

ENERGIA NUCLEAR FUNDAMENTOS

José Maldifassi Pohlhammer

Teniente 1°

Decimos dulce, decimos amargo, decimos caliente, decimos frío,
decimos calor, pero en realidad no hay más que átomos y vacío.

DEMOCRITO

De Demócrito al siglo xx

El atomismo tiene sus orígenes en los antiguos filósofos griegos, de los cuales Demócrito es el que representa el nacimiento de esta concepción que intenta explicar la constitución de la materia.

Debido a la predominancia de la filosofía teocrática a partir de la difusión del catolicismo en la Europa del medioevo, gran parte de los avances conceptuales relativos al materialismo obtenidos por los filósofos de la antigua Grecia fueron dejados en el olvido, y solamente los alquimistas se dedicaron en forma sistemática y con gran ahínco al estudio de los fenómenos químicos; algunos, incluso llegaron a ser sacrificados en la hoguera acusados de prácticas heréticas.

Sólo a partir del siglo XVIII, con la aparición del protestantismo en Europa central, es posible observar el surgimiento de las investigaciones que darían lugar a la nueva ciencia, la cual a partir del estudio de la naturaleza y sus fenómenos, comienza a adentrarse cada vez en forma más profunda en la materia y sus misterios. La antigua concepción de que el universo se compone de agua, tierra, fuego y aire se desmorona al reconocerse que la materia es única y que el resto son manifestaciones de sus diferentes estados físicos.

A partir de laboriosos trabajos, experimentos y mediciones relativas a las posibles combinaciones de diferentes "elementos puros" conocidos en esa época fue posible establecer, mediante la química, uno de los pilares fundamentales de la ciencia moderna. Usando dicha metodología, el químico inglés John Dalton, en 1803, llegó a la conclusión que la materia está constituida por pequeños corpúsculos independientes entre sí e imposibles de dividir; basado en las concepciones de Demócrito, los rebautizó como átomos.

La semejanza entre los comportamientos químicos y la diferencia en los pesos relativos de los elementos puros conocidos condujo al químico ruso Mendelejef, en 1869, a establecer la primera ordenación de los mismos, dando lugar a la "tabla periódica", en la cual cada uno de ellos ocupa un lugar específico. Debido a diversas circunstancias, algunos de esos espacios quedaron vacíos y el desarrollo posterior de la investigación química ha permitido la identificación de los elementos faltantes originalmente. Si bien la tabla periódica es conceptualmente correcta, fue necesario el descubrimiento del neutrón para revolver la naturaleza de ciertas incoherencias aparentes relativas a irregularidades en pesos atómicos de ciertos elementos.



MARIA CURIE

Al estudiar ciertas propiedades de algunas sales de uranio que producían fosforescencia en la oscuridad, y la ionización de los gases, se puede decir que el físico francés Becquerel descubrió la radiactividad en 1896. Un profesor de París llamado Pierre Curie y su joven esposa polaca Marie, comenzaron a investigar qué otras sustancias tendrían las mismas propiedades que las sales empleadas por Becquerel.

Después de más de tres años de investigación, los esposos Curie lograron separar del óxido de uranio el elemento que tan famosos los haría, el radium, que en iguales concentraciones que el uranio era capaz de producir efectos millones de veces más intensos. A partir de ese año, 1898, se abrió el camino para la investigación de los elementos radiactivos, el número de los cuales

crecería rápidamente. En 1903, los esposos Curie y Henri Becquerel recibieron el Premio Nobel. Después de la repentina muerte de su esposo en 1906, Marie Curie continuó sus investigaciones y recibió nuevamente el mismo galardón en 1911. Falleció a la edad de 66 años, víctima de los efectos de la radiación de las sustancias con las que había trabajado tanto tiempo, efectos desconocidos a esa fecha.

Con los trabajos de los esposos Curie fue posible identificar la radiactividad natural, fenómeno del cual están dotados solamente los elementos químicos pesados. Estos átomos son en sí mismos eminentemente inestables y se desintegran espontánea y aleatoriamente, proyectando partículas y energía por el espacio que los rodea, dando nacimiento a un átomo de otro elemento, diferente del que lo engendró. Debido a su carácter de aleatoriedad, la concentración de estos átomos radiactivos invariablemente presenta un decrecimiento exponencial en el tiempo, donde la velocidad de desintegración es particular para cada elemento, variando entre millonésimas de segundo a cientos de miles de años.

