

A photograph of two large, dark, cylindrical cooling towers of a nuclear power plant. They are silhouetted against a bright orange and yellow sunset sky. A plume of white steam or smoke rises from the left tower. The towers and the sky are reflected in the calm water in the foreground. The overall scene is serene yet industrial.

LOS COMIENZOS DE LA ERA NUCLEAR

POR RAFAEL NÚÑEZ-LAGOS

“Hace poco que se ha cumplido el septuagésimo aniversario de la primera vez que el hombre consiguió iniciar y mantener controlada una reacción nuclear en cadena.”

Central nuclear de Watts Bar, estado de Tennessee (EEUU).

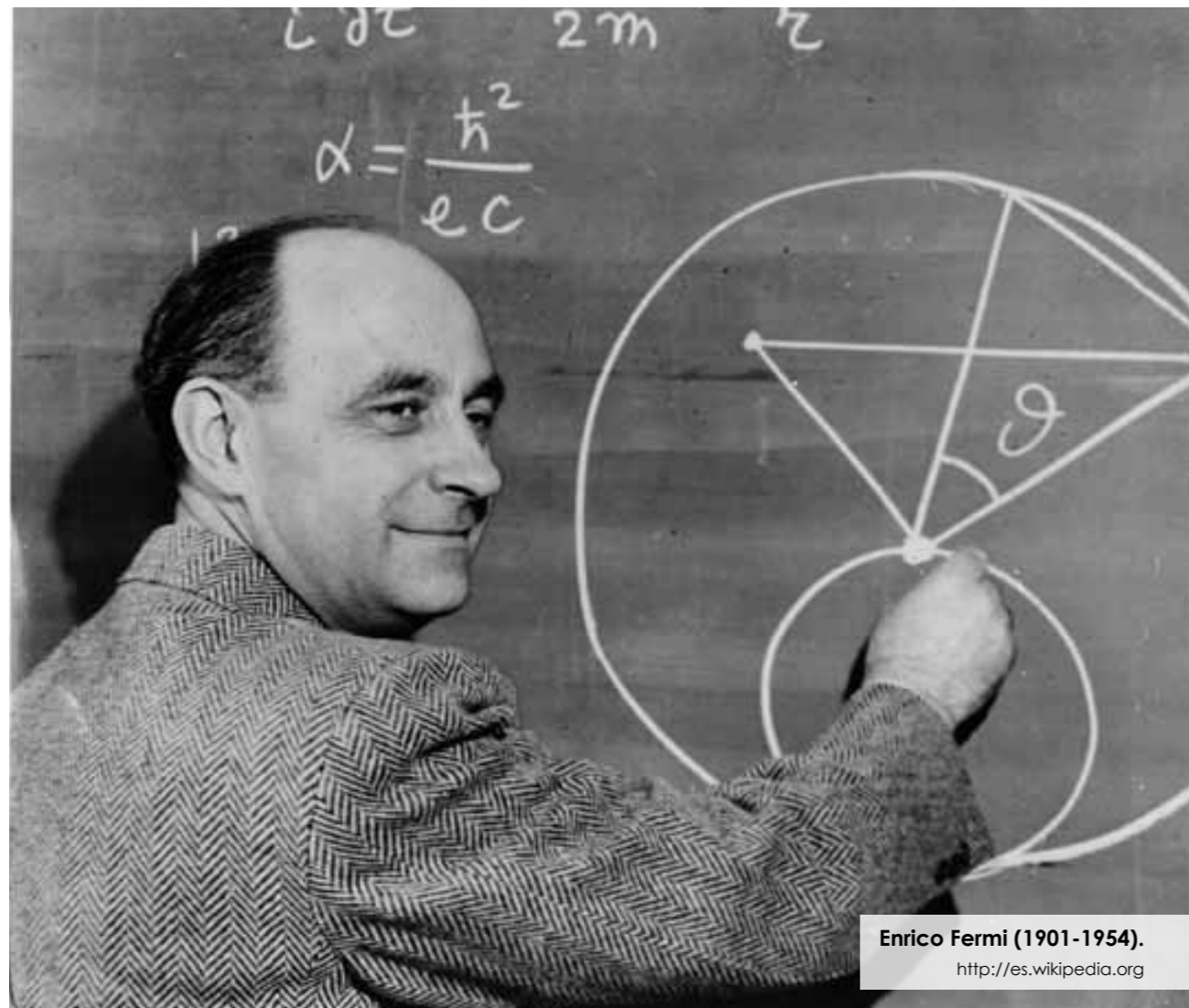
<http://www.flickr.com> (Chuck Sutherland)

Los comienzos de la era nuclear

No sabemos si actualmente estamos todavía en la era atómica o ya han comenzado otras eras como la era informática, la era internet o la era del móvil. Lo que sí es cierto es que en su aspecto pacífico la energía nuclear sigue siendo un sistema de producción de energía eléctrica que supone alrededor del 15% de la producción mundial de electricidad, sin emisión de gases de efecto invernadero, y en su faceta bélica todavía pende sobre nosotros el fantasma de un conflicto nuclear, dos ejemplos podrían ser Irán y Corea del Norte. En la vida cotidiana y en los medios de comunicación se utilizan indistintamente, en este contexto, las palabras atómica y nu-

