

CONSTITUCIÓN DE LOS NÚCLEOS ATÓMICOS

DISCURSO DE INGRESO EN LA ACADEMIA
LEIDO POR D. JUAN CABRERA FELIPE
EL DIA 18 DE MARZO DE 1934

Señores académicos:

Me habéis llamado para ocupar a vuestro lado el sitio que dejó vacante nuestro inolvidable amigo y compañero Jerónimo Vecino y Varona, que en la plenitud de su vida nos fué arrebatado por una rápida y cruel enfermedad, a la que no pudo resistir su fortaleza física. Por ser su característica fundamental entregarse de lleno a toda obra a la que sus méritos le llevaban a cooperar, no es sólo esta Academia la que en estos momentos llora tan sensible pérdida al ver alejarse de su seno uno de sus colaboradores más entusiastas, sino que su paso por otras Corporaciones donde intervino en sus múltiples actividades no se olvidará fácilmente, y, por lo mismo, el recuerdo que ha dejado en su Cátedra de la Facultad de Ciencias de Zaragoza hará necesario el transcurso de muchos años para que las futuras generaciones estudiantiles no oigan hablar de las excelentes dotes, dotes inmejorables que poseía para hacer agradables sus explicaciones, a pesar de la altura científica que les daba.

Su extensa labor científica la conocéis perfectamente por el detalle con que la expuso vuestro compañero el Dr. de Gregorio Rocasolano en el discurso de salutación a su ingreso en esta Academia y ahora sólo quiero hacer resaltar una vez

más sus magníficas condiciones de maestro, que ya puso de manifiesto en las oposiciones a la Cátedra de Física general de la Universidad de Santiago, que obtuvo por propuesta unánime del Tribunal en 1914, en cuya época comenzaba mis estudios en la Universidad de Madrid y tuve la satisfacción de conocerle, por la estrecha amistad que le ligaba a uno de mis hermanos. Durante mucho tiempo se habló de las admirables oposiciones realizadas y su paso a la Cátedra, alejándole del Laboratorio de Investigaciones Físicas de Madrid, se recordaba siempre como un orgullo de aquel Laboratorio, del cual fué uno de los que contribuyó con más empuje en su primera época a su rápido funcionamiento y a que adquiriera su prestigio. Como resumen de su trabajo diario en la Facultad, ha dejado su obra magistral "Tratado de Física general", que demuestra las características pedagógicas que le adornaban.

En esta Academia comenzó su labor con el discurso de entrada, en el que expuso de modo admirable los conocimientos que entonces se poseían sobre la constitución de la materia, problema siempre de palpitante actualidad, y después fué un colaborador entusiasta en la gran obra cultural que os habéis propuesto realizar por toda la región aragonesa.

Ya comprenderéis que si, en consideración a mis pocos méritos, he de agradecer de modo expreso el honor que me dispensáis al llamarme a vuestro lado, cuando pienso en el trabajo desarrollado por el compañero que vengo a reemplazar, me encuentro con muchas menos energías, para poder conseguir que pasado el tiempo no os deis cuenta de vuestro error al traerme a compartir con vosotros esta hermosa labor.

Una de mis mayores preocupaciones ha sido elegir el tema para este trabajo que he de presentaros; pues, o bien temía no poder desarrollarlo, o me parecía que era indigno de vuestros merecimientos, y, por ello, he terminado por seguir en la elección un camino que, atendiendo al fin propuesto, me pueda servir para que me perdonéis las faltas que en su exposición encontréis, pues sólo ha sido mi intención hacerlo como homenaje al recuerdo de Jerónimo Vecino y Varcna, y que aunque sólo sea en unos instantes podáis pen-

sar que él sigue a vuestro lado, al oírme hacer un rápido resumen de los conocimientos actuales sobre los núcleos atómicos, como continuación de su discurso de entrada

La existencia para la Física del núcleo atómico tuvo su origen en unas ingeniosas experiencias realizadas en 1911 por el eminente físico inglés Rutherford (1), en las cuales hacía pasar un haz de partículas α a través de la materia. La observación demostró que estas partículas pueden atravesar, sin desviarse de modo sensible, laminillas metálicas de varias centésimas de milímetro de espesor y capas gaseosas de varios centímetros, hecho que es imposible interpretar si consideramos al átomo como una esfera maciza, pues no puede pensarse que dichas partículas pasen en recorridos rectilíneos tan grandes por los intersticios de los átomos, sino que es necesario que en su marcha los atraviesen a ellos mismos.

Para salvar esta dificultad, Rutherford considera los átomos constituídos por una región central, el *núcleo atómico*, en la cual reside casi en su totalidad la masa del átomo y que contiene una carga eléctrica positiva, neutralizada por la carga de signo contrario de los electrones que gravitan a su alrededor, constituyendo el conjunto un diminuto sistema solar; en estas condiciones basta atribuir al núcleo unas dimensiones muy pequeñas y pensar que los electrones se mueven en un espacio relativamente grande, para comprender que si las partículas α son muy pequeñas, de dimensiones análogas al núcleo, encuentran su camino libre de obstáculos y se pueden mover en línea recta.

Ahora bien, si una de esas partículas pasa muy cerca del núcleo, en cuya proximidad el campo eléctrico es muy intenso, sufre una repulsión que, admitiendo la validez de la ley de Coulomb, transforma su trayectoria rectilínea en una hipérbola, tanto menos abierta, cuanto mejor centrado sea el

(1) G. Castelfranchi, *Física moderna*. En esta obra se pueden consultar todos los trabajos sobre el núcleo hasta 1924.

choque y menor su velocidad. La Mecánica enseña que el núcleo ocupa el foco exterior de esa rama de la hipérbola y además conduce a leyes que no sólo confirma la experiencia, sino que de ellas se han podido deducir datos interesantísimos, midiendo las desviaciones sufridas por las partículas α .

