

SECCION FÍSICO-MATEMÁTICA

Ideas modernas sobre la constitución de la materia

POR

PABLO KRASSA

(*Conclusión*)

Esta fórmula se puede comparar con las experiencias midiendo las líneas del espectro del hidrógeno. Este trabajo se ha hecho y se sabe que hay pocas medidas cuya exactitud se puede comparar con la exactitud con la cual se pueden medir las longitudes de las ondas de las líneas del espectro o sus frecuencias. Ya hace mucho tiempo se sabía que estas diversas líneas están relacionadas entre sí y *Balmer* había encontrado en el año 1885 una fórmula que les representa todos poniendo λ la longitud de las ondas:

$$\lambda = \frac{1}{A} \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

donde A es un factor constante y n alcanza sucesivamente los valores 3, 4, 5, etc. . . . Para poder comparar esta fórmula deducida empíricamente con nuestra fórmula teórica tenemos que transformarla. Entre λ y ν existe la relación de que el producto $\lambda\nu = c$ igual a la velocidad de la luz (siendo λ la longitud de una onda, ν el número de ondas por segundo, $\lambda\nu$ es el recorrido de la luz por segundo, es decir la velocidad de propagación).

Podemos pues escribir nuestra fórmula también de la manera siguiente:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2m\pi^2e^4}{ch^3} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Por otra parte la fórmula de Balmer se transforma en

$$\frac{1}{\lambda} = A \frac{n^2-4}{n^2} = A \frac{n^2-2^2}{n^2} = \left(1 - \frac{2^2}{n^2} \right) = 4A \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Pongamos en vez de 2 la letra r generalizando la fórmula de Balmer; se obtiene

$$\frac{1}{\lambda} = 4A \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

y salta a la vista la igualdad formal de las dos fórmulas. Pero sin las fórmulas no sólo son semejantes sino idénticas, el coeficiente de Balmer 4A tiene que ser igual a:

$$\frac{2m\pi^2e^4}{ch^3} = R$$

Ya sabemos que conocemos todos los valores para hacer el cálculo de esta cantidad. Resulta, con los mejores datos que tenemos a la vista, igual a $1,09 \cdot 10^5$ mientras que el valor de 4A en la fórmula de Balmer según las experiencias más exactas se calcula igual a 109677,69. No es posible imaginar una coincidencia mejor y el resultado supera todas las esperanzas. Pero una teoría no es completa cuando sólo permite explicar los hechos ya conocidos. Tiene que permitir nuevas comprobaciones. Veámoslas. En nuestra fórmula general tenemos los factores r y m; en la de Balmer r es igual 2. ¿Qué líneas resultarán haciendo r igual a 1 ó a 3 y variando nuevamente? Con $r = 1$ se obtiene una serie que se llama la de Lyman y que no es visible; se encuentra en la región de los rayos ultravioletas. Con $r = 3$ se obtiene la serie ultraraja de Paschen-Ritz, series que no se conocían cuando Balmer propuso su fórmula, y para todos estos casos la coincidencia numérica es sorprendente.

Volvamos ahora al modelo (Tabla V) para demostrar las diversas líneas. El electrón se puede encontrar en las diversas órbitas. Al volver a la órbita segunda se

producirán las líneas de la serie visible de Balmer H_α ; H_β ; H_γ . Al volver a la primera órbita se obtiene la serie ultravioleta, al volver a la tercera órbita la serie ultraroja, ¿Cuántas líneas se podrán producir? Es claro que el electrón, cuando la presión es

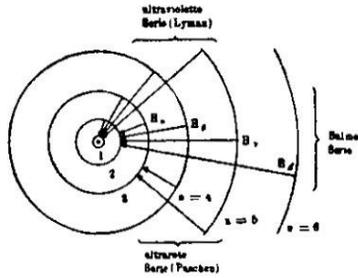


TABLA V

relativamente alta, no puede salir en una órbita muy distante y por esto aun en los tubos de Geissler obtenemos sólo 13 líneas, de emisión, mientras que en las atmósferas de las estrellas donde la dilución es mucho más grande se ha llegado a determinar 29 líneas distintas.

