

Experimento histórico:

Descubrimiento del protón

INTRODUCCIÓN

Después del descubrimiento del núcleo atómico por Ernest Rutherford (1871-1937) en 1911¹, y con la esperanza de obtener mayores conocimientos de la estructura, composición y estabilidad nuclear, Rutherford y Ernest Marsden² (1888-1970) continuaron realizando experimentos de dispersión de partículas alfa³ por núcleos ligeros. En 1914 Marsden aceptó trabajar como profesor en Nueva Zelanda, donde no disponía del equipo necesario para continuar con los experimentos, por lo que Rutherford decidió proseguir solo. Pero en agosto de 1914 comenzó la primera guerra mundial y durante los años que duró la contienda, Rutherford trabajó en desarrollar métodos acústicos de detección de submarinos, por lo que le quedaba poco tiempo para trabajar con partículas alfa y núcleos atómicos. Cuando en 1919 la guerra acabó, Rutherford retomó sus experimentos sobre el estudio de los constituyentes nucleares.



Figura 1. Fotografía de Ernst Rutherford.

Fruto de estos experimentos son 4 artículos que se publicaron en "*Philosophical Magazine*" con el título genérico de "*Collision of alfa particles with light atoms*": I – Hydrogen; II – Velocity of the hydrogen

atoms; III – Nitrogen and oxygen atoms; IV – An anomalous effect in nitrogen.

En estos artículos se describen unos experimentos en los que se bombardean distintos gases ligeros (hidrógeno, nitrógeno y oxígeno). Los resultados obtenidos llevaban a la conclusión de dos grandes descubrimientos: la existencia del protón como constituyente de los átomos y la transmutación de los átomos. Rutherford concluyó que algunos átomos de nitrógeno se desintegraban cuando las partículas alfa chocaban con ellos. Los átomos de nitrógeno se transformaban en átomos de oxígeno, había llegado el descubrimiento de la transmutación de los elementos (lo que se denominaba la piedra filosofal⁴ por los antiguos alquimistas). Además, en el experimento demostró que dentro del núcleo de nitrógeno hay núcleos de hidrógeno, lo que significaba que el núcleo de hidrógeno era una partícula elemental. Posteriormente, en 1920, le denominó *protón* del griego "proton" que significa primero.

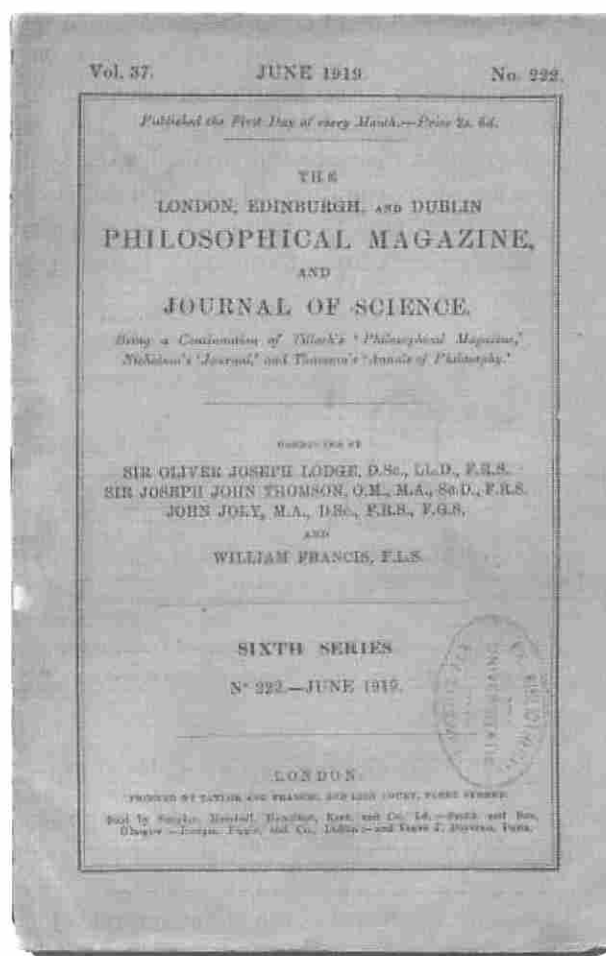


Figura 2. Portada de la revista donde se publicaron los resultados de los experimentos conducentes al descubrimiento del protón.

