

Enseñanza

TALLER Y LABORATORIO

EXPERIMENTO HISTÓRICO

DESCUBRIMIENTO DEL NEUTRÓN

INTRODUCCIÓN

Cuando en 1919¹ E. Rutherford (1871-1937) descubrió el protón, la estructura de la materia parecía ser simple si se suponía que la masa y la carga se concentraban de forma elemental en dos partículas fundamentales: el electrón y el protón. Esto explicaba que la carga de cualquier núcleo resultara ser un múltiplo entero de la carga del protón, que es la misma que la del electrón pero de signo opuesto. Además, una vez establecida la existencia de los isótopos², se vio que era la masa de éstos la que resultaba ser muy cercana a un múltiplo de la masa de protón. Bastaba entonces con suponer que el núcleo estaba constituido por el número de protones necesario para explicar su masa y un número tal de electrones que neutralizara la carga excedente igualándola a la carga característica de cada elemento. Por lo que según esta hipótesis un núcleo de He⁴ (partícula α) estaría compuesto de 4 protones y 2 electrones, lo que daba como resultado un carga (número atómico) igual a 2 y un número másico de 4.

En la actualidad sabemos que esta suposición era incorrecta y la verdadera respuesta la encontró J. Chadwick (1891-1974) cuando en 1932 descubrió una nueva partícula a la que denominó **neutrón**, término que ya había usado Rutherford en una conferencia que impartió en 1920. Según Rutherford, esta partícula podía originarse en un átomo de hidrógeno en el que el electrón habría «caído» al núcleo neutralizándolo eléctricamente.

Chadwick, después de graduarse en 1911 en la Universidad de Manchester, empezó a trabajar como ayu-



Figura 1. Fotografía de James Chadwick.

dante de Rutherford. En 1914, Chadwick viajó a Berlín para trabajar con H. Geiger (1882-1945), otro de los discípulos de Rutherford. No era un buen momento para que un ciudadano inglés estuviera en Alemania, y cuando comenzó la primera guerra mundial, el gobierno alemán lo retuvo como prisionero de guerra. Chadwick fue tratado razonablemente bien, y aunque tuvo malnutrición, se le permitió seguir alimentando su curiosidad académica con lecturas y conversaciones con otros científicos, pero le prohibieron continuar con sus experimentos. Al final de la guerra, en 1918, Chadwick volvió a Manchester, justo en el momento en el que Rutherford estaba trabajando en los experimentos que le llevarían al descubrimiento del protón. En 1919 Rutherford es nombrado Director del Laboratorio de Cavendish y Chadwick le sigue a Cambridge, donde poco después de doctorarse es nombrado ayudante del Director.

Chadwick estaba interesado en el «neutrón» de Rutherford y estuvo varios años buscándolo sin éxito. En 1930 algunos resultados experimentales obtenidos en el continente europeo, sobre choques de partículas alfa y núcleos ligeros y la posterior producción de una extraña radiación, llamaron su atención y aunque no estaba de acuerdo con la interpretación que se daba de ellos, le llevaron a repetirlos con algunas modificaciones, realizando una correcta interpretación de los resultados. En 1932 anunció el descubrimiento del neutrón, primero en «*Nature*»³ en una carta al Editor en la que se avanzaban sus resultados, «*Posible Existente of a*

¹ El experimento con el que Rutherford descubrió el protón está descrito en el n.º 6 de 100cias@uned, págs. 107-111 (2003).

² Son isótopos de un elemento químico de número Z, los distintos nucleidos con el mismo número de protones (mismo número atómico: mismas propiedades químicas) y con distinto número de neutrones (distinta masa atómica A: distintas propiedades nucleares).

³ *Nature*, 129, 312 (27 de febrero de 1932).

Letters to the Editor

[The Editor does not hold himself responsible for opinions expressed by his correspondents. Neither can he undertake to return, nor to correspond with the writers of, rejected manuscripts intended for this or any other part of NATURE. No notice is taken of anonymous communications.]