En la práctica solo es posible medir el ángulo de las asíntotas de la trayectoria hiperbólica, pues la parte curvilínea no ocupa un espacio superior a las dimensiones del átomo, y, por tanto, como la asíntota de incidencia es conocida porque el haz de partículas α está perfectamente limitado, se sabe el punto de impacto en la laminilla metálica, y para conocer la dirección de la asíntota de salida, basta determinar otro punto, lo que se consigue aprovechando el efecto producido por dichas partículas cuando caen sobre una pantalla fluorescente; Crookes observó que al mirar dicha pantalla con un microscopio de pequeño aumento se percibe un centelleo que denuncia los impactos de las partículas, pudiéndose contar el número de las que llegan a una cierta superficie en un tiempo determinado.

Otro método que ha suministrado a la Física nuclear servicios inestimables, permite fotografiar la trayectoria completa de la partícula, gracias a la aplicación del método de la niebla, de Wilson. Cuando en una atmósfera saturada de vapor de agua se produce una expansión brusca, el enfriamiento que la acompaña da lugar a la formación de pequeñas gotas sobre los iones gaseosos que puedan existir, gotas que se pueden hacer visibles e incluso fotografiar mediante una iluminación lateral. Pues bien, las partículas α , en sus recorridos, rozan con la parte superficial de los átomos, disminuyendo algo su velocidad, pero sin variar de dirección por la pequeña influencia de ese roce, y en cambio, el átomo se rompe en dos partes electrizadas de signos contrarios por perder algunos de sus electrones corticales, dando lugar a los iones gaseosos necesarios para obtener las fotografías de Wilson, que dejan impresas las huellas de esas partículas. Así se obtienen trayectorias perfectamente rectilíneas o a lo sumo con un codo más o menos pronunciado y precisamente cerca del final de la trayectoria cuando la partícula ha perdido parte

de su velocidad y está en mejores condiciones para ser desviada.

El desarrollo de la teoría de Rutherford de estas desviaciones, conduce a fórmulas que la experiencia ha de confirmar; sin entrar en detalles, nos limitaremos a dar el resultado que encierra las leyes fundamentales y que se condensan en la expresión

$$x = X \frac{nd E^2 e^2}{r^2 M^2 v^4 \sin^2 \frac{\varphi}{2}}$$

siendo x el número de partículas α desviadas un ángulo φ y que llegan a la unidad de área colocada a la distancia r de la hoja metálica de espesor d , X el número total de partículas que atraviesan la lámina, v su velocidad, M su masa, n el número de átomos contenidos en la unidad de volumen de la lámina, E la carga eléctrica del núcleo y e la del electrón o unidad elemental.

Geiger y Marsden, utilizando el método del centelleo, comprobaron en 1913 la exactitud de esta fórmula en lo que se refiere a la relación que liga el número de centelleos al espesor de la lámina, a la velocidad de las partículas y al ángulo de desviación, y lo que era más interesante, se les presentaba un medio para medir la carga E del núcleo atómico. Esta medida era de una delicadeza extraordinaria por tener que determinar directamente, no sólo el número x de partículas α que llegan a la pantalla fluorescente, sino también el número total X de todas las que llegan a la lámina metálica, números de orden de magnitud completamente diferente, sobre todo en cuanto el ángulo de desviación es un poco grande; basta indicar que en las experiencias de Geiger y Marsden, de 3 millones de partículas α incidentes, sólo contaban una por mm.² para un ángulo de desviación de 45°. A pesar de la poca precisión de sus medidas, pudieron establecer que en el caso del oro el número de unidades elementales de carga positiva de su núcleo debiera ser aproximadamente igual a la mitad de su peso atómico. Chadwick,

perfeccionando el método, en 1920 encontró para la carga eléctrica de los núcleos del cobre, la plata y el platino los valores

Cu	Ag	Pt
29,3	46,3	77,4

muy aproximadamente iguales al *número atómico* o número de orden de estos elementos en la clasificación periódica:

29	47	78
----	----	----

mientras que se diferencian bastante de la mitad de sus pesos atómicos:

31,8	53,9	87,6
------	------	------

quedando así de manifiesto, como ya lo había indicado por otro camino el joven físico inglés Moseley, la mayor importancia que en todos los fenómenos físico-químicos tiene el número atómico frente al peso atómico.

De todo esto resulta que

$$E = Ze$$

siendo Z el *número atómico* del elemento en cuestión, y como el átomo ha de estar en estado neutro, es necesario que fuera del núcleo exista una carga igual y de signo contrario, que es debida precisamente a los Z electrones corticales. A este resultado, es decir, a que el número de electrones corticales debe ser aproximadamente igual a la mitad del peso atómico, había llegado ya J. J. Thomson en 1906 estudiando la difusión de un haz de rayos X por la materia. Por consiguiente, el número de electrones extranucleares debe ser 1 en el hidrógeno, 2 en el helio, etc., y 92 en el uranio, y si se tiene en cuenta que la masa del átomo de H es $1,66 \times 10^{-24}$ gr. y la del electrón $9,03 \times 10^{-28}$ gr., en el caso del uranio, que es

el más favorable, todos los electrones corticales tienen una masa total igual a unas 0,05 de la masa del átomo de hidrógeno, cantidad inferior al error que se comete en la mayor parte de los métodos de medida de los pesos atómicos y, en consecuencia, como ya hemos dicho, se puede considerar que en los núcleos atómicos se encuentra toda o *casi* toda la masa del átomo.

