



EL PROYECTO MANHATTAN *

I PARTE

Julio A. Vergara Aimone **



Introducción.

Aunque es interesante exponer las bondades de la energía nuclear, es necesario conocer otras facetas, entre otras, su génesis. Armas nucleares es sinónimo de controversia. Mientras muchos se incomodan, otros creen que han sido o son indispensables

para mantener la paz. El uso de la bomba en Japón también es controversial, lo que el lector comprobará al avanzar en el texto. Para entender este complejo tema, conviene alejarse de los extremos, abandonar estándares y percepciones actuales, y abstraerse de la guerra fría. Situémonos en el contexto de fines de los años 30:

- Existen serios efectos de la Crisis Económica de 1929.
- Alemania no tolera las condiciones del Tratado de Versalles, y la inestable situación política y social de la llamada República

de Weimar lleva al Poder al Partido Nazi liderado por Adolf Hitler en 1933, y abandona la Sociedad de Naciones y la Conferencia de Desarme.

- Japón ocupa Manchuria en 1932, instaura Manchukuo y explota sus recursos.
- Dos imperios nacionalistas se militarizan agresivamente y comienzan una expansión, sin oposición, creándose las condiciones para una nueva guerra.
- En lo científico se vive un crecimiento exponencial en descubrimientos de física nuclear.

Este artículo es una visión cronológica que describe el extraordinario desarrollo científico-tecnológico de las bombas nucleares usadas en Hiroshima y Nagasaki, en la II Guerra Mundial, con énfasis en el Proyecto Manhattan. Los aspectos militares, históricos y políticos se presentan superficialmente, para que el lector los correlacione con los aspectos científicos, y saque sus propias conclusiones.

La situación antes de 1939.

Aunque la radiactividad en la naturaleza fue descubierta en 1896 por Henry Becquerel, y estudiado por *Pierre y Marie Curie*, Rutherford, y otros, no fue hasta los años 30 en que los secretos del núcleo atómico comenzaron a conocerse.

* Basada en el Panel "6 de Agosto de 1945: Hiroshima", de la Asociación Chilena de Estudios Norteamericanos, del 28 de Septiembre de 1995.

** Capitán de Corbeta, Ingeniero Naval Mecánico y Licenciado en Ciencias Navales y Marítimas de la Escuela de Ingeniería Naval. M.B.A. de la Universidad Adolfo Ibáñez. M.Sc. en Naval Architecture y Marine Engineering, M.Sc. en Materials Engineering, M.Sc. en Nuclear Engineering, y Ph.D. en Nuclear Materials Engineering, del Massachusetts Institute of Technology.



Pierre y Marie Curie.

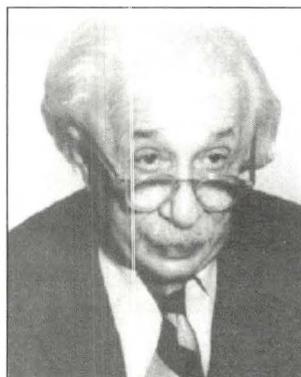
En 1930, los alemanes Bothe y Becker bombardearon núcleos de helio (partículas alfa), contra una placa de berilio, y obtenían partículas diferentes a los conocidos protones, las cargas positivas del núcleo. Le llamaron "radiación de berilio" y notaron que tenía notable capacidad para penetrar la materia. Frédéric Joliot e Irène Curie decidieron profundizar esto, usando una placa de berilio con otro elemento químico. Quisieron ver los efectos de la "radiación de berilio" en cera hidrogenada, encontrando que podían arrancar núcleos de hidrógeno de la cera. En 1930, E. Lawrence inventó el ciclotrón, un acelerador de partículas.

En 1932, James Chadwick demostró matemáticamente que este dilema se explicaba con una partícula neutra de masa igual o parecida a la del protón, que era el paso faltante para entender las propiedades del núcleo. En ese año, Harold Urey descubre un núcleo de hidrógeno que pesaba el doble (deuterio), y que posee propiedades diferentes. Por otro lado, Cockroft y Walton descubrieron que era posible transmutar especies químicas, convirtiéndolas en otras diferentes (ej.: convertir nitrógeno en oxígeno). En 1932, Carl Anderson, mientras estudiaba los rayos cósmicos, validaba una teoría de Paul Dirac, quien predijo la existencia

de un electrón de carga positiva (positrón). Luego, ya se conocía la masa y carga de los electrones, positrones, protones y neutrones, existían los aceleradores, y más partículas para bombardear y producir nuevas reacciones y elementos. Mientras, los descubrimientos se publicaban libremente, y muchos físicos se sumaban a verificar resultados, entre estos el notable físico italiano Enrico Fermi.

Con el ascenso de Hitler, se expulsa a Albert Einstein de la Academia Prusiana de Ciencias, se le quita su ciudadanía ale-

mana y sus bienes, y en 1933, llega a la Universidad de Princeton. Einstein ya era una celebridad desde los años 10, y gana el Premio Nobel de 1921. Otros científicos también abandonarían Alemania.



Albert Einstein.

En 1933, Joliot retiró accidentalmente una fuente de partículas alfa de un blanco y siguió marcando el contador Geiger, descubriendo la radiactividad¹ artificial. Luego, verifica que se puede inducir esta propiedad en materiales estables y determina las tasas a las cuales ésta se extingue.

