



Por T. BATUECAS

Catedrático de Química Física en la Universidad
de Santiago de Compostela.

Artículo recibido en la Redacción el día 19 de octubre de 1945.

La noticia oficial norteamericana dando cuenta que, el 6 de agosto último, un arma novísima—de efectos muy superiores a las demás conocidas—había sido utilizada, por vez primera, contra Hiroshima, aniquilando esta ciudad japonesa, provocó tanta sensación—apenas divulgada—, que son muy explicables la viva curiosidad e interés despertados, con tal motivo, en el mundo entero.

Dado el rigor extremo con que el Gobierno de los Estados Unidos oculta todo lo referente a la terrible arma, nadie pretenda hallar en las presentes líneas explicación clara y satisfactoria de aquello que, siendo un secreto tan celosamente guardado, sólo contadísimas personas conocen, a saber: el *mecanismo real de la "bomba atómica"*. Lo único que el lector encontrará en este artículo—su autor lo advierte en seguida lealmente—son algunas consideraciones relacionadas con el probable fundamento, que puede haber servido de base al reducido grupo de eminentes científicos que han concebido y llevado a término la fabulosa empresa de construir la citada bomba.

Nuestras consideraciones tendrán como punto de partida la admirable serie de estudios que, desde 1933, venían realizándose por buen número de físicos, sobre los fenómenos de transmutación que sufren los núcleos atómicos, al ser bombardeados por *neutrones*. Antes, sin embargo, creemos útil principiar recordan-

do algunos conceptos generales y muy conocidos sobre estructura atómica, pues de esta suerte cuanto deseamos exponer aquí resultará más fácil y asequible.

De acuerdo con las concepciones de ciertos filósofos de la Grecia clásica y, asimismo, con las ideas de Dalton y sus continuadores, los *átomos* (o partículas últimas constitutivas de los cuerpos materiales) habría que considerarlos como indivisibles e inmutables. Mas, desde finales del siglo XIX, fueron acumulándose—una tras otra—las pruebas experimentales que hacían dudosa la validez general del postulado referente a la indivisibilidad e inmutabilidad atómicas. De una parte, en efecto, los numerosos experimentos demostrativos de que la materia, sometida a diversas acciones no muy enérgicas, libera cargas eléctricas negativas, obligaron a concluir que uno de los constituyentes esenciales de todos los cuerpos debían ser los electrones. Por otra parte, los fenómenos de radiactividad natural (descubiertos por H. Becquerel en 1896 y estudiados a fondo por Pierre y María Curie y E. Rutherford, entre otros) probaban también que los elementos de masa atómica elevada son inestables, pues emiten diversas radiaciones (α , β , γ) y se transmutan unos en otros. En fin, las experiencias fundamentales realizadas en 1911 por Rutherford y sus colaboradores sobre la difusión, por la materia, de las partículas α procedentes de ciertas sustancias radiactivas, demostraron—en for-

ma concluyente—que los átomos están dotados de un núcleo pequeñísimo, en que se encierra prácticamente toda la masa y cuya carga positiva es la necesaria para neutralizar la de los electrones existentes.

Poco después de Rutherford, el danés N. Bohr, a fin de explicar los espectros emitidos por los átomos, estableció el modelo atómico que lleva su nombre. Según este modelo, los átomos serían—en primera aproximación—a manera de diminutos sistemas planetarios, en cuyo centro se halla el núcleo y en torno del cual giran los electrones periféricos. Estos últimos no están, sin embargo, distribuidos al azar, sino formando capas concéntricas, cada una de las cuales encierra sólo un número limitado de electrones. Añadiremos aún, que la labor tenaz y admirable de los modernos espectroscopistas y un postulado de amplia y profunda significación (el llamado *principio de Pauli*) (1), han permitido explicar las estructuras electrónicas de casi todos los átomos.