Este hecho es todavía mucho más interesante si se tienen en cuenta las pequeñas dimensiones de los núcleos, a cuyo conocimiento se ha llegado fundándose en el mismo fenómeno de que venimos hablando. En efecto, hemos dicho que Geiger y Marsden comprobaron las leyes deducidas teóricamente por Rutherford a partir de ciertas hipótesis, y, por consiguiente, dicha comprobación se puede considerar como una prueba de su realidad; entre ellas debemos destacar la validez de la ley de Coulomb; ahora bien, como obtuvieron resultados satisfactorios incluso para partículas α desviadas un ángulo de 150° , para lo cual es necesario que se aproximen mucho al núcleo, a pesar de lo cual la repulsión que sufren sigue siendo inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, resulta que a lo largo de esa trayectoria *no* se ha producido un *verdadero choque con el núcleo*, es decir, que su radio debe ser inferior a la distancia mínima a que haya pasado la partícula. Así se ha encontrado, por ejemplo, que los límites máximos de los radios del cobre y del oro son respectivamente $1,2 \times 10^{-12}$ cm. y $3,2 \times 10^{-12}$ cm., y si se tiene presente que los radios atómicos son del orden de 10^{-8} cm., podemos decir que los núcleos están constituidos por materia enormemente condensada, con densidades prodigiosas. En el caso del núcleo de oro, resulta, con las dimensiones dadas, que su densidad es, por lo menos, igual a 3 billones, es decir, unos 150 mil millones de veces superior a la densidad normal del propio metal, lo que ha permitido interpretar las fabulosas densidades que la Astronomía ha llegado a atribuir a algunas estrellas, teniendo presente que a las temperaturas que reinan en ellas, los átomos han perdido su cortejo de electrones corticales y se han reducido exclusivamente a sus núcleos.

En el caso del núcleo de hidrógeno, también es muy interesante el resultado. Rutherford, estudiando el choque de las partículas α del *Ra* con los átomos de hidrógeno, al lanzarlas en una atmósfera de este gas, pudo poner de manifiesto que los núcleos de hidrógeno eran lanzados con una velocidad 1,6 veces superior a la de la propia partícula α , lo que indica que los centros se han aproximado a una distancia de $1,7 \times 10^{-13}$ cm., y si se tiene en cuenta, como veremos, que la partícula α contiene dos electrones, y por tanto, su radio ha de ser, por lo menos el del electrón, es decir $1,9 \times 10^{-13}$ cm., resulta que dentro de los errores experimentales el radio del núcleo de hidrógeno ha de ser despreciable respecto al radio del electrón. Ahora bien, sabéis que para explicar la masa del electrón, unas 1.840 veces inferior a la del átomo de hidrógeno, se ha conseguido atribuirle un origen electromagnético y así se ha podido calcular su radio por la fórmula $m = \frac{2e^2}{3r}$; pero esto nos permite también interpretar la masa del núcleo de hidrógeno, bastando para ello atribuirle un radio 1.840 veces menor que el del electrón, es decir, del orden de 10^{-16} cm., dimensiones que escapan a nuestra imaginación, pero de cuya insignificancia podemos hacernos una idea al pensar que si construyéramos un sistema semejante al átomo de hidrógeno, pero cuyas dimensiones fueran 100 billones de veces superior, el electrón cortical sería una esfera de 2 decímetros de radio colocado a 5 kilómetros de un núcleo que sólo tendría 0,1 mm. de radio, de tal modo que un observador colocado junto al electrón y provisto de un buen antejo astronómico, sería incapaz de ver el núcleo.

Hemos dicho que en el núcleo atómico reside casi la totalidad de la masa material del átomo y, por tanto, su valor lo podríamos tener a partir de los resultados de la Química sobre la medida de los pesos atómicos; sin embargo, pensando que en estas medidas se opera siempre con *grandes* cantidades de substancia, se comprende la importancia que tiene el poder llegar a hacer una *pesada* directa de cada núcleo.

En realidad, este caso sólo se ha presentado en el H^+ y en el He^{++} , pues en los demás átomos sólo se consigue operar faltándole alguno de sus electrones corticales, ya que en nuestros laboratorios no se ha podido disponer de los medios necesarios para dejar a los núcleos completamente libres de su cortejo.

Cuando uno de estos átomos desprovisto, por lo menos, de alguno de sus electrones corticales, es lanzado en un campo eléctrico, queda sometido a una fuerza proporcional a la carga eléctrica e que transporta, y según la Mecánica, le comunica una aceleración que depende de su masa m , de tal modo, que si E es la intensidad del campo eléctrico, la aceleración en su propia dirección es

$$a = \frac{e}{m} E$$

de cuya medida podemos calcular la relación $\frac{e}{m}$. Análogamente, si la partícula es lanzada perpendicularmente a las líneas de fuerza de un campo magnético H , éste ejerce sobre ella una fuerza perpendicular a su velocidad y al campo, y de valor evH , lo que da lugar a una trayectoria circular, de modo que esta fuerza quede compensada por la fuerza centrífuga $m\frac{v^2}{\rho}$, siendo ρ el radio de la circunferencia, de donde resulta

$$v = \frac{e}{m} \rho H.$$

La aplicación simultánea de un campo eléctrico y uno magnético paralelos fué realizada por primera vez por J. J. Thomson, logrando por este procedimiento que todas las partículas del haz atómico que tengan el mismo valor de $\frac{e}{m}$ se agrupen en su marcha y sobre una placa fotográfica perpendicular a la dirección inicial del haz dejen una huella lineal en forma de parábola, de cuyas características se puede deducir el valor de dicha relación. Al utilizar J. J. Thomson

este método en colaboración con Aston en 1913, para estudiar el neon atmosférico, se encontró con la presencia de dos parábolas, que ponían de manifiesto la existencia de dos especies de átomos Ne_{20} y Ne_{22} , donde el subíndice indica la masa atómica o *número de masa* correspondiente, lo que parecía demostrar que se trataba de una mezcla de gases.