La comprobación cuantitativa que hemos podido hacer es bastante sorprendente. Pero este resultado es sólo una pequeña parte del total alcanzado. Hemos hecho al hacer nuestros cálculos, varias suposiciones para simplificarlos. Así hemos supuesto que la masa del núcleo es inmensa en relación con la del electrón y que este núcleo queda en reposo. Pero podemos fácilmente prescindir de estas suposiciones. Si el núcleo con la masa M también se mueve en órbitas circulares, el núcleo y el electrón se moverán juntos alrededor del centro de gravedad del sistema. En vez de m —la masa del electrón—entrará en nuestra fórmula otro valor de la masa del sistema giratorio, digamos μ . Se puede deducir fácilmente que μ tiene que ser igual a

$$\frac{M m}{M + m}$$

siendo M la masa del núcleo. En vez de a el radio resulta entonces $a + A$, la suma de las distancias del electrón y del núcleo al centro de gravedad.

El valor de R que ha sido:

$$\frac{2 m \pi^2 e^2 E^2}{c h^3}$$

resulta ahora:

$$\frac{2\mu \pi^2 e^2 E^2}{c h^2}$$

o bien:

$$\frac{2 m \pi^2 e^2 E^2}{c h^2 \left(1 + \frac{m}{M} \right)}$$

Para $M = \infty$ resulta nuevamente el valor anterior para R que por esto designaremos por R_∞ , mientras que para el hidrógeno por ejemplo se obtiene

$$R_H = \frac{R_\infty}{1 + \frac{m}{m_H}}$$

¿Cómo podremos aplicar esta fórmula? Nuestra deducción rige para un sistema en el cual un electrón se mueve alrededor de un núcleo cargado de electricidad. Un ejemplo para este caso es el del H, que obteníamos haciendo $e = E$. Pero hay otro caso análogo. El del ion de helio, es decir, del átomo que ha perdido un electrón y por esto consiste también en un núcleo pero con dos cargas + y un electrón. En este caso obtendremos en nuestra fórmula para ν otra constante R, digamos R_{He} y esta será igual a:

$$R_{He} = \frac{R_\infty}{1 + \frac{m}{m_{He}}} = \frac{R_\infty}{1 + \frac{m}{4m_H}}$$

(siendo la masa del He 4 veces mayor que la del H).

es decir un valor algo mayor que el que se obtiene para R_H . Midiendo experimentalmente R_H y R_{He} podemos calcular de nuestras fórmulas la relación de $\frac{m}{m_H}$

$$R_{\infty} = R_H \left(1 + \frac{m}{\pi_H} \right) = R_{He} \left(1 + \frac{m}{4\pi_H} \right)$$

$$R_H - R_{He} = R_{He} \frac{m}{4\pi_H} - R_H \frac{m}{\pi_H} = \left(\frac{R_{He}}{4} - R_H \right) \frac{m}{\pi_H}$$

$$\text{y } \frac{m}{\pi_H} = \frac{R_H - R_{He}}{\frac{R_{He}}{4} - R_H}$$

Los valores de R_H y de R_{He} han sido calculados con gran exactitud por Paschen de una serie de experimentos obteniéndose (doy las cifras con la exactitud de las medidas): $R_{He} = 109722,144 \pm 0,04$ y $R_H = 109677,691 \pm 0,06$.

De estos datos se deduce $\frac{m}{\pi_H} = 1847$. Pero este valor se puede controlar.