Al desintegrarse, los elementos radiactivos decaen emitiendo lo que en 1900 se denominaban rayos alfa (α), beta (β) y gama (γ). Posteriormente se comprobó que estos "rayos" correspondían, respectivamente, a núcleos de helio, electrones y fotones, todos ellos expulsados del núcleo con una alta energía cinética, y que por lo mismo son capaces de atravesar barreras de diferentes materiales y espesores (blindajes), en forma inversamente proporcional a su masa, esto es, se requiere un blindaje mucho mayor para radiación gamma que para alfa, para una misma energía.

De este modo se llegaba al siglo xx con una nueva concepción atomística de la constitución de la materia, pero en esta oportunidad basada en estudios científicos, la cual estableció la base para el edificio de la física moderna, en particular de la física nuclear y posteriormente de la energía atómica.

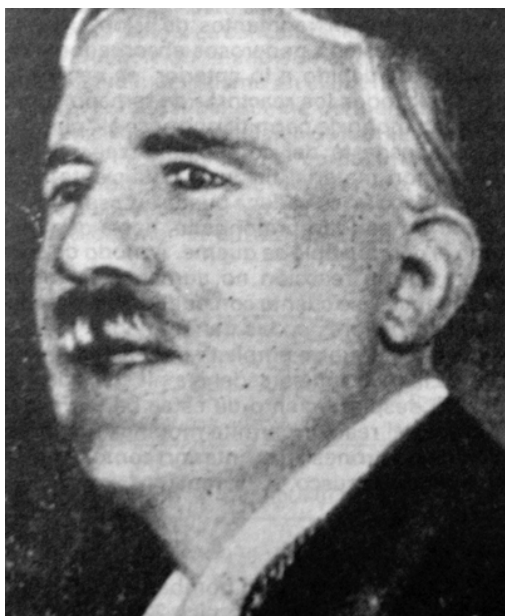
El neutrón, los isótopos y la fisión nuclear

En 1911, Rutherford postuló que el átomo no era un cuerpo único e indivisible, como había postulado Dalton, sino que consistía en un centro de gran masa cargado positivamente debido a la presencia de los protones, y que rodeando al mismo, en forma de una nube,

estaban los electrones de carga eléctrica negativa. Debido a su similitud con las órbitas de los planetas en torno al Sol, a esta postulación se la conoció como "modelo planetario". Si bien su importancia fundamental radica en la división del átomo, esta teoría presentaba conceptos equívocos relativos a la masa del núcleo, que no serían aclarados y corregidos hasta 30 años más tarde.

A partir de experimentos efectuados por la hija de los esposos Curie y su esposo Joliot, quienes no pudieron dar una explicación convincente de sus resultados, James Chadwick, en 1932 postuló la existencia del neutrón, partícula de masa similar a la del protón, pero que por carecer de carga no había sido descubierto mediante las técnicas experimentales empleadas en esa época, basadas en mediciones y desviaciones de campos y cargas eléctricas. Su existencia fue demostrada mediante el uso de la entonces recién inventada "cámara de niebla". Con el descubrimiento del neutrón quedaba completa la estructura fundamental del átomo de Rutherford y su modelo planetario.

Otra de las significaciones que trajo consigo el descubrimiento del neutrón es que permitió explicar la ocurrencia de ciertos pseudo elementos que, teniendo las mismas propiedades químicas que los elementos fundamentales conocidos, poseían un diferente peso atómico que éstos. Con la existencia del neutrón fue posible demostrar que estos pseudo elementos eran los mismos conocidos hasta la fecha, pero que teniendo una diferente cantidad de neutrones en su núcleo tenían un peso atómico diferente de los originales. Estos "isótopos", como fueron denominados, incluso permitieron clarificar incoherencias en pesos atómicos de algunos elementos de la tabla periódica de Mendelejev, que se mencionaron antes.



ERNESTO RUTHERFORD

El físico italiano Enrico Fermi logró emplear en forma satisfactoria neutrones para bombardear átomos de elementos estables, con lo cual logró obtener los primeros isótopos radiactivos inexistentes hasta ese momento en la naturaleza (radiactividad inducida). Usando neutrones de baja velocidad, Fermi logró también obtener elementos más pesados que el uranio, el más pesado existente en la naturaleza, dando lugar a los elementos transuránicos, la totalidad de los cuales son radiactivos. Su trabajo le valió en 1938 el Premio Nobel de Física, y ese mismo año debió emigrar a los Estados Unidos por motivos políticos.

