



La escisión o fisura nuclear.

No sólo ha sido preciso romper el átomo artificialmente para poder imaginar una bomba atómica. Hizo falta, después, estudiar aquella violenta fractura hasta conocer sus leyes, antes de pensar en gobernarla a voluntad. En el caso del uranio, la bomba existe, porque se le puede escindir en dos fragmentos casi idénticos, cuya enorme energía se aprovecha mucho mejor que si resultasen numerosos fragmentos pequeños.

Las cabezas visibles de las tres familias radioactivas, o sea, el Uranio, el Torio y el Protoactinio, al ser bombardeados por neutrones, siguen una conducta paralela (Prof. Smyth). Sus núcleos atómicos se escinden en dos porciones desiguales, pero grandes, cada una de las cuales resulta ser un elemento distinto, y ambos, isótopos de los cuerpos centrales de la tabla de Mendeléief, desde el Selenio (de $Z = 34$) al Lantano (de $Z = 57$). Naturalmente, las cargas y masas atómicas de ambos fragmentos, sumadas, dan muy aproximadamente las cifras correspondientes al cuerpo cuyo átomo ha

Hacia la bomba atómica

IV

Por el Coronel RICARDO MUNAIZ DE BREA

sido escindido, menos algún producto residual más o menos perdido.

Los elementos resultantes de la escisión, dotados de una enorme energía cinética, van emitiendo rayos β y γ , y evolucionando hacia cuerpos estables. No obstante, su presencia crea serios problemas en el proceso de obtención del uranio puro, según tendremos ocasión de ver más adelante.

El Torio, To_{232}^{90} y el Protoactinio, Pa_{231}^{91} (sobre todo el primero), solamente fisuran con neutrones muy rápidos, de muchos miles de kilómetros/segundo. El Uranio, en cambio, lo hace con neutrones rápidos o lentos. El tipo 235 prefiere los neutrones lentos, con velocidades "térmicas" (cuya definición daremos luego). El tipo 238 es mucho más difícilmente fisurable, pero posee la interesantísima propiedad de absorber los neutrones que le llegan a velocidades de resonancia. (Designanse así las energías neutrónicas comprendidas entre ciertos márgenes definidos, dentro de la región de 0 a 1.000 eV.). La denominación de "resonau-

cia" se basa en la existencia de niveles de energía nuclear que corresponden a las citadas energías neutrónicas (Prof. Smyth). Este fenómeno se estudió en varios centros docentes de Columbia, Princeton e Indiana en los años 1941-42, haciendo incidir neutrones de velocidad conocida, contra esferas de U_{238} internadas más o menos profundamente en una masa de grafito.

El Plutonio, Pu_{239}^{94} , es fisurable por neutrones lentos. Emite entonces un rayo α y evoluciona en un período T bastante largo. (Estas propiedades, con las primeras obtenciones y escisiones del plutonio, se investigaron a partir de 1940 y después del informe de Lawrence en mayo de 1941.)

Según estos trabajos, se creyó saber que empleando plutonio se podrían utilizar elementos de unos 45 kilogramos de peso, en vez de la masa de 100 toneladas que exigiría el uranio natural.

Y que si se dispone de una gran cantidad de Pu , es probable que pueda obtenerse una reacción en cadena bombardeándolo con neutrones rápidos. Con tal reacción, la explosión tendría una energía formidable, con caracteres de verdadera superbomba.

El factor de multiplicación.

Sólo existe reacción en cadena, como hemos insinuado, cuando el factor k (factor de multiplicación) es mayor que la unidad. Se designa por k el cociente del número de nuevos neutrones procedentes de fisuras nucleares, por cada 100 procedentes de la primera fisura, ya que de éstos es sabido que unos escapan, otros son absorbidos por el uranio (sin fisura) o por impurezas, y el resto es el que produce fisuras que liberan nuevos neutrones, por ejemplo, en número de N . Por definición, $N/100 = k$. Si, por ejemplo, $N = 105$, sería $k = 105/100 = 1,05$, mayor que la unidad. Pero si resultase $N = 98$, sería $k < 1$, y entonces no hay reacción en cadena ni posible bomba atómica.