En vez de $\frac{m}{\pi_H}$ podemos escribir:

$$\frac{\frac{e}{\pi_H}}{\frac{e}{m}}$$

En esta fórmula el numerador es la carga específica del ion de H, que se conoce muy bien en la electrolisis, siendo como lo he mencionado anteriormente igual a 9650 unidades electro magnéticas, mientras que $\frac{e}{m}$ es la carga específica del electrón. Su valor resulta así $\frac{e}{m} = 1,769 \cdot 10^7$ y este valor está en concordancia muy exacta con las mejores determinaciones que se han hecho por otros métodos. Aun más; debido a la gran exactitud de las medidas ópticas, se ve que éstas podrán servir para la determinación de esta magnitud fundamental.

No puedo entrar en mayores detalles. No puedo hablar de los resultados que se

han obtenido abandonando aun más la suposición es que hemos hecho para nuestros cálculos y tomando en cuenta la posibilidad de órbitas elípticas y la influencia que tiene sobre todos estos cálculos el hecho de que debido a la gran velocidad del electrón en su órbita ya hay que aplicar las reglas de la teoría de la relatividad. Sólo quiero decir que la teoría así completada permite explicar todas las finezas con la cual se han podido observar las líneas del espectro, también bajo la influencia de campos eléctricos y magnéticos.

Resumiendo lo expuesto, podemos decir que Bohr ha logrado formular un modelo para el átomo de H y que las experiencias—y especialmente la del espectro del H—prueban la exactitud del modelo. Pero lo que puede hacerse para el H no es posible para otros elementos, que según nuestras ideas, consisten en un núcleo y varios electrones. Estos varios electrones pueden girar en la misma órbita o en órbitas diferentes, siempre se nos presentará el problema del movimiento mutuo de tres y más cuerpos, para el cual no existe una solución única. Pero mientras que del modelo de H se puede deducir por cálculo a qué movimiento del electrón corresponde cierta línea del espectro, se pueden deducir de las regularidades que muestran los espectros los movimientos de los electrones que causan estas líneas. No puedo demostrar en detalle las bases en que se fundan los cálculos de Bohr, quiero dar sólo el resultado, que sin duda todavía va a sufrir variaciones. Para explicar la tabla VI que reúne este resultado tengo que dar todavía una explicación. Como ya he dicho, las órbitas del electrón resultan, si se hace un cálculo más exacto, en forma elíptica. En el caso de órbitas circulares basta, para determinar las órbitas, un valor, el de n , que puede tener los valores 1, 2, 3, etc. . . Para las órbitas elípticas se necesitan dos factores: uno para el eje mayor y el otro para el eje menor. Si éstos son iguales la elipse degenera en un círculo. Pero pueden ser distintos. Tendremos, pues, para $n=2$ dos posibilidades llamando el otro factor p , $p=1$ y $p=2$; para $n=3$ tendremos tres posibilidades $p=1$, 2 y 3 y los electrones podrán encontrarse en cualquiera de estas órbitas. Según las suposiciones de Bohr los electrones de los diversos elementos se distribuyen como indica la tabla. La primera órbita sólo puede contener dos electrones, las segundas 4 cada una en total 8, las terceras 18, las cuartas y quintas 32. Para imaginar mejor estas regularidades se puede elegir un fenómeno macroscópico algo semejante. Si se ponen en una superficie de agua una serie de agujas puestas sobre corchos y se acerca un imán, entonces se forman ciertas configuraciones según el número de agujas. Los electrones podemos compararlos con las agujas, el núcleo con el imán.

Los cálculos que han inducido a Bohr a elegir justamente los números de electrones indicados en las diversas órbitas son muy complicados y se basan especial-

