

# EMPLEO DE LA ENERGIA ATOMICA (NUCLEAR) PARA FINES INDUSTRIALES Y MILITARES

por E. GAVIOLA

Director del Observatorio de Córdoba

Informe presentado a la 7ª Reunión de la Asociación Física Argentina realizada en La Plata, Instituto de Física, el 19 de abril de 1946

*Abstract.* — The present report is based on the general knowledge on fission processes up to 1940, on the Smyth Report and on an article of Oliphant (Nature, January 5, 1946). An effort has been made to read between the lines in order to fill some of the lacunae left by the censorship imposed on the authors.

A description is given of the possible dimensions and functioning of the heterogeneous pile.

A schematic possible gun for firing atomic bombs is described.

As applications of scientific interest the spectra of matter at very high temperatures and the experimental production of cumulo-nimbus storms and earthquakes are mentioned.

## *Introducción.*

Las publicaciones científicas referentes a la fisión nuclear en general y a la del uranio en particular cesaron en 1940. Ello se debió a la campaña iniciada por Leo Szilard en febrero de 1939 en los Estados Unidos, para evitar que el enemigo en potencia se enterara de resultados científicos que, según declaración de E. Fermi en Washington del 26 de enero de 1939, podían tener importancia militar. El estado de los conocimientos al correrse la cortina metálica de la censura fué referido por Cecilia Mossin Kottin<sup>1)</sup> en su parte física y por Juan T.

---

<sup>(1)</sup> C. MOSSIN KOTTIN, Rev. UMA y AFA, V. 10, p. 130 (1945); C. é Invest. Set. 1945.

D'Alessio<sup>2</sup>) en su parte química en la Tercera (Cuarta según la nueva cronología) Reunión de la Asociación Física Argentina efectuada en el Instituto de Física de La Plata el 28 de Agosto de 1944.

Con la censura impuesta en 1940, una era científica — la de la ciencia libre internacional — ha terminado y otra — la de la ciencia nacional al servicio de la guerra — ha comenzado. Es probable que ésta dure mientras no cambie fundamentalmente el actual panorama político mundial.

Desde el principio de la nueva era han aparecido dos informes, uno muy largo y confuso<sup>3</sup>) en los Estados Unidos y otro<sup>4</sup>) breve y claro en Inglaterra, y algunas breves notas y cartas a editores que tienen sólo relación más o menos remota con el asunto.

Para formarse una idea medianamente clara sobre los trabajos y progresos efectuados entre 1940 y 1945 no queda más remedio que, basándose en los conocimientos públicos de 1940, leer los informes entre líneas, atar cabos y hacer una cantidad de supuestos plausibles. Es lo que voy a hacer en este informe. El peligro de equivocarse es grande. Es uno de los peligros a que nos somete la nueva era de las ciencias secretas nacionales. Todo lo que se haga por mitigar ese mal será beneficioso para la ciencia.

### *El Problema.*

El problema que, desde 1940, se presentó a los físicos era doble: a) Producir una reacción en cadena, por medio de la fisión del uranio, de manera controlable, que sirviera para producir energía para uso industrial. Este problema fué parcialmente resuelto por medio de la así llamada *pila heterogénea*; b) Construir una bomba atómica para fines militares. Este problema fué doblemente resuelto: por medio de la separación de los isótopos del Uranio y por medio de la purificación del *Plutonio* producido como *subproducto* de la pila heterogénea.

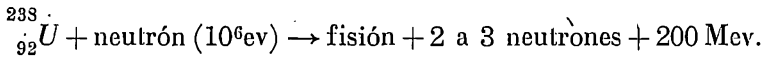
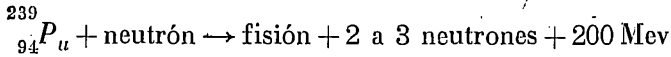
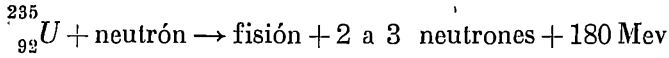
(<sup>2</sup>) JUAN T. D'ALESSIO, Rev. UMA y AFA, Vol. 10, pág. 132 (1945).

(<sup>3</sup>) HENRY D. SMYTH, *Atomic Energy for Military Purposes* (1945), Reproducido en: Review of Mod. Phys. (Vol. 17, N° 4, 1945, pág. 351).

(<sup>4</sup>) M. L. OLIPHANT, *Nature*, January 5, 1946.

*Hechos fundamentales conocidos.*

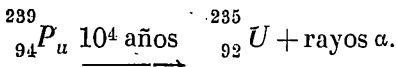
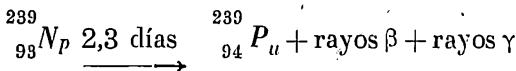
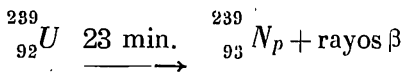
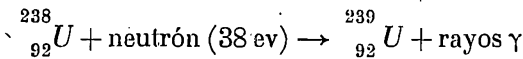
Se sabe que las siguientes reacciones nucleares conducen a la fisión de los núcleos indicados:



El isótopo 235 del Uranio y el Plutonio sufren fisión al capturar neutrones de cualquier energía. El Uranio 238, en cambio, necesita ser atacado por neutrones de energía igual o mayor que un millón de electrónvoltios para que la probabilidad de entrar en fisión sea grande. Con neutrones de menor energía puede transformarse, como veremos, sin dividirse en partes de tamaño comparable. La fisión es improbable.