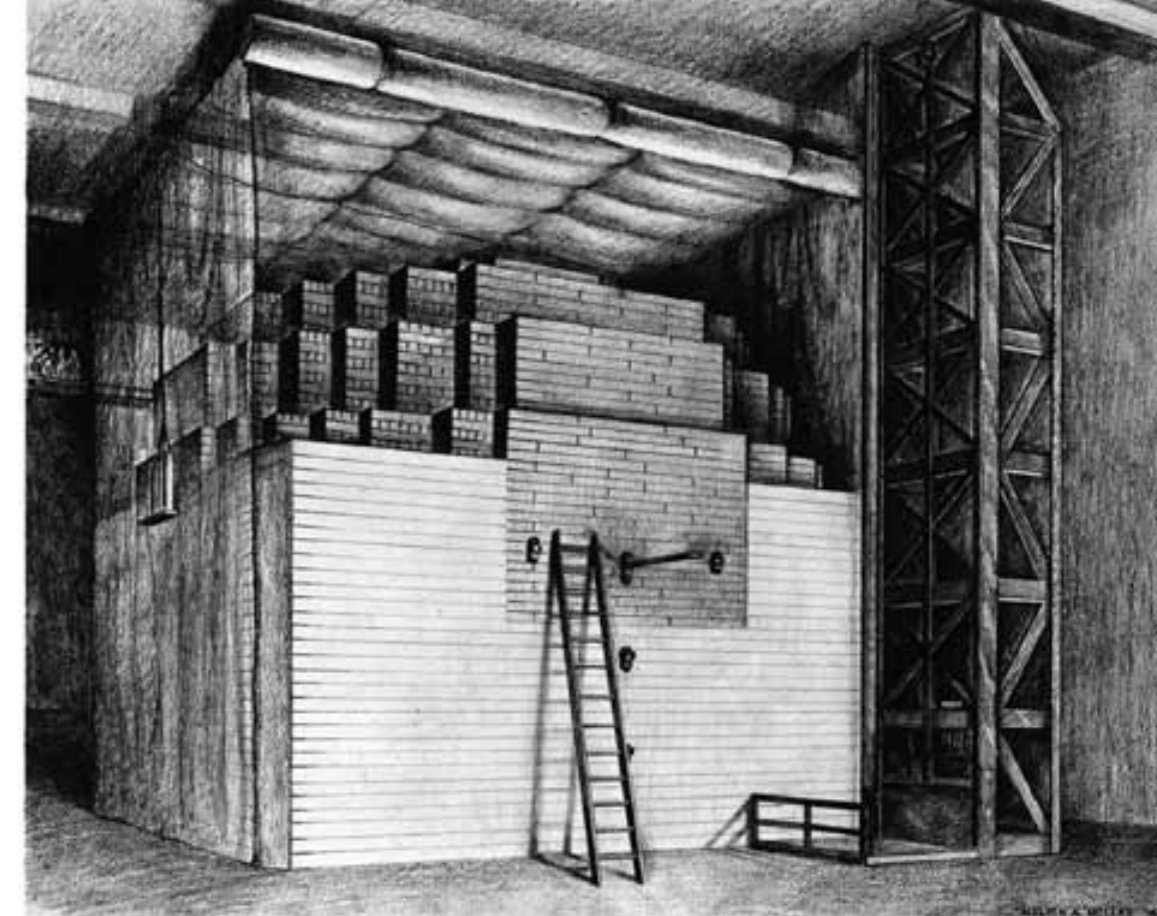
clear; científicamente son muy distintas y sería mejor hablar de era nuclear y bomba nuclear pero hay que aceptar los hechos y costumbres.

Hace poco que se ha cumplido el septuagésimo aniversario de la primera vez que el hombre consiguió iniciar y mantener controlada una reacción nuclear en cadena, hecho que puede considerarse como la fecha de inicio de la era nuclear. Fue exactamente el 2 de diciembre de 1942 a las 15:53h. La reacción se mantuvo durante 4,5 minutos hasta que Enrico Fermi ordenó su parada habiendo generado una potencia de $\frac{1}{2}$ W. El primer reactor nuclear fabricado por el hombre, conocido como Pila CP1, estaba situado debajo de las tribunas del



Enrico Fermi (1901-1954).

<http://es.wikipedia.org>



La pila CP1, primer reactor nuclear artificial del mundo.

<http://es.wikipedia.org>

estadio deportivo de la Universidad de Chicago y dependía del Laboratorio de Metalurgia de esa universidad, creado a principios de 1942, y cuya dirección se encomendó al Premio Nobel Arthur Compton. Por cierto, el nombre de pila dado por Fermi al reactor, según él mismo explicó, no era en el sentido de productor de electricidad, como se tiende a pensar, sino de apilamiento de cosas.

Durante más de 30 años se creyó que la pila CP1 era el primer reactor nuclear que existió sobre la Tierra; sin embargo, hoy sabemos que la primera reacción nuclear en cadena estable ocurrió de forma natural hace unos 2.000 millones de años en la región de Oklo, en Gabón, donde se han encontrado seis reactores naturales de forma lenticular de 1 m de grosor y de 10 a 20 m de largo que funcionaron durante 600.000 a 800.000 años. En aquella época la proporción de $^{235}_{92}\text{U}$ en el Uranio natural era del 10% al 20% y en la zona de Oklo dicha concentración era de alrededor del 6%. Los reactores estaban a unos 2.000 m de profundidad en el mar y por tanto con agua a unas 200 atmósferas pudiendo llegar a alcanzar los 350°C sin ebullición. El agua hacía de moderador y refrigerador. Iniciada una reacción, la tem-

peratura aumenta y el agua eventualmente hierve disminuyendo su poder moderador y consecuentemente el ritmo de fisiones, por lo que el sistema se va enfriando volviendo a su estado líquido; el ciclo vuelve a comenzar. De esta forma el reactor funcionó hasta que la proporción de $^{235}_{92}\text{U}$ no fue suficiente para mantener la reacción en cadena. La energía que Oklo suministró se puede deducir del consumo de $^{235}_{92}\text{U}$ estimándose en unos 500 millones de Gigajulios; en otras palabras, la misma producción que la de unas 20 plantas nucleares de última generación (3.000 MWt, 1000 MWe) durante 1 año, pero como se produjo a lo largo de tanto tiempo, la potencia media de cada reactor era tan solo de unos 2,6 kW.

La historia del primer reactor nuclear fabricado por el hombre está rodeada del secreto militar y del científico, impuesto por los hechos que acaecieron en la segunda guerra mundial. Está inserta en el conocido como proyecto Manhattan, cuyo objetivo era la fabricación de la bomba atómica, lo que supuso el mayor esfuerzo científico y tecnológico jamás realizado y, quizás también, el conjunto de secretos mejor guardados de la Historia. El logro fue posible gracias, por una parte, a la colaboración



Bombardeo de Pearl Harbor (1941).

<http://laley1079.com>

de un conjunto de científicos del máximo nivel dirigidos por Enrico Fermi ayudado por una industria capaz de suministrar, en cantidad y calidad, productos completamente nuevos y, por otra, a una serie de descubrimientos científicos previos que se sucedieron a un ritmo acelerado.

