

# **RUTHERFORD, EL NACIMIENTO DE LA FÍSICA NUCLEAR Y SUS APLICACIONES**

*Conferencia pronunciada por el Dr. Gerardo Quintana  
en la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires,  
acto organizado por el Instituto de Investigación y Desarrollo  
el 21 de octubre de 2011*



## **Presentación**

### **por el Dr. C. Mercader**

El Lic. Gerardo Quintana es Profesor Titular Consulto (Dedicación Exclusiva) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FIUBA) y Secretario Académico de la misma desde 2009 a la fecha. En este cargo también se ha desempeñado entre los años 1986 y 1990.

Desde 1999 es Director de la Carrera de Especialización: «Aplicaciones Tecnológicas de la Energía Nuclear» que se dicta en forma conjunta entre la Facultad de Ingeniería (UBA), el Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo y la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Asimismo, desde 1981 a la fecha, es director de los cursos de postgrado internacionales “Protección Radiológica y Seguridad de las Fuentes de Radiación” y “Seguridad Nuclear” FIUBA, Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) y Organismo Internacional de la Energía Atómica (IAEA).

En su carrera académica desarrollada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, se ha desempeñado como Director del Departamento de Física (1994-2009) y Secretario de Investigación (1994). Ha sido Consejero Superior de la Universidad de Buenos Aires (1994-2002) y Consejero Directivo de la FIUBA en los períodos 1986-1990 y 1994-2002.

Ha sido Investigador de la CNEA en el Departamento de Física Nuclear trabajando en Colisiones de Iones, y en el proyecto IALE (Isótopos alejados de la línea de estabilidad) entre 1965 y 1969.

Ha sido Profesor e Investigador en la Universidad Central de Venezuela, trabajando en espectroscopía Mössbauer en física biológica entre 1969 y 1972 sobre la alteración del ADN por la presencia de Fe y Sn. Este tema fue una de las primeras aplicaciones del efecto Mössbauer a la física biológica en América Latina. A su regreso en 1972, Quintana tuvo también un rol protagónico en establecer y mantener el laboratorio de espectroscopía Mössbauer en la FIUBA. Este laboratorio es uno de los primeros existentes en nuestro país en el

cual se formaron numerosos investigadores y que permitieron a la Facultad tener un importante grado de afianzamiento y desarrollo en investigaciones básicas y aplicadas como el que se verifica en la actividad.

Como investigador ha desarrollado estudios en física biológica, sólidos amorfos, materiales superconductores y ablación laser, produciendo, como resultado de los mismos, muchas publicaciones en revistas especializadas. Asimismo, ha contribuido a la formación de destacados grupos de investigación.

DIRECTOR DE LA SECCIÓN MÉTODOS Y  
APLICACIONES DE LA FÍSICA NUCLEAR

## RUTHERFORD, EL NACIMIENTO DE LA FÍSICA NUCLEAR Y SUS APLICACIONES

Lic. GERARDO QUINTANA

### Breve biografía

Ernest Rutherford nació en el año 1871 en el sur de Nueva Zelanda y falleció en Cambridge, Inglaterra, en 1937 a la edad de 66 años.

Fue el cuarto de doce hijos y su padre, James, de modestos ingresos, tuvo variadas ocupaciones: granjero, mecánico, etc. Su madre, Martha, que era maestra, tenía un carácter muy fuerte y tuvo una excelente relación con su hijo Ernest. Éste fue un destacado estudiante secundario, circunstancia que le ayudó para ingresar en la Universidad. En el año 1894 obtuvo el título *Bachelor of Science*.

En ese entonces se interesó en el efecto de las ondas electromagnéticas en agujas magnetizadas, lo que condujo a que desarrollara un equipo muy sensible para la detección de dichas ondas. Esto dio origen a sus dos primeras publicaciones en las *Transactions of the New Zealand Institute*, 1894, las que tuvieron una acogida favorable.

En el año 1895 obtuvo una beca para estudiar en Inglaterra y en septiembre arribó al Laboratorio Cavendish de Cambridge, cuyo director J. J. Thomson lo dirigió durante su permanencia en él. Lo admitieron bajo la figura de “estudiante investigador”. Inicialmente prosiguió con sus investigaciones sobre la recepción de las ondas hertzianas a gran distancia. Presentó sus trabajos ante la *Cambridge Physical Society* que se publicaron en la prestigiosa revista *Philosophical Transactions* de la Royal Society, hecho éste que le dio mucha notoriedad a Rutherford.

Al mes de haber arribado a Cambridge, Röntgen descubrió los rayos X. Poco después, diciembre de 1895, colaboró con Thomson en el estudio del efecto de esta radiación sobre los gases. Descubrieron la propiedad de los RX de ionizarlos. Thomson afirmó “*Rutherford*

*ideó métodos muy ingeniosos para medir cantidades fundamentales conectadas con este fenómeno*". Este trabajo, que trata de la ionización y recombinación, se convirtió en un clásico<sup>1</sup>.

Contemporáneamente, en 1896, Becquerel descubrió que el uranio emitía una radiación desconocida, que denominó "radiación uránica". Rutherford comenzó a investigar las propiedades de estos "rayos de Becquerel" en cuanto a sus efectos ionizantes. Esto se plasmó en un trabajo de febrero de 1898 que fue publicado en setiembre de ese año<sup>2</sup>.

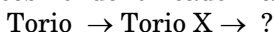
En 1898, luego de pasar tres años en Cambridge, le ofrecieron una cátedra en la Universidad McGill de Montreal, Canadá. Esta nueva posición, si bien no lo entusiasmaba demasiado, por el mayor salario percibido le daba la posibilidad de poder reunirse con su prometida que todavía residía en Nueva Zelanda y así poder casarse. En el año 1900 se casó con Mary Newton y un año después nació su única hija, Eileen Mary, quien luego de casarse con el famoso físico R. Fowler le dio cuatro nietos.

En Montreal Rutherford, donde cuenta con la importantísima colaboración de F. Soddy, continuó con sus análisis de la radiación emitida por el uranio. Sus experimentos de absorción le indicaron que la radiación del uranio es compleja y está formada por dos componentes; a una que es menos penetrante (es absorbida por una hoja de papel) la denominó radiación alfa y a la restante de mayor penetración la llamó radiación beta; más adelante encontrará un tercer tipo de radiación que llamará gama.

Fueron necesarios diez años de intensos trabajos para poder establecer con certeza que los rayos alfa eran átomos de Helio doblemente ionizados. En un principio supuso que éstos eran neutros, pero en 1903, con campos magnéticos suficientemente intensos, Rutherford probó que llevaban carga positiva<sup>3</sup>. En 1905 concluyó que además tenían carga eléctrica positiva desde el momento mismo de su emisión. Finalmente en 1908 estando en Inglaterra, junto con H. Geiger<sup>4</sup>, propuso que la carga de la partícula alfa es el doble de la unidad de carga elemental, es decir  $2e$ .