Suele considerarse casi siempre el valor de k para pilas de dimensiones infinitas, obtenido (naturalmente) por el cálculo. En dichas hipotéticas pilas supónese que ningún neutrón puede llegar a escaparse por los bordes, y en ellas el correspondiente

factor de multiplicación se designa por k_{∞} (Más adelante hemos de describir las "pilas" de uranio.)

En 1941, el Prof. Fermi calculó para valor de k_{∞} la cifra de 0,87. Es decir, que en la pila infinita no hay cadena reactiva. En la práctica, y tratando de hacer $k > 1$, se ha encontrado que cuando la pila tiene dos o tres veces el tamaño crítico y está envuelta por un deflector, el valor de k difiere poco de k_{∞} y se hace mayor que la unidad. En julio de 1942, empleando óxido de uranio 235 y grafito como moderador, se obtuvo ya prácticamente un factor de multiplicación $k > 1$.

(Del tamaño crítico de las pilas nos ocuparemos también más adelante.)

La reacción en cadena.

En teoría, el problema de obtener energía nuclear del uranio es muy sencillo. Si un neutrón produce en el átomo un fraccionamiento que libera más de un nuevo neutrón, el número de escisiones puede crecer en proporciones ingentes, liberando formidables cantidades de energía.

En la práctica, sin embargo, interviene un complejo factor de probabilidad. En efecto: los neutrones desprendidos en la rotura atómica pueden adoptar tres malos caminos: pueden escapar totalmente de la masa de U , pueden ser absorbidos por ésta sin provocar nuevas fracturas, o pueden ser retenidos por alguna impureza nociva. Por ello, la obtención de la reacción en cadena puede ser función de una competencia entre estos cuatro procesos posibles: fuga de los neutrones, retención por el uranio, sin explosión; retención por impurezas, y retención por el uranio, con explosión. Si la pérdida de neutrones en los tres primeros procesos, sumados, es menor que el exceso de ellos producido por el cuarto, sobreviene la reacción en cadena; en caso contrario, no se producirá.

Evidentemente, cualquiera de los tres primeros procesos puede darse con tal factor de probabilidad que resulten insuficientes los neutrones sobrantes para cebar la reacción. Si, por ejemplo, se da el caso de que la absorción de neutrones sin explosión es mucho más probable que la contraria, es casi imposible que la cadena nazca.

Otra complicación básica es la coexistencia de los tres isótopos del uranio (ya conocidos) en el mineral natural. Como sabemos, la proporción del U_{235} es sumamente pequeña: del 0,7 por 100. Y es precisamente éste el único de los tres que da satisfactoriamente la reacción explosiva, ya que el U_{238} se limita a transmutarse en plutonio.

Es conveniente recordar aquí un esquema de la deseada reacción explosiva:

a) Si se han de emplear los neutrones lentos, en esta primera fase los neutrones atraviesan un moderador de velocidad; por ejemplo, parafina. En caso contrario, esta fase no existiría.

b) Los neutrones (lentos o rápidos) inciden en la masa de U_{235} .

c) Uno de ellos provoca la escisión de un átomo de uranio.

d) La escisión desprende fragmentos de núcleo, energía, calor y más neutrones.

e) Algunos de éstos inciden en otros núcleos uránicos, los escinden y...

Así sucesivamente se va repitiendo el proceso, multiplicado sensiblemente en proporción geométrica.

La onda explosiva se extiende a razón de 9.000 kilómetros por segundo. Un átomo de U_{235} genera así 200 MeV, y 500 gramos del metal producen $1,15 \cdot 10^7$ Kwh., equivalentes a 56.540.000.000 de HP.