ANTECEDENTES CIENTÍFICOS

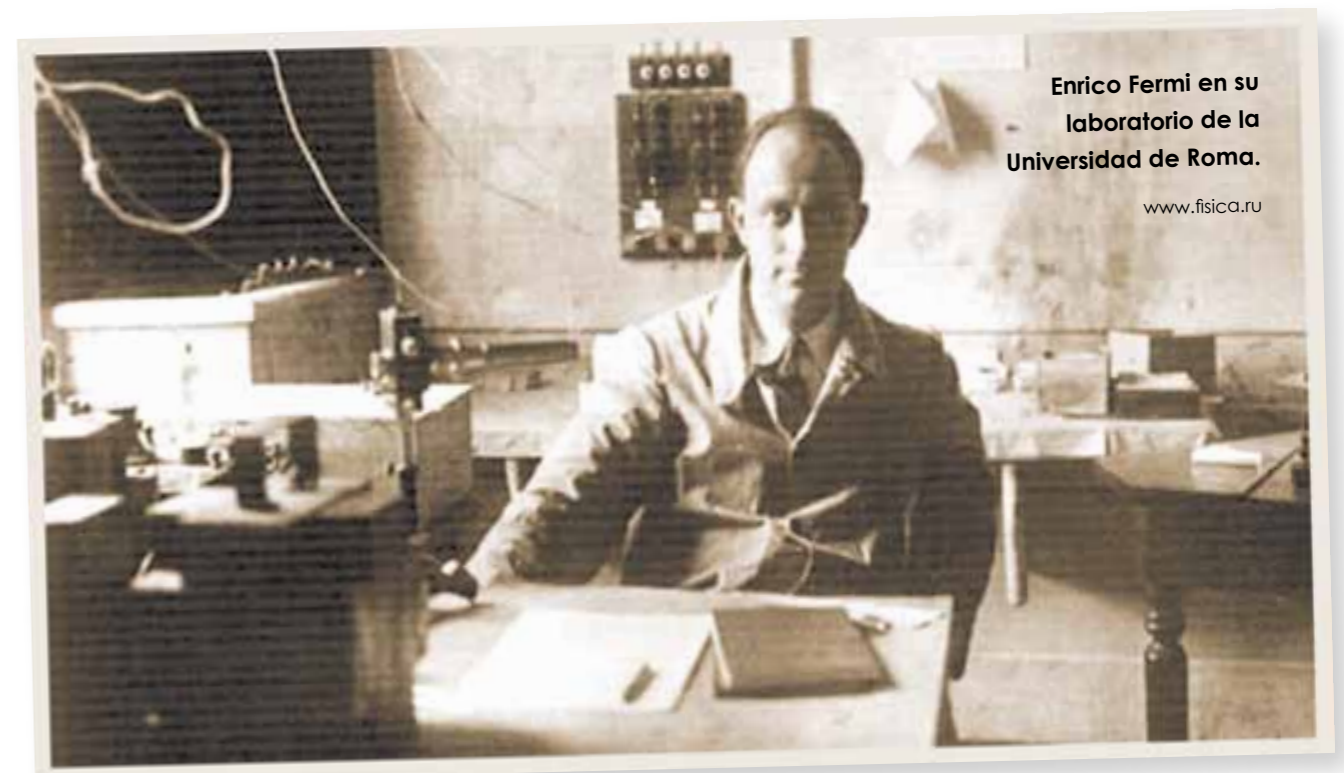
Desde 1933 se fueron reuniendo, en diversas universidades de los Estados Unidos, científicos europeos que escapaban a la presión política existente inicialmente en Alemania e Italia y que fue extendiéndose a otros países del centro y norte de Europa. Así, por ejemplo, en Princeton se reunieron Einstein, von Neumann y Wigner; a la Universidad de Columbia en Nueva York llegó en 1938 Enrico Fermi de vuelta de recoger su Premio Nobel; en la Universidad de California en Berkeley estaba Emilio Segré, etc. En total se calcula que, en aquellos años, más de 200 físicos se establecieron en los Estados Unidos. El ambiente científico pronto se convirtió en indudablemente excepcional. El inicio de la Segunda Guerra Mundial con la invasión alemana de Polonia, el 1 de septiembre de 1939, indujo a los científicos europeos que se

“La fisión nuclear fue un descubrimiento que tardó en ser reconocido por los físicos y químicos de la época porque les parecía algo impensable.”

encontraban en los Estados Unidos a colaborar con su saber a la terminación de la guerra con la victoria aliada. En aquellos años, los Estados Unidos no participaban en el conflicto pero sí el Reino Unido, donde también se habían refugiado muchos científicos que mantenían contacto con sus colegas americanos. El bombardeo de Pearl Harbor, el 7 de diciembre de 1941, decidió a los Estados Unidos a participar en la guerra y promovió, de forma definitiva, la coordinación de los científicos americanos en torno al Proyecto Manhattan, encaminado a la consecución de una bomba nuclear.

La fisión nuclear fue un descubrimiento que tardó en ser reconocido por los físicos y químicos de la época porque les parecía algo impensable. Desde el descubrimiento del neutrón por Chadwick en 1932, se supo que el núcleo atómico estaba constituido por protones y neutrones. Este hecho, junto al descubrimiento de la radiactividad artificial en 1933 por el matrimonio Frederick Joliot e Irene Curie, inducida por el bombardeo de aluminio con partículas alfa y publicado en 1934, indujo a Fermi a utili-

zar neutrones para bombardear materia y producir nuevos elementos radiactivos. Su idea era evidente, los neutrones, al no tener carga eléctrica, podían llegar al núcleo con más facilidad que las partículas alfa pues no serían repelidos por el núcleo. Fermi comenzó en su laboratorio de la Universidad de Roma, utilizando una fuente de neutrones de Radio-Berilio, a bombardear sistemáticamente todos los elementos de la tabla periódica comenzando por los más ligeros. Produjo multitud de isótopos radiactivos, todos ellos cercanos al elemento que se había utilizado como blanco. El proceso era claro, los núcleos del blanco absorbían un neutrón y el isótopo formado decaía por desintegración beta en el elemento siguiente. No se emitían positrones, como en el caso de bombardeo con partículas alfa, ni tampoco neutrones. Sus experimentos le sirvieron, además, para desarrollar toda la teoría de las desintegraciones beta una vez que la hipótesis de Pauli, de la existencia de una tercera partícula en el proceso que Fermi bautizó como neutrino, aclaró la conservación de la energía y demás leyes consideradas fundamentales en la Física.



Enrico Fermi en su laboratorio de la Universidad de Roma.

www.fisica.ru

Los comienzos de la era nuclear

Los problemas para Fermi comenzaron cuando llegó a bombardear el uranio y trató, con toda lógica, de fabricar elementos transuránicos, en particular el elemento 93. Se inducía mucha radiactividad, pero los resultados no los pudo explicar ni fueron fácilmente interpretables por los radioquímicos italianos. Sus mediciones de la propagación de neutrones en agua, realizados en un estanque de la universidad, le permitieron construir toda la teoría de la difusión y moderación de neutrones, esencial para conseguir una reacción nuclear en cadena controlada. Fermi solía realizar los experimentos durante el día y por la noche realizaba sus cálculos y elaboraba sus teorías, dormía muy poco. Fermi ya había observado que se producía más radiactividad cuando utilizaba neutrones frenados previamente con parafina. En Roma, D'Agostino demostró que el elemen-

to radiactivo de 13 minutos de periodo, que se formaba al bombardear el uranio, no era ni protactinio ($Z=91$), ni torio (90), ni actinio (89), ni radio (88), ni bismuto (83), ni plomo (82). Su comportamiento excluía el entonces llamado ekacesium (87), hoy francio, y el radon (86); el elemento 85, astatio, era desconocido en la época. Fermi en una comunicación en junio a la revista Nature sugirió que, dada la evidencia negativa, se abría la posibilidad de que el elemento descubierto de 13 minutos de periodo fuese un elemento superior al 92.