El número de neutrones puestos en libertad por la fisión no es el mismo para cada caso individual. El promedio no es un número entero. Dicho número parece depender de la forma en que se divide el núcleo original, forma que puede variar de caso a caso, dentro de ciertos límites, conduciendo a distintos productos de desdoblamiento. Los neutrones secundarios no son producidos instantáneamente. Algunos demoran segundos en ser emitidos. Ello facilita el manejo de la reacción en cadena.

La siguiente serie de transformaciones conduce al nacimiento de los elementos transuranianos Neptunio y Plutonio:



Las curvas completas de absorción de los dos isótopos principales del uranio no han sido publicadas. Es de suponer que tengan la forma indicada cualitativamente en figura 1. El Thorio se comporta en forma análoga al  $U\ 238$ ; el Plutonio al  $U\ 235$ .

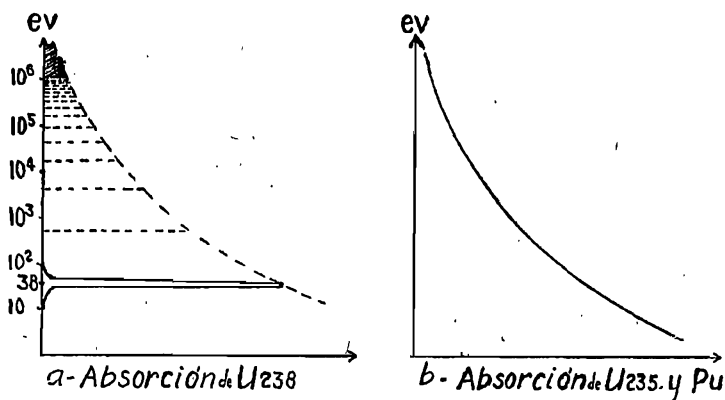


Fig. 1

El más bajo de los niveles de absorción del  $U\ 238$  se encuentra a 38 electrón-voltios y es un nivel de resonancia. Por encima de éste se encuentran otros niveles de absorción (indicados por líneas punteadas en la figura) de menor intensidad. Los niveles están más próximos unos a otros a medida que crece la energía. Cerca de  $10^6$  ev comienza una banda continua de absorción. Parece que la captura de un neutrón dentro de esta banda produce fisión; por debajo de ella tan sólo excitación e inestabilidad radioactiva. La fisión nuclear del  $U\ 238$  adquiriría, así, un lejano parecido formal a la ionización atómica por absorción de fotones.

La absorción de neutrones de parte del  $U\ 235$  y del  $P_u$  es continua, teniendo el coeficiente un valor grande para pequeñas velocidades (velocidades «térmicas») y uno cada vez menor a medida que las velocidades crecen.

#### Reacción en Cadena.

Se ignora aún si una masa suficientemente grande de Uranio metálico purísimo produciría una reacción en cadena en forma de explosión. Para que tal sucediera sería necesario que más de uno de cada dos o tres neutrones rápidos (energía cercana a

10<sup>6</sup> ev) procedentes de una fisión fuese absorbido en la banda continua del *U 238* indicada en Fig. 1 a. En tal caso, tendríamos una superbomba atómica, no menos de mil veces más efectiva que las actualmente conocidas y considerablemente más fácil de preparar.

Si el porcentaje de neutrones capturados en la banda de absorción continua es inferior a uno por cada dos o tres neutrones rápidos, no hay posibilidad de reacción en cadena en Uranio metálico puro. En efecto, la mayoría de los neutrones serían, en este caso, capturados en los niveles de absorción del *U 238* de energía inferior a 10<sup>6</sup> ev, sin conducir a fisión ni a la emisión de nuevos neutrones.

El isótopo 235 del Uranio tiene un coeficiente de absorción elevado para neutrones lentos («térmicos») y la captura conduce a fisión, con la emisión de 2 a 3 nuevos neutrones. El isótopo 238 del Uranio, además, no absorbe neutrones de energía inferior a 38 ev. Si los neutrones emitidos por la fisión de *U 235* tuvieran energía inferiores a 38 ev, una reacción en cadena se produciría fácilmente en Uranio metálico. Pero los neutrones emitidos por la fisión del *U 235* tienen una energía cercana a 10<sup>6</sup> ev. Hay que reducir su energía por medio de un «moderador» para obtener reacción en cadena.

Un «moderador» es una sustancia de peso atómico pequeño y que no absorbe, prácticamente, neutrones. Como tal pueden servir el Deuterio (Hidrógeno pesado), el Helio, el Berilio y el Carbono (grafito).

Si el moderador es mezclado en forma *homogénea* con el Uranio metálico no se produce reacción en cadena: por cada átomo *U 235* hay 140 átomos *U 238*; al ir perdiendo paulatinamente energía un neutrón rápido por choques con núcleos de átomos del moderador, la probabilidad de ser capturado por *U 238* en una de sus «líneas» de absorción — en especial en la de 38 ev — es muy grande. Tales capturas no conducen a la producción de nuevos neutrones. Si el moderador es mezclado, en cambio, en forma *heterogénea* con el Uranio, la reacción en cadena es posible. Esta mezcla puede ser hecha de varios modos. La primera forma ensayada por Fermi fué la de «red cúbica»: Consiste en una construcción hecha con «ladrillos» cúbicos de grafito. Los ocho vértices de cada cubo son limados, introduciéndose en los espacios dejados libres terrones de Uranio me-

tálico o de  $UO_2$  purificado. El tamaño de éstos y el de los cubos de grafito es calculado de modo tal que: 1) casi todos los neutrones rápidos, producidos por fisión de un núcleo de  $U 235$  en un terrón dado, abandonen éste sin ser absorbidos y penetren en el grafito; 2) al llegar a otro terrón vecino, a través del grafito, entre dos terceras partes y una mitad de los neutrones deben tener una energía inferior a 38 ev, a fin de ser capturados por  $U 235$  y mantener la cadena, los restantes pueden ser capturados por  $U 238$ , para producir Plutonio, o por impurezas.

