

PRIMER EJERCICIO

GRUPO B - FÍSICA Y TECNOLOGÍA NUCLEARES

TEMA 1: Radiactividad natural. Series radiactivas. Isótopos. Radiactividad artificial. Estructura nuclear. Fuerzas nucleares. Estabilidad nuclear.

1. RESUMEN

Este tema trata los fenómenos nucleares y se hace, por tanto, necesario darle una cierta extensión para permitir su comprensión.

Se incluye:

- el núcleo atómico, su composición, estructura y propiedades (fuerzas nucleares y estabilidad nuclear), la existencia de diferentes tipos de átomos estables e inestables (existen muchos más aspectos a considerar, pero en ese caso, puede recurrirse a los libros referenciados)
- Las reacciones nucleares (que no aparecen tratadas en ningún otro tema se tratan someramente, para más detalles ver la bibliografía).
- La radiactividad natural originada por diferentes causas y las series radiactivas naturales (tratamiento básico, puesto que existe el tema D.7 del primer ejercicio donde se desarrollará el tema con más detalle y el tema B.2 donde se trata el fenómeno de desintegración radiactiva).
- La producción de radiactividad por métodos artificiales por diferentes procedimientos (ver tema D.7. del primer ejercicio para más detalle).

No se incluyen más fórmulas que algunas básicas ya que resultan complicadas de exponer en una oposición, pero se ha añadido un anexo con figuras para ayudar a una mejor comprensión de los puntos tratados en este tema. Se marcan con una línea a la derecha aquellos aspectos que se consideran básicos, en relación con el enunciado del tema.

No se trata en este tema la descripción histórica de los descubrimientos que dieron origen a los conocimientos actuales en materia de física nuclear y atómica ni en materia de química de las radiaciones o radioquímica. Para considerar estos temas se aconseja recurrir a la bibliografía citada.

Este tema puede empezarse por el punto 5 (para seguir el orden del título) pero para la exposición ha parecido mejor empezar a tratar el núcleo y su estructura y, como

consecuencia, el fenómeno de desintegración radiactiva de algunos núcleos y su consecuencia que es la radiactividad. Con una marca a la derecha se señala aquellos aspectos que se consideran básicos para el tema (dado su título)

2. TEMAS RELACIONADOS

Este tema es básico para la comprensión del resto del temario, tanto en lo que se refiere a la seguridad nuclear como y, muy especialmente, a la protección radiológica.

3. UNIDADES BÁSICAS

Las unidades relacionadas en este tema son:

- Unidad atómica de masa (**uma**) que equivale a 1/12 de la masa del carbono-12, esto es $1/12 \cdot (12 \text{ gramos/número de Avogadro}) = 1/12 \cdot (12/6,0247 \cdot 10^{23}) = 1,660540 \cdot 10^{-24}$ gramos. (en el sistema internacional, SI, $1,660540 \cdot 10^{-27}$ kilos)
- Unidad de carga eléctrica = culombio
- Energía: electronvoltio (**eV**), es la energía cinética que alcanza un electrón cuando se le somete en el vacío a la diferencia de potencial de un voltio y equivale a $1,602177 \cdot 10^{-19}$ julios.
- Como unidad de longitud se usa, a menudo, en física nuclear, el Fermi, 1 Fermi (1fm) = 10^{-15} metros y en física atómica el Armstrong = 10^{-10} metros.
- Flujo de partículas ϕ es el número de partículas por segundo que inciden sobre cada cm^2 del material usado como blanco. En un acelerador de partículas es más habitual referirse a la intensidad del haz, expresada en $\mu\text{Amperios}$; para partículas de una sola carga (positiva o negativa) 1 μA equivale a $6,2418 \cdot 10^{12}$ partículas por segundo.
- Sección eficaz para una reacción dada, σ , es una magnitud proporcional a la probabilidad de que se produzca dicha reacción. Su unidad habitual es el barnio (1 barnio = 10^{-24} cm^2)

4. NUCLEO ATOMICO

Todos los cuerpos o sustancias de la naturaleza están constituidos por unos componentes elementales llamados átomos o por grupos de átomos llamados moléculas.

Hay que distinguir entre la *física nuclear* que se refiere a los fenómenos nucleares y la *física atómica* que se refiere a procesos extranucleares; las energías puestas de manifiesto en ambos casos son muy diferentes. En la física atómica, los fenómenos extranucleares (como el enlace químico, suponen energías del orden de los **eV**, o la emisión de rayos X, con energías del orden del **KeV**) y en la física nuclear, es decir la que abarca los fenómenos que afectan directamente al núcleo, las energías involucradas son del orden de los **MeV**

4.1. Estructura atómica

El átomo está formado por un núcleo donde están los *neutrones* y los *protones*. Alrededor del átomo están los *electrones* organizados en orbitales. Neutrones y protones se denominan *nucleones* o también *bariones*.

Los neutrones son partículas carentes de carga eléctrica y tienen una masa en reposo de $1,007593^1$ **uma** ($1,674929 \cdot 10^{-24}$ Kilogramos); los protones tienen una masa en reposo de $1,006543$ **uma** ($1,672623 \cdot 10^{-24}$ Kilogramos) y una carga eléctrica positiva de $1,602177 \cdot 10^{-19}$ culombios. El electrón tiene una masa en reposo de $0,0055$ **uma** ($9,10390 \cdot 10^{-31}$ Kilogramos) y una carga eléctrica negativa de $1,602177 \cdot 10^{-19}$ culombios. Los núcleos tienen el mismo número de protones que de electrones por lo que su carga eléctrica es nula.

- **Radio u carga nuclear. Momento nuclear**

El diámetro del núcleo es del orden de $10^{-14/-15}$ metros y el del átomo del orden de 10^{-10} metros, por lo que la densidad del núcleo es del orden de 10^8 toneladas/cm³, o lo que lo mismo, la mayor parte de la materia esta vacía porque toda la masa se concentra en los núcleos.

Esto supone un modelo nuclear muy sencillo de núcleo esférico y densidad uniforme. Aunque este modelo es correcto, es demasiado simplificado, ya que los experimentos han demostrado que la densidad nuclear no se anula bruscamente, sino que, excepto para núcleos muy ligeros, se puede apreciar una zona de densidad constante y una zona superficial en la que la densidad disminuye progresivamente (ver figuras 1, 2, 3).

Las características generales de los espectros atómicos pueden interpretarse de una manera simple por la suposición de un núcleo de tamaño extraordinariamente pequeño y masa infinita. La estructura fina de las líneas espectrales puede explicarse por la posterior adición de los conceptos del *spin² electrónico* y de la interacción spin-órbita, sin necesidad de tener en consideración las propiedades de los respectivos núcleos.

Ahora bien, en una estructura hiperfina es necesario introducir conceptos como la existencia de un *momento angular nuclear*, con el cual quedaría asociado un estado magnético. Como los momentos magnéticos nucleares surgen como resultado de la circulación de cargas en el núcleo, es evidente que el núcleo debe tener un tamaño finito. Tanto el spin como el momento magnético nuclear intervienen en el tratamiento cuantitativo de la estructura hiperfina. (para más detalles de estos aspectos véase el Cap. 4 de la ref. 2 y Cap. 2 de la ref. 3))

Dado que ambos, neutrón y protón tienen un momento angular intrínseco y puesto que los neutrones y protones en un núcleo se mueven también en órbitas unos respecto a otros, debe esperarse que el núcleo tenga un *momento angular orbital* que se expresa como una integral, **I**, o semi-integral relacionada con el spin nuclear. De acuerdo con la mecánica cuántica, el momento angular asociado con el

¹ Según los diferentes autores las masas en reposo de las partículas pueden presentar pequeñas diferencias. Estos números están tomados de la referencia 1.

² Giro de la partícula sobre sí misma que puede tener los valores $+1/2$ ó $-1/2$.

movimiento orbital de los nucleones puede ser sólo una integral múltiplo del spín angular intrínseco de sus nucleones.

- **Modelos nucleares**

A causa de las complejas relaciones entre los nucleones cuando forman átomos medios o pesados no se ha conseguido desarrollar ninguna teoría exacta.

Todos los modelos nucleares actualmente existentes pueden clasificarse en dos tipos:

- a) modelos del tipo de *partícula individual* para los cuales la característica estratiforme es una característica básica
- b) modelos de tipo *colectivo* o de *fuerte interacción*, tales como el modelo de la gota líquida, en los cuales se pone de manifiesto una fuerte correlación entre el movimiento de los nucleones.

Ambos tipos de modelos no se excluyen entre sí, dado que la materia nuclear está lejos de poder ser considerada como un líquido clásico. De hecho, el principio de Pauli permite que un nucleón en un núcleo posea un gran recorrido libre medio lo que lleva a la evidencia de una estructura estratiforme. La interpretación de los modos colectivos en términos de movimiento de los nucleones es la base del *modelo unificado*

El modelo del núcleo denominado *de gota líquida* (desarrollado por Von Weizsäcker en 1935) supone que el núcleo se comporta como una gota de líquido incomprensible; los nucleones se asocian a moléculas de la gota. A pesar de su simplicidad consigue valores aproximados a los empíricos para núcleos de **A >20**

La existencia de *números mágicos* (concepto que se describirá posteriormente) sugirió otro tipo de modelos, los denominados *modelos de capas* en los que se supone que los nucleones en un núcleo se distribuyen en capas con un número limitado de lugares disponibles en cada capa, de modo parecido a la estructuración de los electrones en el átomo. Su estado de mínima energía se denomina *estado fundamental* y en este estado el núcleo tendrá los nucleones situados en las capas de menor energía posible. En caso contrario, es decir cuando los nucleones no ocupan las capas de menor energía el núcleo se encuentra en un *estado excitado*. Así, de manera similar al átomo, el núcleo presenta una serie de estados estacionarios con energías determinadas (figura 5).

Dado que las fuerzas internucleónicas intervienen explícitamente en los cálculos de la estructura nuclear, es conveniente introducir el concepto formal del *spin isobárico* que hace posible la toma en consideración concisa de la independencia de las fuerzas nucleares con la carga y proporciona un nuevo número atómico en los estados nucleares (figura 6)

Una carga eléctrica en movimiento posee un *momento bipolar magnético* que es proporcional a su momento angular orbital. El momento *cuadrupolar eléctrico*, **Q**,

da idea de cómo está distribuida la carga alrededor de un eje; si el espín nuclear es $\frac{1}{2}$ o 0, $Q=0$ y la distribución es esférica; en los demás casos $Q \neq 0$; si $Q > 0$ el núcleo es un elipsoide alargado y si $Q < 0$ un elipsoide achatado.

