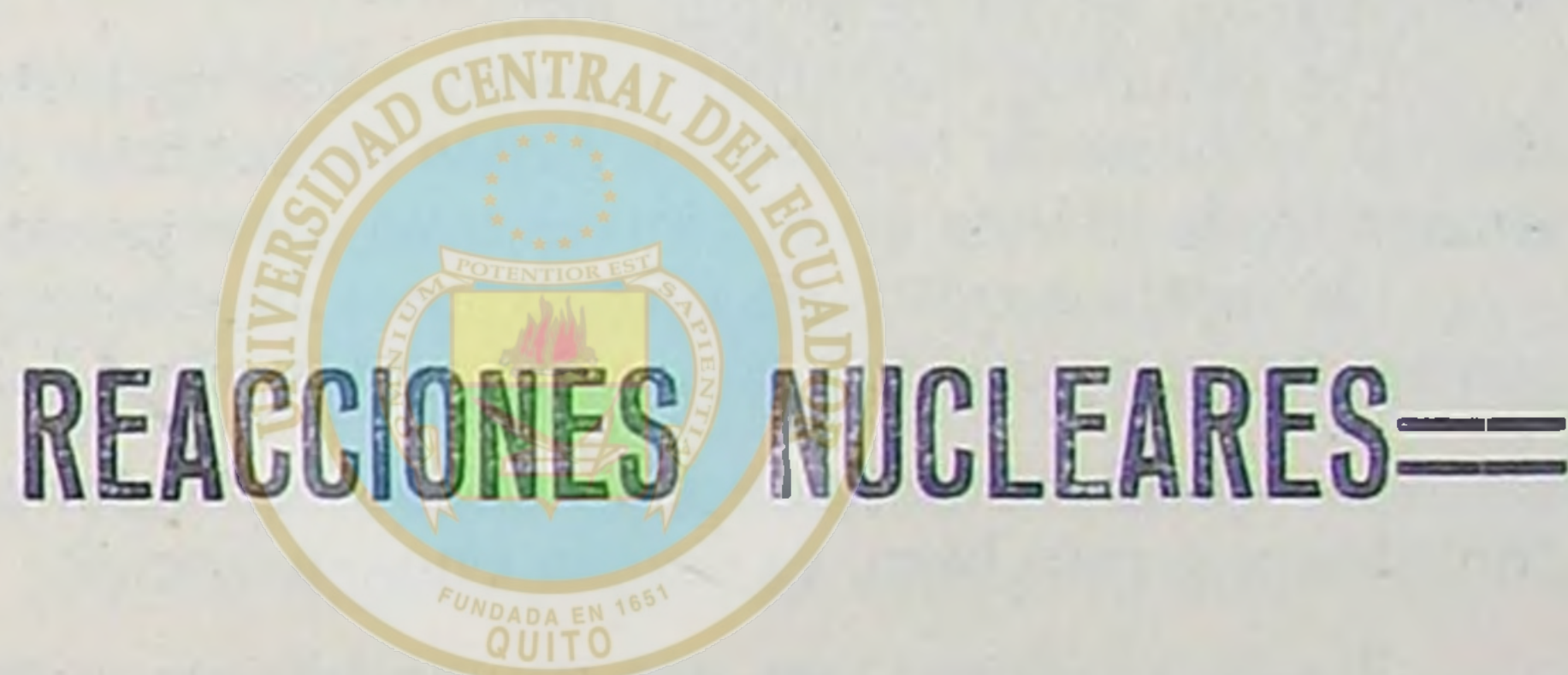


Dr. W. E. Shoupp

Gerente, Departamento de Electrónica. Laboratorios de  
Investigación de Westinghouse

Hugh Odishaw

Ayudante del Director. Oficina de Normas, E. U. A.



ÁREA HISTÓRICA  
DEL CENTRO DE INFORMACIÓN INTEGRAL



## RECOMENDACION PARA EL LECTOR QUE PIENSA

El siguiente artículo "REACCIONES NUCLEARES", tomado de la Revista "EL INGENIERO WESTINGHOUSE" correspondiente a Noviembre de 1947, despierta excepcional interés para las ciencias, a tal punto que la gran variedad de incógnitas, que ellas no han resuelto todavía, serán muy en breve despejadas: incógnitas en la Biología, en la Astronomía, en la Geología, etc.

Los estudios filosóficos tendrán que reajustarse al fin a la realidad, y la filosofía tomará en breve el carácter de ciencia exacta. La incógnita de la vida en el Universo va a ser pronto despejada.

Un lector erudito de "Reacciones Nucleares" va a plantearse de inmediato una variedad de interrogantes como los que siguen:

1.—¿Está constituido el Mundo por materia sustancialmente heterogénea; o más bien, es simple en su esencia?

2.—Si lo último, ¿es por su variadísimas actividad y por sus reacciones nucleares que la materia se ha presentado de apariencia heterogénea?

ÁREA HISTÓRICA  
DEL CENTRO DE INFORMACIÓN INTEGRAL

3.—Son los astros incandescentes, como el Sol, focos actuales de espontáneas y potentes reacciones nucleares, y por las cuales irradian inmensa energía en forma de calor y luz, como bombas atómicas?

4.—Si nuestro planeta también pasó por su etapa de incandescencia, ¿fué también asiento de igual actividad y reacciones nucleares, y por las que presenta su configuración actual?

5.—Constituyendo ya la trasmutación de la materia un hecho experimental, ¿estaremos próximos a convertir los metales ordinarios y baratos en metales preciosos, las sustancias dañinas en inocuas, las de acción perjudicial en neutras o bien en sustancias útiles?

6.—En analogía a las pilas y acumuladores eléctricos, ¿estaremos próximos a construir una pila de reacción nuclear, o pila atómica, que sustituya a los más potentes dinamos y alternadores?

7.—Sí lo último, ¿será el actual sistema de producción, transporte y distribución de energía, para fuerza, calor y luz, ventajosamente reemplazado por la producción local o domiciliaria de energía, proveniente de reacción nuclear, para los mismos fines?

Ing. RAFAEL ANIBAL JARRIN.



## Reacciones Nucleares

*El radio, en otros tiempos la substancia más fabulosa y más costosa del mundo, puede llegar a quedarse desempleado tecnológicamente. Hay materiales artificialmente radioactivos en las pilas de energía atómica, que prometen ser superiores, de aplicación más variada, y hasta menos costosos que el radio. En esta ciencia nueva, que participa de la física y de la química, se han conseguido ya en el laboratorio centenares de reacciones nucleares. De éstas, la bomba atómica es sólo una, aunque por ahora la más espectacular y notoria, quizás por ser la mejor conocida entre todas.*

LA TRANSMUTACIÓN artificial de los elementos, buscada en vano por los alquimistas durante siglos, se descubrió hace menos de 30 años. En el corto tiempo transcurrido desde entonces, se han producido en el laboratorio casi un millar de reacciones nucleares, en las que los cuerpos simples de la química se han transformado en otros elementos —es decir, en la alquimia de la desintegración de los átomos se han producido y despedazado los núcleos.

Estas reacciones, además de facilitar la producción de una familia numerosísima de substancias radioactivas, importantes para la medicina y la ingeniería, proporcionan el único método de investigar la estructura nuclear y las fuerzas nucleares, permitiendo a los hombres de ciencia formular hipótesis acerca de la estructura fundamental del universo. Esas fueron las reacciones que condujeron por fin a la obtención de explosivos atómicos, en los cuales se utilizan neutrones veloces para separar el uranio en dos cuerpos simples más livianos, que se caracterizan por tener una masa total menor y por consiguiente desprenden enorme cantidad de energía. Y esta misma serie de conocimientos es la que promete aplicaciones pacíficas de la energía atómica, probablemente, en



el caso del uranio, mediante reacciones inducidas por neutrones lentos.

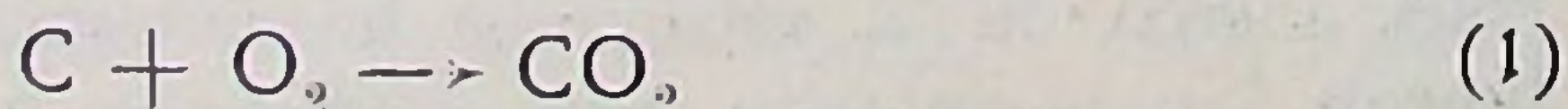
Antes de 1932, la desintegración del átomo se limitaba a la utilización de los rayos alfa desprendidos naturalmente del radio, como proyectiles atómicos necesarios para penetrar los núcleos. La construcción de grandes máquinas de alta tensión —las desintegradoras de átomos— ha proporcionado al hombre de ciencia nuevos manantiales de partículas de gran energía, como los protones, neutrones, deuterones, rayos gamma, electrones, y núcleos de helio. \*Con estas potentes máquinas, que producen partículas cuya energía, llega hasta 100 millones de electronvoltios, se ha descubierto y clasificado un gran número de reacciones nucleares.

Al mismo tiempo, las desintegradoras de átomos están produciendo materiales radioactivos en cantidades considerables para aplicaciones médicas y de investigación. Las sustancias artificialmente radioactivas se obtienen a un costo mucho menor que el radio natural, lo que facilita una utilización mayor y más extensa en la radiografía y en la medicina.

## REACCIONES NUCLEARES Y QUÍMICAS

ÁREA HISTÓRICA  
DEL CENTRO DE INFORMACIÓN INTEGRAL

Las reacciones nucleares, o sean los cambios en el propio núcleo atómico, tienen muchas características similares a las reacciones químicas, que afectan solamente a los electrones de las órbitas exteriores circundantes al núcleo. De hecho, se escriben generalmente de la misma manera, excepto que los compuestos químicos se substituyen por núcleos atómicos. Por ejemplo, comparemos las dos reacciones siguientes —la primera es la conocida reacción química de la combustión, y la segunda es nuclear:



\* En el artículo «La estructura del núcleo atómico», publicado en EL INCENIERO WESTINGHOUSE de marzo, 1947, el Dr. Shoupp trata de las partículas que intervienen en la física nuclear.



La primera reacción expresa que un átomo de carbono se une a dos átomos de oxígeno para formar una molécula de anhídrido carbónico. Los subíndices indican el número relativo de átomos que participan en la reacción.

La segunda reacción expresa que un núcleo de carbono, bombardeado por un protón (el núcleo del hidrógeno) forma un núcleo de nitrógeno y un neutrón. Aquí, los subíndices indican la carga eléctrica positiva del núcleo, que es el número de protones del núcleo de tal elemento, y también la posición o número del mismo en la escala de los cuerpos simples. Los superíndices indican el número total de protones y neutrones del núcleo (el número de masa, o número entero más próximo al peso atómico). \*

Sin embargo, las reacciones nucleares se escriben a menudo de otra manera, como se indica abajo, donde aparece escrita la reacción (2) en esta forma abreviada:



Esta manera de escribir las reacciones nucleares expresa justamente lo que ocurre en la ecuación (2). Sin embargo, el proyectil incidente y la partícula liviana expelida se agrupan dentro del paréntesis del centro de la reacción,



La más común reacción nuclear en que participan neutrones es una de simple captación. Una reacción de esta clase es aquella en que se bombardea plata  $_{47}\text{Ag}^{107}$  por medio de un neutrón, aumentando la masa del núcleo resultante en una unidad y produciendo emisión de rayos gamma. El isótopo  $_{47}\text{Ag}^{108}$  de la plata es radioactivo, pero inestable; degenera en cadmio estable  $_{48}\text{Cd}^{108}$  mediante la emisión de un solo electrón.