Rutherford también estudió la radiación emitida por el Torio. Un joven colaborador suyo, el ingeniero electricista R. B. Owens, descubrió con gran sorpresa que la radiación emitida por el Torio se ve afectada por corrientes de aire que se producen al abrir o cerrar la puerta del laboratorio. Rutherford concluyó que el Torio desprende una "emanación" y diseñó algunos experimentos para mostrar que tal emanación es un gas radiactivo (1902, junto con F. Soddy) que de-

nombraron Torio X. Cuando separaron el Torio X del Torio, éste quedó inicialmente inactivo. Sin embargo el Torio en pocas semanas recuperó la actividad mientras que el Torio X la perdió. Analizando matemáticamente estos patrones de recuperación y decaimiento Rutherford y Soddy propusieron una teoría revolucionaria<sup>5</sup>. Suponían que el Torio y el Torio X, son elementos distintos que tienen diferentes propiedades químicas y físicas. El Torio X se forma espontáneamente a muy baja velocidad a partir de la transformación del Torio y el Torio X a su vez, en forma espontánea, se convierte en otro elemento en ese entonces no identificado. La secuencia es:



En definitiva un elemento radiactivo cambia espontáneamente en otro. Los átomos se desintegran dando lugar a nuevos átomos. Se trata de la transmutación de los elementos, algo que buscaban los antiguos alquimistas.

Las cantidades de estos radioelementos eran minúsculas y no podían ser pesadas ni identificadas químicamente aunque su radiactividad podía ser medida con precisión. Rutherford y Soddy estudiaron cadenas radiactivas cuyas “cabezas” son Torio, Uranio, Radio y Actinio.

En el estudio de las propiedades radiactivas de la “emanación” del Torio, hoy identificada como Radón ( $^{220}\text{Rn}$ ), Rutherford encontró que la intensidad de la radiación emitida disminuye en el tiempo. Esto le permitió introducir el concepto de *vida media* de una sustancia radiactiva<sup>6</sup>. Fue el primero en notar que si  $N(t)$  es el número de átomos radiactivos al instante  $t$ , la disminución de éstos en el tiempo es:

$$dN/dt = -\lambda N \quad \text{o} \quad N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$$

Para el caso del Radón, Rutherford y Soddy encontraron que en un tiempo de 60 s la actividad se reduce a la mitad, lo que equivale a que la cantidad de átomos iniciales se reduce en la misma proporción. Los valores actuales dan una vida media de 56 s para el Radón.

Rutherford y Soddy obtuvieron la secuencia completa de la serie de decaimientos radiactivos del Radio y los tipos de radiaciones emitidas en cada caso ( $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ ). También pudieron estimar la energía total generada en la transmutación química. Ésta resultó mucho mayor que la obtenida en una reacción química habitual. En el último trabajo publicado por ambos puntualizan: “*la energía latente en el átomo (radiactivo o no) debe ser enorme comparada con la proporcionada libremente en un cambio químico ordinario*”. A continuación especularon que si esta “*energía atómica*” fuese disponible en un cambio subatómico en el sol, esto podría dar cuenta de la energía ge-

nerada en él. Tal vez haya sido la primera ocasión en que se propone una explicación del origen de la energía producida en el sol.

En 1904 la Royal Society le otorgó a Rutherford la medalla Rumford y publicó un libro titulado *Radiactividad* en el que dio cuenta de todos sus descubrimientos y cuánto se conocía del tema en ese entonces<sup>7</sup>.

En su estadía en Montreal, 1898-1907, publicó unos 80 trabajos científicos.

## Regreso a Inglaterra

Rutherford tenía todo lo que prácticamente necesitaba en McGill salvo la proximidad con los centros científicos de Europa. Por tal razón cuando le ofrecieron la llamada Langworthy Chair of Physics en la Universidad de Manchester aceptó la invitación y regresó a Europa. En la primavera de 1907 arribó a Manchester.

*“El laboratorio de Manchester es muy bueno”*, escribió a su madre, aunque no disponía de tantos fondos como en Montreal. Incluyó un excelente equipamiento, pero sobre todo un joven asistente, Hans Geiger, quien haría aportes cruciales en los futuros estudios con partículas  $\alpha$ .

Con Geiger desarrolló un contador que permitía registrar y contar individualmente las partículas  $\alpha$  emitidas por las sustancias radiactivas y que fue el antecesor del futuro contador denominado “Geiger-Müller”.

En 1908, primero con Geiger<sup>8</sup> y luego junto con uno de sus estudiantes Thomas Royds, publicó dos trabajos que dilucidaron definitivamente la naturaleza de las partículas alfa. En ellos afirma: *“la partícula  $\alpha$ , luego de perder su carga positiva es un átomo de Helio”*. Para ello producían una descarga en un tubo que en su interior tenía Radio (emisor  $\alpha$ ) y al analizar las líneas espectrales aparecieron las líneas características del Helio.

En el año 1908 Rutherford fue galardonado con el premio Nobel de Química *“por sus investigaciones relativas a las desintegraciones de los elementos y la química de las sustancias radiactivas”*. Su conferencia oficial luego de recibir el premio, la tituló: *“La naturaleza química de las partículas alfa emitidas por las sustancias radiactivas”*.

El premio Nobel de Química sorprendió a Rutherford quien se consideraba un físico. Esto lo manifestó jocosamente en su discurso en el banquete que siguió a la entrega del premio cuando afirmó: *“He tratado con muchas y diferentes transformaciones con diversos perío-*



*dos de tiempo, pero la más rápida que he encontrado es mi propia transformación de físico a químico”.*

Siempre se afirmó que la gran publicidad del premio Nobel iba en detrimento en la creatividad de los galardonados y hay mucho de verdad en esta afirmación. Sin embargo Rutherford fue un caso atípico dado que sus logros tal vez más importantes fueron posteriores al año 1908 en que obtuvo el premio, cuando descubrió el núcleo atómico, obtuvo la primera reacción nuclear y propuso la existencia del neutrón.

Estos tres descubrimientos fueron los que realmente dieron origen a la física nuclear y sus posteriores y maravillosas aplicaciones.

## **1. Modelos atómicos**

### ***Historia***

El concepto de átomo se originó en la antigua Grecia como una necesidad filosófica para explicar la realidad, ya que pensaban que la materia no podía dividirse indefinidamente, por lo que debía existir una unidad última, indivisible e indestructible. Así lo propusieron, entre otros, Demócrito, Leucipo y Epicuro.

Los siguientes avances significativos se produjeron en el siglo XVIII merced al trabajo de los químicos. Lavoisier ya en 1773 postuló que la materia *“ni se crea ni se destruye, simplemente se transforma”*. En 1804, el químico inglés John Dalton, luego de medir muy precisamente la masa de los reactivos y de los productos de una reacción química concluyó que:

- a) La materia está formada por partículas muy pequeñas denominadas átomos que son indivisibles.
- b) Los átomos de un mismo elemento son iguales entre sí. Los de diferentes elementos difieren en su peso.

Sin embargo la idea del carácter atómico de la materia no fue aceptada inmediatamente. La necesidad de explicar algunos descubrimientos realizados a lo largo del siglo XIX como ser:

- a) La tabla periódica de los elementos, que codifica regularidades de éstos,
- b) La espectroscopía,
- c) Los trabajos de Clausius y Maxwell sobre gases,
- d) Trabajos teóricos de Young, Loschmidt, Stoney y Kelvin en que estiman los tamaños moleculares, condujo a que se consolidara progresivamente la certeza de la existencia de los átomos.