At.-Gew.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	At.-Gew.
197	Au	—	—	—	—	—	—	—	197
200	—	Hg	—	—	—	—	—	—	200
204	—	—	Tl	—	—	—	—	—	204
206	—	—	β Ac C''	Ra G, Ac D	—	—	—	—	206
207	—	—	—	Pb	—	—	—	—	207
208	—	—	β Th C''	Th D	Bi	—	—	—	208
210	—	—	β Ra C''	β Ra D, β Ac B	β Ra E, α β Ac C	α Po, α Ac C'	—	—	210
212	—	—	—	β Th B	α β Th C	α Th C'	—	—	212
214	—	—	—	β Ra B	α β Ra C	α Ra C', α Ac A	—	—	214
216	—	—	—	—	—	α Th A	—	—	216
218	—	—	—	—	—	α Ra A	—	α Ac-Em	218
220	—	—	—	—	—	—	—	α Th-Em	220
222	—	α Ac X	—	—	—	—	—	α Ra-Em	222
224	—	α Th X	—	—	—	—	—	—	224
226	—	α Ra	β Ac	α Rd Ac	—	—	—	—	226
228	—	β Me Th ₃	β Ms Th ₃	α Rd Th	—	—	—	—	228
230	—	—	—	α Lo, β U Y	α Pa	—	—	—	230
232	—	—	—	α Th	—	—	—	—	232
234	—	—	—	β U X ₁	β U X ₂	α U _{II}	—	—	234
238	—	—	—	—	—	α U _I	—	—	238

mente en consideraciones energéticas. Hemos dicho ya que a cada configuración del átomo, es decir a cada posición del electrón en cada una de sus órbitas, corresponde cierta energía y que con los cambios de energía está relacionada la frecuencia de la línea que se emite. Consideremos ahora un átomo con un peso molecular mayor, es decir, uno que tenga un núcleo cargado con mayor cantidad de electricidad +. Consideremos además uno de los electrones que gira alrededor de este núcleo, prescindiendo por un momento de los otros y supongamos que este electrón salta de una de sus órbitas a otra. La atracción del núcleo con cargas mayores será mucho mayor sobre este electrón que en el caso de hidrógeno. Por esto también aumentarán las energías y con éstas la frecuencia de la luz emitida. Cálculos muestran que por fin se alcanzarán frecuencias como las de los rayos X y tenemos que aceptar, pues, que la emisión de rayos X se debe a saltos de electrones en el interior de átomos más pesados. Bien se sabe que la dureza de los rayos X (su frecuencia) aumenta con el peso molecular—o más bien dicho con el número de orden—del material que les emite. Hemos encontrado para esto una regla deducida por Moseley y puedo agregar ahora, que la teoría permite deducirla cuantitativamente. Pero como las diversas líneas del espectro de hidrógeno se deben a diversos niveles iniciales y finales, las diversas líneas del espectro de rayos X se deberán también a varios cambios de energía con niveles distintos y se distinguen las series K, M, N, L, etc. según el nivel al cual el electrón vuelve a su salto. Pero si no hay electrones en uno de estos niveles no se podrán formar las líneas correspondientes y así podremos juzgar de la presencia o ausencia de ciertas líneas sobre la formación de los niveles correspondientes, y en realidad los datos así obtenidos concuerdan con las ideas expuestas. Es decir, mientras que la serie K se nota ya en los elementos livianos, la N sólo ha sido encontrada en los más pesados.

Se ve así que después de cierto número de pasos en el sistema periódico, Bohr supone la formación de una nueva órbita y se ve que el número total de elementos en las diversas líneas horizontales del sistema periódico coincide con los números 2, 8, 18, 32. Los elementos que tienen la misma configuración exterior tienen cualidades químicas semejantes: Li, Na, K, Rb, Cs, tienen todos un electrón aislado exterior; Be, Mg, Ca, Sr, Ba, tienen dos, etc. Los primeros son monovalentes, los segundos bivalentes. Es decir, forman por ejemplo en solución de sus sales iones con una y dos cargas—respectivamente. Pero estos iones se forman por eliminación de electrones, quedando positivo el resto, y es fácil comprender que será más fácil eliminar los electrones más exteriores y así se explica la valencia de los diversos elementos. Pero se pueden deducir más explicaciones. En el sistema tenemos varios grupos de elementos que se