Una cantidad seis veces mayor puede atribuirse a la bomba de Nagasaki, que llevaba (creemos nosotros) unos tres kilogramos de uranio.

Las fugas de neutrones y su reducción.

Los investigadores han tratado de eliminar cada uno de los tres procesos perjudiciales a que antes nos hemos referido. Por ejemplo, han llegado a determinar que el número de neutrones que escapan fuera de la masa de U puede reducirse al mínimo mediante cambios adecuados de la masa y forma de la cápsula.

La fuga de neutrones obedece a un efecto de superficie (digamos, algo como falta de tensión superficial en la pila); es, por tanto, proporcional al área de la superficie

exterior del uranio. En cambio, la absorción de neutrones con rotura del átomo ocurre en todo el seno de la masa, y es, por tanto, un efecto volumétrico. Como los volúmenes crecen más rápidamente que las superficies de los cuerpos, aumentando la cantidad de uranio se obtendrá un predominio mayor de la masa (volumen) sobre la superficie (área), y por tanto, menor probabilidad relativa de la ineficaz fuga de neutrones.

Dando a la cápsula forma esférica, se obtiene una nueva ventaja, ya que en la esfera todo efecto de superficie es proporcional al cuadrado del radio, y todo efecto de volumen lo es al cubo del radio. Hay, pues, ventaja para la absorción explosiva, y desventaja para la fuga de neutrones, en proporción $r^3/r^2 = r$, siendo r el radio de la esfera. A simple vista se ve que aumentando el radio de la masa metálica, aumenta la ventaja hacia la explosión.

Por el contrario, como la absorción no explosiva de los neutrones es un efecto volumétrico, con estos arbitrios de variar la forma y tamaño de la cápsula, no se favorece ni se perjudica la eliminación de este proceso nocivo.

Las dimensiones críticas.

Las dimensiones críticas de un artefacto cargado de U se definen como el tamaño para el cual la producción de neutrones libres por escisión nuclear es exactamente igual a la pérdida inútil de los mismos por fuga o absorción sin fractura. En otros términos: si el tamaño es menor que el crítico, entonces—por definición—no habrá reacción en cadena autoentretendida.

En principio, desde 1940 podía ya calcularse el tamaño crítico; pero en la práctica, la incertidumbre sobre las constantes y los parámetros implicados era tal, que los diferentes cálculos obtenidos por unos y otros resultaban sumamente dispares. No parecía improbable que el verdadero tamaño crítico fuese demasiado considerable para finalidades prácticas. Aun hoy día, los cálculos que se efectúan para ciertas disposiciones no comprobadas prácticamente están sometidos a frecuente variación, según se van obteniendo nuevas informaciones empíricas.

Las impurezas nocivas y su eliminación.

Las "secciones transversales" que determinan la absorción de neutrones varían considerablemente de unos cuerpos a otros. Son, en algunos, muy elevadas en comparación con las correspondientes a la máxima sección transversal de absorción en el uranio. Si entonces pretendemos obtener la reacción en cadena, será preciso reducir a un grado insignificante el proceso nocivo número 3 (la absorción de neutrones por impurezas). Esto implica una purificación exquisita, exagerada, a ultranza, del uranio metálico y del cuerpo moderador. Los cálculos demuestran que la máxima concentración de impurezas admisible es del orden de unas pocas unidades por millón, tanto en el uranio como en el moderador.

Cuando se sepa que la producción total de uranio obtenida en Estados Unidos hasta 1940 no pasaba de unos pocos gramos (y esto, de muy escasa pureza), que la producción total de berilio en el mismo país no excedía de unas pocas libras, que una cantidad similar era todo el deuterio disponible, y que jamás se había obtenido carbono con una pureza ni muy remotamente aproximada a la que necesita un moderador nuclear, se comprenderá que el problema de obtener y unificar los elementos necesarios era uno de los principales que hubo que resolver en Estados Unidos antes de pensar en la bomba atómica. Ello debió de exigir algún tiempo, pero no muy excesivo si se considera que en diciembre de 1942 se disponía ya de seis toneladas de uranio puro y suficiente grafito para operar con ellas.