Fermi fabrica blancos de 70 especies y prueba los efectos de bombardearlos con neutrones, descubriendo, en 4 meses, que 40 de estos se tornaban radiactivos. Sus colegas encontraron mayor radiactividad al poner el blanco sobre madera, lo que llevó a Fermi a sugerir poner la fuente en un bloque de cera, confirmando un aumento de actividad.

¹ Radiactividad es la cantidad de partículas (alfa o beta, que es un "electrón" de carga negativa o positiva) o radiación electromagnética (gama), que proceden del núcleo atómico, por unidad de tiempo, durante su proceso de estabilización. Estas se emiten a una tasa definida por una vida media, característica de cada especie radiactiva. Las partículas alfa y beta son menos penetrantes que los rayos gama y neutrones debido a su carga.

Ello se debía a los neutrones se frenaban (moderaban) al chocar con los núcleos del hidrógeno y que, una vez lentos, eran más eficientes para inducir la radiactividad artificial.

Se redescubre la energía nuclear.

En esos años, muchos creían que la energía nuclear de potencia era impráctica, exceptuando a Leo Szilard, un húngaro judío de 35 años, exalumno de Einstein, que huyó a Inglaterra en 1934. Szilard visualizó las posibilidades de la energía nuclear y bombas nucleares provocadas por reacciones en cadena geométrica en uranio, y presentó una visionaria patente. Por las consecuencias que previó, entregó la patente al Almirantazgo. Szilard admiraba a Herbert G. Wells, un novelista que en 1914 publicó una profética novela de ficción "The World Set Free", en que menciona motores y bombas atómicas, durante una guerra en 1956 entre Inglaterra, Francia y Estados Unidos, contra Alemania y Austria.

Hacia 1935, el nivel de investigación en Europa disminuyó, motivado por crecientes tensiones. Ese año, Joliot también sugería, pero sin mucha elaboración, una reacción en cadena como requisito para obtener energía nuclear de potencia.

Fermi también bombardeó uranio, pero encontró sorpresas. Formó diferentes especies, varias más pesadas que el uranio. Muchos científicos repitieron esta curiosidad, entre otros el físico Niels Bohr, cuyo aporte resultaría crucial, al asociar el comportamiento del núcleo al de una gota de agua.

En 1936, Hitler ocupa la zona desmilitarizada del Rin, y a fin de año Mussolini, que recién había invadido Etiopía, establece el eje Berlín-Roma. Paralelamente, se establece un pacto Alemania-Japón, que nunca fue efectivo ni cooperativo, por la distancia, desconfianza, diferentes principios y supuestos raciales. Japón inicia hostilidades contra China.

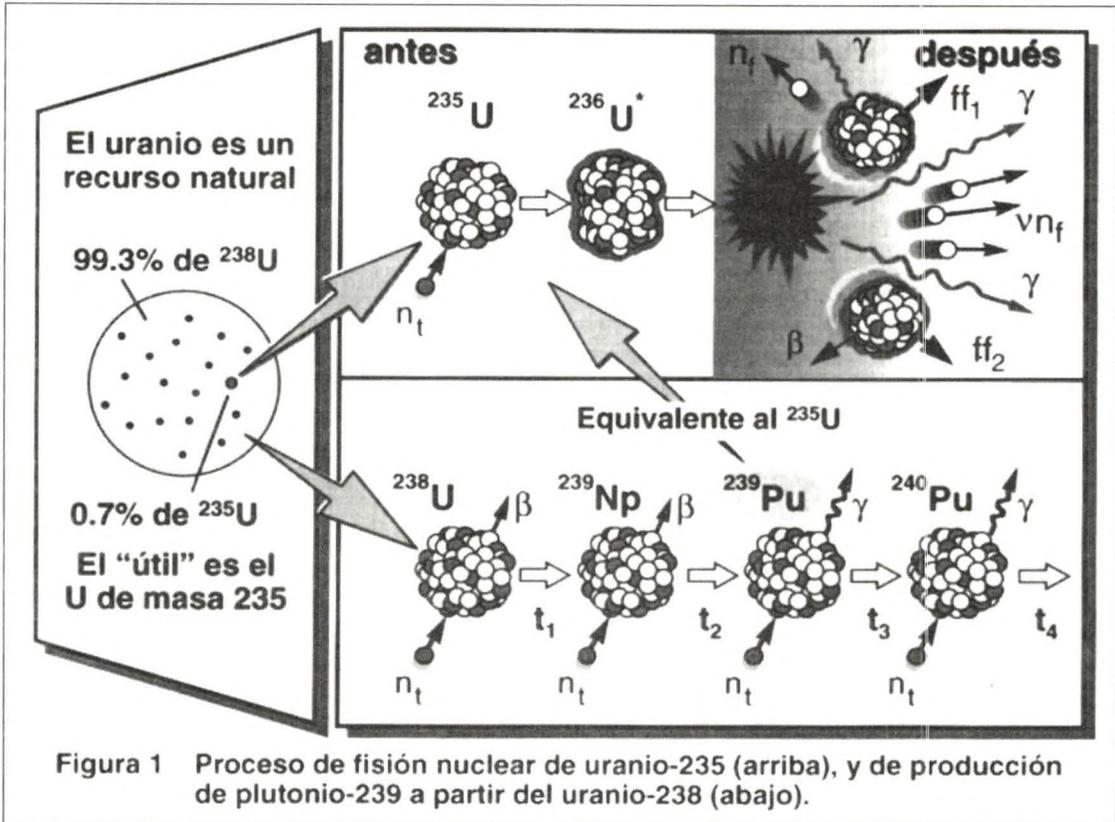
El químico alemán Otto Hahn no le creyó a Fermi y junto a Liese Meitner y Fritz Strassmann, decidieron en 1937 duplicar su experimento. Lo mismo hizo Irene Curie, quien encontró que uno de los productos se comportaba como lantano, una tierra rara de casi la mitad de la masa del uranio, pero estimó que se trataba de actinio, de masa similar al uranio. Joliot, más analítico, pudo haber inferido este dilema, pero estaba interesado en los aceleradores y en política. Hahn sospechó que I. Curie había errado, y encuentra actinio (no lantano), y radio, que se comportaba como bario, también de casi la mitad de la masa del uranio.

