muestra de mineral se conoce, se calcula la cantidad original de U que debe haber habido, y con ello se puede deducir el número de años necesarios para que se haya producido la cantidad de Pb encontrada. Los resultados, que pueden dar una idea para la edad de la tierra, son de 1.600.000.000 de años.

Siendo el helio un producto de la desintegración, se puede medir la cantidad que de él se encuentra en un mineral, y determinando la cantidad de helio que ese mineral forma en un tiempo dado (mediante una pantalla fosforescente se cuenta el número de choques luminosos en un tiempo determinado, y se deduce la cantidad de átomos de helio), se calcula el tiempo necesario para formar ese helio. Así, se encontró que un mineral radioactivo tenía 26 c.c. de helio, y que producía 1 c.c. en 16 millones de años; se deduce que se ha demorado 416 millones de años en producir los 26 c.c., edad que tendría la roca y que es muy inferior a la calculada de acuerdo con su contenido en U y Pb. Las diferencias, que no se han explicado completamente, pueden deberse al hecho de que algo de helio se ha escapado de la roca y en consecuencia, el volumen medido es inferior al volumen total de helio que se ha producido.

*Propiedades de los cuerpos radioactivos.*—Las propiedades, tanto físicas como químicas de los sucesivos elementos radioactivos son muy diferentes. Así, el Ra es un metal de propiedades semejantes al Ba; su producto de desintegración, el radón o emanación, es un gas inerte, cuyos átomos son mucho menos estables que los del Ra; este gas tiene una intensa radioactividad, y se emplea a menudo, en lugar del radio en las aplicaciones médicas.

La substancia radioactiva se encuentra repartida más o menos en forma uniforme en las rocas de la corteza terrestre, pero en pequeñísimas cantidades, 1 millo-

nésimo de gr. por tonelada, en las aguas radioactivas y tal vez en el interior de la tierra. Sólo en algunos minerales, p. ej. la pechblenda ( $U_3O_8$  y otros sulfuros y óxido) en Joachimstal, Bohemia, y la carnotita (uranil vanadato de potasio) en EE. UU., lo contienen en cierta cantidad, siempre bastante pequeña; se necesitan 800 toneladas de mineral para producir 1 gramo de radio; cuyo valor es de 1.800.000 de nuestra moneda. Hasta la fecha se ha aislado en todo el mundo una cantidad de radio no superior a 1 Kg.

El radio se emplea principalmente en medicina (generalmente su emanación), en el estudio de transformaciones nucleares, en la confección de pinturas luminosas (en forma de sales, en la proporción de una parte por 10.000 de sulfato de zinc).

Emitiendo las sustancias radioactivas partículas alfa y beta con gran velocidad, aun cuando sus masas sean pequeñísimas, la energía cinética ( $\frac{1}{2} m v^2$ ) del conjunto enorme de partículas emitidas por la substancia, es apreciable; a esta energía debemos agregar todavía la proveniente de los rayos gamma emitidos por la substancia, para tener el valor total de ella.

Si colocamos 1 gr. de radio en un recipiente de vidrio, los rayos gamma y gran parte de los beta escapan, pero los alfa, debido a su menor velocidad, serán absorbidos por el vidrio, y su energía cinética se transformará en calor. Un gramo de radio emite en total 137 cal/hora.

No sólo el átomo de radio posee en su núcleo una enorme energía, sino que todos los otros elementos también, pero la diferencia está en el hecho de que en éstos por ser estables, la energía no se manifiesta al exterior, salvo cuando se despedaza el núcleo, como lo veremos más adelante, mientras que el núcleo radioactivo, inestable, emite continuamente al exterior energía mediante sus radiaciones.

La substancia radioactiva que existe en la tierra, emite, pues, en forma continua calor. Por semejanza con los meteoritos, que se supone tienen constitución semejante a la de la tierra (proviene de procesos semejantes a los que se han efectuado en la formación de los planetas solares), se ha calculado la cantidad de substancia radioactiva que debe haber en el núcleo terrestre, y se ha llegado a la conclusión de que el calor desarrollado por esas substancias es superior al que pierde por irradiación, o sea que el núcleo terrestre debe aumentar paulatinamente su temperatura, y este hecho podría ser la explicación para ciertos fenómenos geológicos, como la actividad volcánica, por ejemplo.