En 1815 William Prout<sup>9</sup> propuso que los pesos específicos de las diferentes especies atómicas se pueden expresar como múltiplos enteros de una unidad fundamental y conjeturó que ésta se puede identificar con el hidrógeno. Aún mucho antes del descubrimiento del electrón (J. J. Thomson, 1897) que puso de manifiesto que los átomos tenían estructura, Stokes, en 1852, a partir del estudio de las líneas espectrales emitidas por diferentes gases, especuló que esta luz emitida por las moléculas no proviene de vibraciones relativas entre ellas sino de vibraciones de las partes constitutivas de ellas en virtud de fuerzas internas que mantienen las diferentes partes unidas.

El último y más discutido de los modelos atómicos previos al descubrimiento del electrón fue debido a William Thomson (Lord Kelvin)<sup>10</sup> que lo denominó “vortex atom”. La inspiración provenía del campo de la hidrodinámica, en particular de un trabajo de Helmholtz (1858) sobre la dinámica de los vórtices. Este afirmaba que *“en un fluido ideal las líneas de vórtice permanecen continuamente formada por los mismos elementos de fluido”*.

W. Thomson propuso que el átomo sería como un tubo de vorticidad cerrado inmerso en un éter infinito, incompresible, homogéneo y sin fricción. Supuso que podría explicar tres hechos como: la estabilidad atómica (los vórtices son estables), la variedad atómica (variedad de vórtices y configuraciones) y los espectros (los vórtices tendrían modos de vibraciones fundamentales definidos). W. Thomson<sup>11</sup> continuó trabajando en este modelo durante veinte años hasta que por último lo abandonó. Finalmente su esfuerzo contribuyó más a la teoría de la hidrodinámica que a la física atómica.

### ***Primeros modelos electrónicos***

Luego de que J. J. Thomson descubriera el electrón en 1897 se pensó que era el único componente del átomo. Éste asumió que un átomo estaba constituido por un gran número de estos corpúsculos<sup>12</sup>. En 1900 FitzGerald propuso que un átomo de hidrógeno tenía alrededor de 500 electrones. En 1902 Rutherford<sup>13</sup> afirmó: *“el hidrógeno tiene una estructura muy complicada que consiste en miles de electrones”* y algo similar afirmó el mismo J. J. Thomson en 1903. Evidentemente no tenían idea del valor de la masa del electrón.

Sin embargo quedaba en pie la respuesta a la pregunta sobre qué agente neutralizaba la carga de los electrones y cuál era su contribución a la masa del átomo.

Thomson no estaba predispuesto a asociar al agente que compen-sara la carga de los electrones con una nueva forma de materia y que por ende contribuyera a la masa del átomo aunque determinara el tamaño del mismo.

Sin embargo en el año 1907 se comenzó a abandonar la idea de que sólo los electrones formarían parte del átomo. Thomson planteó un modelo de carga positiva y descartó la idea de miles de electrones.

En la primera década del siglo XX hubo extraordinarios avances en la física teórica debido a los trabajos de Planck y Einstein, pero no en lo que respecta a la física atómica. El átomo individual permanecía siendo un misterio a pesar de los grandes esfuerzos realizados.

Desde el principio se tuvo claro que los electrones, dentro del átomo, deberían estar en movimiento. En primer lugar para dar cuenta de los espectros y en segundo porque no podrían estar en equilibrio estático. Aparecía el problema de que al estar confinados en un volumen finito sus movimientos no podían ser uniformes y por lo tanto deberían radiar y entonces el átomo no sería estable por la pérdida de energía.

En 1901, Jeans<sup>14</sup> propone un modelo, denominado de pares formados por un par de partículas de igual masa pero signo eléctrico opuesto. Jeans fracasa en el intento de explicar las líneas espectrales. Algo similar postula Lenard<sup>15</sup> quien denomina al par “dynamid”. Ninguno de ellos afirma nada sobre las regularidades químicas.

La imagen de que el átomo es análogo a un sistema solar apareció mucho antes de que Rutherford descubriera el núcleo.

Vale la pena recordar dos propuestas. En 1901 Perrin<sup>16</sup> afirma: “cada átomo consiste de uno o más soles... Y pequeños planetas negativos”; y al comienzo de 1903, Nagaoka<sup>17</sup>, profesor de física de la Universidad de Tokyo, propone un átomo “saturniano” en el cual los electrones se mueven en uno o más anillos alrededor de un cuerpo central. Los espectros se supone que se deben a perturbaciones en los movimientos de los anillos. La importancia de este trabajo se manifiesta en que fue citado por Poincaré y Rutherford. Cálculos basados en este modelo de Nagaoka indicaron que el átomo sería muy inestable y en consecuencia se abandonó.

### ***Modelo de J. J. Thomson***

El período 1897-1913 abarca dos épocas diferentes: en la primera se pensaba que el número de electrones en el átomo era elevado, y en la segunda, a partir de 1906 y por influencia de J. J. Thomson, se asume que el número de electrones es del orden del número atómico.

En 1902, Kelvin<sup>18</sup> propuso que la carga positiva puede estar homogéneamente distribuida en el volumen atómico, supuesto esférico. Inmediatamente Thomson<sup>19</sup> adoptó esta imagen.

Supuso que los electrones rotan con la misma velocidad angular  $\omega$  en un mismo plano aunque pueden estar en distintos anillos. Este modelo se denomina *el budín de pasas*. Durante 1904 y 1905 Thomson<sup>20</sup> intentó explicar, con poco éxito, la pérdida por radiación, la emisión  $\beta$  en la radiactividad y la tabla periódica.

### ***Contribución de Einstein a la aceptación de la teoría atómica de la materia***

La tesis de Einstein, presentada el 20 de julio de 1905 en la Universidad de Zurich y publicada en los *Annalen der Physik* en agosto del mismo año, daba un método para el cálculo de los tamaños moleculares. Esto resultó un aporte decisivo en la consolidación de la teoría atómica de la materia y que culminó con su explicación del movimiento Browniano. Este es el movimiento irregular de partículas microscópicas suspendidas en un líquido, lo que fue observado en 1828 por el botánico Robert Brown.

La deducción que hizo Einstein de las leyes que gobiernan el movimiento Browniano, y su posterior verificación experimental por parte de Perrin, contribuyó en forma significativa al reconocimiento de la realidad física de los átomos por los entonces todavía numerosos escépticos.

Desde al menos mediados del siglo XIX, un número creciente de físicos y químicos habían aceptado la hipótesis atómica. Sin embargo la realidad física de los átomos no estaba universalmente aceptada aún a fines de dicho siglo. Había acérrimos opositores a la teoría atómica como W. Ostwald y G. Helm. Otros, como Ernst Mach, pensaban que entidades no directamente accesibles a la experiencia sensorial, como los átomos, sólo tenían un valor heurístico o didáctico.

## **2. Los experimentos de dispersión. El modelo de Rutherford del átomo**

En diciembre de 1910, en una carta dirigida a su amigo Boltwood, Rutherford afirma: “*Pienso que puedo idear un modelo del átomo superior al de Thomson con el que pueda explicar la absorción de las partículas  $\alpha$  y  $\beta$  y otros hechos experimentales*”<sup>21</sup>.

Durante su permanencia en Montreal, en 1906, Rutherford<sup>22</sup> fue el primero en observar la dispersión de las partículas  $\alpha$  por la materia.

