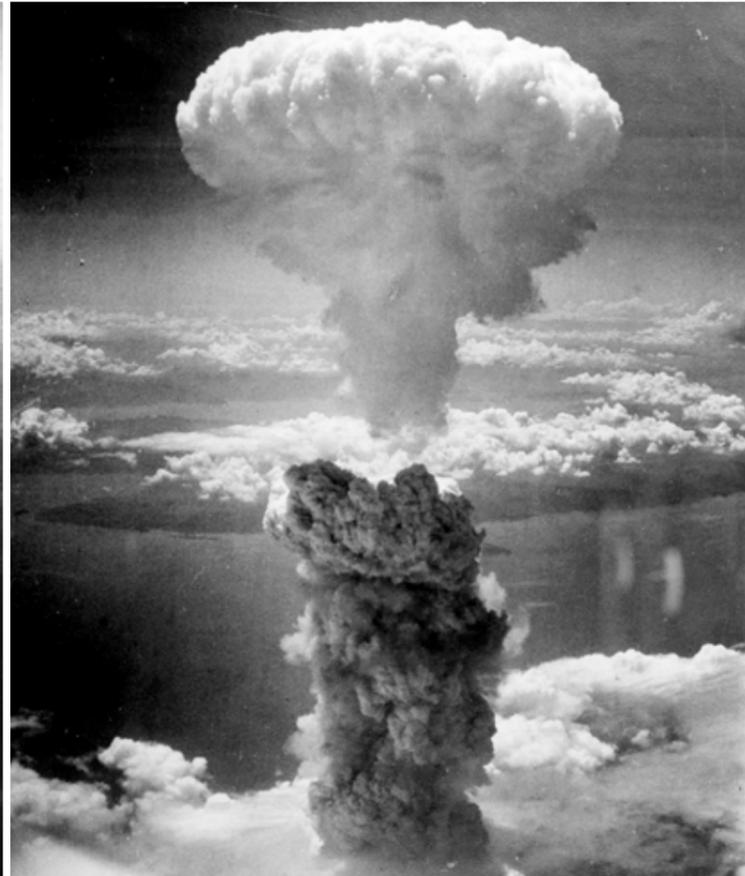
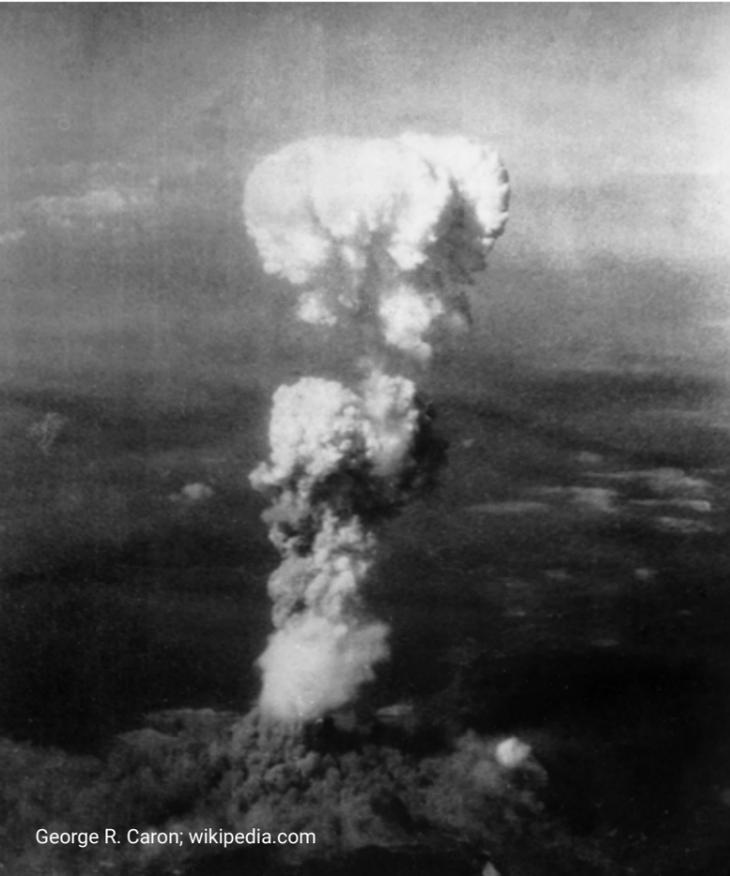


A photograph of a nuclear power plant featuring several large, white, hyperboloid cooling towers with red and white striped bands. The towers are set against a cloudy sky. In the foreground, there is a green field, and in the background, a power transmission substation with several high-voltage pylons is visible.

De lo invisible a lo previsible. El camino a la fisión nuclear

“La ciencia no es el resultado de un genio aislado. Es el resultado del trabajo de muchos hombres curiosos y tenaces que han dedicado su vida a preguntarse el porqué de las cosas y a buscar la respuesta.”

José Manuel Vicente



George R. Caron; wikipedia.com

El seis de agosto de 1945 explotaba, en guerra, la primera bomba de fisión nuclear. En el año 2020 se cumplió el 75 aniversario. La pandemia de Covid-19 impidió que se celebraran, como estaba previsto, diversos actos, conferencias, etc. Este artículo se corresponde con la conferencia que, prevista en 2020, se celebró en octubre de 2021 en Encuentros con la Ciencia. Su objetivo es recorrer los principales hitos científicos que llevaron al descubrimiento de la fisión y a la construcción de las primeras bombas atómicas. Antes de iniciar nuestro camino, dos reflexiones:

La primera es que la ciencia no es el resultado de un genio aislado, como se ve en algunas películas. Es el resultado del trabajo de muchos hombres curiosos y tenaces que han dedicado su vida a preguntarse el porqué de las cosas y a buscar la respuesta. Actualmente, en todas las disciplinas, varias personas o equipos trabajan en la misma dirección y alguno llega antes que otro a la misma conclusión.



Explosiones nucleares en Japón, Hiroshima y Nagasaki.

“Los padres del conocimiento científico occidental son los griegos. ¿cómo veían ellos la composición de la materia?”

La segunda es que nuestro conocimiento del mundo no parte de cero, cada generación se basa en lo que han investigado otros con anterioridad. Como dice el programa de radio, caminamos “A hombros de gigantes”. En este artículo voy a citar numerosos investigadores pero hay otros muchos que se quedan en la sombra, sin cuya labor no habría sido posible alcanzar una respuesta. La fisión se basa en el mundo atómico. Veamos en primer lugar la evolución de lo que se llegó a conocer hasta 1945.

El artículo está dividido en tres partes: Antigüedad clásica, del siglo XIX a 1938, de 1938 a la bomba atómica.

ANTIGÜEDAD CLÁSICA

Los padres del conocimiento científico occidental son los griegos. ¿cómo veían ellos la composición de la materia? Había diferentes escuelas. Las corrientes mayoritarias creían que había cuatro elementos que componían la materia: el agua, el aire, el fuego y la tierra.

Otras escuelas filosóficas consideraban que solo uno de ellos era el fundamental. Para Tales de Mileto era el agua, para Anaxímenes de Mileto el aire, el fuego para Heráclito de Éfeso y la tierra para Jenofonte de Colofón.

Pero estas teorías resultaban insuficientes para explicar los procesos que observaban en la naturaleza y sobre todo para explicar la vida, por lo que Aristóteles introdujo un nuevo elemento *el quinto elemento* (éter) que era algo intangible que insuflaba vida en la materia.