Z	⁰ k	1 ₁	2 ₁ 2 ₂	3 ₁ 3 ₂ 3 ₃	4 ₁ 4 ₂ 4 ₃ 4 ₄	5 ₁ 5 ₂ 5 ₃ 5 ₄	6 ₁ 6 ₂ 6 ₃ 6 ₄ 6 ₅ 6 ₆	7 ₁ 7 ₂
1	H	1						
2	He	2						
3	Li	2	2					
4	Be	2	2					
5	B	2	2 1					
10	Ne	2	[4 4]					
11	Na	2	4 4	1				
12	Mg	2	4 4	2				
13	Al	2	4 4	2 1				
18	A	2	4 4	[4 4]				
19	K	2	4 4	4 4	1			
20	Ca	2	4 4	4 4	2			
21	Sc	2	4 4	4 4 1	(2)			
22	Ti	2	4 4	4 4 2	(2)			
29	Cu	2	4 4	[6 6 6]	1			
30	Zn	2	4 4	6 6 6	2			
31	Ga	2	4 4	6 6 6	2 1			
36	Kr	2	4 4	6 6 6	[4 4]			
37	Rb	2	4 4	6 6 6	4 4	1		
38	Sr	2	4 4	6 6 6	4 4	2		
39	Y	2	4 4	6 6 6	4 4 1	(2)		
40	Zr	2	4 4	6 6 6	4 4 2	(2)		
47	Ag	2	4 4	6 6 6	[6 6 6]	1		
48	Cd	2	4 4	6 6 6	6 6 6	2		
49	In	2	4 4	6 6 6	6 6 6	2 1		
54	X	2	4	6 6 6	6 6 6	[4 4]		
55	Cs	2	4 4	6 6 6	6 6 6	4 4	1	
56	Ba	2	4 4	6 6 6	6 6 6	4 4	2	
57	La	2	4 4	6 6 6	6 6 6 n	4 4 1	(2)	
58	Ce	2	4 4	6 6 6	6 6 6 1	4 4 1	(2)	
59	Pr	2	4 4	6 6 6	6 6 6 2	4 4 1	(2)	
71	Cp	2	4 4	6 6 6	[8 8 8 8]	4 4 1	(2)	
72	Hf	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	4 4 2	(2)	
79	Au	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	[6 6 6]	1	
80	Hg	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	2	
81	Tl	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	2 1	
86	Em	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	[4] 4	
87	—	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	4 4	1
88	Ra	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	4 4	2
89	Ac	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	4 4 1	(2)
90	Th	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	4 4 2	(2)
118?	—	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	[8 8 8 8]	[6 6 6]	[4 4]

asemejan mucho, como Fe, Ni, Co. Estos no pueden diferir en su configuración exterior y por esto Bohr supone que en estos casos el nuevo electrón se sitúa en una órbita interior. Cálculos complicados sobre la estabilidad de las diversas órbitas prueban esta suposición. Y esta idea ha dado ya un resultado positivo inesperado. Hay un grupo de elementos que se asemejan mucho: las llamadas tierras raras. Empezan con el La (N.º 57) y concluyen antes del Ta (N.º 73). Todas estas deben tener pues una configuración exterior similar y en la tabla se ve que no difieren las órbitas 5 y 6 en todos estos elementos con excepción del último con el N.º 72, desconocido cuando Bohr desarrolló estas ideas. Este elemento N.º 72, por otra parte, muestra una configuración exterior semejante a la del Zirconio y Bohr dudó que se tratara de un elemento de las tierras raras. Este elemento creían haberlo encontrado Auer y Urbain y se le había dado el nombre de Tu II. Como consecuencia de las dudas ocasionadas por la teoría de Bohr, Koster y v. Hevesy buscaron este elemento, partiendo de la hipótesis de que era homólogo del Zirconio, en minerales que contienen este último y consiguieron en realidad encontrarlo, pero con cualidades bien distintas del que se había llamado Tu II. Se demostró que varias sustancias que se creyeron óxido de zirconio puro contenían hasta un 25% de este nuevo elemento que ahora se llama hafnio y que ya ha encontrado usos prácticos después de separarlo del zirconio. Así nuevamente la teoría de Bohr ha comprobado su gran valor.