Un año después, en junio de 1907 como ya se indicó, abandonó Canadá y arribó a Manchester. Una de sus primeras tareas fue confeccionar una lista de “posibles investigaciones” y a una de ellas la denominó: *Dispersión de los rayos  $\alpha$* . Además de haber colaborado con Rutherford en la caracterización de las partículas  $\alpha$  la participación de H. Geiger fue decisiva en los experimentos de dispersión que culminaron con el descubrimiento del núcleo.

El 18 de junio de 1908 Rutherford presentó dos comunicaciones en la “Royal Society”. En la primera, en colaboración con Geiger<sup>23</sup>, muestran que la carga de la partícula  $\alpha$  es en magnitud el doble que la carga del electrón. La restante, en la que figura Geiger<sup>24</sup> solo, es una nota preliminar sobre la dispersión de las partículas  $\alpha$ .

Las experiencias con rayos catódicos, el descubrimiento por parte de J. J. Thomson en 1897 del electrón y la radiactividad sugirieron que el átomo es una entidad compleja y que puede descomponerse.

En la figura 1 se muestra un esquema del experimento de dispersión de partículas  $\alpha$  en las que éstas eran dispersadas por materiales de alto peso atómico Z.

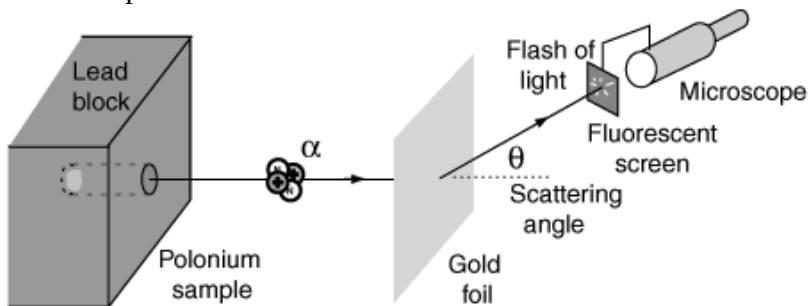


Fig 1. Las partículas  $\alpha$  son dispersadas por una lámina de oro y detectadas por el destello que producen en una pantalla fluorescente.

La fuente radiactiva eran unos pocos mg de  $\text{RaBr}_2$  que emitían partículas  $\alpha$ . Éstas eran colimadas y luego dispersadas por una delgada lámina de oro o aluminio. Se contaban los proyectiles o partículas  $\alpha$  dispersadas en función del ángulo de desviación  $\theta$ . Para ello se contabilizaban, a ojo, los destellos luminosos que las partículas  $\alpha$  producían cada vez que incidían en una pantalla fluorescente.

Para espesores equivalentes, el oro tenía un poder de dispersión mayor que el aluminio.

Geiger señala, y anticipa: *“algunas de las partículas  $\alpha$  eran dispersadas en ángulos apreciables ... Un análisis detallado de estos resultados nos permitirá realizar un estudio desde un punto de vista teórico de la materia”*.

Un joven estudiante ayudante de Geiger, E. Marsden, contó la siguiente anécdota: *“en los primeros días del año 1909 estaba con Geiger en el laboratorio contando partículas  $\alpha$  con el experimento de dispersión cuando el Profesor Rutherford entró en él. Fue entonces cuando me dijo, vea Ud. si aparecen partículas  $\alpha$  directamente reflejadas desde la superficie del metal. Pienso que tal vez no esperaba ningún resultado, pero no dudo que tuvo una premonición que quizás algún efecto de ese tipo se podía observar. Para mi sorpresa observé el resultado sospechado por Rutherford, a quien se lo comuniqué al cabo de una semana”*.

Estos resultados fueron publicados, por Geiger y Marsden, en mayo de 1909<sup>25</sup>.

El resultado más importante fue que una de cada 8000 partículas  $\alpha$  incidentes se refleja, es decir el ángulo de dispersión es mayor de 90°. También analizaron la dispersión en función del número atómico Z del dispersor.

En una conferencia, de las pocas que Rutherford dio en toda su vida, describió su reacción sobre el efecto del retroceso de las partículas  $\alpha$ : *“fue el evento más increíble que me haya sucedido en mi vida, tan increíble como si Ud. dispara un proyectil de 15 pulgadas sobre una hoja de papel y rebota y vuelve sobre sí mismo”*.

Desde el punto de vista del modelo atómico aceptado en ese entonces el resultado experimental era asombroso. Cuesta imaginar que un proyectil enorme (la partícula  $\alpha$ ) moviéndose a una velocidad de 10.000 km/s que choca contra un manojo de minúsculos electrones inmersos en una “jalea” de carga positiva pueda rebotar volviendo sobre su trayectoria.

Estando en Montreal, en 1906, ya Rutherford había observado ángulos de dispersión de aproximadamente 2° al bombardear una lámina de mica de 0.003 cm de espesor. En ese entonces señaló que esto *“requiere en esa distancia de campos eléctricos transversales de 100 millones de V/cm”*<sup>26</sup>. Qué pensar entonces para ángulos mayores que 90°.

A principios de 1910, Geiger escribió al referirse a los resultados obtenidos con Marsden (de grandes ángulos) que aún no era el momento conveniente para discutir las razones que provocaban tal dispersión. Es razonable suponer que estaba al tanto de que Rutherford

estaba madurando una nueva idea revolucionaria respecto del átomo. Todo permaneció tranquilo hasta fines de 1910 que es cuando, como se señaló antes, Rutherford le escribió una carta a su amigo Boltwood<sup>21</sup>.

Geiger ha relatado lo siguiente “a principios de 1911 Rutherford entró en mi oficina y me comunicó, estando del mejor humor, que se dio cuenta de cómo tenía que ser el átomo para explicar los resultados de dispersión”<sup>27</sup>.

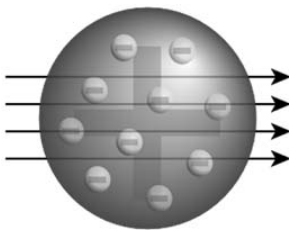
El 7 de marzo Rutherford presentó su resultado en una reunión de la Manchester Literary and Philosophical Society y en mayo apareció la publicación en la revista *Philosophical Magazine*<sup>28</sup>.

Es interesante señalar que en el año 1909, ya siendo Rutherford premio Nobel, se dio cuenta que no sabía suficiente teoría de probabilidades como para analizar una pequeña muestra de datos. Entonces decidió transformarse en un alumno tomando un curso de grado dictado por H. Lamb.

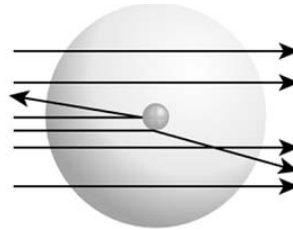
Rutherford siempre fue reacio a convertirse en físico teórico y sólo lo hacía si tenía que interpretar resultados experimentales de su propio laboratorio.

Sus contribuciones teóricas más relevantes fueron con Soddy, en 1902 en Montreal, en relación al formalismo para una secuencia de decaimientos radiactivos sucesivos y en 1911 su trabajo sobre la dispersión  $\alpha$ .

En la figura 2 se muestra cómo se comportarían las partículas  $\alpha$  si el átomo fuera el propuesto por Thomson o por Rutherford.



