

## LA FISIÓN NUCLEAR: EL PROCESO FÍSICO Y SUS IMPLICACIONES ECONÓMICAS Y MILITARES

MARCOS MOSHINSKY

*Miembro de El Colegio Nacional*

Mi primer objetivo es indicarles por qué el tema de fisión nuclear, por primera vez mencionado por Hahn y Strassman en 1939, me volvió a interesar. Hace unas semanas vi en el canal de historia de la televisión un relato sobre el bombardeo de Hiroshima el 6 de agosto de 1945. Esto ocurrió con una bomba basada en la fisión nuclear que prácticamente arrasó la población y causó centenas de miles de muertos y heridos. Todo esto ocurrió hace 61 años cuando en el mundo sólo se habían construido dos bombas nucleares (la segunda fue arrojada en Nagasaki sólo tres días después) pero lo que me llamó la atención y me preocupó grandemente fue que en el momento actual se dice que el número de esas armas, repartidas por todo el orbe, quizás sea del orden de 100 000. Existe pues la posibilidad de acabar con la especie humana si esas armas llegaran a usarse y es por lo tanto importante que todas las personas del mundo tengan una idea del proceso de su producción y de la manera en que se pueden evitar las armas nucleares si queremos sobrevivir como especie.

Empecemos pues nuestro relato con un poco de historia. Ya los griegos hace 2 500 años consideraban que la materia estaba formada de pequeños constituyentes que llamaban átomos y que estos últimos estaban a su vez formados de átomos fundamentales que, para ellos, eran agua, aire, tierra y fuego. En lo último estaban equivocados porque tres de los fundamentales eran compuestos y el fuego es una forma de energía.

El esfuerzo de un gran número de químicos del siglo XIX mostró que había cerca de cien materiales que no podían descomponerse más y que se caracterizaban por un número creciente de su masa en un volumen fijo dividido por su densidad, que más adelante se indicó por la letra A. En 1869 un químico ruso, Mendeleev, mostró que utilizando este número A se podía indicar una periodicidad en sus características químicas encuadrado en lo que se conoce como la tabla periódica de los elementos. En

1897 un físico inglés, J.J. Thompson, mostró que se podía desintegrar alguno de estos elementos con choques eléctricos dando lugar a la emisión de partículas de masa y carga negativa muy pequeñas que más adelante llamaron electrones. Como los elementos químicos son eléctricamente neutros, la primera impresión fue que los átomos serían pequeñas esferas de carga positiva en la cual estaban insertados un cierto número de electrones que compensaban la carga positiva para dar un átomo neutro.

Diversos experimentos sugerían que el radio de esos átomos era del orden de  $10^{-8}$  cm. Un brillante físico, Rutherford, de Nueva Zelanda, pero que trabajó en Inglaterra desde el inicio del siglo XX, quiso checar este modelo bombardeando una delgada hoja de oro con partículas provenientes de núcleos radiactivos que se conocen como  $\alpha$  y tienen una carga doble del electrón pero positiva y una masa como cuatro veces la del átomo de hidrógeno. Con el modelo propuesto del átomo descrito anteriormente y conociendo la energía cinética de las partículas  $\alpha$  emitidas por núcleos radiactivos, éstas al atravesar la hoja de oro, aun si se acercaran mucho a la esfera atómica de radio  $10^{-8}$  cm, apenas se desviarían un poco y así se verían sus trazos en la cámara de niebla del otro lado de la hoja de oro. La sorpresa de Rutherford fue grande cuando vio que algunas de sus partículas  $\alpha$  eran inclusive rechazadas hacia atrás, lo cual indicaba que la esfera de carga positiva debería tener un radio mucho menor del orden  $10^{-13}$  cm y los electrones no estarían incrustados en ella sino girarían en órbitas alrededor de lo que se llamó núcleo a la distancia atómica ya medida  $10^{-8}$  cm, tal como ocurre con los planetas alrededor del sol.

Pero el sol y los planetas interactúan por fuerzas gravitatorias mientras que los electrones con carga negativa interactúan con el núcleo de carga positiva por fuerzas electromagnéticas. Las características de estas últimas eran bien conocidas a principios del siglo XX y se sabía que los electrones, al recorrer sus órbitas, radiarían energía y se precipitarán al núcleo y el átomo desaparecería. Fue el físico danés Niels Bohr quien propuso una discretización (conocida como  $\hbar$  la constante de Planck para la acción) que impidió ese colapso pero que sólo pudo justificarse por la necesidad de una nueva mecánica, que llevó el nombre de cuántica, para los fenómenos a la escala atómica.

Tenemos pues que la existencia de los diferentes elementos se asocia con átomos con un número definido de electrones, que se indica con la letra  $Z$ , y un núcleo mucho menor que el átomo pero cuya carga positiva también está dado por  $Z$ , para que el átomo completo sea neutro.