¹ El experimento con el que Rutherford descubrió el núcleo atómico está descrito en el n.º 6 de esta revista, págs. 107-111.

² Marsden ya había colaborado con Rutherford y Geiger en el descubrimiento del núcleo.

³ Se denomina partícula alfa, α , al núcleo del isótopo del helio He^4 , compuesto por 2 neutrones y 2 protones. Esta partícula es muy estable al tener una gran energía de enlace por nucleón.

⁴ La *piedra filosofal* era una sustancia que según los creyentes en la alquimia tendría propiedades extraordinarias, como la capacidad de transmutar los metales vulgares en oro.

ANTECEDENTES – RAYOS CANALES

En realidad, los protones habían sido detectados varios años antes de los experimentos de Rutherford por el físico alemán Eugen Goldstein (1850-1930), en los rayos canales.

Durante los años 1894 a 1897, J.J. Thomson (1856-1940) estudió el fenómeno de los “rayos catódicos”, que habían sido descubiertos en 1858. Para generar estos rayos invisibles se aplicaba una tensión eléctrica entre dos placas metálicas (electrodos) en el interior de un tubo de vidrio al vacío. En 1879 se postuló que los rayos catódicos eran una corriente de partículas que llevaban cargas eléctricas negativas. Thomson logró calcular la velocidad de las partículas, así como la razón de la carga transportada por cada partícula (e) y su masa (m). Se estableció que la razón e/m era independiente del tipo de metal de que estuviese hecho el cátodo o del gas residual contenido en el tubo. Estas partículas recibieron el nombre de *electrones*.

Goldstein, que había sido el primer investigador que empleó el término rayos catódicos (*Kathodenstrahlen*), inició en el año 1886 unos experimentos empleando un tubo catódico con el cátodo perforado, descubriendo que algunos rayos atravesaban dicho orificio en sentido contrario a los rayos catódicos, denominándolos rayos canales (*Kanalstrahlen*). Los rayos canales atravesaban las perforaciones del cátodo iluminando la zona posterior de éste.

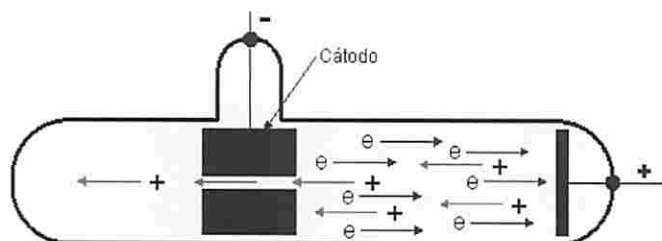


Figura 3. Esquema de un tubo de rayos catódicos, preparado para la obtención de rayos canales.

Las características de estos rayos canales eran:

- Sufren desviaciones por efecto de campos magnéticos y eléctricos.
- Transportan carga positiva.
- La razón carga/masa es mucho menor que el valor obtenido para los electrones y depende del gas contenido en el tubo.

En 1895 el francés J. Perrin (1850-1942) demostró que los rayos canales consistían en partículas cargadas positivamente, pues sufrían desviaciones hacia la placa negativa cuando se les aplicaba un campo eléctrico ex-

terno. A estos rayos J.J. Thomson les dio, en 1907, el nombre de rayos positivos.

Los rayos canales o positivos están constituidos por iones positivos y dependen del gas encerrado en el tubo. Si el gas es hidrógeno, la relación carga/masa es la mayor de todas las encontradas para los rayos positivos, lo cual sugirió que el ión positivo del átomo de hidrógeno era la partícula positiva elemental.

Aunque no fue hasta los posteriores experimentos de Rutherford cuando se llegó a la conclusión de que el ión positivo del hidrógeno (núcleo H^1) era un constituyente elemental del núcleo, y se le identificó con esa partícula elemental positiva, en algunos textos aparece Goldstein como descubridor del protón en 1886.