El gobierno de la reacción en cadena.

Todos los problemas expuestos hasta aquí se contraen a la obtención, es decir, a la iniciación y desarrollo de la llamada reacción en cadena. Si hemos de emplear una reacción de esta clase, es preciso, ante todo, que la podamos gobernar.

El problema que en sí supone este gobierno o "control" varía mucho en el planteamiento, según que nos interese una producción regular y continuada de energía, o una explosión instantánea.

En líneas generales, lo primero (control de la energía atómica, en términos periódicos) requiere producir una reacción en

cadena, por fisura atómica mediante bombardeo con neutrones lentos, sobre una mezcla o entramado de uranio con una sustancia moderadora. Lo segundo (la bomba atómica) requiere una reacción en cadena por fisura atómica mediante bombardeo con neutrones rápidos, en una masa homogénea de U_{235} o Pu_{239} (plutonio). Hay bomba con U_{235} en masa superior a la crítica. Hay bomba con Pu_{239} , añadiendo U_{238} y un retardador.

Como ya se dijo, en cualquiera de ambos casos pueden contribuir, tanto los neutrones lentos como los rápidos, para provocar la fisura.

Aún en 1940 parecía verosímil que una reacción en cadena, potente, pudiera ser gobernada empleando elementos absorbentes de neutrones. Se pensaba también que una reacción así podría ser autolimitadora en virtud de la escasa probabilidad de absorción con fractura atómica cuando la temperatura alcanzase un grado suficientemente elevado. Con todo, existía siempre una probabilidad de que un sistema de reacción en cadena llegase a ser ingobernable en un momento crítico, y por ello creyóse necesario intentar la obtención de la primera reacción de esta clase en un lugar deshabitado.

La cadena reactiva en la práctica.

Suponiendo lograda una reacción en cadena, es preciso luego utilizarla prácticamente, y ello plantea nuevos y delicados problemas. (Si desde el descubrimiento del fuego hasta el invento de la locomotora de vapor—o de otro motor térmico cualquiera—han transcurrido cinco o seis decenas de siglos, no ha de extrañarnos que desde que se conoce la desintegración atómica (1919) hasta el aprovechamiento de su enorme energía (1945) hayan transcurrido decenas de años. Estos últimos veintiséis son—en la historia de la Ciencia—un auténtico instante, acaso media milésima del lapso primeramente citado.)

Los trabajos desarrollados durante la guerra por los aliados anglosajones, encaminados hacia la obtención del explosivo militar atómico, no se detuvieron—no había tiempo, pues Alemania trabajaba febrilmente en lo mismo—para estudiar el aprovechamiento de la energía nuclear gradual,

pero si pudieron darse cuenta los investigadores de la principal dificultad a vencer en tal empeño: el logro de un funcionamiento regular a elevada temperatura.

Una máquina térmica eficaz no solamente ha de producir calor, sino que ha de desarrollarlo a elevada temperatura. Y el producir una reacción en cadena a alta temperatura es mucho más difícil que poner en marcha una cadena reactiva a baja temperatura.

Por otra parte, la posibilidad de la reacción en cadena no garantiza por sí misma que la energía nuclear sea eficaz en una bomba. Para obtener una explosión efectiva, es preciso que la reacción en cadena se desarrolle con extraordinaria rapidez; en otro caso, sólo una pequeña porción de la energía nuclear será utilizada antes de que la bomba se fragmente y la reacción se detenga. Es preciso, igualmente, que no ocurra ninguna explosión prematura.

Este problema de la completa y oportuna detonación era—y sigue siendo—uno de los más difíciles a resolver en el proyecto y realización de una bomba atómica de verdadera eficacia.