Otto Hahn era un reconocido radioquímico que trabajaba en la Universidad de Berlín junto con su ayudante Fritz Strassmann y su colega, amiga y colaboradora, la física Lisa Meitner. Hahn decidió repetir la experiencia de Fermi con el uranio para tratar de identificar los productos que se habían originado. Desde 1934 a 1938, los tres bombardearon con neutrones muchos elementos químicos y encontraron numerosos isótopos radiactivos, pero los resultados con el uranio natural seguían siendo un problema, el elemento radiactivo que aparecía era inseparable del bario. Tras la anexión de Austria por Hitler en 1938, Lisa Meitner de nacionalidad austriaca, católica pero de ascendencia judía, decidió abandonar Berlín y se trasladó a Estocolmo al Instituto de Manne Sieghbahn.

Hahn y Strassmann continuaron sus análisis, se resistían a creer que el elemento era bario e hicieron una prueba definitiva. Si en realidad lo era, el bario con $Z=56$ por desintegración beta produciría lantano con $Z=57$ y este elemento era fácilmente separable radioquímicamente. El resultado que lo confirmaba no se hizo esperar y su resistencia a pensar que se habían producido elementos tan ligeros como el $A=137$, que correspondería al bario, así como su perplejidad fueron en aumento. Aunque estaban en diciem-

Otto Robert Frisch (1904-1979).

<http://photos.aip.org>

bre, a la vista de los resultados Hahn escribió un artículo para que lo publicasen urgentemente en el siguiente número de la revista *Naturwissenschaften*, pues el editor era amigo suyo. Este se lo aceptó pero le impuso que el manuscrito tenía que llegar antes de Navidad. Sus dudas quedaron muy bien reflejadas en un comentario que se añadió al final del artículo en el que decían: "Como químicos deberíamos de revisar el esquema de desintegración dado más arriba e insertar los símbolos Ba, La, Ce (Cerium) en lugar de Ra, Ac, Th (Thorium). Sin embargo como "químicos nucleares", trabajando muy estrechamente con el campo de la física, no podemos todavía dar un salto tan drástico que va en contra de todas las leyes previas de la física nuclear. Podría haber una serie de coincidencias inusuales que nos han dado indicaciones falsas". Hahn escribió una carta a Lisa Meitner incluyéndole una copia al carbón del original del artículo.

En la Navidad de ese año Otto Frisch, físico prestigioso que trabajaba en Copenhague con Niels Bohr, acudió a Suecia a pasar las fiestas con su tía Lisa Meitner. Lisa Meitner recibió la carta de Otto Hahn en la que le comunicaba que: después de haber probado todas las posibles vías de separación le había resultado imposible separar del bario el elemento radiactivo que aparecía tras el bombardeo del uranio con neutrones. Le pedía que estudiase si un isótopo radiactivo del bario podía tener una masa tan grande y le añadía "Quizás pueda Vd. sugerir alguna explicación, comprendemos que no se puede romper hasta el bario de manera que piense en alguna otra posibilidad, ¿Isotopos del bario con pesos atómicos superiores a 137?, estamos seguros de que esto o es una locura o que una contaminación está jugando con nosotros".



Frisch era escéptico sobre los resultados de Hahn pero Meitner sabía de la meticulosidad y competencia de Otto Hahn y no podía dudar de sus resultados. Después de pensarlo algunos días, llegó a la conclusión de que el núcleo de uranio se había partido en dos trozos más pequeños y que uno de ellos era bario. Para convencer a Frisch, utilizó la fórmula de masas de Bohr para ver primeramente que la reacción era energéticamente posible, que se podían haber formado bario, kriptón y posiblemente algún neutrón, que la energía cinética con la que esos dos fragmentos eran expulsados era de unos 200 MeV, una energía fabulosa si se pudiese aprovechar de alguna forma útil. Frisch quedó convencido pero la propuesta era tan revolucionaria e impensable que Meitner decidió que era imprescindible, antes de publicar nada, tener el beneplácito de Bohr y encomendó a Frisch, que regresaba a Copenhague, que se lo mostrase antes de que este iniciase una visita a los Estados Unidos. Tía y sobrino redactaron conjuntamente por teléfono unas páginas que Frisch discutió con Bohr el 6 de enero. A poco de comenzar la explicación, Bohr exclamó "¡Oh que idiotas hemos sido todos! ¡Esto es



Lisa Meitner y Otto Hahn.
<http://es.wikipedia.org>



maravilloso! Esto es exactamente como tiene que ser" y le urgió a escribir un artículo y enviarlo urgentemente a Nature. Bohr, que partía al día siguiente para una estancia larga en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, se comprometió a no decir nada a los físicos americanos hasta que el artículo hubiese sido aceptado.

EL DESARROLLO DE LA PILA CP1

La comprensión inmediata de Bohr se entiende fácilmente pues, con anterioridad, había publicado el mecanismo del núcleo compuesto en un artículo titulado "Neutron capture and nuclear constitution" ¹ en el que un neutrón es absorbido por un núcleo que lo captura y se forma un núcleo excitado que pierde toda la memoria de su estructura interna anterior, y que se puede desintegrar en diversos canales. Era normal suponer, como habían pensado Meitner y Frisch, que el núcleo compuesto de uranio for-

mado tras la absorción estuviese fuertemente excitado, sufriese una fuerte elongación y en su excitación se pudiese partir en dos fragmentos. Bohr vio claro el proceso pero trató de comprenderlo con su modelo de la gota líquida que había publicado con Kalckar. ²

En su viaje hasta Nueva York en barco, junto con el físico Leon Rosenfeld, que le acompañaba, repitió todos los cálculos con su fórmula de masas y ambos comprobaron que los resultados que Meitner y Frisch habían obtenido eran correctos. Bohr se quedó un día en Nueva York, pero Rosenfeld se fue directamente a Princeton con John Wheeler que le había ido a buscar.

El Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, New Jersey, fue fundado en 1930 por el matrimonio Bamberger, y se creó para acoger a los emigrantes judíos a quienes la Universidad de Princeton rechazaba, debido a su antisemitismo institucionalizado. Allí estuvo Einstein hasta

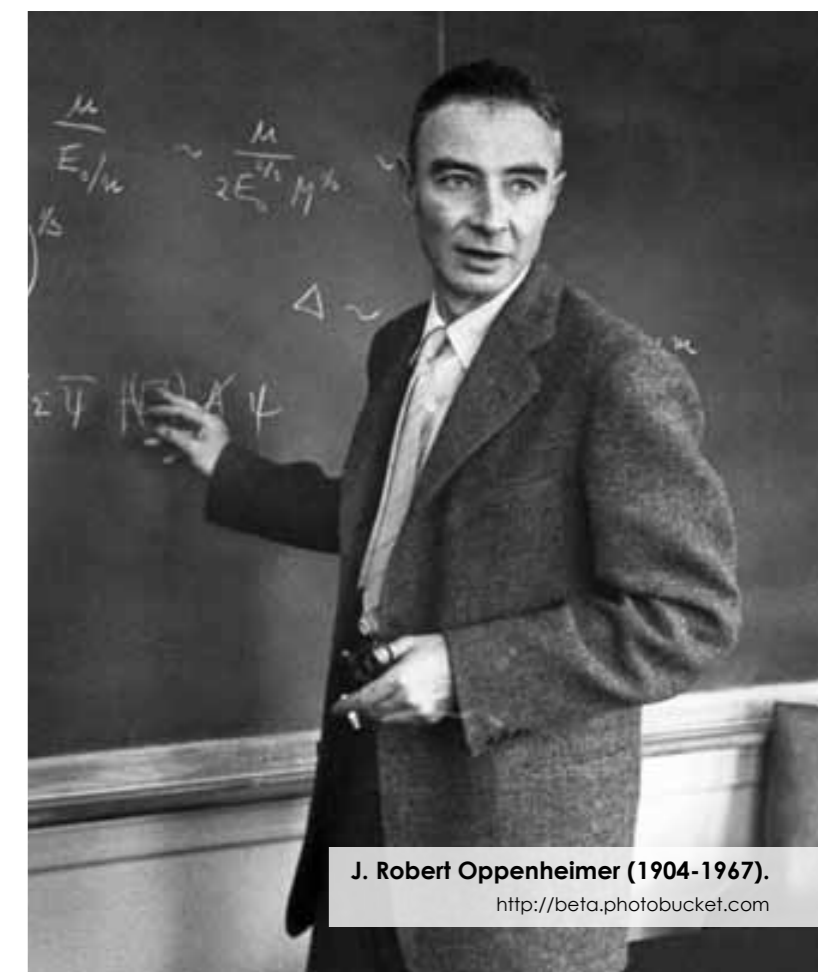
su muerte y de allí era profesor John Wheeler, uno de los mejores físicos del siglo XX, y allí fueron Rosenfeld y Bohr.

Frisch realizó en Copenhague un experimento para detectar los dos fragmentos que tenían que salir procedentes de la rotura del uranio. Utilizó una rudimentaria cámara de ionización construida por él, en la que añadió a los electrodos una hoja recubierta de uranio y, con las tres fuentes de neutrones que encontró en el laboratorio, bombardeó las placas esperando que los productos de la rotura del núcleo de uranio, al ser tan energéticos, pudiesen atravesar unos mm de aire y producir una gran ionización, detectable con un sencillo amplificador y un osciloscopio. El experimento fue un éxito y lo mostró a todo el que quiso verlo, en particular a un amigo, y colega microbiólogo, William Arnold a quien Frisch preguntó cómo llamaban los biólogos a la división en dos de una bacteria; "fisión binaria" fue la respuesta y fue Frisch el que puso al proceso nuclear el nombre de "fisión" a secas. Tía y sobrino volvieron a comunicarse y decidieron enviar dos artículos a Nature, uno con los cálculos de la fisión y otro con la confirmación realizada por Frisch.

Para ser rigurosamente exactos, fue la química Ida Noddack la primera persona que, criticando los resultados de Fermi sobre los transuránidos y su dificultad de interpretación, sugirió una fragmentación del núcleo de uranio en un artículo publicado, en 1934, titulado "Sobre el elemento 93" ³, pero todavía no se disponía de la fórmula de masas para poder dar algún argumento, y su mera sugerencia quedó en el olvido. Fermi, que sabía cómo hacer los cálculos, estimó cuál era la probabilidad de que el $^{238}_{92}\text{U}$ se partiese en dos fragmentos encontrando que era tan pequeña que la sugerencia de Ida Noddack no podía ser cierta y olvidó el asunto.

Al llegar Bohr a Princeton se encontró con la desagradable sorpresa de que los físicos americanos del Instituto se habían enterado de la noticia de la fisión porque Rosenfeld, que no sabía nada de la promesa de Bohr a Frisch, se lo había contado a Wheeler en el viaje y este lo publicó en una revista interna de Princeton. La noticia corrió como la espuma por todo Estados Unidos, y así fue como los físicos americanos se enteraron de la fragmentación del uranio, la palabra fisión aún no había llegado. Bohr envió una nota a Nature confirmando la autoría de la fragmentación del uranio a Meitner y Frisch.

Bohr, por cálculos realizados a bordo del barco que lo llevaba a Estados Unidos y continuados en Princeton, donde permaneció varios meses en 1939, estableció para empezar que era el isótopo $^{235}_{92}\text{U}$ el que se fisionaba con neutrones lentos y no el $^{238}_{92}\text{U}$ y luego desarrolló con Wheeler el trabajo "Mecanismo de la fisión nuclear" ⁴ enviado al "Physical Review" a fines de junio de 1939, y publicado el primero de septiembre,



Los comienzos de la era nuclear

que fue durante años la referencia esencial de la fisión nuclear y que dio a conocer a los físicos del mundo, y en particular a los alemanes, el mecanismo de la fisión. Muchos laboratorios comenzaron a realizar experimentos para comprobar la existencia de la fisión y determinar sus principales características.

La conferencia de Física Teórica de Washington de 1939, que reunió a la mayoría de los físicos de los principales laboratorios, estaba dedicada, en principio, a las bajas temperaturas; sin embargo, hubo un cambio total. George Gamow, que abrió la conferencia, presentó a Niels Bohr y este explicó todas las novedades de los experimentos de Hahn y Strassmann, la interpretación de Lisa Meitner y Frisch y sus propias ideas y cálculos. A continuación, Fermi explicó sus ideas y bosquejó las posibles implicaciones. El impacto fue total, muchos no creyeron los resultados presentados y multitud de laboratorios realizaron experimentos para comprobar los hechos. En menos de una semana, todos los grandes laboratorios en Estados Unidos dieron a conocer sus resultados positivos. Robert Oppenheimer y Enrico Fermi, asistentes a la conferencia, se dieron cuenta rápidamente que muy probablemente en la reacción se desprenderían varios neutrones y, si eso era correcto, se abriría la puerta a una reacción en cadena y consecuentemente a la obtención de enormes cantidades de energía si se controlaba la reacción y, por desgracia también, a una bomba nuclear si la reacción no se controlaba. Afortunadamente para los científicos, lo primero que se consiguió fue una reacción en cadena controlada.