Como los números de masa son todos enteros y positivos, el menor de ellos es  $A = 1$  y para el hidrógeno que tiene un solo electrón  $Z = 1$ . El núcleo del hidrógeno, que tendría una carga positiva 1, se puede obtener libre si se ioniza el hidrógeno y se le conoce como protón y, por el hecho que los núcleos de diferentes elementos tienen masas muy cercanas a múltiplos de  $A$  de la masa protón, sugieren que los núcleos atómicos estén formados por protones y en un inicio se supuso que fueran  $A$  protones y  $A - Z$  electrones para que la carga total positiva sea  $A - (A - Z) = Z$ .

Pero en vista que tanto protones como electrones tienen spin  $\frac{1}{2} \hbar$ , el momento angular total de los núcleos atómicos no resulta ser el observado de acuerdo con este modelo. (Por ejemplo el  ${}^{14}_7\text{N}_7$  resulta tener un spin semientero ligado con  $\frac{21}{2}$  del número de protones más electrones dividido por dos, cuando el observado es entero). También hay un problema relacionado con la estadística si se utiliza un modelo del núcleo con  $A$  protones y  $A - Z$  electrones ya que todas esas partículas son fermiones y un número par de ellas se comporta como bosones y un número impar como fermiones.

Si por condiciones de momento angular y de estadística no podemos aceptar a electrones en el núcleo, hay que pensar que la diferencia entre el número  $A$  de masa y el  $Z$  de carga eléctrica se debe a la presencia de partículas neutras.

Como las masas de los núcleos siguen cambiando muy cerca de múltiplos enteros de la masa del protón, se esperaba que la masa de la partícula neutra fuera cercana a la masa del protón y así fue cuando finalmente Chadwick la descubrió en 1932 y se le dio el nombre de neutrón. A partir de esa fecha los núcleos se caracterizan por tener  $Z$  protones y  $A - Z$  neutrones.

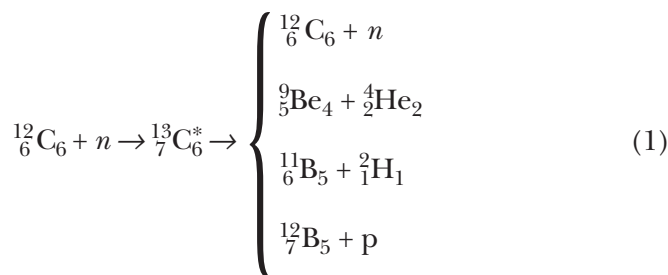
Con el descubrimiento del neutrón fue de interés bombardear con él a núcleos pesados para saber si con una emisión beta, esto es al emitir posteriormente un electrón se podría crear elementos transuránicos como lo intentaron hacer, entre otros, Fermi de 1934 a 1939. Pero fue la investigación de Hahn y Strassman, dos físicos alemanes en 1938 y 1939, la que dio inicio a la comprensión de que un núcleo pesado bombardeado con neutrones podría fisionarse en dos con masas casi iguales y al fenómeno se le llamó fisión nuclear y es el objetivo de esta plática (Bohr and Wheeler *Phys. Rev.* 56, 426, 1939).

El primer nombre que quisiera mencionar en relación con este tema es el de Niels Bohr.

Durante los primeros veinticinco años de su vida científica, entre 1910 y 1935, Niels Bohr se concentró en comprender tanto la estructura electrónica de los átomos como la nueva mecánica que se requería para este propósito. Pero, desde su encuentro con Rutherford en 1912, nunca abandonó el interés por el misterioso núcleo alrededor del cual se movían los electrones.

De aquí a partir del descubrimiento del neutrón por Chadwick, en 1932, Bohr dedicó cada vez más atención a la posibilidad de comprender la estructura nuclear en una forma tan completa como antes lo había logrado para la atómica.

Una de sus primeras contribuciones en este campo fue “*Captura neutrónica y estructura nuclear*” [1] publicada en la revista *Nature* de febrero de 1936, donde estableció la idea de que las reacciones nucleares tienen lugar en dos pasos: *a)* La formación de un núcleo compuesto por los dos fragmentos que se ponen en contacto, en donde rápidamente la energía aportada se reparte entre todos los nucleones, y *b)* La desintegración del núcleo compuesto a lo largo de diversos canales como lo que se indica en la reacción del isótopo 12 del carbón bombardeado por neutrones y que lleva primero al núcleo compuesto  ${}^{13}_7\text{C}_6^*$  en un estado excitado,



donde los subíndices a la izquierda y derecha del elemento indican respectivamente el número de neutrones y protones. Las probabilidades de desintegración de los diferentes productos que aparecen a la derecha en la fórmula (1), son independientes del proceso que llevó a la formulación del núcleo compuesto, esto es, serían las mismas si se hubiera formado el  ${}^{13}_7\text{C}_6^*$ , con igual energía de excitación, por ejemplo a través de la reacción de  ${}^9_5\text{Be}_4$  bombardeado con partículas  $\alpha$ .

