

se denomina "pura" para significar que su desarrollo no tiene en vista las aplicaciones sino, esencialmente, el mejor conocimiento de la naturaleza y sus fenómenos, del hombre y sus obras.

b) En consecuencia, la investigación en la universidad debe ser rigurosamente libre, guiada ante todo por la curiosidad espontánea de los investigadores. Los organismos nacionales podrán coordinar, sin subordinarlas, estas investigaciones con las investigaciones aplicadas efectuadas por las industrias y las dependencias del Estado, para las cuales es conveniente el plan previo.

c) La investigación en la universidad está íntimamente asociada a la enseñanza, por la participación de los estudiantes (sobre todo durante el año de tesis), por la obligación que tiene todo el personal docente de investigar, por la influencia que tienen sus resultados sobre los cursos, por la integración de los organismos de trabajos prácticos de las cátedras en los laboratorios de investigación, por el florecimiento de los seminarios. El mandarínismo ha de ser combatido aún más energicamente en la investigación que en las actividades docentes.

#### 9. COLEGIO DE ESTUDIOS SUPERIORES

Es un organismo vinculado a la universidad, que organiza un conjunto de

cursos y conferencias muy especializados, de nivel elevado, que los intelectuales más prestigiosos darán sobre sus trabajos o sobre cualquier tema de su elección. Los cursos podrán ser dictados por profesores o investigadores de la universidad o por sabios nacionales o extranjeros que no pertenezcan a la misma. Es un centro de estudios universitarios complementarios, de alta erudición, de presentación, comunicación y discusión de los más altos exponentes del pensamiento.

#### 10. ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN

a) Autonomía en todos los grados. Se establecerá una jerarquía de Consejos formados sobre base representativa por delegados elegidos por todos los miembros docentes de la universidad. Representación de estudiantes en todos los Consejos. Publicidad de las deliberaciones. Asambleas generales con regularidad.

b) Los decanos, rectores y demás dirigentes serán elegidos por 10 años por la totalidad del personal docente mediante voto secreto, y serán reelegibles.

c) Nombramiento de los profesores e investigadores por la universidad, previo concurso en todos los casos en que la competencia científica constituya el factor decisivo.

---

## La energía atómica como recurso militar <sup>(1)</sup>

Pocos días antes del primer ensayo de una bomba atómica, el Dr. H. D. Smyth concluyó la redacción del informe sobre los fundamentos históricos, científicos, técnicos y administrativos

(1) Este resumen del informe oficial, ha sido preparado por el Seminario de la Agrupación de Física, La Plata.

que sirvieron de base al magno proyecto, conocido en código como *Manhattan District*.

En unas ciento veinte páginas de lenguaje semi-técnico, escritas a pedido oficial, el Profesor Smyth presenta toda la información que el secreto militar permite. Después de autorizarse su divulga-

ción, en agosto de 1945, el trabajo ha sido publicado en forma de libro bajo el título *Atomic Energy for Military Purposes*, por la Universidad de Princeton, y reproducido luego en un número de *Reviews of Modern Physics*(<sup>2</sup>).

A continuación resumimos algunos aspectos destacados del informe, que se refieren a los trabajos realizados desde 1940, fecha en que comenzó la censura sobre las publicaciones científicas vinculadas de cerca o de lejos con la fisión nuclear. El estado de las investigaciones hasta ese año ya ha sido publicado en esta revista(<sup>3</sup>).

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cuando el impacto de un neutrón lento logra partir un núcleo de  $U^{235}$ , éste se fragmenta casi en mitades, liberando además de uno a tres neutrones y gran cantidad de energía; los neutrones emitidos en el proceso no son eficaces para provocar nuevas fisiones en otros núcleos vecinos debido a su gran velocidad.

El problema de obtener una reacción en cadena consiste pues, en disponer un conglomerado con átomos fisionables (celda) de  $U^{235}$  ó  $Pu^{239}$ (<sup>4</sup>) o ambos, interponiendo entre ellos frenadores de neutrones —hidrógeno, deuterio, litio, berilio, boro, carbono— y extremando el grado de pureza de los elementos fisionables para impedir pérdidas de neutrones por captura en núcleos extraños. Las pérdidas deben ser en número inferior al promedio de neutrones liberados en cada fisión, si el proceso ha de continuar. Esto depende de la determinación del tamaño correcto —crítico— que se dé al material fisionable.