- **Estructura electrónica y energía de enlace de los electrones y nucleones**

Los electrones se encuentran en órbitas (según el modelo de una estructura similar a un sistema planetario de Borh) o en orbitales (según el modelo ondulatorio de Schödinger). Así pues, los electrones se estructuran en capas (denominadas K, L, M, N,... a medida que se van alejando del núcleo; a medida que las capas se van alejando del núcleo disminuye su energía y aumenta el número de electrones que son capaces de soportar; las capas L, M, N.... se dividen en subcapas)

Cada capa tiene una energía bien determinada E_n caracterizada por un número entero positivo, n (la fórmula, según los cálculos de Borh de esas energías está en la Pág. 43 de la referencia 1..Excepto la capa K (que contiene dos electrones), las demás tienen subcapas, en cada una de las cuales se contienen dos electrones de igual energía diferenciándose sólo en el *spín* (giro del electrón sobre sí mismo). En la tabla siguiente se dan, a título de ejemplo, algunas energías de enlace de los electrones en las capas K y L

Valores aproximados en eV para diferentes nucleidos	Capa K	Capa L		
		Subcapa L ₁	Subcapa L ₂	Subcapa L ₃
Hidrógeno (Z=1)	13,6	----	----	----
Calcio (Z=20)	1.038,1	437,8	350,0	346,6
Plomo (Z=82)	88.004,5	15.850,8	15.200,0	13.035,2

Todos los núcleos atómicos tienen exactamente conocidos el número de protones y neutrones (la masa de los electrones es despreciable al ser 1/1.800 veces la de un protón), pero la masa de los átomos no se corresponde exactamente con la suma de la masa de ambas partículas, sino que existe un defecto de masa que equivale a la *energía de enlace* que permite mantener unidos neutrones (sin carga) y protones (con carga positiva).

Aplicando la ecuación de Einstein, la deficiencia de masa de un átomo equivale a una energía de enlace (E_L), generalmente del orden de los **MeV (mega electronvoltio)**. En la práctica esta energía se traduce en *energía media de enlace por nucleón* dividiendo la energía anterior por el número de nucleones. En la tabla siguiente se dan algunos ejemplos de energías medias de enlace que, como puede apreciarse, es inmensa. En la Figura 7 se representa la energía de enlace media por nucleón.

Nucleido	Energía media de enlace por nucleón en MeV
Helio-4	7,07
Calcio-40	8,55
Cobre-63	8,75
Uranio-238	7,57

- ❖ Los valores de la energía media de enlace de los nucleones varían de manera irregular para los núcleos ligeros $A < 20$, siendo el del hidrógeno-2 (deuterio) muy bajo y presentando un pico alto para el helio-4 (véase la tabla anterior); esto último da una peculiar estabilidad a la partícula alfa (α).
- ❖ Para $A > 20$ permanece prácticamente constante la energía de enlace por nucleón entre 7,3 y 8,7 MeV; un análisis más detallado indica que esa energía de enlace aumenta a partir de $A=20$, hasta llegar a un máximo de 8,7 MeV para alrededor de $A=60$ y después disminuye lentamente hasta un valor de 7,6 MeV para $A=240$, siendo ese descenso más acusado a partir de $A > 150$ a consecuencia de la repulsión coulombiana de los protones. Esta es una causa en que exista una limitación en el número de átomos estables que se pueden formar.

Si se desea completar este tema de la estructura nuclear se recomienda la lectura del capítulo 4, 9 y 10 de la referencia 2 y del capítulo 2 de la referencia 3.

• Fuerzas nucleares

Las fuerzas nucleares no son de naturaleza eléctrica (puesto que los protones son positivos y los neutrones carecen de carga); tampoco son de naturaleza gravitatoria, ya que la pequeña masa de las partículas haría que esta fuerza fuera muy pequeña. Las fuerzas nucleares son de corto alcance y sólo se dan cuando las partículas se encuentran a distancias de 10^{-15} o 10^{-14} metros.

La fuerza nuclear depende de la orientación relativa de los spin de los nucleones inter-actantes, no es completamente central ya que depende de la orientación del spin con respecto a la línea que une los dos nucleones, tiene un carácter repulsivo por lo que debe existir una separación media entre nucleones y es una fuerza que tiene un carácter de saturación, de modo que cada nucleón sólo puede interactuar con un número limitado de nucleones vecinos.

• Composición del núcleo. Nucleido. Nucleidos isótonos, isóbaros, isótopos e isómeros

Los elementos químicos se caracterizan por el número de protones (y por tanto de electrones) que tienen y esta cantidad se denomina *número atómico* y se representa por la letra **Z**. No obstante, los núcleos, aun manteniendo el mismo número de protones pueden tener distinto número de neutrones (**N**) y por tanto tienen diferente *masa atómica* representada por la letra **A**. A cada una de las posibles agrupaciones de nucleones se le denomina *nucleido*. Así la forma más precisa de representar un nucleido, si por **X** denotamos el elemento químico es:

A	24	A
X	por ejemplo Na	X
Z	11	Z

y a veces por facilidad de escritura

También son frecuentes las nomenclaturas ^{24}Na o, más sencillamente, Na-24 (puesto que el número atómico viene unívocamente determinado por el elemento químico que se trate).

Los nucleidos se clasifican en:

- Isótonos, los que corresponden a elementos químicos distintos por ejemplo $^1_1\text{H}^3$ y $^2_2\text{He}^4$ pero tienen el mismo número de neutrones; $N = \text{constante}$
- Isóbaros, los que correspondiendo a elementos distintos tienen la misma masa atómica, por ejemplo $^{32}_{15}\text{P}$ y $^{32}_{16}\text{S}$; $A = \text{constante}$
- Isótopos, los que correspondiendo al mismo elemento químico tienen distinto número de neutrones, como por ejemplo $^{31}_{15}\text{P}$ y $^{32}_{15}\text{P}$. ($Z = \text{constante}$). La mayoría de los elementos que existen en la naturaleza están constituidos por mezclas de isótopos con una *abundancia isotópica característica*; así, el uranio natural está formado por U-234 (0,0055%), U-235 (0,7200%) y U-238 (99,2745%).
- Isómeros, los que correspondiendo al mismo elemento y teniendo el mismo número de protones y neutrones tienen núcleos con diferentes niveles de energía, cada uno de los cuales tiene una vida media medible. El nivel mínimo de energía del núcleo se toma como cero o “base” y los de los valores excitados en **eV** por encima de ese valor base (el concepto de vida media se trata más adelante en este tema); N , A y Z son constantes. Se suelen denotar con la letra **m** (meta estable o estado excitado del núcleo). Por ejemplo, el tecnecio-99 tiene un isómero el tecnecio-99m cuyo núcleo tiene un nivel de energía superior al del tecnecio-99 en 140 **MeV**. El Tc-99m tiende a perder ese exceso de energía para transformarse en Tc-99 (los esquemas de desintegración radiactiva se tratan más adelante en el tema B.2).

Hay aproximadamente unos 1.300 nucleidos que se ordenan en tablas o cartas de nucleidos teniendo como eje de ordenadas el número **Z** y como abscisas el número **N** (Figura 8). La diagonal de esa representación contiene los núcleos que tienen el mismo número de protones que de neutrones y, para los átomos de menor masa, representa *la línea de estabilidad* es decir, representa a aquellos núcleos que son estables y no sufren fenómenos de *desintegración radiactiva* (se describe el fenómeno más adelante). Sin embargo, a medida que la masa atómica va creciendo, se necesita un mayor número de neutrones que de protones para que los núcleos sean estables, por lo que la línea de estabilidad se va curvando hacia arriba a medida que aumentan los números atómicos, y así para $A = 50$ la relación neutrones/protones tiende a 1,6.

Una mirada de mayor detalle de esta figura (Figura 9) observa un comportamiento ligeramente diferente para los núcleos de A par que para los que tienen el número atómico impar.

- Así, si A es impar (el momento angular es semi-entero):

- Para cada valor de A sólo hay un único isóbaro estable, excepto para $A=113$ y $A=123$, en que hay dos
- Para cada valor de Z hay uno o como mucho dos isótopos estables
- Si A es par (el momento angular es entero):
 - Para cada valor de A puede haber uno, dos e incluso tres isóbaros estables
 - Para cada valor de Z puede haber muchos isótopos estables.

Estos hechos indican que las fuerzas nucleares dependen en cierta manera de la paridad de N y Z . Por ejemplo es curioso señalar que existen:

- 166 nucleidos estables para Z y N pares
- 51 nucleidos estables para Z impar y N par
- 55 nucleidos estables para Z par y N impar
- 5 nucleidos estables para Z y N impares

Se ha observado una estabilidad especial en ciertos nucleidos como helio-4 ($Z=2$), oxígeno-16 ($Z=8$) y plomo-208 ($Z=82$). Estos números se denominan *números mágicos* y representan ciertas *islas de estabilidad*. Los investigadores están convencidos de que debieran existir islas de estabilidad, para determinadas relaciones Z/N en núcleos más pesados, pero aún no se han obtenido resultados en este campo.

Los nucleidos que representan una relación N/Z superior o inferior al valor correspondiente a la franja de estabilidad serán inestables y son los llamados *nucleidos radiactivos* y tienden a convertirse en nucleidos estables mediante transformaciones nucleares (*desintegración radiactiva*) para alcanzar la relación Z/N que les permita ser estables.

El último nucleido estable conocido es el que corresponde al de número atómico 83 y, más concretamente el Bismuto-209. A partir de ahí, todos los nucleidos existentes en la naturaleza son inestables (radiactivos).

4.2. Partículas elementales

Según la teoría más aceptada actualmente, el universo empezó con un gran “big bang” tras el cual se creó una “sopa” de fluido inicial o primordial, una “sopa” indescritiblemente compleja consistente casi completamente en partículas materiales extremadamente energéticas viajando a velocidades muy cercanas a la de la luz, con una pequeña parte de naturaleza no material. La densidad y temperatura del fluido primordial fue extremadamente alta (se estima que la temperatura inicial era del 10^{33} grados y la densidad de 10^{94} gramos/cm³ y que la energía de las partículas fue del orden de 10^{27} MeV).

Los varios tipos de partículas en el fluido primordial se clasifican modernamente en tres grandes familias, tal como se expresa en la siguiente tabla.

Familia de los hadrones ³	Familia de los leptones	Familia de los fotones
Mesones (135-548)	Electrones (0,551)	Radio ondas
Bariones o nucleones: neutrones (939,5) y protones (938.2)	Muones (105,65)	Micro ondas
Hiperones (1.115-1.675)	Partículas Tau	Luz infrarroja
	Neutrinos-electrón (0)	Luz visible
	Neutrinos-muón (0)	Luz ultravioleta
	Neutrinos-tau	Rayos X
		Rayos gamma

Para completar el tema de la física de partículas se recomienda el Cáp. 21 de la ref. 1 y los Cáp. 19, 20 y 21 de la ref. 2.