**Resultados esperados:**  
Las partículas alfa pasando a través del modelo del “pudding con pasas” sin verse alteradas



**Resultados observados:**  
Una pequeña parte de las partículas eran desviadas, demostrando la existencia de un minúsculo volumen de carga positiva

Fig 2. Comportamiento de las partículas  $\alpha$  con el modelo de J. J. Thomson y de E. Rutherford.

El modelo de Rutherford para un átomo de  $N$  electrones consiste en una carga  $\pm Ne$  en su centro. Por conveniencia asume que el signo es positivo. El resultado final de la dispersión  $\alpha$  no depende de esta ambigüedad en el signo.

Más aún, en un momento jugó con la idea, por cierto extraña, de un centro de carga negativa pues pensó que explicaría mejor la absorción de los rayos  $\beta$ .

La carga central, positiva, está rodeada por una esfera en la cual la carga negativa  $- Ne$  debida a los electrones está uniformemente distribuida. Esta última suposición es irrelevante en su teoría de la dispersión  $\alpha$  ya que asume que el fenómeno se debe a la acción de una carga central positiva puntual sobre una partícula  $\alpha$  también puntual, despreciando el retroceso de la carga central.

En su trabajo, que daba por tierra con el modelo de Thomson, por cortesía hace referencia al mismo. En él calcula la sección eficaz (término que aún no estaba en uso)  $\sigma(\theta)$  para la dispersión de una partícula  $\alpha$  sobre un ángulo  $\theta$ . Este cálculo es hoy en día un ejercicio de grado de la mecánica Newtoniana del movimiento de una partícula en un potencial del tipo  $1/r$  cuya trayectoria resulta ser una hipérbola.

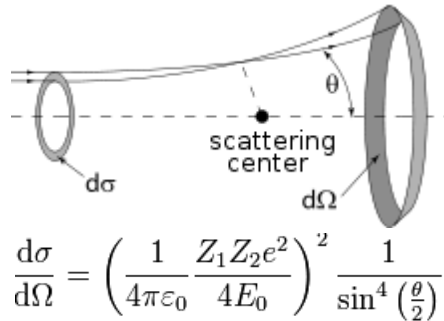


Fig 3. Probabilidad de que las partículas  $\alpha$  dispersadas incidan en un ángulo sólido  $d\Omega$  después de ser desviadas un ángulo  $\theta$ .

$E_0$  se refiere a la energía cinética de la partícula  $\alpha$  y  $Z_1$  y  $Z_2$  son los números atómicos de la partícula  $\alpha$  y del blanco. Rutherford verificó que su teoría coincidió cualitativamente con el trabajo de Geiger y Marsden<sup>25</sup> en cuanto a la dispersión para grandes ángulos, en la dependencia con el número atómico y con los resultados de Geiger<sup>29</sup> en relación al ángulo promedio de dispersión de las partículas  $\alpha$ . Finalmente en el año 1912 Geiger y Marsden, luego de repetir satisfactoriamente las medidas de dispersión, publicaron sus resultados en la revista *Philosophical Magazine*<sup>30</sup>.



En cierta manera Rutherford tuvo “suerte” en sus experiencias, ya que con los proyectiles que tuvo a su disposición, partículas  $\alpha$  de energías de alrededor 5 MeV y blancos con alto número atómico, la penetración de la barrera coulombiana nuclear era muy baja. Esto significaba que las interacciones fuertes o nucleares no intervenían, ya que los proyectiles no podían acercarse demasiado a los nucleones. De haber sido así la fórmula de Rutherford no hubiese ajustado adecuadamente con los resultados experimentales. Por otro lado las partículas  $\alpha$  utilizadas tenían la suficiente energía como para justificar que se despreciara la dispersión con los electrones orbitales. Además la sección eficaz de dispersión coulombiana clásica y cuántica, en el límite no relativista, coinciden. Cabe preguntarse qué hubiese pasado si las experiencias iniciales de bombardeo la hubiesen hecho con blancos de bajo número atómico  $Z$ .

Desde esos primeros tiempos se han realizado muchos refinamientos de la fórmula de la sección eficaz original considerando: apantallamiento del campo coulombiano nuclear por parte de los electrones orbitales, contribución a la dispersión  $\alpha$  por los mismos electrones atómicos, efectos relativistas y del spin, la influencia del tamaño nuclear finito y de las interacciones fuertes.

### **3. Las fuerzas nucleares y la primera reacción nuclear**

En 1911 Rutherford dedujo la existencia del núcleo. Su principal hipótesis fue que la dispersión de las partículas  $\alpha$  se debía a la fuerza de repulsión coulombiana, del tipo  $1/r^2$ , entre el proyectil y el núcleo considerados ambos puntuales.

En 1917 Rutherford comenzó en Manchester una nueva serie de experimentos en los que bombardea núcleos livianos como H, N y O con partículas  $\alpha$ .

Estos resultados son publicados en 1919 en un artículo denominado: “Colisión de partículas  $\alpha$  con núcleos livianos”. En él reportó que la hipótesis de repulsión coulombiana no siempre se puede tomar como válida ya que las fuerzas entre las partículas  $\alpha$  y el núcleo son más complejas de lo que había supuesto.

En uno de estos experimentos situaba su fuente radiactiva, RaC ( $^{214}\text{Bi}$ ), dentro de un tubo que contenía H a presión atmosférica. Cubría alternativamente la fuente con láminas de oro y aluminio de tal forma que las partículas  $\alpha$  emitidas, que son de 5 MeV, reducían su energía. El método de detección consistió en contar los destellos

que producen los núcleos de hidrógeno dispersados por las partículas  $\alpha$ . Éstas, de 5 MeV, tienen la suficiente energía como para penetrar la barrera coulombiana  $\alpha$  – hidrógeno de tal forma que las fuerzas nucleares entran en juego y la dispersión no sigue lo que indicaba la fórmula de Rutherford que sólo consideraba fuerzas de repulsión eléctricas. Cuando las  $\alpha$  tienen menor energía (al cubrir la fuente con Au o Al) no se acercan tanto al núcleo del H (protón) y sólo actúan las repulsiones eléctricas y la dispersión coincide con la fórmula de Rutherford. Esto le permitió a Rutherford estimar la distancia característica a partir de la cual entra en juego este nuevo efecto, cuyo valor es:

$$d = 3.5 \times 10^{-13} \text{ cm}$$

Rutherford en el año 1917 pensaba que las partículas  $\alpha$  tenían una estructura compleja y eran cuatro núcleos de H y dos electrones negativos. Señaló que para distancias menores a  $3.5 \times 10^{-13}$  cm la fuerza podría no obedecer al inverso del cuadrado de la distancia; sin embargo indicó que sería más simple suponer que la alteración de la fuerza se debería a una deformación del núcleo. Es decir que Rutherford consideraba más prudente seguir suponiendo que todas las fuerzas involucradas eran electromagnéticas y que el nuevo efecto se debería a deformaciones de la estructura de las partículas que colisionaban.

En una publicación posterior Rutherford presentó resultados de colisiones de partículas  $\alpha$  con N y O, e indicó desviaciones respecto de la “teoría simple”, es decir que Rutherford lentamente se convenció de que hay algo más en juego que simplemente fuerzas de origen eléctricas.