EXPERIMENTO DE RUTHERFORD

Rutherford bombardeó con partículas alfa distintos gases y midió el *alcance* de las partículas obtenidas. El alcance es una magnitud que se define para partículas cargadas. Para una partícula cargada dada (alfa, beta, protones,...) que incide perpendicularmente sobre la superficie de un medio material determinado, es la distancia máxima de penetración en ese medio. Se define el alcance medio, R , para partículas con energía inicial E_0 :

$$R = \int_0^{E_0} \frac{1}{(dE/dx)} dx$$

El alcance depende del tipo de partícula, de su energía inicial y del medio material atravesado. Conociendo el alcance se puede saber de qué partícula se trata y con qué energía se ha producido, permite caracterizar a las partículas originadas.

Para partículas pesadas (alfa, protones,...) se comprueba experimentalmente que el alcance en aire:

$$R \cong C \times v^3$$

donde v es la velocidad inicial del haz de partículas y C es una constante, cuyo valor depende de las unidades utilizadas.

Ejemplo de medida de alcances

Como ejemplo de medida experimental del alcance de partículas cargadas, se describe la obtención del alcance de las partículas alfa emitidas por una fuente de Am^{241} . Ésta es una práctica que se realiza en la asignatura “Física Nuclear”⁵.

El Am^{241} es un emisor alfa, que emite partículas alfa con energía media de 5,5 MeV⁶. El detector utilizado es de barrera de superficie⁷ conectado a un sistema elec-

⁵ La descripción de las prácticas de “Física Nuclear” aparece en el n.º 1 de esta revista, págs. 10-12.

⁶ El eV es una unidad de energía, utilizada en Física Atómica y Nuclear. $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$.

⁷ Los detectores de barrera de superficie se basan en la ionización que experimenta un semiconductor al paso de sucesos ionizantes.

trónico de adquisición de datos. Para obtener el alcance, se va separando progresivamente la fuente emisora del detector, tomando sucesivos espectros, cuya área va disminuyendo a medida que se aleja la fuente radiactiva. Representando el área del espectro en función de la distancia se obtiene la siguiente gráfica:

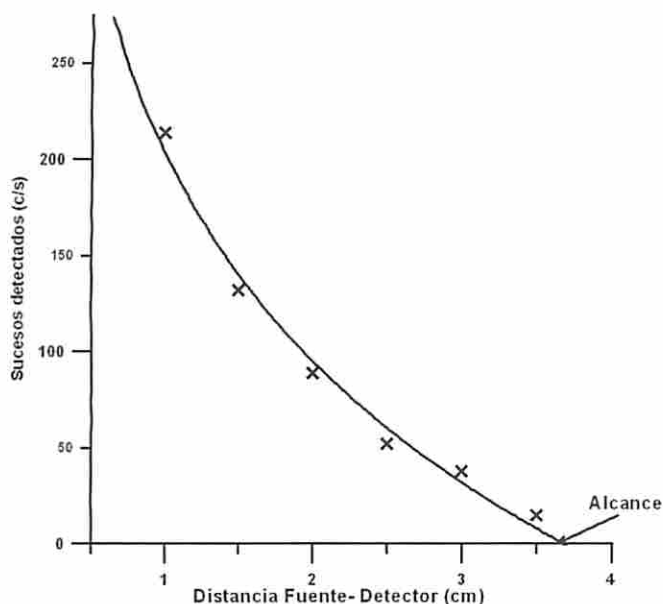


Figura 4. Obtención de alcance experimental de un emisor alfa.

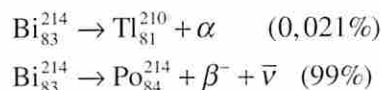
La extrapolación de la gráfica proporciona el valor del alcance en aire, en este caso 3,7 cm (máxima penetración de las partículas alfa de 5,5 MeV).

Sistema experimental de Rutherford

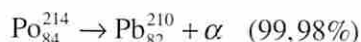
Al igual que en el ejemplo descrito anteriormente, el experimento que realizó Rutherford requería de una fuente emisora alfa, un método de detección y algún sistema para variar los espesores de aire atravesados. Todo el sistema se describe a continuación.