Es fácil ver que el crecimiento de la cadena es favorecido por pequeños terrones de Uranio y grandes cubos de grafito. La producción de Plutonio es favorecida por grandes terrones de Uranio y pequeños cubos de grafito (mientras la cadena no se corte).

Los neutrones que se escapan por la periferia de la *pila heterogénea* no vuelven a penetrar en ella. Para que la cadena no se corte es necesario que el volumen sea grande (unos 5 metros de diámetro) y que la pila esté rodeada de una substancia «refleitora» de neutrones, que devuelva la mitad de los que tratan de escapar.

Como substancia reflectora se ha usado grafito, la misma substancia moderadora. Podrían usarse también Plomo, Bismuto, Berilio, Aluminio, Magnesio, Zink, Estaño y Parafina o agua preparada con Deuterio.

Si se quiere evitar que la cadena crezca en forma de explosión más o menos violenta, es necesario introducir en la pila, láminas o barras de substancias que absorben fuertemente neutrones lentos. Para tal fin se han usado Cadmio, acero al Cadmio y acero al Boro. La extracción lenta y controlada de tales láminas o barras, permite regular la marcha de la reacción en cadena.

La fisión del Uranio produce una gran cantidad de calor. El enfriamiento de la pila a través de su periferia es mínimo, debido a su gran volumen. Si el calor producido en su interior no es extraído, el Uranio y el grafito se calentarían fuertemente hasta que se cortase la cadena — por la variación de los coeficientes de absorción de neutrones de los isótopos del Uranio con la temperatura — o hasta que la pila se evaporase. Para eliminar estas contingencias se refrigerarán las pilas haciendo pa-

sar aire, Helio o agua, por cañerías apropiadas, a través de la pila.

### *Dificultades y Soluciones.*

El 1º. de Noviembre de 1939 el primer comité oficial norteamericano pidió, en base a un memorandum de Leo Szilard, 50 toneladas de óxido de uranio y 4 toneladas de grafito. Ambos materiales — los mejores que producía la industria — resultaron excesivamente impuros; con ellos no podía funcionar una pila heterogénea. La cantidad de grafito pedida resultó, además, unas cien veces demasiado pequeña. Una primera dificultad a vencer fué, pues, el perfeccionamiento de los métodos de producción y refinación industrial del  $UO_2$  y del grafito. Una segunda dificultad, la producción de tales substancias en cantidades suficientes y en tiempos razonables.

El  $UO_2$  refinado puede ser usado, como lo demostró Fermi, en pilas heterogéneas. Es preferible, sin embargo, usar Uranio metálico, para evitar la captura de neutrones por el Oxígeno. La obtención de Uranio metálico puro en grandes cantidades es una operación difícil. Fué obtenido, aparentemente, por electrólisis de sales de Uranio fundidas.

En lugar del grafito puede usarse con ventaja agua o parafina pesadas. Pero para ello es necesario disponer de cantidades suficientes (toneladas) de Deuterio. La separación de este último del Hidrógeno común es difícil y lenta. Por ello se prefirió concentrar los esfuerzos durante la guerra en la obtención de grafito puro como moderador, dejando la fabricación de agua pesada para después de la guerra.

Al fisionarse el Uranio en la pila heterogénea produce, entre otras cosas, gases nobles (Xenon y Kriptón) radioactivos. Si se permitiera el escape de tales gases, sin ciertas precauciones, se envenenaría la atmósfera alrededor de la pila durante su funcionamiento. Para evitar el escape de estos gases fuera de tiempo y lugar es necesario encerrar al Uranio en recipientes herméticos.

El Uranio metálico es un metal poroso. Contiene, en contacto con la atmósfera, gran cantidad de aire adsorbido. El Nitrógeno del aire captura neutrones. Es conveniente, pues, hacer el vacío dentro de los recipientes herméticos que contienen el Uranio y «desgasarlo».

Los recipientes o *tarros* en cuestión deben, pues, ser herméticos, aguantar el vacío, soportar la temperatura de desgaseamiento y «last not least» ser hechos de un material que no capture Neutrones. Parece que estas dificultades fueron vencidas usando tarros de aluminio de unos 42 mm. de diámetro y algo así como 1 metro de largo (para la pila de simetría cilíndrica).

La substancia usada como refrigerante y los caños dentro de los que circula deben capturar pocos neutrones.

Resueltas todas estas dificultades, se puede construir una pila heterogénea.

### *La pila heterogénea.*

La primera reacción en cadena fué obtenida por Enrico Fermi con una pila de simetría cúbica construída en Chicago en una sala de deportes de la Universidad. No tenía dispositivo para refrigeración. Anduvo a razón de 1/2 vatio el 2 de diciembre de 1942, a 200 vatios 10 días después.