*Revelación de las radiaciones y de las partículas rápidas.*—Es interesante conocer los diversos métodos que se emplean para revelar las radiaciones y partículas corpusculares, y poder estudiar con precisión los diferentes casos de radioactividad y transmutación.

1.º El primer método y el más sencillo, es el empleado por Becquerel en sus experiencias sobre radioactividad, basándose en el hecho de que las radiaciones emitidas por las sales de uranio, impresionaban a la placa fotográfica; al igual, las radiaciones emitidas por cualquier substancia radioactiva también impresionan a la placa fotográfica. El rayo alfa produce una fuerte impresión, el rayo beta una menor, y el rayo gamma una muy débil, pero que por procedimientos especiales puede reforzarse; estas impresiones pueden observarse mediante un microscopio.

2.º Otro método empleado para revelar a las partículas alfa y a los protones, es el del «espintaroscopia», también sumamente sencillo; fué el que sirvió a Lord

Rutherford para comprobar en 1919 la primera transmutación que se efectuó. Lo veremos más adelante.

3.º Los métodos más precisos y más empleados para la revelación, son aquéllos que se basan en el fenómeno de la ionización de un gas.

Al pasar una partícula cargada, de suficiente energía, a través de materia, choca contra varios átomos; supongamos para mayor sencillez que tenemos un gas. Siendo el núcleo del átomo sumamente pequeño, el choque se reduce a verificarse, en la gran mayoría de los casos, con los electrones planetarios del átomo, lo que queda favorecido por cuanto estos ejercen fuerte acción (de atracción o repulsión) sobre la partícula, dado que están provistos de carga eléctrica; en consecuencia, debido al choque material o aun sin choque material (por la simple acción de atracción o repulsión) la partícula puede proporcionarle al electrón la energía suficiente para alejarse a gran distancia del átomo. Perdiendo así un átomo a un electrón, el resto queda cargado positivamente y toma el nombre de «ion».

Una partícula alfa, de mayor masa que la beta, produce mayor número de iones que ésta; la partícula alfa tiene mayor «poder de ionización» que la beta.

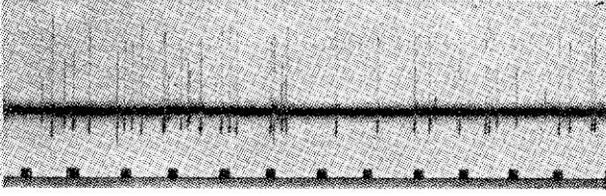
Igualmente, los rayos gamma, que son radiaciones electromagnéticas, son capaces de producir una ionización al atravesar materia. Para explicarnos esto más claramente recordemos el mecanismo de emisión de las ondas electro-magnéticas (rayos X, rayos gamma, etc.) Los electrones periféricos al aumentar por cualquier medio (calentamiento, radiaciones, etc.) su energía, pueden pasar de una órbita de menor (o interna) a otra de mayor (o externa) energía, y después de algún tiempo volver a su posición primitiva emitiendo la energía absorbida en forma de radiaciones de frecuencia variable en cada caso. rayos ultra-violetas, rayos X, etc. La emisión de rayos gamma se debe no al pasaje de los electrones planetarios de una órbita a otra, sino que se produce en el núcleo del átomo debido al estado cuántico del núcleo, en forma análoga al del átomo.

Al pasar una onda electromagnética por un átomo, un electrón pueden capturar a un quantum y absorberlo; la energía del electrón aumentará y podrá ser sólo suficiente para hacerlo pasar a otra órbita, donde quedará algún tiempo hasta volver nuevamente a su posición estable. Pero también puede el quantum proporcionarle al electrón la energía necesaria para alejarse definitivamente del átomo y se tiene el llamado «efecto foto-eléctrico». También puede acontecer que un electrón abandone al átomo sin que absorba al quantum, y se tiene el «efecto Compton», comportándose el quantum como un corpúsculo material, que al chocar con el electrón es desviado y pierde la energía que le ha comunicado al electrón (disminuye la frecuencia de la onda que lo constituye).