En marzo de 1938, L. Meitner perdió la protección austriaca al ser anexada a Alemania, y por ser judía, debió dejar a Hahn. Bohr no podía explicar como al bombardear uranio con neutrones podía convertirse en radio (que parecía bario). En ese año, Hahn trató de separar el bario de ese radio, sin éxito. Para despejar dudas, lo mezcló con radio genuino y logró la separación química, concluyendo que si era bario, y que el actinio de I. Curie podía ser lantano. Defraudado, Hahn presenta su resultado y transmite su desilusión a Meitner, por contradecir la experiencia previa en física nuclear.

Meitner no creyó que Hahn se hubiese equivocado, y lo discutió con Otto Fritsch, pues no se conservaba la energía. Aplicaron el modelo de la gota de agua para ver si ésta podía partirse en dos. Con cálculos rápidos, evaluaron que la energía resultante era enorme, de ~200 MeV.² Verificaron que la suma de masas resultaba menor que la del uranio original, y esta pequeña diferencia de masa, en la relación de Einstein, $E=mc^2$, confirmaba este valor.

En diciembre de 1938, Hahn y Strassmann habían descubierto la fisión del uranio, y Meitner y Fritsch habían explicado el fenómeno. Tanto Fermi como I. Curie estuvieron a un paso de hacerlo.

2 Millones de "eV" (electrón-volts).



La fisión de uranio se muestra en la parte superior de la figura 1. Un neutrón de baja velocidad se incorpora a un núcleo de uranio, lo desestabiliza, y éste se parte en dos fragmentos de masa similar con alta energía, liberando algunos neutrones a gran velocidad. A modo de comparación, una reacción química libera 3 a 4 eV por átomo, contra 200 MeV por cada fisión.

Situación científica en 1939.

El resultado de Hahn fue publicado en febrero de 1939, pero debido a que se filtró información y a que algunos trataron de sacar ventaja personal -había un premio Nobel en juego-, en enero, durante una conferencia de

física teórica en Estados Unidos, Bohr debió explicar lo ocurrido. Casi todos los investigadores presentes se fueron a replicar este crucial experimento.

A pocos días, ya se hablaba de superbombas, dado que, al liberar neutrones, se podía establecer una reacción en cadena, contrariando la fantasía que Szilard rechazó. La física nuclear dejaba de ser un tema de simple investigación, pues se generaría científicos con responsabilidades éticas y políticas. Bohr no creía que la reacción en cadena pudiese ser explosiva, pues pensaba que se requería el raro isótopo uranio-235 en vez del común uranio-238³ y era complejo separarlos.

3 El uranio-238 es químicamente idéntico al de masa 235 pero posee 3 neutrones más, y que lo hace comportarse en forma muy diferente.

Joliot se propuso demostrar una reacción en cadena para usos industriales. Lo primero era ver cuántos neutrones se producían. En marzo, Joliot confirma la emisión promedio de 2.6 neutrones por fisión (hoy se acepta 2.3), y un equipo ruso prueba lo mismo. En rigor, basta un solo neutrón para producir la siguiente fisión, pero no siempre se logra, pues hay absorciones en impurezas, o escapes.