La espectrometría de los hadrones presenta estados resonantes estrechos para energías del orden de 3 **GeV** o superiores. La estructura de estos estados sugiere que nos encontramos ante una *estructura fina* (o dicho de otro modo, los hadrones no son partículas simples sino que son, a su vez, el resultado de la composición de otros subelementos). Se pueden así establecer funciones de ondas de tres componentes que describen tres magnitudes básicas conocidas como *quarks*.

El empleo de grandes aceleradores de partículas que permiten la interacción de iones pesados acelerados a muy altas energías ha permitido avanzar mucho en este campo específico.

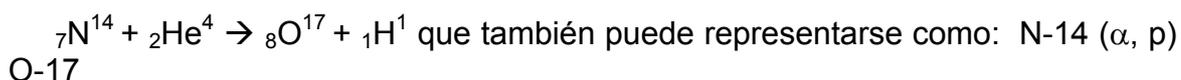
Las partículas elementales que más se usan en la física nuclear son además de las tres citadas anteriormente (protón, neutrón y electrón), antiprotones (partículas como los protones y con la misma masa y carga pero ésta negativa) y *positrones* (partículas beta con la misma masa y carga que el electrón pero esta última positiva); el *neutrino* y el *antineutrino*, unas partículas sin carga y masa en reposo nula que aparecen involucradas en el fenómeno de la desintegración beta; el *fotón* o cuanto de radiación (bien conocido tanto en física atómica como en física nuclear) y los *mesones* π^+ , π^0 y μ , partículas cuyas masas están comprendidas entre la del protón y la del electrón y que son importantes, respectivamente, en la teoría de las fuerzas nucleares y para la comprensión de ciertos fenómenos de la radiación cósmica..

4.3.Reacciones nucleares (este aspecto no aparece en el enunciado del tema, por lo que, o bien puede obviarse, o bien reducirse a una mínima exposición; no obstante se ha incluido aquí con un cierto grado de detalle porque se considera necesario para comprender los fenómenos involucrados en la física nuclear)

³ Los números entre paréntesis son las masas de las partículas en MeV. Cada partícula material tiene su antipartícula de idéntica masa y, para las partículas cargadas, de carga opuesta. Las únicas partículas estables son el protón, el electrón, el neutrino-muón, el neutrino-electrón y los protones. Los neutrones tienen una vida media (después se tratará este concepto) de 710 segundos cuando no se encuentran en el interior de un núcleo. La vida media de las otras partículas inestables varía entre 10^{-8} segundos a menos de 10^{-14} segundos.

Una reacción nuclear es un proceso que tiene lugar cuando un núcleo reacciona con otro núcleo, una partícula elemental o un fotón para producir en un tiempo del orden de 10^{-12} segundos uno o más núcleos diferentes (y posiblemente otras partículas). Para que esto ocurra las especies que interactúan deben entrar en el radio de acción o influencia mutua.

Como ejemplo de una reacción nuclear, puede citarse la primera por la que se descubrió el proceso que fue la desintegración del nitrógeno al bombardearlo con partículas alfa:

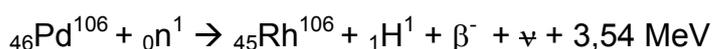


4.3.1. Valores de energía de la reacción (Q)

Es evidente que los cambios de energía involucrados en una reacción nuclear son correspondientes a los cambios de masa que se observan. Así, en el caso anterior, la suma de las masas del ${}^7_7\text{N}^{14}$ y del ${}^2_2\text{He}^4$ es 18,005678 **uma** y la suma de las masas de ${}^8_8\text{O}^{17}$ y del ${}^1_1\text{H}^1$ es de 18,00658 **uma** por lo que debe proporcionarse a la reacción, para que sea posible, una energía equivalente a 0,001280 **uma** o, lo que es lo mismo, **Q = -1,192 MeV**.

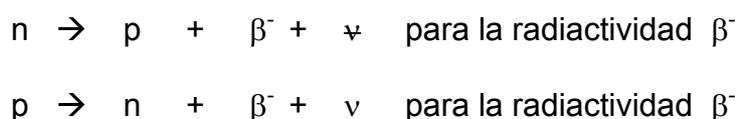
A veces, aunque no se conozca la masa de los núcleos productos, es posible conocer la **Q** de la reacción si el núcleo producto es radiactivo y se desintegra.

Por ejemplo para la reacción Pd-106 (n,p) Rh-106, dado que el Rh-106 es radiactivo y se desintegra con una vida media (ver el tema B-2) de 30 segundos, emitiendo una partícula β^- de 3,54 MeV para llegar al átomo estable Pd-106, la correspondiente reacción nuclear tendría una expresión como la que sigue:



(la partícula $\bar{\nu}$ es un antineutrino y su justificación en las desintegraciones betas se tratará en el tema B.2)

Pero para comprender el fenómeno de las reacciones nucleares debe explicarse como es posible que un núcleo, que no contiene más que neutrones y protones, pueda emitir una partícula beta o un positrón en una reacción nuclear. Las transiciones entre neutrones y protones se llevan a cabo mediante las reacciones fenomenológicas siguientes:



- **Modelos para las reacciones nucleares**

- Modelo óptico, en donde la visión del núcleo es la de un pozo energético cuadrado con una barrera de potencial fijada en función de las fuerzas de culomb (Figura 10). En él las interacciones de la partícula incidente sobre los nucleones es reemplazada por la interacción de dicha partícula con un pozo de energía. Con este tipo de modelo el único efecto de una partícula sería la desviación de la partícula de su dirección original. No dice nada sobre lo que ocurre si la partícula es absorbida.
- Modelo del núcleo compuesto; es uno de los dos modelos que intentan predecir que ocurre en aquellos casos en que la partícula es absorbida por el núcleo (denominado *núcleo blanco*, por incidir sobre él una partícula). En este modelo se asume que la energía transportada por la partícula incidente se distribuye al azar entre los nucleones del *núcleo compuesto* resultante. El núcleo compuesto tiene una vida media de entre 10^{-14} a 10^{-18} segundos lo que es mucho comparado con el tiempo necesario para que un nucleón atraviese el núcleo (entre 10^{-20} y 10^{-23} segundos). Con una distribución al azar de la energía en el núcleo compuesto hace difícil que un nucleón adquiera tanta como para salir del núcleo (rompiendo la fuerza de enlace de los nucleones y, si posee carga, superando la barrera de culomb).

No obstante, siempre puede producirse una fluctuación estadística, en que la distribución de energía se concentre suficientemente en un nucleón para permitirle escaparse del núcleo. Lo más probable es que sólo una parte del exceso de energía introducida en el núcleo por la partícula incidente se concentre en un solo nucleón, por lo que el núcleo resultante quedará aún con un exceso de energía, es decir, en un estado excitado. La dificultad principal del modelo es que en ese estado cuasi-estacionario durante el cual persiste el núcleo compuesto incluye muchos estados excitados del mismo. Sin embargo, para reacciones con neutrones térmicos sólo existe un único estado excitado.

La probabilidad de emisión de una partícula cuya energía esté comprendida en un cierto intervalo depende de la energía de la susodicha partícula y la densidad de niveles en el núcleo de que forma parte y, en consecuencia, el espectro de tales partículas se anula tanto para altas como para bajas energías. Para núcleos de **A** alrededor de 50 y para energías del orden de 10 MeV el espectro presenta un a forma continua, parecida a la distribución energética de las moléculas de un gas. Esta analogía se toma frecuentemente en un sentido más profundo, para sugerir que las partículas emergentes se pueden considerar como *productos de evaporación* de un núcleo altamente excitado. En tal sentido, se puede definir una *temperatura nuclear*, que es un parámetro del espectro de evaporación relacionado con la densidad de niveles del núcleo residual. Para más detalles de *la teoría de evaporación de partículas* ver el cap10 de la ref. 3 y el Cáp. 15 de la ref. 2.

- Modelo de interacción directa; en este modelo no se asume que la energía de la partícula incidente se distribuye al azar entre los nucleones, sino que presupone que la partícula incide directamente sobre un nucleón, o, como máximo, con un grupo de nucleones que, por tanto, pueden ser

directamente liberados del núcleo. Puede ocurrir también que la partícula incidente salga del núcleo, después de haber dejado en él parte de la energía que transportaba en algunas pocas colisiones. Así no se forma un núcleo compuesto intermedio en estado excitado y las partículas emitidas tendrán usualmente más energía que las que pudieran proceder de dicho núcleo compuesto.

Este modelo incluye las interacciones directas en las que sólo una parte de la partícula incidente compleja (por ejemplo un deuterón) colisiona con el núcleo blanco. La parte que no colisione continuará su con una trayectoria desviada. Esta clase de reacción es especialmente importante con los deuterones y es conocida como reacción “stripping” (desgajamiento). Otro tipo de interacción directa que es observada frecuentemente es el llamado proceso “pickup” (captura⁴) que puede considerarse el proceso opuesto al anteriormente descrito y por el que, por ejemplo, puede formarse una partícula compleja (tales como un deuterón o el H-3) por interacción con una partícula incidente simple como un protón.

- **Secciones eficaces (para más detalle ver tema B.3.)**

La sección eficaz de un átomo para una reacción dada (σ) es una magnitud proporcional a la probabilidad de que tenga lugar dicha reacción. Tiene las dimensiones de un área y suele visualizarse que cada átomo es un disco de área σ y que la reacción ocurre cuando una partícula incide sobre un punto de ese disco. Se representa por el símbolo sigma (σ) provisto del subíndice indicativo de la reacción que tiene lugar (c = captura radiante, f = fisión,) y su unidad es el barnio. (La Figura 11 contiene una interpretación geométrica de la sección eficaz microscópica)

Por supuesto, al ser la sección eficaz dependiente de la reacción nuclear, dependerá de la energía de la partícula incidente, lo que significa que pueden aparecer funciones de excitación. (Figura 12). En muchos casos pueden observarse picos de resonancia en las secciones eficaces (Figura 13).

Además, cuando se emplean partículas cargadas (producidas principalmente en aceleradores), éstas se van frenando (perdiendo energía) a medida que penetran en el material blanco, lo que significa que la sección eficaz, ya dependiente de la energía, dependerá también de la penetración de una forma no muy sencilla.

A efectos prácticos bastará con conocer el valor numérico de la integral resultante; esto se consigue irradiando el núcleo blanco durante un tiempo mucho menor, del orden de 5 veces o menos, que el periodo de semidesintegración del radio-nucleido producido a una corriente del haz de 1 μA y posterior medida de la actividad producida.

4.3.2. Tipos de reacciones nucleares

⁴ No confundir esta “captura” con el concepto de “captura” de una partícula incidente por un nucleido bombardeado con un haz de ellas, tema que se verá al tratar los distintos tipos de reacciones nucleares existentes.