La idea de Bohr fue fundamental para explicar muchas características de las reacciones nucleares y en particular la presencia de resonancias. En esta contribución quisiera analizar cómo Bohr implementó esas ideas

en el proceso fundamental de la fisión nuclear combinándolas con la analogía del núcleo a una gota de líquido cargada.

Pero antes de entrar a la parte más técnica del análisis quisiera hacer un poco de historia sobre cómo fue descubierto el proceso de fisión nuclear y la excitación que provocó en los físicos y que luego se extendió a la humanidad toda por el impacto de ese descubrimiento.

La historia empieza en 1934 cuando Fermi, enterado de los experimentos de Joliot y Curie para producir radiactividad artificial mediante el bombardeo de partículas cargadas, decidió tratar de inducirla con neutrones. Tuvo gran éxito en su objetivo al estudiar sistemáticamente los elementos de la tabla periódica, notando en el proceso que si la energía de los neutrones se reducía por choques con protones en parafina o en agua, la radiactividad inducida aumentaba grandemente. Al llegar al uranio, resultó que uno de los isótopos radiactivos producidos no pudo identificarse entre los conocidos en esa región de la tabla periódica y se llegó inclusive a pensar que podría ser un nuevo elemento “transuránico”.

El problema del uranio bombardeado con neutrones fue reexaminado en 1938 por Otto Hahn y Lise Meitner, quienes encontraron de nuevo el misterioso elemento radiactivo de Fermi, así como muchos otros que no podían ser identificados con los cercanos al uranio en la tabla periódica. Las circunstancias políticas en 1938, cuando las fuerzas de Hitler ocuparon Austria, obligaron a Lise Meitner, que era judía austriaca, a abandonar Alemania. Hahn continuó sus experimentos con Strassmann para producir los misteriosos elementos transuránicos y finalmente logró que uno de ellos se precipitara con bario y vio luego que ningún procedimiento químico le permitía separar al “transuránico” radiactivo del bario mismo.

La conclusión era que en alguna forma un isótopo radiactivo de bario se producía al ser bombardeado el uranio con neutrones, lo cual parecía absurdo desde el punto de vista de la física nuclear de la época en que las reacciones con neutrones sólo habían llevado del núcleo bombardeado a núcleos vecinos en la tabla periódica de los elementos. Hahn escribió a Lise Meitner en Estocolmo sobre la paradoja que había encontrado y ésta, con su sobrino Otto Frisch, pronto llegó a la conclusión que posiblemente el uranio se había fisionado y uno de sus fragmentos era el bario. De inmediato Frisch regresó a Copenhague, donde entonces trabajaba, e informó a Bohr que estaba por salir a Estados Unidos para una estancia de varios meses. La reacción de Bohr fue: *“Pero qué tontos hemos sido. Esto es maravilloso y justo como debe ser”* y sugirió a Frisch y Meitner que inmediatamente escribieran una nota sobre el asunto.

Al llegar a Estados Unidos en enero de 1939, Bohr comunicó la noticia de la fisión del uranio con neutrones a los físicos norteamericanos que de inmediato lo comprobaron mediante diversos tipos de experimentos. En particular, Fermi, ya refugiado en Estados Unidos tras abandonar la Italia fascista, los continuó con entusiasmo. Bohr decidió aplicar su modelo de la gota de líquido a la fisión nuclear y 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 del uranio el que fisionaba con neutrones lentos y luego desarrolló con Wheeler el trabajo “*Mecanismo de la fisión nuclear*” enviado a *Physical Review* a fines de junio de 1939, y publicado el primero de septiembre, al iniciarse la Segunda Guerra Mundial (figura 1). Poco se imaginaba Bohr que ese trabajo, además de afectar el curso de la física nuclear iba también a influir en la guerra y en la política futura del mundo.

Después de esta introducción quisiera dar brevemente algunos detalles sobre el modelo de Bohr sobre la fisión nuclear.

La interacción fuerte y de corto alcance entre los nucleones en el núcleo sugirió a Bohr que este último tendría más analogía con una gota de líquido cargada (ya que los protones tienen carga) que con un gas encerrado en una esfera. En efecto, para una gota de líquido, la excitación provocada en una de sus partes rápidamente se comunica al resto de la gota por el contacto directo entre las moléculas de la misma y su fuerte interacción, cosa que no sucedería con un gas. De allí que también la gota pierda rápidamente memoria del proceso que la excitó y sólo se ve afectada por la energía que se le proporcionó en ese proceso, lo que sucede también en el caso nuclear, como se indicó en el análisis de la fórmula (1).

Si tenemos una gota de líquido cargada, el equilibrio de la misma se debe esencialmente a la lucha entre dos fuerzas, la repulsión electrostática, que tratará de separar los constituyentes de la gota lo más posible, y la tensión superficial, que resiste toda deformación de la superficie que aumente el área de la misma.