Una de las teorías sobre la estructura de la materia se la debemos a Demócrito, nacido en el año 460 antes de Cristo. Su teoría es la atómica, basada en el átomo. Átomo en griego significa indivisible. Su idea es que la materia está hecha de unidades discretas que no se pueden dividir ni fragmentar. Así, la materia que vemos estaría compuesta por estos átomos como si fueran ladrillos. Esta teoría no fue exclusiva de Grecia, aparece en otros lugares como la India con la corriente jainista. En aquellos años no existían los medios necesarios para poder experimentar y “ver” el interior de la materia, por lo que esta teoría estaba basada en razonamientos filosóficos y no empíricos.

DEL SIGLO XIX A 1938

Durante este periodo de tiempo los investigadores fueron dando pasos hacia el conocimiento de la materia, del átomo. Los avances ya no eran exclusivamente teorías sacadas de una profunda reflexión, lo habitual era la experimentación, y analizando los resultados intentar explicar por qué sucedían. Con un mismo resultado a veces se publicaban distintas teorías, coexistían hasta que con más experimentos y reflexión se aceptaba la que mejor explicaba los sucesos.

Vamos a ir viendo las teorías más aceptadas en cada momento, y los científicos que las formularon.

Átomo macizo

No fue hasta el siglo XIX cuando los científicos refinaron la idea, ya que en la pujante química se produjeron descubrimientos que podían explicarse utilizando el concepto de átomo. Veamos algunos de los protagonistas.

John Dalton (1766-1844). Naturalista, químico, matemático y meteorólogo británico. Es el padre de la teoría del *átomo macizo*, dentro de su teoría atómica y de la ley de las proporciones múltiples. Para él, el átomo es

indestructible e indivisible. En un elemento todos los átomos son idénticos, pero diferentes de los de otro elemento. Los átomos se combinan para formar compuestos químicos y no se destruyen (cambian) en el proceso químico.

La idea del átomo la obtuvo del estudio de las propiedades de la atmósfera y de otros gases. Comprobó que siempre se mezclaban en una proporción constante generando un nuevo compuesto. Supuso que la combinación se realiza siempre en la forma más sencilla posible, por lo que la combinación química se lleva a cabo entre partículas de diferentes pesos. De estos estudios obtuvo algunos pesos atómicos, siendo el primero en publicar una tabla. En ella aparecen seis elementos: hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), carbono (C), azufre (S) y fósforo (P). Atribuye al átomo de hidrógeno el peso de una unidad. Es la primera vez que a la idea atómica de Demócrito se le da soporte experimental.

La experimentación le llevó a formular, y confirmar, la ley de las proporciones múltiples (1805). En su obra "Un nuevo sistema de filosofía química" (1808) los compuestos fueron enumerados como binarios, ternarios, cuaternarios, etc, en función del número de átomos que el compuesto tenía en su forma más simple.

La tabla periódica

Dimitri Mendeléyev (1834-1907). Químico ruso. Creó el sistema periódico. Este es la clasificación de todos los elementos químicos, naturales o artificiales. A medida que se profundizaba en el estudio de la química, el número de elementos conocidos fue creciendo y surgió la necesidad de ordenarlos.

Mendeléyev publicó su tabla periódica en 1891, aunque la había terminado en 1869. Unos meses después, Meyer¹ publicó una tabla muy parecida pero algo más imperfecta.

“A medida que se profundizaba en el estudio de la química, el número de elementos conocidos fue creciendo y surgió la necesidad de ordenarlos.”

TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS

udt.cl

Mónico Sánchez mostrando su aparato de rayos X a un médico.



wikipedia.com

Mendeléyev ordenó los elementos según su masa atómica, colocando en una misma columna los que tuvieron algo en común. Los ordenó según sus propiedades, incluso alteró el orden de masas cuando era necesario y se atrevió a dejar huecos, postulando la existencia de elementos desconocidos en ese momento.

Los rayos X

Wilhelm Conrad Röntgen (1845- 1923). Ingeniero mecánico y físico, alemán. El 8 de noviembre de 1895, trabajando con un tubo de rayos catódicos, observó una radiación electromagnética desconocida, rayos X (desconocidos). En los años siguientes, Röntgen publicó diferentes estudios sobre ellos, y se empezó a confirmar que determinados compuestos podían emitir energía.

En 1901 se le concedió el primer Premio Nobel de Física. Röntgen donó la recompensa monetaria a su universidad. Por razones éticas rechazó registrar cualquier patente relacionada con su descubrimiento, de la misma forma que el matrimonio Curie haría años más tarde. Tampoco quiso que los rayos llevaran su nombre, y se quedaron con el que él les dio, rayos X.

La posibilidad de ver el interior del ser humano hizo que rápidamente se extendiera su uso, especialmente en todos los campos de la medicina. Incluso en el arte, entre las clases más pudientes se puso de moda hacerse radiografías de la mano, enmarcarlas y exponerlas como si fuera un cuadro. Al año del primer informe de Roentgen se habían escrito 49 libros y más de 1.200 artículos en revistas científicas sobre su uso y sus cualidades.

Mónico Sánchez

No me resisto a citar a este español de Piedrabuena (Ciudad Real, 1880-1961). Su vida es un ejemplo de constancia y genio². Inventor e ingeniero eléctrico español, pionero de la radiología, telecomunicaciones sin cables y electroterapia. Desarrolló un aparato portátil de rayos X y corrientes de alta frecuencia en 1909. En la Primera Guerra Mundial este equipo rivalizó con los diseñados por Marie Curie, siendo los suyos mucho más ligeros y transportables. El Ejército Español los compró como dotación de sus equipos sanitarios de campaña³.

De origen humilde, trabajando, y sin apenas saber leer y escribir, su sed de conocimientos le llevó a estudiar, en sus escasos ratos libres, física, ingeniería e inglés. Se trasladó primero a Madrid y posteriormente a los

REFERENCIAS

1. Julius Lothar Meyer (1830-1895), químico alemán, publicó su trabajo en 1870.
2. Se puede descargar, de forma gratuita, un archivo artístico de su invento que contiene una minibiografía, en la siguiente dirección: <http://www.muncyt.es/stfls/MUNCYT/Publicaciones/off%20on%20muncyt.pdf>
3. En el museo de la Academia General Militar se puede ver uno de ellos. Cuando le dieron el premio.



Estados Unidos, trabajó en diversas empresas. A su vuelta a España en su pueblo natal montó una fábrica para desarrollar sus inventos, y una central hidroeléctrica para proporcionar energía a su empresa y al pueblo. El gobierno de la segunda república le incautó todo y la posterior guerra civil terminó de destrozar su obra.

Radiactividad natural

Antoine Henri Becquerel (1852-1908). Físico francés. En 1896 descubrió una nueva propiedad de la materia, la radiactividad natural. Investigando sobre la fluorescencia, colocó sales de uranio sobre una placa fotográfica en una zona oscura y comprobó que dicha placa se ennegrecía. Las sales de uranio emitían una radiación capaz de atravesar el material opaco a la luz ordinaria. La energía que desprendían las sales de uranio no se relacionaba con la fluorescencia, sino que procedía del interior. Sus investigaciones y descubrimientos sirvieron de base a los primeros modelos atómicos.

En 1900 halló que la radiación beta (β) está integrada por electrones. En 1901 que el radio se podía utilizar para destruir tumores, origen de la radioterapia. En 1903,

compartió con el matrimonio Curie el premio Nobel de Física. También realizó investigaciones sobre la fosforescencia, la espectroscopia y la absorción de la luz.