Fuente emisora alfa

En su experimento, Rutherford utilizó como emisor alfa una fuente intensa de lo que se conocía por Ra-C⁸, el Ra-C es el isótopo Bi²¹⁴ descendiente de la cadena del Ra²²⁶. El Bi²¹⁴ es emisor alfa en un 0,021% de sus desintegraciones y emisor beta en un 99%, según las desintegraciones:



El Po²¹⁴ producido es a su vez emisor alfa en un 99,98%, según la desintegración:



Las partículas alfa emitidas en este proceso tienen una energía cinética de 7,687 MeV, y un alcance de 7 cm; éstas fueron las partículas alfa utilizadas en el experimento.

Descripción del sistema experimental

El aparato usado por Rutherford para sus primeros experimentos era bastante sencillo (figuras 5 y 6); consistía en una caja de latón de 18 × 6 × 2 cm³, provista de llaves que permitían la circulación de los gases estudiados, en uno de los extremos de la caja había un orificio recubierto de plata S, capaz de absorber por sí sola partículas alfa y que equivalía a una capa de aire de 4 a 6 cm, en el otro extremo se disponía una placa de vidrio C.

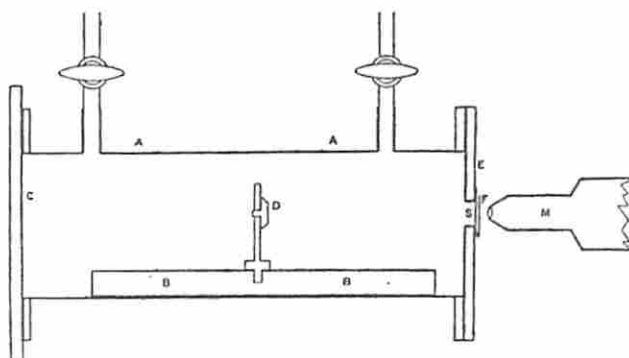


Figura 5. Esquema del dispositivo experimental.

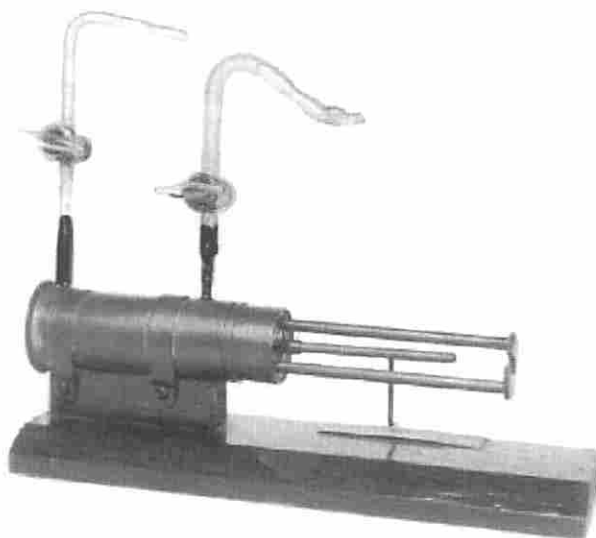


Figura 6. Fotografía del sistema experimental.

⁸ Los productos de desintegración del radio eran conocidos como Ra-A, Ra-B y Ra-C. En la actualidad se sabe que son isótopos de otros elementos, descendientes de la cadena de desintegración del Ra²²⁶.

Una pantalla centelleadora F de sulfuro de zinc, se situaba en el exterior a una distancia de 1,5 mm, intervalo en el que se podían introducir pantallas absorbentes de mica, y M es el microscopio para observar los destellos producidos en la placa. La fuente emisora radiactiva se situaba en el interior de la caja, sobre un soporte D cuya distancia a la pantalla reveladora podía variarse, moviéndose sobre la superficie B . Para eliminar la contribución de las partículas beta emitidas por la fuente (como se ha visto la fuente también emite partículas beta) se situaba el sistema en un campo magnético intenso, que desviaba lateralmente a los electrones beta, evitando que incidieran en la pantalla reveladora y produjeran destellos no deseados.