Imaginando la formación de los elementos químicos, por adición sucesiva de electrones (y la correspondiente variación en el núcleo, claro es), resultará que, al completarse una capa, el electrón siguiente iniciará otra nueva. Ahora bien: como las propiedades químicas de los distintos elementos dependen del número y configuración de los electrones más externos, y tales configuraciones se reproducen a intervalos fijos, existirán elementos de propiedades muy afines. Mas justamente, estas regularidades—conocidas desde hace tiempo—constituyen la base empírica del *sistema periódico*, establecido en la pasada centuria por D. Mendelejeff y L. Meyer, y cuya importancia es fundamental en Química (2). Como se sabe, este sistema es una ordenación de los elementos químicos, de tal suerte que, disponiéndolos según sus masas atómicas crecientes, aparecen—a intervalos determinados (llamados *períodos*)—elementos de propiedades análogas, que reunidos forman *grupos*. Tales son los formados por los halógenos o los metales alcalinos, para no citar sino ejemplos bien conocidos. A cada uno de los 92 elementos de la Tabla periódica corresponde un lugar; así, el hidrógeno ocupa el primer lugar, el helio el segundo, etc., y el uranio el 92. Según lo dicho con anterioridad, todo ello encuentra explicación adecuada dentro del modelo atómico planetario y el principio de Pauli; el número de electrones periféricos de un átomo condiciona sus propiedades químicas y también su posición en la Tabla periódica. Haremos notar que, si bien el modelo atómico de Bohr es satisfactorio, en líneas generales, tropieza en ciertos aspectos con dificultades insuperables, sólo resueltas por las novísimas teorías

de L. de Broglie, E. Schrödinger y W. Heisenberg; mas sobre estas teorías—aun dada su importancia fundamental—nada diremos aquí, teniendo en cuenta la índole y finalidad de este artículo.

Veamos ahora lo referente a la constitución y estabilidad de los núcleos atómicos, de tanto interés para la cuestión que nos ocupa. La prueba experimental de que algunos núcleos, además de inestables, poseen cierta complejidad, viene impuesta por los fenómenos de radiactividad natural. En efecto, como la emisión de partículas por los átomos generadores (uno de los rasgos esenciales de la radiactividad) tiene lugar en la región más interna de aquéllos, parece lógico admitir que dichas partículas puedan preexistir en los edificios atómicos de que proceden. Otras pruebas que demuestran la complejidad de los núcleos tienen por base los numerosos experimentos de transmutación realizados desde 1919, fecha en que—por primera vez—logró Rutherford poner en evidencia la liberación de protones (núcleos de hidrógeno) al bombardear nitrógeno con partículas α . Pero de estas pruebas, importantísimas para nuestro objeto, nos ocuparemos después.

Entre las varias partículas elementales hasta ahora conocidas: *protón*, *neutrón*, *electrón negativo* y *positrón* (1), únicamente las dos primeras intervienen en los núcleos. Esta, al menos, es la hipótesis que, propuesta en 1932 por Heisenberg, se acepta en la actualidad. El número de protones fija la carga nuclear, y como el valor de esta última es idéntico al de electrones periféricos, dicho número determinará asimismo la posición del elemento en la Tabla periódica.

Empero, mientras el número de protones es único para cada elemento, el de neutrones puede variar entre límites restringidos. En consecuencia, a un mismo elemento químico podrán corresponder uno o más núcleos, los cuales—por ocupar el mismo lugar del sistema periódico—se denominan *isótopos*. Estos poseen, de ordinario, iguales propiedades químicas, salvo el caso excepcional del hidrógeno, cuyos dos isótopos más corrientes, H_1^1 y H_1^2 (2), muestran diferencias bastante acusadas. Los elementos del comien-

(1) Véase, por ejemplo, J. Palacios, *Calor y constitución de la materia*. Madrid, 1942.

(2) Véase el artículo de L. Villena en *Investigación y Progreso*. Marzo-mayo 1945.