La explosión gobernada.

Al estudiar anteriormente la reacción en cadena hemos supuesto siempre que una de las cosas a evitar era que la cadena se interrumpiese bruscamente por explosión indeseada. Ahora, por el contrario, vamos a ver cómo se puede provocar, y hasta qué punto es posible gobernar, la explosión de la masa reaccionante.

Por definición, una explosión es una violenta e instantánea liberación de una gran cantidad de energía dentro de un espacio muy limitado.

Para producir una explosión eficaz en una bomba atómica, es preciso que las porciones o fragmentos de la bomba no se separen apreciablemente antes de que haya sido liberada una parte importante de la energía nuclear disponible, porque la expansión hace incrementar las fugas de neutrones, provocando una prematura interrupción de la cadena. Dicho en otros términos: la eficacia de la bomba atómica dependerá de la relación entre la velocidad con que los neutrones generados en las primeras fisuras atómicas penetran en otros núcleos y pro-

ducen nuevas fracturas, y la velocidad con que los fragmentos de la bomba se separan entre sí.

Más claro: una granada artillera percute en un muro y estalla en su seno; los trozos del explosivo detonan y se queman totalmente, siquiera por "simpatía". Es excepcional la proyección de un trozo de explosivo sin quemar. Mas en la bomba atómica no ocurre lo mismo. Si prematuramente se fragmenta, la reacción en cadena se detiene y no hay bomba eficaz. Lo excepcional aquí es que se desintegre y aproveche toda la masa del explosivo nuclear.

Aplicando principios conocidos de la generación de energía, la variación de temperatura y presión y las leyes de expansión de sólidos y gases, ha sido posible calcular el orden de magnitud del lapso de tiempo a transcurrir entre el principio y el fin de una reacción nuclear en cadena. Y es tan breve este intervalo, que su misma brevedad es el origen de casi todas las dificultades técnicas con que han tropezado los proyectistas de la bomba.

El cálculo de las dimensiones críticas de un elemento capaz de reaccionar en cadena es un problema ya insinuado al mencionar los cuerpos empleados y su disposición relativa. Aunque el cálculo es más sencillo para bloques homogéneos de metal que para un enrejado relleno, se registran siempre inexactitudes en el curso de los primeros trabajos, tanto por desconocimiento de las constantes de cada cuerpo, como por verdadera dificultad matemática.

Por ejemplo, las secciones transversales (1) de fractura, dispersión y absorción de los núcleos afectados, varían con la velocidad de los neutrones atacantes. Las leyes de estas variaciones no se conocían ni eran fáciles de encontrar experimentalmen-

(1) En Física Nuclear se ha convenido en llamar "cross-section" (que libremente hemos traducido por sección transversal) a la probabilidad de que se dé un cierto proceso nuclear. Si P es el número de procesos concurrentes, p el de partículas incidentes (neutrones, etc.) y B el número de núcleos alcanzables por cada centímetro cuadrado, la sección transversal correspondiente puede expresarse por la fórmula P/pB . Cuando no se refiere a los núcleos, sino a los procesos totales (absorción o dispersión de neutrones, etc.), se llama sección transversal total, y se designa por σ .

te, y, por tanto, fué muy difícil tenerlas en cuenta al efectuar los cálculos.

En la primavera de 1943 se habían ultimado varios cálculos de dimensiones críticas, aplicando diversos procedimientos matemáticos y las constantes nucleares determinadas hasta entonces con mayor exactitud. Con todo, los límites de error siguieron siendo demasiado grandes para ser admisibles, y sólo por el exquisito lujo de precauciones adoptado en aquellos trabajos se logró evitar todo accidente, según más adelante se verá.

Las pilas nucleares.

Con bastante propiedad se han llamado "pilas" a los dispositivos imaginados para obtener, emplear y aprovechar los procesos nucleares de desintegración de elementos radioactivos.

