

# ENERGIA NUCLEAR

JUAN M. PARDO

Profesor de la Facultad

En nuestros textos ordinarios de Química General hemos considerado las reacciones nucleares de una manera somera y resumida, sin preocuparnos del balance riguroso cuantitativo de la masa y la energía.

En primer término, denominamos reacciones nucleares, aquellas que algunos textos como el de Babor y Lehrman (por ser el más conocido), llaman "desintegración artificial"; "radioactividad artificial" o conocidas desde un principio como "transmutaciones". En general, las transmutaciones y la Radioactividad tanto natural como artificial, y posteriormente la "fisión nuclear" pueden considerarse como reacciones nucleares. Hay quienes comparan estos fenómenos nucleares con los fenómenos químicos comunes y establecen una estrecha analogía, un paralelismo, de donde proviene la denominación de "reacciones nucleares".

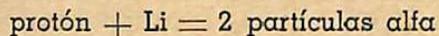
*Energía nuclear.* El fundamento de estas consideraciones es el de la *equivalencia de la masa* y de la energía, el cual fue establecido para los fotones y la energía cinética de los electrones (Consúltese Foundations of Modern Physics, por Thomas B. Brown, de John Wiley & Sons), Secciones 107 y 212. En la sección 224 de la misma obra, se encuentra algo sobre la creación y destrucción de electrones. En todos estos casos la equivalencia de masa y energía se expresa por la relación

$$\text{masa} \times c^2 = \text{energía} \quad (1)$$

La masa (m) suele darse en gramos; (c) es la velocidad de la luz expresada en centímetros; (E) es la energía en ergs.

Con este principio surge una aclaración con respecto a la Ley de la conservación de la masa y de la energía. Ambas son incompletas a menos de que se entienda y se incluya en la una *masa de energía* y *energía de masa* en la otra.

*Masa de energía potencial.* Veamos una ilustración de esta Ley, en el experimento de Cockcroft y Walton (Sección 234 de la obra citada arriba) y que puede hacerse extensivo a todas las formas de energía:



El litio empleado aquí es un isótopo, el más abundante, de número de masa 7 y de masa nuclear 7.0165. La masa del protón es 1.00076; la de la partícula alfa 4.0028. Todas estas masas han sido medidas con el espectrógrafo de masa de una manera muy precisa. Y el balance general es el siguiente:

$$\begin{array}{r}
 1.0076 + 7.0165 = 8.0241 \\
 \text{(masa total antes de la reacción)} \\
 2 \times 4.0028 = 8.0056 \\
 \text{(después de la reacción)}
 \end{array}$$

Se constata una pérdida de 0.0185 unidades de masa (1). Qué ha sido o se ha hecho esta masa? La respuesta la hallamos en la trayectoria de las partículas alfa captada en las fotografías de la cámara de vapor de agua sobresaturado. La energía cinética del recorrido de estas partículas se puede computar en 8.5 Mev para cada una (2), o 17 Mev equivalentes a 0.0183 unidades de masa, para ambas. Cuando dos partículas, tales como estas partículas alfa, se apartan en virtud de su repulsión mutua, pierden energía potencial en una cantidad igual a la energía cinética ganada, y este experimenta prueba que esta pérdida de masa es exactamente la *masa de la energía potencial*, que se ha perdido. (La diferencia, menor del 2 por ciento, está dentro del error experimental).

La equivalencia de masa para la energía potencial, ha sido verificada cuidadosamente para otras reacciones nucleares, de modo que el autor mencionado concluye: "La ley de la equivalencia entre la masa y la energía (de cualquier clase), se puede considerar hoy una de las leyes fundamentales de la Física.

"*Binding Energy*". Sería la energía por concepto de ligarse una partícula nuclear a otra, como energía de unión o de ligadura, por este motivo lo dejamos en su versión original.

Consideremos, por ejemplo, el núcleo del helio, el cual consta de dos protones y de dos neutrones. Las masas de estas partículas son 1.0076 para cada protón, 1.0089 para cada neutrón, y 4.0028 para el núcleo de helio. La masa antes de la combinación es 4.0330, y sólo 4.0028 después. La pérdida en masa es 0.0302 unidades, y esta masa es la energía potencial perdida cuando cuatro partículas han venido a juntarse, a unirse o ligarse. Esto equivale a 29 Mev o  $45 \times 10^{-6}$  ergs (3). La magnitud de esta energía perdida se aprecia mejor si computamos la energía liberada para un átomo-gramo, o 4.003 gramos de helio. La masa perdida es entonces 0.030 gramos, cantidad que se puede apreciar en una balanza de mediana precisión, y aplicando la fórmula (1), la energía liberada es  $0.030 \times c^2$  ergs, o  $27 \times 10^{18}$  ergs. Esto equivale a 750,000 kilowatt-hora por gramo de helio.