\* Véase el artículo «La relación entre energía y masa», por el Dr. Frederick Seitz Jr., en el número de noviembre de 1946 de EL INGENIERO WESTINGHOUSE.



donde  $p$  denota el protón cuya misión es bombardear y  $n$  el neutrón que ha de ser expelido. Luego, expresa lo siguiente:

*Núcleo bombardeado (Proyectil,  
Fragmento) Núcleo resultante*

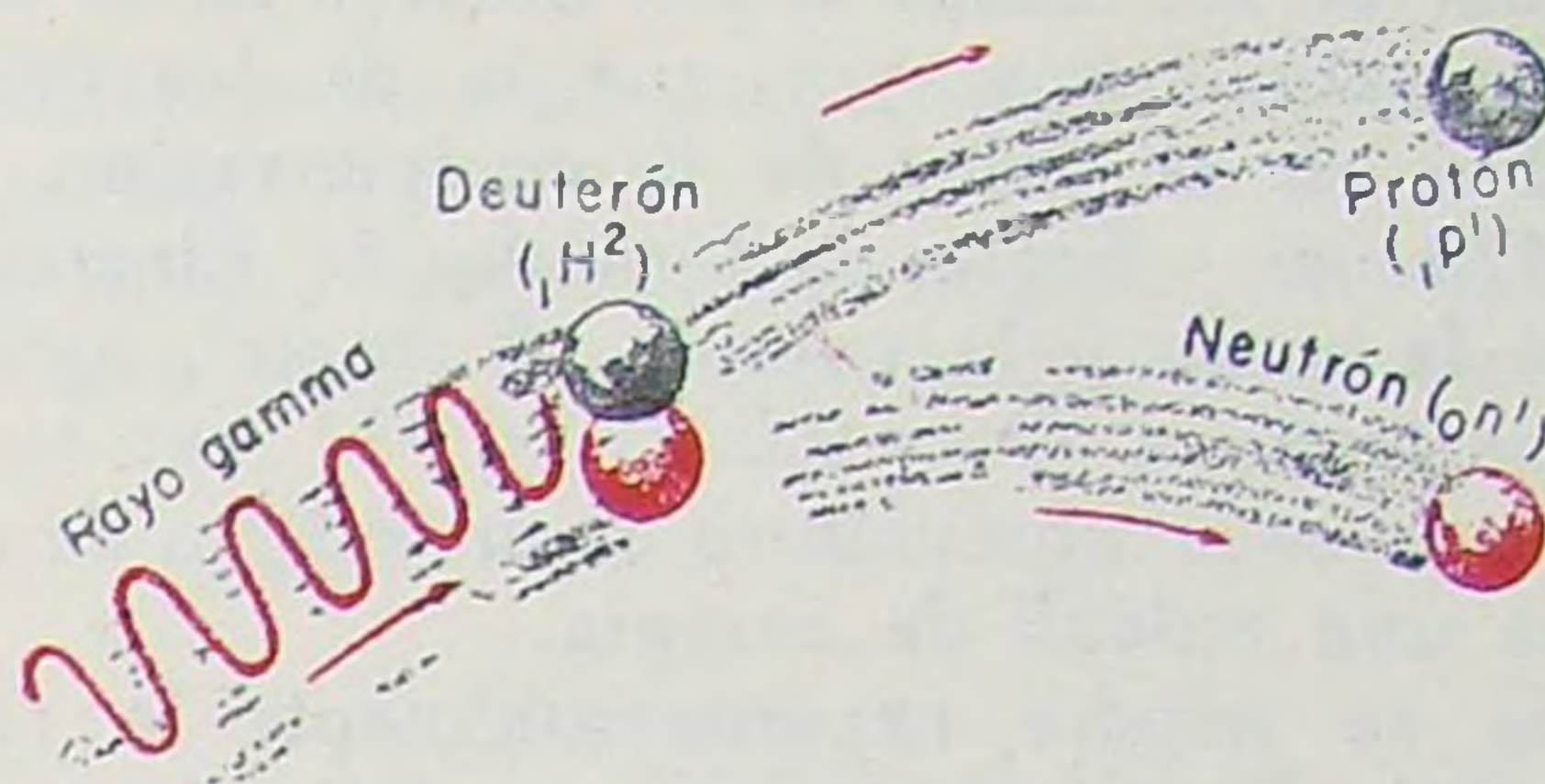
La parte entre paréntesis ( $p, n$ ) se emplea a menudo para describir reacciones de esta clase. Este caso representa una reacción de tipo neutrón y protón, que es probablemente la más frecuente de las reacciones nucleares.

Otros símbolos que se emplean entre paréntesis para describir reacciones nucleares corresponden a otros proyectiles desintegradores de átomos y otras partículas expelidas o energías resultantes. Entre ellos figuran: un protón y un neutrón íntimamente ligados en un grupo, que es una forma del hidrógeno,  ${}_1H^2$ , y que se llama deuterón, designado por la letra  $d$ ; el rayo gamma es  $\gamma$ ; dos neutrones y dos protones, que es el núcleo del helio, se llama partícula alfa y es representado por la letra griega  $\alpha$ ; dos neutrones se representan por  $2n$ , etc. Tenemos, por consiguiente reacciones de otros tipos diversos —así como la ( $p, n$ )— representadas por ( $n, p$ ), ( $n, \alpha$ ), ( $n, 2n$ ), ( $p, \alpha$ ), ( $p, d$ ), ( $d, p$ ), ( $d, n$ ), ( $d, \alpha$ ), ( $\alpha, p$ ), y ( $\alpha, n$ ). Algunas veces el proyectil incidente en el bombardeo es captado por el núcleo que hace de blanco; las reacciones típicas de esta clase, en las cuales es captado un neutrón o un protón, se indican como sigue, ( $n, \gamma$ ) y ( $p, \gamma$ ), porque no se emite ninguna partícula, pero se forma un rayo gamma que se lleva el exceso de energía.

#### COMPENSACIÓN DE LA ENERGÍA EN LAS REACCIONES NUCLEARES

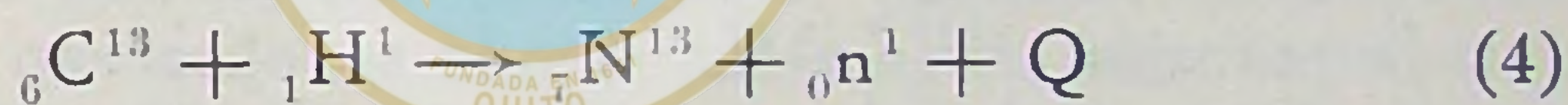
En química, algunas reacciones exigen la adición de calor, o de energía, para hacer que la reacción continúe; mientras que en otras, como en la ecuación (1), se desprende calor o energía. En las reacciones nucleares existen las mismas circunstancias, y se emplean análogamente los términos endotérmico y exotérmico para expresar si en el proceso se necesita añadir o se desprende energía. Al igual que las ecuaciones químicas, las ecuaciones nucleares pueden





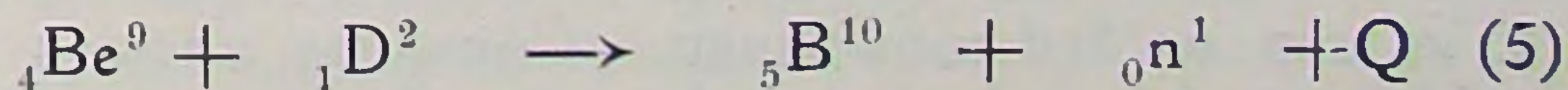
Ocurre también la inversa de la reacción precedente—la captación del neutrón con emisión de rayo gamma. Si se aplican rayos gamma cuya energía sea de 2.20 mev, sobre deuterones  ${}_1\text{H}^2$  tiene lugar la «fotodesintegración», y puede observarse la emisión de neutrones y protones. Como son conocidas las masas del protón y del neutrón, la «fotodesintegración» ofrece el método más exacto para determinar la masa del neutrón en la actualidad (se admite generalmente que es de 1.008939).

por tanto representarse con mayor exactitud incluyendo el término  $Q$  (energía de la reacción o compensación de energía). Por consiguiente, la ecuación (2) debe escribirse,



Cuando la «compensación de energía», o valor de  $Q$ , es positiva, se emite energía y la reacción es exotérmica. Cuando la compensación de energía  $Q$  es negativa, la reacción es endotérmica y en el proceso se absorbe energía.

Es fácil de calcular la magnitud de la compensación de energía si se conocen las masas de los núcleos de la reacción o de los átomos que contienen esos núcleos. Consideremos, por ejemplo, la reacción nuclear causada por el bombardeo del metal berilio ( ${}_4\text{Be}^9$ ) con núcleos de deuterio ( ${}_1\text{D}^2$ ) acelerados en una desintegradora de átomos, y que produce boro y un neutrón. En esa reacción se emiten neutrones, y los diversos núcleos tienen las masas que se indican a continuación. Recordemos que  $um$  es la unidad de masa.



$$9.01497 + 2.01472 \rightarrow 10.01605 + 1.00894 + Q$$

$$\text{Total } 11.02969 \text{ um} \rightarrow 11.02499 \text{ um} + Q$$



La suma de las masas de los núcleos en el lado izquierdo de la ecuación es mayor que la de los núcleos en el lado derecho, en el valor de la compensación de energía  $Q = 0.00470$  um. Según la fórmula de Einstein, de equivalencia de la masa y la energía,  $E = mc^2$ , esta diferencia de masa asciende a  $Q = 0.0047 \times 931 \text{ mev} = 4.38 \text{ mev}$ , en la que *mev* es la abreviatura de un millón de electronvoltios, que es una unidad de energía.

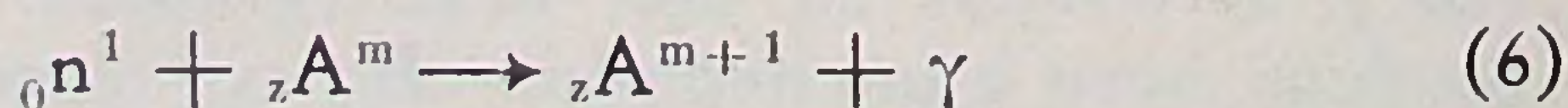
Cuando se estudia experimentalmente la reacción, se observan neutrones cuya energía corresponde a estos cálculos. Por cierto que esta reacción es el método más comúnmente usado para conseguir neutrones. La producción de neutrones excede a la obtenida con otra reacción conocida que utiliza deuterones bombardeadores con energías de unos millones de electronvoltios.

Pueden producirse con regularidad reacciones que dependan de la energía. Sin embargo, la producción o rendimiento es función de la energía de la partícula empleada para el bombardeo. Para que sea perceptible la producción de las reacciones nucleares, el voltaje empleado para acelerar los *proyectiles* bombardeadores tiene que ser casi siempre de millones de voltios. Una excepción notable es la observada en la reacción  $H^2(d,n)He^3$  donde se observan neutrones para energías de bombardeo de sólo 10.000 voltios.