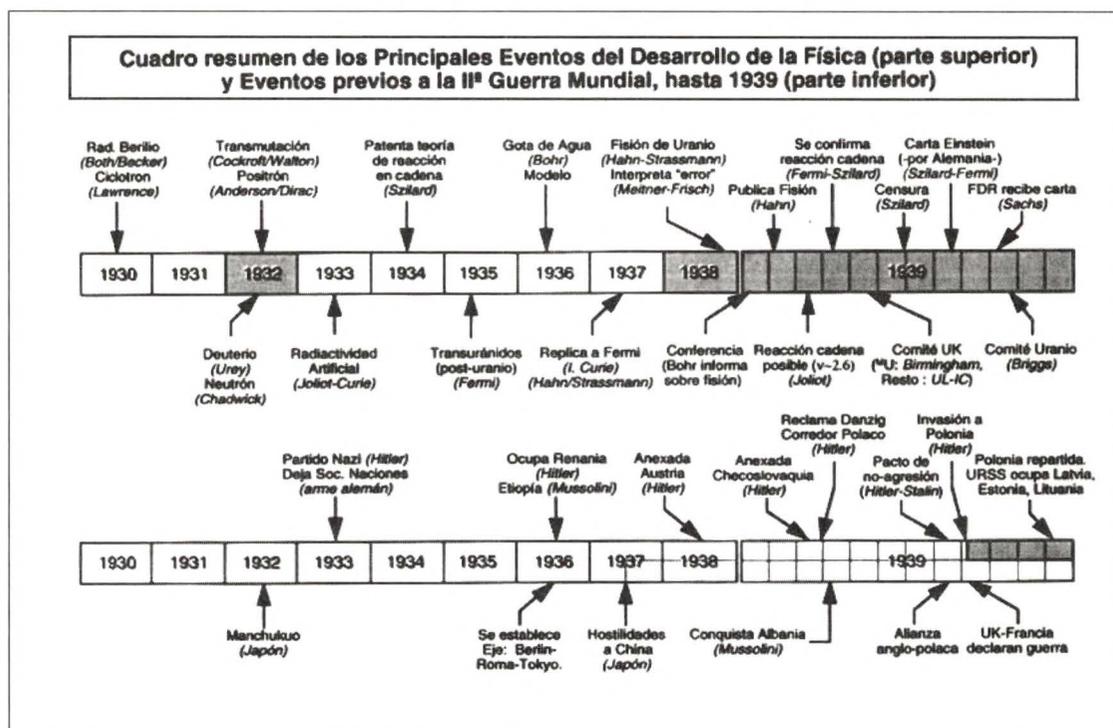
En marzo, Alemania anexa la parte de Checoslovaquia que no fue incluida en la anexión de Austria de 1938, y en abril Italia invade y anexa a Albania.

Fermi y Szilard, ya radicados en Estados Unidos, confirman la reacción en cadena en la Universidad de Columbia, pero retienen temporalmente el resultado. Szilard propuso una censura voluntaria, e incluso intenta rescatar la patente del Almirantazgo inglés, temeroso de una captura Nazi. Pero, Joliot no se suma a la censura, pues estimaba

que el conocimiento era una carrera individual, donde sólo algunos alcanzarían el éxito, que resultó ser la postura más aceptada por los científicos.

Otro húngaro, Eugene Wigner, sugiere a Fermi una reunión con la Armada y Ejército de Estados Unidos, pero como todo era prematuro, no se logra transmitir la preocupación. Varios científicos informan de la fisión y sus consecuencias a sus gobiernos, en el caso de Inglaterra, Alemania, y Francia. En todo caso, el primer efecto notado era una creciente urgencia global por el acopio de uranio.

En Inglaterra, se ordena establecer un grupo bajo el Comité Científico de Defensa Aérea. En mayo, se asignan dos áreas, la primera con los principales proyectos, a cargo de George P. Thomson, del Imperial College, y la producción de uranio metálico a cargo de Mark L. Oliphant, de la Universidad de Birmingham.



A mediados de año, Szilard, Fermi, Teller, Weisskopf y Wiegner, convencidos de que Alemania incursionaba en un plan nuclear⁴ y persuaden a Einstein para alertar al Presidente Roosevelt, mediante una carta que firma el 22 de agosto.⁵

Estalla la Segunda Guerra Mundial.

El 1 de septiembre 1939, y protegido por el Pacto de No Agresión germano-ruso del 23 de agosto, Alemania invade Polonia. Como consecuencia de las Alianzas anglo-polaca y franco-polaca, el 3 de septiembre, Inglaterra y Francia declaran la guerra, iniciándose la Segunda Guerra Mundial.

La carta de Einstein llega a Roosevelt recién el 11 de octubre. El emisario fue Alexander Sachs, un persuasivo asesor de Roosevelt. Este le relató la oportunidad que perdió Napoleón Bonaparte para conquistar Inglaterra por el canal de la Mancha, por no hacer caso a Fulton, quien propuso construir buques a vapor, pero Napoleón no creía en buques sin velas. Sachs le preguntó ¿Cómo hubiese cambiado el mundo si Napoleón hubiese acogido la idea de Fulton?

Roosevelt comprendió la idea y después, sesiona el recién formado Comité de Uranio, dirigido por Lyman Briggs, Director de la Oficina Nacional de Estándares. Sugieren líneas de acción en energía nuclear, en la bomba, en la compra de uranio, y asignan sólo 6.000 dólares a Szilard.⁶ En ese año se publicaron unos cien papers en física nuclear, y muchos artículos de prensa. Al estallar la guerra, muchos científicos aceptan la censura solicitada por Szilard, y los experimentos en Estados Unidos e Inglaterra siguieron en secreto.

A fines de 1939, Alemania comienza una guerra corsaria contra Inglaterra, y la Unión

Soviética ocupa Estonia, Latvia y Lituania, además de atacar Finlandia, a la que vence en algunos meses. Ambos se reparten Polonia.

En febrero de 1940, el Comité de Uranio expone dos problemas: la confirmación de que sólo el uranio-235 se fisionaba, y la designación del proyecto alemán al Instituto Kaizer Wilhelm. En junio, se forma el Comité de Investigación de la Defensa Nacional (NDRG), dirigido por Vannevar Bush, Presidente de Carnegie, principal asesor científico de Roosevelt. Al comité de uranio se le agregan otros proyectos, como reactores, física teórica, separación de uranio y agua pesada.

A mediados de 1940 se definen dos áreas: demostrar una reacción en cadena controlada para energía, y trabajar directamente en la reacción en cadena para la bomba. Esta última era de mayor atractivo,⁷ y simple para convencer a escépticos y autoridades, en plena guerra, y se asignan 40.000 dólares para estudios y 100.000 para construcción, había que demostrar la reacción en cadena en un reactor, que es un sistema donde se estabiliza la producción de neutrones por fisión (en un reactor moderno se extrae calor como subproducto de la refrigeración).