Propuesta por Fermi y Szilard la idea de usar grafito como moderador de neutrones, y sobre la base de realizar una

bomba de entre 100 y 200 kg. de  $U^{235}$ , se planteó el problema de obtener la cantidad de materiales necesarios. Puede juzgarse su magnitud sabiendo que en 1940 se produjeron en Estados Unidos unos pocos gramos de uranio metálico, dentro del cual el  $U^{235}$  se halla en proporción 1 en 140.

Confirmada la fisión del uranio en enero de 1939, correspondió a un grupo de físicos extranjeros(<sup>5</sup>) dar los primeros pasos para interesar al gobierno en el estímulo de las investigaciones, con vista a posibles aplicaciones militares.

Al comenzar 1940 se iniciaron los intercambios de informaciones con los británicos, y en abril se tomó la decisión de forzar las investigaciones en vista de que noticias de Berlín daban cuenta de que una sección del Instituto Kaiser Guillermo había sido destinada a trabajos en uranio.

El plan organizativo general se tuvo a fines de 1941, cuando las comunicaciones con los británicos habían aumentado, y las dificultades administrativas habían disminuído.

#### Progreso hasta diciembre de 1941

Al comenzar el año se disponía ya de resultados teóricos y experimentales sobre la difusión de neutrones en grafito.

En julio se había concluído en Columbia la primera celda de grafito y óxido de uranio. Ésta y otras celdas fueron utilizadas en la determinación del factor de multiplicación  $k$ , relación entre el número de neutrones productores de fisiones y el número producido en las fisiones.

Fermi logró al concluir 1941 el valor 0.87 para  $k$ .

En la faz teórica, nuevas estimaciones del tamaño crítico permitían prever que alrededor del 10 % de la energía de fisión podía ser liberada en forma explosiva. Un kilogramo de  $U^{235}$  equivaldría pues, a 2 000 toneladas de TNT.

(<sup>5</sup>) L. Szilard, E. Wigner, E. Teller, V. F. Weisskopf, E. Fermi, y posteriormente, Niels Bohr.

(<sup>2</sup>) *Rev. Mod. Ph.*, 1945, 17, 351.

(<sup>3</sup>) MOSSIN KOTIN, C., *Ciencia e Investigación*, 1945, 1, 395.

(<sup>4</sup>) Plutonio de masa 239; elemento transuránico obtenido artificialmente por la reacción  $92U^{238} + n^1 \rightarrow 92U^{239} \rightarrow 93Np^{239} + {}_{-1}e^0$ ;  $93Np^{239} \rightarrow 94Pu^{239} + {}_{-1}e^0$ .

## *Progreso hasta diciembre de 1942*

Gracias a los esfuerzos del llamado *Laboratorio Metalúrgico* (Universidad de Chicago) y sus laboratorios asociados, en mayo de 1942 se dispuso de 15 toneladas de óxido negro de uranio, de gran pureza, con el que se llegó a obtener  $k = 0.98$ .

En septiembre se disponía ya de una tonelada diaria. El costo de producción se redujo en seis meses de 2 a 0.05 dólares por gramo de uranio puro.

En cuanto a los frenadores de neutrones, los esfuerzos se concentraron en la obtención de grafito, debido a la lentitud del progreso en la preparación de agua pesada y las dificultades insalvables que ofrecían los otros tipos de moderadores.

La confirmación de la posibilidad de lograr una reacción en cadena se tuvo, por fin, en julio de 1942, al alcanzarse el valor  $k = 1.007$  en una célula de uranio-grafito muy purificados. Poco después, el 2 de diciembre, se consiguió realizar la primera reacción en cadena.

El control de la velocidad de la reacción —fundamental para la ejecución de los ensayos— se hace posible gracias al hecho, ya conocido de tiempo atrás, de que una pequeña fracción de los neutrones liberados por la fisión presenta un retardo en el tiempo, lo que puede aprovecharse para hacer actuar controles. La modificación de la velocidad se cumple por medios mecánicos de manera relativamente simple.

### *El problema del plutonio*

La experiencia del 2 de diciembre tenía aún otro objetivo, de no menor importancia que la reacción en cadena: la obtención de plutonio.