Estas investigaciones quedaron en suspenso, como otras muchas, a consecuencia de la guerra europea, y hasta 1919 no las reanudó Aston, después de haber introducido en sus aparatos importantes perfeccionamientos que le permitían obtener los números de masa con una precisión de 1/1.000; entonces no sólo dejó plenamente confirmada la existencia de los dos elementos que por mezcla daban lugar al neon atmosférico sino que extendió su estudio a 29 elementos, y en la mayor parte de los casos encontró que aquellos cuerpos que se habían considerado como simples por su comportamiento físico-químico, eran, en realidad, mezclas de varios elementos de propiedades idénticas, pero de masas diferentes, lo que ha llevado a darles el nombre de *isótopos* por ocupar el mismo lugar en la clasificación periódica.

Además de haber confirmado en los cuerpos no radioactivos el descubrimiento de la isotopía, hecho anteriormente por Soddy, este trabajo de Aston tuvo otra importancia capital. De sus medidas y dentro de los errores experimentales, se encontró que si se toma para el número de masa del oxígeno 16, todos los demás *elementos* tienen números de masa enteros, siendo la única excepción el hidrógeno, al cual corresponde el valor 1,0078; es decir, que los pesos de los átomos de todos los elementos, con la aproximación de una milésima, son múltiplos enteros del peso del átomo de hidrógeno disminuído en 8 milésimas.

Con este resultado parece volverse a la hipótesis de Prout, de comienzos del siglo pasado, según la cual, todos los átomos están formados por una materia primordial única que es el átomo de hidrógeno, y que fué desechada al observar los valores fraccionarios que en general presentan los pesos atómicos; una vez descubierto que estos valores frac-

cionarios son debidos a no tratarse con verdaderos elementos, sino con mezclas, desaparece la dificultad, pues la condensación de las 8 milésimas de cada átomo de hidrógeno la explica perfectamente la Física moderna, teniendo presente que la masa de un cuerpo no es un coeficiente característico de él, sino que depende también de la energía almacenada, de tal modo, que toda modificación de ésta va ligada a una variación de la masa, según la fórmula

$$\Delta m = \frac{\Delta \epsilon}{c^2}$$

siendo c la velocidad de la luz, y, en consecuencia, basta admitir que al formarse un átomo a partir de varios de hidrógeno, se produce una emisión de energía que asegura su estabilidad al mismo tiempo que disminuye la masa del compuesto.

De acuerdo con esta manera de razonar, la disminución de masa tiene un gran interés por poder darnos una idea sobre la estabilidad del elemento producido, y se explica que Aston intentara determinarla con la mayor exactitud posible, para lo cual hizo nuevos perfeccionamientos en su espectrógrafo de masas, que dió a conocer a fines de 1927 en el Congreso celebrado en Como, con cuyo aparato puede determinar las masas con la aproximación de $1/10.000$. Hasta hoy se han estudiado unos 70 elementos, y de ellos sólo 18 se presentan como verdaderos elementos, siendo todos los demás mezclas de varios isótopos, cuyo número máximo aparece en el caso del estaño que tiene 11. Además, al aumentar la precisión de las medidas, ha resultado que la excepción del valor fraccionario del hidrógeno se generaliza y lo presentan todos los cuerpos, aunque en menor grado. Si se trata de un elemento en cuya formación se supone que han intervenido N átomos de hidrógeno y los resultados de Aston dan para su número de masa A , la pérdida de masa será $A - N = \Delta A$, es decir, que cada átomo de hidrógeno ha perdido

$$a = \frac{\Delta A}{N}$$

magnitud que podemos llamar *índice de ligadura* (1) (packing-fraction de Aston) del núcleo, pues multiplicada por c^2 nos daría la energía perdida en la asociación de cada átomo de hidrógeno, y cuanto mayor sea, tanto mayor será la estabilidad del núcleo. Aston encontró que la pérdida de energía en la formación de los diversos elementos va aumentando con el número atómico hasta $Z = 30$, y después desciende, pero más lentamente, lo cual demuestra que la estabilidad del elemento empieza por aumentar para después decrecer, quedando así explicada, en cierto modo, la existencia de los elementos radiactivos al final de la clasificación periódica y su espontánea transmutación hacia elementos de menor peso atómico y, por tanto, de mayor estabilidad.