AREA HISTORICA  
DEL CENTRO DE INFORMACIÓN INTEGRAL

### REACCIONES INDUCIDAS POR NEUTRONES ( $n, \gamma$ ) Y FOTODESINTEGRACIÓN ( $\gamma, n$ )

Cuando un neutrón choca contra un núcleo de masa  $m$  y de carga  $z$ , la reacción nuclear más corriente es una simple captación. Una reacción de esta clase, (6) se representa por ( $n, \gamma$ ) porque durante el proceso se emite un rayo gamma:

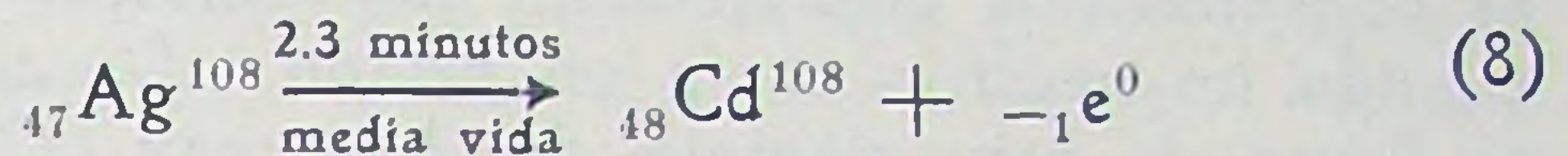
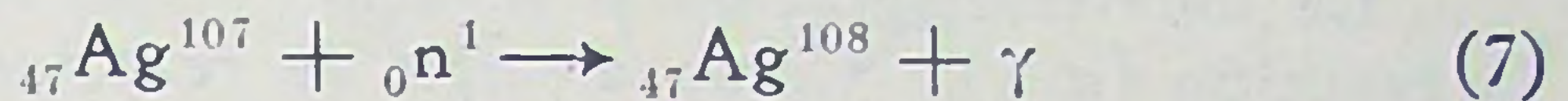


aquí  $A$  representa el núcleo sometido al bombardeo. El núcleo resultante es un isótopo del núcleo que sirve de blanco y es una unidad más densa. Como los núcleos que existen en la naturaleza han durado miles de años, son generalmente los más estables. De donde se deduce que el isótopo  ${}_zA^{m+1}$  es menos estable y a menudo es radioactivo. Por lo



tanto, el núcleo producido puede emitir electrones, positrones o rayos gamma.

Por ejemplo, se produce una reacción de esta clase cuando se deja que actúen neutrones sobre la plata:



En esta reacción, la plata ordinaria se convierte en un isótopo radioactivo de plata  ${}_{47}\text{Ag}^{108}$  por medio del bombardeo con neutrones. Este isótopo se descompone después en cadmio estable  ${}_{48}\text{Cd}^{108}$  mediante la emisión de un electrón. Esta reacción se observa con frecuencia—hasta una moneda de plata que uno lleve en el bolsillo, después de estar en las cercanías de un manantial de neutrones, (como es el ciclotrón), revela una radioactividad definida.

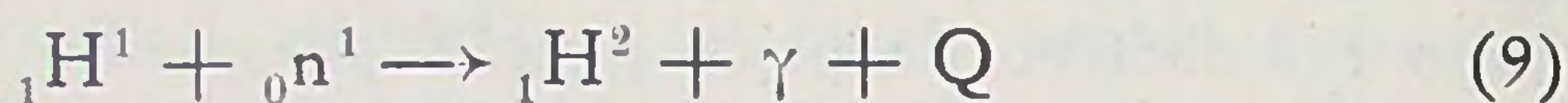
Como en esa reacción se capta un neutrón, debe desprenderse una cantidad de energía igual a la energía cohesiva del neutrón. La energía cohesiva por partícula suele ser de seis a nueve mev, y cuando ocurren reacciones nucleares ( $n, \gamma$ ) se observan a menudo rayos gamma de casi esa energía.

Las reacciones de esta clase ocurren únicamente cuando se trata de energías moderadas del neutrón, y en términos generales se dice que las reacciones ( $n, \gamma$ ) son *reacciones de resonancia*—es decir, que la energía de la partícula bombardeadora (los neutrones) ha de ser casi igual a la diferencia entre los dos niveles de energía en el núcleo compuesto. Si el neutrón bombardeador se mueve con mucha más rapidez o lentitud, no habrá reacción. Lo que ocurre es una transición entre esos dos niveles de energía del núcleo compuesto, y la diferencia de energía se desprende en la forma de un rayo gamma. La frecuencia de esta radiación electromagnética,  $\nu$ , está determinada por la energía ( $E$ ) dividida por la constante de Planck ( $\nu = E/h$ ). Los núcleos densos tienen un gran número de niveles de energía poco espaciados; por lo tanto, se captan neutrones de casi todas las energías. Sin embargo, en los elementos más livianos, donde el número de niveles es menor, las reacciones ( $n, \gamma$ ) ocurren



algo menos frecuentemente. Se han observado unas 200 reacciones de esta clase  $(n, \gamma)$ , y los estudios de estas reacciones de resonancia que se han llevado a cabo, han sido importantísimos para constituir las teorías de los núcleos densos.

La fotodesintegración o reacción  $(\gamma, n)$  es la inversa de la reacción  $(n, \gamma)$ . Como ejemplo de reacciones de esta clase consideremos primeramente la formación de un deuterón cuando un neutrón capta un protón. Durante este proceso, se emite un rayo gamma de 2.20 mev ( $Q$  tiene un valor positivo de 2.20 mev).



También ocurre la reacción inversa. Un deuterón puede descomponerse mediante fotodesintegración, iluminándolo con rayos gamma de 2.20 mev de energía. Entonces se observa la emisión de un neutrón y un protón, como sigue:



y en esta reacción  $Q = -2.20$  mev. La importancia de esta reacción es que ofrece el método más exacto para la determinación de la masa del neutrón (1.008939), que por ser neutra eléctricamente no es susceptible de fácil análisis.

Todas las demás reacciones  $(\gamma, n)$  exigen mayor energía que la necesaria para desintegrar el deuterón. Se han observado reacciones en el berilio y el fósforo, y en unos cuantos elementos livianos. El valor de  $Q$  en las reacciones  $(\gamma, n)$  es evidentemente negativo, mientras que en las reacciones  $(n, \gamma)$  es siempre positivo.

### OTRAS REACCIONES INDUCIDAS POR NEUTRONES

Los neutrones pueden ocasionar la emisión de partículas, así como radiación gamma, de los núcleos. De hecho, se han observado reacciones  $(n, \alpha)$ ,  $(n, p)$  y  $(n, 2n)$ . Las reacciones de la clase  $(n, \alpha)$  o  $(n, p)$  son fáciles de observar en una cámara nublosa, cuando se dispone del núcleo que hace de blanco en forma gaseosa, como es posible con el carbono, oxígeno, flúor y neón. En tales casos el gas

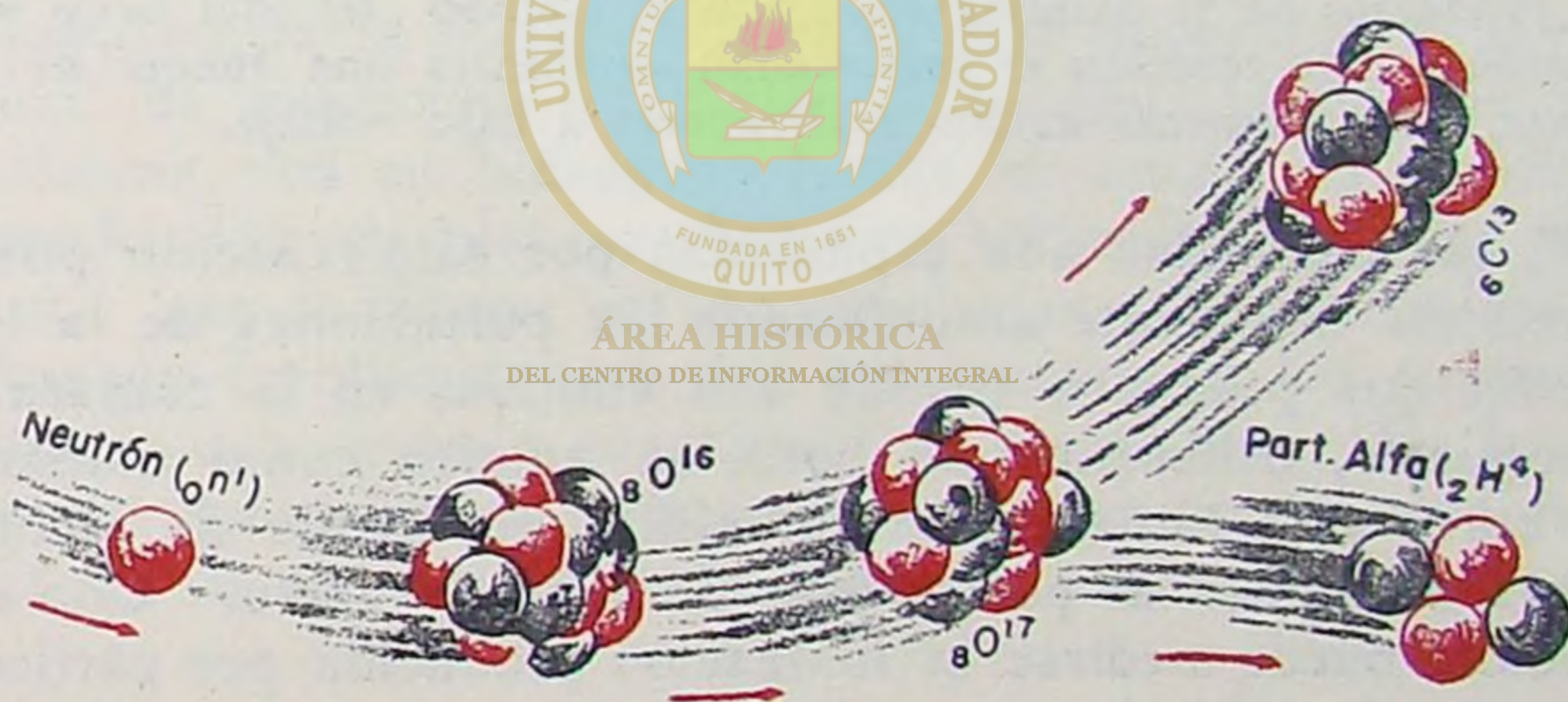


contenido en la cámara está sobresaturado de vapor. Las trayectorias de las gotitas resultantes de la ionización producida por las partículas cargadas eléctricamente que pasan a través de esta atmósfera, pueden observarse a simple vista y medirse fotográficamente, por ejemplo:



El núcleo  ${}_6\text{C}^{13}$  producido y la partícula alfa ( ${}_2\text{He}^4$ ) ocasionan trayectorias bifurcadas. Como el neutrón no está cargado eléctricamente, no produce ionización y, por consiguiente, no hace que aparezca una trayectoria en la cámara nublada. Sin embargo, su presencia es evidente en seguida, porque debe haber alguna razón para que las dos partículas ionizadoras observadas posean inercia hacia adelante.