Possible Existence of a Neutron

It has been shown by Bothe and others that beryllium when bombarded by α -particles of polonium emits a radiation of great penetrating power, which has an absorption coefficient in lead of about 0.3 (cm.)^{-1} . Recently Mme. Curie-Joliot and M. Joliot found, when measuring the ionisation produced by this beryllium radiation in a vessel with a thin window, that the ionisation increased when matter containing hydrogen was placed in front of the window. The effect appeared to be due to the ejection of protons with velocities up to a maximum of nearly $3 \times 10^9 \text{ cm. per sec.}$ They suggested that the transference of energy to the proton was by a process similar to the Compton effect, and estimated that the beryllium radiation had a quantum energy of $50 \times 10^6 \text{ electron volts.}$

I have made some experiments using the valve counter to examine the properties of this radiation excited in beryllium. The valve counter consists of a small ionisation chamber connected to an amplifier, and the sudden production of ions by the entry of a particle, such as a proton or α -particle, is recorded by the deflexion of an oscillograph. These experiments have shown that the radiation ejects particles from hydrogen, helium, lithium, beryllium, carbon, air, and argon. The particles ejected from hydrogen behave, as regards range and ionising power, like protons with speeds up to about $3.2 \times 10^9 \text{ cm. per sec.}$ The particles from the other elements have a large ionising power, and appear to be in each case recoil atoms of the elements.

If we ascribe the ejection of the proton to a Compton recoil from a quantum of $52 \times 10^6 \text{ electron volts,}$ then the nitrogen recoil atom arising by a similar process should have an energy not greater than about 400,000 volts, should produce not more than about 10,000 ions, and have a range in air at N.T.P. of about 1.3 mm. Actually, some of the recoil atoms in nitrogen produce at least 30,000 ions. In the laboratory with Dr. Feather, I have observed the recoil atoms in an expansion chamber, and their range, estimated visually, was sometimes as much as 3 mm. at N.T.P.

These results, and others I have obtained in the course of the work, are very difficult to explain on the assumption that the radiation from beryllium is a quantum radiation, if energy and momentum are to be conserved in the collisions. The difficulties disappear, however, if it be assumed that the radiation consists of particles of mass 1 and charge 0, or neutrons. The capture of the α -particle by the Be^9 nucleus may be supposed to result in the formation of a C^{12} nucleus and the emission of the neutron. From the energy relations of this process the velocity of the neutron emitted in the forward direction may well be about $3 \times 10^9 \text{ cm. per sec.}$ The collisions of this neutron with the atoms through which it passes give rise to the recoil atoms, and the observed energies of the recoil atoms are in fair agreement with this view. Moreover, I have observed that the protons ejected from hydrogen by the radiation emitted in the opposite direction to that of the exciting α -particle appear to have a much smaller range than those ejected by the forward radiation.

No. 3252, Vol. 129]

This again receives a simple explanation on the neutron hypothesis.

If it be supposed that the radiation consists of quanta, then the capture of the α -particle by the Be^9 nucleus will form a C^{12} nucleus. The mass defect of C^{12} is known with sufficient accuracy to show that the energy of the quantum emitted in this process cannot be greater than about $14 \times 10^6 \text{ volts.}$ It is difficult to make such a quantum responsible for the effects observed.

It is to be expected that many of the effects of a neutron in passing through matter should resemble those of a quantum of high energy, and it is not easy to reach the final decision between the two hypotheses. Up to the present, all the evidence is in favour of the neutron, while the quantum hypothesis can only be upheld if the conservation of energy and momentum be relinquished at some point.

J. CHADWICK.

Cavendish Laboratory,
Cambridge, Feb. 17

The Oldoway Human Skeleton

A LETTER appeared in NATURE of Oct. 24, 1931, signed by Messrs. Leakey, Hopwood, and Reek, in which, among other conclusions, it is stated that "there is no possible doubt that the human skeleton came from Bed No. 2 and not from Bed No. 4". This must be taken to mean that the skeleton is to be considered as a natural deposit in Bed No. 2, which is overlaid by the later beds Nos. 3 and 4, and that all consideration of human interment is ruled out.

If this be true, it is a most unusual occurrence. The skeleton, which is of modern type, with filed teeth, was found completely articulated down even to the phalanges, and in a position of extraordinary contraction. Complete mammalian skeletons of any age are, as field palaeontologists know, of great rarity. When they occur, their perfection can usually be explained as the result of sudden death and immediate covering by volcanic dust. Many of the more or less perfect skeletons which may be seen in museums have been rearticulated from bones found somewhat scattered as the result of death from floods, or in the neighbourhood of drying water-holes. We know of no case of a perfect articulated skeleton being found in company with such broken and scattered remains as appear to be abundant at Oldoway. Either the skeletons are all complete, as in the *Stenomys* quarry at Sioux City, Nebraska, or are all scattered and broken in various degrees, as in ordinary bone beds. The probability, therefore, that the Oldoway skeleton represents an artificial burial is thus one that will occur to palaeontologists.

The skeleton was exhumed in 1913, and published photographs show that the excavation made for its disinterment was extensive. It is, therefore, very difficult to believe that in 1931 there can be reliable evidence left at the site as to the conditions under which it was deposited. If naturally deposited in Bed No. 2, the skeleton is of the highest possible importance, because it would be of pre-Mountanian age, and would be in the company of *Pithecanthropus* and the *Pitdown*, *Heidelberg*, and *Peking* men, all of whose remains are fragmentary to the last degree. Of the few other human remains for which such antiquity is claimed, the Galley Hill skeleton and the Ipswich skeleton are, or apparently were, complete. The first of these was never seen *in situ* by any trained observer, and the latter has, we believe, been withdrawn by its discoverer. The other fragments, found long ago, are entirely without satisfactory evidence as to their mode of occurrence.

significaba un coeficiente de atenuación⁶ $\mu \sim 0,3 \text{ cm}^{-1}$. Este poder de penetración era notablemente mayor que el de la radiación gamma emitida por los elementos radiactivos conocidos en ese momento. Además, al determinar la energía de esas extrañas radiaciones, concluyeron que ésta debería ser mayor que la energía de las partículas alfa incidentes, lo que podía ser interpretado como un fenómeno de desintegración.

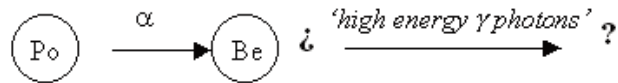


Figura 3. Interpretación de Bothe y Becker sobre la emisión de radiación por Be^9 después de ser irradiado por partículas alfa.

Posteriormente, los físicos franceses I. Joliot-Curie (1897–1956) y su marido F. Joliot⁷ (1900–1958) hicieron pasar la radiación penetrante, descubierta por Bothe y Becker, por blancos de parafina u otros compuestos hidrogenoides y, midiendo la ionización producida al paso de la radiación, descubrieron que se producían protones de alta energía. Lo interpretaron como resultado de la acción de los fotones sobre los núcleos de hidrógeno de la parafina (usando una analogía con el efecto Compton⁸ de los fotones sobre los electrones) produciendo protones de retroceso. Este efecto había sido observado en la interacción entre rayos X y electrones, pero debería ser igualmente válido para la dispersión de rayos gamma por protones. Sin embargo, los protones son casi 1.836 veces más pesados que los electrones, por lo que, para arrancarlos de un sólido, serían necesarios fotones de gran energía. Otro problema con esta interpretación era que, dado el número de protones observados, habría que suponer que la probabilidad de colisión entre estos fotones y los protones de la parafina era millones de veces mayor a la que se esperaría de extrapolar el cálculo válido para el electrón, esta probabilidad de dispersión en el caso de fotones de alta energía por electrones (efecto Compton) viene dada con bastante exactitud por la fórmula de Klein-Nishima⁹ y también debería poder ser aplicada a

⁶ El coeficiente de atenuación es la probabilidad de que un fotón interacte por unidad de recorrido.

⁷ C.R. Acad. Sci. Paris, Vol. 193, 1412 (1931).

⁸ El efecto Compton había sido predicho por A. Einstein en 1905 y confirmado por A.H. Compton en 1923. Consiste en la dispersión de un fotón por un electrón libre o débilmente ligado, en la que parte de la energía del fotón incidente se comunica al electrón y el fotón dispersado tiene una longitud de onda superior a la del incidente.

⁹ Z. f. Physik, Vol. 52, 853 (1929).

Figura 2. Carta al Editor publicada en Nature, donde Chadwick adelantaba su descubrimiento de la existencia del neutrón.

Neutron» y posteriormente en los «*Proceedings of the Royal Society of London*»⁴, donde se desarrollaba todo el descubrimiento y en el que en el título desaparecía la palabra «*possible*» quedando como afirmación «*The Existence of a Neutron*».

ANTECEDENTES EXPERIMENTALES

En 1930, los físicos alemanes W. Bothe (1891–1957) y su discípulo H. Becker⁵ habían descubierto que al bombardear algunos elementos ligeros (particularmente berilio) con las partículas α , provenientes de un isótopo del polonio, se emitían radiaciones muy penetrantes y eléctricamente neutras que, originalmente, pensaron que eran fotones gamma de alta energía, con un poder de penetración de aproximadamente 20 cm en plomo, lo que

⁴ *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 136, nº 830, 692 (1 de junio de 1932).

⁵ Z. f. Physik, Vol. 66, 289 (1930).

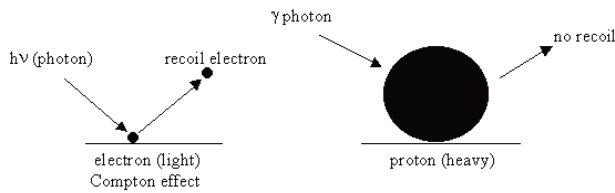


Figura 4. Comparación del efecto Compton con electrones y con protones.

la dispersión de fotones por protones, pero los resultados experimentales mostraban que la probabilidad de dispersión era varios ordenes de magnitud mayor que la predicha en la fórmula.

A Chadwick no le convencían las interpretaciones que se daban a los resultados obtenidos, por lo que se propuso realizar unos experimentos similares y buscar un razonamiento más correcto.

EXPERIMENTO DE CHADWICK

Sistema Experimental

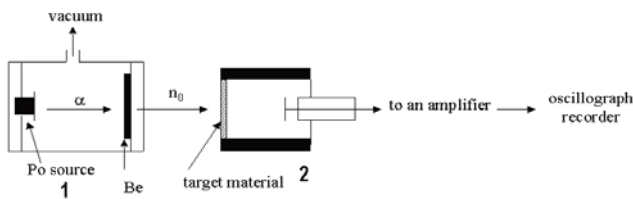


Figura 5. Esquema del sistema experimental del experimento de Chadwick.

El sistema experimental utilizado por Chadwick consistía en una cámara (1) y un contador (2) conectado a un oscilógrafo. En la cámara se hacía vacío y estaba alojado el emisor alfa (una fuente de polonio) y el berilio (Be^9). Las partículas alfa al chocar con el berilio producían un haz de la radiación desconocida, n_0 , cuyos efectos se examinaban con el contador. El contador era en una pequeña cámara de ionización conectada a un amplificador, cuando se producían ionizaciones debidas a la entrada de una partícula ionizante en la cámara, éstas eran registradas en un oscilógrafo. A la entrada del contador se colocaba blancos de distintos materiales.

Resultados

Cuando el blanco era rico en hidrógeno, como la parafina, se emitían protones como ya había observado el matrimonio Joliot-Curie. Para obtener la energía con

que se emitían esos protones, Chadwick utilizó un método basado en la medida del alcance¹⁰ de esos protones en aluminio. Intercaló láminas de aluminio entre el blanco y el gas de llenado de la cámara de ionización y midió la variación en la ionización que se producía al aumentar el espesor de aluminio. Llegó a la conclusión de que la velocidad transferida a los protones por la misteriosa radiación emitida por el berilio era de $3,3 \times 10^9$ cm/s, lo que equivalía a una energía de 5,7 MeV. Si la emisión de los protones fuera debida a una dispersión Compton con fotones, éstos deberían tener una energía de 55 MeV, pero por conservación de la energía es imposible producir fotones de esa energía en un choque de partículas alfa de 5 MeV en un blanco de Be^9 .

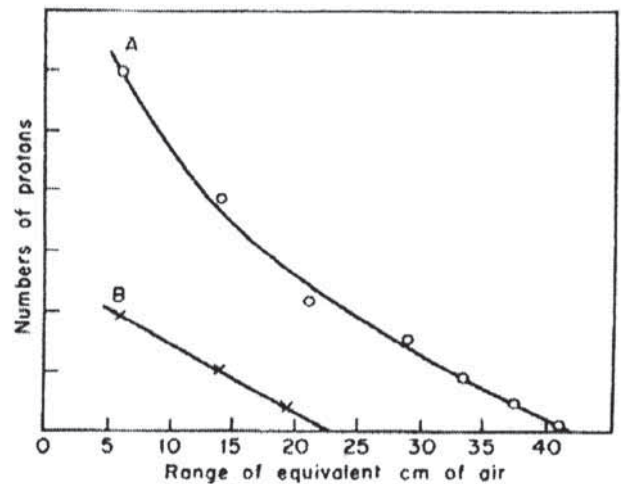


Figura 6. Gráfica de alcances de los protones, que le sirvió a Chadwick para obtener la energía con la que eran emitidos. La curva A se obtuvo midiendo los protones producidos en el mismo sentido que el haz incidente y la B, en sentido contrario.

Si se colocaban otros blancos a la entrada de la cámara de ionización (litio, berilio, boro, carbono, nitrógeno...), en todos los casos se comprobaba que se producían ionizaciones posteriores, que sólo podían ser causadas por la producción de partículas ionizantes con un gran poder de ionización y que probablemente eran núcleos de retroceso de los elementos del blanco. A medida que la masa de los núcleos del blanco aumentaba, la energía que deberían tener los fotones para producir los núcleos de retroceso tendría que ser mayor, lo que por conservación de la energía no era posible.

¹⁰ La medida de alcances está descrita también en el artículo sobre el descubrimiento del protón, nº 6 de 100cias@uned, págs. 107-111 (2003).

LA HIPÓTESIS DEL NEUTRÓN

Quedaba claro que la radiación que producía esas emisiones de núcleos de retroceso no podía ser radiación electromagnética de alta energía, ya que esta hipótesis no explicaba la probabilidad de interacción observada ni la conservación de la energía. Sin embargo, si en lugar de rayos gamma se suponía que el proceso era producido por algún tipo de partícula neutra, el neutrón, todas las propiedades podrían ser explicadas.

La masa que se deducía en todos los casos resultaba ser consistentemente la misma y aproximadamente igual a la del protón; para ello se supone que los núcleos de retroceso detectados en la dirección de la flecha de la Figura 5 provienen de la colisión frontal elástica entre las partículas que forman la radiación y los núcleos del blanco, por ejemplo, hidrógeno y nitrógeno; sus respectivas velocidades están determinadas por:

$$V_H = \frac{2m}{m + m_H} V \quad \text{y} \quad V_N = \frac{2m}{m + m_H} V$$

en donde m , m_H y m_N son las masas de las partículas de la radiación, de los núcleos de hidrógeno (protón) y nitrógeno, respectivamente y V , V_H y V_N las respectivas magnitudes de las velocidades con las que son emitidas. Dividiendo la primera de estas entre la segunda y sustituyendo $m_N = 14 m_H$ (dato que ya se sabía), se obtiene:

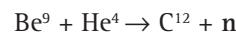
$$\frac{V_H}{V_N} \approx \frac{m}{m + m_H} V$$

Chadwick midió la relación de velocidades V_H/V_N (deducidas de sus medidas de alcance) y encontró que era aproximadamente de 7,0. Por lo tanto, el valor de la masa de la partícula que iba buscando tenía que ser $m \approx 1,15 m_H$. Este resultado fue corroborado midiendo las correspondientes velocidades para otros núcleos de retroceso de los elementos usados como blanco en las colisiones.

En experimentos posteriores se ha determinado que la relación V_H/V_N es cercana a 7,5 y se obtiene que $m \approx m_H$.

Además, con este resultado se podía explicar la producción de neutrones en el berilio al ser bombardeado con las partículas alfa. La partícula alfa es capturada por el núcleo de Be^9 , lo que produce un núcleo de C^{12} y

la emisión de un neutrón, en lo que hoy sabemos que es una reacción nuclear típica, y la reacción de la Figura 3 es en realidad:



Por conservación de la energía, teniendo en cuenta que las partículas alfa emitidas por el polonio tienen una energía de 5,25 MeV, se obtiene que la energía con la que se emiten los neutrones no es mayor que 8 MeV, y neutrones de esa energía en su choque con núcleos de hidrógeno sí que podían producir los protones de retroceso observados.

Cuando Chadwick reportó sus resultados, los interpretó como evidencia de una nueva partícula neutra, a la que llamó **neutrón**, igual a la predicha por Rutherford doce años antes. El descubrimiento de Chadwick, sin embargo, no tuvo una repercusión inmediata en la concepción de la estructura del núcleo, puesto que él mismo imaginaba al neutrón como un compuesto electrón-protón. Posteriormente, Heisenberg mostró que el neutrón podría no ser la combinación de un protón y un electrón y se aceptó la existencia del neutrón como una partícula elemental¹¹ constituyente del núcleo.

Por el descubrimiento del neutrón Chadwick fue galardonado con el Premio Nobel de Física en diciembre de 1935. En el discurso que pronunció al recibir el premio ya habló del neutrón como constituyente elemental del núcleo aunque sin dar una idea clara de la naturaleza de su interacción con el protón.

REFERENCIAS

1. J. Chadwick: «Possible Existence of a Neutron». *Nature*, 129, 312 (27 de febrero de 1932).
2. J. Chadwick: «Existence of a Neutron». *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 136, nº 830, 692 (1 de junio de 1932).
3. D. Lincoln: «Understanding the Universe: from quarks to the Cosmos». World Scientific (2004).

Amalia Willliart Torres
Dpto. Física de los Materiales

¹¹ En la actualidad sabemos que el neutrón no es una «partícula elemental» en el estricto significado del término, ya que está compuesta por quarks que sí que serían partículas elementales.