La segunda pila heterogénea se elevó en Clinton en el Valle del Tennessee. Fué enfriada con Helio primero y con aire después. El uso de Helio resultaba molesto, pues era difícil evitar su escape. Esta pila fué construída cambiando la simetría cúbica por simetría cilíndrica: el Uranio, en lugar de estar en forma de terrones en los vértices de cubos, estaba en forma de barras a lo largo de las aristas de paralepípedos de grafito, de sección cuadrada. El grafito fué substituído, posteriormente, por agua pesada. Ello permitió reducir el tamaño de la pila.

La pila de Clinton funcionó a una potencia superior a 1800 kilovatios.

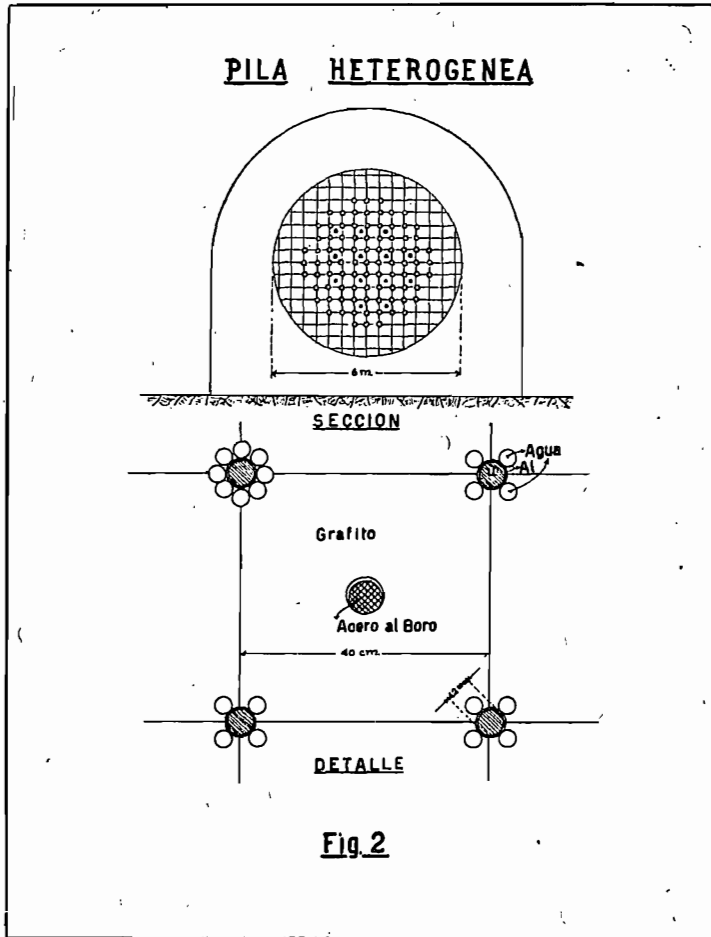
La tercera pila, levántada en Hanford (Washington) con el propósito de producir Plutonio en cantidad, fué construída usando unas 300 toneladas de grafito como moderador y reflector, unas 30 toneladas de Uranio metálico y el agua del río Columbia como refrigerador. Funciona normalmente a 100.000 kilovatios durante un mes entero.

La figura 2 representa esquemáticamente una forma probable de la pila heterogénea.

La pila heterogénea de Hanford está probablemente formada por un tronco de cilindro de grafito de unos 6 metros de diámetro y alrededor de 6 metros de largo. La parte central del



cilindro de grafito está atravesada, por unas 80 barras de Uranio metálico encerrado en «tarros» de aluminio, que corren paralelas al eje del cilindro. Para su mejor manejo, cada tarro



**Fig. 2**

de 42 mm. de diámetro tiene menos de 1 metro de longitud. La distancia entre barras es de unos 40 cm. Como las barras del centro reciben mayor lluvia de neutrones que las de la periferia, se las coloca, con el fin de emparejar el calentamiento, a distancia diferente que a las periféricas. El manto cilíndrico exterior de grafito sirve de «reflector» de los neutrones. Entre las barras de Uranio pasa un cierto número de barras o láminas de

acero al Boro o al Cadmio que sirven para regular la marcha de la reacción en cadena. Cada barra de Uranio está rodeada por un sistema de caños de Aluminio por los que circula el agua refrigerante.

El cilindro de grafito está sostenido y encerrado por una espesa pared de concreto. Esta tiene por misión principal detener las radiaciones que se escapan del cilindro de grafito. La muralla de concreto tiene, naturalmente, aberturas por las que se introducen y extraen los «tarros» de Uranio y las barras de acero.