*Potencia nuclear.* Se ha visto que la formación de un gramo de helio a partir de protones y neutrones, deja en libertad una cantidad de energía que asombra la imaginación. Cuáles son las posibilidades de utilización de ésta y acaso otras reacciones nucleares (mejores) como fuentes de potencialidad comercial? Desde el descubrimiento de la radioactividad los científicos han sido asediados con interrogantes de esta naturaleza, y hasta 1940 la respuesta era de que ninguna reacción nuclear se conocía que llenara los requisitos o condiciones especiales como fuente de potencia.

Para comprender cuáles son estos requisitos, consideremos las fuentes prácticas de potencia suministradas por las reacciones químicas, tales como la combustión de madera, carbón o gasolina. Dos requisitos son indispensables. El primero, o sea que el nivel energético de los productos de la reacción sea menor o inferior al nivel energético de las sustancias reactantes, tales como el combustible y el oxígeno. En términos termodinámicos diríamos que haya

energía libre, máxime si esta energía es liberada en forma térmica. El segundo requisito que se mantenga la reacción por sí misma una vez iniciada. A tales reacciones se les llama "reacciones en cadena", y permiten el consumo de todo el combustible. Algo más con relación a este segundo requisito, debe ser controlable para iniciarla, suspenderla o que proceda a velocidad deseable; no debe morir ni proceder con violencia explosiva.

Tratándose de reacciones químicas, la exposición anterior es muy clara, aunque siempre hay una diferencia y es, la de que en este campo imperan las leyes clásicas de la conservación de la masa y la energía, pues las pérdidas de masa no son apreciadas por la balanza de mayor precisión (4). En cambio, en el campo nuclear las relaciones de masa a energía son mayores y por tanto mayor su efectividad como fuente de energía.

Muchas reacciones nucleares satisfacen el primer requisito y con diferencia de niveles considerables. Las dificultades residen mayormente en el segundo requisito. Consideremos la reacción de nuestro ejemplo. La cantidad de energía liberada por cada exposición nuclear es relativamente grande, pero el proceso no se mantiene por sí solo. Cada explosión debe ser determinada por un protón bombardeante, y el número de protones que logran el impacto es un débil porcentaje del rayo total de protones. Las reacciones con el neutrón ofrecen mayores posibilidades de éxito, pero requieren neutrones suministrados de una fuente externa, con un gasto de energía superior al producido por las mismas. Sin embargo, con el descubrimiento de la "fisión nuclear" lo anteriormente expuesto queda dentro de las posibilidades de este fenómeno al cual se la ha dado suma importancia.

*Fisión nuclear.* A comienzos de 1939 Otto Hahn y F. Strassmann, en Alemania, descubrieron trazas de bario radioactivo en el uranio bombardeado por neutrones, y L. Meitner y O. R. Frisch hallaron la explicación correcta: "este bario representaría fragmentos del núcleo de uranio el cual se habría roto espontáneamente con la captura de neutrones". Muchos físicos alemanes se encontraban en la Conferencia anual de Física Teórica en Washington, en Enero de 1939. El profesor Bohr fue enterado de esto privadamente. Inmediatamente los trabajadores de los laboratorios de física nuclear de EE. UU. propusieron comprobar esta noticia, y antes de que se terminara la Conferencia, fue confirmado este descubrimiento por observaciones directas de los fragmentos en los laboratorios de Carnegie Institution of Washington, Johns Hopkins University, Columbia University, y California University. Bien pronto se demostró que el torio y el protoactinio, como los dos isótopos del uranio, pueden sufrir este proceso de ruptura nuclear, el cual se conoce con el nombre de *fisión nuclear* (5).

Tenemos al Uranio 235 que es un isótopo del 238, y que está en la proporción de 0.7% con relación al último en la naturaleza. Este isótopo es el responsable de la fisión nuclear observada. Sobre el mecanismo de esta fisión ya la veremos posteriormente, nos interesa entretanto la energía liberada.