Fermi repitió en Columbia la experiencia de Frisch, pero faltaba todavía mucho por descubrir. Se conocía la existencia

“Fermi explicó sus ideas. El impacto fue total, muchos no creyeron los resultados presentados y multitud de laboratorios realizaron experimentos para comprobar los hechos.”

del $^{235}_{92}\text{U}$ pero la proporción en que se encontraba en el uranio natural no se midió hasta tres años después. Tampoco estaba probado qué en la fisión se produjeran neutrones ni con qué abundancia y energías, algo esencial para producir una reacción en cadena. Bohr realizó cálculos teóricos demostrando, como antes mencionamos, que era el $^{235}_{92}\text{U}$ el isótopo que se fisionaba con neutrones lentos y no el $^{238}_{92}\text{U}$ que necesitaba una mayor energía. También predijo unas fuertes resonancias en la absorción de neutrones de alrededor de 25 eV en el $^{238}_{92}\text{U}$ que conducirían a la producción del elemento 93 y este, tras una desintegración beta, al elemento 94 que sería también un excelente combustible nuclear. Fermi al principio no estaba muy de acuerdo y la discusión terminó cuando se acordó que solo los experimentos podrían decidir lo que realmente sucedía.

En el fondo, los cálculos son muy simples usando la fórmula de masas. En ella hay un término que es nulo cuando el número de protones es par y el de neutrones impar o viceversa como ocurre con el $^{235}_{92}\text{U}$, con 92 protones y 143 neutrones. El término es negativo y reduce la masa cuando los dos son pares como ocurre cuando el $^{235}_{92}\text{U}$ absorbe un neutrón y se forma el $^{236}_{92}\text{U}$ con 92 protones y 144 neutrones. Esto hace que el núcleo formado esté fuertemente excitado y sea posible que la repulsión entre los protones domine sobre la tensión superficial y sea más estable la situación en que el núcleo esté partido en dos fragmentos. Con el $^{238}_{92}\text{U}$ esto no sucede pues el $^{239}_{92}\text{U}$ que se forma es $Z=92$ par y $N=147$ impar y por tanto se desintegra beta en $^{239}_{93}\text{Np}$ que sigue siendo impar-par ($Z=93$ y $N=146$) por tanto se desintegra beta y forma el $^{239}_{94}\text{Pu}$ que como el $^{235}_{92}\text{U}$ es $Z=94$ par y $N=145$ impar. Al absorber este



Fermi, primero a la izquierda, y su equipo. El de la gabardina es Leo Szilard.

<http://www.3rd1000.com>

un neutrón se forma el $^{240}_{94}\text{Pu}$ elemento con $Z=94$ par y $N=146$ también par, altamente excitado que se divide en dos con facilidad. Si el $^{239}_{93}\text{Np}$ absorbiese un neutrón se formaría el $^{240}_{93}\text{Np}$ que sería un núcleo con $Z=93$ impar y $N=147$ también impar en el que el término de la fórmula de masas es positivo y añade masa al núcleo, al revés de lo que se necesita. Solamente el $^{235}_{92}\text{U}$ y el $^{239}_{94}\text{Pu}$ eran susceptibles de fisionarse con neutrones térmicos.

Durante los años 1939 a 1941 se realizaron en Estados Unidos multitud de experimentos a lo largo de los dos caminos posibles, uno producir el $^{239}_{94}\text{Pu}$ y otro enriquecer el uranio natural en el isótopo $^{235}_{92}\text{U}$. También se produjeron muchos informes dirigidos a la autoridades civiles y militares explicándoles la potencialidad del uranio para la producción de energía y para fabricar un arma nuclear, entre ellos la célebre carta que Einstein envió al Presidente Roosevelt escrita a instancias de Leo Szilard, Eugene Wigner y Edward Teller que formaban el llamado “Trio Húngaro” que fue el origen

del Proyecto Manhattan. Los tres colaboraron estrechamente en el proyecto, pero Szilard se distinguió en el terreno de las reacciones en cadena llegando a patentar un reactor nuclear en Inglaterra, patente que luego cedió a los Estados Unidos.

Fermi, que se encontraba en la Universidad de Columbia en Nueva York, se decidió por realizar un reactor nuclear. Para ello comenzó una serie de experimentos subcríticos que le permitieron comprender bien el proceso. En un experimento subcrítico se producen reacciones en cadena mediante una fuente externa de neutrones, pero no es automantenida. Fermi definió el llamado factor k de un reactor que es el cociente entre los neutrones producidos en una generación dividido por el de neutrones de la generación anterior. Si $k < 1$ el número de neutrones disminuye y la reacción se termina parando, salvo si se suministran neutrones de una fuente exterior como es el caso de un conjunto subcrítico. Si $k = 1$ la reacción se mantiene estable y el sistema es crítico y si $k > 1$ la