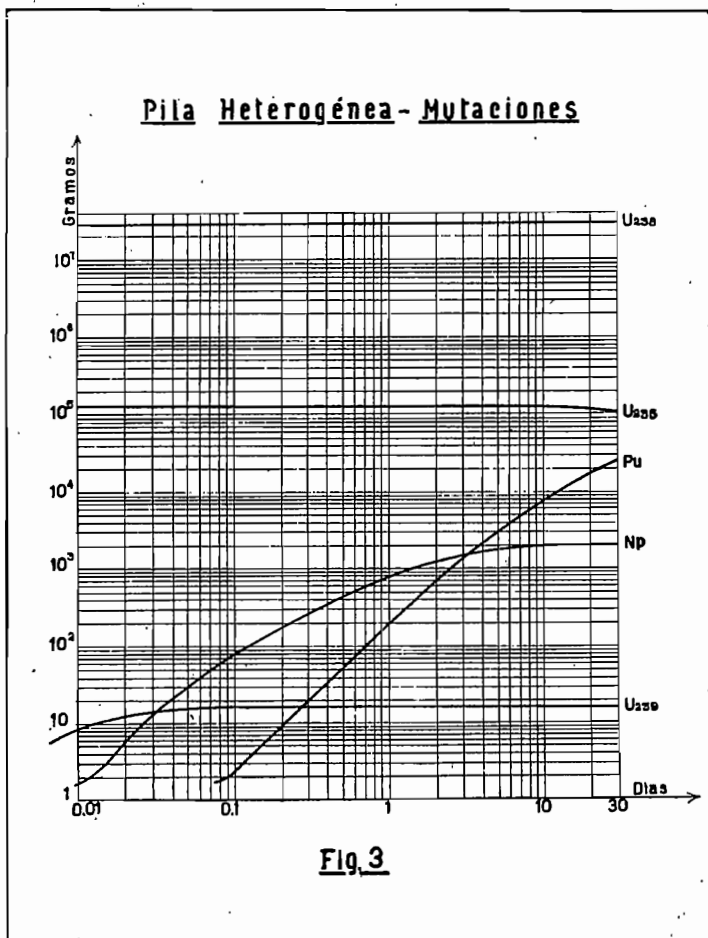
El agua común, destilada, no es un refrigerante ideal. El Hidrógeno absorbe neutrones, transformándose en Deuterio. El Oxígeno captura también algunos neutrones. Sería mejor usar agua pesada o algún aceite o parafina del tipo  $C_nD_{2n+2}$ . Estos últimos permitirían, talvez, elevar la temperatura del refrigerante a un valor que facilitase el aprovechamiento industrial del calor producido.

Es posible que el agua usada como refrigerante — especialmente purificada — sea enfriada en serpentinas y recirculada. En tal caso, el río Columbia no pasaría por dentro de la pila, sino que las serpentinas de enfriamiento estarían sumergidas en el mismo. Se evitaría así el envenenamiento de las aguas del río con materias hechas radioactivas por la radiación neutrónica. El agua refrigerante se iría convirtiendo paulatinamente en agua pesada, con lo que mejoraría con el tiempo la eficiencia de la pila.

#### *Funcionamiento de la pila heterogénea.*

Cargada la pila con tarros de Uranio, que pesan en total 30 toneladas, estando en su lugar un número suficiente de láminas o barras de acero al Cadmio o Boro y puesta en circulación el agua refrigerante, se inicia la reacción en cadena retirando progresivamente el material absorbente hasta que la temperatura de salida del refrigerante tenga el valor deseado. El tiempo que tarda la pila en acomodarse a un nuevo nivel de potencia al retirar o introducir material absorbente — tiempo de relajación — es largo: 4 horas. El manejo de la pila no es, pues, crítico. Eso sí, debe ser hecho a distancia, por el peligro de las radiaciones de toda clase que andan cerca de la pila. Dicho manejo puede ser automático, por medio de termóstatos accionados por el refrigerante a su salida de la pila.

La pila funciona un tiempo del orden de un mes a una potencia constante de unos 100.000 kilovatios. Durante este tiempo, de los 1 a 3 neutrones que emite el  $U^{235}$  por fisión, alrededor de uno es capturado por  $U^{238}$ , convirtiéndose en la sustancia radiactiva  $U^{239}$ . Esta se transforma, por emisión  $\beta$ , en Neptunio y este, a su vez, en igual forma, en Plutonio.



**Fig. 3**

La figura 3 muestra, en forma aproximadamente cuantitativa, la marcha de las reacciones. Las curvas han sido calculadas en la forma usual para procesos radioactivos, teniendo en cuenta los valores conocidos de las «vidas medias» del  $U^{239}$  y del Neptunio.

A los 30 días de funcionamiento, la curva del Plutonio ha alcanzado cerca de 24 kilos y continúa creciendo rápidamente con el tiempo. Convendría, pues, prolongar el funcionamiento de la pila. Es cierto que el Plutonio formado sería fisionado, en parte, por neutrones lentos del  $U\ 235$ , pero hay que tener presente, también, que la fisión de un átomo de Plutonio conduce, después de un cierto tiempo, a la formación de otro, al ser capturado uno de sus neutrones por un núcleo de  $U\ 238$ . Si no hubieran inconvenientes de otra naturaleza, convendría proseguir la cadena hasta que casi todo el  $U\ 235$  hubiera desaparecido, siendo reemplazado por una cantidad comparable de Plutonio. Los inconvenientes de otra naturaleza que lo impiden son los productos de la fisión del  $U\ 235$ : Bario, Iodo, Kriptón, etc. Casi todos ellos absorben fuertemente neutrones. La cantidad (en peso) acumulada de tales subproductos es, en cada instante, igual o mayor que la cantidad de Plutonio. Llega un momento, pues, en el que la cadena se detiene, aún retirando todo el material absorbente de control.

Si la eficiencia de la pila fuese menor que un átomo de *Pu* por cada fisión de  $U\ 235$ , el tiempo de funcionamiento estaría limitado por la creciente fisión del *Pu* mismo, lo que haría que su cantidad tendiera a un nivel de equilibrio radioactivo.