Al romperse el  $U^{235}$  por neutrones lentos, nos dá elementos comprendidos entre los números atómicos 34 y 57 (desde el Silencio hasta el Lantano), elementos que resultan radioactivos y sufren por consiguiente ulteriores transformaciones. De esto también se dará cuenta luego. El nivel energético de este uranio como el del Torio, Protoactinio y los transuránicos (véase más adelante), es superior al de estos elementos que ocupan la posición intermedia en la clasificación periódica. "The binding factor" que no hemos explicado pero que el

lector puede entenderlo por la consideración siguiente, es de 7.4 Mev por nucleón de uranio (6), y cerca de 8.8 Mev por nucleón para los elementos intermedios. La diferencia es de 1.4 Mev por nucleón. Desde que hay 235 nucleones en el  $U^{235}$ , la energía total liberada al romperse el núcleo de  $U^{235}$ , es aproximadamente  $235 \times 1.4$  Mev o 330 Mev. Sin embargo en el proceso real no tiene esta eficiencia debido a que los fragmentos inmediatos son núcleos radioactivos cuyos "binding factors" son menores que los de aquellos estables formados ulteriormente. Pero el promedio de energía liberada es cerca de 200 Mev por cada átomo de uranio, o 22.000 kilowat-hora por gramo de uranio.

*Reacción nuclear en cadena.* El descubrimiento de este proceso de fisión nuclear ha originado nuevas esperanzas en el desarrollo de fuentes prácticas de potencia nuclear o energía atómica. Es significativo con especialidad un factor: Cada fisión deja en libertad muchos nuevos neutrones. Si estos nuevos neutrones pueden a su vez producir fisión en otros núcleos, entonces una reacción en cadena puede ser posible, todo depende de que los neutrones producidos o su promedio no deje morir la reacción, se mantenga constante, pues si es progresiva puede llegar a la explosión con violencia.

El núcleo del uranio 238, se rompe solamente cuando captura neutrones rápidos, entonces la probabilidad de captura es muy baja, y una reacción en cadena es muy difícil producirla. Condiciones similares existen para el Torio y el Protoactinio. Por el contrario, la fisión del núcleo del  $U^{235}$ , se produce por neutrones lentos (7), y el proceso es tan efectivo que una reacción en cadena es posible. Pero para que esto se pueda llevar a cabo es necesario que un nuevo núcleo de  $U^{235}$  aproveche estos neutrones libres, de manera que produzca nuevas fisiones y así continúe de manera que sea controlable esta reacción en cadena. El  $U^{235}$  debe estar en una alta concentración o puro, pero sucede que en el uranio común y corriente, se halla el  $U^{238}$  en la proporción de 99,3%, desvirtuándose toda posibilidad de que la reacción continúe. Se hace necesario la concentración del  $U^{235}$ , proceso que se describirá luego.

*Separación del  $U^{235}$ .* Coexistiendo en tan bajo porcentaje la obtención de una cantidad apreciable de este isótopo, exige gigantescas cantidades de  $U^{238}$ . Además de esta condición, se tiene el problema de su separación. Tiene el gravísimo inconveniente de que un isótopo no difiere de otro (del mismo elemento) sino en masa, siendo sus propiedades químicas iguales, y quedando por tanto excluidos todos los métodos químicos de separación o purificación. Se debe recurrir únicamente a los métodos de orden físico o químico-físicos, lo cual constituye una operación de mayor dificultad y costo. Uno de esos métodos es por difusión gaseosa de un compuesto denominado hexafluoruro de uranio. Está fundamentado en la ley de Graham de difusión de los gases.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{M_2}}{\sqrt{M_1}}$$

El proceso tiene que verificarse repetidas veces, y los dispositivos industriales para lograr un  $U^{235}$  de 99% constituyen las gigantescas instalaciones de Oak Ridge, Tennessee, parte de una ciudad construida expresamente.

El empleo del espectrógrafo de masa no es industrial sino de laboratorio, separa el 100% cualquier isótopo, pero su rendimiento es pequeño. Al espectrógrafo empleado para este fin se le dio el nombre de Calutrón, pues el mag-

neto mide 184 pulgadas de diámetro, y es el ciclotrón de la Universidad de California, de ahí su nombre.

Se puede separar por centrifugación en centrífugas de ultra-alta velocidad; por difusión térmica, etc.

*Pila Atómica.* Dejamos de considerar la bomba atómica, empleada con fines militares(9), para detenernos más bien en la pila atómica como fuente de energía en un futuro no lejano.