El físico alemán Otto Hahn logró determinar experimentalmente que como producto del bombardeo del uranio con neutrones lentos o "térmicos" de baja energía cinética, como los empleados por Fermi, se obtenía una cierta cantidad de elementos más livianos que el uranio, que se debían al rompimiento o "fisión" del núcleo del uranio en dos fragmentos más livianos, junto con lo cual se generaba una cantidad considerable de energía. Era el inicio de la era nuclear, en 1938.

Estudios teóricos posteriores demostraron que en el uranio natural empleado para las experiencias de Fermi y Hahn existían dos isótopos, uno de masa atómica 238 en una concentración de 99,2%, y otro de masa atómica 235 en una concentración de 0,71 %, siendo este último el que efectivamente se fisionaba con los neutrones lentos. La naturaleza

se mostraba egoísta, ya que el isótopo U235 era el más escaso de los dos y el que efectivamente servía, y, por otro lado, protectora, ya que de haber sido el isótopo de alta concentración (U238) el que se fisionaba durante los experimentos se podrían haber producido accidentes de consideración, con grave peligro para los experimentadores.

Conocedor de los resultados obtenidos por Hahn, Fermi sugirió que como producto de la fisión también se producían neutrones, los que convenientemente desacelerados mediante choques elásticos con otros núcleos más livianos (moderador), podrían a su vez dar lugar a otras fisiones, generándose una reacción en cadena autosostenida, la que si ocurre a un ritmo considerable de fisiones por segundo es capaz de generar grandes cantidades de energía, "para propulsar máquinas o fabricar superbombas", a decir del mismo Fermi.

Los reactores nucleares

Por reactor nuclear se entiende un arreglo de material combustible (alguna forma de uranio), una cierta cantidad de material de bajo peso atómico (moderador) que permite reducir la velocidad de los neutrones de alta energía que se producen en la fisión, un sistema de control que cuenta con una cierta cantidad de material fuertemente absorbedor de neutrones, y material de estructuras y soportes, todo esto en una proporción tal, que es capaz de mantener una reacción de fisión en cadena. No por el hecho de juntar estos componentes en cantidades aleatorias se obtendrá un reactor nuclear capaz de operar; se requieren cálculos detallados para determinar las características geométricas y las proporciones relativas de los distintos componentes.

En la Universidad de Chicago, el 2 de diciembre de 1942, mediante un arreglo de planchas de grafito que hacían las veces de material moderador y esferas de uranio natural que hacían de combustible, Fermi logró producir la primera reacción en cadena autosostenida y controlada, con lo cual se dio inicio a la investigación de las aplicaciones de los reactores nucleares. El reactor de Fermi, posteriormente fue desmantelado y llevado a la Universidad de Stanford, donde pasó a ser empleado para la producción de plutonio para el programa Manhattan, destinado a la fabricación de la primera bomba atómica.

Existe un tamaño de reactor llamado "crítico", el cual corresponde al menor tamaño de una mezcla específica de combustible y moderador, debajo de la cual la cantidad de neutrones que físicamente escapan o se pierden es tal, que el reactor no estará en condiciones de autosostener la reacción en cadena. Por sobre ese tamaño crítico, sin control adecuado, la población de neutrones no solo se mantendrá, sino que además crecerá en forma exponencial indefinidamente configurando lo que se denomina un tamaño "supercrítico". El tamaño crítico depende en gran medida de la cantidad de material fisionable disponible para la reacción en cadena. A mayor cantidad de material fisionable con neutrones lentos, menor será el tamaño crítico para ese reactor particular, existiendo eso sí, un valor mínimo de la masa de U235 puro capaz de automantener una reacción en cadena sin necesidad de moderador. A esa masa mínima se le llama "masa crítica", y es la cantidad mínima de material fisionable para fabricar una bomba.

Por lo antes mencionado los reactores que requieren un menor espacio, como los adecuados para la investigación o los de submarinos nucleares, para operar necesitan una mayor proporción del isótopo 235, que el que se encuentra en el uranio natural, empleándose en estos casos uranio "enriquecido" con este isótopo particular.