No hemos visto ninguna de estas pilas; pero sabemos de ellas lo suficiente para conjeturar cómo pueden ser.

Creemos que hay que considerar en ellas lo siguiente:

- a) El elemento activo (uranio, plutonio).
- b) Un elemento retardador de neutrones (parafina, grafito, agua pesada).
- c) Un deflector o envolvente.
- d) Elemento de absorción del exceso de neutrones, regulador del proceso (boro, cadmio).
- e) Un elemento refrigerador (agua, helio).
- f) Periscopios e instrumentos de observación y medida.
- g) Organos generales de mando y regulación.

En estas pilas se trata de obtener neutrones, adaptar su velocidad a los límites convenientes, hacerles romper átomos y provocar la reacción en cadena.

Rara vez existe una fuente específica de neutrones. La reacción se ceba por los que espontáneamente desprende el elemento radioactivo de la pila, o incluso por neutrones o electrones erráticos, que abundan más de lo que se cree.

Durante algunos años antes del descubrimiento de la escisión nuclear, el método ha-

bitual de decelerar los neutrones era hacerles atravesar materias de escaso peso atómico, tales como los compuestos hidrogenados. El proceso de deceleración de los neutrones se reduce a hacerlos chocar (en choque elástico) contra partículas en reposo. Cuanto más idénticas sean la masa del neutrón incidente y la de la partícula embestida por él, mayor será la pérdida de energía cinética para el primero. Por consiguiente, los elementos hidrogenados son los más eficaces como moderadores de neutrones.

Se prefieren, pues, los deuterones, y los núcleos de helio, de berilio y de carbono. Utilízase también la parafina fabricada con deuterio, en cuya masa existen deuterones.

Los neutrones, después de chocar con el retardador, reducen su velocidad hasta establecer un equilibrio térmico con la temperatura de la parafina. Pasan a ser así los "neutrones térmicos" o de velocidad "térmica", a los que antes hemos hecho alusión. Tienen la propiedad de ser ávidamente absorbidos por el cadmio y el boro. Por tanto, introduciendo en una pila barras o pletinas de estos metales, tendremos un excelente y sencillo medio de gobernar la actividad de los neutrones con tanta precisión como nos convenga.

Nos queda aún algo que decir sobre ese importante elemento de las pilas que se llama moderador o retardador. Veamos su empleo.

Diversos investigadores pensaron que podría mezclarse el uranio con un elemento moderador, de tal suerte que los neutrones rápidos liberados por fractura atómica, y antes de encontrar a otros núcleos de uranio, podrían ser refrenados por debajo de las velocidades para las cuales es más probable la absorción sin fractura.

Evidentemente, las características de un buen moderador exigen, no sólo que su peso atómico sea muy pequeño, sino también que no ofrezca excesiva tendencia a absorber neutrones y quedarse con ellos. Por tener precisamente esta última, hay que excluir ciertos cuerpos ligeros, como el litio y el boro. El helio es de difícil empleo por su estado gaseoso y por no dar compuestos. Por todo ello, el moderador habría de elegirse entre el deuterio, el hidrógeno, el berilio y el carbono. Ninguno de estos ele-

mentos ha sido aún eliminado de la lista de los posibles moderadores. Pero el último llamó más la atención de los profesores Fermi y Szilard, que propusieron la adopción del grafito como moderador para obtener la reacción en cadena.

Se ha ensayado también el agua pesada, cuyo empleo permite reducir notablemente las dimensiones de la pila; pero su carácter líquido presenta nuevas complicaciones.