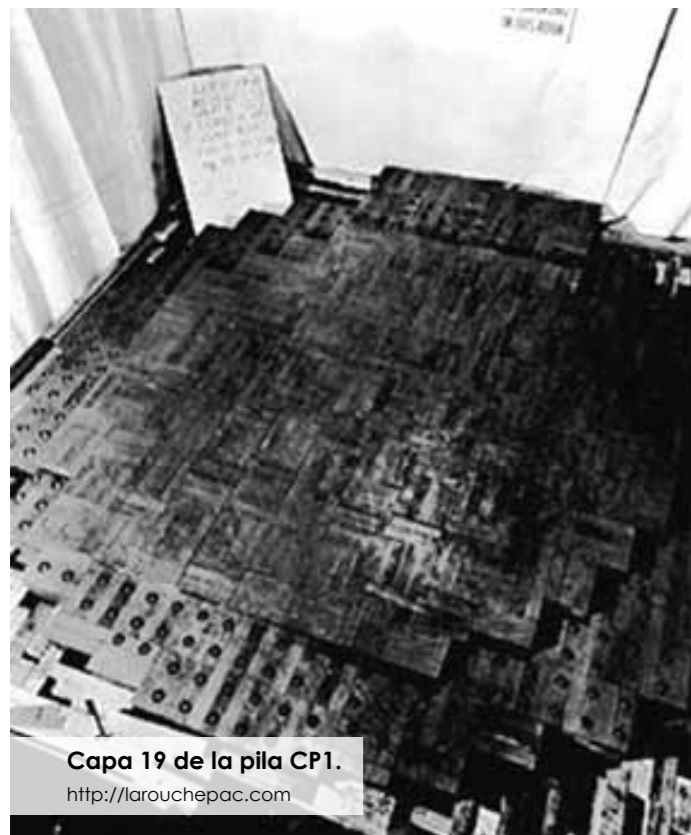
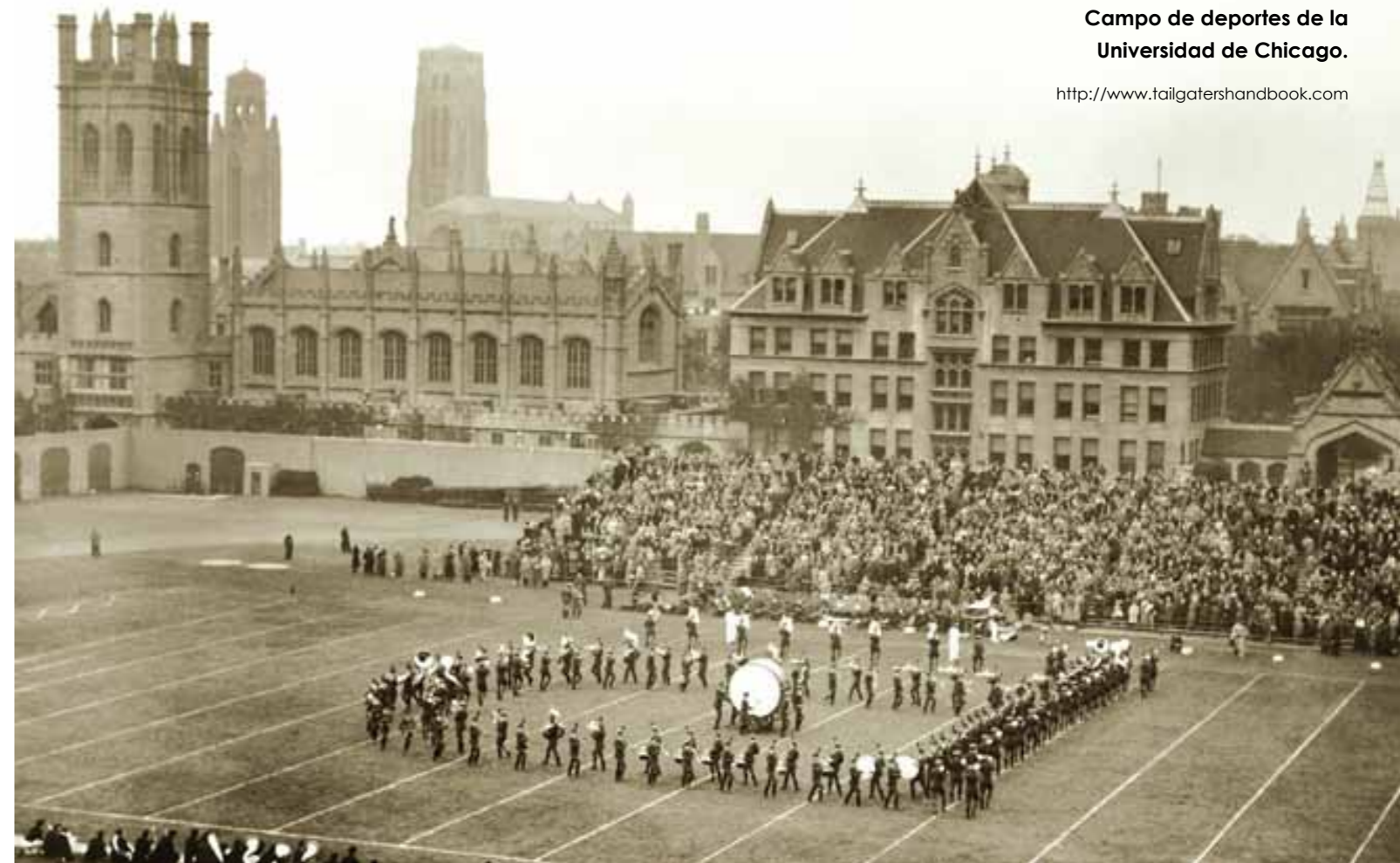
Los comienzos de la era nuclear

reacción diverge y el sistema puede fundirse. Bajo ciertas condiciones, aunque nunca con neutrones térmicos y con $^{235}_{92}\text{U}$ o $^{239}_{94}\text{Pu}$ prácticamente puros, podría explotar si la masa fuese suficientemente grande. Las características geométricas que tenía que tener un dispositivo que trabajase con uranio natural para conseguir un factor $k = 1$ es lo que Fermi fue deduciendo de sus experimentos. Pronto se dio cuenta de que el moderador no podía ser agua y se decidió por trabajar con grafito. En estos experimentos también trabajaba con él Szilard y ambos discreparon, pues Fermi quería construir un sistema con placas alternadas de grafito y uranio natural y Szilard creía mejor un dispositivo de dados de uranio.

La creación del Laboratorio de Metalurgia en la Universidad de Chicago, a principios de 1942, llevó a Fermi y a Szilard a Chicago. Los Estados Unidos habían entrado en la guerra mundial. Los científicos americanos e ingleses temían que los alemanes estuviesen construyendo una bomba

nuclear, como así era, y decidieron unánimemente trabajar en el Proyecto Manhattan para conseguir, cuanto antes, la bomba atómica y también se autoimpusieron una censura total en cuanto a la publicación, o difusión, de sus investigaciones. Los dos caminos para conseguir un ingenio nuclear eran conseguir enriquecer el $^{235}_{92}\text{U}$ hasta casi la pureza o producir $^{239}_{94}\text{Pu}$, ambos en cantidad suficiente para conseguir la masa crítica necesaria que se estimaba en alrededor de una decena de kg. Las primeras estimaciones fueron entre 2 y 100 kg.

Las autoridades americanas optaron por los dos caminos a la vez y, paradójicamente, ambos ingenios nucleares estuvieron a punto también a la vez. Enriquecer $^{235}_{92}\text{U}$ hasta conseguir la casi pureza, mediante difusión térmica o ultracentrifugación gaseosa, no le atraía a Fermi y fueron otros los que siguieron ese camino. Tratar de producir $^{239}_{94}\text{Pu}$ mediante un acelerador como habían logrado en Berkeley parecía imposible, pues había que pasar de microgramos a kilogramos. Fermi pensó que el camino era bombardear uranio natural con neutrones, para ello hacía falta mucho uranio y muchos neutrones, algo que se podría conseguir mediante una reacción en cadena en un reactor nuclear. Desde sus inicios en Chicago, sus esfuerzos fueron dedicados a la construcción de la pila nuclear. Szilard se encargó de encontrar los suministradores de uranio natural lo suficientemente puro y, sobre todo, de grafito sin impurezas para que hiciese de moderador y no absorbiese neutrones. De ambos materiales se necesitaban muchas toneladas y, hasta entonces, se habían producido solamente en cantidades de unos pocos kilogramos. La industria norteamericana fue capaz de ello en poco tiempo. Debajo de las gradas del campo de deportes de la universidad se habilitó un espacio lo suficientemente amplio como para



Capa 19 de la pila CP1.