Este elemento se obtuvo a mediados de 1940, con el ciclotrón de Berkeley, y a medida que se dispuso de cantidades apreciables se lo fué estudiando con tal intensidad, que en un año y medio su comportamiento químico era tan conocido como el de cualquier elemento usual.

Su obtención en grandes cantidades a partir del  $U^{238}$  dependía de las siguientes condiciones: preparación de una célula de uranio-grafito con reacción en cadena controlable, y disipación de la energía térmica generada. El plutonio producido iría quedando en la misma célula, y su separación se haría después por medios químicos.

Las plantas elaboradoras de plutonio, cuya construcción se inició de inmediato, consistieron pues en celdas de uranio-grafito, en las que era posible renovar de manera periódica el uranio a medida que se enriquecía en el elemento deseado. Esta renovación debía efectuarse por control remoto, debido a la enorme cantidad de radiaciones nocivas.

La forma constructiva de las celdas planteó difíciles problemas. Debían ser geométricamente simples, para facilitar los cálculos teóricos de rendimiento; debían permitir la remoción periódica del uranio, y dejar pasar grandes cantidades de agua de refrigeración sin que las tuberías afectaran sensiblemente la geometría, de la que depende muy críticamente el factor  $k$ .

En la planta más importante, de Hanford, se optó por hacer las celdas cilíndricas, colocando en su interior el uranio en forma de roscas o de tortas y haciendo pasar el agua en contacto casi inmediato con el uranio, protegido contra corrosiones o reacciones por una cubierta impermeable.

En esta planta, el agua de refrigeración se tomó del río Columbia, en cantidades equivalentes al consumo de una ciudad, y se la devolvía al mismo río después de asegurarse que había perdido toda su radioactividad inducida.

No solamente el agua, sino también el aire en la proximidad del uranio, presentaban radioactividad peligrosa. En consecuencia, las celdas estaban cubiertas con un blindaje estanco, a través del cual debían pasar sin embargo los controles mecánicos para la carga y descarga del uranio.

En una celda de uranio-grafito para la preparación de plutonio, la partición de núcleos de uranio produce neutrones rápidos, cuya velocidad modera el grafito; parte de estos neutrones choca con núcleos de  $U^{238}$ , y si su velocidad es la conveniente, quedan dentro de ellos, iniciando el proceso de reacciones nucleares que conduce a la formación del plutonio. Los neutrones más lentos son eficaces para producir fisiones en el  $U^{235}$ , con lo que se generan nuevos neutrones rápidos. El mantenimiento de la reacción en cadena depende del número de fisiones que se produzcan; a medida que disminuye la cantidad de  $U^{235}$ , y con ella el número de fisiones, va aumentando la cantidad de plutonio formado, el que a su vez fisiona en parte y contribuye a la continuidad del proceso. La duración de éste debe determinarse experimentalmente para hallar el tiempo óptimo, prolongado el cual comenzaría el empobrecimiento en plutonio.

Además del plutonio, aparecen dentro de los blocks de uranio no menos de una veintena de elementos distintos, producto de las fisiones. Cuando se retira el block de su celda para separar químicamente el plutonio, las concentraciones con que figuran los elementos no deseados son funciones del régimen de trabajo de la celda, y también del tiempo, puesto que muchos de ellos son inestables y se desintegran espontáneamente. El problema químico de separar el plutonio de tal diversidad de elementos y obtenerlo con un elevado grado de pureza, se hace así extraordinariamente complejo.

Entre varios métodos, en la planta de Hanford se empleó uno cuyo éxito sobrepasó todo lo esperado: incluía precipitaciones con *carriers*, soluciones, oxidaciones y reducciones.

Las plantas elaboradoras eran, por orden de importancia:

El laboratorio de Argonne, en las afueras de Chicago, que disponía de una celda de uranio-grafito y otra de uranio-

agua pesada. Con ellas se estudió la difusión y absorción de neutrones en diversos materiales. La de agua pesada estuvo concluida en mayo de 1944 y resultó de menor tamaño que la otra, pero de una eficiencia tal que fué menester colocarle elementos de control adicionales para prevenir sobrecalentamientos peligrosos.

La planta de Clinton, Tennessee, construida por Du Pont y el *Laboratorio Metalúrgico*, era una planta piloto equipada para el estudio experimental completo de todos los aspectos del problema. La celda, de uranio-grafito, era de forma cúbica y refrigerada por aire; sin embargo, poco después de ser puesta en marcha se le hicieron mejoras en la distribución del uranio y en la refrigeración que llevaron la potencia inicial de 500 kW hasta 1 800 kW. La planta de separación química del plutonio recibía diariamente  $\frac{1}{3}$  de tonelada de uranio más plutonio, y en pocos meses había producido ya algunos gramos de plutonio.