No parece que sea cómodo (por todo ello) obtener una mezcla homogénea de uranio y moderador. Pero a propuesta de los dos profesores citados (que se desarrolló en Estados Unidos) fué ensayado otro expediente muy ingenioso: emplear bloques de uranio en gran tamaño, embebidos en una matriz de sustancia moderadora. Un entramado así compuesto presenta, al parecer, grandes ventajas sobre una mezcla homogénea. Como las constantes se determinaron ahora con mayor exactitud, fué posible calcular teóricamente el tipo de celosía que sería más eficaz. No conocemos cuál sea éste. Pero podemos conjeturar que se haya llegado a algo parecido a las placas de los acumuladores de plomo, superpuestas o yuxtapuestas, como el encofrado de una construcción de cemento. También creemos se han empleado pilas en bloques de grafito o parafina, con barras de uranio introducidas en su seno. Pero de las dimensiones adoptadas no nos atrevemos a dar cifras o a exteriorizar las que en privado podemos evidentemente imaginar.

Hablemos, por último, del deflector.

En una pila mixta, de uranio y grafito, apta para reaccionar en cadena, pueden reducirse considerablemente las dimensiones críticas, sin más que rodear toda la pila con una capa de grafito, ya que esta envoltura desvía y "refleja" hacia el interior de la pila un gran número de neutrones fugitivos que, sin ello, escaparían al exterior.

Para reducir el tamaño crítico de la bomba se puede emplear una envoltura análoga; pero en este caso tiene la misma otra misión más: su propia inercia química retarda la explosión del material reaccionante. El empleo de éste deflector trae consigo, indudablemente, la obtención de una explosión más dilatada, más enérgica y más eficaz.

El deflector más eficiente será el que

tenga una mayor densidad; en cambio, contra lo que pudiera presumirse, carece de importancia que su fuerza tensil sea elevada o no. Y da la feliz coincidencia de que los materiales de alta densidad son también excelentes reflectores de neutrones.

Como ya hicimos observar, la bomba tiende a volar en fragmentos al iniciarse la reacción, y esto tiende a interrumpir la misma. Nos hallamos ante un círculo vicioso.

Es relativamente sencillo calcular cuánto puede abrirse la bomba antes de que la reacción se corte. Pero calcular cuánto dura la expansión de la bomba y hasta dónde llega en ese tiempo la reacción nuclear, es algo mucho más difícil.

Aun cuando el efecto de un deflector es aumentar el rendimiento por haber reflejado los neutrones y por haber demorado la expansión de la bomba, no es, sin embargo, tan grande esa influencia del deflector sobre la eficacia final, como lo es sobre el tamaño crítico de la masa explosiva. La razón de ello es que el proceso de reflexión neutrónica consume un tiempo relativamente apreciable, y no puede tener lugar muy extensamente antes de que concluya la reacción en cadena.

Hablemos, por último, de la refrigeración de las pilas.

Puesta en marcha una pila uránica, hay que prever inmediatamente un medio de refrigeración. En efecto: en primer lugar, hay que mantener la temperatura de la pila por debajo de cierto límite, pasado el cual la actividad neutrónica resulta inadecuada para penetraciones nucleares. No es fácil hallar un buen refrigerante. Es difícil emplear el agua, por causa de su hidrógeno, ni el aire, por su nitrógeno. Se hicieron al principio muchas cábalas sobre el medio elegido en Clinton (primera pila experimental), hablándose del helio y del bismuto líquido. Pero se sabe que las tuberías de refrigeración tienen un desarrollo total de 2.000 kilómetros (?). Luego se ha afirmado que se emplea como refrigerante el agua.

Al cabo de un cierto tiempo de funcionamiento de la pila, se establece un equilibrio de masa y se retiran los bloques de uranio para separar el plutonio. (De no hacerlo así, se acumularían los productos de las roturas atómicas, que absorberían neutrones y perjudicarían a la cadena.) Ade-

más, son recuperados los productos radioactivos, y los átomos de U_{235} vuelven a la pila para continuar la operación.