La primera consideración que necesitamos hacer se refiere a la masa de los núcleos. Debido a que los electrones tienen una masa 1 837 veces menor que la de los protones, esta masa es prácticamente la del átomo, y puede medirse a través de alguno de los múltiples métodos de determinar la masa atómica. Pero es importante tener la fórmula semiempírica que nos permita, a través de la relación de Einstein  $E = mc^2$  entre masa y energía, determinar la masa aun para aquellos núcleos inestables en que ésta no puede ser medida experimentalmente.

Typical Radioactive Series from Fission of  ${}_{92}\text{U}^{235}$

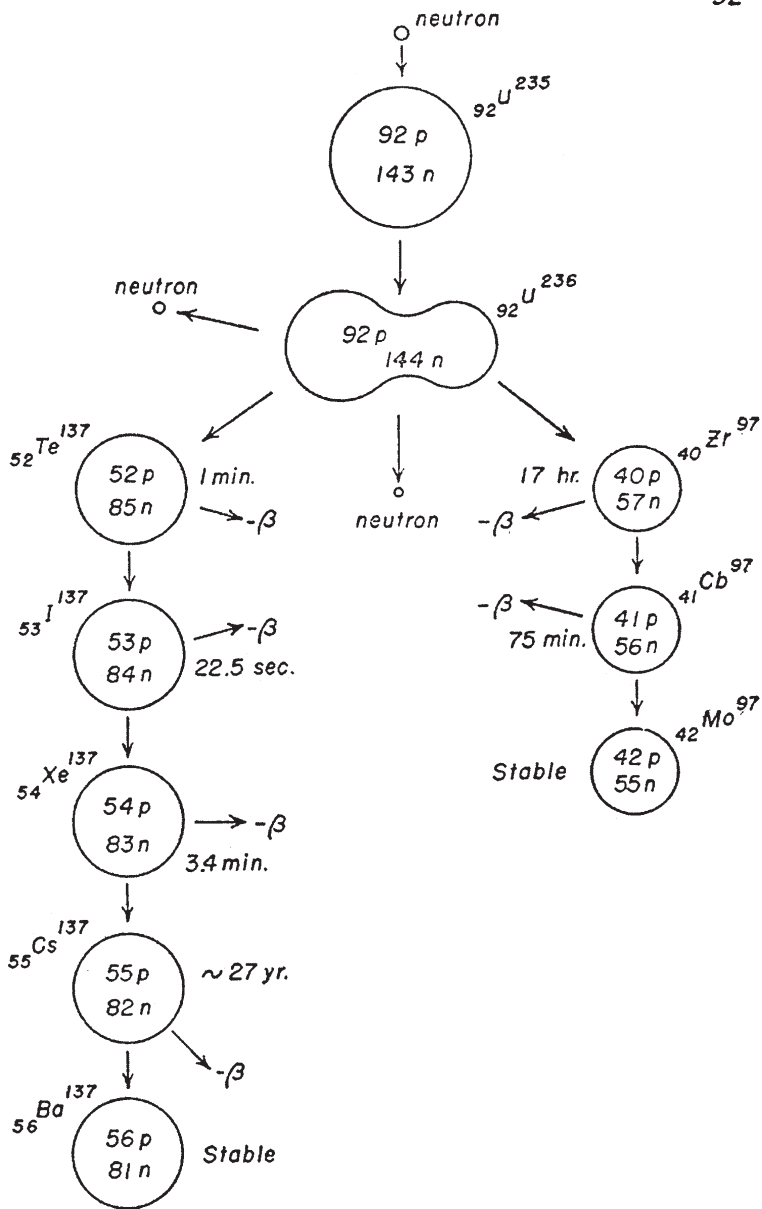


Figura 1.

Vamos a dar la masa en unidades de energía. El núcleo está caracterizado por  $A$  nucleones de los cuales  $N$  son neutrones y  $Z$  son protones,  $N + Z = A$ . La masa entonces toma la forma:

$$\begin{aligned}
 M(A, Z)c^2 &= Nm_n c^2 + Zm_p c^2 \\
 &- u_v A + u_r(N - Z)^2 A^{-1} \\
 &+ u_c Z^2 A^{-1/3} + u_s A^{2/3} + \delta
 \end{aligned} \tag{2}$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz.

La masa proviene en primer lugar de la masa de los neutrones y de los protones, pero tenemos que considerar que esos neutrones y protones forman el núcleo por un proceso similar al de la condensación de las moléculas del vapor de agua cuando forman una gota de líquido. Ahora, la condensación libera calor en el caso de las moléculas, y lo mismo sucederá en el caso nuclear. Como esa energía no se da al sistema, sino que éste la da al medio, tiene que volverse negativa y es proporcional a  $A$ . La constante de proporcionalidad es  $u_v = 14$  MeV donde  $1\text{MeV} = 1.6 \times 10^{-6}$  ergs. Viene después lo que podríamos llamar la energía de simetría proveniente del hecho que los núcleos de igual  $A$  (isóbaros), son más estables mientras más cercano esté entre sí el número de protones y neutrones. Más estables significa de menor energía y, por lo tanto, de menor masa, y esto se traduce en el hecho que haya un término proporcional a  $A^{-1}$  ( $N - Z$ )<sup>2</sup>, como una teoría más detallada puede mostrarlo. Viene posteriormente la fuerza electrostática; para una esfera uniformemente cargada, con carga total  $Ze$  y radio  $R = r_0 A^{1/3}$  (se supone que la densidad de la materia nuclear se mantiene aproximadamente constante, y por lo tanto el radio del núcleo es proporcional a  $A^{1/3}$ ), su contribución a la energía del núcleo es:

$$(3/5)R^{-1}Z(Z - 1)e^2 \approx 4u_c A^{-1/3}Z^2 \tag{3}$$

donde  $u_c = 0.146$  MeV.