(1) Esta partícula, descubierta en 1932 por C. D. Anderson en el curso de sus investigaciones sobre la radiación cósmica, difiere del electrón negativo por el signo de su carga y por su vida tan efímera, pues sólo alcanza una pequeña fracción de segundo. Otro tanto sucede con el *mesotróon* o *electrón pesado*, descubierta también por Anderson ulteriormente.

(2) Se ha convenido en representar los isótopos por el símbolo del elemento a que pertenecen, acompañándolo de dos números: uno en la parte superior, indicando la masa, y otro en la inferior, que representa la carga nuclear. Como única excepción, el hidrógeno pesado, descubierta en 1932 por H. C. Urey, se suele designar también por el símbolo *D*, inicial de *deuterio*, nombre dado por su descubridor al nuevo isótopo.

zo y final de la Tabla periódica se caracterizan por un número escaso de isótopos; en cambio, los intermedios poseen, en general, un crecido número de ellos. Así, por ejemplo, el hidrógeno y el oxígeno tienen tres cada uno; el carbono y el nitrógeno, dos; el fluor y el sodio, uno, y, en fin, el uranio, dos principales de masas 235 y 238; por el contrario, el krypton (de carga nuclear 36) tiene seis isótopos, y el bario (cuya carga nuclear vale 56) posee siete. Teniendo en cuenta que protones y neutrones son los constituyentes nucleares y que ambas partículas tienen casi idéntica masa, el número de neutrones pertenecientes a un núcleo se obtendrá restando de la masa atómica el de sus protones. Según esto, el núcleo de hidrógeno pesado (o *deuterio*) tendrá un neutrón; el O_8^{16} poseerá ocho; el Cl_{17}^{35} , 18; el Ba_{56}^{138} tendrá 82, y, en fin, el U_{92}^{238}

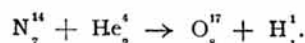
hasta 143. Una observación que cabe hacer a este propósito, y que ha de sernos útil en lo sucesivo, muestra que así como en los elementos de masa atómica ligera el número de neutrones es idéntico o muy poco superior al de protones, a partir del calcio (carga nuclear = 20) el exceso de neutrones se va acentuando progresivamente hasta el final de la Tabla periódica.

La existencia de isótopos—en número menor o mayor, pero limitado—plantea la cuestión referente a la estabilidad de los núcleos atómicos. Por de pronto, siendo ineludible admitir fuerzas atractivas poderosas entre los constituyentes nucleares, un determinado núcleo será más o menos estable, según la magnitud de la energía liberada al unirse todos los protones y neutrones que lo forman. Dicha energía tiene por origen la diferencia entre las masas correspondientes a sus partículas integrantes y la efectiva del propio núcleo, ya que, de acuerdo con las ideas relativistas de Einstein, si toda masa equivale a una energía y recíprocamente, la diferencia en cuestión representará la energía puesta en juego al constituirse el núcleo.

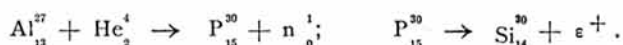
Mas por razones que el limitado espacio del presente trabajo no consiente exponer, acontece que la energía de formación nuclear es, *grosso modo*, proporcional al número de partículas elementales; dicho de otra suerte, cada una de ellas contribuye, aproximadamente, con la misma cantidad a la energía de formación total. Aceptando, con N. Bohr y J. A. Wheeler (1), que los núcleos son análogos a gotitas líquidas cargadas positivamente, sucederá que mientras las gotitas sean muy pequeñas conservarán la forma esférica, y ello porque la tensión superficial—característica de los líquidos—supera entonces a la repulsión eléctrica. Pero al crecer el tamaño de las gotas, y por tanto su carga, la relación entre ambas fuer-

zas se modifica en sentido favorable a la repulsión electrostática; en su virtud, las gotas adoptarán la forma de elipsoides cada vez más alargados, terminando por escindirse en dos fragmentos si sufren algún choque bastante intenso. Tales gotas líquidas de gran tamaño corresponderán a núcleos de elevada carga; por ejemplo, los de uranio y torio. Para el primero de ellos, el estudio cuantitativo del problema, efectuado por Bohr y Wheeler, lleva a la consecuencia de que, entre los isótopos del uranio, sólo el de masa 235 experimenta la ruptura bajo la acción de neutrones lentos. Destaquemos la importancia de esta conclusión—que la experiencia, por otra parte, ha confirmado—, ya que más adelante habrá de sernos útil.