Pudín de pasas

Joseph John Thomson (1856-1940). Físico y matemático británico. Descubrió el electrón, los isótopos e inventor del espectrómetro de masa. En 1906 fue galardonado con el Premio Nobel de Física.

En su tercer experimento (1897), Thomson determinó la relación entre la carga y la masa de los rayos catódicos, al medir cuánto se desvían por un campo magnético y la cantidad de energía que llevan. Encontró que la relación carga/masa era más de un millar de veces superior a la del ion hidrógeno. Sus conclusiones fueron que los rayos catódicos estaban formados por "corpúsculos" que procedían de dentro de los átomos, de lo que dedujo que los átomos eran divisibles. Imaginó que el átomo se compone de estos corpúsculos en un mar lleno de cargas positivas, modelo de pudín de pasas. En base a este modelo, que no tenía explicación científica, se desarrollaron otras teorías en las que los átomos tenían partes diferenciadas.

Para el descubrimiento de los isótopos empleó rayos positivos para separar átomos de diferente masa, y encontró que el neón tiene dos isótopos (Ne^{20} y Ne^{22}).

Isótopo

Los isótopos de un elemento tienen las mismas propiedades químicas, pero difieren algo en sus propiedades físicas. Esta pequeña diferencia deriva de su distinta masa atómica, tienen el mismo número de protones pero distinto de neutrones.

Representamos a los elementos con la abreviatura de su nombre, así el uranio es U. Y los caracterizamos con dos números: Z, el número atómico, la cantidad de protones; y A, número másico, la masa, suma de protones y neutrones. En el caso del uranio, $Z=92$.

Para designar a un isótopo concreto lo representamos con su símbolo y el número másico. El uranio tiene tres isótopos que se encuentran en la naturaleza con el siguiente porcentaje: U^{234} con 0,0054%, U^{235} con 0,7204% y U^{238} con 99,2742%. Este último es un elemento estable (no se desintegra).

Pierre y Marie Curie

Pierre Curie (1859-1906), físico francés. María Skłodowska, posteriormente Curie, (1867-1934), física y química, polaca nacionalizada francesa.

El descubrimiento de la radiactividad dio un paso de gigante con este matrimonio. Sin su dedicación y sacrificio, el descubrimiento de la estructura y funcionamiento del átomo hubiera sido más difícil.

Pierre, en 1880, descubrió la piezoelectricidad. Enunció en 1894 el principio universal de simetría, realizó avances en magnetismo y desarrolló una balanza de torsión adecuada a este campo. En 1895 se casó con Marie Curie. Para preparar el doctorado de ella comenzaron a trabajar en la naturaleza de las radiaciones de las sales de uranio. Se basaron en el hallazgo de los rayos X (Roentgen) y en los trabajos de Becquerel sobre el uranio. Fruto de su trabajo fue el hallazgo de dos nuevos elementos radiactivos, en 1898, el radio (de donde procede el nombre de radiactividad) y el polonio, en honor a su país de origen.

Marie Curie recibió dos premios Nobel. El premio Nobel de Física en 1903, junto a su marido y Henri Becquerel,

“Pierre y Marie Curie. Sin su dedicación y sacrificio, el descubrimiento de la estructura y funcionamiento del átomo hubiera sido más difícil.”



el importe del premio fue a medias entre Becquerel y el matrimonio. Fallecido Pierre en 1905, Marie continuó con sus trabajos y en 1911 recibió el Nobel de Química.

En lo personal fue una mujer honesta y moderada. Pasó penurias y, sin embargo, los premios en metálico los utilizó para ayudar a su familia, amigos, estudiantes y organizaciones científicas. Triunfó en Francia a pesar de ser de origen extranjero y mujer, en un momento en que todavía estaba mal vista su presencia pública.

Radiactividad

Hemos citado la radiactividad, pero ¿qué es? Es la emisión espontánea, por parte de núcleos inestables, de partículas o de radiación electromagnética, o de ambas. La radiactividad puede ser: Natural, los isótopos radiactivos que se encuentran en la naturaleza, o artificial, isótopos radioactivos obtenidos por el hombre. Los isótopos estables no se descomponen y los isótopos radioactivos (o radioisótopos) se descomponen espontáneamente.

Ernest Rutherford

Nació en Nueva Zelanda, entonces Gran Bretaña, y falleció en Cambridge (1871-1937), físico. Uno de los científicos más destacados. Estudió las partículas radiactivas y logró clasificarlas en alfa (α), beta (β) y gamma (γ). Verificó que la radiactividad iba acom-

pañada por una desintegración de los elementos, por lo que recibió el Premio Nobel de Química⁴ en 1908. Probó la existencia del núcleo atómico, que contiene la carga positiva y casi toda la masa. Consiguió la primera transmutación artificial con la colaboración de su discípulo Frederick Soddy.

Durante la primera parte de su vida se consagró por completo a la investigación, pasó la segunda mitad dedicado a la docencia y dirigiendo los Laboratorios Cavendish de Cambridge. Trabajó en las ondas hertzianas, en el efecto de los rayos X sobre un gas, en las radiaciones uránicas, deduciendo que el uranio emitía dos radiaciones distintas porque tenían distinto poder de penetración.

Con Soddy, en 1902, llega a la conclusión que el torio (Th) emite átomos radiactivos, esta emisión está acompañada de la desintegración de los elementos. Hasta ese momento se consideraba que la materia era indestructible.

Experimento de Rutherford, partículas alfa, beta y gamma.
Elaboración propia.

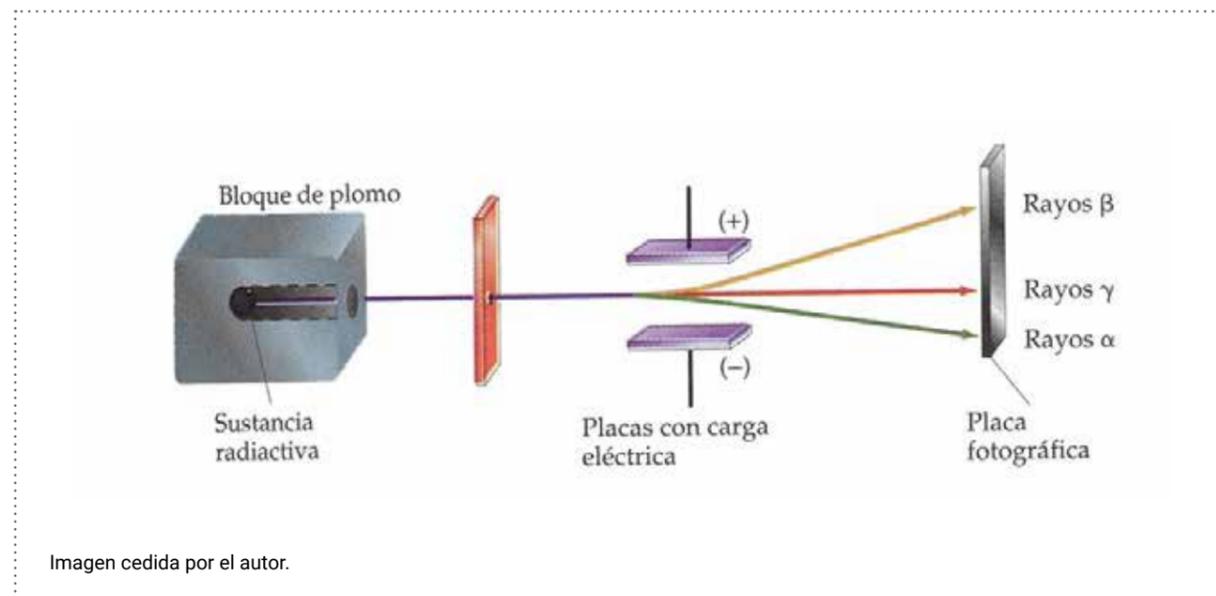


Imagen cedida por el autor.