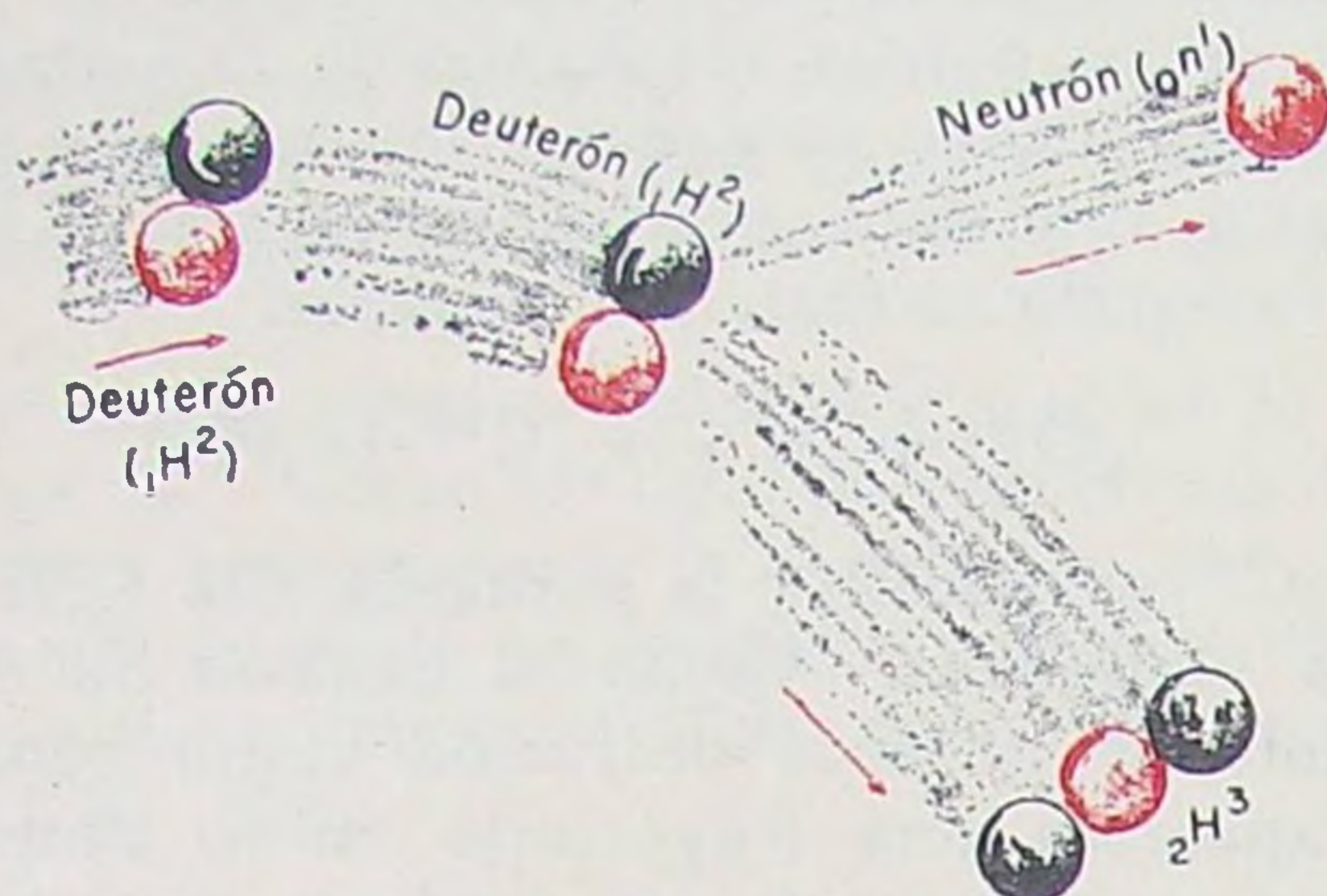
Para casi todos los cuerpos simples se han observado reacciones de la clase  $(n, \alpha)$ , aunque a menudo es difícil probar definitivamente este punto en el caso de las substan-



Los neutrones pueden también ocasionar la emisión de partículas alfa, protones y hasta otros neutrones. Esta reacción es un ejemplo de la expulsión de partículas alfa  ${}_2\text{He}^4$ , de los núcleos de oxígeno  ${}_8\text{O}^{16}$ , por bombardeo con neutrones. El isótopo del oxígeno  ${}_8\text{O}^{17}$  se descompone en carbono  ${}_6\text{C}^{13}$  y una partícula alfa.

cias muy densas porque se producen también muchas reacciones concurrentes. Una reacción de valor especial es la transmutación  $\text{B}^{10} (n, \alpha) \text{Li}^7$ . Esta reacción es prolífica y se utiliza para medir la intensidad de los manantiales de neutrones, pero como el neutrón no es partícula ionizadora, es difícil de percibir. No obstante, si se deja que los neutrones entren en una cámara que contenga una forma gaseosa de





Al igual que los neutrones, los deuterones son importantes en la producción de reacciones nucleares, pero su naturaleza, o sea su carga eléctrica, exige que sean acelerados hasta alcanzar grandes velocidades, antes de que puedan ocasionar desintegración. Esto se hace en aceleradores a alta tensión, como el ciclotrón. La reacción de la izquierda muestra un deuterón acelerado desintegrando otro que hace de blanco; los productos de la desintegración son el isótopo  ${}^3_2\text{He}$  del helio y un neutrón. Esta reacción es importante; suministra una fuente de neutrones, que solamente exigen aceleradores a bajo voltaje.

$B^{10}$ , las partículas alfa producidas por esta reacción pueden percibirse fácilmente amplificando las pulsaciones de la ionización que producen cuando son emitidas en la cámara. El compuesto, trifluoruro de boro, se emplea como manantial de boro, y la ionización se amplifica por medio de rectificadores corrientes de pulsaciones de tubo de vacío. Con esos medios, puede medirse la ionización producida por partículas alfa simples, y así se perciben los neutrones separados.

Las reacciones de la clase  $(n, p)$  forman como producto, un núcleo que tiene el mismo número de masa ( $A$ ) que el núcleo que hace de blanco, y por consiguiente, puede «reconvertirse» en el elemento que sirve de blanco, mediante la emisión de un electrón. Estas reacciones son probables energéticamente sólo para los neutrones de gran energía y para materiales livianos como blanco. Por esta razón, las reacciones  $(n, p)$  no son prolíficas, y en consecuencia, su interés es más bien teórico, sin importancia práctica en la formación de sustancias radioactivas.

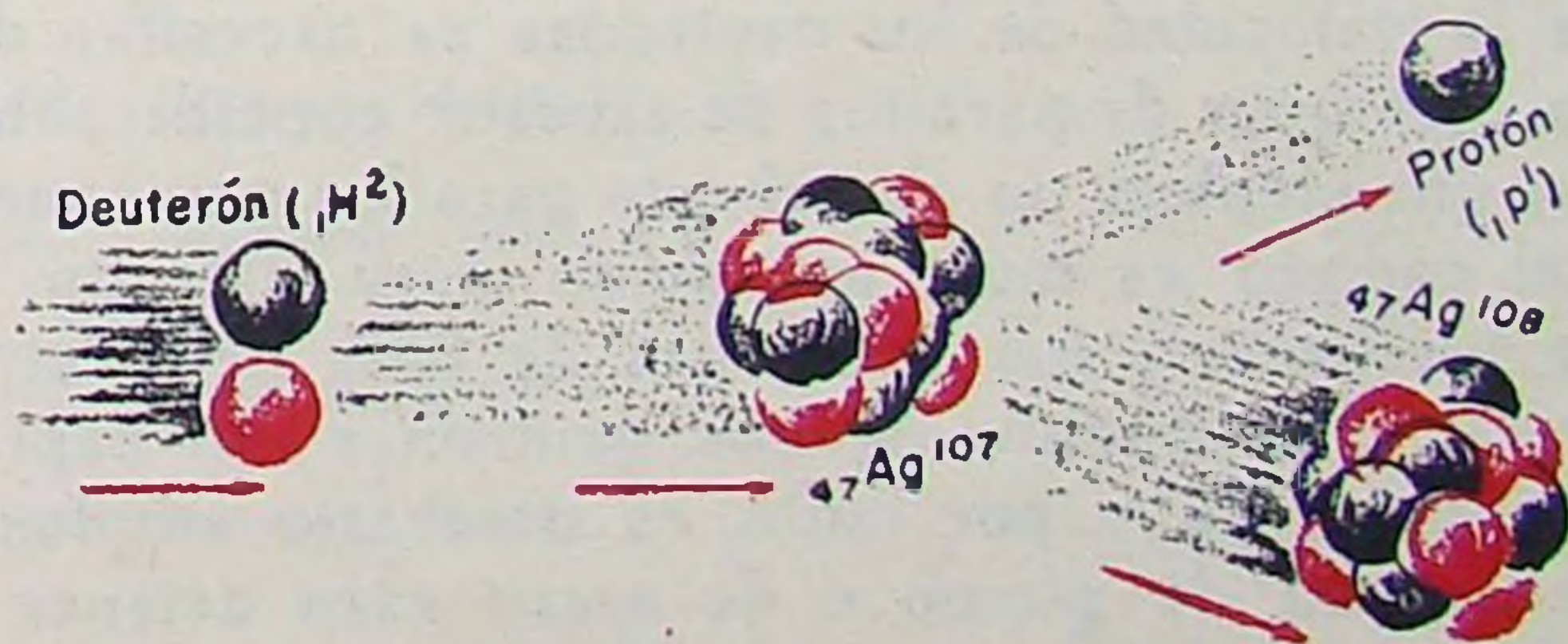
Las reacciones de la clase  $(n, 2n)$  conducen a la producción de un isótopo inferior del blanco bombardeado,



exactamente como hacen las reacciones ( $\gamma, n$ ). Por lo tanto, suele ser difícil determinar cual de estas reacciones es la que está produciendo un determinado isótopo radioactivo. La reacción ( $n, 2n$ ) se observa únicamente con el bombardeo por neutrones de gran energía, y se identifica por medio de la formación de isótopos radioactivos del núcleo que hace de blanco. Se ha observado que más de 30 cuerpos simples, comprendidos entre el berilio y el uranio, se desintegran de esta manera excepcional.

### NEUTRONES LENTOS Y VELOCES

Los neutrones veloces o de gran energía pueden ocasionar reacciones nucleares, pero, aunque parezca sorprendente, los lentos reaccionan a menudo más violentamente. Si la reacción (ecuación 7), en la cual se forma un isótopo radioactivo de la plata, se lleva a cabo sumergiendo el manantial de neutrones y el blanco de plata dentro de una sustancia rica en hidrógeno (como el agua o la parafina), la producción de plata radioactiva se multiplica unas diez veces. Las colisiones de los neutrones con los núcleos de hidrógeno (protones) retardan suficientemente los neutrones de modo que ocurren reacciones de resonancia. De hecho, los neutrones pierden (por término medio) aproximadamente el 70 % de su energía, cada vez que entran en colisión con



Los deuterones pueden también expeler protones. La transformación de la plata  ${}^{107}_{47}\text{Ag}$  en el isótopo radioactivo  ${}^{108}_{47}\text{Ag}$ , mediante la captación del neutrón (arriba), puede conseguirse con el bombardeo con deuterones. En este caso se expela un protón. Como antes, el isótopo de la plata degenera en cadmio de forma estable mediante la emisión de un electrón.



un núcleo de hidrógeno. Se necesitan relativamente pocas colisiones para reducir las grandes energías de los neutrones a la escala en que ocurren las reacciones de resonancia ( $n, \gamma$ ), que es de 1 a 1.000 voltios. Por ejemplo, un neutrón de 5 mev se reduce mediante 14 colisiones sucesivas a un neutrón cuya energía es menor de 1 electronvoltio. El espesor óptimo de parafina para reducir las energías de los neutrones a la escala de la resonancia es de unos 6.5 cm. Si el espesor de la parafina se hace demasiado grande, muchos de los neutrones quedan absorbidos al unirse con protones en la reacción nuclear ( $n, \gamma$ ). Si el espesor de la parafina es menos de 6.5 cm., permitirá que gran parte de los proyectiles neutrones se escapen, con la consiguiente pérdida de eficacia.