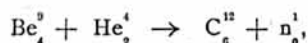
Examinemos ahora con brevedad los procesos de transmutación que experimentan los núcleos por la acción de proyectiles atómicos de suficiente energía. Ya dijimos incidentalmente que el primero de tales procesos bien conocidos se debe a Rutherford, quien, al bombardear nitrógenos con partículas α , demostró que había liberación de protones; en opinión del gran físico inglés, ello implicaba la formación simultánea de un isótopo estable del oxígeno, O_8^{17} ; es decir, que la interpretación del proceso conducía a la reacción nuclear siguiente:



Este descubrimiento—tan fundamental en varios aspectos—dió origen a numerosas y admirables investigaciones, en las que tanto Rutherford y sus colaboradores como otros eminentes físicos, lograron resultados del máximo interés. Merece destacarse entre ellos, por su gran trascendencia, el de la *radioactividad artificial*, descubierta en 1934 por el matrimonio Curie-Joliot al hacer actuar sobre el boro y el aluminio la radiación α emitida por el *polonio* (RaF). Mas, a diferencia del nitrógeno, cuya transmutación por las partículas α tiene lugar en una etapa, para el aluminio y boro los procesos se efectúan en dos, formándose en la primera etapa un neutrón (n_0^1) y un isótopo inestable de fósforo o nitrógeno radiactivo; isótopo que emitiendo luego un electrón positivo (e^+), da lugar, en la etapa siguiente, a un isótopo estable del silicio o carbono, respectivamente. He aquí la reacción nuclear para el caso del aluminio:



Otro proceso de interés es el que condujo al descubrimiento en 1932, por J. Chadwick, del neutrón, partícula elemental tantas veces aquí mencionada. La reacción nuclear correspondiente:



(1) Véase a este respecto el interesante artículo de K. F. von Weizsäcker publicado en *Investigación y Progreso*, pág. 119, 1941.

se utiliza como fuente generadora de neutrones, para lo cual basta encerrar en un tubito de vidrio berilio en polvo y emanación de radio.

El neutrón constituye un eficazísimo proyectil atómico de que dispone el físico para estudiar los fenómenos de transmutación artificial. Ello se debe a que esta partícula elemental goza de singulares propiedades, que la diferencian de las otras partículas atómicas hasta ahora conocidas. En efecto, como no posee electrón periférico ni transporta carga eléctrica alguna, no es repelido por los núcleos, y la barrera de potencial que circunda a éstos no será obstáculo que les impida penetrar en su interior. Contrariamente a los otros agentes de transmutación, los neutrones apenas son detenidos en su marcha por las sustancias pesadas, como el plomo, mientras que aquellos cuerpos (agua, parafina, etc.) en que intervienen elementos ligeros, y sobre todo el hidrógeno, ejercen sobre los neutrones intensa acción frenadora. Semejante propiedad, en apariencia paradójica, es, sin embargo, consecuencia de las leyes elementales del choque elástico, ya que ellas permiten demostrar que en el choque de dos partículas la fracción de energía cinética transferida de una a otra, sólo es considerable si las masas son casi iguales, en tanto que si la diferencia es grande, dicha fracción toma valores pequeños.

A su paso por la materia, los neutrones no producen fenómenos primarios de ionización, por no tener acción alguna sobre los electrones de la periferia atómica. Cuando entran en colisión con núcleos, los neutrones son rechazados por choque elástico, o dan lugar—en choque inelástico—a diferentes procesos de transmutación. El más interesante para nuestro objeto es su captura por un núcleo, transformándose éste en un isótopo de masa atómica superior en una unidad. Empero, el isótopo formado es inestable y, perdiendo un electrón negativo, se convierte en el elemento inmediato superior. El estudio sistemático de esta clase de procesos, llevado a cabo en casi todos los elementos por E. Fermi y colaboradores, puso de relieve el hecho singular de que el rendimiento aumenta—en forma extraordinaria—cuando la sustancia transmutable se halla disuelta en agua o cuando entre la fuente neutrónica y la sustancia bombardeada se interpone parafina u otro compuesto hidrogenado. Esta acción peculiar del agua y las demás combinaciones de hidrógeno se explica, según Fermi, porque al chocar con los núcleos de hidrógeno, el neutrón es intensamente frenado, aumentando así las posibilidades de transmutación, pues entonces permanece más tiempo en el entorno próximo al núcleo.

El mismo Fermi y sus colaboradores fueron también los primeros en señalar que en el bombardeo neutrónico del uranio parecían engendrarse nuevos radioelementos, que deberían considerarse como *elementos transuránicos*. Se comprende que tal sugerencia provocara vivo interés entre los científicos y que fuera

el origen de numerosos trabajos. Al cabo de muchas investigaciones, no poco contradictorias, O. Hahn y sus colaboradores lograron demostrar, sin embargo, que—salvo un posible elemento 93—no existen los *transuránicos*. En el curso de nuevas investigaciones, O. Hahn y F. Strassmann (1) dieron a conocer, en 1939, un tipo de transmutación, diferente por completo de todos los conocidos, y que consiste en que el uranio, bombardeado por neutrones lentos, se escinde en dos fragmentos pesados. Entre los productos de escisión identificados por los físicos alemanes se encuentran isótopos del bario, así como del Kr, Rb, Sr, Y, Xe, Cs, etc. Estos resultados fueron confirmados por F. Joliot, quien, sirviéndose de la cámara de Wilson (2), logró fotografiar e identificar las trayectorias de los fragmentos engendrados en la partición nuclear del uranio.

A Joliot se debe también haber previsto que el fenómeno de la ruptura del núcleo uránico por neutrones lentos (o la del torio por neutrones rápidos) era muy probable que fuese de naturaleza explosiva. He aquí el razonamiento, expuesto en breves palabras, que le condujo a semejante consecuencia. Ya se dijo con anterioridad que entre los isótopos del uranio sólo el de masa 235 puede escindirse por choque. Ahora bien: dicho isótopo contiene 143 neutrones, ya que ésta es la diferencia entre su masa y la carga nuclear (92). Admitiendo que los fragmentos producidos sean el isótopo más elevado del bario, Ba_{56}^{138} , y el más pesado del krypton, Kr_{36}^{86} , resulta que el número de neutrones suma en ambos 132, inferior, pues, a los contenidos en el núcleo primitivo; dicho en otras palabras, durante el proceso de ruptura *quedarán en libertad algunos neutrones*. Esta previsión de Joliot ha sido confirmada por las experiencias de otros investigadores, y si bien es verdad que en cuanto al número de neutrones liberados los resultados no coinciden, lo indudable es que experimentalmente ha sido demostrada su certeza. Pero si la ruptura nuclear del uranio (o la del torio), por choque neutrónico, deja libres varios neutrones, éstos, a su vez, podrán romper nuevos núcleos, y así sucesivamente; en otros términos, el fenómeno—iniciado por el bombardeo previo—continuará por sí mismo según un mecanismo en cadena.

La ruptura del uranio da lugar a un desprendimiento enorme de energía, la cual tiene su origen en el hecho de que siendo la masa del uranio superior a la de los fragmentos, la diferencia se convierte (al menos parcialmente) en energía cinética, de acuerdo con las ideas relativistas de equivalencia entre masa y energía. Por diversos medios y en forma concordante se ha llegado a establecer que la escisión de cada

(1) *Investigación y Progreso*, pág. 204, 1940.