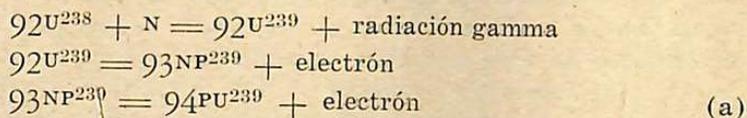
En primer término se necesita una fuente de neutrones, suministrada por una cantidad regular de  $U^{235}$ , que esté por debajo de una cantidad crítica, pues al ser aprovechados todos los neutrones de la primera fisión, luego los otros de las sucesivas fisiones, la cantidad de energía liberada sería tan enorme y el transcurso del tiempo tan pequeño, que los efectos serían de carácter explosivo (bomba atómica). Estos neutrones van a obrar sobre el  $U^{238}$ , pero deben ir con baja velocidad porque ya vimos que neutrones rápidos no los captura el  $U^{238}$ . Hay necesidad de disminuir su velocidad mediante colisiones con núcleos que no los capturen hasta las velocidades llamadas térmicas (8). Grafito muy puro, purificado hasta un grado jamás alcanzado antes, se ha encontrado muy propio para este fin, así una pila atómica se construyó en la Universidad de Columbia, New York, como principio de experimentación. La primera pila atómica fue un cubo de grafito de 2.50 m. de lado, que contenía 7 toneladas de óxido de uranio en la forma de terrones los cuales se hallaban distribuidos en todo el cubo a la manera de pasas en un bizcocho. Cuando se colocó una fuente de neutrones cerca al fondo de la pila, se vio que fisión aparecía en los terrones de uranio porque aparecían una gran cantidad de neutrones como resultado de la fisión misma. Esta deducción se obtuvo del primer diseño de pila debido a Fermi. Así los neutrones rápidos, escapados de un terrón de uranio, eran detenidos o aminorada su velocidad en el grafito antes de alcanzar otro terrón del mismo, de esta manera eran capaces de producir más fisiones. En este proceso solo el  $U^{235}$  es el que se rompe, y el uranio en terrones mencionado arriba, es una mezcla de los isótopos, el  $U^{238}$  no sufre fisión, captura el neutrón lento. Los neutrones derivados de la fisión producida en esta pila, no fueron suficientes para sostener el proceso una vez que la fuente primera de neutrones era removida. Por los datos indicados, se sugirió la prevención de escape de los neutrones por las paredes de la pila, si no se escaparan estos neutrones el proceso se mantendría por sí solo. Si la pila fuera más grande, las pérdidas de neutrones sería proporcionalmente menor. De ahí que una reacción nuclear en cadena es posible si una pila es lo suficientemente grande.

De estos datos fue posible calcular el tamaño crítico de una pila que sostuviera una reacción en cadena, y en Diciembre 2 de 1942, tal pila operó con éxito en la Universidad de Chicago. Comenzó a operar por sí misma cuando alcanzó el tamaño crítico. Esta fue la primera planta de energía atómica. Su producción fue controlada y regulada por medio de tiras de acero-cadmio, el cual absorbe los neutrones muy fuertemente, introducidos dentro de agujeros que atraviesan la pila. La operación puede ser controlada o registrada introduciendo estas tiras dentro de la pila, o acelerada si se retiran. La potencia de esta primera pila fue limitada a unos pocos centenares de watts. Desde entonces se han construido bastantes pilas más poderosas como en la planta de Oak Ridge, cerca de Clinton, Tennessee y Harwell, Inglaterra, de 2.000 kw.; la de Hanford, Washington, más poderosa que las anteriores, más de 6.000 kw.

Es bastante extraño el que ninguna de estas pilas haya sido construída con el propósito de generar potencia. Son empleadas en la producción de sub-productos cuyo valor actual es mayor que el de la energía generada, ésta por ahora se está perdiendo. El propósito primario de la planta de Hanford es la producción de plutonio. La energía térmica desarrollada o liberada se disipa por el agua fluyente a través de las pilas (Río Columbia).

*Plutonio.* Es el elemento 94 de la tabla periódica. No se encuentra en la naturaleza (10), pero se produce del uranio 238 por el proceso informado antes. Es el elemento transuránico más importante, porque análogo al uranio 235, su núcleo sufre fisión con la captura de neutrones lentos.