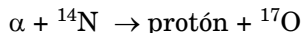
### ***Nuevamente en el Laboratorio Cavendish***

En el año 1919 Rutherford dejó su puesto en Manchester y se trasladó al Laboratorio Cavendish en Cambridge. Se llevó equipos, una fuente radiactiva de Radio y su ayudante James Chadwick. Este último, bajo la dirección de Rutherford, continuó con los experimentos de dispersión de partículas  $\alpha$  por hidrógeno<sup>31</sup> y otros núcleos livianos. Señalaron que muy cerca de una carga eléctrica la ley de fuerzas no es del tipo  $1/r^2$ . Chadwick puntualizó que eran fuerzas de enorme intensidad y que era necesario encontrar los campos de fuerzas que reprodujeran los efectos observados. Esta afirmación, hecha en 1921, marcó el nacimiento de la idea de las interacciones fuertes.

## ***La primera reacción nuclear***

Las experiencias de colisiones de partículas  $\alpha$  sobre núcleos livianos condujeron a Rutherford y Chadwick a un descubrimiento de gran importancia. El bombardeo puede desintegrar núcleos livianos como N, B, F, Na, Al y P. Obtuvieron la primera reacción nuclear artificial, es decir la transmutación de los elementos.

Comunicaron<sup>32</sup> el primer ejemplo de una reacción nuclear inducida:



pero no pudieron verificar directamente la producción del isótopo del oxígeno por la pequeñísima cantidad producida.

Quedó por responder si las partículas  $\alpha$  penetran en el núcleo blanco, forman un núcleo compuesto y luego se emite el protón o sólo expulsan el protón por un choque con él. Para la confirmación de la primera de ambas hipótesis fue determinante el equipo desarrollado por C. T. R. Wilson en el laboratorio Cavendish, la cámara de niebla, que permite visualizar las trayectorias de las partículas que intervienen en la reacción nuclear.

## ***El primer modelo del núcleo***

A comienzos de 1914 estaba claro que el núcleo era el asiento de todos los fenómenos radiactivos y que todas las diferentes especies nucleares quedaban especificadas por los números A y Z. También se aceptaba que las interacciones entre las partículas  $\alpha$  y los núcleos eran de origen electromagnético, es decir que las fuerzas que permitían obtener la sección eficaz de dispersión de Rutherford eran del tipo  $1/r^2$ .

Asumiendo esta hipótesis y calculando la distancia más cercana de aproximación de la partícula  $\alpha$ , Rutherford se dio cuenta en 1911<sup>33</sup> que el radio nuclear es  $r \leq 3 \times 10^{-12}$  cm. Al núcleo de hidrógeno, que es el más pequeño, lo llamó la *partícula H o electrón positivo*, y se aceptó su carácter básico. El nombre de protón fue posterior.

Si los núcleos de las sustancias radiactivas emiten partículas  $\alpha$  y  $\beta$  fue lógico que se aceptara que ambas formaban parte de éstos. La contribución de los electrones a la masa nuclear sería muy pequeña y servirían principalmente para compensar la carga eléctrica. Pero si éstos fuesen los únicos componentes los números másicos A serían múltiplos de 4. La partícula H o núcleo de hidrógeno podría resolver este problema.

En febrero de 1914 Rutherford<sup>34</sup> conjeturó para la partícula  $\alpha$  la siguiente composición  $\text{He} = 4\text{H} + 2\text{e}$ . En general para una especie isotópica X con número másico A y carga Z se tiene:

$$X = \text{AH} + (\text{A} - \text{Z})\text{e}$$

Lo que significa aceptar que los núcleos están compuestos por núcleos de H (protones) y electrones.

Sin embargo la ecuación anterior es incorrecta. ¿Cómo entonces podía entenderse que algunos núcleos emitan electrones? La respuesta se tuvo veinte años después cuando E. Fermi explicó la emisión de electrones, o decaimiento  $\beta$ , como la transformación de un neutrón en un protón, con la emisión simultánea de un electrón y un neutrino. En resumen, no hay electrones libres dentro del núcleo.

En ese entonces Rutherford señaló: *“el núcleo de He o partícula  $\alpha$  debe ser una configuración muy estable, ya que sobrevive la intensa perturbación que significa su emisión de un núcleo radiactivo y además debe ser una unidad que compone los núcleos”*.

Alrededor de esos años, 1914/1915, se aceptaba que los núcleos a pesar de sus diminutas dimensiones eran un sistema complejo de cargas positivas y negativas unidas por intensas fuerzas eléctricas, ya que en ese entonces sólo se conocían las fuerzas electromagnéticas y las gravitacionales, siendo estas últimas despreciables. Sin embargo Rutherford vislumbró que algo diferente pasaba dentro de los núcleos, *“los electrones nucleares y las cargas positivas deben estar mantenidas juntas y en equilibrio por fuerzas de diferente orden de magnitud que aquellas que ligan los electrones externos”*. Poco tiempo después aparecen las primeras evidencias de la existencia de las fuerzas nucleares fuertes.

#### **4. El descubrimiento del neutrón y el modelo nuclear definitivo**

El conocimiento del núcleo fue un proceso lento y laberíntico, hubo una física pre-nuclear, siguió con el descubrimiento del núcleo, de los isótopos, de las masas nucleares, de la carga y dimensiones del núcleo y finalmente en el año 1932 todo culmina con el descubrimiento por parte de Chadwick del neutrón.

En gran parte de este desarrollo la figura de Rutherford fue decisiva y casi excluyente. El concepto del neutrón tuvo una larga gestación. En 1920 Rutherford ya señaló: *“puede ser posible que el*

*electrón se combine mucho más íntimamente con el núcleo de H que en el átomo de hidrógeno, es mi intención ‘testear’ esta idea, esta existencia es necesaria para explicar la construcción de átomos pesados”.*

Rutherford puso a trabajar a sus jóvenes colaboradores de entonces en la búsqueda de esa partícula neutra que sospechaba de su existencia.

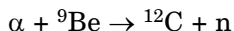
Uno de ellos, J. L. Glasson, trató de ver la posible producción generando descargas en un tubo con protones y electrones. Los resultados fueron negativos, pero en su reporte de 1921<sup>35</sup> señaló que estos presuntos objetos neutros “*eran denominados neutrones por el Profesor Rutherford*”. Fue la primera vez que apareció tal denominación. Posteriormente en un trabajo del año 1929 de Rutherford y Chadwick<sup>36</sup> reapareció nuevamente el nombre de neutrón.

Ambos estaban cerca de descubrirlo, aunque los resultados son negativos, cuando analizaron los productos del bombardeo de Aluminio con partículas  $\alpha$ .

La fase final de la búsqueda del neutrón comenzó en junio de 1930 cuando Bothe y Becker<sup>37</sup> comunicaron que el bombardeo de Be con partículas  $\alpha$  generaba una nueva radiación muy energética que la asimilaban con rayos  $\gamma$ . Luego, el 28 de enero de 1932, los Joliot-Curie<sup>38</sup> informaron que si los presuntos rayos  $\gamma$  a que hacían referencia Bothe y Becker eran capaces de eyectar protones de la parafina por efecto Compton entonces la energía de estos rayos sería de alrededor de 50 MeV. Poco después dudaron de esta explicación, dado que suponían que estos  $\gamma$  no podrían tener tan alta energía y propusieron que debe haber otro mecanismo, que no sea el Compton, de interacción entre los protones (de la parafina) y los  $\gamma$  (22 de febrero de 1932)<sup>39</sup>.