En este apartado se efectúa un breve resumen de los tipos de reacciones nucleares que han sido observadas

Las reacciones $A + a \rightarrow (C) \rightarrow B + b$, se denominan *reacciones de captura radiactiva* porque el núcleo blanco captura la partícula incidente (A = núcleo blanco del bombardeo con partículas o radiaciones, a = partícula o radiación incidente o bombardeante, C = núcleo compuesto, B = núcleo resultante o producto y b = partícula o radiación resultante). Las reacciones nucleares, del tipo $A(a,b)B$, en la que el nucleido resultante, B , resulta con un exceso de energía (en un estado excitado) se denominan en general *reacciones de activación* ya que ese exceso de energía tiende a eliminarse mediante un proceso de desintegración radiactiva (véase tema B.3.).

Para que una partícula pueda producir una reacción nuclear debe tener una energía mínima que se denomina *energía umbral* que es la que le permite superar la barrera de culomb del núcleo blanco.

4.3.2.1. Dispersión elástica (Q=0)

La más simple consecuencia de una colisión nuclear, y que ocurre para todas las partículas y energías, es la dispersión elástica. Las partículas no cambian su identidad durante el proceso y la suma de las energías cinéticas (ignorando la excitación molecular y atómica y el *bemsstrahlung*, aspecto que se trata en el tema B.2) permanece constante. Excepto para neutrones de muy baja energía es aplicable a esta reacción el modelo óptico.

Serían reacciones del tipo $X(a,a)X$ en las que la partícula incidente es difractada en diferente dirección sin modificar su energía. La energía cinética del sistema final es idéntica a la del sistema inicial.

4.3.2.2. Dispersión inelástica (Q≠0)

Se representan por reacciones del tipo $X + a \rightarrow X^* + a' + Q$

En estos casos la energía cinética de los productos difiere de la del sistema inicial y el núcleo blanco queda en un estado excitado. Si Q es positiva la reacción puede tener lugar con cualquier valor de energía de la partícula incidente (incluso nula), pero si Q es negativa es necesario una *energía umbral* mínima para que se produzca la reacción.

4.3.2.3. Reacciones con neutrones de baja energía.

Como los neutrones carecen de carga eléctrica, la barrera de culomb no supone un impedimento para que neutrones de muy baja energía causen reacciones nucleares. De hecho este tipo de reacciones suelen tener secciones eficaces mucho más elevadas que las que corresponden a otro tipo de reacciones nucleares. También son observables picos de resonancia en la sección eficaz (Figura 13).

Estas reacciones pueden explicarse mediante el modelo del núcleo compuesto.

La principal reacción con neutrones lentos es la denominada reacción de excitación que puede representarse como $X (n, \gamma) X^*$ dando como resultado un núcleo en un estado excitado que tenderá al estado fundamental por uno de los procesos de desintegración radiactiva que se tratan en el tema B.2.

Para núcleos de bajo **Z** son también posibles reacciones (n,p) y (n,α) ya que para estos átomos las barreras de potencial no son muy elevadas y pueden ser atravesadas por una partícula cargada (la resultante de la reacción).

Ejemplos de estas reacciones son la N-14 (n,p) C-14 y la (n,α) sobre boro-10 que es de gran valor por la elevada sección eficaz y porque las partículas α producidas pueden ser detectadas.

4.3.2.4. Reacciones de energía media

La barrera de culomb hace imposible, excepto para núcleos muy ligeros, estudiar reacciones con partículas cargadas a baja energía. Para estudiar este tipo de reacciones se precisan energías comprendidas entre unos pocos **MeV** y hasta **50 MeV**.

Dos características diferencian este tipo de reacciones de las que ocurren con neutrones de baja energía:

- a) Los picos de resonancias aisladas en la sección eficaz no son observables porque su distancia es demasiado pequeña en comparación con la anchura de dichos picos.
- b) El incremento de energía hace posible una gran variedad de reacciones nucleares distintas para un mismo núcleo blanco y partícula incidente. (Figuras 12 y 14)

Las secciones eficaces para partículas cargadas caen prácticamente a cero para energías por debajo de la barrera de culomb y se aproximan asintóticamente a $\pi \cdot R^2$ donde π es el número pi, y R es la distancia ente los centros de la partícula incidente y el núcleo blanco (*radio de interacción*).

En la Figura 15 se presenta un esquema de las reacciones entre las partículas alfa y el núcleo de Hierro-54 con sus correspondientes nucleidos descendientes, según las observaciones efectuadas.

Las partículas emitidas en las reacciones de energía media son, usualmente neutrones, protones, partículas alfa, núcleos de tritio (H-3), núcleos de helio-3 y deuterones (núcleos de hidrógeno-2), así como fragmentos de fisión (véase más adelante las reacciones de fisión); como la emisión de partículas cargadas requiere acumular en la partícula emitida energía suficiente para superar la barrera de culomb y, además, la energía de enlace de la partícula

el núcleo, en general, está favorecida la emisión de neutrones. Para núcleos de números atómicos menores de 30, la barrera de culomb no es tan elevada, lo que unido a la simetría en la masa (relación Z/N) hace que, en estos casos, la emisión de partículas cargadas sea de cierta relevancia. Cuando el número atómico crece, el aumento de la barrera de culomb disminuye la probabilidad de emisión de partículas cargadas y así en el caso del bismuto ($Z=83$) las reacciones más favorecidas cuando se bombardea con protones son las reacciones (p,xn) , donde x es el número de neutrones emitidos.

El espectro de energía obtenido para las partículas alfa emitidas en las reacciones del Níquel (68% Ni-58 y 26% de Ni-60) al ser irradiado con protones de 16,6 **MeV** destaca que dicho espectro tiene un máximo en la proximidad del valor de la barrera de culomb (alrededor de 10 **MeV**) indicando que la mayoría de las partículas se emiten con la energía mínima que haga posible traspasar dicha barrera y que el modelo del núcleo compuesto es el aplicable en este caso. En el espectro (ver figura 10-2 de la Pág. 299 de la ref. 3), aparece un segundo pico que corresponde a partículas alfa con toda la energía disponible y que conduce a un nivel cero o a uno de los primeros niveles excitados para la energía residual del núcleo resultante, lo que sugiere que, también, son esperables reacciones por el modelo de interacción directa.

4.3.2.5. Reacciones con deuterones

Desde muy pronto en el estudio de las reacciones nucleares, se encontró que las reacciones (d,p) ocurrían a energías de los deuterones inferiores a la de la barrera de culomb y que las secciones eficaces eran considerablemente elevadas. Esto no es justificable con la teoría del núcleo compuesto y fue explicada por Oppenheimer y Phillips como resultado de la polarización del deuterón por el campo del culomb del núcleo: cuando el deuterón se aproxima al núcleo, el neutrón puede entrar en el núcleo, siendo repelido el protón por la fuerza de culomb. A causa de la elevada distancia entre el protón y el neutrón en un deuterón (del orden de 10^{-13} cm.); el neutrón alcanza la superficie del núcleo mientras el protón está aún fundamentalmente fuera de la barrera de culomb y como las fuerzas nucleares de enlace en el deuterón son bajas (2,23 **MeV**) las fuerzas nucleares tienden a atrapar el neutrón rompiendo el deuterón. Este proceso es normalmente denominado *proceso Oppenheimer-Phillips* o proceso (O-P).

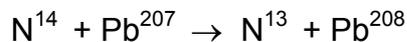
Un proceso similar puede ser responsable de las reacciones a baja energía con el bombardeo con núcleos de Helio-3: (He^3,p) .

4.3.2.6. Reacciones con iones pesados

Las reacciones nucleares iniciadas por iones pesados (de masa superior a la de la partícula alfa) exhiben mecanismos de reacción tanto del núcleo compuesto como de “stripping” y “pickup” (según se indica al describir el modelo de reacción nuclear por interacción directa)

Las reacciones que pueden justificarse por el modelo del núcleo compuesto suponen la evaporación⁵ de varias partículas dado que tales iones pesados deben tener una elevada energía para superar la barrera de culomb. Para átomos para números atómicos superiores a 35 o 40, la mayoría de las secciones eficaces para las reacciones según el modelo del núcleo compuesto suponen la evaporación de neutrones. Para núcleos de menor Z, la emisión de partículas cargadas se completa con la emisión de neutrones.

También se han detectado, en estos niveles de energía, reacciones que suponen una colisión de roce entre el núcleo blanco y la partícula bombardeante y uno o más nucleones son transferidos tanto desde la partícula incidente al núcleo como a la inversa, según es esperable según la teoría de la interacción directa. Son reacciones, por ejemplo, como la siguiente:



Las secciones eficaces de estas *reacciones de transferencia* disminuyen a medida que se incrementa la transferencia de nucleones.

4.3.2.7. Reacciones foto-nucleares

Las reacciones del tipo (γ, n) ó (γ, p) no son similares a otras reacciones de baja energía; este tipo de reacciones crece rápidamente cuando se va incrementando la energía hasta alcanzar un máximo para después volver a disminuir. Sin embargo, esta disminución de las secciones eficaces se van correspondiendo al incremento en las secciones eficaces de otras reacciones competitivas. En otras palabras, la sección eficaz total para la absorción de fotones aparece tener un comportamiento resonante. Esta resonancia gigante está adscrita a la excitación de las vibraciones de los dipolos de todos los neutrones moviéndose colectivamente contra todos los protones.

La anchura de los picos de resonancia son del orden de varios **MeV** a la mitad del máximo y la energía de los picos de resonancia decrecen lentamente cuando aumenta A desde los 24 **MeV** para el oxígeno-16 hasta alrededor de 14 **MeV** para el talio-181.

4.3.2.8. Reacción de fisión

Un núcleo compuesto, formado por un núcleo pesado al absorber un neutrón, puede dividirse en dos núcleos de masa comparable y esto va normalmente acompañado por la emisión de neutrones y mucho más raramente con la emisión de partículas alfa u otros núcleos ligeros. La fisión se da, generalmente en algunos nucleidos (especialmente uranio-235, uranio-238 y torio-232). Utilizando muy altas energía (50-450 **MeV**) en las partículas que

⁵ Para ampliar el concepto de la teoría de evaporación y conocer la formulación matemática correspondiente, se recomienda leer las pág. 343 a350 de la ref. 3)

inciden, se ha producido fisiones en átomos como bismuto, plomo, tantalio y algunas tierras raras.

U-232, U-233, U-235, Pu-239, Am-241 y Am-242 sufren reacciones de fisión tanto con *neutrones térmicos*⁶, como con neutrones de alta energía, mientras que la fisión de torio-232, protactinio-231 y uranio-238 requiere neutrones rápidos. En la tabla siguiente se da una clasificación de los neutrones por su energía.

Alcance (energía)	Descripción	Subdivisión
0 – 1.000 eV	Lentos	0 – 0,02 eV: fríos 0,025 eV: térmicos 0,5 eV Epidérmicos 1-100 eV: resonancias
1-500 KeV	Intermedios	-----
0,5 – 10 MeV	Rápidos	-----
10 – 200 MeV	Alta energía	-----
Más de 200 MeV	Ultra alta energía	-----

Aunque pueden producirse por el bombardeo con partículas tales como protones, deuterones, iones helio y rayos X y gamma, las reacciones de fisión más importantes son las originadas por el bombardeo con neutrones.