RESULTADOS

El sistema experimental descrito anteriormente permite medir de manera directa el *alcance* de las partículas cargadas que intervienen en los procesos que tienen lugar dentro del sistema experimental, de manera similar a la descrita en el ejemplo.

Para medir los alcances de las partículas producidas se variaba el espesor de los absorbentes de mica, lo que permite obtener distintos espesores equivalentes en aire.

Las partículas alfa emitidas por el Po^{210} , utilizadas en el experimento de Rutherford, tienen un alcance aproximado en aire de 7 cm, por lo que en la pantalla reveladora se producen destellos hasta cuando la distancia equivalente era 7 cm. Este alcance se medía cuando dentro de la caja se había hecho vacío, con lo que únicamente podían incidir sobre la pantalla las partículas alfa.

Resultados con hidrógeno

Pero cuando se introducía hidrógeno, además de los destellos para alcances de 7 cm, también se producían destellos hasta 30 cm aproximadamente, lo que indicaba que eran debidos a partículas con un alcance de 30 cm.

Si consideramos que las partículas alfa producen choques elásticos sobre los núcleos de hidrógeno y teniendo en cuenta la conservación del momento y de la energía cinética, se obtiene que la velocidad que adquieren los núcleos de hidrógeno, v_p , es:

$$v_p = 1,6 v_\alpha$$

siendo v_α la velocidad de las partículas alfa incidentes. Por lo que conociendo el alcance de la partículas incidentes (7 cm) y teniendo en cuenta la relación del alcance con la velocidad:

$$R_\alpha = C \times v_\alpha^3$$

$$R_p = C \times v_p^3$$

$$\frac{R_p}{R_\alpha} = \left(\frac{v_p}{v_\alpha}\right)^3 = \left(\frac{1,6v_\alpha}{v_\alpha}\right)^3 = 4,1 \Rightarrow R_p = 4,1 \times R_\alpha = 28,7 \text{ cm}$$

lo que confirma que las partículas que incidían sobre la pantalla centelleadora eran núcleos de hidrógeno, impulsados debido a choques elásticos con las partículas alfa.

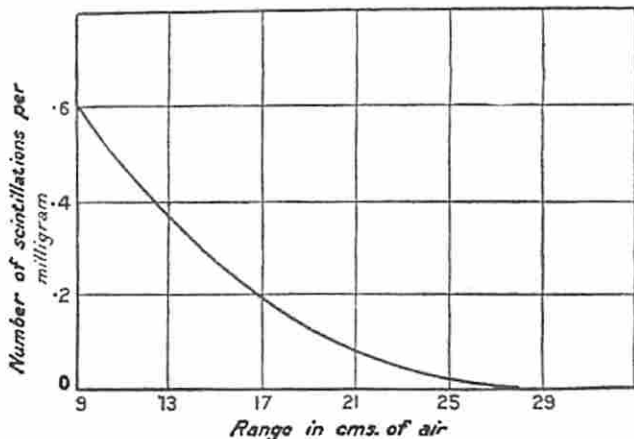
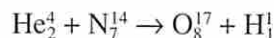


Figura 7. Resultados experimentales obtenidos por Rutherford del alcance de los núcleos de hidrógeno impulsados por las partículas alfa.

Resultados con nitrógeno

Al introducir aire en lugar de hidrógeno, Rutherford encontró que se producían destellos hasta un alcance de 40 cm. Estas partículas tan penetrantes, que procedían del aire, tenían un alcance aún más largo que los átomos de hidrógeno bombardeados por los rayos alfa. Las medidas de Rutherford demostraban que la relación entre la carga y la masa, deducida de la desviación en un campo magnético, era la correspondiente al átomo de hidrógeno con una carga positiva. En principio pensó en hidrógeno residual, pero lo que no tenía sentido era que tuviera mayor alcance que cuando se encontraba sólo.