En 1919 se hace cargo de la dirección del Laboratorio Cavendish, en él se descubre la existencia del neutrón y de los isótopos de hidrógeno y de helio (He). Bajo su dirección están James Chadwick (descubridor del neutrón), Niels Bohr (demuestra que el modelo de Rutherford es estable) y Robert Oppenheimer (uno de los padres de la bomba atómica). Otro estudiante destacado fue Henry Moseley (demostró que en los átomos el número de electrones y de protones es el mismo).

Comprensión del átomo, mecánica cuántica

Niels Bohr (1885-1962). Físico danés. Contribuyó a la comprensión del átomo y la mecánica cuántica. Premio Nobel de Física en 1922 por sus trabajos sobre la estructura del átomo.

Tras doctorarse en Física fue discípulo de Rutherford, con el que mantuvo una gran relación científica. Con él, en 1913, introdujo la teoría de las órbitas cuantificadas (el número de electrones es creciente en cada órbita hacia el exterior). En 1933 desarrolla la hipótesis de la gota líquida, que permite explicar las desintegraciones nucleares y la gran capacidad de fisión del U^{235} .

En 1943, Segunda Guerra Mundial, huye a Suecia y después a Londres escapando de la policía alemana. Con el temor de que la bomba alemana era inminente, se une al proyecto Manhattan. Después de Hiroshima fue defensor de los usos pacíficos de la energía nuclear.

“Niels Bohr, tras doctorarse en Física, fue discípulo de Rutherford, con el que mantuvo una gran relación científica. Con él, en 1913, introdujo la teoría de las órbitas cuantificadas.”

En 1932, Cockcroft y Walton descubren la transmutación nuclear, Anderson el positrón y Urey el hidrógeno pesado (deuterio).

En 1934, Joliot y Curie descubren la radiactividad artificial. En 1935, Fermi introduce la idea de moderador como desacelerador de neutrones, además indujo radiactividad en 22 elementos diferentes mediante el bombardeo con neutrones.

DE 1938 A LA BOMBA ATÓMICA

En aquellos momentos ya se tenían herramientas experimentales y matemáticas para conocer lo que sucedía en el mundo atómico. Pero nadie se esperaba que los descubrimientos terminarían en el empleo del átomo para la construcción de una bomba.

La fisión

En el descubrimiento de la fisión tenemos varios protagonistas que se relacionan como en un drama clásico. Lise Meitner (1878-1968), física austriaca. Otto Hahn (1879-1968), químico alemán, Premio Nobel de Química en 1938. Fritz Strassmann (1902-1980), químico alemán. Otto R Frisch (1904-1979), físico, austriaco nacionalizado británico.

Los inicios: En 1907 Lise Meitner llega a Berlín y, por medio de Max Planck, entra a trabajar con Otto Hahn.

4. Nobel de Química. Se enfadó mucho, era físico. Se le atribuye la frase “toda la ciencia o es física o es filatelia”.

INSTITUT INTERNATIONAL DE PHYSIQUE SOLVAY
SEPTIÈME CONSEIL DE PHYSIQUE -- BRUXELLES. 22-29 OCTOBRE 1933



Photo Benjamin Couperie

H. A. ARANES	N. P. BOYD	G. GARDNER	P. BLACKETT	M. COHEN	Aug. PICARD	Dr. Anne Lavin, Brussels			
E. HERBIET	F. JOLIOT W. HEISENBERG	E. STANGL	P. A. M. DIRAC	J. ERERA	C. D. ELLIS	E. G. LAWRENCE			
F. PERRIN	E. FERMI	E. T. A. WALTON	P. DEBYE	B. CARRERA	M. ROTHE	Ed. BAUER	J. E. VERHOEFFELT	J. S. COCKROFT	L. ROSENFELD
E. SCHROEDINGER	M. J. JOLIOT	H. BOHR	A. JOFFE	M. CURIE	G. W. RICHARDSON	Lord RUTHERFORD	M. de BROGLIE	M. L. MEITNER	J. CHADWICK
				P. LAUREN	Th. DE DONDER	L. de BRUIJLE			

Arrang. : A. KRISTEN et Ch. GUY. BUTE

archives.gov

Juntos se dedicaron durante tres décadas a desvelar los secretos del mundo atómico. Juntos descubrieron el protactinio en 1918.

El nudo: Entre 1935 y 1938, Hahn, Strassmann y Meitner identificaron, al menos, 10 productos radiactivos resultantes del bombardeo del uranio. Pero con la llegada de Hitler al poder en Alemania se prohibió a los judíos trabajar en la universidad y en la investigación. Meitner se salvó por ser austriaca. Pero en 1938 Alemania anexionó Austria y Lise tuvo que escapar, en un peligroso viaje, a Dinamarca y después a Suecia.

En esos momentos estaban bombardeando uranio con neutrones y los resultados eran extraños. Otto y Lise mantuvieron correspondencia y siguieron juntos en el experimento. Hahn y Strassmann reproducen el experimento y descubren que hay un elemento que se

comporta como radio, pero que es bario (Ba). Piensan que se han equivocado, y en sucesivos experimentos obtienen el mismo resultado. Hahn le envía sus notas a Meitner, que está en Suecia, para que le dé su parecer. Al mismo tiempo, Hahn envió a publicar los resultados el 22 de diciembre del 1938, sin mencionar a Meitner⁵ e indicando que en la reacción aparece bario, pero sin explicar porqué.

En las navidades de 1938, Meitner con su sobrino, Otto R Frisch, analizan las notas del experimento y deducen (matemáticamente) que los núcleos de uranio se han partido en dos, con una gran liberación de energía⁶. Acuñan el término fisión para describirlo. Publican un artículo en Nature, donde explican los resultados del experimento y la posibilidad de la reacción en cadena o reacción autosostenida. La carrera por la bomba atómica está preparada.

“En las navidades de 1938, Meitner con su sobrino, Otto R Frisch, analizan las notas del experimento y deducen (matemáticamente) que los núcleos de uranio se han partido en dos, con una gran liberación de energía.”

◀
Fotografía de Solvay. Solo tres mujeres participaron en el Congreso Solvay (Bruselas, 1933): Meitner, Marie Curie y su hija Irène Joliot-Curie. De Benjamin Couprie.

El drama: Otto Hahn recibe el premio Nobel, y no cita el papel de Lise Meitner afirmando que solo ha sido su ayudante. La relación quedó rota para siempre.

¿Qué es la reacción en cadena?

Consiste en que una vez provocada la primera fisión esta se mantenga en el tiempo hasta consumir el uranio fisionable. Para que se produzca es necesario:

- Que el número de neutrones que se produce en la fisión sea superior a dos. En los experimentos de 1939, publicados en Nature y en la Physical Review, explican que la producción de neutrones oscilaba entre más de 2 y 3,5. Hay que tener en cuenta que algunos neutrones escapan del sistema y otros no provocan una nueva fisión.
- La existencia de un elemento moderador para que

5. “Lise Meitner y la energía del uranio”. Javier Castelo Torras.
6. La fisión de un gramo de uranio equivale a 24.000 kWh. “La bomba atómica”. Natividad Carpintero. Página 18.