También es posible que surjan reacciones de *fisión espontánea* en ciertos radionucleidos por la existencia de neutrones en el medio ambiente.

Los nucleidos que sufren procesos de fisión se denominan *materiales fisionables o sustancias fisibles* y aquellos nucleidos que no sufren la fisión pero que, tras una captura neutrónica se convierten en nucleidos fisionables se denominan *materiales fértiles*.

La energía liberada en un proceso de fisión térmica del uranio-235 es del orden de los 200 MeV distribuida en la forma que se indica en la tabla siguiente.

Naturaleza de la energía	Valor medio (MeV)
❖ Energía cinética de los fragmentos de fisión	165
❖ Energía cinética total de los neutrones de fisión	5
❖ Energía de la radiación gamma inmediata	6
❖ Energía de las partículas beta emitidas por	6
	5

⁶ Son aquellos neutrones que van perdiendo energía por colisiones elásticas con los núcleos del medio llegan a estar en equilibrio termodinámico con ellos. La energía y, por tanto, la velocidad de los neutrones térmicos depende de la temperatura del medio en el que se mueven. Para una temperatura de 20 ° C (T=293,15 K) la velocidad de los neutrones es de 2.200 metros por segundo y su energía 0,025 eV; para medios con mayores temperaturas la energía va creciendo hasta valores del orden de 0,04 eV.

Naturaleza de la energía	Valor medio (MeV)
los productos de fisión ❖ Energía de la radiación gamma emitida por los productos de fisión ❖ Energía de los neutrinos emitidos por los productos de fisión	11
Energía total	198 MeV

Esta energía y el hecho de que en cada reacción de fisión térmica es liberado un número de neutrones ν (una media de 2,5 para el uranio-235 y 2,9 para el plutonio-239) hace que sean posible las denominadas *reacciones en cadena* en las que la multiplicación de las reacciones, y por ende, de la energía crece de forma divergente (fundamento de las bombas atómicas); si los neutrones en exceso producidos en cada reacción de fisión son absorbidos por un material adecuado, de modo que quede sólo uno disponible por cada fisión para provocar una nueva reacción de fisión, se tendrá una *reacción nuclear auto mantenida* que es el tipo de reacción que se aprovecha para la producción de energía en un reactor nuclear.

Hay que señalar que no sólo son posibles reacciones de fisión, sino también de captura radiactiva. Por tanto, para obtener el número de neutrones producidos por la absorción de un neutrón térmico, η , el valor ν debe ser multiplicado por la relación ente la sección eficaz de captura de neutrones térmicos y la sección eficaz total de absorción de neutrones térmicos. Los valores resultantes de η son 2,1 para uranio-235; 1,3 para uranio normal y 2,1 para plutonio-239⁷.

El proceso de fisión ocurre de muchas formas diferentes, dando un amplio número de productos de fisión que van desde $Z = 30$ a $Z = 65$ y desde $A = 72$ a $A = 161$, en lo que se refiere a la fisión térmica del uranio-235. El modo más probable de fisión térmica no es la ruptura en dos fragmentos iguales, los máximos rendimientos (figura 16) ocurren para $A = 95$ y $A = 138$. La curva es esencialmente simétrica alrededor de un valor mínimo de $A=233,5/2$ donde la probabilidad es del orden de 0,04%. La asimetría en la fragmentación del núcleo compuesto disminuye a medida que aumenta la energía del neutrón (figura 16).

Cada uno de los productos de fisión, que son radiactivos, sufre un proceso de desintegración dando otro radio-nucleido, generalmente también radiactivo, el cual, a su vez, vuelve a desintegrarse, produciéndose de esta manera *cadena de fisión* (cadenas isóbaricas, es decir, en las que se mantiene la masa atómica) hasta que se llega a un nucleido estable que es el final de la cadena. Las cadenas de fisión, ya que los núcleos tienen exceso de neutrones, avanzan a través de desintegraciones beta. No se han encontrado núcleos con defecto de neutrones pero si núcleos denominados *blindados* (shielding nuclides) que son isóbaros estables con una unidad menos de Z

⁷ Estos valores están tomados de la referencia 3, en otras publicaciones pueden aparecer valores ligeramente diferentes.

pero que no se forman como productos de una cadena de fisión, por lo que presumiblemente se forman de manera directa como producto de fisión primario.

❖ **Distribución de cargas**

La hipótesis que parece ajustarse más a la mayoría de los datos es la de *igualdad en el desplazamiento de cargas*. Así si denotamos como Z_A el valor de Z correspondiente a la mayor energía de enlace de un A dado y como Z_p la carga más probable para un producto de fisión primario de un fragmento de fisión de número másico A , la teoría de igualdad en el desplazamiento de cargas establece que los dos fragmentos de fisión complementarios tienen igual $Z_A - Z_p$ y, por tanto, que la probabilidad de distribución alrededor de Z_p es la misma para todos los valores de A . Los valores que pueden calcularse (véase Cap.10 de la ref. 3) para $Z_A - Z_p$ varían desde 3,0 para los productos de fisión más ligeros y más pesados hasta alrededor de 4,0 en el entorno de $A = 105$. La distribución del rendimiento isobárico alrededor de Z_p aparece ser de tipo gaussiano. El postulado de una distribución universal en Z para todos los valores de A se deriva de los experimentos pero aún no tiene una explicación teórica.

❖ **Distribución de masas**

El rendimiento de cada cadena isobárica aparece en la Figura 16. Similares curvas son las que describen la fisión térmica del plutonio-239 con algunas diferencias; en este caso el mínimo no es tan bajo como para el uranio-235, sino que el rendimiento para $A = 119$ es alrededor del 0,04%. El pico máximo más pesado está apreciablemente más desplazado, pero el pico más ligero tiene su máximo alrededor de $A = 99$.

4.3.2.9. Reacción de fusión

Las reacciones de fusión consisten en la unión de un núcleo ligero con una partícula cargada para dar como resultado un átomo "suma". Son las reacciones que tienen lugar de forma natural en las estrellas. También son reacciones con enormes desprendimientos de energía pero para que se produzcan tales reacciones deben darse unas condiciones muy determinadas. (Para más detalle véase el tema del primer ejercicio D.7).

4.3.2.10. Reacciones de alta energía

Las reacciones nucleares de alta energía se producen en el rango de 40 a 100 **MeV** o energías superiores. En esta región de energía el modelo del núcleo compuesto está cuestionado para las reacciones entre 40 y 100 **MeV** y no resulta aplicable a energías superiores a 100 **MeV**, donde las reacciones parecen ocurrir de acuerdo con el modelo de interacción directa.

En la Figura 17 se aprecia que para protones del orden de 40 **MeV**, cuando las reacciones ocurren de acuerdo al modelo del núcleo compuesto con una

energía de excitación dada, casi todas las reacciones conducen a nucleidos de número másico entre 206 y 208. A 400 **MeV** se produce una amplia distribución de productos que se agrupan en dos picos, el primero alrededor de **A = 150** (son productos de estalación, ver más adelante) y los que tienen **A** entre 60 y 140 que pueden definirse como productos de fisión. A 4.000 **MeV** existe una distribución continua de productos no existiendo diferencia evidente entre los resultado de reacciones de espallación y de fisión. Hay evidencia de que la curva no cambia mucho cuando la energía de los protones incidentes se eleva a 30.000 **MeV**.

❖ **Cascadas intranucleares**

R. Serber para la explicación de este fenómeno señala que la energía del protón incidente es significativamente mayor que la energía de interacción entre los nucleones y que su longitud de onda es menor que la distancia entre tales nucleones. Por lo que el protón puede incidir sobre un nucleón dentro del núcleo. En este caso la sección eficaz de cada colisión ocurre en un “espacio libre” más que en el interior de un núcleo complejo.

Así, en la figura 18 puede apreciarse que un protón que incide sobre un núcleo complejo al incidir sobre un nucleón individual aún conserva suficiente energía para seguir produciendo una serie de colisiones “en cascada”. A energías superiores a 350 **MeV** las cascadas pueden incluir también pi-mesones que pueden ser creados en colisiones entre nucleones.

Así se ha llegado a pensar que las reacciones a alta energía ocurren en dos etapas:

- a) primero, se produce una cascada intranuclear en la que varias partículas son expulsadas directamente del núcleo en un tiempo del orden de 10^{-22} segundos, dejando al núcleo resultante de la cascada en un estado excitado
- b) el núcleo excitado resultante se des-excita a través, al menos de dos vías:
 - a. Puede “evaporar” nucleones o grupos de nucleones de forma similar a como lo haría un núcleo compuesto. El producto formado de esta manera se denomina *producto de espalación*
 - b. puede fracturarse el núcleo en piezas iguales de manera análoga a la del proceso de fisión

❖ **Productos de espalación (spallation products)**

Con energías del orden de los 30 **GeV** las reacciones nucleares que se producen son muy complejas en las que se emiten un número variable de nucleones o grupos de ellos, dejando un núcleo de números másico y atómico bastante inferiores a los del primitivo. Los rendimientos más altos se dan en núcleos finales relativamente próximos al bombardeado con valores menores en el número másico entre 10 a 20.

4.3.3. Producción de radisótopos artificiales en reactores nucleares o fuentes de neutrones y en aceleradores (véase el tema D.7. del primer ejercicio para completar este aspecto).

Los radisótopos más utilizados con fines médicos, industriales, medio ambiental, etc. son, además de los producidos como subproductos de las reacciones de fusión en reactores nucleares, los que se producen bombardeando determinados núcleos “blanco” (“target”) con neutrones (bien en un reactor de investigación o un dispositivo generador de neutrones) o bien con partículas cargadas aceleradas mediante el empleo de *aceleradores de partículas*.

5. RADIATIVIDAD (véase el tema B.2. para completar este aspecto en cuanto a la desintegración radiactiva)

La causa de la radiactividad es, como se ha dicho antes, que existen nucleidos (con valores de N/Z fuera de la línea de estabilidad) que tienen estados “excitados” inestables que tienden a pasar a un nivel estable mediante un proceso que se denomina *desintegración radiactiva* o proceso radiactivo. El resultado del proceso es la emisión de la energía sobrante en forma de partículas o radiaciones, es decir, la desintegración de los nucleidos inestables produce radiactividad (actividad). Por consiguiente, desintegración radiactiva es un proceso nuclear que produce como resultado una propiedad que es la radiactividad.

El universo que nos rodea contiene tanto nucleidos estables como inestables y la radiactividad producida de forma espontánea por la naturaleza se denomina *radiactividad natural*.

También puede producirse ese proceso de forma artificial, por la creación, mediante reacciones nucleares, de nucleidos radiactivos artificiales o rayos X. Es la denominada *radiactividad artificial*.