El factor  $3/5$  tiene que ver con el cálculo de la energía electrostática en una esfera.

El penúltimo término de (1) proviene del hecho que al “condensar” los nucleones, obtenemos menos energía de los nucleones que quedaron en la superficie, que de aquellos que quedaron en el interior del núcleo.

Es necesario corregir entonces en (2) el término negativo  $-u_s A$ , por un efecto superficial que será proporcional al área y, por lo tanto a  $A^{2/3}$ . El coeficiente de proporcionalidad de ese término superficial es  $u_s = 13$  MeV. Finalmente, del hecho que los nucleones tienen spin, y del principio de exclusión de Pauli, se puede demostrar que los núcleos son particularmente estables si contienen un número par de protones y neutrones, es decir, si  $N$  y  $Z$  son pares, en cambio son particularmente inestables si  $N$  y  $Z$  son impares. Esto se refleja en el término  $\delta$  de la fórmula (1) que es igual a:

$$\delta = \begin{cases} -1/2 \text{ MeV} & \text{si } N, Z \text{ par,} \\ 0 & \text{si } N \text{ par, } Z \text{ non, o viceversa} \\ 1/2 \text{ MeV} & \text{si } N, Z \text{ non,} \end{cases} \quad (4)$$

La fórmula (2), conocida con el nombre de fórmula semiempírica de Weizacker [2] por el nombre del físico que la propuso originalmente, contiene una gran cantidad de información de interés. Consideremos, por ejemplo, la diferencia de energía entre un núcleo de número de masa  $A$  (consideremos  $N$  y  $Z$  pares), y dos fragmentos de masa  $A' = (A/2)$ , con  $N' = (N/2)$ ,  $Z' = (Z/2)$ . Despreciando el efecto de los términos  $\delta$ , tenemos de (2) que:

$$M(A, Z)c^2 - 2M[(A/2), (Z/2)]c^2 = u_s A^{2/3}(1 - 2^{1/3}) + u_c A^{-1/3} Z^2(1 - 2^{-2/3}) \quad (5)$$

Como  $(1 - 2^{1/3}) < 0$  y  $(1 - 2^{-2/3}) > 0$ , el signo de (5) dependerá de cuál de los coeficientes de los paréntesis es mayor. Para núcleos pesados, el término electrostático  $u_c Z^2 A^{-1/3}$  es mayor que el término de tensión superficial  $u_s A^{2/3}$ , y el miembro izquierdo de (5) es positivo, lo que implica que la fisión de un núcleo pesado es exoérgica.

Para el uranio se puede calcular de (5), que la fisión libera cerca de 200 MeV y teniendo en cuenta esa diferencia de energía, nos preguntamos qué impide que el núcleo de uranio se fisione inmediatamente, y que el uranio hubiera desaparecido de la Tierra. Aquí el modelo de la gota de líquido vuelve a ayudarnos [3]. Al deformarse la gota de líquido, sigue los pasos de la figura 2. Al principio, al alargarse la gota disminuye la energía electrostática, pero aumenta la tensión superficial, y un cálculo elemental para un elipsoide muestra que para un núcleo como el uranio, aumenta más rápidamente la tensión superficial que lo que disminuye la repulsión electrostática, de manera que la energía total del núcleo aumenta con la

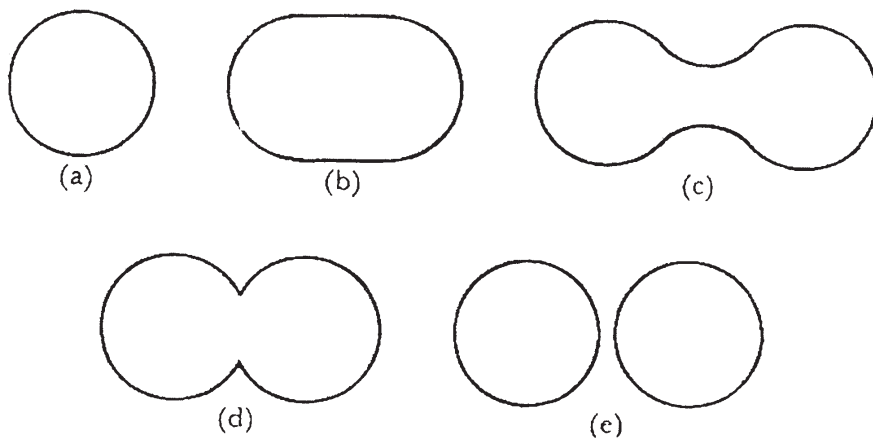


Figura 2.

deformación hasta que el núcleo toma la forma (d) de la figura 2 en que los fragmentos están en contacto.