La historia del descubrimiento del plutonio es anterior a la de la fisión nuclear. Poco después del descubrimiento del neutrón, Fermi anotó el descubrimiento de elementos radioactivos de número atómico del 93 al 97, los cuales supuso fueran creados por la captura del neutrón en el núcleo del uranio. Se ha verificado la existencia de los elementos 93 y 94 (11), conocidos con el nombre de Neptunio (Np) y Plutonio (Pu), y el desarrollo de un método para la producción de plutonio en grande escala, constituyen una de las realizaciones científicas prominentes del Proyecto Manhattan. Las reacciones nucleares que ocurren en el proceso de la producción de plutonio están representadas por las siguientes ecuaciones:



Esto significa primero, que el  $\text{U}^{238}$  captura un neutrón, siendo radiada la energía de ligadura como rayos gamma. Es esta la captura del neutrón sin fisión, el que ha sido discutido anteriormente, para lo cual hay una gran probabilidad cuando los neutrones tienen cierta velocidad intermedia (en las vecindades de 25 Mev de energía). El núcleo de  $\text{U}^{239}$  que resulta es radioactivo, emite un electrón rayo beta y volviéndose un núcleo de Neptunio. El núcleo de  $\text{Np}^{239}$ , a su turno emite un rayo beta electrón y se vuelve plutonio. Todos estos procesos radioactivos tienen muy cortos semiperíodos, de modo que el plutonio se produce con muy poca demora.

De las consideraciones teóricas se predijo, que el plutonio como el uranio 235, debe ser fisionable por neutrones de distintas velocidades, siendo más efectivas las lentas. Los experimentos verificaron esta predicción, los cuales colocan al plutonio en gran competencia con el uranio 235 como materia prima para bombas, con la condición de que este proceso pueda ser desarrollado para producirlo en suficiente cantidad. La principal ventaja sobre el uranio 235, es la de que puede ser separado del uranio 238 por medios químicos comparativamente fáciles, en vez de los procesos físicos muy difíciles necesarios para la separación del uranio 235. La otra ventaja es el rendimiento de la transformación de uranio 238, no fisionable, en plutonio, fisionable, lo cual descarga el porcentaje de consumo del uranio 235, y por tanto su costo.

*Producción de Plutonio.* La pila atómica suministra un medio muy satisfactorio de producir plutonio en grande escala; algunos de los neutrones liberados por la fisión del uranio 235 son capturados por el núcleo del uranio 238, el cual entonces se convierte en plutonio por la secuencia de reacciones mostradas en (a). En una pila diseñada para la producción de plutonio el metal uranio es confeccionado en lingotes que se insertan dentro de agujeros a lo largo de la

estructura de grafito. Estos lingotes guardados en cajas de aluminio tubular. Periódicamente estos lingotes se retiran, el plutonio extraído químicamente, y los lingotes reemplazados. También se puede extraer los sub-productos o isótopos de diversos elementos. Todas las operaciones, incluyendo el proceso químico, deben ser verificados a control remoto, para proteger a los operarios de las radiaciones intensas.

*Plantas de Energía Atómica.* Cuando se opera en las pilas atómicas para la producción de plutonio, la energía generada es un producto de deshecho, como se ha señalado anteriormente. Haciendo determinadas modificaciones en una pila atómica puede ser posible emplear esta energía para propósitos útiles. Sin embargo todavía el camino por recorrer es largo para llegar al concepto popular de la planta o central energética atómica. Desde que cantidades enormes de energía puedan derivarse de tan pequeñas cantidades de combustible nuclear, el público generalmente contempla la pequeñez del tamaño como una de las primeras ventajas de las plantas de potencia atómica. Por el contrario, las pilas atómicas deben ser de cierto tamaño crítico, si se quiere que operen, y el tamaño crítico para la materia prima o combustible atómico (uranio natural) es muy grande, requiere toneladas de uranio metálico como de grafito de la más alta calidad. Algo más, el funcionamiento de una pila genera bastante radiación activa, para las cuales voluminosas y pesadas corazas o blindaje son necesarias. La pila completa es mucho mayor por pequeña que sea que una estación o central de potencia cualquiera. Para tales propósitos debe ser de carácter práctico. Los ingenieros han computado los costos relativos del kilowatt-hora para un combustible y el de la planta mencionada. Por hoy, que los combustibles como carbón y aceite están en pleno desarrollo, la planta de potencia atómica es incapaz de competir económicamente con las viejas fuentes de energía.