Hasta aquí sólo hemos hablado de la Configuración de los electrones sin ocuparnos del núcleo, del cual sólo hemos supuesto que el número de cargas positivas que tiene aumenta siempre en uno cuando pasamos de un elemento al próximo en el sistema. Las experiencias de Rutherford sobre la desviación de las partículas α permiten calcular aproximadamente el tamaño de los núcleos y se obtienen valores alrededor de 10^{-12} cm. Un conocimiento más detallado de este núcleo nos suministran los fenómenos radioactivos. Considerando éstos más a fondo se pueden distinguir dos fenómenos distintos: la emisión de rayos α y la de rayos β . Con cada una de estas emisiones está ligada una transformación de los elementos y al fin de estudios muy detenidos se ha podido comprobar que existe una relación entre los diversos elementos radioactivos, así que se pueden formar familias de éstos: Hay tres; la del uranio-radio, la del torio y la del actinio. En nuestra tabla VII los elementos están enumerados. Examinando esta tabla se nota una regularidad que ha sido descubierta por Soddy y por Fajans. En la tabla estan puestos los números de los grupos del sistema periódico a los cuales pertenecen los diversos elementos y se ve que siempre cuando un elemento emite rayos α el producto de su transformación es—fuera del helio—un elemento que pertenece a la penúltima columna anterior y cuando se emiten rayos β el producto de la

transformación pertenece al grupo siguiente a la derecha. ¿Cómo podemos explicar esto? Ya hemos visto que los rayos α consisten en una masa con dos cargas positivas. Cargas $+$ sólo contiene el núcleo. Al perder dos de ellos el número de cargas disminuye así en dos y por esto disminuye también el número de orden del elemento en dos unidades, así que se obtiene un elemento con un número de orden menor en dos y es claro que este elemento tiene que pertenecer al penúltimo grupo anterior. Pero ¿cómo podemos explicarnos la transformación ligada con la emisión de rayos β ? Estos son, como hemos visto, electrones (cargas negativas) y tales hay alrededor del núcleo. Pero cuando se pierde uno de éstos el átomo se ioniza pero no cambia de fondo. Debemos, pues, suponer que el rayo β no proviene de estos electrones sino también del núcleo y tendremos que suponer, pues, también en los núcleos, tales cargas negativas. A la misma conclusión llegamos también por otro razonamiento. El átomo de helio tiene según nuestra suposición 2 cargas positivas mientras que el hidrógeno tiene una. La masa del helio tendría que ser, pues, dos veces mayor que la del hidrógeno. Pero no lo es, sino que es 4 veces mayor. Debe tener por esto 4 cargas positivas y para neutralizar dos de estas 2 cargas negativas. Además, si sólo tuviese cargas positivas, no sería posible explicar por qué estas cargas no se repulsan. Nuevamente hay que suponer que estas diversas cargas positivas y negativas están en movimiento para mantener el equilibrio, pero estamos muy lejos de poder hacer ya cálculos a propósito de las configuraciones posibles. Del H al Ca aumenta el peso atómico en 40 unidades, el número de orden en 20 y podremos explicar pues el núcleo del Ca conteniendo 40 cargas positivas y 20 negativas o bien constituido de 10 núcleos de helio combinados. Si todos los elementos tuviesen esta constitución tendríamos que suponer sólo pesos atómicos múltiples de cuatro (C, O, Ne, Mg, Si, S). Pero hay también otros, como por ejemplo, el N. Su número de orden es 7, debe tener, pues, 7 cargas positivas en total. Este sería el caso si tuviera tres núcleos de helio (12 + y 6—) más dos núcleos de hidrógeno más 1 carga—(1 electrón). Ahora hemos mencionado que Rutherford ha logrado destruir átomos de nitrógeno y que ha obtenido hidrógeno y se ve pues como este fenómeno se explica. La misma presencia de núcleos de hidrógeno tenemos que suponer para los otros elementos que ha podido disgregar Rutherford y todos éstos tienen un peso atómico que no es un múltiplo de 4 mientras que los que son múltiplos exactos como C y O, S, Ca, nunca dieron esta producción de hidrógeno.