La radiactividad (natural o artificial) puede darse en forma de partículas o de radiación electromagnética. Las partículas emitidas con mayor frecuencia son la alfa (núcleos de helio-4), la beta (electrones o positrones) y el neutrón; el deuterón y otro tipo de partículas son consecuencia de reacciones a mayores niveles de energía. La radiación electromagnética son los fotones gamma y los rayos X.

5.1. Radiactividad natural (véase el tema D.7. del primer ejercicio para completar este tema)

Los elementos químicos son el resultado de reacciones de fusión que se producen en las estrellas, mediante un proceso denominado *núcleo síntesis*. Estos nucleidos producidos son tanto estables como inestables, por lo que la radiactividad es un fenómeno natural desde el principio del universo.

En general, las fuentes de radiación natural se agrupan en tres grandes apartados:

- ❖ Radiación cósmica, que es la que llega a la tierra procedente, fundamentalmente, del sol aunque también del resto del universo.
- ❖ Radiación procedente de nucleidos radiactivos de larga vida que persisten en la tierra desde su creación (*nucleidos primordiales*). Los más importantes son los que están agrupados en tres series radiactivas naturales: las del uranio-238 (serie $4n+2$), torio-232 (serie $4n+3$), y Uranio-235 (serie $4n$). En las Figuras 19, 20 y 21 se presentan estas tres series radiactivas naturales. También existen otros nucleidos de vida media del orden de 10^9 años o superior; son los que aparecen en la tabla que se inserta en la figura 21. Se tiene constancia de que en la tierra existieron los denominados *radio-nucleidos extintos* que, por su menor vida media no existen actualmente de forma natural. Se ha discutido mucho si existió en el origen de la tierra la serie radiactiva natural del neptunio-237 ($4n+1$), ya que el radionucleido de mayor vida media es el torio-229 de 7.340 años; no obstante, la serie es bien conocida por las investigaciones realizadas y se incluye como figura 22. Otro ejemplo de elemento extinto es el caso del tecnecio (cuyo nombre significa descubierto por la técnica) que no existe de manera natural ya que todos sus isótopos son radiactivos y el vida más larga es el Tc-98 de $4,2 \cdot 10^6$ años por lo que se ha consumido por desintegración desde el momento de la constitución del planeta.
- ❖ Nucleidos radiactivos que se forman de manera continuada en la atmósfera como subproductos de la interacción de la radiación cósmica con nucleidos estables naturales; son los nucleidos cosmogénicos y los más importantes son el hidrógeno-3 y el carbono-14.

Para ver más detalles de la radiación natural, tomar como referencia el tema D.7 del primer ejercicio.

5.2. Radiactividad artificial (lo que sigue es complementario de lo incluido en el tema D.7 del primer ejercicio)

La radiactividad artificial, como ya se ha dicho, procede de nucleidos radiactivos creados mediante reacciones nucleares bombardeando núcleos estables con neutrones (en un reactor nuclear u otro tipo de fuentes de neutrones), con partículas cargadas aceleradas (en aceleradores de partículas) o con reacciones con fotones de alta energía (generados usualmente en aceleradores de partículas).

5.2.1. Producción de radionucleidos por irradiación neutrónica

Para la producción de radionucleidos en reactores puede recurrirse a dos vías:

- ❖ Separar los productos de fisión producidos en las reacciones nucleares que tienen lugar en el uranio contenido en los elementos combustibles de un reactor nuclear de potencia. Esta separación es factible si el combustible irradiado es sometido a un proceso de reciclado⁸ (también denominado *reprocesado del combustible*) para la recuperación de uranio o plutonio. El inconveniente principal de este método es la elevadísima actividad que debe manejarse y la complejidad,

⁸ No existen en España instalaciones de este tipo.

tanto en la composición química como isotópica, de los productos de fisión resultantes.

- ❖ Utilizar reactores experimentales diseñados específicamente, con potencia baja, pero con facilidades para introducir en diferentes tipos de dispositivos muestras que queden sometidos a flujos neutrónicos conocidos durante periodos de tiempo suficientes para inducir la producción de la actividad de producto resultante requerida.⁹ En este caso la recuperación del material radiactivo deseado es químicamente más fácil y supone el manejo de niveles de actividad mucho más bajos. Los dispositivos más utilizados en un reactor experimental, tipo piscina, para la producción de isótopos son los cestos de irradiación, los tubos verticales y los tubos de transporte neumático. Todos ellos permiten aproximar el material blanco al núcleo del reactor.

La utilización de otras fuentes de neutrones, por el bajo flujo de neutrones que producen, sólo es útil con fines de investigación.

Como consecuencia de lo expresado en las dos notas a pie de página, todos los radionucleidos que se utilizan con fines médicos, industriales o de cualquier tipo en nuestro país son importados de países en los que sí existen este tipo de instalaciones.

5.2.2. Producción de radionucleidos en aceleradores

Los aceleradores de partículas constan, fundamentalmente de las siguientes partes:

- ❖ Una fuente generadora de iones
- ❖ Un dispositivo mediante el cual estos iones son acelerados al ser sometidos a sucesivas diferencias de potencial cada vez más elevadas
- ❖ Un dispositivo que “recoge” los iones acelerados y los hace incidir sobre el material blanco seleccionado.

El desarrollo de las máquinas de aceleración de partículas está íntimamente relacionado con el progreso de la física nuclear, de la tecnología y de la ingeniería mecánica y eléctrica.

Las partículas cargadas pueden acelerarse aplicando una diferencia de potencial estable entre un manantial de las mismas y un electrodo adecuado. Este es el fundamento de la máquina de Cockcroft-Walton con la que se obtienen energías de aceleración moderadas.

Para aumentar la probabilidad de las transmutaciones (reacciones) nucleares y los rendimientos de producción de radisótopos, es necesario disponer de partículas cargadas de mayor y más homogénea energía, de trayectorias paralelas, en cantidades adecuadas y de forma que el haz vaya acompañado de la menor cantidad posible de radiación parásita. Todas estas exigencias pueden satisfacerse combinando un generador electrostático, o la máquina de Cockcroft-Walton, con un

⁹ Tampoco existen en España reactores nucleares de este tipo en activo; todos los que han existido en el pasado se encuentran en fase de desmantelamiento.

tubo acelerador, con la ventaja de que el dispositivo puede usarse lo mismo para acelerar electrones que partículas cargadas positivamente.

Otro tipo de acelerador es el generador electrostático de Van der Graaf en el que el alto potencial se va generando y manteniendo en una esfera conductora por la transferencia continua de cargas estáticas que se mueven por una cinta transportadora desde la fuente de voltaje a la esfera.

Sin embargo, las máquinas mencionadas se basan en el empleo de tensiones elevadas, por lo que están sujetas a ciertas limitaciones prácticas, creadas por problemas de aislamiento y por la aparición de descargas y esto tanto más cuanto mayor es la tensión requerida.

Para obviar estos inconvenientes, se diseñó el *acelerador de resonancia magnética uniforme o ciclotrón* cuya descripción aparece en el tema D.7 del primer ejercicio. En él las partículas a acelerar, además de someterse a una diferencia de potencial, se encuentran sometidas a un campo magnético resonante, describiendo trayectorias circulares.

Para compensar el incremento relativista de la masa con la velocidad, puede aumentarse el campo magnético, fundamento del *sincrotrón* o variar la frecuencia del campo eléctrico, método en el que se basa el *ciclotrón de frecuencia modulada o sincrociclotrón*. También, en la sucesiva mejora, con vistas a obtener partículas con energía cada vez más elevada, a unos costes y a un nivel de complejidad de la máquina aceptable, se ha diseñado el *sincrotrón de gradiente alternante*, en el que, mejorando el sistema de enfoque de los iones, se reduce notablemente el tamaño de las cámaras y del electroimán, llegándose a alcanzar energías de 30 **BeV** (1 **BeV** = 1.000 **MeV**).

Los aceleradores lineales se basan en el empleo de tubos de deriva de longitudes crecientes, separados por pequeños huecos de separación y conectados, alternativamente, a los terminales de un oscilador, de forma tal que cuando la partícula abandona cada tubo es acelerada hacia el siguiente, en ese momento, de carga opuesta. También pueden utilizarse los *betatrones* o sincrotrón de electrones.

Para completar, si se desea este tema ver el Cáp. 8 de la ref. 2 y Cáp. 11 de la ref. 3.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Las radiaciones ionizantes. Su utilización y riesgos. Institut de Techniques Energétiques. Xavier Ortega Aramburu y Jaume Jorba Bilbal ed. Ediciones UPC. 1994.
2. Física Nuclear. W.E. Burcham. Editorial Reverté. 1974.
3. Nuclear and radiochemistry. G. Friedlander, J. W. Kennedy, J. M. Miller. John Wiley & Sons. 1987.
4. Nuclear Power and its environmental effects. S. Glasstone y W.H. Jordan. American Nuclear Society. 1980.

FIGURAS DE ACOMPAÑAMIENTO DE ESTE TEMA

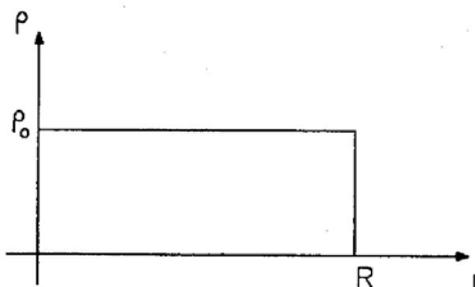


Figura 1. Densidad de nucleones en el caso de que se considere el núcleo esférico y de densidad constante (R es el radio nuclear y ρ_0 la densidad).