El tamaño crítico de la pila puede ser reducido al aumentar la proporción de uranio 235 o de plutonio en el metal; tales pilas se llaman *pilas enriquecidas*. Pero este proceso que aumenta la eficiencia, aumenta también el costo. Es necesario también reducir el tamaño general de la pila. También puede haber la posibilidad de reacciones nucleares de condiciones más favorables que sirvan como fuente de energía.

Pero la dificultad principal reside en la naturaleza misma de la fuente energética, es decir, la radioactividad. La energía se libera en su mayor parte en forma de calor; la otra parte está representada por las diferentes radiaciones. Sobre el aprovechamiento de esta última parte, se está a una distancia considerable. Nos queda la forma térmica, y como tal se ha avocado el problema por el aspecto de las máquinas térmicas o los dispositivos térmicos. No habría inconveniente en hacer circular el fluido empleado a través de la pila; o en recurrir a dos fluidos con intercambiador de calor, pero estos fluidos se vuelven radioactivos, junto con los materiales empleados para su circulación, constituye esto un grave peligro para la seguridad y conservación de los mismos equipos y personal operario. El peligro de contaminación es por hoy la más grave dificultad en el aprovechamiento de esta energía.

Una serie de consideraciones, se halla expuesta en la revista "Nucleonics" de Noviembre de 1949, acerca de las posibilidades actuales de la energía nuclear. Es necesario, el adelanto conjunto de otras ramas de la Ciencia para que ayude a resolver problemas tales como materiales anti-radioactivos; fluidos y sustancias también anti-radioactivas; abaratamiento de la materia prima en sus

procesos metalúrgicos; aprovechamiento del torio y del protoactinio como fuentes de metales radioactivos, etc., etc.

(1) La unidad de masa es igual a  $1.66 \times 10^{-24}$  gramos, o la masa real de un átomo de hidrógeno tomado como unidad. Las unidades de masa anteriores provienen de fijar convencionalmente la masa del átomo de oxígeno en 16.000 y emplearlo como base o patrón de relación para los demás elementos.

De acuerdo con la ley de la equivalencia de masa-energía, esta masa equivale a  $1.66 \times 10^{-24} c^2$  ergs, o  $1.49 \times 10^{-9}$  ergs.

(2) Mev (mega electrón-voltio) ó  $10^6$  electrón-voltio. Desde que 1 Mev es igual a  $1.60 \times 10^{-8}$  ergs, la energía equivalente a una unidad de masa es 935 Mev, o 1 Mev es igual a 0.00107 de unidad de masa. Por lo tanto los 17 Mev de energía perdida en esta reacción nuclear equivalen a 0,0183 de unidades de masa.

(3) Al multiplicar esta cantidad por N (número de Avogadro),  $6.03 \times 10^{23}$  nos da  $27 \times 10^{18}$  ergs.

(4) La balanza puede precisar hasta el quinto lugar decimal y el espectrógrafo de masa hasta el sexto, pero se trata de que el último es el apropiado para estas determinaciones.

(5) Recientemente Lawrence ha demostrado que los núcleos de talio, plomo y bismuto también sufren fisión cuando se bombardean con neutrones del ciclotrón de 184 pulgadas.

(6) Denomínase nucleón tanto al protón como al neutrón, constituyentes esenciales y de la mayor importancia en el núcleo. La suma de ambos dá un número entero que se llama número de masa, o sea el número entero más próximo a su masa nuclear o peso atómico. Ejemplo: el nitrógeno tiene de masa nuclear o peso atómico 14.008, su número de masa es 14, y el número de protones y neutrones es también 14, tiene por tanto 14 nucleones.

(8) Los neutrones que no han sido capturados al principio, van perdiendo velocidad hasta alcanzar aquella correspondiente de las moléculas de los gases a esa misma temperatura. Su energía cinética es igual al valor medio de  $3/2kT$ . Estos neutrones lentos se denominan neutrones térmicos.

(9) Smyth Report o Atomic Energy for Military Purposes, de H. Dew. Smyth, relato semipopular y oficial del Proyecto Manhattan.

(10) Se sugirió por la reacción (a) de los párrafos siguientes, podría existir plutonio en cantidades infinitamente pequeñas o trazas. Se ha comprobado de que sí existe en la naturaleza aproximadamente en la proporción de 1 a  $10^{-14}$  relativa con el uranio 238.

(11) Aunque Fermi anotó hasta el elemento 97, se ha verificado la existencia de los elementos 95 y 96, Américio (Am) y Curio (Cm) respectivamente. Sobre estos elementos ya se ha estudiado bastante.