En la pila norteamericana de Hanford habíase proyectado la refrigeración por helio; pero consultado el "as" de la química de aquel país, Dupont de Nemours ("Ducoco"), decidió sustituir el helio por el agua, por razón del peligro de escapes de gases refrigerantes cargados de radioactividad, por la dificultad de construir rápidamente grandes ventiladores, dificultades de la carga y descarga de uranio, etc. El agua no presenta estos inconvenientes, pero sí otros menos graves, como la mayor complicación de la pila y el riesgo de oxidación del uranio, cargándose también el agua de radioactividad. Luego veremos cómo se resolvieron todos estos problemas, al tratar de la fabricación en Hanford. *

El empleo del plutonio.

No hemos formulado, hasta este momento, más que consideraciones referidas exclusivamente al uranio. Pero ya hemos dicho que también es posible emplear, con resultados comparables a los del U_{235} , el elemento Pu_{239} (de $Z = 94$), conocido vulgarmente por plutonio. Sabemos que en Estados Unidos se le viene produciendo en gran escala, y hay más que indicios de que este "as" de los cuerpos pesados ha cargado alguna de las bombas atómicas ya utilizadas.

Conocida es la dificultad de separación del U_{235} y su isótopo más abundante, el U_{238} , a causa de su identidad química precisamente. Pero el plutonio, aunque se deriva del U_{238} , es ya un elemento químico diferente, y esto facilita su obtención. Es decir, que desarrollando las reacciones que convierten en plutonio parte del U_{238} , una separación química del uranio y el plutonio es mucho más practicable que la separación isotópica del U_{235} y el U_{238} .

Supongamos que se ha establecido una reacción en cadena, gobernable, en un entramado de uranio natural con un elemento moderador tal como el carbono (en forma de grafito). Sabemos que de la escisión atómica del U_{235} —contenido en pequeñas dosis en el mineral—nacerán neutrones que

serán absorbidos por las cantidades—mucho mayores—de U_{238} , lo cual irá dando lugar sucesivamente al U_{239} , al neptunio y al plutonio Pu_{239} . Este último emite, a su vez, una partícula α , y al perder cuatro unidades másicas y dos cargas eléctricas, el citado Pu_{239} ($Z = 94$) evoluciona hacia el U_{235} (de $Z = 92$), pero tan lentamente que en la práctica actúa como un elemento estable, lo que permite manejarlo.

Si, después de haberse dejado la reacción en marcha durante un tiempo considerable, se separa la mezcla de metales, puede ser factible extraer por métodos químicos el plutonio y purificarlo para su empleo en ulteriores cadenas reactivas (con fractura) de naturaleza explosiva. Y esto es lo que creemos se hace.

El curso de una reacción nuclear en cadena, en una masa heterogénea con moderador de grafito, puede definirse como productor de una sola "generación" de neutrones. Los neutrones rápidos iniciales aumentan ligeramente en número por las fisuras rápidas, mientras que se les reduce por absorción en el U_{238} , y más tarde, por absorción (a las energías térmicas) en el grafito y otras sustancias, y finalmente, por su fuga definitiva al exterior. Los restantes neutrones, que han sido refrenados en el grafito, producen fisuras en el U_{235} , originando una nueva generación de neutrones rápidos semejante a la precedente.

El producto plutonio debe ser separado por procesos químicos de otra cantidad similar de productos heterogéneos de la fractura atómica y de una cantidad mucho mayor de uranio. Existen varios procedimientos hábiles para lograr esta separación.

Los investigadores americanos han elegido uno cuyo pormenor no ha sido revelado. Sólo sabemos que consiste en una serie de reacciones que comprende precipitaciones con gangas-soporte, disolución, oxidación y, por último, reducción.

Vencida ya la parte más monótona de esta indispensable introducción, estamos ya en situación de ver cómo se fabrica el explosivo atómico, cómo está constituida la bomba, cómo detona y cómo se la ha utilizado. Mejor dicho: lo poco que sabemos de todo esto. De ello nos proponemos tratar en los capítulos que siguen.