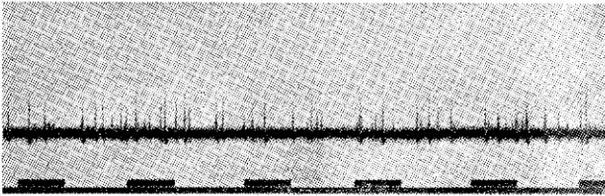
El quantum puede, pues, alejar a un electrón del átomo de gas que atraviesa, y producir así un ion.

Basados en el fenómeno de ionización tenemos:

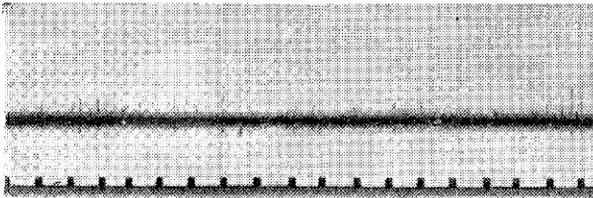
a) *Cámara de ionización.*—Sirve principalmente para contar el número de partículas que entran a la cámara en un tiempo dado. Las partículas a contar, se hacen entrar a la cámara a través (fig. 11) de una delgada lámina metálica L, y chocan contra la placa A, que se encuentra aislada. Se aplica un voltaje suficiente a los electrodos (separados unos 4 mm.), para eliminar rápidamente los iones formados entre las placas. La variación de voltaje de A, debido a la entrada de las partículas, se



Rayos alfa



Neutrones



Protones

Detección de las partículas mediante el oscilógrafo. La fotografía del medio indica las deflexiones producidas por átomos de helio al ser chocados por neutrones de 2 M. V. Los intervalos de tiempo están expresados en segundos.

amplifica enormemente, mediante amplificadores semejantes a los usados en radio-telefonía, y se hace actuar sobre un oscilógrafo de un período de vibración cortísimo (1/1000 seg.).

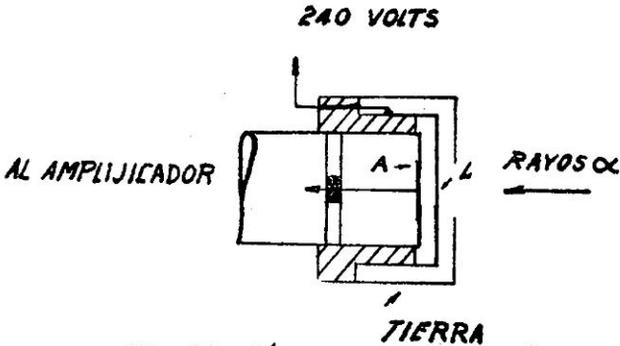


Fig.11.-Cámara de ionización.

En la lámina 6, vemos fotografías de partículas alfa, protones y neutrones, obtenidas usando un film rápido. Las líneas verticales representan el efecto debido a cada partícula que entra en la cámara; la banda continua horizontal representan el movimiento del oscilógrafo, cuando no entran partículas a la cámara. Debido a que las partículas alfa tienen cada una dos cargas eléctricas, mientras que las otras sólo una, la ionización producida por las primeras es unas cuatro veces la producida por las segundas, y se puede en consecuencia ver fácilmente si las partículas son alfa o no.

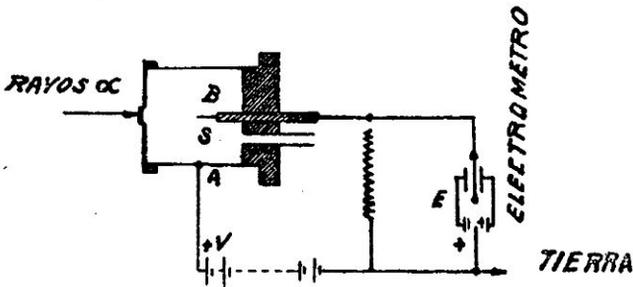


Fig.12.-Contador de punta.