- los neutrones sean lentos (imprescindible para que se produzca la fisión).
- Una masa crítica de uranio para que se mantenga la reacción. Si la masa es subcrítica la reacción se agota. A su vez la masa crítica depende de:
 - a) La disposición geométrica del uranio, tanto en distancia (para que no se pierdan neutrones) como en forma. Para un reactor (central nuclear) su distribución es en forma de red. Para una bomba (explosión nuclear) su forma es una esfera.
 - b) De la pureza del uranio. A mayor pureza mejor rendimiento. Para alcanzarla lo que se hace es enriquecer el mineral que se encuentra en la naturaleza. Para una bomba atómica es necesario que supere el 90%.
 - c) Material deflector de neutrones para que la masa sea menor.
 - d) Densidad. La masa crítica es inversamente proporcional al cuadrado de la densidad. Como ejemplo, si se incrementa la densidad un 1% la masa crítica se reduce en un 2%.

Alemania y la física

Alemania a principios del siglo 20 hasta 1930 fue una de las principales potencias en la investigación en física. Científicos como Albert Einstein, Hans Geiger, Heisenberg, etc., estaban en la cabeza de la física mundial. Pero el ambiente social pronto cambiará. En enero de 1933 Adolf Hitler llega al poder, en marzo promulga la primera ley antisemita. Esta ley provoca que los científicos que tenían origen judío sean apartados de las universidades y centros de investigación. Comienza el éxodo hacia países más amigables, principalmente Gran Bretaña y Estados Unidos. En 1935 se aprueban

las leyes de Núremberg, que hace a los judíos, y sus descendientes, ciudadanos sin derechos. El éxodo de los científicos hace que Alemania⁷ pierda la hegemonía científica en favor de Estados Unidos.

Algunos de los científicos expulsados de Alemania, y que trabajaron en el proyecto Manhattan, son:

- Albert Einstein. Judío alemán, físico. Padre de la teoría de la relatividad. Premio Nobel de Física, en 1921, por sus contribuciones a la física teórica. Firmó la carta de petición de desarrollo de la bomba atómica, después de su uso se opuso a las armas nucleares.
- Leo Szilard. Judío húngaro, físico. Es el autor de la carta firmada por Albert Einstein y dirigida al presidente de los Estados Unidos (Roosevelt), en agosto de 1939, que llevó a la bomba atómica.
- Edward Teller. Judío húngaro, físico. Trabajó en el desarrollo de la bomba de hidrógeno. Su figura pública fue controvertida a causa de la dureza de sus opiniones.
- John von Neumann. Judío húngaro, matemático. Trabajó en física cuántica, teoría de juegos, ciencias de la computación, hidrodinámica, estadística, etc. Junto con los tres anteriores formó la trama húngara, los más firmes defensores del desarrollo de la bomba atómica.
- Eugene Paul Wigner. Judío húngaro, matemático. Premio Nobel en 1963. Contribuyó al diseño de los reactores de plutonio.
- Felix Bloch. Judío suizo, físico. Premio Nobel de Física en 1952.
- Hans Albrecht Bethe. Judío alemán, físico. Premio Nobel de Física en 1967. Trabajó en el cálculo de la masa crítica del U^{235} .
- Emilio Gino Segrè. Judío italiano, físico. Premio Nobel de Física en 1959. Grupo de Roma. Fotógrafo, realizó fotos para documentar eventos y personas de la historia de la ciencia moderna.
- Enrico Fermi. Italiano, católico, pero su esposa era judía, físico. Premio Nobel en 1938 por sus trabajos en radiactividad inducida. Desarrolló el primer reactor nuclear y es uno de los científicos más completos y destacados del siglo XX.

Desarrollo de la bomba atómica

En este apartado vamos a ver las investigaciones de Alemania, Gran Bretaña y de los Estados Unidos (proyecto Manhattan) para desarrollar la bomba atómica.

Alemania

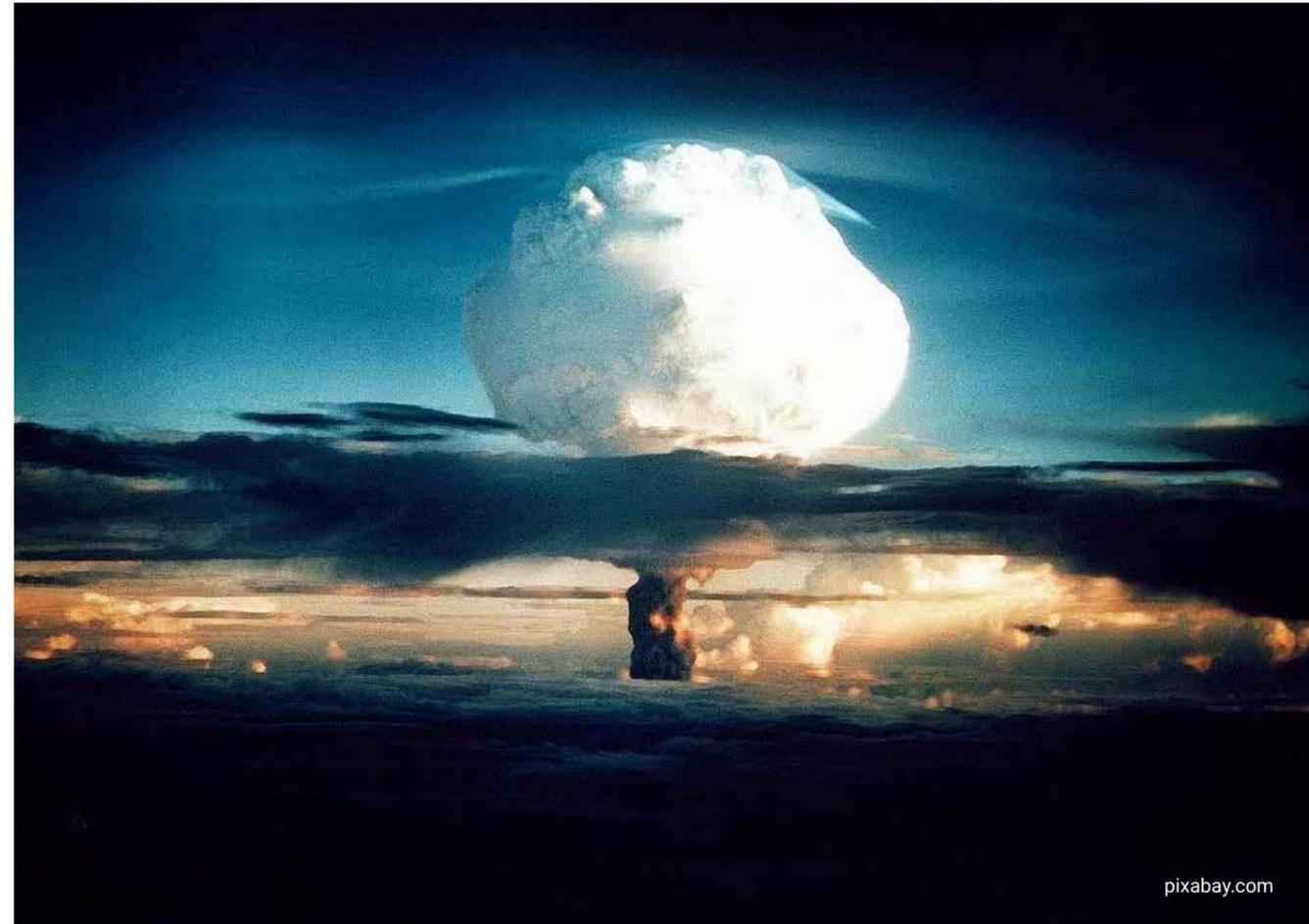
El proyecto alemán para desarrollar la bomba atómica comenzó en 1939. Su responsable fue Werner Heisenberg, que se apoyó en los mejores físicos que quedaban en Alemania. Consideraba que se necesitarían muchos años para llegar a ella. Tuvo poco apoyo económico y de personal. Uno de los errores que cometieron fue desecharlo como moderador de neutrones el grafito, y optar por el agua pesada⁸. Agua pesada que se producía en Noruega, concretamente en la factoría Norks Idro, de Telemark. El acceso a ella fue fácil tras la invasión de Noruega. Desde 1942 sufrió varios sabotajes que perturbaron poco la producción. Sin embargo, en 1944 el total de la producción se perdió tras un sabotaje al barco que la trasladaba a Alemania. Con las derrotas alemanas, cada vez fue más difícil el trabajo y el proyecto fracasó. Los principales motivos fueron el presupuesto (0,5% del de Estados Unidos) y la dispersión por los ataques aliados.

Al final de la guerra los principales científicos alemanes de la bomba atómica fueron detenidos en la Operación Épsilon. Fueron trasladados a Gran Bretaña y encerrados en una granja (Farm Hall). Cuando escucharon en la BBC la descripción del ataque a Hiroshima no se lo creían, a pesar de que tenían el estudio teórico muy avanzado.

Gran Bretaña

En marzo de 1940, dos extranjeros, Rudolf Peierls y Otto R Frisch, el sobrino de Lise Meitner codescubridor de la fisión, presentaron un memorándum que afirmaba que Alemania estaba desarrollando la bomba y que su potencia era tal que la única defensa era poseerla. El memorándum argumentaba que una pequeña esfera de U^{235} puro podría tener el poder explosivo de miles de toneladas de TNT. Además, explicaba cómo separar el U^{235} del U^{238} . Tras muchos problemas, incluso con la amenaza de detención de Frisch por ser de origen alemán, en junio de 1940 se crea el grupo MAUD⁹, que termina sus trabajos en verano de 1941. Intercambian información con Estados Unidos, que propone unir esfuerzos, pero Gran Bretaña se niega por estar sus estudios más adelantados. En una segunda fase se crea el grupo secreto *Aleaciones de Tubos*, con más de 200 científicos trabajando en él.

En julio del 1942 se dan cuenta de que no pueden desarrollarla solos por el coste (70 millones de libras), por el tiempo necesario (cinco años), y por la exposición a los bombardeos alemanes. Intentan unirse a los Estados Unidos pero ahora son ellos los que no quieren.



pixabay.com

“El éxodo de los científicos hace que Alemania pierda la hegemonía científica en favor de Estados Unidos.”

7. Tras la ley se produjeron tanto pérdidas cuantitativas como cualitativas en la comunidad de la física. Por ejemplo, Max Born, maestro de Werner Heisenberg y coautor de la versión matricial de la teoría cuántica, fue despedido. Se ha estimado que un total de 1.145 profesores universitarios fueron expulsados, alrededor de un 14% de los que había entre 1932 y 1933. De los 26 físicos nucleares alemanes citados en la

literatura antes de 1933, la mitad emigró. Entre ellos, 10 físicos y 4 químicos que habían ganado o podrían ganar el premio Nobel, emigraron de Alemania poco después de la subida de Hitler al poder, la mayoría en 1933. Estos 14 científicos fueron: Hans Bethe, Felix Bloch, Max Born, Albert Einstein, James Franck, Peter Debye, Dennis Gabor, Fritz Haber, Gerhard Herzberg, Victor Hess, George de Hevesy, Erwin Schrodinger, Otto Stern, y Eugene Wigner. Javier Castelo, obra citada.

8. Óxido de deuterio es una molécula de composición química equivalente al agua. El hidrógeno es sustituido por el deuterio, que tiene en el núcleo un protón y un neutrón. Su fórmula química es D_2O .

9. Grupo de trabajo científico británico cuya finalidad era realizar la investigación para determinar si una bomba atómica era posible. El nombre MAUD proviene de una extraña línea en un telegrama del físico danés Niels Bohr refiriéndose a su ama de llaves, Maud Ray.

El desencuentro termina en agosto de 1943 con la firma del *Acuerdo de Quebec*, entre Roosevelt y Churchill, por el que los británicos junto con los canadienses se incorporaban al proyecto Manhattan.

Los Estados Unidos. El Proyecto Manhattan

El 2 de agosto de 1939 Einstein firma una carta, escrita por Leo Szilard, dirigida a Roosevelt para que se desarrolle la bomba atómica. Este es el inicio del Proyecto Manhattan. El inicio fue lento y con muchas trabas administrativas y políticas. Estados Unidos no estaba en guerra. En octubre se crea el *Comité asesor del Uranio*. Su misión, obtener uranio y procedimientos de separación. Los informes británicos impulsan el desarrollo del proyecto.

En octubre de 1941 Roosevelt aprueba el programa atómico. Dos meses después, el 7 diciembre se produce el ataque japonés a Pearl Harbor y Estados Unidos entra en guerra. El panorama cambia totalmente y se produce un gran incremento del esfuerzo económico y técnico.

Mapa del Proyecto Manhattan De Original: Fallschirmjäger - Translation: Banjo - Trabajo propio derived from File: Manhattan Project US Canada Map 2.svg Base map from: File: BlankMap-USA-states-Canada-provinces, HI closer.svg, CC BY-SA 3.0.



El trabajo de investigación sobre la fisión se encomendó al Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en junio de 1942.

En la parte administrativa hubo muchos problemas provocados por la lentitud, la falta de un presupuesto realista y el escaso apoyo del Ejército al proyecto. El Ejército consideraba que había otros problemas más urgentes para ganar la guerra. La necesidad de agilizar el proyecto llevó a nombrar, en septiembre de 1942, como director al general de Ingenieros Leslie Groves. Y este escogió a Robert Oppenheimer como director científico del proyecto en los Álamos (Nuevo México), lugar en el que se investigaron, diseñaron y desarrollaron las primeras bombas nucleares.

El Proyecto Manhattan fue una colaboración entre los Estados Unidos, Gran Bretaña y Canadá, llena de desconfianza, peleas y secretos. El 18 de diciembre de 1941, Arthur Compton, que era el responsable de la investigación nuclear en Chicago, propuso el siguiente calendario (entre paréntesis la fecha cuando se consiguió):

- Julio del 42. Determinar si una reacción en cadena es posible (julio del 42).
- Enero del 43. Lograr la primera reacción nuclear en cadena (diciembre del 42).
- Enero del 44. Extraer la primera muestra de plutonio del uranio (diciembre del 43).
- Enero del 45. Disponer de la bomba (julio del 45).

A partir de este momento los trabajos se desarrollaron, a marchas forzadas, básicamente en tres aspectos:

- **Obtención de uranio.** En la que tres equipos distintos, en sendas universidades, estudiaron la separación del U^{235} del U^{238} , siendo este mayoritario en la naturaleza.
- **Estudio de los neutrones rápidos** para poner en marcha la reacción en cadena. Este objetivo se asignó a Robert Oppenheimer, quien posteriormente sería el director científico del proyecto Manhattan.
- **Diseño de la bomba.** Tema muy complejo porque se desconocía todo de un mundo que se podía medir e imaginar, pero no ver, y los cálculos tenían que ser muy precisos.

Primer reactor

En diciembre de 1942, el grupo de Fermi, que escoge el grafito como moderador, completa y opera el primer reactor nuclear, el Chicago Pile-1 (CP-1). Fue un gran éxito y la confirmación de que la reacción en cadena, y la bomba, era posible.

El descomunal apoyo logístico, infraestructura industrial, construcción de fábricas, bases militares, alojamientos y centros de investigación llevaron el proyecto a numerosas localidades, aunque las más importantes fueron los Álamos, Oak Ridge y Richland (ver mapa).

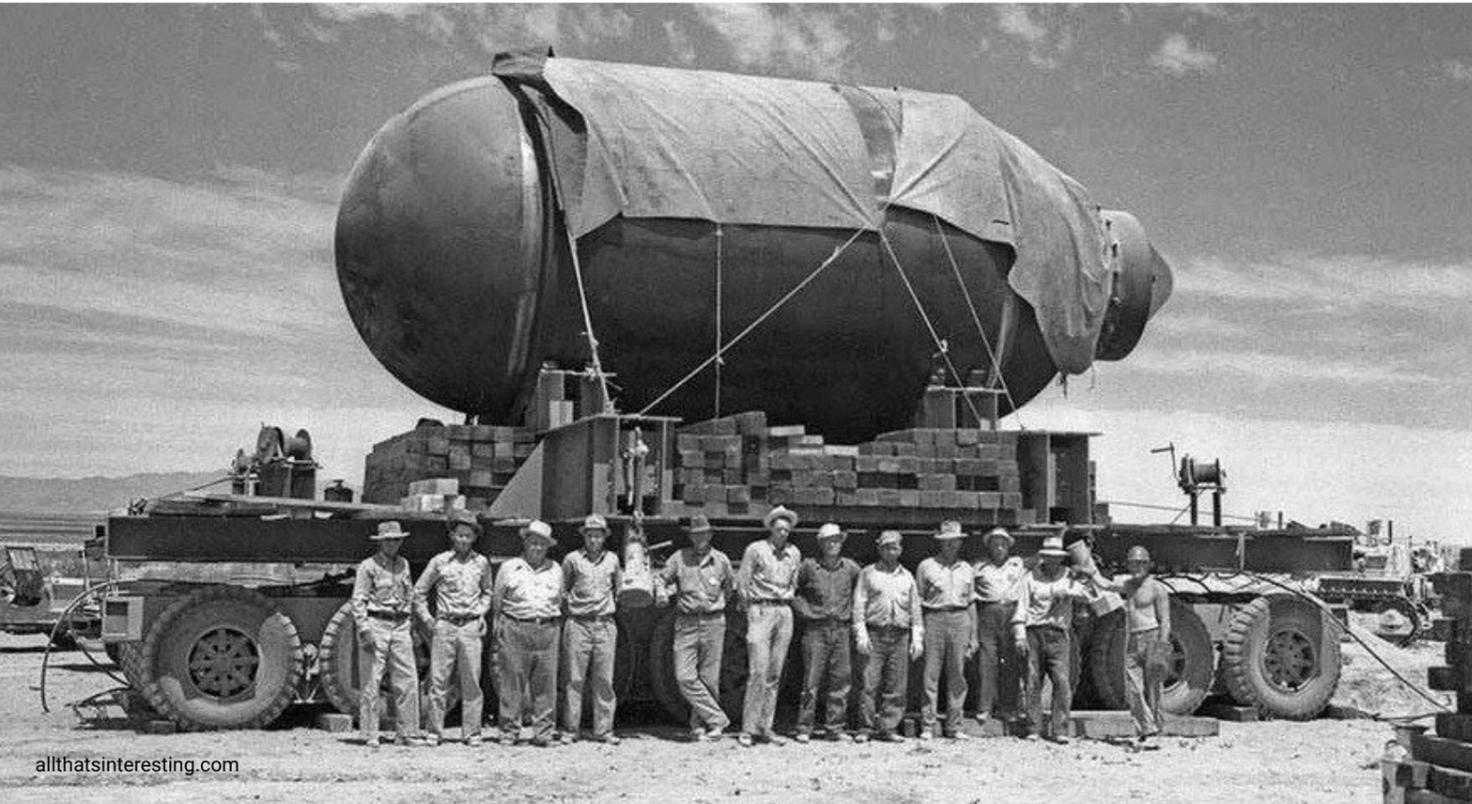
En los Álamos se construyó una ciudad dedicada a la investigación, a la que no se podía entrar y de la que era muy difícil salir. El reclutamiento de científicos y técnicos fue todavía más difícil. Había que convencerlos de dejar su trabajo (muchos estaban en otros proyectos para la guerra) para ir a un lugar indeterminado, por un tiempo indeterminado y cuya finalidad era secreta, y además debían abandonar toda vida social, aunque los casados podían ser acompañados por sus familias.

Material fisionable

No voy a entrar en detalle en las dificultades para conseguir el material fisionable, que fueron extraordinarias, indicaré que se utilizaron dos elementos diferentes, el U^{235} para la bomba Little Boy (bomba lanzada en Hiroshima) y el Pu^{239} para la Trinity (explosionada en Alamogordo) y la Fat Man (lanzada en Nagasaki).

Uranio. Para separar el U^{235} del U^{238} se utilizaron tres métodos distintos, combinados, en la factoría de Oak Ridge, para alcanzar una pureza de 89%. A mayor pureza mayor rendimiento en la explosión. Para la Little Boy se obtuvieron 50 kg con una pureza del 85%.

“Hubo muchos problemas provocados por la lentitud, la falta de un presupuesto realista y el escaso apoyo del Ejército al proyecto.”



Proyecto Manhattan.

Plutonio. El Pu^{239} es un subproducto de la reacción de fisión del uranio, por eso se controlan las centrales nucleares para que no se desvíe para construcción de bombas. El plutonio, por su mayor poder, es el único elemento que se utiliza en las bombas nucleares.

Diseño. Se estudiaron y construyeron dos: disparo (Little Boy), dos masas subcríticas, que se unen para formar una esfera por medio de una explosión convencional. Y el de implosión, Trinity y Fat Man. Es el único que se emplea desde entonces. El material radiactivo se fracciona en partes subcríticas (lentes) de una esfera, se rodea de explosivo convencional y al explosionar se comprime el plutonio y se forma la esfera que ya tiene una masa crítica para la reacción en cadena.

La complejidad de manejo del plutonio, y del sistema de implosión de la bomba, llevó a la construcción y detonación de una bomba de prueba (Trinity). Esta se explosionó el 13 de julio de 1945 en Alamogordo, y su potencia estimada fue de 20 kilotones (kt)¹⁰. La explosión se escuchó en El Paso (a más de 140 km). Fue un éxito y confirmó que Estados Unidos estaba preparado para utilizar la bomba en la guerra.

“A pesar de los miles de hombres que trabajaron en las distintas fases y lugares del proyecto, apenas unas pocas docenas sabían lo que estaban haciendo.”