Si fuera posible construir un reactor exactamente crítico, esta condición perduraría solamente un corto lapso, pues lo que en un comienzo es combustible, después de fisionarse se transforma en fragmentos de fisión, algunos de los cuales son poderosos absorbedores de neutrones; debido a lo anterior, es necesario construir todos los reactores de tamaño súper crítico, a modo de permitir que pese al "quemado" o desgaste del combustible sea posible contar con material fisionable suficiente para que la reacción en cadena pueda autosustentarse por un período prolongado, hasta que casi todo el combustible se quemé. A modo de controlar que la reacción no aumente en forma exponencial, se cuenta con poderosos materiales absorbedores en las denominadas "barras de control", que se emplean para ajustar el ritmo de la reacción en cadena a niveles adecuados. El desplazamiento de estas barras por el interior del reactor permite modificar la población de neutrones en su interior, como también su apagado brusco, o "scram".

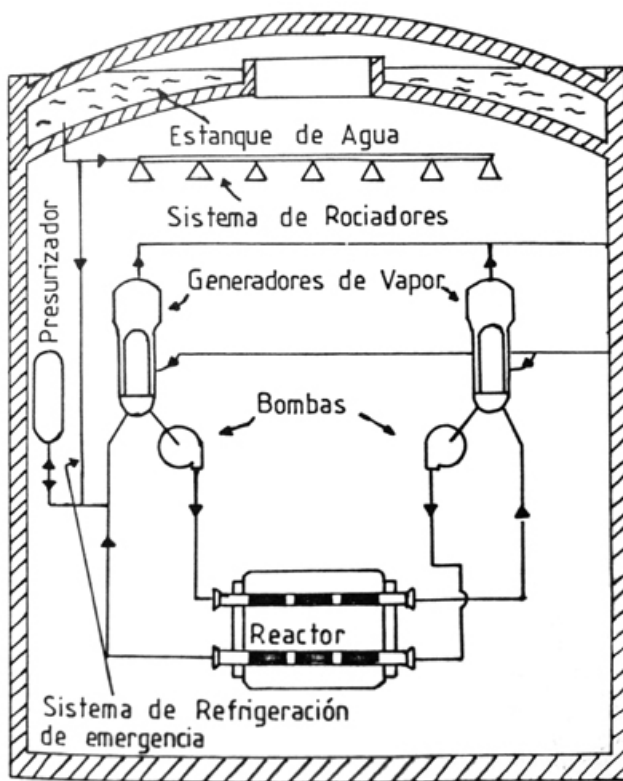


DIAGRAMA SIMPLIFICADO DEL REACTOR TIPO CANDU

El plutonio

Como producto del bombardeo del isótopo del uranio de peso atómico 238 con neutrones de energía levemente superior a los lentos o "términos" de Fermi, al capturar un neutrón éste se convierte en el isótopo del elemento transuránico plutonio, de peso atómico 239; (Pu239). Una de las principales características de este elemento creado en forma artificial es su elevada probabilidad de fisionarse con neutrones térmicos, que lo convierte en un excelente combustible nuclear, no sólo para reactores sino que también para bombas nucleares. Por su elevada toxicidad y radiactividad es extremadamente peligroso, todo lo cual hace que su tratamiento y manipulación deba ser efectuada bajo estrictas normas de seguridad y radioprotección.

La diferencia química con el uranio y el resto de los elementos permite su separación del combustible quemado mediante procesos químicos relativamente convencionales (reprocesamiento y recuperación), facilitando su recuperación sin la necesidad de contar con equipos y procesos de separación de muy elaborada tecnología, como son los métodos de enriquecimiento del uranio. El Pu239 así recuperado puede ser usado como material fisionable para alimentar otros reactores, o como explosivo para poderosas bombas nucleares.

Cabe hacer presente que en el combustible ya quemado junto con el Pu239 también aparece el isótopo Pu240, el cual posee características análogas al U238, esto es, que no se fisiona con neutrones lentos. La concentración del Pu240 en el combustible quemado aumenta con el tiempo de estadía del mismo en el interior del reactor, y el combustible que ha permanecido tres años en el interior del núcleo de los reactores de potencia de agua ligera, como moderador, combustible levemente enriquecido en U235, posee tal

concentración de Pu240 que no es posible obtener la pureza de Pu239 necesaria para fabricar bombas atómicas. Para el caso de los reactores tipo CANDU, de uranio natural como combustible y agua pesada como moderador, la estada del combustible en su interior es mucho menor, del orden de un par de meses a los más, por lo que su combustible quemado podría servir para obtener Pu239 de pureza suficiente para fabricar bombas nucleares.