La planta de Hanford comenzó a construirse en abril de 1943 en un lugar semidesierto sobre el río Columbia, en el centro del Estado de Washington; sus celdas comenzaron a trabajar en septiembre de 1944, cuando la población del campamento de construcción alcanzaba a 60 000 habitantes. Disponía en total de tres celdas, distanciadas varias millas entre sí.

A pesar de la enorme cantidad de materiales radioactivos manipulados, las perturbaciones en la salud del personal fueron en conjunto muy escasas, debido a la intensa labor de control, prevención e investigación desarrollada por la División Sanitaria.

### *La separación de isótopos*

Independientemente del problema del plutonio, se trabajó también con gran intensidad en el perfeccionamiento de los métodos de separación de isótopos, con el fin de obtener  $U^{235}$  y deuterio, este último destinado a la preparación de agua pesada.

Se usaron entre otros métodos, el de difusión gaseosa y el de separación magnética en el caso del uranio. En el caso del deuterio, la destilación fraccionada del agua y la reacción de intercambio hidrógeno-agua.

En la separación por difusión gaseosa se aprovecha la propiedad de que la velocidad de difusión de un gas a través de una barrera porosa es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su peso molecular. En cada pasaje el gas se enriquece muy poco en el isótopo buscado, de modo que se requieren miles de etapas y el empleo de grandes masas de gas. Se calcula que el gas finalmente enriquecido tiene un volumen unas 100 000 veces menor que el gas original.

Las plantas de separación por difusión resultan enormes, y plantean serios problemas técnicos, que van desde la obtención del gas (hexa-fluoruro de uranio), la preparación de muchas hectáreas de barrera porosa, la instalación de grandes bombas para el manejo del gas a presión, hasta los graves problemas de vacío en las etapas en que se debe trabajar a presión reducida.

De todas maneras, el método no proveyó de  $U^{235}$  sino solamente de uranio enriquecido en él, que debió pasar como materia prima a la planta de separación magnética instalada en Clinton.

Esta planta, basada en las investigaciones de E. O. Lawrence y su grupo de colaboradores del *Radiation Laboratory* de la Universidad de California, estaba formada por equipos *calutrón* (*California University Cyclotron*), es decir, ciclotrones adaptados a funcionar como espectrógrafos de masa, con una fuente perfeccionada de iones y un sistema de enfoque magnético muy eficaz: el haz de iones entra con su eje normal a la ranura de ingreso; el campo magnético homogéneo deflecta los iones según círculos cuyos diámetros dependen solamente de la masa de los iones, de modo que iones iguales describen círculos de igual curvatura que se cortan en un punto situado en el plano de la ranura de entrada, a la distancia de un diámetro;

en ese punto se coloca la ranura de salida, por donde pasarán solamente los iones deseados.

El método de la destilación fraccionada del agua para obtener agua pesada se basa simplemente en la diferencia de  $1.4^{\circ}C.$  en los puntos de ebullición.

En cuanto al método de la relación de intercambio, interesante por tratarse de un método *químico* para separar *isótopos*, se apoya en el hecho de que, después del intercambio catalítico de átomos de hidrógeno entre hidrógeno gaseoso y agua, esta última contiene entre tres y cuatro veces más deuterio que el gas con el que se encuentra en equilibrio.

Durante la visita de la comisión británica, a fines de 1941, comenzaron los trabajos sistemáticos; hasta enero de 1945 no se obtuvieron resultados definitivos.

#### EL TRABAJO EN LA BOMBA ATÓMICA

Después de los trabajos previos, de cuya magnitud dan ejemplo los párrafos anteriores, queda a considerar la fase final del proyecto *Manhattan District*: El estudio, diseño, construcción y ensayo de una bomba "atómica".

En el verano de 1943 se estableció en Los Alamos, New Mexico, sobre una meseta a unos treinta kilómetros de Santa Fe, un nuevo laboratorio, al que un ciclotrón trasladado de Harvard, dos Van der Graaff de Wisconsin y un Cockroft-Walton de Illinois, más todos sus equipos auxiliares, lo transformaron en el laboratorio probablemente mejor dotado, en todo el mundo, para investigaciones nucleares.