Los neutrones lentos son mucho más eficaces en determinadas reacciones nucleares por otra razón. Como se mueven tan lentamente, están más tiempo en las cercanías de los núcleos que hacen de blanco y, por lo tanto, la probabilidad de que sean captados es mucho mayor que si pasaran rápidamente por el blanco. De ahí resulta un efecto que se enuncia simplemente diciendo que la probabilidad de que tenga lugar una reacción nuclear con un neutrón lento (participando en reacciones distintas de las de resonancia) es inversamente proporcional a la velocidad del neutrón.

Las precedentes propiedades de los neutrones obligan a tomar precauciones excepcionales para la protección de los obreros en los laboratorios de física nuclear o en los hospitales donde pueden existir haces intensos de neutrones. Para retardar la velocidad de los neutrones se necesitan depósitos de agua o bloques de parafina de espesor considerable. También hay que emplear un absorbente para los neutrones lentos. El metal cadmio es muy apropiado para este fin, ya que absorbe fuertemente los neutrones de 0.03 de electronvoltio de energía. Por último, algunos neutrones son captados por la reacción ( $n, \gamma$ ), y por tanto, es necesario emplear la cantidad adecuada de plomo o de acero para detener o interceptar los rayos gamma producidos por este proceso. Lo complicado de tales disposiciones indica que las operaciones en que tengan lugar reacciones nucleares deben ser dirigidas por hombres de ciencia y operarios expertos.



**TABLA I—RESUMEN DE LAS CLASES DE REACCIONES NUCLEARES\***

Clase de reacción	Partícula incidente	Partícula expelida	Cambio normal de la masa	Dependencia en la energía del proyectil	Rendimiento	Tipo de Radioactividad producida generalmente	Reacciones obtenidas
(n,γ)	Neutrón	Gamma	Positivo	Resonancia	Casi 100%	Electrón	$\text{Ag}^{107} + n \rightarrow \text{Ag}^{108}$ $\text{Br}^{79} + n \gg \text{Br}^{80}$
(n,p)	Neutrón	Protón	Algo positivo	Suave	Nota 3	Electrón	$\text{N}^{14} + n \gg \text{C}^{14} + \text{H}^1$ $\text{S}^{32} + n \gg \text{P}^{32} + \text{H}^1$
(n,α)	Neutrón	Alfa	Algo positivo en elementos livianos; negativo en los densos	Suave	Nota 3	Electrón	$\text{F}^{19} + n \gg \text{N}^{16} + \text{He}^4$ $\text{Al}^{27} + n \gg \text{Na}^{24} + \text{He}^4$
(n,2n)	Neutrón	2 neutr.	Muy negativo	Suave	Pequeño	Positrón	$\text{N}^{14} + n \gg \text{N}^{13} + 2n$ $\text{P}^{31} + n \gg \text{P}^{30} + 2n$
(p,γ)	Protón	Gamma	Positivo	Resonancia	Grande	Positrón	$\text{C}^{12} + \text{H}^1 \rightarrow \text{N}^{13}$ $\text{F}^{19} + \text{H}^1 \gg \text{Ne}^{20}$
(p,n)	Protón	Neutrón	Negativo	Mínima; Suave aumentando con la energía	Grande	Positrón	$\text{B}^{11} + \text{H}^1 \gg \text{C}^{11} + n$ $\text{O}^{18} + \text{H}^1 \gg \text{F}^{18} + n$
(p,α)	Protón	Alfa	Algo positivo en elementos livianos; negativo en los densos.	Suave, aumentando con la energía del protón.	Grande	Generalmente estable	$\text{F}^{19} + \text{H}^1 \gg \text{O}^{16} + \text{He}^4$ $\text{Al}^{27} + \text{H}^1 \gg \text{Mg}^{24} + \text{He}^4$
(p,d)	Protón	Deuterón	Muy negativo	Suave. como la anterior	Pequeño	Hallóse sólo una	$\text{Be}^9 + \text{H}^1 \gg \text{Be}^8 + \text{H}^2$
(α,n)	Alfa	Neutrón	Nota 1	Suave	Nota 4	Positrón	$\text{B}^{10} + \text{He}^4 \rightarrow \text{N}^{13} + n$ $\text{Al}^{27} + \text{He}^4 \gg \text{P}^{30} + n$
(α,p)	Alfa	Protón	Nota 2	Suave	Nota 4	Generalmente estable	$\text{Al}^{27} + \text{He}^4 \gg \text{Si}^{30} + \text{H}^1$ $\text{N}^{14} + \text{He}^4 \gg \text{O}^{17} + \text{H}^1$
(d,p)	Deuterón	Protón	Siempre positivo	Suave	Nota 4	Electrón	$\text{Na}^{23} + \text{H}^2 \rightarrow \text{Na}^{24} + \text{H}^1$ $\text{P}^{31} + \text{H}^2 \gg \text{P}^{32} + \text{H}^1$
(d,n)	Deuterón	Neutrón	Siempre positivo	Suave	Nota 4	Positrón	$\text{C}^{12} + \text{H}^2 \gg \text{N}^{13} + \text{H}^1$ $\text{Be}^9 + \text{H}^2 \gg \text{B}^{10} + \text{H}^1$
(d,α)	Deuterón	Alfa	Siempre positivo	Suave	Nota 4	Generalmente estable	$\text{O}^{16} + \text{H}^2 \gg \text{N}^{14} + \text{He}^4$ $\text{Al}^{27} + \text{H}^2 \gg \text{Mg}^{25} + \text{He}^4$
(γ,n)	Gamma	Neutrón	Siempre negativo	Mínima definida	Pequeño	Positrón	$\text{Be}^9 + \gamma \rightarrow \text{Be}^8 + n$
(γ,p)	Gamma	Protón	Siempre negativo	Mínima definida	Pequeño	Sólo observada para el deuterón.	$\text{Br}^{81} + \gamma \gg \text{Br}^{80} + n$ $\text{H}^2 + \gamma \gg n + \text{H}^1$

<sup>1</sup> Algo negativo en elementos livianos; positivo en los densos.

<sup>2</sup> Algo positivo, excepto en algunos elementos livianos.

<sup>3</sup> Grande para elementos livianos; considérese la barrera de escape.

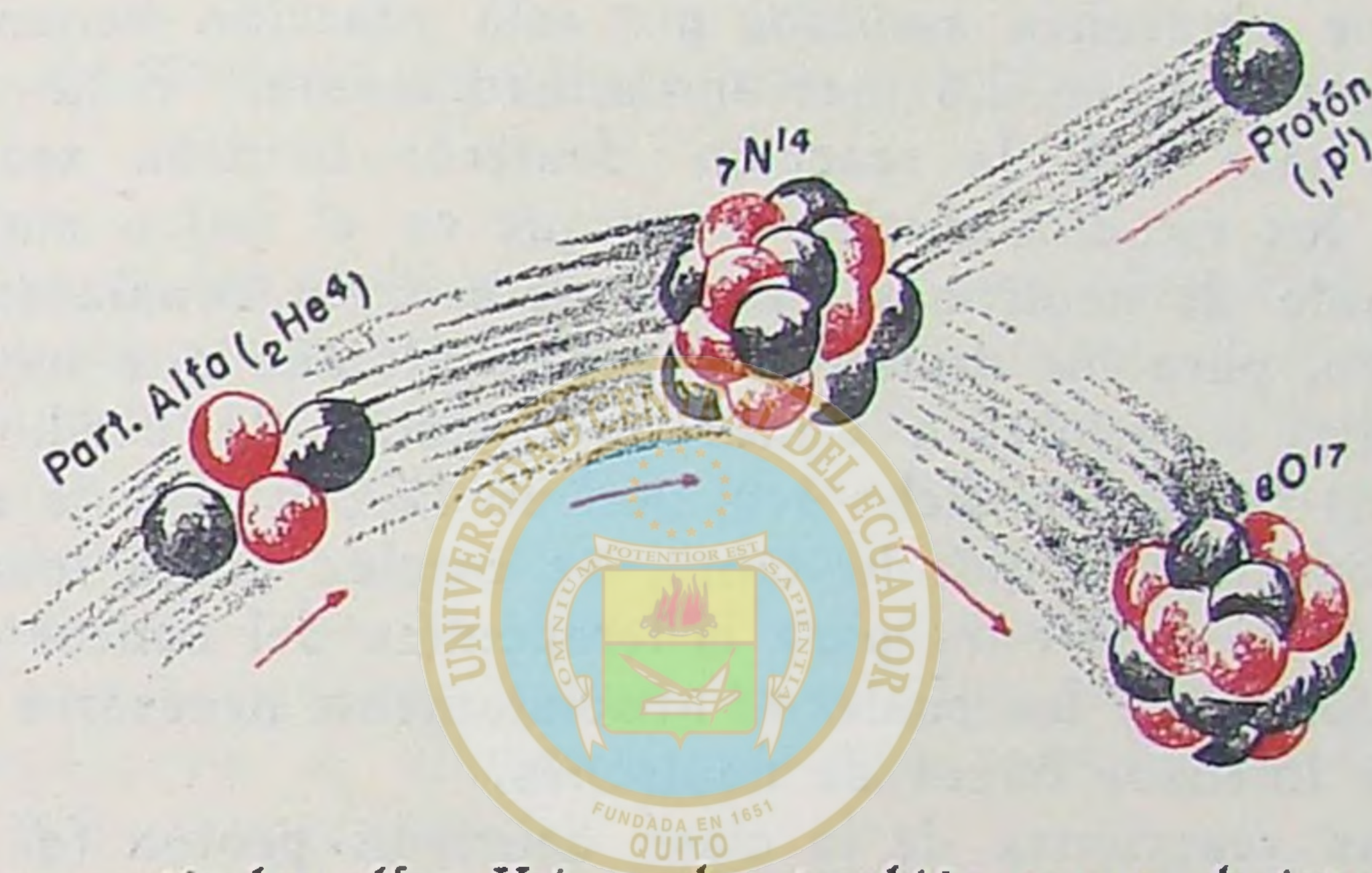
<sup>4</sup> Grande para elementos donde es fácil la penetración de la barrera.

\*Del libro «Applied Nuclear Physics», por Pollard y Davidson, Editorial John Wiley & Sons, 1941.