El secreto

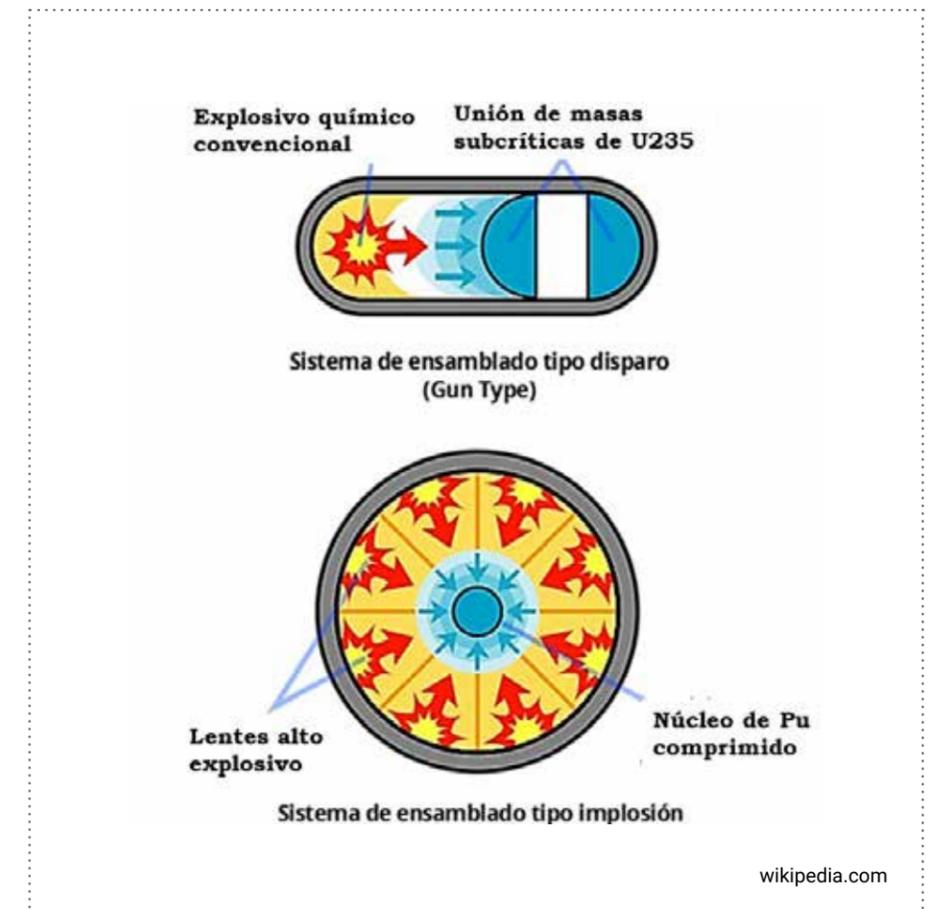
Una característica importante de toda esta operación fue el secreto. A pesar de los miles de hombres que trabajaron en las distintas fases y lugares del proyecto, apenas unas pocas docenas sabían lo que estaban haciendo. El personal más cualificado solo conocía su parcela y tenía prohibido hablar de su trabajo con otros, incluida su familia, y los menos cualificados solo sabían lo que tenían que hacer, pero no para qué servía su trabajo¹¹. Los controles de entrada a las instalaciones eran muy rigurosos y si no se cumplía el despido era inmediato. En Alamogordo, Oak Ridge y otras instalaciones, se construyeron ciudades cerradas para que vivieran las familias. Los contactos entre los residentes estaban muy limitados, y más aún con el exterior, se controlaba todo lo que salía y lo que entraba. La censura sobre los trabajos científicos y tecnológicos comenzó en 1939, no pudiendo publicarse nada sobre las investigaciones nucleares para evitar que esa información llegara a Alemania y Japón.

Aun así, a pesar de todas las medidas, la URSS consiguió infiltrar espías entre los científicos, siendo Klaus Fuchs el más destacado pues ejerció un puesto relevante en los Álamos. Se estima que la información enviada a la URSS adelantó su esfuerzo en varios años.

La prueba de que todas estas medidas funcionaron, y de que se consiguió mantener el secreto, fue la incredulidad del mundo ante la explosión de la bomba en Hiroshima.

- 10. 1 kilotón equivale a la explosión simultánea de 1.000 toneladas de TNT, es decir la carga de 50 camiones de dos ejes.
- 11. Ver <https://web.archive.org/web/20130117023813/http://nuclearsecy.com/blog/2012/04/16/oak-ridge-confidential-or-baseball-for-bombs/>

De Fastfission, trabajo personal del autor.



Personal en el proyecto

Es difícil saber cuánta gente trabajó exactamente en el proyecto, pero parece ser que alcanzó la cifra de 129.000 personas, entre las que se encontraban pocos militares. La mayor dificultad para “reclutar” a este elevado número de personas fue la competencia con otros proyectos vitales en tiempo de guerra, especialmente en lo relativo al personal más cualificado, por lo que en marzo de 1944 el gobierno le otorgó la prioridad más alta. Los científicos eran evaluados por otros científicos e invitados por amigos o conocidos. Como curiosidad, el Cuerpo de Mujeres del Ejército participó en un principio en tareas administrativas y de gestión de material clasificado, pero al poco tiempo pasó también a ejercer tareas científicas y técnicas.

Consecuencias médicas

A pesar de que apenas se conocían los efectos de la radiación, se nombró como jefe de medicina del proyecto

“Fue el mayor esfuerzo científico técnico de la historia de la humanidad. Su aportación al conocimiento en diversas disciplinas ha sido fundamental.”



allthatsinteresting.com

al coronel radiólogo Warren, que tenía a cargo los hospitales de las distintas localizaciones. Era responsable de la investigación médica y de los programas de salud y seguridad. Teniendo en cuenta el elevado número de materiales tóxicos con los que trabajaban, e investigaban, los accidentes fueron muy pocos. En 1945 se le otorgó un premio por ello porque el número de accidentes fueron un 62% menos que en la empresa privada.

¿Cuál fue su coste?

Es casi imposible de conocer con precisión, eran tiempos de guerra. El presupuesto total, en cifras oficiales, fue de 2.400 millones de dólares pero ¿cuánto esfuerzo indirecto se empleó?

El presupuesto se gastó de la siguiente forma. Más del 90% se empleó en la construcción de las plantas y la producción de los materiales fisibles. Un 10% para el desarrollo y producción de las armas. Se fabricaron 4 bombas, por lo que el precio unitario fue de 600 millo-

nes. ¿Es mucho? Comparemos. El gasto corriente en guerra equivale a 9 días de combate¹². Es el 90% del coste de fabricación de todas las armas individuales suministradas al Ejército. El 34% del coste de carros de combate. Por sistemas de armas, el mayor gasto fue el diseño y la producción del bombardero Boeing B-29 superfortaleza.

CONCLUSIÓN

La investigación del mundo atómico hasta 1945 fue una carrera de fondo que empezó hace más de 2.000 años. Carrera que terminó en un gran esprint final con el proyecto Manhattan. Esfuerzo que fue estimulado por la Segunda Guerra Mundial y el temor a que Alemania dispusiera de la bomba e impusiera su voluntad al mundo.

Fue el mayor esfuerzo científico técnico de la historia de la humanidad. Su aportación al conocimiento en diversas disciplinas ha sido fundamental: desarrollo de la energía nuclear, entendimiento del átomo, de los elementos químicos, ingeniería, metales, explosivos, etc.

Quiero hacer una mención especial a la medicina nuclear. El tratamiento con isótopos radiactivos del cáncer fue uno de los hijos más tempranos del Proyecto. Se inició en 1946.

La radiactividad se utiliza hoy en muchos campos como en la generación de energía, investigaciones biológicas, la industria, etc.

Desde 1945 hasta la fecha han sucedido muchas cosas y se ha llegado a un conocimiento del mundo atómico muy exacto y más complejo de lo que se suponía. Pero eso es otra historia.



Planta en Oak Ridge, Tennessee, donde se produjo el uranio para la primera bomba atómica.

José Manuel Vicente
Centro Universitario de la Defensa
Universidad de Zaragoza

12. Estimaciones de la época del Secretario de Defensa.