Podemos mencionar también que tenemos todavía otra razón para creer en la estabilidad del núcleo de helio. Cuando se unen cuatro cargas positivas de hidrógeno con dos cargas negativas la masa tendría que ser igual a $4 \times 1,008$ igual a 4,032 des-

preciando la masa de los dos electrones. Pero la masa del helio es igual a 4 exactamente y hay, pues, un defecto de masa. Este defecto de masa corresponde a una cantidad perdida de energía que se puede calcular según la teoría de la relatividad igual a $E = mc^2$. En kilo-calorías corresponde este valor para un átomo grammo de helio a $6,3 \times 10^9$ Cal. una cantidad que nos da una idea de la enormidad de las energías que están relacionada con el proceso de la formación del helio y de la imposibilidad de destruir tal átomo.

Volvamos a los fenómenos radioactivos que también nos han revelado la presencia de electrones en el núcleo de tales elementos. Si estos núcleos pierden una carga negativa (un electrón) la suma algebraica de las cargas positivas y negativas debe aumentar en uno y así también aumenta en uno el número de orden y se forma el elemento siguiente. Pero esta transformación no está unida con un cambio de masa como en el caso de la emisión de rayos α . La masa del electrón es despreciable y además el nuevo átomo tiene que agregarse otro nuevo electrón en la parte exterior para quedar neutro.

Aplicando ahora nuestra regla a las familias radioactivas podremos verificarla cuantitativamente, midiendo los pesos atómicos. Como no se conocen exactamente los pesos atómicos de muchos de estos elementos tomamos dos bien conocidos, por ejemplo, el de Ra del cual llegamos al Pb como último producto no más radioactivo por 5 transformaciones α y cuatro β . La diferencia de los pesos atómicos tiene que ser pues 20 y teniendo el Ra el peso atómico 226 resulta para el plomo 206. En verdad es 207,2 y así la comprobación no parece muy exacta. Pero veamos otro caso. También el torio se transforma finalmente en Pb. Necesita para esto 6 transformaciones α y 4 β . Siendo su peso atómico 232 resulta para el plomo $232 - (6 \times 4)$ o sea el valor de 208. Pero así se obtienen dos plomos distintos y conocemos sólo uno con el peso atómico casi término medio 207,2. Para explicar esto se hizo una suposición aparentemente revolucionaria, la de que en verdad existen dos clases de plomo y que la ordinaria es una mezcla de éstas. ¿Cómo podemos probar esta suposición? Si el plomo se forma por transformación de uranio y de torio los minerales de uranio y torio deben contenerlo y así es. Buscando pues un mineral de uranio exento de torio y otro de torio, exento en lo posible de uranio deben tener plomo de peso atómico diferente. Se logró encontrar tales minerales y el plomo de minerales de radio y uranio (se le llama también Radio G) tenía un peso atómico 206, el que se obtuvo de minerales de torio (el llamado torio D) un peso atómico 207,9 correspondiendo, pues, exactamente a la teoría.