Se definieron dos requisitos para lograr la reacción en cadena controlada: a) tasa constante o levemente creciente de neutrones (nacen a la misma tasa que mueren), y b) tamaño y forma críticos de uranio. Si la tasa de creación de neutrones es decreciente, simplemente se extingue la reacción, que sucedía de tres maneras: que los neutrones fueran absorbidos en uranio sin fisión, que escaparan del reactor, o que fueran absorbidos en impurezas.

En marzo de 1940, hay complicaciones al confirmarse la tesis de Bohr y Wheeler,

4 Nueve científicos son obligados por el Gobierno a formar el proyecto alemán de uranio, a cargo de Werner Heisenberg.

5 Einstein expone la confirmación de la reacción en cadena hecha por Fermi y Szilard, que redactan la carta, sus consecuencias en una bomba, y la ocupación de minas de uranio, y pese a que anticipaba que sería muy grande para ser llevada por aire, solicita recursos para su desarrollo.

6 El dinero sólo llegó después de que Szilard amenazara con publicar una nota sobre reactores nucleares.

7 Se esperaba que si lograban el 1% de eficiencia en la fisión de uranio-235 se podía obtener un equivalente a 20 mil toneladas (20 kilotones) de TNT, con sólo 100 kilos.

que además el uranio-235 se fisiona con neutrones lentos. Esto se transforma en un dogma que produce retraso y una confusión que sólo se despejaría hacia 1941.

Dado que el uranio-238 "inhibe" la reacción en cadena, ésta mejoraría al frenarse (moderarse) los neutrones incidentes. Había que separar los isótopos de uranio, y no se conocía un método práctico. También se planteaba una posible fisión con elementos químicos más pesados, no descubiertos aún.

Para mejorar las probabilidades de fisión se multiplicaron las líneas de experimentación. Se debían probar moderadores (se decide por grafito extra puro pues era posible obtenerlo en la época), reducir la absorción vía purificación, y reducir la absorción sin fisión en uranio natural por enriquecimiento.⁸

En relación al tamaño crítico, se observa que el escape de neutrones era función de superficie (en una esfera, proporcional al cuadrado del radio) mientras que las fisiones eran volumétricas (proporcional al cubo del radio). Luego, si se logran controlar absorciones indeseadas, a mayor radio las fisiones predominan sobre el escape. En 1939, se había estimado un tamaño crítico para un reactor, equivalente a 40 toneladas de uranio, valor bien calculado, pero impráctico.⁹ Además, se descubrió que para cumplir los requisitos de tasa de generación de neutrones y de masa crítica, se debía intercalar combustible y moderador, para que los neutrones generados en una parte del combustible redujeran su energía al llegar a otra parte, aumentando el volumen y peso, y la masa crítica. En ningún caso ese dispositivo funcionaría como bomba, aunque hubiese habido un avión capaz.

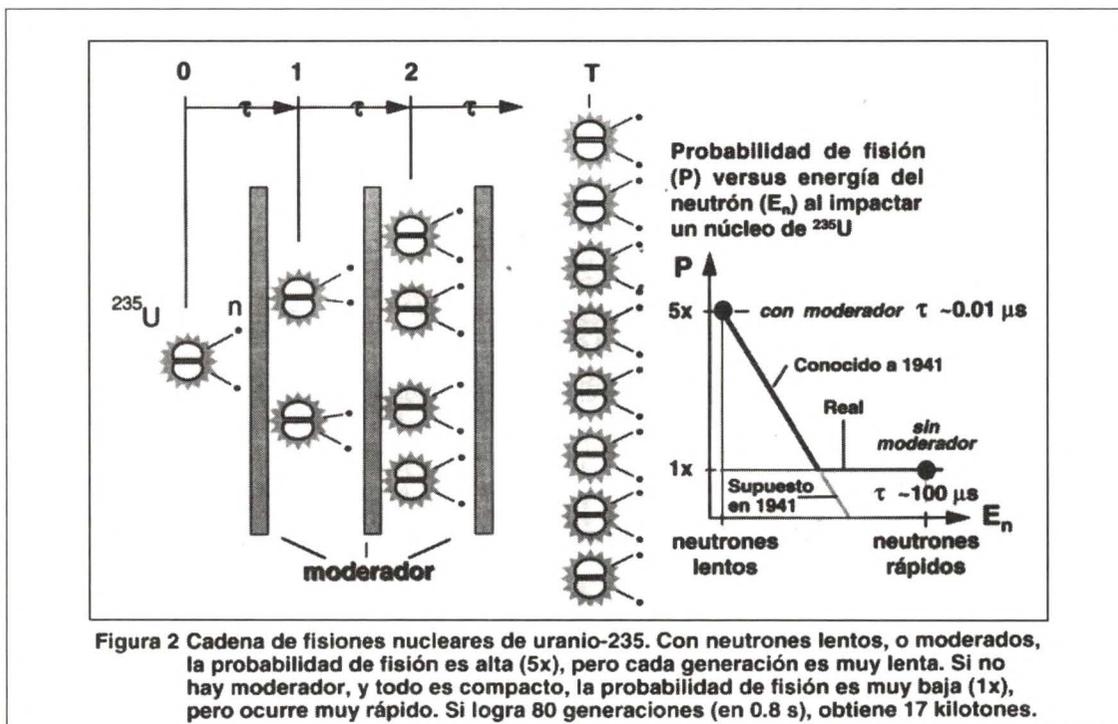


Figura 2 Cadena de fisiones nucleares de uranio-235. Con neutrones lentos, o moderados, la probabilidad de fisión es alta (5x), pero cada generación es muy lenta. Si no hay moderador, y todo es compacto, la probabilidad de fisión es muy baja (1x), pero ocurre muy rápido. Si logra 80 generaciones (en 0.8 s), obtiene 17 kilotones.