De todo lo dicho resulta que como el núcleo del átomo contiene la casi totalidad de su masa, si se trata de un elemento de peso atómico A , en su núcleo deben existir A unidades materiales, que podemos identificar con el núcleo de hidrógeno por lo que se le llama el *protón*, y como entonces tendría una carga eléctrica positiva de A unidades y sólo debe tener tantas como indique su número atómico Z , los A protones han de estar unidos a $E = A - Z$ electrones. A estos resultados se ha llegado a partir de propiedades exteriores del núcleo, en las cuales ha actuado en conjunto y se comprende que tiene interés el estudio de aquellos fenómenos que ocurren dentro del propio núcleo, dando lugar a modificaciones, de cuyo estudio se podrá obtener alguna idea acerca de su constitución. Estas modificaciones o transmutaciones ocurren espontáneamente, como en los fenómenos radiactivos, y sobre ellas no podemos ejercer influencia alguna, o bien se las provoca artificialmente por los medios que ha enseñado la técnica moderna, permitiendo hacer un análisis de los núcleos, cuyo interés es de tal magnitud que podemos

(1) B. Cabrera. La evolución de los elementos químicos. — An. Soc. Esp. F. y Q. vol. 26, pág. 186, 1928.

decir es el problema de mayor importancia de la Física contemporánea. Vamos a ver hasta dónde se ha llegado por los dos caminos.

Sabéis que los fenómenos radiactivos consisten en la propiedad que presentan algunos cuerpos situados al final de la clasificación periódica de emitir unas radiaciones determinadas cuya naturaleza y propiedades ha llevado a clasificarlas en tres grupos que han recibido los nombres de rayos α , β y γ . Los dos primeros tipos son de naturaleza corpuscular, y los últimos de naturaleza ondulatoria, exactamente análogos a la luz, de la que sólo se diferencian por su menor longitud de onda, lo que les hace poseer un gran poder penetrante, de diez a cien veces superior al de los rayos β , que a su vez son unas cien veces más penetrantes que los rayos α . Dadas estas relaciones, os podéis dar cuenta de su poder penetrante, teniendo presente que para absorber los últimos rayos basta una lámina de aluminio de unas centésimas de milímetro de espesor.

Los rayos α y β se han estudiado utilizando las desviaciones que experimentan en campos eléctricos y magnéticos, y así se ha encontrado que los rayos β son análogos a los rayos catódicos y, por tanto, se trata de electrones lanzados a grandes velocidades, cuyo valor depende de la substancia de donde proceden; pero, en general, superior a la velocidad de los rayos catódicos y en algunos casos incluso se aproxima mucho a la velocidad de la luz.

En cuanto a los rayos α , que por muchas razones son los más importantes, el estudio de las mencionadas desviaciones ponen de manifiesto que se trata de partículas cargadas positivamente con una velocidad alrededor de los 20.000 km. por seg., también variable de unos rayos a otros, pero con un valor de la relación $\frac{e}{m}$ perfectamente constante e igual a la mitad del valor correspondiente al ión hidrógeno. Este resultado se podría explicar suponiendo que se trata de moléculas de hidrógeno con una carga positiva, pero Rutherford y Royd recibieron estas partículas en un tubo de Geissler y

después de un par de días empezaron a observar que al producir la descarga eléctrica aparecía el espectro del helio que poco a poco iba aumentando de intensidad, de modo que ya no queda duda de que los rayos α son partículas de He^{++} con dos cargas positivas, y como sabemos que el helio sólo tiene dos electrones corticales, se trata sencillamente de *núcleos* de helio y, por tanto, de dimensiones pequeñísimas, gracias a lo cual tienen el poder penetrante de que hemos hablado; pues, además, aunque su velocidad es menor que la de los rayos β , como su masa es mas de siete mil veces superior a la del electrón, su energía cinética es muy superior a la de los rayos β . Esta energía la van perdiendo los rayos α al chocar con las moléculas que encuentran en su camino y producir la ionización que permite la obtención de sus huellas por el método de Wilson, hasta que después de un cierto recorrido no tienen la energía suficiente para dar lugar a la ionización y entonces se dice que se han detenido; la longitud de su recorrido es característica de cada partícula, según el cuerpo de donde procede, y su valor en el aire en las condiciones normales de presión y temperatura está comprendido entre 2,5 cm. y 11,5 cm., según el cuerpo radiactivo que las emite. Finalmente, el recorrido de la partícula cumple con la ley de Geiger, según la cual la longitud del recorrido es proporcional al cubo de su velocidad inicial.

En el caso de las partículas α , su origen es perfectamente claro: proceden del núcleo atómico, pues fuera de él no existen sino los electrones corticales; pero precisamente por esto los rayos β pueden proceder tanto del núcleo como de la zona cortical, y de hecho en la práctica ocurren las dos cosas. Aquí se nos presenta, por primera vez, un fenómeno de transmutación de los elementos, pues por las ideas expuestas sobre los núcleos atómicos, siempre que de ellos sale alguna de sus partes constituyentes se produce una modificación, originando un elemento diferente: Si es emitida una partícula α , el núcleo pierde de masa 4 unidades y su carga eléctrica disminuye en las 2 unidades que transporta; luego se ha de crear un nuevo elemento cuyo número de masa es inferior en 4 unidades al primitivo y su número atómico en 2 unidades, es decir, que

retrocede dos puestos en la clasificación periódica. Si la partícula emitida es β , entonces la masa del núcleo no varía, pero su carga eléctrica positiva aumenta en una unidad por perder una carga negativa, y el nuevo elemento tiene el mismo número de masa que el primitivo, pero habrá adelantado un puesto en la clasificación periódica y tendrá, por tanto, propiedades completamente diferentes a pesar de su misma masa, constituyendo lo que se llama cuerpos *isobaros*. A este resultado habían llegado ya en 1913 e independientemente Soddy y Fajans al estudiar las propiedades de los diversos cuerpos de las series radiactivas en relación con la causa que los origina, y pone de manifiesto que los rayos β , que producen transformaciones radiactivas, proceden del núcleo atómico.