(2) Este dispositivo, valiosísimo en Física atómica, permite fotografiar y, por tanto, hacer visibles las trayectorias individuales de partículas con carga eléctrica.

núcleo U_{92}^{235} libera 180 millones de electrón-voltios. Teniendo en cuenta que esta unidad de energía (el electrón-voltio) vale: $e \cdot V = 4,80 \times 10^{-10} \times \frac{1}{300} = 1,6 \times 10^{-12}$ ergio, los 180 millones valdrán:

$$1,8 \times 10^8 \times 1,6 \times 10^{-12} = 2,88 \times 10^{-4} \text{ ergio.}$$

Calculemos la energía puesta en libertad si todos los átomos contenidos en un gramo del isótopo más ligero de uranio sufrieran la descomposición. Como en 235 gramos existen—por definición— $6,023 \times 10^{23}$ átomos, en un gramo habrá $2,56 \times 10^{21}$, los cuales, al romperse, liberarán una energía de: $2,88 \times 10^{-4} \times 2,56 \times 10^{21} = 7,37 \times 10^{17}$ ergios; cantidad que dividida por $4,18 \times 10^{10}$ (equivalente mecánico de la kilocaloría) da un resultado de 17,6 millones de kilocalorías. Para dar una idea de lo que esta cifra representa bastará indicar que si este calor hubiera que producirlo quemando carbón cuyo poder calorífico (por kilogramo) fuera de 8.000 kilocalorías, serían necesarias 2,2 toneladas.

Pero interesando sobremanera fijar las condiciones en que el proceso explosivo pueda tener lugar, F. Perrin y S. Flüge han abordado el cálculo, tomando por base ciertas hipótesis plausibles. Los resultados a que llegan estos físicos cabe resumirlos como sigue: Partiendo de óxido de uranio (U_2O_5) en polvo, y suponiendo que la masa de forma esférica y con un foco central emisor de neutrones esté cubierta por una capa difusora de hierro o plomo, y, en fin, que al óxido se añade un 3 por 100 de agua, el cálculo muestra que para conseguir la descomposición explosiva del uranio, la esfera en cuestión debe tener un radio mínimo de 65 cms., a la temperatura ordinaria, o de 80 cms. a 900° C. Por tanto, la realización del proceso exigiría—como mínimo—4,8 toneladas de óxido a la temperatura ambiente y 9,0 toneladas a 900° C. Las cantidades respectivas de uranio metal serían 4,07 y 7,63 toneladas, o bien—teniendo en cuenta que el isótopo U_{92}^{235} existe en cantidad inferior al 1 por 100—las masas de este último, en uno y otro caso, habrían de ser 40,7 y 76,3 kilogramos. Un cálculo elemental indica entonces que la descomposición explosiva de los 76,3 kilogramos desarrollaría nada menos que 1,34 billones de kilocalorías, lo que corresponde al poder calorífico de 168.000 toneladas de carbón. Mas habida cuenta que, una vez iniciado el proceso, se propagaría al resto de la masa en pequeñísima fracción de segundo, cabe imaginar los efectos aterradores que el desarrollo súbito de tanta energía habría de producir.

Ahora es fácil comprender por qué la llamada "bomba atómica" tiene un poder aniquilador inmenso, siempre y cuando el fundamento de la terrible arma sea el aquí descrito. Desde luego, todo lo conocido sobre la cuestión hasta 1941 autoriza a pensar

que el fundamento probable sea el debido a la descomposición explosiva del uranio. ¿Cuál es, sin embargo, el mecanismo real de la "bomba atómica"? El autor de este artículo declara una vez más que ignora por completo en qué forma han sido resueltas las inmensas dificultades que sin duda han necesitado vencer los hombres de ciencia a cuya dirección se confió la empresa tan terrible de consecuencias para la Humanidad.