Detenida la reacción en cadena, se procede a la extracción de los «tarros» de Uranio, dejándolos caer a una pileta con agua. Allí permanecen como una semana, esperando que los 15 gramos de  $U\ 239$  y los 2 kilos de Neptunio existentes se transformen en Plutonio.

Disolventes agregados posteriormente deshacen los «tarros» de Aluminio: los gases nobles radioactivos, producto de la fisión, aprisionados en los mismos, se escapan a la atmósfera por altas chimeneas. Podrían ser envasados para fines industriales o científicos, si se lo deseara.

Las operaciones de separación química del Plutonio se efectúan bajo tierra y por control a distancia, para evitar los efectos de las radiaciones que desprenden los productos de la fisión. Una vez separados estos, los operadores pueden acercarse al Plutonio conseguido.

En un mes de funcionamiento, la pila heterogénea produce entre 25 y 30 kilos de Plutonio, cantidad que es suficiente para construir una bomba atómica.

### *El Plutonio.*

El estudio químico del Plutonio (94) y de los otros elementos transuránicos, el Neptunio (93), el Américium (95) y el Curium (96) muestra que todos ellos pertenecen a un grupo químico (que incluye al Uranio) análogo al de las tierras raras.

Tal hecho se interpreta, en el modelo atómico de Bohr, diciendo que los últimos electrones agregados se incorporan a órbitas internas no ocupadas, sin alterar mucho las órbitas exteriores o de valencia.

El Plutonio sufre fisión al capturar neutrones de cualquier energía, en forma análoga al Uranio 235 (figura 1 - b)). Es radioactivo y se descompone lentamente por emisión de partículas  $\alpha$ . Su vida media es de diez mil años.

### *Aprovechamiento Industrial — Pila Heterogénea.*

La potencia de 100.000 kilovatios producida por la pila heterogénea en forma de calor puede, en principio, ser usada para accionar máquinas térmicas industriales. Las dificultades encontradas parecen consistir en que la pila funciona en condiciones óptimas a baja temperatura, a la cual el rendimiento de una máquina térmica es malo. Si se permite que la temperatura de la pila y del refrigerante lleguen a valores más altos, parece ser que la eficiencia de la pila decrece, porque el coeficiente de absorción de neutrones del  $U 235$  cae con la temperatura y porque algunos de los materiales empleados en la pila sufren deterioro. Esto último será seguramente remediado cuando se ensaye un número suficiente de materiales. Lo primero puede ser compensado usando para cargar la pila Uranio enriquecido en  $U 235$  por difusión térmica, por ejemplo. Podría agregarse, también, Plutonio al Uranio natural, pero este método es, seguramente, poco práctico, por cuando el Plutonio casi puro obtenido de la pila heterogénea puede ser usado con ventajas en una «pila homogénea».

### *La Pila Homogénea.*

Usando  $Pu$  o  $U 235$  muy concentrados, pueden construirse pilas pequeñas para uso industrial. En este caso se pueden

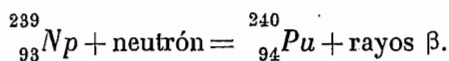
mezclar íntimamente tales metales con un moderador tal como agua pesada o parafina pesada. La cadena resultante es sumamente fuerte, pues no existe ya la proporción de 140 a 1 del isótopo «pasivo»  $U\ 238$  al lado del «activo»  $U\ 235$ .

Una pila construida de tal modo y enfriada con un aceite  $C_nD_{2n+2}$  podría funcionar a temperaturas superiores a cien grados. Podría ser tan pequeña como para ser usada en un barco o en una locomotora. El principal problema a resolver sería evitar el efecto de las radiaciones y de las emanaciones radioactivas de la pila.

### *Plutonio desnaturalizado.*

El Uranio natural no puede ser usado sin más trámites para hacer bombas atómicas por la gran cantidad de isótopo  $U\ 238$  que contiene. La separación del isótopo «activo», el  $U\ 235$ , es difícil, como veremos. El Uranio natural podría ser llamado «Uranio 235 desnaturalizado».

Se ha hablado, últimamente, de «Plutonio desnaturalizado». El Plutonio concentrado que se obtiene de la pila heterogénea puede ser fácilmente empleado para construir bombas atómicas. La entrega de este producto a la industria privada podría producir, pues, sentimientos de inseguridad. Si se mezcla el  $Pu\ 239$  con un isótopo «pasivo», análogo al  $U\ 238$ , podría obtenerse un producto útil para la producción industrial de energía pero inútil para la guerra. Tal isótopo podría ser el  $Pu\ 240$ , el que se formaría conjuntamente con el  $Pu\ 239$  en la pila heterogénea por medio de la reacción



Se ignora si este isótopo del  $Pu$  es estable.

Si la mezcla de isótopos obtenida de la pila es sometida a operaciones de fraccionamiento, la fracción enriquecida en  $Pu\ 239$  sería destinada a bombas atómicas, la fracción enriquecida en  $Pu\ 240$  sería el «Plutonio desnaturalizado», destinada a la industria.

El Plutonio desnaturalizado no serviría, seguramente, para pilas homogéneas. Habría que recurrir con él al uso de pilas heterogéneas.

### *La Separación de Isótonos.*

Vimos al comienzo que el problema de la fabricación de una bomba atómica fué doblemente resuelto, por la «elaboración» de Plutonio y por la extracción del isótopo 235 del Uranio natural.