Posteriormente, disminuye la energía al disminuir la repulsión electrostática sin cambiar la tensión superficial.

Si designamos por  $r$  a un parámetro que mida la deformación del núcleo, y posteriormente la distancia entre los fragmentos del mismo, la variación de la energía con la deformación está indicada por la curva (a) de la figura 3, en la que el valor  $r = R$  corresponde al radio del núcleo no deformado.

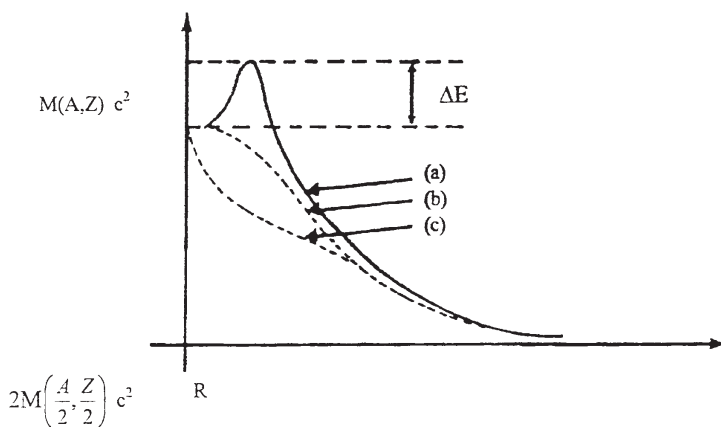


Figura 3.

De la curva (a) se ve claramente que, por lo menos desde el punto de vista de la mecánica clásica, el núcleo es estable contra la fisión, a pesar de que la energía de los dos fragmentos es menor que la del núcleo original. Si en lugar de una curva del tipo (a), tuviéramos una del tipo (b) o (c) de la figura 3, cosa que ocurriría para núcleos con cargas bastante mayores que las del uranio, los núcleos serían inestables a la fisión. La última parte de la curva (a) proviene simplemente de la energía electrostática de repulsión entre los fragmentos y por lo tanto, va como  $r^{-1}$ .

De la curva (a) en la figura 3, vemos que al núcleo hay que proporcionarle una energía  $\Delta E$  para que ocurra la fisión, y se puede estimar esa energía de la diferencia de energías entre los dos fragmentos en contacto de la figura 2d y el núcleo original de la figura 2a. Esta estimación puede hacerse con ayuda de la fórmula (5), si le agregamos la energía electrostática de dos cargas ( $Ze/2$ ) cuyos radios son  $R = r_0(A/2)^{1/2}$  y que está en contacto, de manera que de (2) y (5) se tiene:

$$\Delta E = (5/6)(Z/2)^2(A/2)^{-1/3}u_c - \{M(A, Z) - 2M[(A/2), (Z/2)]\}c^2 \quad (6)$$

De (6), y con algunas correcciones apropiadas para los núcleos pesados [3], se estiman las energías  $\Delta E$  dadas en el primer renglón de la tabla 1:

Tabla 1

	${}^{236}_{92}\text{U}$	${}^{239}_{92}\text{U}$	${}^{233}_{90}\text{U}$
$\Delta(\text{MeV})$	5.2	5.8	6.8
$E_{exc} \text{ MeV}$	6.4	5.2	5.2

Tabla 2

${}^{232}\text{Th} + n \rightarrow {}^{233}\text{Th} \rightarrow {}^{233}\text{Pa} \rightarrow {}^{233}\text{U}$	1.63 x 10 <sup>5</sup> años
${}^{238}\text{U} + n \rightarrow {}^{239}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{Np} \rightarrow {}^{239}\text{Pu} \rightarrow$	2.41 x 10 <sup>4</sup> años

¿En qué forma podemos proporcionar a los núcleos la energía  $\Delta E$  que necesitan para que se produzca el proceso de fisión? El método más directo es el de bombardearlos con neutrones produciendo, como habíamos indicado antes, un núcleo compuesto de  $A + 1$  nucleones. Este núcleo compuesto no se encuentra en su estado de más baja energía sino en un estado excitado, y en el supuesto que la energía cinética del neutrón sea

muy pequeña, esta energía de excitación puede estimarse de la diferencia entre la masa del núcleo original, más la masa del neutrón, menos la masa del núcleo compuesto en su estado base, y todo multiplicado por  $c^2$  es decir:

$$E_{exc} = M(A, Z)c^2 + m_n c^2 - M(A + 1, Z)c^2 \quad (7)$$

Las masas  $M(A, Z)$  y  $M(A + 1, Z)$  se obtienen de (2) y las energías de excitación están dadas en el segundo renglón de la tabla 1.