Un asunto de tan vital interés es lógico que haya despertado curiosidad vivísima y que, no obstante el secreto impenetrable que en torno a él guarda el Gobierno norteamericano, la prensa y radios de todo el mundo lo hayan escogido como tema sensacional y casi diario. Empero, las noticias divulgadas conviene someterlas a crítica prudente y severa, pues, por motivos varios, cabe pensar que muchas de ellas son poco razonables y aun fantásticas. Se dirá que personas de autoridad máxima han hablado de los gastos ingentes que ha exigido la instalación de las fábricas necesarias para la construcción de "bombas atómicas", y asimismo que el tiempo preciso hasta lograr el resultado se cuenta por años. Otras noticias, en fin, han informado del uso como primera materia de minerales de uranio; que la fabricación de la bomba exigía grandes cantidades de agua pesada; que el ciclotrón (1) intervenía en el mecanismo de la bomba, etc.

A base de lo expuesto con anterioridad, veamos qué puede aceptarse de tales noticias. Dos cosas esenciales cabe distinguir en la "bomba atómica": el uranio, cuya escisión explosiva produce la energía inmensa de que hemos hablado, y el proceso nuclear generador de los neutrones, que, una vez frenados, inician el fenómeno. Partiendo de un compuesto de uranio, será preciso ante todo separar el isótopo de masa 235, tan escaso ya en el uranio de partida; ello significa que las cantidades de mineral deben ser considerables. Pero a esto se agrega que la separación de los isótopos, realizable, por ejemplo, mediante grandes espectrógrafos de masas (2), requiere un consumo enorme

(1) Merced a este dispositivo—verdadero hallazgo maravilloso del norteamericano E. O. Lawrence—se pueden acelerar las partículas cargadas, dotándolas de velocidades enormes. A este efecto, un campo eléctrico alternativo y otro magnético muy intenso hacen describir a las partículas una serie de semicírculos, cada vez mayores, pero en que la velocidad angular del proyectil atómico permanece constante. Es fácil ver que al aumentar el radio de los semicírculos crece paralelamente la velocidad lineal de las partículas.

(2) Estos aparatos—el primero de los cuales fue ideado por el inglés F. W. Aston—se basan en la focalización (o reunión en un punto) que producen un campo eléctrico y otro magnético al actual—uno tras otro—sobre partículas de igual masa y carga eléctrica, pero de distinta velocidad. Actualmente existen diferentes modelos de tales espectrógrafos, que permiten determinar masas isotópicas con extraordinaria exactitud. (Véase el citado libro de J. Palacios.)

de energía, ya que—en estos aparatos—intervienen campos eléctricos y magnéticos potentes. Por lo que se refiere a la fuente neutrónica, imprescindible para iniciar el proceso, cabe utilizar, bien la reacción nuclear entre el berilio y la emanación de radio, bien otra (de mucho mayor rendimiento) basada en la interacción mutua de los *deuterones* (núcleos de hidrógeno pesado), según la reacción nuclear:



Caso de utilizar este último proceso, se justificaría el uso del agua pesada, y quizá también el del ciclotrón. Veamos por qué. El agua pesada es necesaria para obtener el deuterio, a partir del cual—por ionización—se producen los deuterones imprescindibles a la reacción nuclear anterior. Digamos de paso que el agua pesada (D_2O), constituida por dos átomos de hidrógeno pesado y uno del isótopo más ligero de oxígeno, existe siempre en el agua ordinaria—aunque en pequeñísima cantidad—, de donde se la obtiene por electrólisis prolongada, hasta que el volumen primitivo queda reducido a una ínfima parte; el residuo líquido es entonces agua pesada casi pura. Como se ve, la preparación de ésta no plantea dificultades especiales, aun cuando necesite un gran consumo de energía eléctrica. Por lo que al ciclotrón se refiere, no sucede lo mismo, pues la complejidad y dimensiones del aparato hacen difícil imaginar que pueda intervenir directamente en el mecanismo de la “bomba atómica”. En consecuencia, a menos de haber logrado el medio de conservar el *gas neutrónico* (neutrones térmicos o lentos) para ser empleado en el momento oportuno, no se adivina cuál pueda ser el papel del ciclotrón. Por el contrario, apelando a la reacción nuclear del berilio y la emanación de radio, bastará un dispositivo que consienta iniciar la emisión de neutrones en el instante preciso y mezclar al uranio una sustancia hidrogenada (parafina, agua, etc.) que, frenando los neutrones, permita a éstos desencadenar el proceso explosivo. Mas todo ello—huelga decirlo—son simples apreciaciones del autor, quien no pretende haber descubierto así, ni mucho menos, el mecanismo de la bomba.