Varios métodos fueron ensayados para extraer el  $U_{235}$ . Tres de ellos condujeron a resultados prácticos satisfactorios:

- 1 - La difusión fraccionada a través de membranas porosas.
- 2 - La separación en el «Calutron» o espectrógrafo de masas.
- 3 - La difusión térmica.

Otros métodos, tales como la centrifugación en torre de fraccionamiento a contracorriente, continúan siendo estudiados.

Los métodos 1 y 3 eran ya conocidos y habían sido usados para separar isótopos antes de la guerra. Los procedimientos secretos descubiertos durante la guerra consisten principalmente en el uso de una membrana porosa mejor que la de plata-zinc ya conocida y en la adaptación de la torre de difusión térmica usada en Alemania por H. Clusius y G. Dickel para gases, al uso de líquidos, con lo que presumiblemente se aumenta la eficiencia.

Las instalaciones necesarias en cualquiera de estos métodos son de dimensiones impresionantes. Para el primero hacen falta *hetéreas de membrana porosa y miles de bombas centrífugas de circulación.*

Así y todo, se obtienen con ello tan sólo «unos gramos de Uranio por día con 10 % de  $U_{235}$ ».

### *El Calutron.*

El Calutron («California University-tron») es una adaptación hecha por E. O. Lawrence, de Berkeley de los aparatos ideados como espectrógrafos de masas, por Aston y otros, a la separación de los isótopos del Uranio.

Lawrence usó primero el electroimán del «cyclotron» de polos de 94 cm. de diámetro que tenía en funcionamiento en Berkeley. Consiguió aumentar la eficiencia en forma considerable — con respecto a cualquier aparato anterior — destruyendo el potencial espacial en la cámara de vacío con la ionización de restos gaseosos y multiplicando el número de haces de iones que atraviesan la cámara simultáneamente.

Asegurando el éxito, Lawrence hizo terminar el electroimán de 5000 toneladas, cuya construcción había sido anteriormente paralizada por la guerra. Este electroimán tiene polos de 4,67 m. de diámetro. El «calutron» hecho con este electroimán probó ser capaz de producir 1 a 2 gramos de Uranio 235 por día, de una pureza del 80 al 40 por ciento respectivamente, partiendo de Uranio natural. Si se parte de Uranio ya enriquecido por difusión térmica, se puede aumentar la cantidad producida o la pureza. Ambas son inversamente proporcionales.

La gran ventaja del calutron sobre la difusión térmica o por membranas es que el primero produce en un escalón un enriquecimiento que requiere miles de escalones en los otros.

La magnitud del esfuerzo industrial necesario, aún con éste método, puede estimarse si se tiene en cuenta que para producir los 30 kilos de  $U\ 235$  concentrado necesarios para una bomba atómica, a razón de 3 gramos por unidad por día, se necesitan 100 calutrones de 5000 toneladas cada uno funcionando durante 100 días.

#### *La Separación del Deuterio.*

Hemos visto que como «moderador», en las pilas heterogénea y homogénea, el Deuterio ofrece grandes ventajas. Su obtención en cantidad se ha conseguido por tres métodos:

1 - Destilación en torre de fraccionamiento.

2 - Fraccionamiento por intercambio químico en torre de contracorriente de Hidrógeno y de vapor de agua.

3 - Electrólisis.

El primer método utiliza el hecho de que el agua pesada hierve a  $101^{\circ},4\text{C}$  mientras que el agua liviana lo hace a  $100^{\circ},0\text{C}$ . Este método parece ser el más económico. Lo está usando en gran escala la casa Dupont.

El segundo método es más rápido pero menos económico.

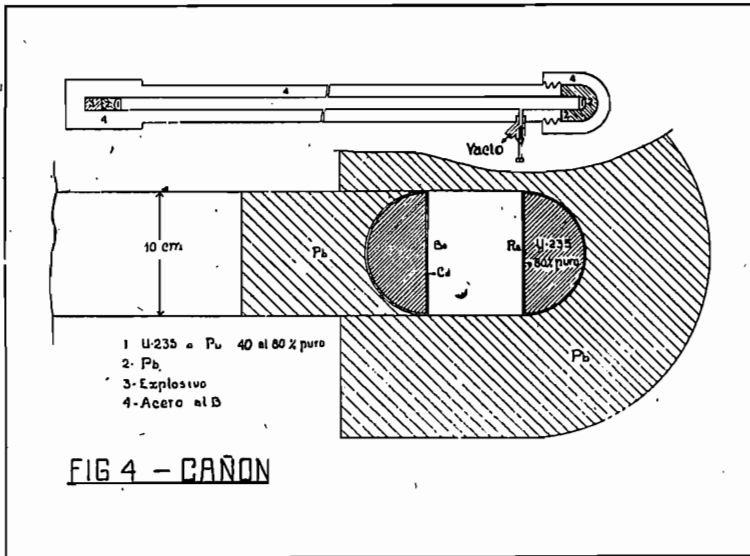
El tercer método — el más antiguo — requiere el consumo de grandes cantidades de corriente eléctrica.