Cuál es la razón de la diferencia de 1 MeV que se observa [4] entre la energía de excitación del  ${}_{92}^{236}\text{U}$  y del  ${}_{92}^{239}\text{U}$ . El isótopo 236 del uranio se forma del isótopo 235 con la absorción de un neutrón. Ahora bien, el Uranio 235 tiene  $N$  par y  $Z$  non, mientras que el  ${}^{236}\text{U}$  tiene  $N$  y  $Z$  par. De la fórmula (4) vemos que el término  $\delta$  da una contribución  $\approx 1/2$  MeV a la energía de excitación. En cambio el  ${}^{239}\text{U}$  se obtiene del  ${}^{238}\text{U}$  cuando éste absorbe un neutrón. Como el  ${}^{238}\text{U}$  tiene  $Z$ ,  $N$  pares, y el  ${}^{239}\text{U}$  tiene  $Z$  par y  $N$  non, tenemos de (4) que  $\delta$  da una contribución de  $\approx -1/2$  MeV, y de aquí se ve la razón del 1 MeV de diferencia en la  $E_{exc}$  del  ${}^{236}\text{U}$  y  ${}^{239}\text{U}$ . Comparando  $E_{exc}$  con  $\Delta E$ , vemos que  ${}^{235}\text{U}$ , al absorber un neutrón lento, da un núcleo compuesto  ${}^{236}\text{U}$  con suficiente excitación para fisionarse, mientras que tal cosa no pasa con el  ${}^{238}\text{U}$  al absorber un neutrón, ya que  $\Delta E > E_{exc}$  para el  ${}^{239}\text{U}$ . Sin embargo, si el neutrón llevara una energía cinética superior a 1 MeV, sí podría dar una energía de excitación suficiente para que se fisionara el núcleo compuesto  ${}^{239}\text{U}$ .

De los materiales presentes en abundancia razonable en la naturaleza, sólo el  ${}^{235}\text{U}$  es fisionable con neutrones lentos. Sin embargo, las razones expuestas en el párrafo anterior nos hacen ver cómo pueden producirse artificialmente núcleos fisionables con neutrones lentos. En la tabla 2 indicamos dos reacciones nucleares de interés, una del  ${}^{238}\text{U}$  que, al capturar un neutrón forma  ${}^{239}\text{U}$  que se desintegra emitiendo un electrón dando  ${}^{239}\text{Np}$ , y finalmente éste se desintegra emitiendo otro electrón para producir el isótopo 239 del plutonio  ${}^{239}\text{Pu}$ , cuya vida media es  $2.41 \times 10^4$  años. La otra reacción que ocurre en forma similar, nos da, a partir del  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  más un neutrón, el  ${}_{92}^{239}\text{U}$ , con cuya vida media de  $1.63 \times 10^5$  años. Ahora bien,  ${}^{239}\text{Pu}$  y  ${}^{233}\text{U}$  tienen  $Z$  par y  $N$  non, y los correspondientes núcleos compuestos tienen  $N$ ,  $Z$  par. Como en el caso del  ${}^{235}\text{U}$  del párrafo anterior, esperaríamos ganar 1 MeV en la energía de excitación por la contribución del término  $\delta$  en (1), y por lo tanto, estos núcleos  ${}^{239}\text{Pu}$  y  ${}^{233}\text{U}$ , producidos artificialmente, son fisionables con neutrones lentos [4].

En la primera mitad de 1939 Bohr desempeñó una vez más el papel de profeta que enseñaba el camino a la tierra prometida. En este caso en la comprensión del fenómeno de la fisión nuclear, como antes lo fue en la estructura del átomo, o dirigiendo las intensas discusiones sobre la interpretación de la mecánica cuántica.

Es difícil darse cuenta hoy en día de la excitación producida por el fenómeno de la fisión nuclear en 1939. Desde el punto de vista de la física ha habido varios descubrimientos, que podríamos llamar “inesperados”, cuya importancia es comparable. Pero aquí se tenía la posibilidad de un impacto social inmediato, sobre todo cuando las mediciones y la teoría fueron mostrando que se producían más neutrones que los que se absorbía para fisiónar el  $^{235}\text{U}$ . Este resultado puede concebirse desde el punto de vista de la gota de líquido, por las pequeñas gotitas que acompañan a los fragmentos principales cuando ésta se fisiona. Más exactamente argumentos de termodinámica, mecánica estadística y física nuclear [5] aclararon en pocos meses que los neutrones emitidos en cada proceso de fisión serían suficientes para sostener una reacción en cadena.

Al comprenderse lo anterior la excitación de los físicos empezó a convertirse en preocupación. Rápidamente comprendieron que no sólo se tenía en principio un mecanismo totalmente nuevo para producir energía sino también que se podían elaborar explosivos de potencia increíble.

Empecemos pues a discutir los pasos necesarios para que la fisión nuclear pueda tener un efecto directo sobre la evolución económica y militar de las sociedades. Por razones de espacio nos limitaremos a la discusión de la fisión del  $^{235}\text{U}$  cuando es bombardeado por neutrones lentos, aunque ya mencionamos algunas otras posibilidades.