La fusión nuclear

El mecanismo de la fusión consiste en una reacción en la cual dos átomos livianos se unen para dar lugar a otro más pesado, junto con la emisión de neutrones y de una gran cantidad de energía. Las condiciones bajo las cuales es posible que se produzca este tipo de reacciones son extremadamente difíciles de alcanzar, siendo la más importante de ellas la obtención de temperaturas del orden de millones de grados Celsius.

Las reacciones de fusión se pueden lograr con diferentes elementos livianos, pero incide notablemente la temperatura para que la reacción sea automantenida; se denomina a esta la "temperatura crítica de autoignición". Con las temperaturas que ha sido posible lograr en los más avanzados reactores de fusión, del orden de los 10 millones de grados Celsius, la única reacción posible de ocurrir es la que se presenta al unir los isótopos del hidrógeno, deuterio y tritio, para dar lugar a un átomo de helio y un neutrón, además de la energía correspondiente.

La elevadísima temperatura de operación es requerida para que los núcleos de los átomos que reaccionan vibren con elevadas velocidades, logrando que en estas vibraciones sean capaces de sobreponerse a la fuerza de repulsión de Coulomb, debida a la igual carga de los protones, y entren en contacto físico dando lugar a la fusión consiguiente. En los laboratorios de investigación, para alcanzar esas elevadas temperaturas y lograr el confinamiento de la mezcla de gases dentro de recipientes de reacción, el deuterio y el tritio están sometidos a una presión extremadamente baja, del orden de 10^{-5} a 10^{-6} veces la atmosférica. A esta baja presión y elevadísima temperatura los electrones se han separado totalmente de los núcleos, dejando al gas totalmente ionizado, en una condición de la materia denominada "plasma", consistente en una nube neutra en la cual vagan núcleos y electrones libres entre sí.

Debido a su muy particular naturaleza, el plasma es muy difícil de confinar, y gran parte de la ingeniería de los reactores de fusión está abocada a producir las condiciones necesarias para que una vez calentado no entre en contacto con las paredes del recipiente y además que no escape de la zona donde se estaría produciendo la reacción de fusión. Lo anterior se ha logrado parcialmente mediante campos magnéticos de elevada intensidad que dan lugar a paredes inmateriales de confinamiento magnético. A la fecha se ha logrado alcanzar tiempos de confinamiento del plasma del orden de los 10 microsegundos, lapso durante el cual el plasma es enriquecido o alimentado de combustible mediante la inyección de gas o de balines de hidrógeno sólido, que contienen deuterio y tritio. El calentamiento se ha logrado mediante haces de partículas, o mediante la generación de ondas de radio de muy alta frecuencia. Debido a las elevadas cantidades de energía que se generan en las reacciones de fusión, se le han buscado otros usos. Al detonar una bomba de "fisión" en base a U235 o Pu233, se producen temperaturas y presiones elevadísimas, condiciones adecuadas para la existencia descontrolada de una reacción de "fusión". La bomba termonuclear opera de esta forma. Un explosivo químico de alto poder produce una masa supercrítica de material fisionable, el que al estallar da lugar a las condiciones adecuadas

para que se realice la explosión de fusión. De esta forma es posible obtener potencias de detonación mucho mayores que las alcanzadas con las bombas de fisión.

Conclusiones

Se ha presentado una breve historia y descripción de los procesos y reacciones mediante las cuales es posible utilizar la energía almacenada en el interior de los núcleos atómicos, como también de las características fundamentales de la radiactividad y de los isótopos.

BIBLIOGRAFIA

- BERNSTEIN, JEREMY: *The elusive neutrino*, U.S. ERDA., 1969.
- COOPER, ANTHONY: *The status of the magnetic fusion energy Programme*", II Simposio Interuniversitario de Energía, Santiago, Chile, 1983.
- GLASSTONE, SAMUEL: *Sourcebook on atomic energy*, Van Nostrand Reinhold, 1976.
- GLASSTONE y SESONSKE: *Ingeniería de reactores nucleares*, Ed. Reverte, 1968.
- *Los átomos*, Ed. Salvat, 1979.
- PAP, DESIDERIO: *Historia de la ciencia en el siglo xx*, Ed. Universitaria, 1984.
- *The first reactor*, U.S. ERDA, 1967.