Siendo neutro el neutrón (véase más adelante) puede pasar a través de las órbitas del átomo sin producir ionización; pero puede chocar con el núcleo y ponerlo en movimiento; este núcleo en movimiento es capaz de producir iones en un gas (antes que vuelva al reposo), los que son detectados. Se usa generalmente H, He, o aire como gas, y en término medio 1 neutrón de cada 5,000 que entran, producen una oscilación en el oscilógrafo. Veremos más adelante que hay métodos especiales para contar neutrones lentos, usando su propiedad de transformar a ciertos elementos. (Li, B, etc).

b) Contador.—Existen dos clases: el contador de hilo y el de punta (fig. 12). Las diferencias de funcionamiento entre uno y otro son pequeñas. El contador de

hilo o tubo de Geiger-Müller, (fig. 13) está formado por un tubo metálico cerrado en sus extremos por material aislador, y atravesado según su eje longitudinal por un hilo metálico; el tubo y el hilo se cargan con una diferencia de potencial poco inferior a la necesaria para que se produzcan la descarga, y en el interior del tubo se encuentra aire o gas a una presión conveniente. Al entrar una partícula al contador, la ionización produce la descarga, la cual, amplificada, es registrada por un alto-parlante, un oscilógrafo o un contador automático. La descarga es casi instantánea y el contador puede acusar inmediatamente el ingreso de otra partícula. Cuando se trata de partículas poco penetrantes, el cilindro metálico se reemplaza por una rejilla.

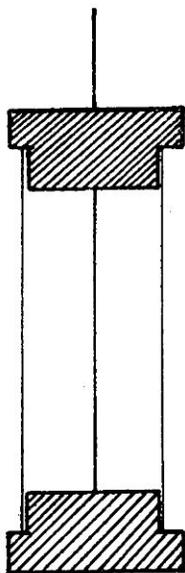


Fig. 13.-Contador de hilo.

c) *La cámara de Wilson.*—Los aparatos hasta ahora descritos permitían determinar el efecto en conjunto de las radiaciones y partículas, o bien revelar la presencia de cada partícula. Pasaremos ahora a indicar un método que permite ver a la partícula, seguirla en su camino recto o desviado, observarla cuando choca con otra, cuando desaparece, cuando se transmuta, etc. y obtener fotografías de todo esto, mediante el maravilloso método y aparato propuesto por el inglés C. T. R. Wilson.

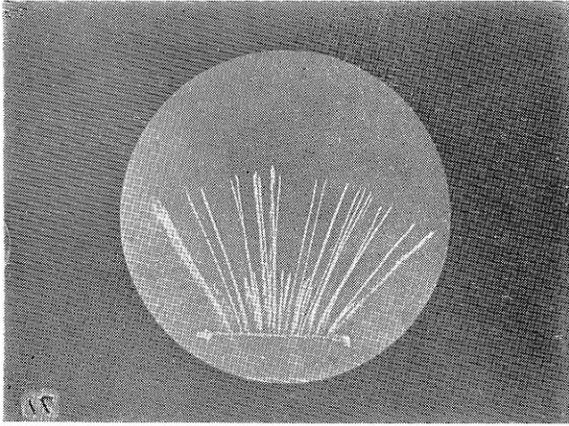
La base teórica del aparato propuesto es sencilla. La humedad atmosférica, en condiciones normales, al superar cierto valor que depende de la temperatura, satura de vapor acuoso al aire. Al enfriarse el aire así saturado, parte del vapor se condensa y transforma en agua, pero si el enfriamiento es algo brusco, el vapor no alcanza a condensarse y el aire queda sobresaturado, en una condición inestable, de modo que cualquier grano de polvo suspendido en ese aire sirve de núcleo de condensación, formándose en torno a él una gota de agua, muy liviana y pequeña, de modo que queda suspendida en el aire; es la neblina que se observa en algunas ciudades industriales.

Wilson observó que los iones obtenidos al pasar una radiación a través de un gas, eran excelentes núcleos de condensación para el vapor sobresaturado. Al pasar una partícula a través de aire que tiene vapor sobresaturado, produce en su trayectoria una serie de iones en torno a los cuales se forman gotas de agua, obteniéndose una trayectoria de neblina, que se ve brillante al ser iluminada en forma adecuada.