El isótopo 235 del uranio se encuentra en la naturaleza mezclado con el isótopo 238 del mineral en la proporción de cerca de uno por ciento. Desde el punto de vista químico los dos isótopos tienen las mismas propiedades y procesos de esa naturaleza no pueden separarlos.

La masa de esos dos isótopos difieren en uno por ciento y de allí que se puedan utilizar centrífugas, en particular en cascada, para separarlos.

Se puede pues obtener al isótopo 235 casi puro o bien a un enriquecimiento determinado en el uranio natural.

Ya mencionamos que bombardeado con neutrones lentos el  $^{235}\text{U}$  se fisiona acompañado con la emisión de más de un neutrón. El proyecto es que ese nuevo neutrón provoque una nueva fisión y dé origen a un nuevo neutrón y se mantenga así la reacción en cadena. Para ello debe de haber suficiente  $^{235}\text{U}$  puro. La cantidad debe ser suficiente para que no

escapen los neutrones antes de completar el proceso. Esa cantidad se conoce con el nombre de masa crítica. Para el  $^{235}\text{U}$  es del orden de 60 kilos y, como el uranio es muy denso, si se juntan bruscamente dos hemisferios de 30 kilos, de un tamaño cercano a una pelota de fútbol, se puede producir en una fracción de segundo una explosión equivalente a 15 000 toneladas de trinitrotolueno (TNT) que en 1945 arrasaron una ciudad como Hiroshima en el Japón. De aquí pues la importancia militar de la fisión nuclear.

Al final de la Segunda Guerra Mundial los Estados Unidos lograron producir suficiente material para dos bombas nucleares pero hoy en día, según un artículo reciente de la revista *Scientific American*, en el mundo hay alrededor de 100 000 armas nucleares distribuidas en varios países.

Aunque se han usado en diferentes tipos de experimentos, ninguna ha causado daños a los seres humanos después de 1945. Esto no se debe a la responsabilidad moral de los que las construyen o manejan, sino al hecho de que una guerra nuclear acabaría inclusive con los que la iniciaron.

Mencioné aquí uno de los aspectos negativos de la fisión nuclear. Hay uno positivo que consiste en enriquecer el uranio natural hasta con un 20% del  $^{235}\text{U}$ . Esto es suficiente para utilizarlo en instrumentos conocidos como reactores nucleares para generar energía eléctrica. Hay ya cientos de estos reactores en el mundo. El uranio enriquecido al 20% del isótopo  $^{235}\text{U}$  no puede utilizarse en bombas nucleares, pero sí puede haber accidentes que liberan radioactividad como ocurrió en el caso de Chernobil hace varias décadas. De manera que los reactores nucleares pueden causar serios problemas si no son constantemente vigilados. Su ventaja es que no producen el tipo de contaminación asociada con combustibles como el carbón o el petróleo en todas sus formas, por ello se piensa que, eventualmente, podría reemplazarlos, pero de todos modos tienen sus peligros, como los tiene cualquier tipo de actividad humana.

Bohr regresó a Dinamarca a mediados de 1939 y la guerra y luego la ocupación nazi de su país lo desconectaron de los progresos en el campo de la fisión. El temor de que Alemania, donde habían surgido los conocimientos iniciales en ese campo, a través de Hahn y Strassmann, pudiera desarrollar una bomba, hizo que los físicos norteamericanos y británicos se autocensuraran, en el campo de la fisión y sus aplicaciones. No fue sino hasta 1943, cuando Bohr escapó de Dinamarca a Suecia y de allí en un avión de la inteligencia británica a Inglaterra, cuando se enteró de los enormes progresos realizados en el campo de la fisión nuclear así como de los enormes peligros que implicaban. Como he contado en otra oca-

sión Bohr, más que con su conocimiento técnico, ya entonces rebasado, contribuyó con su esfuerzo para tratar de lograr un desarrollo pacífico de la energía nuclear. Si por una vez fracasó, fue por el cúmulo de fuerzas que se opusieron a su acción, y no por falta de dedicación y entusiasmo de su parte. Fue pues Bohr, como Einstein y algunos de los otros gigantes de la física de nuestra época, un profeta que se preocupó hondamente no sólo del camino futuro de la física, sino del tortuoso que la humanidad sigue en busca de una vida mejor.

#### REFERENCIAS

1. N. Bohr, *Nature*, 137, 344 y 351 (1936); N. Bohr y F. Kalckar, Klg. "Danske Vid" Selkskab. *Math. Phys. Med.*, 14, núm. 10 (1937).
2. F. Weizsacker, *Z. Physik*, 96, 431 (1935).
3. Niels Bohr and J. A. Wheeler, *Phys. Rev.*, 56, 426 (1939)
4. N. Bohr, *Phys. Rev.* 55, 418 (1939).
5. H. D. Smyth, *Rev. Mod. Phys.*, 17, 351 (1945).