<http://larouchepac.com>

albergar el invento, y se fueron colocando bloques de grafito en forma de grandes ladrillos en capas horizontales y placas de uranio. Se instalaron también contadores para saber cuántos neutrones había en todo momento, placas de madera cubiertas de cadmio que caían verticalmente por la gravedad y que estaban sujetas con sogas para controlar y parar la reacción. Cuando la pila estuvo terminada, se habían apilado 349.719 kg de grafito, 36.555 kg de óxido de uranio y 5.624 kg de uranio metal y había costado, aproximadamente, 1 millón de dólares.

Fermi había calculado que el sistema se haría crítico entre las capas 56 y 57 y Anderson, estrecho colaborador de Fermi, se encargó la tarde del 1 de diciembre de terminar la capa número 57. Al terminarse la capa, dio orden de subir, una a una, las placas de cadmio que controlaban el sistema y medir los neutrones. Cuando solamente faltaba una placa por sacar, estaba claro que si se extraía el reactor se haría crítico. Anderson, siguiendo las instrucciones de Fermi y fiel a la palabra dada, resistió la tentación, man-

dó bajar todas las placas de cadmio y envió a todo el mundo a su casa incluido él mismo.

En la mañana del día 2 de diciembre, extremadamente frío en Chicago, Fermi se reunió con su gente y otros invitados para que asistiesen al acontecimiento. Fermi había dibujado un gráfico con sus predicciones del contaje de los detectores de neutrones de trifluoruro de boro que le permitían calcular el factor k , en función del estado de extracción de las placas de cadmio y dio orden de ir subiendo las placas y medir el flujo de neutrones. Todo se iba cumpliendo con arreglo a sus predicciones.

Para mayor seguridad, Fermi había elegido al más forzudo de sus colaboradores para que, en caso de urgencia, cortase con un hacha la soga que sujetaba unas placas auxiliares de cadmio con objeto de detener la reacción lo más rápidamente posible. Los sistemas de seguridad además contaban con contadores muy sensibles de neutrones, un sistema automático que contaba neutrones y, si se excedía un cierto flujo, disparaba un solenoide que hacía caer

Los comienzos de la era nuclear

placas de cadmio. Poco antes de la hora de comer, Fermi dijo que tenía hambre y ordenó, ante el nerviosismo y la expectación de todos los asistentes, que se parasen los trabajos y se fuese todo el mundo a comer.

A la vuelta, Fermi puso el sistema como Anderson lo había dejado la tarde anterior y dispuso que se extrajese la última placa de cadmio a mitad de altura. Con su regla de cálculo comprobaba si los contadores reflejaban sus predicciones, el sistema estaba a punto de ser crítico pero aún no lo era. La barra de control se fue subiendo en pequeños intervalos de seis pulgadas. En el lugar se acumuló una cuarentena de personas, nadie hizo una fotografía pero, con arreglo a las tradiciones de la época, es de suponer que todos estaban con corbata, chaqueta y elegantemente vestidos. Fermi ordenó que se subiera 6 pulgadas la barra de control, unos cuantos instrumentos de medida saltaron y tuvieron que ser de nuevo ajustados, los contadores seguían reflejando exactamente las previsiones calculadas por Fermi. Al subir otras seis pulgadas se tuvieron que desconectar los sistemas automáticos de control para que la reacción no se detuviera. Fermi ordenó finalmente que se subiera la barra 12 pulgadas y, tras un breve cálculo, anunció que el sistema había alcanzado la criticidad. Todo el mundo lo creyó. Para sorpresa de todos los presentes, Fermi no ordenó parar inmediatamente la pila, esperó durante 4,5 minutos y ordenó la parada, eran las 15:53. El sistema había desarrollado una potencia de 0,5W. Wigner cuenta que:

“La primera reacción nuclear en cadena automantenida realizada por el hombre había tenido lugar. El camino hacia la energía nuclear y la producción masiva de plutonio quedaba abierto.”

“nada espectacular había sucedido, nada se había movido, la pila no produjo ningún sonido, cuando las barras se bajaron y se dejaron de oír los impulsos de los contadores se hizo un gran silencio. Todos habíamos anticipado el éxito del experimento pero éramos conscientes de que habíamos desbloqueado un gigante con unas consecuencias que no podíamos prever”. La primera reacción nuclear en cadena automantenida realizada por el hombre había tenido lugar. El camino hacia la energía nuclear y la producción masiva de plutonio quedaba abierto.

La historia nuclear es muy larga. En Hanford, Seattle, se construyeron nuevos reactores, de uranio natural y grafito, destinados a la irradiación de uranio para producir el $^{239}_{93}\text{Pu}$. En junio de 1944, el grupo anglo-americano dirigido por Sir John Crokoff construyó en Chalk River un reactor de uranio natural y agua pesada que alcanzó la criticidad en 1945. En 1947 lo hacía el primer reactor británico y en 1948 lo hizo Zoe, el primer reactor francés. Las aplicaciones

pacíficas de los reactores no se realizaron hasta diciembre de 1963, cuando la Jersey Central Power and Light encargó a General Electric la construcción de una central de agua en ebullición, estrictamente comercial, para producir energía eléctrica. La historia del Proyecto Manhattan y del uso de los reactores para la propulsión naval, tanto militar como civil, se sale del propósito y la extensión de este artículo.

AGRADECIMIENTOS

Es un placer expresar mi gratitud a mi esposa y a mi buen amigo Santiago Rodríguez Vallejo que con sus sugerencias y consejos han contribuido a la mejora del texto.

Rafael Núñez-Lagos

Miembro del Senatus Científico
Dpto. de Física Teórica
Facultad de Ciencias
Universidad de Zaragoza

REFERENCIAS

Un excelente libro que trata en detalle todo el desarrollo de la fabricación de las bombas nucleares americanas es de Richard Rhodes, *“The making of the atomic bomb”*, publicado por Simon & Schuster ISB 0-671-65719-4, 1988. De él se han obtenido muchas de las citas.

En Internet se pueden también encontrar muchas referencias y artículos.

1. Bohr N. (1936), “Neutron capture and nuclear constitution” Nature 137, 330 y 344.
2. Bohr N. and Kalckar F. (1937), Danske Selbskab. Math. Phys. Medd. 14, Num 10.
3. Noddack I. (1934), “Sobre el elemento 93” Zeitschrift fur Angewandte Chemie 47: pp. 653.
4. Bohr N. and Wheeler J. (1939), Phys Rev 56 426.

Laboratorios de Chalk River (Canadá).

<http://es.wikipedia.org>