En cuanto a los rayos γ , su origen no está todavía aclarado, si bien parece que en los momentos actuales se tiene una buena orientación. En un principio, por analogía con lo que sucede en la zona cortical, donde el desplazamiento de un electrón da lugar a los rayos luminosos y a los rayos X, se pensó que los rayos γ eran una radiación electromagnética que acompaña a los rayos β , y hoy se tiende a pensar que cuando se produce en un elemento la emisión de una partícula α , el nuevo núcleo originado aparece en un estado inestable, cuya transición a un estado más estable va acompañada de la emisión de energía en forma de rayos γ , es decir, que estos rayos van unidos a la emisión α , pero su origen está en el núcleo del nuevo elemento creado.

El hecho de que en estas emisiones radiactivas sólo aparezcan partículas α y β lleva a pensar que sean elementos constituyentes de los núcleos en los que conservan su individualidad; por lo que se refiere a las partículas β , no hay dificultad por tratarse de electrones; pero no así en el caso de las partículas α debido a su constitución compleja; ahora bien, teniendo presente que según las ideas actuales han de estar formadas por 4 protones y 2 electrones, su masa debiera ser aproximadamente 4,03, en vez de 4 que es el peso atómico del helio, luego al formarse un átomo-gramo de

helio se pierden 0,03 gr. de masa, que aparece en forma de energía de valor

$$0,03 \times 9 \times 10^{20} \text{ ergios} = 6 \times 10^{11} \text{ calorías}$$

lo que corresponde aproximadamente al calor desarrollado en la combustión de unas 100 toneladas de carbón, número que es de tal magnitud que explica la extraordinaria estabilidad de esta partícula, pues para descomponerla sería necesario restituirle esta misma energía. En resumen, los elementos constituyentes de todos los núcleos deben ser: partículas α y electrones; pero como entonces los pesos atómicos serían siempre múltiplos de 4, es necesario añadir 1, 2 ó 3 protones, según los casos.

Es evidente que al suponer una constitución tan sencilla de los núcleos, se hace una hipótesis atrevida, puesto que procede de generalizar un resultado obtenido en pocos elementos y sólo como consecuencia del estudio de un fenómeno que la Naturaleza nos presenta sin intervención alguna de nuestra voluntad, y, por tanto, es natural que se haya intentado producir las transmutaciones artificiales atacando directamente a los núcleos atómicos, para lo cual no sólo es necesario atravesar la capa cortical de electrones, sino, además, conseguir penetrar en el propio núcleo. Afortunadamente en este problema, el descubrimiento de los fenómenos radiactivos vuelve a suministrar a la Física su valiosa ayuda, proveyéndola de proyectiles con una energía cinética fantástica, pues, por ejemplo, las partículas α emitidas por el *Ra C* tienen una velocidad 10.000 veces superior a la de una bala de fusil y, por tanto, poseen a igualdad de masa una energía cinética 100 millones de veces superior, y si bien al pasar a través de los átomos sólo tienen una pequeña probabilidad de chocar con uno de ellos, cuando lo hacen pueden dar lugar a una desintegración, sobre todo si se trata de un átomo del comienzo de la clasificación periódica para que su campo eléctrico repulsivo sea más débil.

Así como en las desintegraciones radiactivas, de acuerdo

con los resultados de Aston, un elemento se transforma en otro de menor masa por tener mayor estabilidad, en el caso de las transmutaciones artificiales de los elementos ligeros, puede esperarse que se transformen en otros de mayor masa, es decir, que en vez de una desintegración atómica se ha de producir una verdadera síntesis, por medio de reacciones intranucleares.

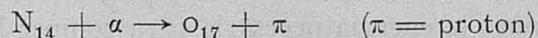
El primer fenómeno de este tipo fué observado por Rutherford estudiando el paso de un haz de partículas α del *Ra C* por diferentes gases. En primer lugar, si la partícula α llega a una masa de hidrógeno, las leyes del choque elástico demuestran que al encontrar un átomo de hidrógeno le debe comunicar una velocidad 1,6 veces superior a la propia de la partícula, y, por tanto, según la ley de Geiger, su recorrido en el aire en las condiciones normales debe ser 4 veces mayor. Las partículas α del *Ra C* tienen un recorrido de 7 cm. y Rutherford pudo observar que al hacerlas llegar a una atmósfera de hidrógeno, el centelleo de la pantalla fluorescente de observación era visible hasta distancias de 29 cm., poniendo de manifiesto la presencia de partículas más penetrantes; su estudio por medio de las desviaciones en los campos eléctrico y magnético condujo a la consecuencia de que se trata de partículas con una carga eléctrica elemental positiva y una masa igual a la del átomo de hidrógeno, es decir, se trata de protones libres, de acuerdo con la teoría. Estos corpúsculos también aparecen cuando el haz de partículas atraviesa una substancia, como la parafina, que contenga hidrógeno, pues la energía necesaria para romper la molécula es muy pequeña comparada con la energía de la partícula α incidente.

Comprobado este fenómeno, Rutherford se encontró con que al sustituir la atmósfera de hidrógeno por una de oxígeno, no aparecen esas partículas de gran recorrido, mientras que si la atmósfera es de nitrógeno, el centelleo se produce hasta recorridos equivalentes a 40 cm. de aire. Por consiguiente, estas partículas producidas por el choque de los rayos α con átomos de nitrógeno, son más penetrantes que las originadas en el choque directo con átomos de hidró-

geno; pero las desviaciones eléctricas y magnéticas continúan indicando que se trata de protones libres, que no podemos atribuir a su posible existencia en alguna combinación química, puesto que entonces su recorrido no debe pasar de 30 cm. En consecuencia, es necesario admitir que estos protones son arrancados de los núcleos atómicos del nitrógeno por el choque de las partículas, es decir, que por primera vez se estaba en presencia de la descomposición de un átomo por una acción externa.