Pero estos descubrimientos son en verdad revolucionarios. Hasta ese entonces se

pensaba que el peso atómico es la calidad característica del elemento y ahora se encuentran dos elementos con pesos atómicos distintos pero idénticos en todas las otras cualidades, tan idénticas que no es posible separarles por cualquier método químico. Y además en este lugar del sistema periódico sólo hay espacio para un elemento y ahora lo ocupan dos y tal vez más. Todos estos elementos tienen la misma configuración exterior y por esto, iguales cualidades químicas. La igualdad se refiere también a la estructura interior de los anillos de electrones, pues, aun los espectros de rayos X son iguales. Pero debe diferir el núcleo a pesar de que la suma algebraica de las cargas positiva y negativa es igual. El número absoluto de estas cargas difiere y con esto la masa, el peso atómico. Para no abandonar la noción elemento se dió a tal grupo de elementos el nombre de elementos isótopos o el de una pleiada. Luego se encontraron otros casos de isótopos. Ya se sabía que, por ejemplo, no se podía separar químicamente el radio del mesotorio y que este último siempre contenía Radio. Son otros elementos isótopos y así todos los elementos que se encuentran en un sólo lugar del sistema forman tal grupo.

Surgió luego la cuestión si la posibilidad de isótopos está limitada a los elementos radioactivos o si también existen entre los otros elementos. *Aston* ha logrado demostrar que no sólo hay tales sino que la mayor parte de los que llamamos elementos se componen de más de un sólo individuo. Su método consiste en medir la masa de los átomos ionizados cuando forman rayos canales. Esta medida, o más bien, la de la relación $\frac{e}{m}$ es relativamente fácil por medio de la desviación debida a los campos magnéticos y eléctricos. Y es claro que esta desviación depende exactamente del valor de m , es decir del peso atómico y así se podrán separar isótopos cuya separación por medio de métodos químicos era imposible.

Aston desarrolló este método, así que dió resultados exactísimos; mostró que todos los elementos cuyo peso atómico no es lo menos muy cerca de una cifra entera son compuestos. Y además pudo comprobar que los pesos atómicos verdaderos de los componentes son números exactamente enteros (siempre tomando $O = 16$ como base). Así el elemento cloro por ejemplo, es una mezcla de un Cl_{35} y otro Cl_{37} y aun las concentraciones relativas de estos componentes que se puede determinar por la diferencia de ennegrecimiento que causan las dos clases de rayos canales es tal que se obtiene el peso atómico 35,45 como término medio. Sabido una vez que por ejemplo, el mercurio también se compone de isótopos se logró su descomposición por medio de la destilación fraccionada aunque el resultado no fué tan nítido como en el caso del plomo.

Volvamos ahora al punto de partida, a la última transformación obtenida: la del mercurio en oro. El oro ocupa el lugar anterior al del mercurio en el sistema periódico. No hay pues posibilidad de transformaciones α o β . Pero hay otra. Si los núcleos no sólo contienen configuraciones de helio, es decir partículas α sino también núcleos de H podemos suponer que al eliminar una de éstas baja el número de orden en uno y esa sería la transformación buscada. *Soddy* da otra explicación. Según él, algunos de los electrones que existen en el arco voltaico de mercurio—que ha servido en las experiencias—podrán pasar por la nube de electrones que giran alrededor del núcleo y entrar en él quedando retenidos allá y bajando el número algebraico de cargas positivas de este modo. *Gaschler* que ya había descubierto la transformación de mercurio en oro antes de *Miethe* pero que no había publicado sus experiencias tomando sí una patente de invención se ha formado todavía otra idea.

Piensa que por la corriente especialmente fuerte que se necesita para las experiencias algunos átomos de mercurio pierden más de un electrón exterior. Debido a la carga positiva muy fuerte que así obtiene el resto del átomo, las cargas positivas del núcleo se repulsan hasta que una salga del núcleo. ¿Cuál de estas hipótesis será exacta? El futuro debe decidirlo.

Para terminar quiero resumir que hemos logrado edificar los átomos de electrones—cargas negativas—y de núcleos que aunque sean muy complicados por fin se componen de cargas positivas y negativas. Sólo la configuración diversa forma los diversos elementos, al fin y al cabo toda la materia consiste en electricidad en movimiento. La teoría de la relatividad ya ha exigido la posibilidad de transformación de energía en materia y nuestras ideas tienden así a confirmar este pensamiento: La energía no sólo domina nuestro mundo, sino que también lo forma.