Deseamos concluir el presente trabajo dedicando unas líneas al tema de la posible utilización para fines útiles y humanitarios de la energía intratómica. Acerca de ello la propaganda mundial se ha esforzado recientemente—por razones bien explicables—en presentar las consecuencias, tan prometedoras, que tendría para la Humanidad el logro de tal esperanza. Ahora bien: todo proceso técnicamente utilizable implica la existencia de un mecanismo que regule el desarrollo de la energía empleada. Ya en 1939, F. Adler y H. von Halban sugirieron el medio de conseguir el control

automático de la descomposición explosiva del uranio. Según estos físicos, basta añadir a la masa uranífera—además del agua u otro compuesto hidrogenado—una pequeña cantidad de cadmio, elemento químico que muestra la notable propiedad de absorber los neutrones lentos en forma constante, sea cualquiera la temperatura. Añadida la cantidad necesaria de cadmio e iniciado el proceso, por el bombardeo neutrónico, el mecanismo en cadena, mencionado en otro lugar, elevará en seguida la temperatura y con ella la velocidad de los neutrones. En su virtud, disminuirán los choques eficaces (ya que los únicos capaces de romper el núcleo uránico son los neutrones lentos) y decrecerá también el número de neutrones liberados. Pero siendo constante la capacidad del cadmio, para absorber estos últimos, se alcanzará muy pronto un régimen de equilibrio, y el proceso se estabilizará a una temperatura, tanto más alta cuanto menor sea la cantidad de cadmio, e inversamente. En la utilización técnica del proceso sucedería, pues, que al sustraer el calor engendrado, la temperatura del sistema descendería; pero como entonces los neutrones lentos serían otra vez más numerosos, la reacción se aceleraría de nuevo, creciendo así la cantidad de calor y restableciéndose la temperatura. Teóricamente, el proceso continuaría, según lo dicho, a temperatura casi constante y hasta agotar la masa de uranio.

Otro aspecto interesante de la cuestión se refiere a las condiciones económicas en que habría de producirse la energía intratómica, para ser aprovechable en la industria. Desde luego, mientras no sean vencidas las dificultades, de todo orden, que surgirán antes de lograr su realización práctica, nada es posible anticipar a este propósito; de todas maneras, por lo dicho con anterioridad, el consumo de energía necesario para conseguir la descomposición explosiva del uranio, y el precio mismo de la primera materia, induce a pensar que el costo sería elevadísimo.*

Cierto que existe la posibilidad—al menos teórica—de que otros núcleos pesados (los de plomo, bismuto, mercurio ...) puedan romperse en forma análoga al de uranio, lo que tendría por consecuencia poder utilizar sustancias de partida más económicas y, sobre todo, más abundantes. Las investigaciones hechas hasta ahora en tal sentido indican, sin embargo, que sólo el *protactinio* (elemento radiactivo más escaso aún que el uranio) es susceptible de romperse en dos fragmentos pesados. Sin duda esto no es muy esperanzador, mas confiemos que el progreso científico logrará hallar solución adecuada. De ocurrir así, ello significaría el principio de una nueva era de realizaciones técnicas extraordinarias, frente a las cuales todo lo conocido ahora—con ser mucho y sorprendente—habría de parecer acaso bien modesto.