## REACCIONES INDUCIDAS POR DEUTERONES

El deuterón (núcleo del hidrógeno denso,  ${}_1H^2$ ) se compone de un protón y un neutrón. Como esta partícula está cargada positivamente, no puede penetrar en otros núcleos ni ocasionar transmutaciones con tanta facilidad como lo hace el neutrón. Los deuterones son repelidos por otros núcleos



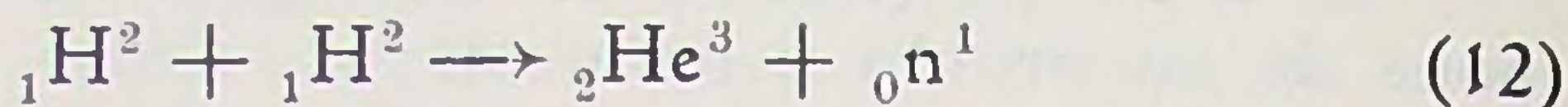
Las partículas alfa  ${}_2He^4$  pueden también causar desintegraciones nucleares. Fueron las primeras partículas utilizadas para este fin, por hallarse en sustancias naturalmente radioactivas. En 1919, Lord Rutherford observó la reacción (arriba) en la cual las partículas alfa convierten el nitrógeno en un isótopo del oxígeno y en un protón.

de blanco cargados positivamente y, por consiguiente, han de ser acelerados hasta grandes velocidades antes de que lleguen a ocasionar una desintegración. Se han construido varias máquinas para este fin. Ya se emplean ciclotrones capaces de producir energías de 100 mev muy aproximadamente.

La fuerza culombio (o electrostática) de repulsión entre dos cargas positivas (como un deuterón y un núcleo del blanco) varía inversamente al cuadrado de la distancia entre los centros y directamente al producto de las dos cargas. Como el deuterón ( ${}_1H^2$ ) tiene una sola carga, suele ser más eficaz en la producción de transmutaciones que las partículas ( ${}_2He^4$ ) de doble carga. Sin embargo, en comparación con los neutrones, son como un millón de veces menos eficaces.



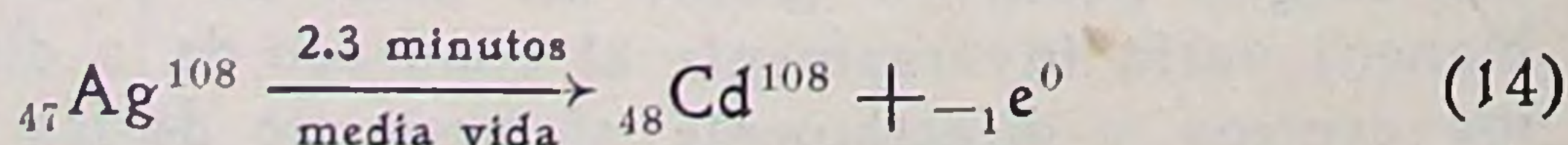
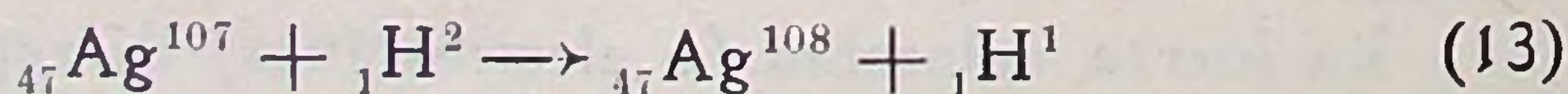
Las reacciones de la clase  $(d, \gamma)$ ,  $(d, n)$  y  $(d, p)$  se han observado y estudiado con gran detenimiento. Dos de las reacciones  $(d, n)$  tienen importancia especial por cuanto proporcionan convenientes manantiales de neutrones. La reacción ocurre



para energías pequeñas hasta de 10.000 voltios, y se utiliza como manantial prolífico de neutrones en los pequeños desintegradores de átomos que funcionan a bajo voltaje.

Los neutrones emitidos por esta reacción tienen todos la misma energía, 2.5 mev aproximadamente. Esta circunstancia hace que la reacción deuterón-neutrón sea muy útil en los estudios nucleares porque es el único manantial abundante de neutrones veloces de energía constante. Sin embargo, para los desintegradores de átomos que funcionan a voltajes superiores a 1 mev, la reacción de berilio boro,  $\text{Be}(d, n) \text{B}$ , supera dicha reacción en la cantidad de neutrones producidos y, por lo tanto, se emplea como manantial principal de neutrones para la terapéutica del cáncer y otras aplicaciones, en las cuales es absolutamente necesario el empleo de intensos haces de neutrones.

Las reacciones de la clase deuterón-protón  $(d, p)$ , en las cuales es expelido un protón, son importantes porque dan lugar a la formación de isótopos radioactivos, exactamente igual que hacen las reacciones  $(n, \gamma)$  de absorción de neutrones. Es más conveniente emplear deuterones que neutrones para producir grandes cantidades de sustancias radioactivas. porque los deuterones (que son partículas cargadas eléctricamente) pueden acelerarse en máquinas de alta tensión. Por ejemplo, el isótopo radioactivo de la plata  $\text{Ag}^{108}$ , expresado en la ecuación (7), se produce también mediante bombardeo con deuterones:



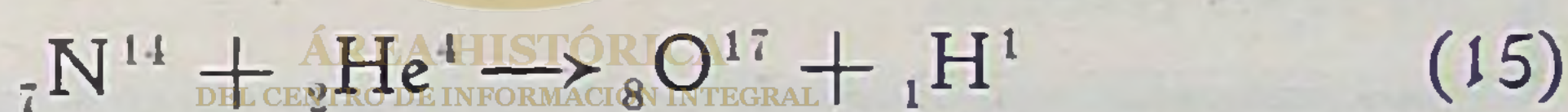
En comparación con otras reacciones entre partículas cargadas eléctricamente la reacción deuterón-protón ocurre con gran probabilidad. En este caso no es necesario que el



deuterón penetre hasta la barrera de potencial culombio del núcleo que hace de blanco, para provocar la reacción. De hecho, el deuterón, al irse acercando al núcleo, se descompone en un protón y un neutrón; el protón es desviado por efecto del campo eléctrico, y el neutrón es absorbido, formando la reacción que expresa la ecuación (6). El protón actúa pues como transportador, haciendo que el neutrón, sea disparado eléctricamente en la proximidad del núcleo que hace de blanco.

### REACCIONES INDUCIDAS POR PARTÍCULAS ALFA

Porque las partículas alfa ( ${}_2\text{He}^4$ ) son obtenibles de las sustancias radioactivas naturales, tales como el  $\text{RaC}'$ , fueron los primeros proyectiles empleados para las desintegraciones atómicas. En 1919, Lord Rutherford logró las primeras desintegraciones nucleares bombardeando gas nitrógeno con partículas alfa de  $\text{RaC}'$ . Los protones de la reacción ( $\alpha, p$ ) correspondiente fueron observados por la iluminación que produjeron al chocar contra una pantalla fluorescente. La reacción observada fue



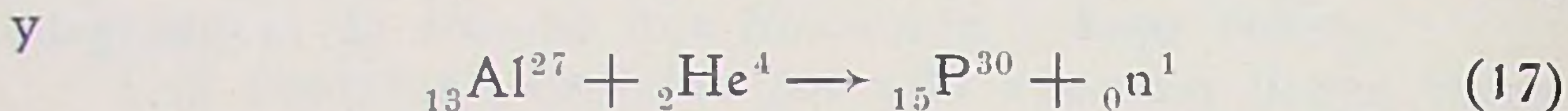
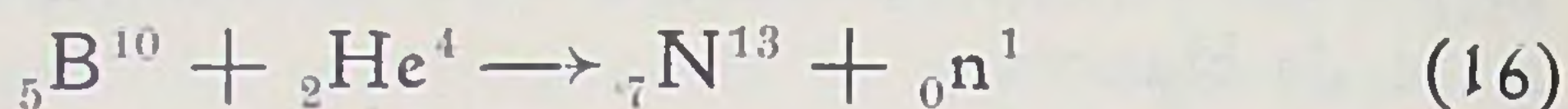
Por aquel tiempo se dudaba que tal reacción fuera observable, porque el tamaño de la partícula alfa ( ${}_2\text{He}^4$ ), así como el del núcleo que servía de blanco ( ${}_7\text{N}^{14}$ ), se sabía que eran menores de  $10^{-12}$  cm. de diámetro. La probabilidad de hacer blanco en un objetivo tan pequeño, con un proyectil aún más pequeño, era ciertamente muy remota. Además, la repulsión culombio eléctrica entre las partículas alfa es bastante grande, y era dudoso que las partículas alfa de  $\text{RaC}'$  pudieran acercarse al núcleo lo bastante para ocasionar la desintegración.

Sin embargo, el experimento tuvo éxito y dió principio al estudio de las reacciones nucleares, que ha evolucionado hasta la compleja ciencia de la física nuclear. Ya no es necesario contar con manantiales naturales de partículas alfa para los fines de los bombardeos atómicos. Los núcleos del helio pueden acelerarse en desintegradores ordinarios de áto-



mos, originando intensos haces de partículas alfa. Se han producido muchas reacciones nucleares de las clases  $(\alpha, p)$  y  $(\alpha, n)$ .

La radioactividad artificial se descubrió primeramente mediante la producción de nitrógeno y fósforo radioactivos, del boro y del aluminio respectivamente, mediante reacciones de la clase  $(\alpha, n)$ .



*Las reacciones nucleares no son nuevas. Sólo que, hasta hace poco, el hombre no participó en su realización o regulación. La naturaleza las emplea espontáneamente. El Sol es un ejemplo «brillante» de reacciones en las que participan los núcleos atómicos. El metal radio fué el primer ejemplo a la mano de una reacción nuclear natural. Aparte de su inestimable utilidad intrínseca, el radio ha sido de muchísimo valor para la ciencia porque facilitó datos para la comprensión de la estructura atómica y demostró que los elementos son alterables. Tal vez—poniendo el asunto aún más a nuestro alcance—los cambios misteriosos en los genes u orígenes biológicos que dan por resultado las mutaciones en las plantas, los animales, y hasta en el hombre, pueden ser efecto de reacciones incitadas por los rayos cósmicos.*