#### *La Bomba Atómica.*

Una cantidad suficientemente grande de Uranio 235 o de Plutonio reunida en un espacio pequeño y mezclada, talvez, con una reducida cantidad de moderador explota. Ello se debe



a que la reacción en cadena con neutrones de cerca de  $10^6$  ev, puede ser iniciada por uno de los muchos neutrones que andan sueltos debido a la radiación cósmica. Si la cantidad de metal es inferior a un cierto límite — el límite crítico — muchos neutrones se escapan por la superficie exterior y las reacciones en cadena se cortan: no hay explosión posible. El problema técnico de la bomba atómica — una vez obtenidas cantidades suficientes de  $U^{235}$  o de  $Pu$  — consiste en evitar que explote antes de tiempo y en hacer que lo haga en el instante deseado. El principio de su solución consiste en el hecho de que si bien una bola maciza de  $U^{235}$  o de  $Pu$ , de unos 10 cm. de diámetro y unos 30 kilos de peso, explota sola, las dos mitades de la bola, suficientemente separadas, están por debajo del límite crítico y no son explosivas. Basta, pues, juntar las dos mitades en el momento deseado para que la explosión se produzca.



La explosión completa tarda un tiempo del orden de un millonésimo de segundo. Para evitar el comienzo y la dispersión prematuros del material — lo que interrumpiría la cadena antes del consumo total del explosivo, restando violencia a la explosión — es necesario que las dos mitades se junten rápidamente y que permanezcan juntas no menos de  $10^{-6}$  segundos, por la inercia de un material pesado que las envuelva.

Estos requisitos conducen a suponer que un posible mecanismo de ignición es el «cañón» representado esquemáticamente en figura 4.

En un «cañón» de acero (4) se encuentran, a la izquierda, la mitad de la bomba de Uranio, respaldada por un «taco» de Plomo y una carga de explosivo (3) contenida en recipiente hermético. En la boca del cañón se encuentra la otra mitad del Uranio (1), un manto de Plomo (2) y el cierre hermético de acero (4). El interior del cañón debe ser evacuado y desgasado. El proyectil debe llegar a la boca del cañón a una velocidad no menor de 1000 metros por segundo.

En la parte inferior de figura 4 se indica al proyectil en marcha, unos centímetros antes de llegar a su meta. Es posible que al Uranio se lo haya protegido con una delgada capa de Cadmio para evitar su deterioro por neutrones lentos durante su almacenamiento. Tal capa no parece indispensable.

Como el Uranio está dentro de un cañón de acero — absorbente de neutrones cósmicos — es probable que se use un «fulminante» consistente en una aguja de Berilio que se hunde en un preparado de Radium o de Polonium. La aguja de Berilio sola pudiera ser suficiente, por cuanto el  $U_{235}$  y el  $Pu$  son radioactivos, con emisión  $\alpha$ .

La inercia mecánica del Plomo que rodea al Uranio durante la explosión tiene la misión de evitar que este se disperse antes de tiempo. Según los informes publicados, esto no se consiguió del todo en Nueva México, Hiroshima y Nagasaki.

La bamba se dispara soltando el cañón desde un avión, con un dispositivo que enciende el explosivo en el momento deseado. La temperatura y la presión calculadas para el instante en que termina la explosión son  $10^7$  grados y  $10^7$  atmósferas.

El efecto letal y destructivo de la explosión se debe a:

- 1 - La intensísima radiación ultravioleta y  $\gamma$ .
- 2 - La lluvia de neutrones;
- 3 - La onda elástica de compresión;
- 4 - El «huracán» que la sigue;
- 5 - La elevada temperatura de los gases en expansión;
- 6 - La radioactividad producida en el lugar.

La magnitud de los efectos 1 y 5 puede juzgarse del hecho de que en Nueva México las arenas del desierto fueron fundidas en 400 metros a la redonda. El efecto 6 puede durar

muchos años, pero con intensidad que decrece exponencialmente.

El tamaño de la bomba dividida en mitades está limitado por la condición de que cada mitad debe estar por debajo del límite crítico. Si se desean disparar bombas más grandes, es necesario dividir las en un número mayor de partes. El problema de hacer que todas ellas se junten dentro de  $10^{-6}$  segundos debe ser resuelto. Una posible solución consistiría en hacer que el choque de una estructura aerodinámica contra la tierra (o el agua) produjera el disparo simultáneo, por inercia, de un número de cañones dispuestos en forma radial, en su interior, de modo que los proyectiles embocaran en una cámara común.

### *Aplicaciones Científicas.*

La explosión de bombas atómicas podría ser usada para importantes investigaciones científicas. La astrofísica y la física ganarían muchísimo si se obtuvieran series cinematográficas de espectros de distintas mezclas gaseosas a temperaturas de hasta diez millones de grados. Hasta ahora se han podido tomar espectros de fuentes de laboratorio hasta treinta mil grados únicamente. La meteorología podría hacer estudios de «nubes experimentales» tipo cúmulo-congestus y cúmulo-nimbus, pues no otra cosa constituyen las masas de gases calientes que se elevan hasta la estratósfera después de la explosión. Es probable que a cada disparo siga tormenta eléctrica con granizo y lluvia. La sismología podría experimentar con terremotos artificiales.

### *Conclusión.*

La producción de bombas atómicas y la investigación de la posible aplicación industrial de la energía nuclear puede ser encarada por cualquier país que tenga una industria desarrollada, materia prima y un número suficiente de físicos y de químicos de primera y de segunda línea.

Las dificultades técnicas a vencer son enormes. Si se conocieran todos los «secretos» se reducirían, pero no mucho. La labor requeriría, en cualquier caso, muchos años.

Deseo expresar mi especial agradecimiento al doctor Guido Beck, quien me ha ayudado con sugerencias y críticas a componer este informe.