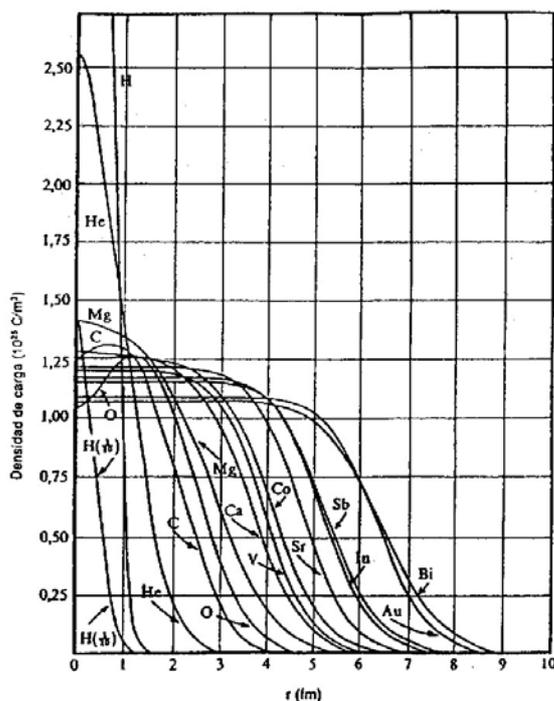


Figura 2. Densidad de carga de algunos núcleos. Los núcleos ligeros presentan grandes efectos de superficie. En Primera aproximación el radio de carga varía como $R_0 \cdot A^{1/3}$. R_0 es una constante que depende del método utilizado y es 1,4 fm cuando se usan métodos que determinan las dimensiones de la región en la que actúan las fuerzas nucleares (dispersión de partículas cargadas, α , p, d) o neutrones en el núcleo. R_0 es 1,2 fm cuando se usan métodos que determinan las dimensiones de la región en la que las cargas positivas están localizadas (dispersión de electrones de alta energía)

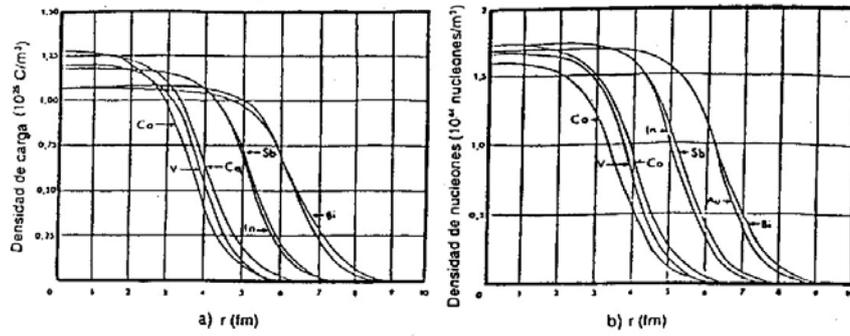


Figura 3. Densidades de carga a) y de nucleones b) deducidas de las experiencias de dispersión de electrones de altas temperaturas

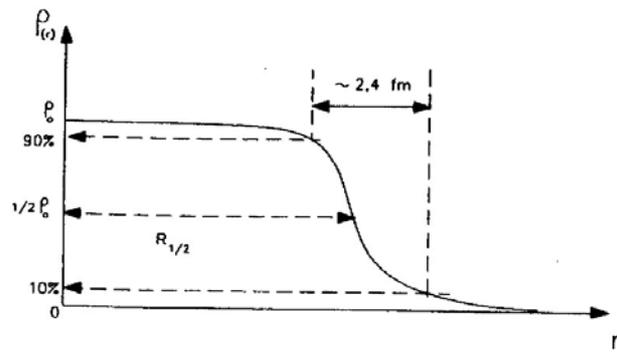


Figura 4. Distribución de la densidad nuclear en función de la distancia al centro del núcleo

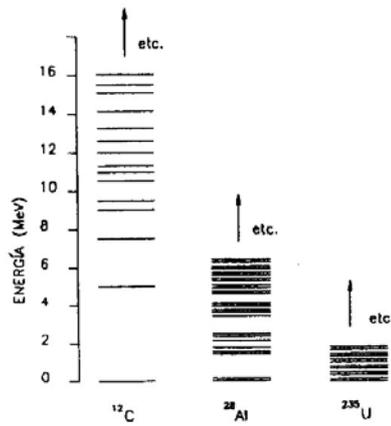


Figura 5. Los niveles de energía de los núcleos de Carbono-12, aluminio-28 y uranio-235

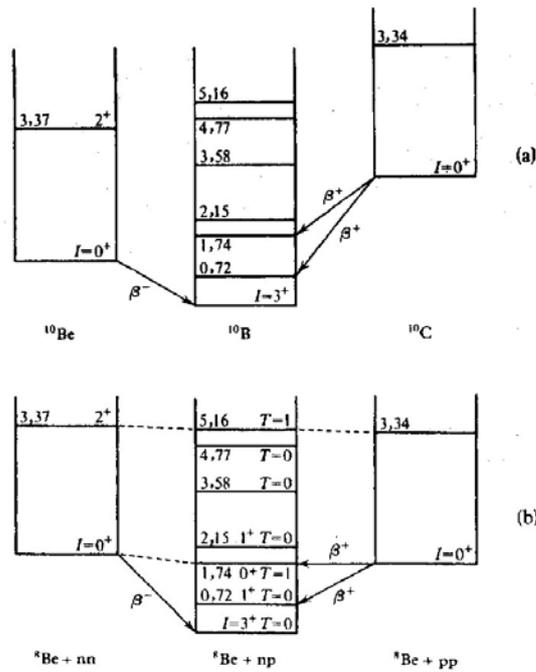


Figura 6. Niveles energéticos de baja excitación de los isóbaros de $A = 10$. Las energías medias vienen dadas en MeV y los spins y paridades se representan por los símbolos 0^+ , 1^+ , etc. A) masas de los núcleos sin corregir; b) masas nucleares corregidas por energía de Coulomb y por diferencia entre las masas del neutrón y del protón; observese los diferentes niveles isobáricos,

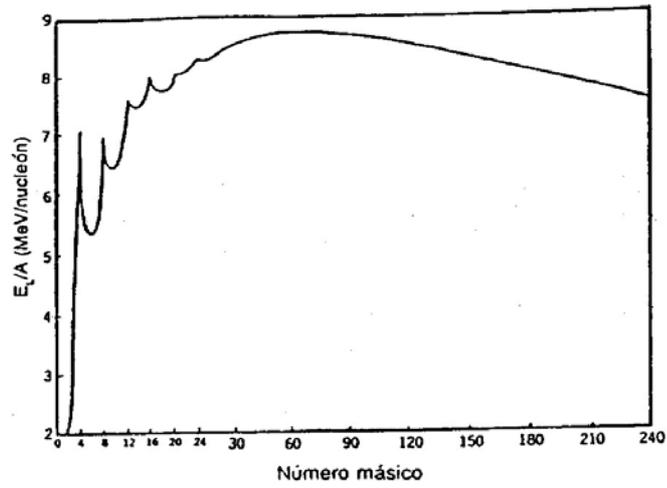


Figura 7. Representación aproximada de la energía de enlace media por nucleón en función del número másico. Pueden apreciarse los picos de estabilidad correspondiente a los números mágicos.

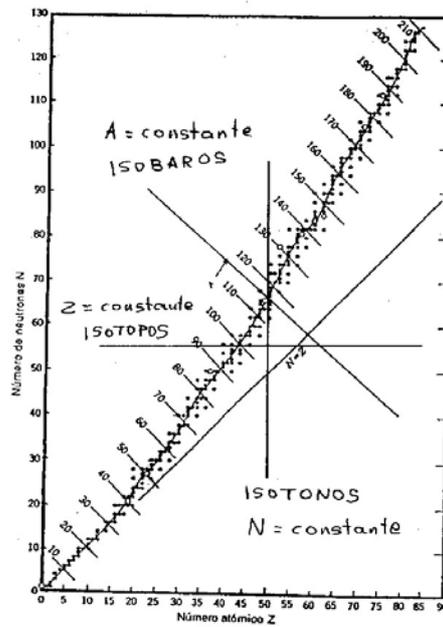


Figura 8. La franja de estabilidad. Los puntos representan los nucleidos estables y los círculos nucleidos radiactivos situados en la franja de estabilidad.

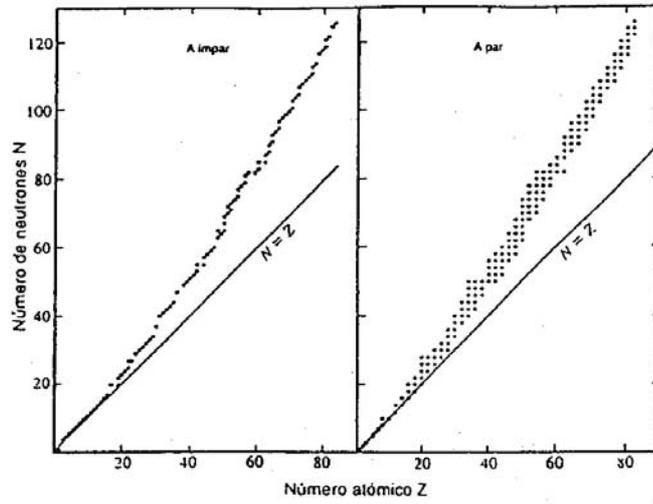


Figura 9. Número de neutrones en función del número de protones. Los nucleidos de A impar están representados en el gráfico de la izquierda y los de A par en la derecha.

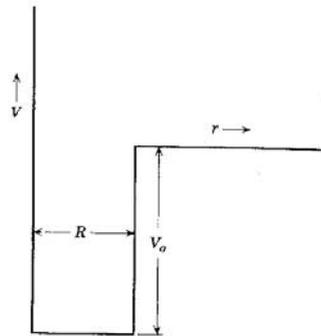


Figura 10. Diagrama esquemático del modelo óptico de pozo cuadrado para la energía potencial del núcleo. R es el radio del núcleo y r el radio del átomo.

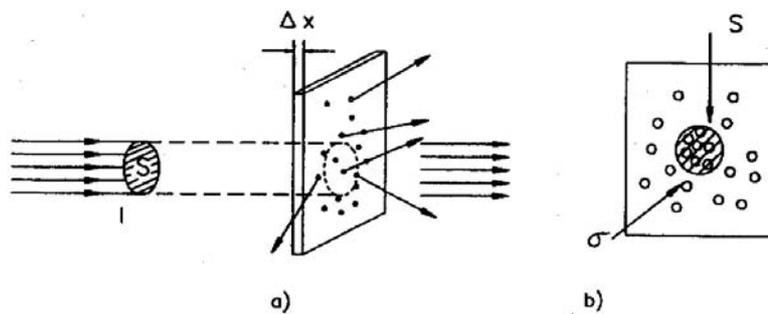


Figura 11. a) Representación esquemática de la interacción entre partículas y nucleidos. B) interpretación geométrica de la sección eficaz microscópica.

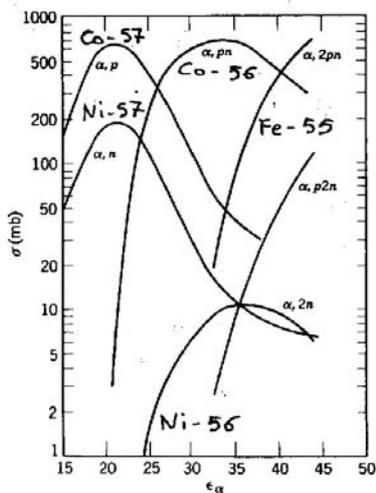


Figura 12. Funciones de excitación para diversas reacciones entre partículas alfa y el núcleo del hierro-54. La ordenada es la sección eficaz en unidades de milibarns y la abcisa es la energía cinética de la partícula alfa. Resultados experimentales en medidas de laboratorio.