El laboratorio funcionaba bajo la dirección de J. R. Oppenheimer, y lo integraban varias divisiones; entre ellas la de física teórica, dirigida por H. Bethe, la de física nuclear experimental, con R. R. Wilson, y la de *Advanced Development*, con E. Fermi. En conjunto, a fines de 1944, el laboratorio disponía de "una verdadera galaxia de astros científicos".

La construcción de la bomba en sí plantea diversos problemas. El más im-



portante es el de la determinación del tamaño que ha de dársele para asegurar la reacción en cadena; un trozo pequeño de material fisionable no explota porque las pérdidas de neutrones —que dependen de la *superficie*— no son compensadas por los neutrones que se van produciendo en las fisiones —que dependen del *volumen*—. No se puede pues experimentar en pequeño. Tampoco se pudo experimentar en grande, debido a la falta de suficiente material. El tamaño crítico debió ser calculado teóricamente, como en el caso de las células productoras de plutonio. Esta fué una de las más serias tareas de la División de Física Teórica.

A diferencia del de las células, el proceso debe ser ahora rápido. De ser lento, las primeras desintegraciones fragmentarían la bomba y el resto del material no explotaría. Para evitarlo se dispuso rodear el material fisionable de una capa de material reflector de neutrones, con el doble objeto de disminuir las pérdidas y proveer una cierta inercia que impida la disgregación prematura. No se trata de contener la explosión, sino de retardarla; no interesa en consecuencia su resistencia mecánica, sino su densidad. Afortunadamente, los materiales de alta densidad son también excelentes reflectores de neutrones y contribuyen a disminuir el tamaño crítico.

El cálculo del tamaño crítico se hizo primero suponiendo neutrones de igual velocidad, dispersos de manera isotropa, y con libre camino medio igual en el material fisionable y en el reflector. Después de muchas tentativas se fueron suprimiendo estas hipótesis simplificatorias, y tomando en cuenta diferencias en caminos medios, anisotropías en la dispersión y variaciones en la sección eficaz con la velocidad.

Uno de los subproductos importantes de los trabajos teóricos fué la obtención de una ecuación de estado para la materia en las condiciones de elevada temperatura y presión que se esperaban en la explosión.

Otro problema fué el de la disposición del material fisionable dentro de la bom-

ba. Darle directamente el tamaño crítico hubiera significado la explosión inmediata provocada por algún neutrón cósmico o la propia radioactividad del material. Por lo tanto, se fraccionó en trozos inefectivos de por sí, y que podían ser puestos rápidamente en contacto disparándolos unos sobre otros mediante recursos de artillería.

Por otra parte, la División de Física Experimental se ocupó de verificar en la medida de lo posible las conclusiones teóricas, de determinar secciones eficaces en fisiones de diversos isótopos, secciones eficaces en choques inelásticos, absorciones y número de neutrones liberados por fisión. Aquí, como en el resto de la actividad de Los Alamos, la información es muy sumaria e incompleta por razones políticas; se sabe, sin embargo, que han sido determinados los espectros de fisión del  $U^{235}$  y el  $Pu^{239}$ .

“Como resultado de las tareas de la organización *Manhattan District* en Washington y en Tennessee; de los grupos científicos en Berkeley, Chicago, Columbia, Los Alamos y otros lugares; de los grupos industriales en Clinton, Hanford y muchos otros puntos, el término de junio de 1945 nos encuentra esperando de un día a otro oír de la explosión de la primera bomba atómica dispuesta por el hombre. Se cree haber resuelto todos los problemas, por lo menos lo suficientemente bien como para hacer practicable una bomba”.

En efecto; la bomba así construída, que costó alrededor de 2 000 000 000 de dólares, fué ensayada por primera vez cerca del aeródromo de Alamogordo, a unos 200 km. al sudeste de Albuquerque, en el desierto de New Mexico. Explotó a las 5 horas 30 minutos del 16 de julio de 1945.

---

## Aclaración

A pedido de nuestra colaboradora, Dra. Cecilia Mossin Kotin, dejamos expresa constancia que es la Mesa de Redacción la que escoge del sumario de la contratapa los títulos que figurarán en la faja destinada a informar al público de los temas tratados en la revista.