Rutherford en colaboración con Chadwick continuó estos estudios sobre diferentes substancias, encontrando que entre el boro ($Z=5$) y el Potasio ($Z=19$) todos los elementos, excepto el oxígeno y el carbono, sobre los cuales queda alguna duda, se pueden desintegrar por la acción de los rayos α , dando lugar a protones rápidos.

Blackett (1) consiguió en 1925 fotografiar por el método de la niebla uno de estos choques entre la partícula α y un átomo de nitrógeno, demostrando que esta acción no se limita sencillamente a la expulsión de un protón, sino que se trata de un fenómeno mucho más complejo. La trayectoria inicial de la partícula α se divide en dos en el momento del choque, indicando que, después sólo existen dos partículas, una de las cuales es el protón y la otra debe proceder del átomo primitivo que ha capturado la partícula α y se ha transformado en un nuevo elemento por una reacción intranuclear, cuya ecuación sería



pues el N_{14} , al ganar una partícula α y perder un protón, da lugar a un elemento cuya carga nuclear ha aumentado en una unidad y, por tanto, se trata de un isótopo del oxígeno con una masa igual a la del nitrógeno aumentada en 3 unidades. Y con este resultado estamos en condiciones de pensar que en las transmutaciones de los demás elementos deben producirse reacciones análogas, dando lugar a síntesis

(1) Proc. Roy. Soc. 107, 349, 1925.

que también están de acuerdo con los resultados de Aston, pues, como ya hemos dicho, por debajo de $Z=30$ la estabilidad del elemento aumenta con el número atómico; además, en ellas, lo mismo que en las transformaciones radiactivas, existe un desarrollo de energía, pues la energía cinética del protón emitido es superior a la de la partícula α incidente.

Este razonamiento parece confirmar la hipótesis de la existencia en los núcleos de protones aislados y, además, permite realizar el sueño de los alquimistas, aunque con un rendimiento irrisorio, pues Rutherford calcula que para producir la liberación de un protón se necesitan 300.000 partículas α , y si pudo descubrir la transmutación correspondiente, fué sólo debido a la extraordinaria sensibilidad de su método de medida. Por otra parte, el hecho de que en las transformaciones espontáneas de la Naturaleza no aparezca este tipo de rayos formados por protones, se debe interpretar suponiendo que las agrupaciones que constituyen las partículas α existen en los núcleos, pero ligadas a ellos menos energéticamente que los protones aislados.

Recientemente se ha descubierto un nuevo elemento constituyente de los núcleos. En 1930, Bothe y Becker (1), descubrieron en Alemania que al bombardear el glucinio con los rayos α del Po se produce la emisión de una radiación penetrante que parecía ser análoga a los rayos γ , pero de un poder de penetración mucho mayor. A fines de 1931, Irène Curie y su esposo F. Joliot (2), repitieron estas investigaciones en el Instituto del Radio de París, y no sólo confirmaron la existencia de la mencionada radiación originada en el glucinio, sino que también observaron su producción en los casos del B y del Li , si bien en el último con un poder de penetración mucho menor; de todos modos, en los dos primeros casos la radiación correspondiente estaría comprendida, por su poder de penetración, entre los rayos γ y las llamadas radiación cósmicas o ultrapenetrantes, y por

(1) Zeit. f. Phys. 66, 289, 1930.

(2) Irène Curie y F. Joliot. L'existence du neutron. Actualités Scientifiques et Industrielles XXXII.
Louis Leprince Ringuet. Les transmutations artificielles. Actualités Scientifiques et Industrielles IV.

ser desconocidas sus propiedades pensaron si serían capaces de provocar fenómenos de transmutación, caracterizados por la emisión de partículas ionizadas (protones o rayos α).

Utilizando (1) láminas muy delgadas de *Pb*, *Ag*, *Cu* y *Al*, no observaron ninguna modificación, pero si la substancia atravesada era hidrogenada, como la parafina, entonces la cámara de Wilson puso de manifiesto la aparición de rayos *H* (protones), que no podían interpretarse como debidos a un fenómeno de desintegración, puesto que para producirse era necesaria la presencia de hidrógeno en la substancia irradiada. Análogamente, si la radiación penetra en una atmósfera de helio, también se obtienen núcleos de helio lanzados, constituyendo rayos α de pequeño recorrido. Si realmente se tratase de una radiación análoga a los rayos γ , estaríamos en presencia de un fenómeno nuevo, como es la proyección de núcleos atómicos por la acción de una radiación, que, por otra parte, debe existir, puesto que en la cámara se observan también trayectorias de electrones secundarios debidos al efecto fotoeléctrico. La interpretación del fenómeno fué dada por el físico inglés Chadwick (2), que tuvo el gran mérito de explicarlo mediante la hipótesis del neutrón (ω): Los rayos α del *Po*, al atravesar el *Be* o el *B*, dan lugar a la emisión de una partícula neutra de gran velocidad que al chocar con los núcleos atómicos origina la proyección observada, y si se admiten las leyes del choque elástico, esa partícula ha de tener una masa aproximadamente igual a la unidad. En definitiva, se ha producido un proceso de transmutación en el cual el elemento absorbe la partícula α y emite un neutrón; por tanto, su número atómico aumenta en 2 unidades y su número de masa en 3; así en el caso del glucinio se puede establecer la reacción



En el caso del *B*, como existen los isótopos B_{10} y B_{11} , hay que determinar en cuál de ellos se produce la emisión del neutrón, para lo cual basta tener presente que en todo

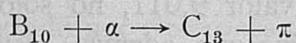
(1) I. Curie et F. Joliot. *J. de Phys.* **4**, série VI, 21, 1933 y **4**, série VI, 278, 1933.