Sustituyó el aire por nitrógeno puro y se producían también núcleos de hidrógeno con un alcance de 40 cm, al igual que ocurría con el aire pero en mayor proporción, lo que le llevó a la conclusión que de alguna manera cuando incidían partículas alfa sobre los núcleos de nitrógeno se emitían núcleos de hidrógeno con una energía mayor que la que tenían en el caso del choque elástico. Lo que realmente estaba ocurriendo era la reacción nuclear:



En esta reacción nuclear los núcleos de H^1 se emiten con una energía cinética de 6,4 MeV. Se puede obtener la relación entre las velocidades de las partículas alfa incidentes y los núcleos de H^1 , y con ello la relación entre sus alcances:

$$\left. \begin{aligned} T_\alpha &= \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 = 7,6 \text{ MeV} \\ T_p &= \frac{1}{2} m_p v_p^2 = 6,4 \text{ MeV} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_p = 1,8 \times v_\alpha \Rightarrow R_p = 1,8^3 R_\alpha = 40,8 \text{ cm}$$

Este resultado explicaba la procedencia de los núcleos de hidrógeno que incidían sobre la pantalla luminiscente.

CONCLUSIONES

Con los resultados anteriores se llegaba a la conclusión de que el núcleo de nitrógeno se desintegraba debido a la colisión con partículas alfa, y que los núcleos de hidrógeno que se liberaban en este proceso eran constituyentes del núcleo de nitrógeno.

Rutherford concluyó que todos los núcleos atómicos debían estar constituidos por protones y electrones. Por lo que según esta hipótesis, un núcleo de He^4 tenía que estar compuesto de 4 protones y dos electrones, lo que da como resultado una carga de 2 y número atómico 4.

La suposición de que en el núcleo había también electrones era incorrecta y la verdadera respuesta de la composición del núcleo no se encontró hasta el descubrimiento por J. Chadwick (1891-1974), en 1932, del *neutrón*. Usando la conservación de la energía y el momento al analizar los datos experimentales de la creación de núcleos de retroceso en nitrógeno e hidrógeno, llegó a la conclusión de que esta radiación consistía en un flujo de partículas neutras cuya masa era similar a la

del protón. Poco después del descubrimiento del neutrón, W. Heisenberg (1901-1976) estableció la hipótesis de la estructura nuclear protón-neutrón. Este modelo eliminaba completamente las dificultades asociadas con el modelo electrón-protón. Según este modelo, todos los núcleos contienen dos tipos de partículas elementales o nucleones: protones y neutrones. Los diferentes núcleos (por el momento alrededor de 2000, incluyendo los obtenidos artificialmente) se diferencian en el número de neutrones y protones que contienen.

REFERENCIAS

1. E. Rutherford: "Collision of alfa particles with light atoms", *Philosophical Magazine*, Ser. 6, págs. 537-590 (june, 1919).
2. E. Rutherford: "Bakerian Lecture: Nuclear Constitution of Atoms", *Proc. Roy. Soc.*, A97, 374 (1920).
3. C. Castelfranchi: "Física Moderna". Ed. Gustavo Gili (1932).
4. A. Ferrer, M. Shaw y A. Williard: "Unidades Didácticas de Física Nuclear". Ed. UNED (2002).

Amalia Williard Torres
Dpto. de Física de los Materiales

Taller de Matemáticas

Matemáticas y Física: el espejismo

INTRODUCCIÓN

La Matemática es el lenguaje propio de la Física y, en menor medida, de las demás Ciencias de la Naturaleza. El progreso matemático ha proporcionado una herramienta indispensable para el progreso de la Ciencia y de la Tecnología, así como los avances de éstas han influido fuertemente en el desarrollo matemático. A modo de sencillo homenaje a las Matemáticas vamos a exponer

aquí la descripción de un fenómeno óptico, *el espejismo*, en el que se puede constatar cómo se entrelazan los conocimientos de Física y de Matemáticas.

ESPEJISMO EN EL ASFALTO

A veces, cuando el sol calienta el asfalto de la carretera, observamos una fina capa especular sobre ella: es como si estuviera mojada (Figura 1).

Dicha capa semeja a un espejo donde se reflejan los automóviles que circulan por delante de nosotros. Sin embargo, al acercarnos el efecto desaparece: se trata de un espejismo.



Figura 1. Espejismo en la carretera N5 (km 168) el 6 de julio de 2006.