La cámara de Wilson se compone fig. 14, de un cilindro de vidrio que contiene aire y vapor de agua; el fondo del cilindro está constituido por un émbolo accionado por un pistón que puede subir o bajar bruscamente a intervalos de tiempos cortos y regulares; posee además un dispositivo para tomar fotografías corrientes o en un film. Bajando bruscamente el pistón, el aire y vapor de agua se expande, enfría, sobresatura, y el pasaje de una partícula produce una trayectoria de neblina que se puede observar y fotografías; un dispositivo automático elimina después de cada expansión los iones formados (atrayéndolos a láminas cargadas eléctricamente).

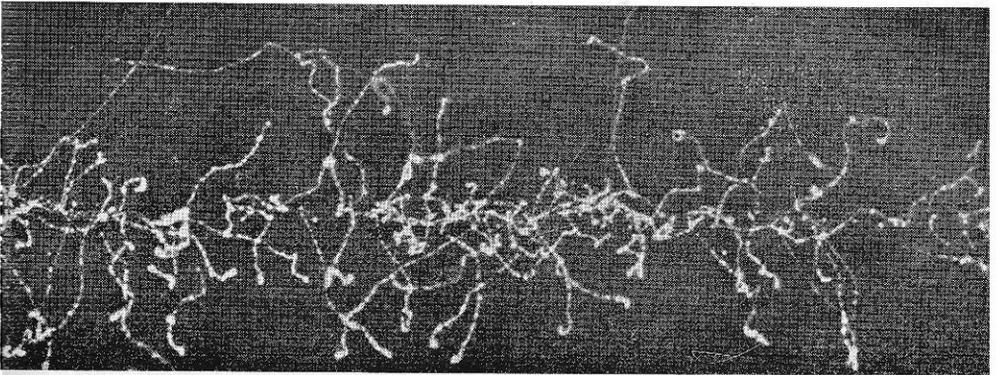
Las partículas alfa de gran poder ionizante, formando unos 10,000 iones por

Lámina VII



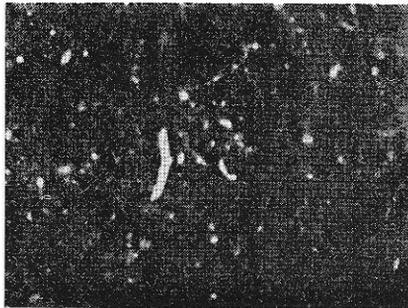
Rayos Alfa producidos por el torio C' (alcance en el aire 8,6 cm.) y el torio C. (alcance en el aire 4,8 cm.), fotografiados mediante la cámara de Wilson.

Lámina VIII



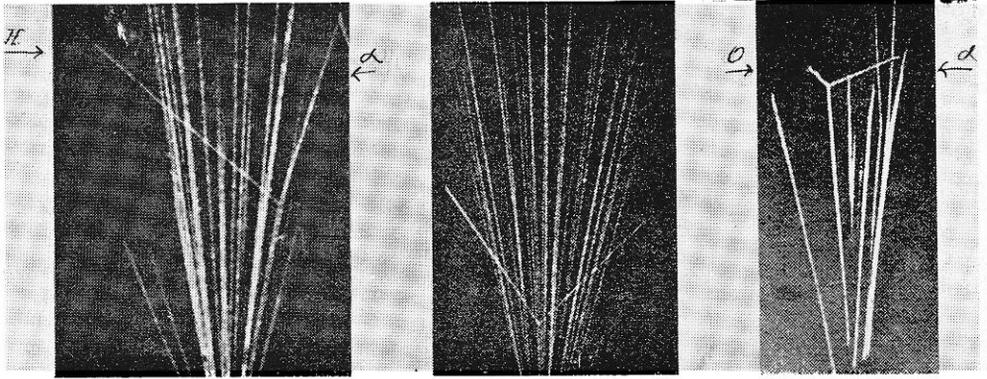
Trayectoria de un electrón secundario, producido por la acción de los rayos X sobre el aire (efecto foto-eléctrico).

Lámina IX



Joliot-Curie

Núcleo de nitrógeno puesto en movimiento por un neutrón invisible.

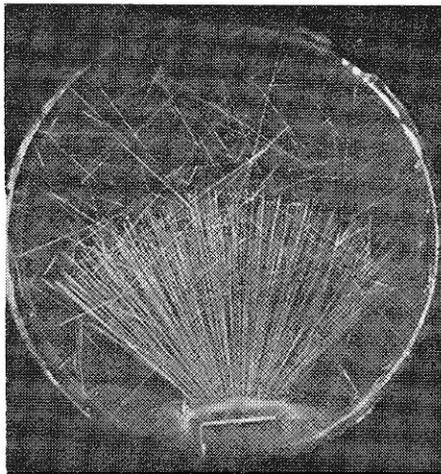


núcleo de hidrógeno;

La partícula Alfa choca con:  
núcleo de helio;

núcleo de oxígeno

Blackett



Fotografía de rayos Alfa del torio C., infestada por rayos Alfa del radón.

centímetro de recorrido, originan una trayectoria de neblina espesa, corta debido a que es absorbido rápidamente por la materia, y recta debido a que siendo pesada no es desviado al chocar con los electrones. La lámina 7 nos indica la fotografía obtenida de los rayos alfa producidos por el torio  $c'$  (alcance en el aire de 8,6 cm.) y el torio  $c$  (alcance de 4,8 cm.).

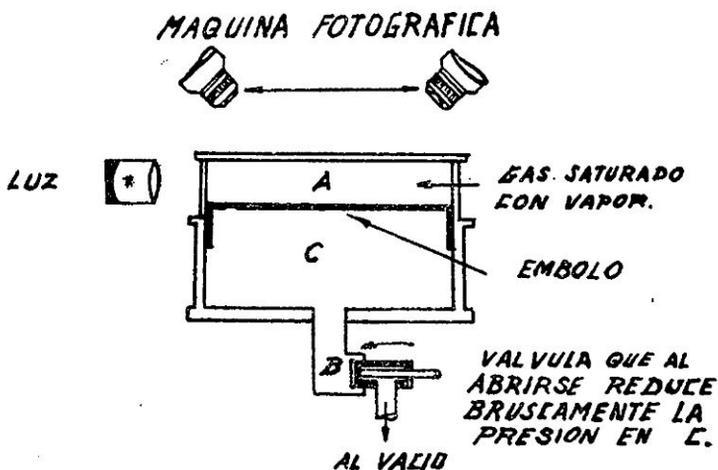


Fig.14.-Cámara de Wilson.

Las partículas beta, que producen sólo unos 100 iones por centímetro, tienen mayor poder penetrante y producen una trayectoria más larga y delgada, pero muy irregular debido a las desviaciones al chocar con los electrones. En muchos casos, se observa que de la trayectoria principal de los electrones, salen otras trayectorias que se deben a que la partícula ha chocado con un electrón, dándole una gran velocidad, siendo entonces este electrón capaz de producir una ionización; en la lámina 8 se ve esta «ionización secundaria» producida por los rayos en el aire mediante el efecto fotoeléctrico.

En la lámina 9 vemos el caso de un núcleo de nitrógeno, puesto en movimiento por un neutrón invisible.

Por consideraciones teóricas se deduce que cuando una partícula choca con un núcleo más liviano, las trayectorias resultantes forman un ángulo agudo; si son de igual peso, el ángulo es recto, y si la partícula es de menor peso que el núcleo con el que choca, el ángulo es obtuso, lámina 10.

La cámara de Wilson es un instrumento sumamente sensible. En la lámina 11 tenemos la fotografía de los rayos alfa del torio  $c$ , infestados por rayos alfa del Radón; se tomó una fotografía con la cámara, y al otro extremo del edificio del laboratorio se abrió un frasco que contenía unos pocos miligramos de radio; una fracción de la emanación, no superior a 1 cien millonésimo de gramo escapó, y una menor cantidad salió al corredor, y una cantidad infinitamente menor llegó a la sala donde se tomaba la fotografía, e impresionó las trayectorias desordenadas. Esta fotografía fué tomada en el laboratorio del Kaiser Wilhelm Institute en Dahlem-Berlín, por los profesores Meitner y Hahn.