(2) *Proc. Roy. Soc. A* **136**, 692, 1932 y **A 142**, 1, 1933.

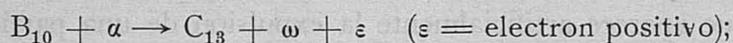
elemento $A \geq 2Z$, y, por tanto, después de la transmutación se debe tener por lo mismo $A + 3 \geq 2(Z + 2)$, luego $A \geq 2Z + 1$, y como en el caso del B , $Z = 5$, la reacción será



y en cambio se admite que el B_{10} emite los protones, que también se observan, de acuerdo con la ecuación



Teniendo en cuenta estas ecuaciones y midiendo las energías de las partículas que intervienen, calculó Chadwick la masa del neutrón, encontrando un valor medio igual a 1,0067, es decir, un poco menor que el peso atómico del hidrógeno, lo que parece indicar que esté constituido por un protón y un electrón más íntimamente ligados que en el átomo de hidrógeno, quedando interpretada la disminución de masa por la energía emitida al hacerse la unión más íntima. Ahora bien, tanto el matrimonio Curie-Joliot (1) como Chadwick y otros, han encontrado hace unos meses que a los fenómenos anteriores acompaña también la presencia en la cámara Wilson de los electrones positivos, cuya existencia fué establecida recientemente por Anderson (2) y de Blackett y Occhialini (3), al estudiar los efectos producidos por la radiación penetrante de la atmósfera en la cámara de Wilson, y entonces Curie-Joliot suponen que algunos de los neutrones observados sean debidos al isótopo B_{10} , que en vez de un protón emite un neutrón y un electrón positivo, de acuerdo con la reacción



a partir de esta ecuación, y siguiendo el mismo camino de Chadwick, calculan para el neutrón una masa igual a 1,012, algo mayor a la del átomo de hidrógeno, lo que llevaría a

(1) I. Curie y F. Joliot. *J. de Phys.* 4, serie VII, 494, 1933.

(2) Anderson. *Phys. Rev.* 43, 491, 1933.

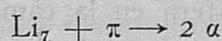
(3) Blackett y Occhialini. *Proc. Roy. Soc. A.* 139, 699, 1933.

a pensar que el *neutron* es el verdadero elemento fundamental y el protón es una asociación íntima de un neutron y un electrón positivo. Si suponemos que el *Be* está constituido por 2 partículas α y un neutron, entonces su masa sería en los dos casos

$$2 \times 4 + 1,0067 = 9,0067 \quad \text{y} \quad 2 \times 4 + 1,012 = 9,012;$$

las medidas recientes de Bainbridge (1) dan para el número de masa del *Be* el valor 9,011, no sólo de acuerdo con la segunda hipótesis, sino que, además, resulta que el valor que se obtiene por la hipótesis primitiva conduce a un átomo de *Be* inestable, pues sería necesario admitir para interpretar la verdadera masa, que en el núcleo sólo está formada una de las partículas α . Con todo, todavía no está resuelto de una manera definitiva la constitución de este nuevo elemento.

Otros casos interesantes de transmutaciones artificiales se han obtenido mediante el bombardeo con protones acelerados artificialmente con campos eléctricos o magnéticos. El primer caso, estudiado con detalle por Cockroft y Walton (2), ha sido la desintegración del *Li* mediante protones acelerados en un campo eléctrico de 100 kilovolts, resultando en la cámara de Wilson que cada átomo de *Li* da lugar por su desintegración a dos partículas α después de capturar el protón, de acuerdo con la reacción



lo que no sólo tiene interés por tratarse de una verdadera desintegración, en vez de la generación de elementos más pesados que hemos visto, sino, además, por ser la primera vez que aparece artificialmente la expulsión de una partícula α , hecho confirmado después en muchos elementos, incluso en el Uranio, que bombardeado por protones acelerados por un campo de 600 kilovolts, presenta una radiactividad 4 veces más intensa que en estado normal, emitiendo partículas α de recorridos superiores a los normales. Tanto en este caso

(1) Bainbridge. *Phys. Rev.* **43**, 367, 1933.

(2) Cockroft y Walton. *Proc. Roy Soc. A.* **136**, 619, 1932 y **A.** **137**, 229, 1932.

como en las desintegraciones producidas por los propios neutrones, sólo se trata de diferentes tipos de reacciones intranucleares, pero que no han puesto de manifiesto ningún nuevo elemento constituyente de los núcleos.

Para terminar, quiero recordar que en la parte referente al átomo del citado discurso de entrada del Dr. Vecino (1), después de hacer una descripción de conjunto del modelo atómico de Rutherford-Bohr, hay un párrafo que dice: "El núcleo es, a su vez, un edificio muy complejo, de dimensiones pequeñísimas e integrado por electrones positivos y negativos, cuya organización nos es hasta ahora desconocida". Desde entonces casi ha transcurrido un cuarto de siglo y, según hemos visto, los progresos adquiridos en este tiempo por lo que se refiere a los elementos que constituyen los núcleos atómicos han sido importantísimos; pero a pesar de ello, su última afirmación, el desconocimiento de la organización interna, sigue siendo el misterio que la Física moderna trata de desentrañar.

(1) J. Vecino y Varona, Rev. Acad. Ciencias Zaragoza. IV, 116, 1919.