Mientras tanto Chadwick, en el laboratorio Cavendish, con la supervisión de Rutherford, estaba a punto de descubrir el neutrón. Ambos no creían en la hipótesis de la producción de rayos  $\gamma$  propuesta por los autores anteriores.

El 17 de febrero Chadwick<sup>40</sup> envió un trabajo denominado “Posible existencia del neutrón”. Propuso que en la reacción  $\alpha - \text{Be}$  se generaban neutrones:



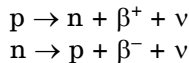
Para corroborar esta propuesta calcularon la velocidad de retroceso cuando la presunta radiación incidía sobre H y N y concluyeron que debía tratarse de una partícula neutra con una masa muy similar a la del protón.

De esta manera comenzó la era de la física del neutrón y entra en escena E. Fermi que se transformó en el mayor experto en esta especialidad.

La dispersión y absorción de neutrones se transformó en una herramienta importante para el estudio de la estructura nuclear. El bombardeo con neutrones llevó al descubrimiento de la fisión nuclear y esto tendría un impacto tecnológico y político de primera magnitud.

Durante dos años, desde 1932 hasta 1934, se aceptó el modelo protón-electrón para el neutrón. Pero finalizó cuando apareció la teoría de Fermi del decaimiento  $\beta$  y a partir de ese momento se consideró al neutrón como una partícula fundamental, tal como se aceptaba para el protón.

En consecuencia, a partir de ese entonces se considera que el núcleo sólo está formado por protones y neutrones y las emisiones  $\beta^+$  y  $\beta^-$  de los núcleos radiactivos provienen de las transformaciones de cada uno de ellos en el otro con la emisión simultánea de un electrón y un neutrino:



La década de los años 30 significó el fin de la hegemonía de la partícula  $\alpha$ , la cual le sirvió a Rutherford para descubrir el núcleo, las transmutaciones artificiales, intuir la existencia de las fuerzas nucleares y a Chadwick para descubrir el neutrón. Sin embargo esta situación no persuadió a Rutherford de comenzar a construir un ciclotrón en el Laboratorio Cavendish, lo que significó que Chadwick se trasladara a Liverpool donde construyó un ciclotrón ya que pensaba que era una herramienta esencial para los futuros estudios de la física nuclear.

Ellis, un importantísimo colaborador de Rutherford, abandonó su lugar en el Cavendish y se trasladó al King's College de Londres. Sin embargo, a pesar del éxodo de algunos de sus más importantes colaboradores, continuó con el control y dirección de todas las líneas de investigación. En sus últimos años Rutherford sufrió de una delicada hernia inguinal. A mediados de octubre de 1937 tuvo una indigestión por lo que fue internado, el día 15 fue operado de la hernia y al atardecer del 19 de octubre falleció. Tenía 66 años.

Dos días después sus restos fueron cremados y sus cenizas depositadas en la Abadía de Westminster.

## 5. Energía de ligadura, la fisión nuclear y el reactor nuclear como fuente de energía

En el año 1905 Einstein obtuvo, en el marco de la teoría especial de la relatividad la relación:

$$E = m c^2$$

conocida como la equivalencia masa – energía.

En ese entonces señaló: “*por el momento no hay esperanza de verificar experimentalmente esta ecuación*”. Mientras Einstein propuso verificarla en términos de la pérdida de peso en los decaimientos radiactivos, Planck fue el primero en proponer otro test: “*un sistema ligado debe tener una masa menor que las de sus constituyentes*”. En 1913 Paul Langevin afirmó que la idea de Planck debía ser válida para los núcleos.

A partir del año 1927 se pudieron medir las masas de los isótopos con la precisión adecuada para corroborar lo afirmado por Planck y Langevin. Esto se consiguió con el desarrollo de los espectrómetros de masa debidos principalmente, entre otros, a Aston.

Se miden los defectos de masa de los isótopos:

$$\Delta M = Z m_p + (A - Z) m_n - M(Z,A)$$

Y se define la energía de ligadura de un núcleo como:

$$B = \Delta M c^2$$

La cual representa la energía necesaria para separar a un núcleo en sus componentes.

Se construye así la curva de energía de ligadura por nucleón en función del número de nucleones para todos los elementos:

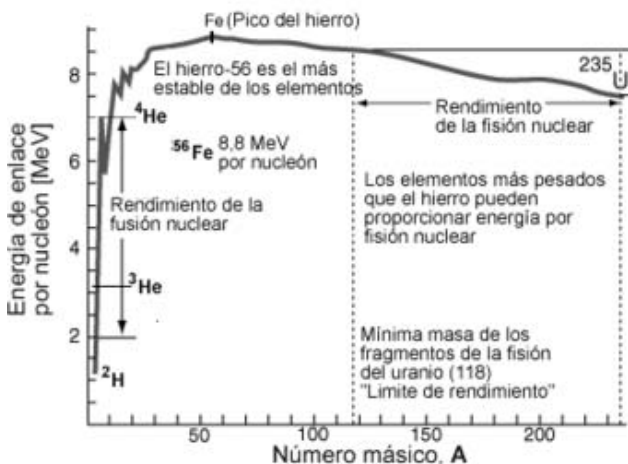


Fig 4. Energía de ligadura por nucleón en función del número másico.

Esta gráfica anticipa que si un núcleo pesado, como puede ser el uranio, se divide o fisiona en dos núcleos menores entonces hay un cambio en la energía de ligadura y ésta aumenta a expensas de la masa final que disminuye. Esta disminución de la masa se traduce en una liberación de energía de acuerdo a la equivalencia masa – energía. Para el caso del uranio esta energía liberada vale 200 MeV por núcleo que se fisiona y la mayor parte de ella se manifiesta como energía cinética de los dos núcleos menores o productos de fisión. La fisión completa de un mol del isótopo  $^{235}\text{U}$ , es decir de sus  $6.02 \cdot 10^{23}$  átomos, representa una increíble energía. Si esta liberación es descontrolada y casi instantánea se tiene una bomba; si se realiza en forma controlada y lenta entonces puede ser aprovechada para generar energía en el llamado reactor nuclear.

A lo largo de la década del '30 se hicieron numerosos experimentos con neutrones. En el año 1939, O. Hann y Strassman, al bombardear un blanco de uranio natural con neutrones descubrieron la fisión nuclear. Fue en el año 1945 en que E. Fermi en la universidad de Chicago produjo la primera reacción nuclear en cadena controlada, es decir el primer reactor nuclear.

La posibilidad de poder tener una reacción en cadena autosostenida reposa en el hecho de que en una fisión se liberan entre dos o tres neutrones los que provocarán las sucesivas fisiones.

Las siguientes figuras ilustran el proceso de fisión y un esquema de un reactor nuclear.

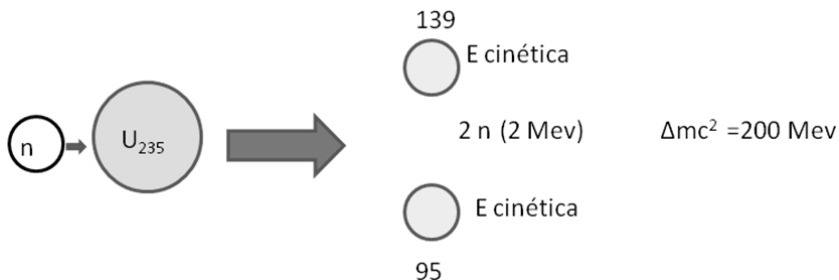


Fig 5. Un neutrón lento (0,025 eV) fisiona un núcleo de  $^{235}\text{U}$  en dos núcleos de números másicos 139 y 95. En este ejemplo se liberan dos neutrones rápidos (2MeV) y una energía de 200 MeV.