8 Esto es aumentar la fracción de uranio-235 por sobre el predominante uranio-238.

9 En esos tiempos, la carga máxima aérea era de unas 10 toneladas, y en tramos cortos.

La mayor parte de este trabajo inicial se hizo en la Universidad de Columbia. Al comienzo se creía más fácil separar el uranio-238 transmutándolo a un elemento más pesado por bombardeo con neutrones lentos en un reactor, y luego separarlo químicamente del uranio-235. En la U. de California, en Berkeley, Glenn Seaborg y Emilio Segre, usando el ciclotrón de Lawrence, logran detectar microgramos de un nuevo elemento que llamarían plutonio, obtenido del uranio-238. Este no es el plutonio-239 útil para la fisión, generado con neutrones, sino que plutonio-238, obtenido bombardeando uranio con núcleos de deuterio, pero que era apto para una caracterización química.

Cuando muchos descartaban la bomba para esta guerra, el Grupo de Birmingham revitalizó su desarrollo, con un Memorandum de los alemanes O. Frisch y Rudolf Peierls, dirigido a Oliphant. Frisch había trabajado con Hahn, y por ende no era plenamente confiable. Peierls se había nacionalizado inglés, después de una visita científica. Sostuvieron que el método prevaleciente de lograr la reacción en cadena, con uranio natural y neutrones lentos (para mayor eficiencia de fisión) no servía como bomba, porque antes de reaccionar completamente el uranio, se calentaría y deformaría, tornándose subcrítica y extinguiéndose la reacción. Paralelamente, visualizaban métodos para enriquecer uranio en respuesta a la tesis de Bohr-Wheeler, por lo que en principio podría lograrse uranio-235 casi puro. Aunque no se había experimentado la fisión de uranio-235 con neutrones rápidos, sostuvieron, con argumentos teóricos, y apoyados por Chadwick, que cualquier energía serviría, y no se requeriría moderar neutrones. La reacción sería tan rápida, que se lograría una fisión total antes de que la bomba se hubiese expandido, logrando una enorme energía. La figura 2 muestra el tiempo de cada generación de fisión, con y sin moderación.

El razonamiento para dimensionar la bomba fue simple. El tamaño debía ser tal que se balancearan los neutrones que escapaban con los que producían fisiones. Luego, el radio de la bomba debía equivaler al 80% del camino libre medio,¹⁰ con lo que se obtiene un diámetro de 4.2 cm, y una masa de 600 gm. Igualmente, en la U. de Birmingham calculan la energía liberada antes de expandirse, lo que es función de la masa. Sostienen que con 5 kg. de uranio puro, una esfera de 8 cm. de diámetro, se podría lograr una potencia equivalente a 10 kilotones de TNT, y enuncian el daño provocado por la bomba. Para prevenir una reacción espontánea, sugieren usar dos hemisferios subcríticos de uranio-235, que se unen rápidamente al momento de la reacción. Este modelo aproximado resultó iluminador, dadas las interrogantes y la falta de constantes físicas exactas.

Asimismo, y como el grupo inglés era muy pequeño, se concentran a enriquecer el uranio-235, y resuelven detalles de un método. Elaboran requisitos de protección radiológica, pues a esa fecha no se conocían los efectos de la radiación en seres humanos. El Memorandum P&F aún no era conocido en Estados Unidos, y ni siquiera habían sido planteadas las preguntas adecuadas.

En marzo de 1940, este Memorandum pasa al comité superior y a Thomson para su discusión, y se analizan las implicaciones del programa francés, que buscaba completar un reactor de agua pesada, y la inquietud de los alemanes sobre ese programa. Como debían seguir experimentando, crean el comité MAUD, a cargo de Thomson. En Estados Unidos, Urey inicia investigaciones para separar uranio.

En abril de 1940, Alemania ocupa puertos noruegos y Dinamarca, y en mayo inicia una operación relámpago pasando por Holanda y Bélgica. Esto culmina el 22 de junio, con la ocupación de dos tercios de Francia, y el resto se declara neutral, en Vichy.

¹⁰ La distancia media recorrida antes que el neutrón interactúe, la que es inversamente proporcional a la densidad del uranio y a la probabilidad de fisión.

Meses más tarde, la fuerza aérea alemana realiza un ataque masivo a Inglaterra, sin éxito, postergándose indefinidamente la invasión alemana. En noviembre, Italia invade Grecia, mientras Alemania incorpora a Hungría, Rumania y Eslovaquia. En abril, incorpora a Bulgaria, Yugoslavia y Grecia. Aprovechando esto, Japón obtiene de Vichy, derechos sobre el Tonkín (Norte de Indochina), para controlar el acceso a China, y por ello Estados Unidos impone sanciones a Japón. En junio de 1941, Alemania abandona el Pacto de No Agresión e invade Rusia, sin éxito, ya que subestiman el clima y la reacción soviética.

A mediados de 1941, se completan las investigaciones del comité MAUD, que resultan en cálculos detallados a partir del Memorandum Frisch-Peierls, en un proyecto secreto llamado "Aleaciones de Tubos". Se anticipa que una bomba estaría lista a fines de 1943, con una masa entre 8 a 42 kilogramos, siendo más probable 10 kilogramos, equivalente a una esfera de 10 cms., y estiman su costo. Consideraron un reflector para conservar neutrones y achicar la bomba, y evaluaron el tiempo de la explosión.¹¹ Se diseña el mecanismo de disparo de la bomba, cuidando en especial que no estalle prematuramente, para lo cual se reestudia el método Frisch y Peierls, que consiste en acercar dos hemisferios a una velocidad de 2000 m/s. Para permitir el escape del avión, se asume que es lanzada en paracaídas. Se describe otro método para enriquecer uranio, el estatus de los experimentos, el tamaño de la planta, seleccionan componentes, y estiman costos. En este caso, se evaluó el método de difusión gaseosa (que hoy enriquece el 93% de la demanda), y no el propuesto por Frisch y Peierls.

Finalmente, el informe MAUD resume las actividades francesas en un reactor moderado con agua pesada, y el interés que

ello había despertado en los alemanes, y se discute la necesidad de buscar la cooperación de Estados Unidos.

A mediados de 1941, Washington envía a ver el trabajo de los ingleses, y comprueba que tenían muy definido los requerimientos para lograr la bomba, y habían gastado sobre 200 mil dólares. En Estados Unidos estaban abocados a la reacción usando neutrones lentos, con sólo 300 mil dólares y 16 proyectos hasta 1941. Canadá también se incorpora con aportes en materias primas, tales como uranio concentrado y agua pesada.

Oliphant, molesto con la burocracia norteamericana, contactó a Briggs, Bush, James Conant, Presidente de Harvard, Lawrence, y finalmente, en septiembre, a Arthur Compton, Presidente de la U. de Chicago. Conant no estaba muy convencido, pero George Kistiakowsky, un profesor de Harvard, ruso experto en explosivos, le indicó que el concepto era factible. Conant desafió a Lawrence a participar en el desarrollo de la bomba, y éste contrata a Robert Oppenheimer, de la U. de California, como asesor en física teórica, quién tendría un papel protagónico.

En ese año, se sugiere que el plutonio podía ser usado, por sí solo, en una bomba, en vez de ser el método para extraer el uranio-238 del uranio-235. El plutonio-239, cuya formación se representa en la figura 1, se comporta análogamente al uranio-235. Algunas diferencias son: mayor probabilidad de fisionarse, más neutrones por fisión, y menor emisión de neutrones retardados.¹²

Nuevo impulso en Estados Unidos.

Desde octubre de 1941, dos años después de la reunión Sachs-Roosevelt, comienzan un período de reorganización en que se eleva la jerarquía del proyecto desde la NDRC a la Oficina de Investigación y

11 Dada la energía de los neutrones rápidos, cada fisión toma 1/100 ms, y considerando una progresión geométrica de 80 generaciones, un kg. de uranio-235 produciría una potencia equivalente a 17 tons. de TNT, en menos de un microsegundo.

12 Alrededor del 1% de los neutrones se emiten hasta casi un minuto después, desde los productos de fisión. Esto implica que hay más neutrones disponibles y por eso es más eficiente. Pero, el uso de plutonio en un reactor es complicado debido a que estos neutrones son necesarios para su control.

Desarrollo Científico (OSRD), presidida por Conant. Pronto se le crea una Oficina de Planificación para ver detalles técnicos, de obtención de materiales y de construcción de plantas, y se recomienda incorporar a un Ingeniero Militar. La reorganización es aprobada por un comité presidido por el Vicepresidente Henry Wallace, el Secretario de Defensa Stimson, Bush, el General Marshall y Conant, y se establecen tres divisiones, a cargo de un premio Nobel cada una: Urey, con dos métodos de enriquecimiento, Lawrence, con un tercer método de enriquecimiento y la producción piloto de plutonio, y Compton, en física teórica y verificación experimental de la reacción en cadena, física de reacciones supercríticas y exploración de producción de plutonio-239.

En septiembre de 1941, se creía que los alemanes producían toneladas de uranio metálico para su reactor. En octubre, se produce una desinteligencia, cuando Bohr y Heisenberg se reúnen en Dinamarca. Como estaban vigilados por los nazis, deciden hablar en clave. Heisenberg, quien tenía una idea acertada de cómo debía ser una bomba, le responde que ojalá ésta no se usara en esa guerra. Bohr interpreta ese mensaje como si estuviesen muy avanzados. A fines de noviembre, Bush le informa a Roosevelt, que según los ingleses la bomba era factible y recomienda un proyecto urgente. Mientras tanto, un centenar de ingleses viaja a Estados Unidos.

En diciembre de 1941, Japón bombardea Pearl Harbor y Estados Unidos entra en guerra. Hacia marzo de 1942, había ocupado Filipinas, Burma, y parte del sudeste asiático, incluyendo Singapur y otras islas. Estados Unidos e Inglaterra lograban acceder a ciertos códigos de comunicación.

A principios de 1942, habían grupos en diferentes universidades respondiendo a Conant, quien recomienda mantener un avance paralelo hasta mediados de año. En marzo, informan a Roosevelt que el proyecto podría concluir en 1944. En mayo, se informan avances en procesos (tres

métodos de enriquecimiento, un reactor y producción de agua pesada), todos con buenas posibilidades de éxito, y sostiene que deben ser realizados en conjunto, con 500 millones de dólares, pues si alguno era abandonado tempranamente, los alemanes podrían adelantarse.

En abril de 1942 se realiza una conferencia para discutir el trabajo de Seaborg en la química del plutonio, y en los métodos para producirlo, y para separarlo en la cantidad y pureza requerida para una bomba. Por la naturaleza química se infería que tendría un comportamiento similar al uranio, torio, y osmio.

Desde mediados de 1942, se consolida el grupo "Proyecto Metalúrgico" en la U. de Chicago, dirigido por Compton, con Fermi y Szilard, e incorpora al grupo de Princeton. Sus actividades más relevantes fueron definir métodos económicos y de suficiente escala para extraer, concentrar y purificar uranio como combustible para un reactor y para obtener grafito puro como moderador. Se diseña el reactor para demostrar la reacción en cadena, y se estudia cómo producir plutonio-239. Paralelamente, se desarrollan instrumentos, vainas, refrigerantes y absorbentes neutrónicos, y se estudian los efectos biológicos de las radiaciones.

A mediados de año, se refuerza el grupo de física, a cargo de Oppenheimer, y se estima la cantidad de energía requerida para producir el plutonio, calculando una potencia de 500 a 1500 megawatts para 1 kilogramo al día.

El 6 de junio de 1942, Japón cede la ofensiva en Midway, pierde tres portaaviones y comienza su retroceso. En Guadalcanal, es derrotado por fuerzas australianas y norteamericanas. Las fuerzas chinas y británicas hacen lo suyo en tierra.

El Proyecto Manhattan se oficializa.

En junio de 1942, el Jefe de Ingeniería Militar, General G. Marshall designa al Coronel J. Marshall para formar el Distrito Manhattan (MED) del Cuerpo de Ingenieros,

que materializaría la bomba, establecido el 13 de agosto. Por seguridad se le llamaría "Proyecto de Desarrollo de Materiales Substitutos" (DSM).

En agosto de 1942, Alemania intenta alcanzar Stalingrado. Durante seis meses las fuerzas se desgastan y son obligadas a retroceder. En noviembre, comienza la gran ofensiva en el norte de Africa, contra las fuerzas alemanas, y que son derrotadas en unos seis meses.

En septiembre, Stimson nombra al General Leslie R. Groves a cargo de todas las actividades militares relacionadas al Proyecto DSM. En un día, Groves soluciona el primer retraso, y resuelve comprar uranio. Seis días después se forma el Comité de Política Militar (MPC), presidido por Bush, para fijar las políticas, e inicia la reestructuración del proyecto, que costaría unos 100 millones de dólares.

En diciembre de 1942, el grupo de Fermi completa y opera exitosamente el primer reactor nuclear, el Chicago Pile-1 (CP-1), construido bajo el estadio de la U. de Chicago, con 37 toneladas de dióxido de uranio y 6 toneladas de uranio metálico, intercalado con 350 toneladas de grafito como moderador, en una estructura esférica de 76 niveles, de 3 metros de alto, y sin refrigeración. Los transientes se controlaron con una sola barra de cadmio, material con capacidad de absorber neutrones, si se introduce en el corazón del reactor. Este fue un buen diseño, ya que cálculos recientes, más exactos, demostraron una criticidad de 1.004 con la barra extraída (el ideal es algo más de 1). Este reactor operó a 0.5 Watts, y luego a 200 Watts, sin pasar de ese valor por falta de blindaje radiológico y refrigeración.

A esa potencia se requerirían muchos años, y blindaje para lograr el plutonio deseado. Luego, era necesario construir reactores para su producción masiva, los cuales se diseñaron casi en paralelo al CP-1. Se consideraron muchas formas de combustible y niveles de enriquecimiento, además de diferentes moderadores y refrigerantes. Hacia noviembre de 1942, se selecciona un sistema compuesto por uranio natural, grafito como moderador y helio como refrigerante, descartando refrigerantes metálicos, y agua pesada como moderador. A esa fecha aún existían problemas pendientes de: refrigeración, condiciones de operación, sistemas de recarga de uranio-238, blindaje radiológico, separación del plutonio, y materiales.

Un reactor es un dispositivo que puede operar establemente por mucho tiempo, pues "las únicas partes móviles son los neutrones", sin desafíos para el operador. Pero, el objetivo del proyecto Manhattan era lograr una reacción supercrítica y explosiva. Aunque poseen algunos componentes similares, son diferentes en su funcionamiento, en su geometría, y nivel de enriquecimiento. En el reactor se aprovechan los neutrones lentos, y en la bomba los rápidos. Un reactor clásico se apaga con neutrones rápidos, mientras que una bomba nuclear no funciona con neutrones lentos, y se desarma en vez de estallar. La explosión es una liberación violenta de energía en un volumen reducido. En una explosión nuclear, el sistema no debe expandirse hasta no completar al menos 80 generaciones de fisión, y la única manera de lograrlo es con gran densidad de neutrones rápidos.

☆☆☆