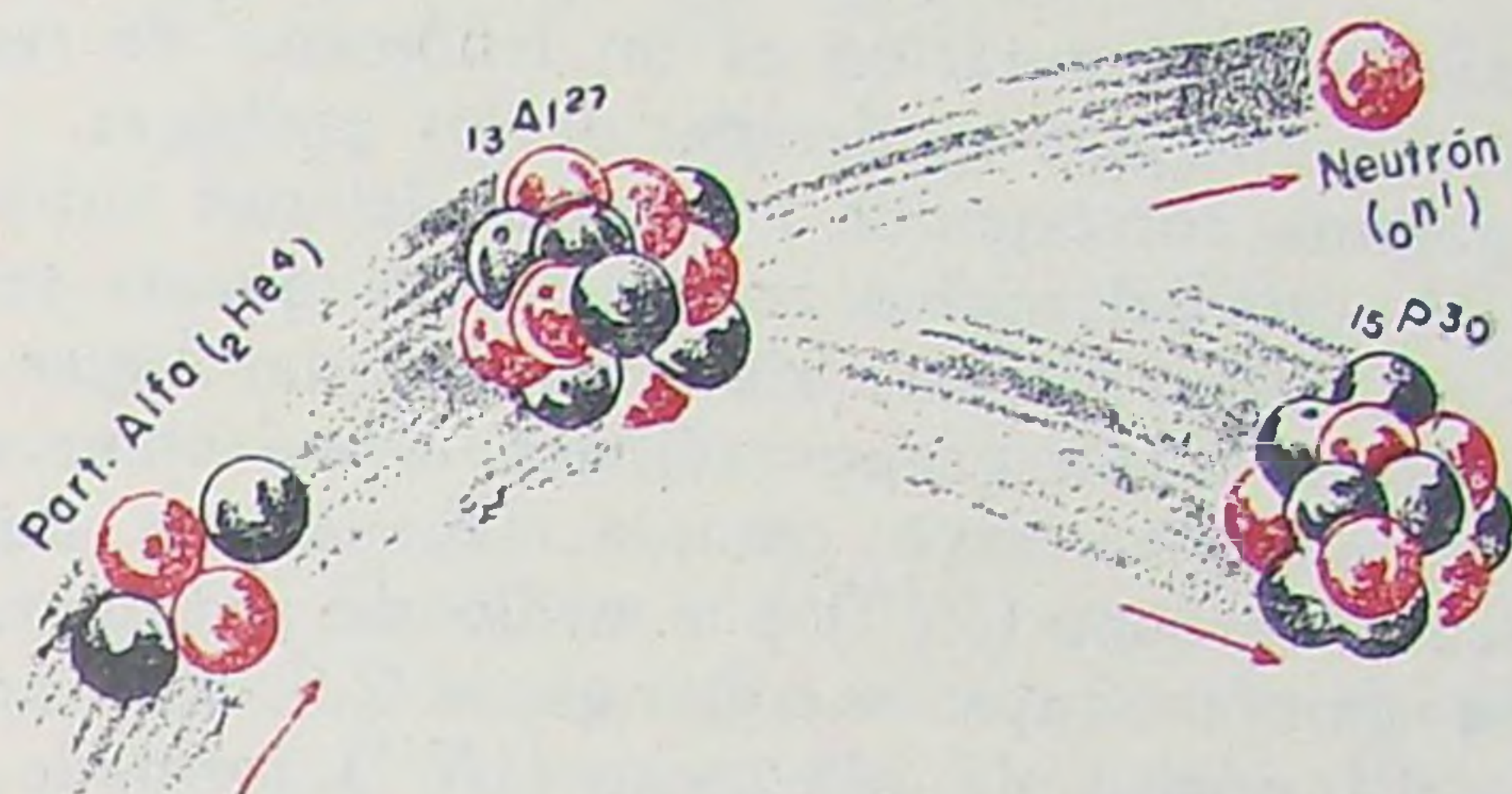
ÁREA HISTÓRICA

Estas reacciones de la clase  $(\alpha, p)$  son importantes porque permitieron las investigaciones de los niveles de energía en los núcleos compuestos, cosa bien difícil hasta entonces.

Se observa a menudo que los protones expelidos en las reacciones  $(\alpha, p)$ , son de varias energías moderadas. En la







Las partículas alfa aceleradas en los desintegradores de átomos constituyen ahora el método corriente de producir reacciones nucleares. La radioactividad artificial fué descubierta primeramente por medio de reacciones alfa en las cuales se expelían neutrones. Así se obtiene nitrógeno  ${}^7\text{N}^{13}$  y fósforo  ${}^{15}\text{P}^{30}$  radioactivos, del boro  ${}^5\text{B}^{10}$  y del aluminio  ${}^{13}\text{Al}^{27}$  respectivamente, y se consigue al mismo tiempo la emisión de una cantidad determinada de neutrones.

reacción  ${}^5\text{B}^{10} (\alpha, p) {}^6\text{C}^{13}$  se han observado cuatro grupos de energía de protones, correspondientes a las compensaciones de energía ( $Q$ ) de valores 3.3, 0.5, 0.1 y  $-0.8$  meV, estableciéndose, por consiguiente, la estructura de los niveles de energía en el núcleo compuesto del nitrógeno estable  ${}^7\text{N}^{14}$ .

### ÁREA HISTÓRICA DEL CENTRO DE INFORMACIÓN INTEGRAL

## REACCIONES INDUCIDAS POR PROTONES

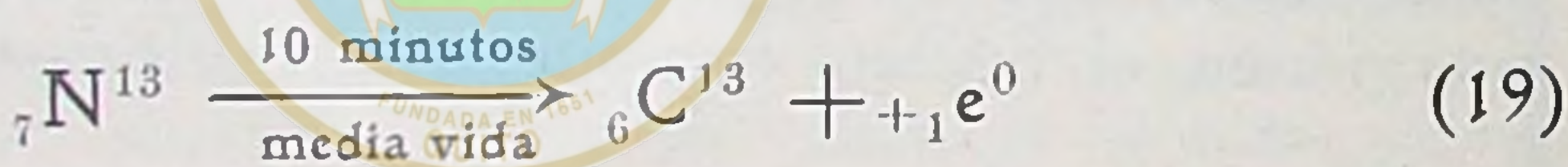
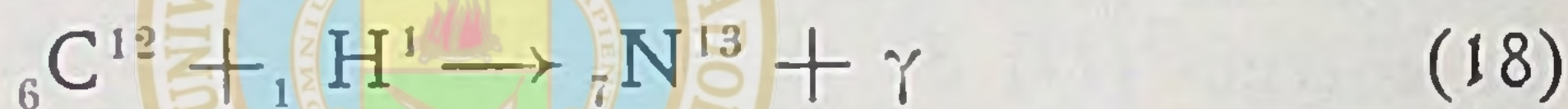
Se emplearon protones acelerados por medio de máquinas de alta tensión para producir las primeras reacciones nucleares inducidas artificialmente. Desde entonces, los estudios de las reacciones nucleares inducidas por protones, tales como las  $(p, \gamma)$ ,  $(p, n)$  y  $(p, \alpha)$ , han contribuido considerablemente a la mejor comprensión de los fenómenos nucleares.

Generalmente, la radiación gamma desprendida de las reacciones  $(p, \gamma)$  es energética. Se han obtenido radiaciones cuyo energía llega hasta 17 meV. Las reacciones nucleares de esta clase pueden utilizarse como manantial de radiación gamma penetrante, para inducir aún otras reacciones, o para aplicaciones radiográficas, médicas, u otros fines experimentales. Como en las reacciones  $(p, \gamma)$  no se emite ninguna partícula material, la energía de protones que se necesita pa-



ra producir la transmutación es un fenómeno de resonancia y ocurre con energías moderadas de los protones. Esta radiación gamma corresponde a las transiciones entre los estados de energía del núcleo compuesto de que se trate.

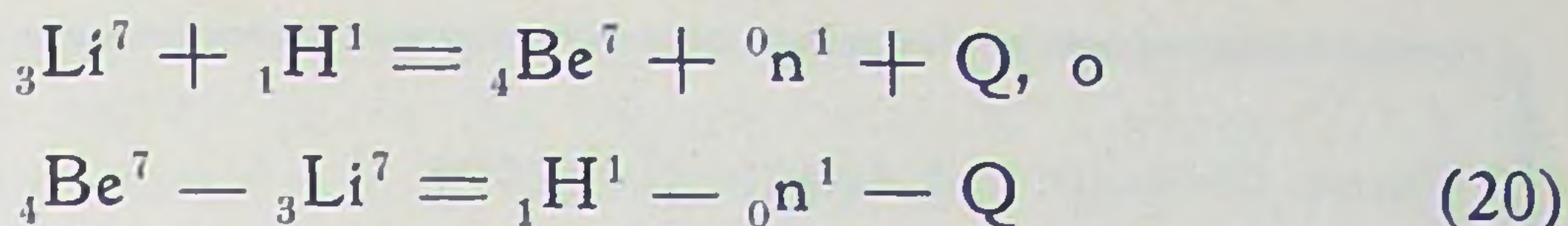
Las reacciones de esta clase pueden dar lugar también a la formación de un grupo radioactivo, así como a la emisión de un energético rayo gamma. En efecto, cuando se bombardea el carbono ( ${}_6\text{C}^{12}$ ) por medio de protones, se emiten rayos gamma cuya energía es de 2.5 mev aproximadamente. El núcleo de nitrógeno ( ${}_7\text{N}^{13}$ ) formado en esta reacción es radioactivo y degenera (ecuación 15) por la emisión de positrones ( $+{}_1e^0$ ) de 1.2 mev convirtiéndose en carbono estable ( ${}_6\text{C}^{13}$ ). Esta media vida del núcleo  ${}_7\text{N}^{13}$  radioactivo es de 10 minutos. De ahí que este material haya de emplearse prontamente, como rastreador químico u otras aplicaciones, porque al cabo de 24 horas sólo queda un átomo radioactivo de cada  $10^{13}$  de la muestra inicial. Estas dos reacciones, que se utilizan corrientemente en estudios de rastreador, son:



ÁREA HISTÓRICA  
DEL CENTRO DE INFORMACIÓN INTEGRAL

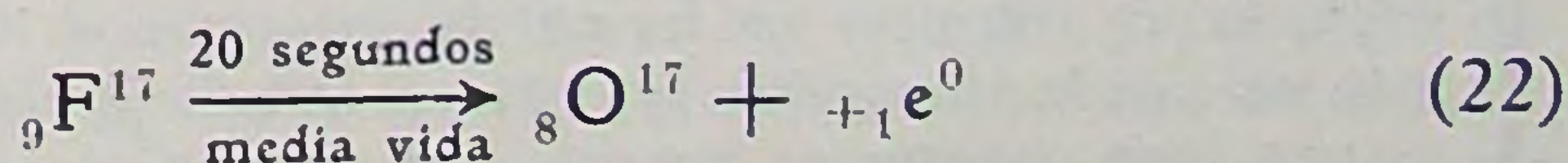
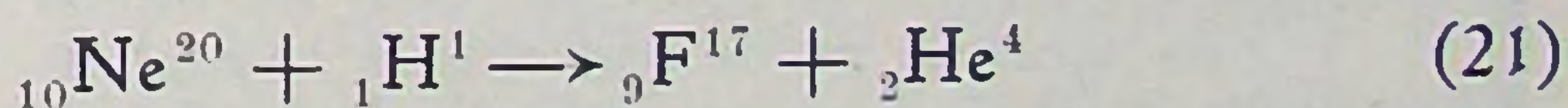
También se observan reacciones de la clase  $(p, n)$ , que son especialmente útiles para la determinación de las masas nucleares. Cuando ocurre este proceso, el núcleo simplemente cambia uno de sus neutrones por un protón, dando lugar a la formación del cuerpo simple inmediato superior, del mismo número de masa que la sustancia bombardeada. Este proceso lleva consigo una merma neta de masa en el núcleo; la masa del neutrón (1.00894) es mayor que la del protón (1.00758). Hay que añadir al núcleo masa o energía ( $mc^2$ ) para compensar esta merma, si se quiere que resulte una estabilidad del mismo orden que la del núcleo inicial. Por esta razón, las reacciones  $(p, n)$  son siempre endotérmicas (es decir, que  $Q$  es negativo), lo cual significa que los protones han de tener siempre energía mayor que una cantidad determinada, llamada energía ( $E_p$ ) antes de que ocurra la transmutación. Una de las reacciones protón-neutrón corresponde al bombardeo del litio por medio de protones, como sigue:





Como se conocen las masas del protón y del neutrón, la diferencia de masa entre los núcleos  ${}_4\text{Be}^7$  y  ${}_3\text{Li}^7$  puede determinarse siempre que  $Q$  pueda medirse. El valor de  $Q$  es posible determinarlo por la energía mínima ( $E_p$ ) de la reacción ( $p, n$ ), mediante la fórmula  $Q = (A/A+1)E_p$  donde  $A$  es el número, de masa del núcleo bombardeado. Si se conociera la masa del núcleo bombardeado, se podrá determinar la masa del núcleo producido; o a la inversa, si se conoce la masa del núcleo producido se podrá determinar la del núcleo bombardeado. Las transmutaciones de la clase ( $p, n$ ) no sólo conducen a la producción de núcleos radioactivos, sino que proporcionan también un método cómodo y sumamente exacto de investigar las relaciones entre masa y energía que intervienen en estas reacciones.

También son conocidas las transmutaciones ( $p, \alpha$ ) en las cuales entra en el núcleo un protón y sale una partícula alfa. Esta reacción suele ser exotérmica, a causa de la gran energía cohesiva de la partícula alfa. La probabilidad de que ocurra esta reacción es muy favorable, sólo cuando la energía del protón bombardeador es grande. Generalmente no se observan las partículas alfa, a causa de la dificultad experimental de distinguirlas de los protones empleados en el bombardeo. Sin embargo, se ha confirmado decididamente la existencia de la reacción, examinando los productos radioactivos originados por la transmutación ( $p, \alpha$ ). Un ejemplo de este proceso es la formación de flúor radioactivo ( ${}_9\text{F}^{17}$ ) mediante el bombardeo de núcleos de neón:



El resultante flúor radioactivo que se forma en esta reacción degenera en oxígeno mediante la emisión de positrones.

La investigación de las reacciones nucleares es indudablemente muy complicada. Durante el bombardeo de un blanco por medio de partículas sumamente veloces, pueden ocurrir simultáneamente muchas reacciones, porque toda reac-



## Veloz detector de rayos atómicos

Los doctores Fitz-Hugh Marshall y John W. Coltman, de los Laboratorios de Investigación de Westinghouse en Pittsburgh, acaban de idear un detector de rayos atómicos que puede contar las partículas que despiden los átomos al desintegrarse, a razón de 100.000 por segundo—es decir, con una rapidez 50 veces mayor que la que registra el contador normal de Geiger.

Este detector, que funciona a una velocidad ultraalta, registra acontecimientos atómicos que ocurren en lapsos tan brevísimos como de una millonésima de segundo. El aparato, que todavía no ha salido de la fase experimental, puede contar cualquier cantidad de rayos o partículas emitidos por los rayos al desintegrarse. El contador de Geiger deja de registrar las señales con claridad cuando las radiaciones que lo atraviesan pasan de 2.000 por segundo. El nuevo detector cuenta con precisión los rayos separados... hasta 100.000 por segundo. Una vez terminados los experimentos, este detector será de valor inmenso, tanto en las investigaciones científicas como en las aplicaciones industriales. En los momentos actuales, cuando la investigación de la energía atómica ha llegado a su punto culminante—pues se trata de utilizarla en la industria—se presenta la necesidad perentoria de un detector de alta velocidad y ultrasensitivo, que pueda contar cualquier número de radiaciones. Los actuales contadores de Geiger necesitan accesorios separados para captar distintas clases de rayos.

Alma del detector Westinghouse es un pequeño foto-tubo con una pantalla fluorescente y un espejo. Al chocar la radiación atómica con la pantalla emítense muchísimos rayos de luz, conocidos como *fotones*, los cuales capta el espejo y los enfoca en el foto-tubo sobre una superficie sensitiva a la luz, haciendo saltar miles de electrones.

Estos electrones libres chocan en el foto-tubo con otra placa sensitiva, acelerando todavía más electrones. Este procedimiento se repite nueve veces hasta que la circulación de electrones, o corriente eléctrica, se aumenta como un millón de veces.

Esta señal se puede transmitir a la pantalla fluorescente de un osciloscopio de rayo catódico donde los físicos pueden ver las explosiones atómicas en forma de velocísimos relámpagos. También se puede transmitir la señal a circuitos electrónicos que registran, con asombrosa precisión el número de las partículas atómicas irradiadas.

ción que sea posible energéticamente tiene una probabilidad finita de ocurrir. Es precisamente esta naturaleza contingible la que especifica cual es la reacción dominante en casos determinados.

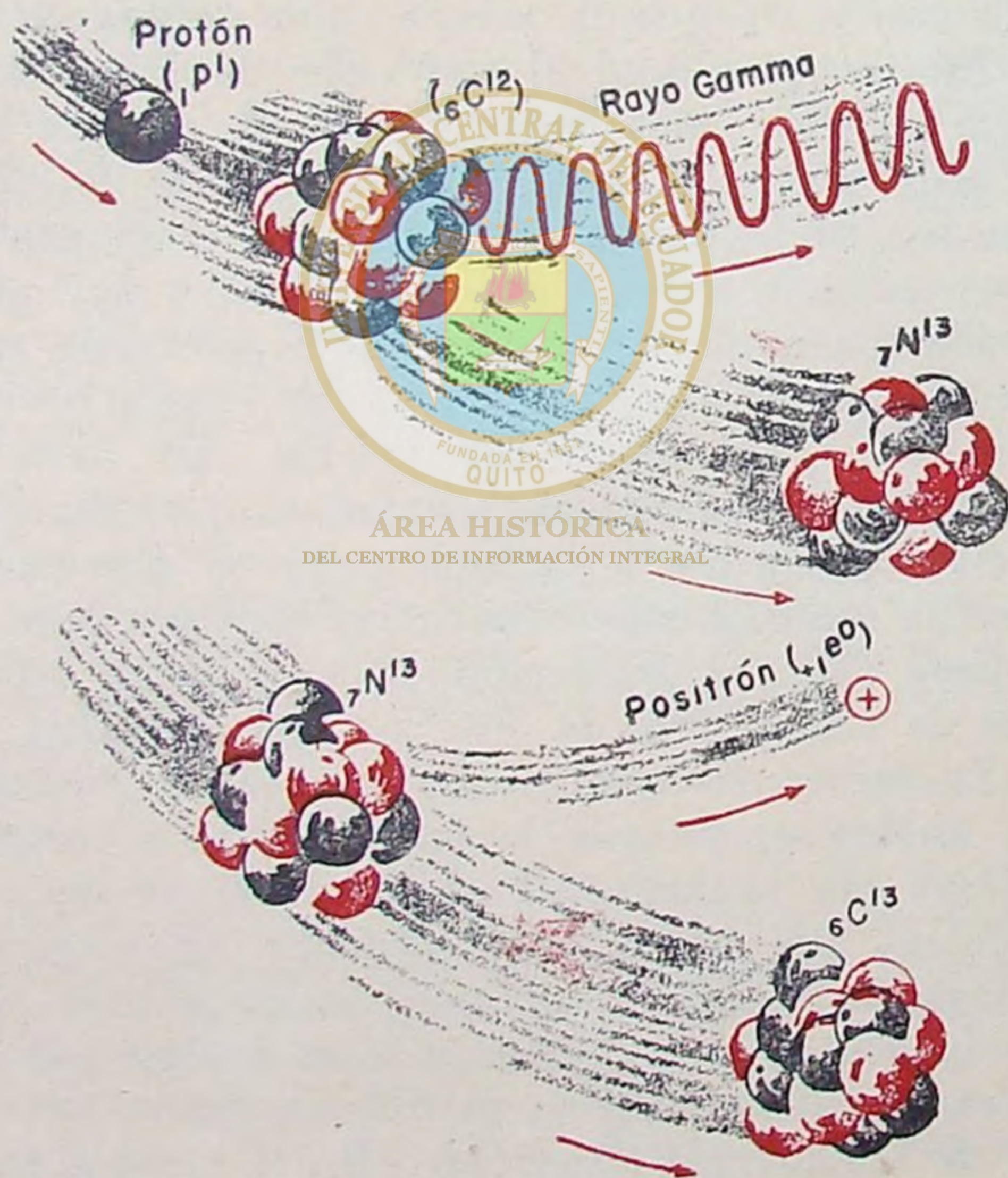


Sin embargo, no se ha llegado aún a comprender bien el mecanismo detallado y las fuerzas nucleares que hacen más posible una reacción que otra. Del estudio detallado de las reacciones nucleares se obtienen datos para la posible explicación de los secretos nucleares. Ahora ya es posible clasificar las reacciones que pueden, y no pueden, ocurrir, pero quedan muchas dudas por aclarar.

El estudio de la física nuclear se halla aún en la fase preliminar de exploración. No le será posible al teorizante formular una teoría nuclear adecuada hasta que disponga de una cantidad considerable de datos científicos más precisos. Comparemos, por ejemplo, el desarrollo de la comprensión de los fenómenos eléctricos con el de la ciencia nuclear. La ley de Coulomb, de que la fuerza entre cargas eléctricas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, fué descubierta muchos años antes de que se pusiera la electricidad en uso práctico; en la ciencia nuclear todavía no se conoce la ley de la fuerza que actúa entre un protón y un neutrón—y éstos son los elementos básicos con que se producen todos los núcleos. Esta situación es aún más complicada en la investigación nuclear, por cuanto no se conoce ningún método para medir esa fuerza. En electricidad es posible establecer dos cuerpos cargados eléctricamente en un sistema mecánico y medir la fuerza que se ejerce entre ellos, cuando están separados por distancias considerables. Entonces se puede calcular la acción de esa fuerza para cortas distancias de separación de los cuerpos cargados eléctricamente. En la ciencia nuclear no es posible efectuar experimentos análogos, porque la fuerza entre el neutrón y el protón decae tan rápidamente al aumentar la separación de las partículas, que no es factible medir su magnitud para separaciones razonables. Además, no es posible aislar una cantidad de neutrones y juntarlos a un cuerpo para fines de mediciones, como se hace en la determinación de las características de las fuerzas eléctricas. En la ciencia nuclear no parece que esto sea posible, porque todavía no se ha descubierto método alguno de poner el neutrón y el protón lo suficientemente juntos y, al mismo tiempo, medir la fuerza de atracción por medios mecánicos. Únicamente se puede acelerar una partícula nuclear y utilizarla como proyectil para bombardear otras partículas o núcleos, y observar qué reacciones nucleares u otras acciones recíprocas ocurren. Cuando



se hacen estudios como éstos con precisión suficiente, puede llegarse a inferir qué ley de fuerzas se necesita para producir esos efectos. Los experimentos aislados de esta clase, en unión de datos de reacciones nucleares, han indicado que la separación entre las partículas en la física nuclear ha de ser una distancia menor de  $10^{-12}$  cm. antes de que se manifiesten las fuerzas de atracción. Para separaciones mayores de  $10^{-12}$  cm. no parece que existan otros efectos particulares que las fuerzas culombio o electrostáticas. La mayor utilidad de los estudios de las reacciones nucleares radica en el hecho de que el examen minucioso de los procesos que ocurren, permite llegar a conclusiones concernientes a la estructura del núcleo y las fuerzas cohesivas.



Las primeras reacciones nucleares inducidas artificialmente se consiguieron acelerando protones en máquinas a alta tensión. Las reacciones de los protones, con la consiguiente emisión de rayos gamma, neutrones, y partículas alfa, importantes en la investigación de los fenómenos nucleares, son corrientes. Un caso típico es el bombardeo del carbono  ${}^{12}_6\text{C}$  por medio de protones, resultando nitrógeno radioactivo  ${}^{13}_7\text{N}$  y radiación gamma. Este nitrógeno degenera en diez minutos en el carbono estable,  ${}^{13}_6\text{C}$ .