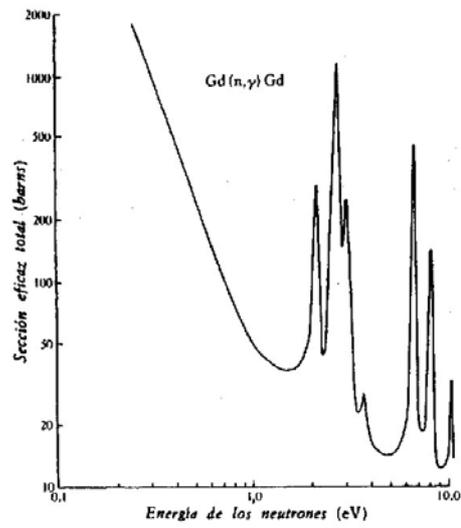


Figura 13. Sección eficaz para la interacción de neutrones lentos con gadolinio

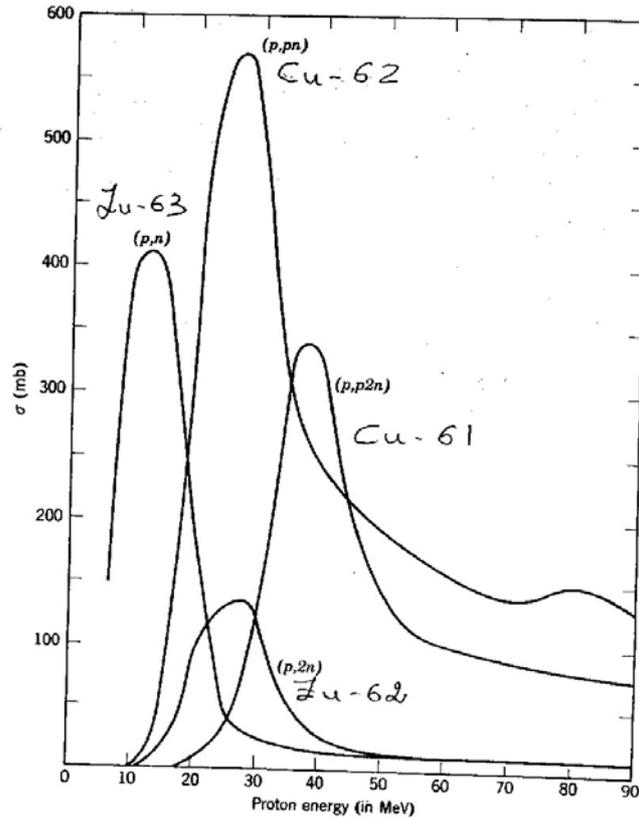


Figura 14. Funciones de excitación para reacciones producidas por protones sobre cobre-63)

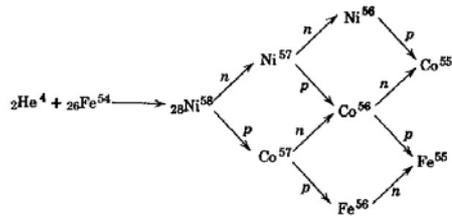


Figura 15. Esquema nuclear de las reacciones que se observan al bombardear Hierro-54 con partículas alfa en la región de reacciones de energía media.

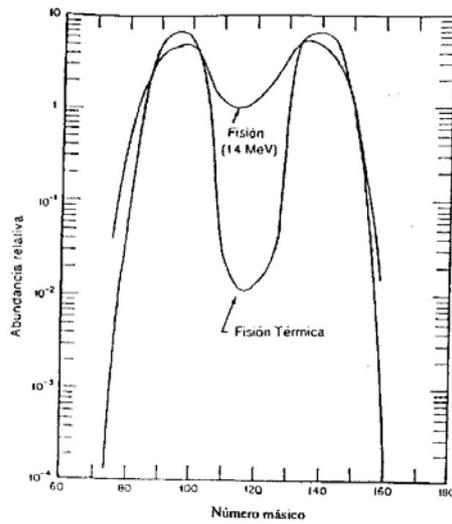


Figura 16. Rendimientos (yield) de las cadenas de fisión como función del número másico para fisión de uranio-235 con neutrones lentos.

U	U^{238}, U_I (uranium I) 4.51×10^9 years		U^{234}, U_{II} (uranium II) 2.48×10^5 years			
Pa		α	P_a^{234}, UX_2 (99.85%) 1.18 minutes	β		
91		β	P_a^{234}, UZ 6.7 hours	α		
Th	Th^{234}, UX_1 (uranium X ₁) 24.1 days		Th^{230}, Io (ionium) 7.52×10^4 years			
Ac						
89						
Ra			Ra^{226}, Ra (radium) 1622 years			
88						
Fr						
87						
Rn			Rn^{222}, Rn (radon) 3.825 days			
86						
At				At^{218} 1.3 seconds		
85						
Po			Po^{218}, RaA (radium A) 3.05 minutes	β	Po^{214}, RaC' (radium C') 1.6×10^{-4} second	Po^{210}, RaF (polonium) 138.4 days
84				α		
Bi			Bi^{214}, RaC (radium C) 19.7 minutes	β	Bi^{210}, RaE (radium E) 5.01 days	
83			α (99.98%)	α		
Pb			Pb^{214}, RaB (radium B) 26.8 minutes	β	Pb^{210}, RaD (radium D) 22 years	Pb^{206}, RaG (stable lead isotope)
82				α (0.04%)	α ($5 \times 10^{-5}\%$)	
Tl			Tl^{210}, RaC'' (radium C'') 1.32 minutes	β	Tl^{206}, RaE'' (radium E'') 4.3 minutes	
81				α ($1.8 \times 10^{-6}\%$)		
Hg					Hg^{206} 8.5 minutes	
80						

Figura 19. Serie radiactiva natural del uranio-238 (tomada de la ref. 3). Se incluyen entre paréntesis las denominaciones dadas a los correspondientes nucleidos cuando fueron descubiertos, en los primeros años de investigación en este tema.

90	Th	Th^{232} , Th (thorium) 1.39×10^{10} years		Th^{230} , RaTh (radiothorium) 1.90 years	
89	Ac		Ac^{228} , MsTh ₂ (mesothorium 2) 6.13 hours		
88	Ra	Ra^{226} , MsTh ₁ (mesothorium 1) 6.7 years		Ra^{224} , ThX (thorium X) 3.64 days	
87	Fr				
86	Rn			Rn^{220} , Th (thoron) 54.5 seconds	
85	At				
84	Po			Po^{216} , ThA (thorium A) 0.158 second	Po^{212} , ThC' (thorium C') 3.0×10^{-7} second
83	Bi			Bi^{212} , ThC (thorium C) 60.6 minutes	
82	Pb			Pb^{212} , ThB (thorium B) 10.6 hours	Pb^{208} , ThD (stable lead isotope)
81	Tl				Tl^{208} , ThC" (thorium C'') 3.1 minutes

Figura 20. Serie radiactiva natural del torio-232 (tomada de la ref. 3). Se incluyen entre paréntesis las denominaciones dadas a los correspondientes nucleidos cuando fueron descubiertos, en los primeros años de investigación en este tema.

U	U^{235} , AcU (actinouranium) 7.13×10^8 years			
Pa		Pa^{231} , Pa (protactinium) 3.48×10^4 years		
Th	Th^{231} , UY (uranium Y) 25.6 hours		Th^{227} , RdAc (radioactinium) 18.17 days	
Ac		Ac^{227} , Ac (actinium) 22.0 years		
Ra			Ra^{223} , AcX (actinium X) 11.7 days	
Fr		Fr^{223} , AcK (actinium K) 22 minutes		
Rn			Rn^{219} , An (actinon) 3.92 seconds	
At		At^{219} 0.9 minute		At^{218} 10^{-4} second
Po			Po^{215} , AcA (actinium A) 1.83×10^{-3} second	Po^{211} , AcC' (actinium C') 0.52 second
Bi		Bi^{216} 8 minutes	Bi^{211} , AcC (actinium C) 2.15 minutes	
Pb			Pb^{211} , AcB (actinium B) 36.1 minutes	Pb^{207} , AcD (stable lead isotope)
Tl			Tl^{207} , AcC'' (actinium C'') 4.79 minutes	

Figura 21. Serie radiactiva natural del uranio-235 (tomada de la ref. 3). Se incluyen entre paréntesis las denominaciones dadas a los correspondientes nucleidos cuando fueron descubiertos, en los primeros años de investigación en este tema.

Active Substance	Type of Disintegration	Half-Life (Years)	Per Cent Isotopic Abundance	Stable Disintegration Products
K ⁴⁰	β , EC*	1.27×10^9	0.012	Ca ⁴⁰ , Ar ⁴⁰
V ⁵⁰	β , EC*	6×10^{15}	0.24	Cr ⁵⁰ , Ti ⁵⁰
× Rb ⁸⁷	β	5.7×10^{10}	27.8	Sr ⁸⁷
× In ¹¹⁵	β	5×10^{14}	95.7	Sn ¹¹⁵
Te ¹²³	EC*	1.2×10^{13}	0.87	Sb ¹²³
La ¹³⁸	EC, * β	1.1×10^{11}	0.089	Ba ¹³⁸ , Ce ¹³⁸
Ce ¹⁴²	α	$\cong 5 \times 10^{15}$	11.07	Ba ¹³⁸
× Nd ¹⁴⁴	α	2.4×10^{15}	23.85	Ce ¹⁴⁰
× Sm ¹⁴⁷	α	1.1×10^{11}	14.97	Nd ¹⁴³
Gd ¹⁵²	α	1.1×10^{14}	0.20	Sm ¹⁴⁸
Lu ¹⁷⁶	β	3×10^{10}	2.59	Hf ¹⁷⁶
Hf ¹⁷⁴	α	2×10^{15}	0.18	Yb ¹⁷⁰
× Re ¹⁸⁷	β	6×10^{10}	62.9	Os ¹⁸⁷
Pt ¹⁹⁰	α	7×10^{11}	0.013	Os ¹⁸⁶

Figura 21. Otros nucleidos radiactivos que existen de forma natural. El símbolo EC significa captura electrónica (véase tema B.2. del primer ejercicio)

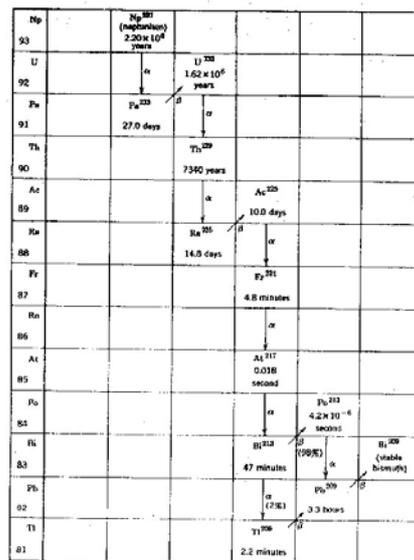


Figura 23. La serie 4n + 1 (serie del neptunio-237)