En la figura 6 se muestra el esquema de un reactor nuclear. En un recipiente V se colocan las barras de combustible nuclear C. Estas pueden ser de uranio natural (99,3% de  $^{238}\text{U}$  y 0,7% de  $^{235}\text{U}$ ) o uranio enriquecido (mayor porcentaje en  $^{235}\text{U}$  que el natural). To-



das están inmersas en el moderador M que puede ser de agua pesada ( $D_2O$ ) o agua liviana o natural. El moderador que circula, refrigera las barras de combustible, las que se calientan por las fisiones nucleares que se producen en su interior. El moderador entrega su calor en un intercambiador de calor B y regresa al recipiente V. En el circuito secundario se genera vapor de agua que mueve una turbina T que genera electricidad en un generador G.

D representa las barras de control. Estas son de un material que tiene alta absorción de neutrones y que cuando son introducidas en el recipiente V detienen la reacción en cadena.

Las fisiones las producen neutrones de baja energía (térmicos) al ser absorbidos por el  $^{235}U$ . Los neutrones de fisión que son muy energéticos no son aptos para producir otras fisiones a menos que se reduzcan sus energías. Esto se consigue con choques sucesivos con los átomos del moderador.

Fig 6. Un reactor nuclear con un circuito primario de moderador que actúa como refrigerante y un circuito secundario con una turbina y un generador.

## Esquema de un reactor

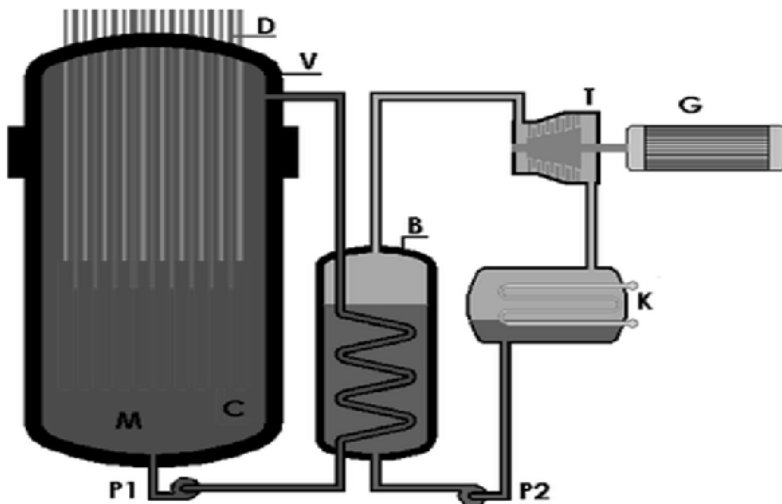


Fig 6. Un reactor nuclear con un circuito primario de moderador que actúa como refrigerante y un circuito secundario con una turbina y un generador.

## Referencias

1. J. J. Thomson and E. Rutherford, *Phil. Mag.*, **42**, 392, 1896.
2. E. Rutherford, *Phil. Mag.*, **47**, 109, 1898.
3. E. Rutherford, *Phil. Mag.*, **5**, 177, 1903.
4. E. Rutherford and H. Geiger, *Proc. Roy. Soc.*, A **81**, 162, 1908.
5. E. Rutherford and F. Soddy, *Phil. Mag.*, **4**, 370 y 569, 1902.
6. E. Rutherford, *Phil. Mag.*, **49**, 1, 1900.
7. E. Rutherford, *Radioactivity*, Cambridge Univ. Press. 1904.
8. E. Rutherford and H. Geiger, *Proc. Roy. Soc.*, A **81**, 162, 1908.
9. W. Prout, *Ann. Of Philosophy*, **6**, 321, 1815.
10. W. Thomson, *Phil. Mag.*, **34**, 15, 1867.
11. S. P. Thomson, *The life of Lord Kelvin*, Chelsea Pub. Co. N. Y. 1976.
12. J. J. Thomson, *Phil. Mag.*, **48**, 547, 1899.
13. E. Rutherford, *Trans. Roy. Soc. Canada*, **8**, 79, 1902.
14. J. Jeans, *Phil. Mag.*, **2**, 421, 1901.
15. P. Lenard, *Ann. Der Phys.*, **12**, 714, 1903.
16. J. Perrin, *Rev. Scientifique*, **15**, 447, 1901.
17. H. Nagaoka, *Proc. Tokyo Math. Phys. Soc.*, **2**, 92, 129, 240, 1903-1906.
18. Kelvin, *Phil. Mag.*, **6**, 257, 1902.
19. J. J. Thomson, *Phil. Mag.*, **6**, 673, 1903.
20. J. J. Thomson, *Phil. Mag.*, **7**, 237, 1904.
21. L. Badash, *Rutherford and Boltwood*, Yale Univ. Press. New Haven, Conn. 1969.
22. E. Rutherford, *Phil. Mag.*, **12**, 143, 1906.
23. E. Rutherford and H. Geiger, *Pro. Roy. Soc.*, **A81**, 162, 1908.
24. H. Geiger, *Proc. Roy. Soc.*, **A181**, 174, 1908.
25. H. Geiger and E. Marsden, *Proc. Roy. Soc.*, **A82**, 495, 1909.
26. E. Rutherford, *Phil. Mag.*, **12**, 143, 1906.
27. H. Geiger, In collected paper of Rutherford, Vol 2, pag. 295, *Intern. Sc. NY* 1966.
28. E. Rutherford, *Phil. Mag.*, **21**, 669, 1911.
29. H. Geiger, *Proc. Roy. Soc.*, **A83**, 492, 1910.
30. H. Geiger and E. Marsden, *Phil. Mag.*, **25**, 604, 1913.
31. J. Chadwick and E. S. Bieler, *Phil. Mag.*, **42**, 923, 1921.
32. E. Rutherford, *Phil. Mag.*, **37**, 581, 1919.
33. E. Rutherford, *Phil. Mag.*, **21**, 669, 1911 y **25**, 604, 1913.
34. E. Rutherford, *Phil. Mag.*, **27**, 488, 1914.
35. J. L. Glasson, *Phil. Mag.*, **42**, 496, 1921.
36. E. Rutherford, J. Chadwick and C. D. Ellis, *Radiation from radioactive substances*, pag. 523, Cambridge, Univ. Press 1930.
37. W. Bothe and H. Becker, *Nature*, **20**, 252, 1932.
38. I. Curie and F. Joliot, *Comptes Rendus*, **194**, 273, 1932.
39. I. Curie and F. Joliot, *Comptes Rendus*, **194**, 708, 1932.
40. J. Chadwick, *Nature*, **124**, 312, 1932.

## **Bibliografía**

Abraham Pais, *Inward Bound of Matter and Forces in the Physical World*,  
Clarendon Press, Oxford University Press  
William H. Cropper, *Great Physicists*, Oxford University Press.

SECRETARIO ACADÉMICO DE  
LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES