

3

REACCIONES NUCLEARES



IDEAS PRINCIPALES

- Reacciones nucleares
- Radiactividad artificial
- Fisión nuclear
- Reacción en cadena
- Masa crítica
- Reactor nuclear
- Residuos radiactivos
- Fusión nuclear
- Nucleosíntesis
- Partículas elementales
- Interacciones fundamentales

Las reacciones provocadas por el hombre permitieron descubrir la radiactividad artificial y tener fuentes de neutrones, con las que bombardear núcleos. Se obtuvieron núcleos más pesados que el uranio y se descubrió la fisión nuclear. En su camino hacia la comprensión de la naturaleza se ha pasado de las partículas fundamentales, neutrón, protón, etc. a las elementales, quarks, leptones, y el modelo estandar para explicar las relaciones entre ellas. Todo esto ha dado paso a lo que se ha dado en llamar la «gran ciencia» con grandes proyectos como los aceleradores de partículas como el CERN, etc. Pero también se han cometido grandes tropelías utilizando estos conocimientos: no debemos olvidar nunca que se han utilizado las bombas atómicas con su enorme capacidad de destrucción, y que se está generando el problema de los residuos nucleares que afectará a las generaciones futuras.

El conocimiento de la estructura de la materia ha tenido durante el siglo XX un desarrollo impresionante, profundizando en la teoría atómica hasta alcanzar el nivel de los núcleos atómicos. Al conocimiento científico se ha unido casi de inmediato la aplicación técnica, para usos militares, industriales o en medicina, lo que ha llevado a la ciencia a ocupar un papel protagonista en las sociedades desarrolladas. Sin embargo, no todo son aspectos positivos y el desarrollo ha venido acompañado de negros nubarrones: bombas atómicas, residuos radiactivos, etc., que exigen un gran debate y toma de postura por parte de todos los ciudadanos sobre estos temas.

Sirvan las palabras que siguen, pronunciadas por Joliot* en 1950, como recuerdo de la responsabilidad de los científicos:

... La admirable serie de descubrimientos científicos iniciados a principios del siglo XX por Henri Becquerel, Pierre y Marie Curie da como resultado que la especie humana ve cernirse sobre ella la amenaza de destrucción por la bomba de hidrógeno. Esto constituye una advertencia grave para todos y especialmente para los científicos...

... Los científicos no deben permitir que una mala organización social deje que los resultados de sus trabajos se utilicen para fines egoístas o nocivos. Los científicos y los técnicos no forman parte de una pequeña elite desligada de las contingencias prácticas. Deben, como ciudadanos de la gran comunidad de los trabajadores, militar con éstos para asegurar una plena utilización de la ciencia con vistas a la paz y el bienestar de los hombres.

* Frédéric Joliot (1900-1958) científico francés obtuvo el premio Nobel de física por el descubrimiento de la radiactividad artificial. El premio Nobel lo obtuvo conjuntamente con Irène Curie, hija de Marie y Pierre Curie, con la que se casó en 1926.



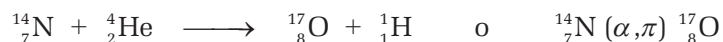
Irène y Frédéric Joliot Curie

1 REACCIONES NUCLEARES

Son aquellas en las que participan los núcleos de los átomos. Los fenómenos radiactivos estudiados en la unidad anterior, así como las reacciones que ocurren en las estrellas, pueden ser considerados ejemplos de reacciones nucleares naturales.

Otras reacciones nucleares son provocadas por el hombre. La primera reacción nuclear la llevó a cabo Rutherford, en 1919, en sus investigaciones sobre cómo estaba constituido el núcleo. Utilizó como proyectil las partículas alfa que emitía una fuente radiactiva de polonio, que bombardeaba nitrógeno. Como resultado observó que se producía oxígeno y protones.

La reacción llevada a cabo por Rutherford se puede escribir:



En las reacciones nucleares, como en cualquier tipo de interacción, se cumplen los principios de conservación de la masa, de la energía total, del momento lineal, del momento angular y de la carga eléctrica, pero además es necesario tener en cuenta la conservación del número de nucleones. Por lo tanto, las ecuaciones que representan las reacciones nucleares deben ajustarse teniendo en cuenta la conservación del número de nucleones y de la carga eléctrica.

Las reacciones nucleares deben acompañarse del correspondiente balance de masa y energía.

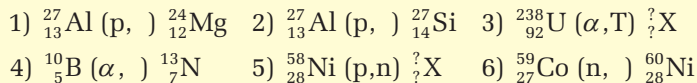
El bombardeo de un núcleo y la posterior emisión de una partícula, se interpreta suponiendo que se produce la absorción de la partícula-proyectil para producir un núcleo inestable que se descompone, en un intervalo de tiempo muy corto, en una serie de productos que pueden ser estables o inestables. Los proyectiles más utilizados tienen poca masa y pueden tener carga eléctrica, como las partículas alfa o los protones, o ser neutros, como los neutrones. Los neutrones, al no tener carga, tienen un gran

poder de penetración, ya que no han de vencer fuerzas eléctricas repulsivas, pero son muy difíciles de acelerar, precisamente por no tener carga.

Las reacciones nucleares no tienen nada que ver con las reacciones químicas.

En las reacciones químicas, las interacciones se producen entre los electrones de los niveles más externos, los átomos no cambian, lo que cambian son las uniones que hay entre los átomos. En las reacciones nucleares, la parte que interviene es el núcleo y como resultado, los átomos se transmutan unos en otros, de tal forma que un átomo de nitrógeno puede convertirse en un átomo de oxígeno, o un átomo de platino en un átomo de oro.

A.1.- a) Completa las siguientes reacciones nucleares:



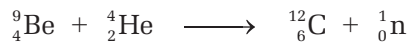
b) Calcula la energía mínima que tiene que tener un fotón para que se lleve a cabo la reacción fotonuclear $\text{Mg-24} (\gamma, n) \text{Mg-23}$.

16,5 MeV

Descubrimiento del neutrón

El modelo de Rutherford de 1911 consideraba que el núcleo estaba compuesto de electrones y protones. En 1920 ya tenía Rutherford la idea de que debería existir una partícula «neutra», formada por un doblete electrón-protón. Pero no tenía muy claro si era una partícula individual o un conjunto de dos partículas. Sin embargo hubo que esperar otros 12 años a que «se descubriera» el neutrón.

Fue Chadwick quien en 1932 interpretó lo que ocurría cuando al berilio se le bombardeaba con partículas alfa*. La ecuación que representa el proceso es:



Chadwick señaló que esa partícula emitida era el protón neutro (es decir, el neutrón) que había propuesto Rutherford.

A continuación estudiaremos otros ejemplos de reacciones nucleares que dieron lugar a fenómenos tan importantes como la radiactividad artificial, la fisión y la fusión nuclear.

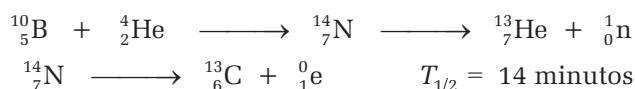
*Resulta curioso que esa reacción empezó a estudiarla Bothe en 1930, y supuso que además de carbono se emitían rayos gamma de mucha energía. Los esposos Joliot-Curie, siguieron estudiando el proceso y observaron que la radiación era capaz de arrancar protones de una muestra de parafina, pero tampoco la interpretaron correctamente.



James Chadwick

2 RADIATIVIDAD ARTIFICIAL

F. Joliot e I. Curie, en 1934, examinando las partículas emitidas por el boro, magnesio y aluminio al ser bombardeados con partículas alfa, advirtieron que los positrones (electrones positivos) producidos, continuaban siendo emitidos después de terminar el bombardeo: se había descubierto así la radiactividad artificial* o inducida. Explicaron el fenómeno admitiendo que el núcleo residual formado en la reacción era inestable y que se desintegraba emitiendo un positrón. El isótopo radiactivo producido tenía un período de semidesintegración característico del elemento en cuestión. La reacción nuclear del boro como blanco es:



* La radiactividad artificial puso de manifiesto que no sólo los núcleos muy pesados podían ser radiactivos, sino que en realidad cualquier átomo podía convertirse en radiactivo.

Además, por primera vez, se producía la transmutación de un átomo en otro. La desgracia era que para conseguir oro, el sueño de los alquimistas, es necesario partir del platino, más caro que el metal dorado.

A.2.- Escribe las reacciones de transmutación del aluminio que al ser bombardeado con partículas α , emite un neutrón y se transforma en fósforo-30, y éste, a su vez, se transforma en silicio-30 emitiendo un positrón.

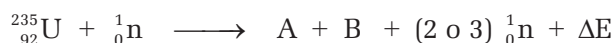
b) Escribe los procesos que ocurren al bombardear magnesio-23 con una partícula alfa, suponiendo que son procesos similares a los anteriores.

Se han obtenido un gran número de isótopos radiactivos artificiales, utilizando diversas partículas como proyectiles y diferentes blancos. Estos isótopos resultan muy útiles, en muchos casos imprescindibles, en un gran número de investigaciones, y tienen numerosas aplicaciones técnicas.

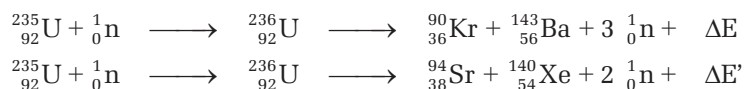
Además, la radiactividad artificial jugó un papel importante en el avance de la física nuclear pues permitió obtener fuentes estables de neutrones, que se podían utilizar como proyectiles. Por ejemplo, Fermi comenzó un estudio sistemático de bombardeo de diferentes elementos con neutrones, lo que permitió «producir» elementos nuevos, incluso de mayor masa que el uranio. Además, dio la posibilidad de acercarnos a un nuevo proceso, la fisión nuclear.

3 REACCIONES DE FISIÓN NUCLEAR

Consisten en la escisión* o ruptura de un núcleo pesado como el uranio (bombardeándolo con neutrones), en dos trozos de masa intermedia mucho más estables (ver gráfica $B/A - A$), liberándose la energía correspondiente al defecto de masa y emitiendo nuevos neutrones capaces de interactuar con otros átomos de uranio originando así una reacción en cadena.



Dos posibles reacciones de fisión del uranio son:



En estas reacciones se producen más neutrones que los que se utilizan para romper el núcleo. Como vemos se utiliza un neutrón para romper el núcleo de uranio y en ese proceso se producen 2 o 3 neutrones. Estos neutrones pueden incidir sobre otros núcleos de uranio produciendo la fisión de los mismos. Vemos que es un proceso que se multiplica y se mantiene a sí mismo; lo llamamos una «reacción en cadena».

Masa crítica es la cantidad mínima de uranio necesaria para que la reacción en cadena pueda tener lugar. Para que la reacción se mantenga los neutrones que se producen deben chocar con otros núcleos; pero algunos neutrones se escapan a través de la superficie sin chocar con otros núcleos, de tal forma que si la masa de uranio es inferior a la crítica, es más fácil que no choquen con otros núcleos antes de escapar, y la reacción no se multiplica.

Una bomba atómica de fisión consiste en un proceso como el descrito en el que no se controla la velocidad con la que ocurre, dando lugar a la liberación de una gran cantidad de energía en muy poco tiempo. De los efectos destructivos de la misma tenemos, por desgracia, evidencia empírica con las explosiones de Hiroshima y de Nagasaki. Además de los efectos de la onda expansiva y térmica está el peligro de la radiación emitida por muchos de los productos de la fisión que son radiactivos.

* La fisión nuclear se observó por primera vez en 1938 cuando se hacían unas experiencias para obtener átomos de número atómico superior al del uranio. Para eso bombardeaban núcleos de uranio con neutrones esperando que fuesen absorbidos por el uranio y así producir un núcleo con mayor número de nucleones; la posterior transformación de un neutrón en un protón y un electrón que sería emitido como partícula beta, haría aumentar el número atómico. De hecho así se obtuvieron varios elementos de $Z > 92$.

Lise Meitner realizaba estos experimentos en Berlín junto con Otto Hahn, que realiza el análisis químico de los productos. Meitner abandonó Berlín debido a la persecución nazi, pero se mantuvo en contacto con Hahn. Cuando éste encontró que entre los productos había átomos de bario, Lise Meitner le confirmó que podía ser, pues sus cálculos demostraban que era posible la ruptura del núcleo de uranio en dos núcleos de menor masa, de masa intermedia.

En 1944 le dieron el premio Nobel a Otto Hahn. Parece una injusticia que el premio Nobel no fuese compartido por Lise Meitner.

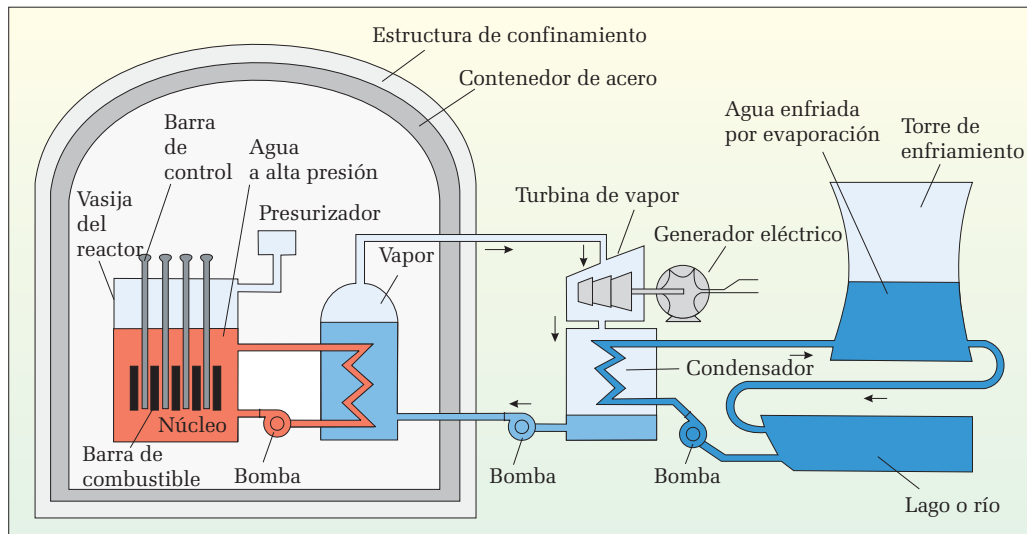
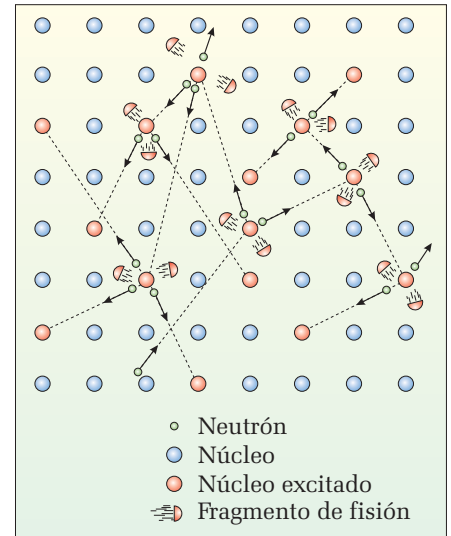
Central nuclear

En los reactores nucleares el proceso anterior ocurre de forma controlada por lo que es posible el aprovechamiento de la energía liberada. Los principales elementos de un reactor nuclear son:

1: Las barras de «**combustible**» que contienen el material de uranio enriquecido en U-235.

2. El **moderador**, sustancia cuya función es disminuir la velocidad de los neutrones, con objeto de que sean más eficaces los golpes con los núcleos de uranio. Se utiliza grafito o agua pesada (en la que el hidrógeno se ha sustituido por deuterio), que son sustancias que no absorben neutrones, sólo sirven para controlar su velocidad.

3. Las **barras de control**, formadas por sustancias como el boro o el cadmio, capaces de absorber los neutrones, evitando de esa manera que la reacción ocurra más rápido de lo que se desea, de forma que introduciendo más barras de control disminuye el número de fisiones/segundo, mientras que sacando barras de control aumenta las fisiones/segundo.



Para poder aprovechar la energía liberada en el proceso de fisión se utilizan dos circuitos de refrigeración, denominados primario y secundario. El circuito primario está lleno de agua a presión (para que el agua continúe en estado líquido aunque su temperatura sea de 300-400°C), que cede su energía al agua del circuito secundario, a la que convierte en vapor de agua a alta presión capaz de mover una turbina, que a su vez hace girar un alternador para que se produzca una corriente eléctrica.

A.3.- a) Calcula la energía liberada en la fisión de un núcleo de U-235 de acuerdo con cada una de las reacciones que hemos propuesto en el texto.

b) Calcula la energía liberada en la fisión de 1 g de U²³⁵ de acuerdo con la primera reacción nuclear propuesta.

a) 174 MeV/núcleo; 130 MeV/núcleo; b) $7,13 \cdot 10^{10}$ J

A.4.- Explica el papel que juega en una central nuclear: el moderador, las barras de control, el refrigerante, el edificio de contención. En una central nuclear, ¿el combustible sufre un proceso de combustión con oxígeno? Explica la respuesta.

EJEMPLO

En un reactor nuclear se produce la fisión del uranio-235. Entre las diferentes procesos posibles consideremos que únicamente ocurre el representado por la ecuación: ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} = {}^{140}_{55}\text{Cs} + {}^{93}_Z\text{Rb} + a {}^1_0\text{n}$

a) Calcule el número atómico, Z , del Rb, y el número de neutrones, a , emitidos en la reacción, indicando las leyes de conservación utilizadas para ello.

b) ¿Qué masa de U-235 se consume por hora en una central nuclear de 800 MWe, si suponemos que de la energía liberada en el proceso nuclear se aprovecha el 40%? $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$; $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

a) El número de protones así como el número de nucleones debe conservarse. Eso permite plantear las ecuaciones: conservación del número de protones: $92 + 0 = 55 + Z + a \cdot 0$; $Z = 92 - 55 = 37$ (número atómico del rubidio)
conservación del número de nucleones: $235 + 1 = 140 + 93 + a \cdot 1$; $a = 236 - 233 = 3$; (se emiten 3 neutrones)

b) 800 MWe quiere decir que la potencia eléctrica de la central es de 800 Mw. En una hora se produce una energía eléctrica de $800 \cdot 10^6 \cdot 3600 = 2,88 \cdot 10^{10} \text{ J}$

Puesto que el rendimiento es del 40%, eso supone que en el proceso nuclear se debe liberar una cantidad de energía nuclear E_n , que cumpla: $0,4 E_n = 2,88 \cdot 10^{10} \text{ J}$. Luego, $E_n = 7,2 \cdot 10^{10} \text{ J}$.

Si el único proceso que ocurre es el descrito, el defecto de masa por cada átomo de uranio que se fisiona será:

$$\Delta m = (m_U + m_n) - (m_{\text{Cs}} + m_{\text{Rb}} + 3 m_n) = 0,188284 \text{ u} = 0,31255 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$
$$\Delta E = \Delta m c^2 = 0,31255 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 2,81 \cdot 10^{-11} \text{ J/átomo}$$

El número de átomos fisionados (N) será tal que la energía total liberada sea igual a la energía de origen nuclear:

$$E_n = 7,2 \cdot 10^{10} \text{ J} = N \cdot 2,81 \cdot 10^{-11} \text{ J/átomo}; N = 2,56 \cdot 10^{21} \text{ átomos.}$$

$$n_{\text{uranio}} = (2,56 \cdot 10^{21}) / (6,02 \cdot 10^{23}) = 0,00425 \text{ mol. Supone una masa de } 0,00425 \cdot 235 = 1 \text{ g de U-235}$$

Aunque es una cantidad muy pequeña de combustible, hay que tener en cuenta que en este tipo de procesos, la cantidad de combustible «gastado» es muy pequeña. De todas formas, puesto que el combustible utilizado tiene una riqueza del 3,5% de uranio-235, cada gramo de uranio-235 supone 28,6 gramos totales de uranio. Eso supondría que necesitaríamos de uranio total 685,7 gramos/día, y por lo tanto, 250 kg/año. En el cálculo hemos hecho otra simplificación que no se corresponde con la realidad, suponer que todo el uranio-235 se fisiona. Realmente se aprovecha sólo una parte del combustible.

Los residuos nucleares

Llamamos residuos nucleares a los que se producen a causa de las reacciones nucleares. Aunque se producen residuos en diferentes procesos, los que más cantidad generan, y además los más peligrosos, son los procesos que ocurren en las centrales nucleares con fines civiles o militares. Los residuos pueden ser de alta, media y baja radiactividad, y por su duración pueden considerarse de corta, media y larga duración. Lógicamente, los más peligrosos, son los de alta actividad y larga duración.

¿Cómo y dónde se producen los residuos? Los residuos se producen a lo largo de todo el tratamiento que se hace con el uranio; desde la separación que se hace en las minas de uranio del mineral que vamos a utilizar, pasando por el proceso de enriquecimiento (en el que se aumenta el porcentaje del U-235 desde el 0,7% en el que se encuentra en la naturaleza hasta el 3,5% que contiene el combustible nuclear) hasta llegar a lo que ocurre en los propios reactores.

Hay tres clases de residuos que se generan en el reactor*:

– La mayor parte del uranio que se utilizó como combustible y actínidos producidos por la captura de un neutrón.

– Productos de fisión, que se han producido al dividirse los núcleos de U-235.

– Productos de activación que se generan por la irradiación de los materiales que forman el reactor o contienen al combustible.

A.5.- a) Según los datos recogidos en la tabla adjunta, señala los 4 elementos que producen mayor cantidad de residuos en un reactor de agua a presión.

b) Entre los residuos aparecen elementos cuyo número másico es superior al del uranio-238. ¿Cómo se originan esos elementos? ¿Cuál es el origen de elementos como el cesio-137 o el paladio-107?

c) Escribe un ejemplo de residuos de vida media corta y otro de residuos de vida media larga. ¿Cuánto Cs-137 quedará dentro de 120 años de los 24,3 kg de residuos producidos? ¿Cuánto Pu-239 quedará dentro de 120 años de los 123 kg producidos.

c) 1,52 kg de Cs-137; aproximadamente 123 kg de Pu-239

¿Qué hacer con los residuos?

No hay una política uniforme en todos los países. Algunos como Francia, Gran Bretaña, Japón y Rusia proceden a un retratamiento de los residuos para recuperar el uranio y el plutonio, mientras que otros, la mayoría, no efectúan esa operación; la razón es que esa operación es muy costosa, y no existe un consenso sobre el beneficio que puede reportar.

Los residuos de baja y media actividad se almacenan en superficie o en sitios poco profundos, como ocurre en el cementerio nuclear de El Cabril. Pero qué hacer con los residuos de alta actividad. Pues hasta el momento, esperar.

Cuando se produce la descarga del combustible es necesario esperar a que se enfríe y a que disminuya la actividad tan grande que tiene debido a los residuos de vida más corta. En las centrales nucleares hay «unas piscinas» en las que se almacena durante un tiempo esos materiales. ¿Y que se hace después? Pues por ahora, seguir esperando, ya que en los años 50 y 60, los residuos originados en complejos militares, se vertían al medio directamente, al menos en algunos países.

La alternativa que hasta ahora se ha considerado mejor es colocar esos residuos, debidamente vitrificados y protegidos, en lo que se llama un Almacenamiento Geológico Profundo (AGP), también llamados repositorios o cementerios nucleares, unas minas con profundidades cercanas a los mil metros, que deben estar en formaciones geológicas muy estables (sal, arcillas o granito), que no hayan sufridos variaciones durante millones de años y que carezca de fallas o fracturas. De lo que se trata es de retrasar tanto la migración de los radionúcleos a la superficie, que cuando lleguen su radiactividad sea tan baja que ya no sea peligrosa. Pero los AGP han chocado con la oposición de los habitantes de las zonas en las que podrían enclavarse. El hecho es que en el año 2000 no hay ninguno en funcionamiento en ningún país del mundo.

Otra alternativa estudiada en los últimos años es la **transmutación** de los residuos. Por transmutación debemos entender procesos en los que se intenta que los residuos absorban neutrones, dando productos de fisión no radiactivos o transformándose en productos estables. Aunque hay resultados «prometedores», las previsiones son que antes de poder pensar en que estuviesen industrialmente disponibles, será necesario un mínimo de 20 años de investigaciones costosas y difíciles. Aunque con este procedimiento no podría eliminarse totalmente la radiactividad de los residuos, se intentaría reducir al mínimo la radiactividad de los residuos de alta actividad y larga duración, que son los más peligrosos.

A.6.- ¿Qué alternativa hay para los residuos? ¿Qué se hace hoy día? ¿En qué consiste la transmutación de los residuos?

* Residuos producidos en una central nuclear de 900 MWe, que utiliza 21500 kg de uranio enriquecido al 3,5%.

Elemento	masa (kg)	$T_{1/2}$ (años)
U-235	22,0	$7,1 \cdot 10^8$
U-236	88,0	$2,3 \cdot 10^7$
U-238	20204,0	$4,5 \cdot 10^9$
Pu-239	123,1	$2,4 \cdot 10^4$
Pu-240	47,5	6570
Np-237	8,8	$2,1 \cdot 10^6$
Am-241	4,4	432,2
Am-243	2,2	7380
Sr-90	10,5	28
Cs-137	24,3	30
Zr-93	15,5	$1,5 \cdot 10^6$
Tc-99	17,7	$2,1 \cdot 10^5$
Pd-107	4,4	$6,5 \cdot 10^6$
I-129	3,9	$1,6 \cdot 10^7$
Cs-135	7,7	$2,0 \cdot 10^6$

* En España, los residuos de alta intensidad se conservan en las mismas plantas que los producen, en piscinas especiales. El Gobierno decidió en 1998 aplazar hasta 2010 la toma de una decisión definitiva, a la espera de que maduren las tecnologías.



Sarcófago para el reactor nuclear de Chernóbil

4

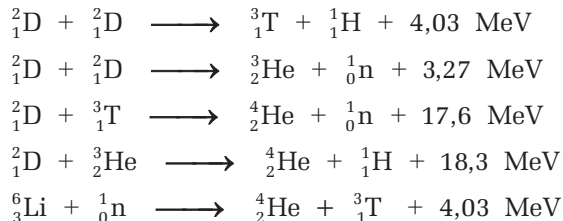
REACCIONES DE FUSIÓN NUCLEAR

Consisten en la aproximación de dos núcleos ligeros hasta una distancia lo suficientemente pequeña para que la fuerza nuclear supere a la fuerza de repulsión eléctrica y se forme un núcleo más pesado y estable, liberándose en este proceso una gran cantidad de energía (obsérvese de nuevo la gráfica $B/A - A$).

La energía solar procede de una reacción de fusión, a partir de cuatro protones y a temperaturas de 10 a 20 millones de grados (por ello, se les llama también a estas reacciones, termonucleares), que esquemáticamente se escribe:



Es muy difícil que ese proceso ocurra directamente ya que exige la colisión simultánea de cuatro núcleos. Existen otras reacciones termonucleares que transcurren más rápidamente y que dependen de un material abundante, el deuterio D, que existe en el agua en una proporción de una parte por 6000 de hidrógeno, siendo posible separar ambos isótopos de manera fácil. En otras participa el tritio (T), isótopo del hidrógeno de número másico 3. Estas reacciones son:



De esas reacciones la que se investiga con mayor interés es la del deuterio con tritio, ya que es la que necesita una temperatura de «ignición menor». Si bien el deuterio es fácil de obtener, no ocurre lo mismo con el tritio, que además es radiactivo con un periodo de 12,4 años. El tritio se obtiene a partir de la última reacción, bombardeando litio con un neutrón.

Conseguir que se fusionen los núcleos es bastante difícil, por lo que se tiene que «calentar» los átomos que van a participar a temperaturas muy altas; en esas condiciones, la materia se encuentra en estado «plasma», separados los electrones de los núcleos. Para que se produzca la ignición se tiene que cumplir:

a) Que la temperatura del plasma sea tan alta que los iones puedan superar la repulsión electromagnética del otro núcleo y conseguir fusionarse.

b) Que la densidad del plasma sea suficientemente alta para que haya un número de choques significativos. Es una condición opuesta a la anterior.

c) Que el tiempo que se mantengan las dos condiciones anteriores sea suficiente.

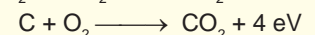
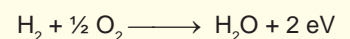
Puesto que esas temperaturas no las pueden soportar los recipientes materiales, lo que se investiga es mantener a ese plasma aplicando potentes campos magnéticos que confinen al plasma en espacios cerrados. Debemos tener en cuenta que una partícula cargada describe un movimiento circular si se mueve en un campo magnético cuya dirección sea perpendicular a la velocidad de la partícula.

Se han realizado bastantes investigaciones que utilizan este sistema. Hay dos tipos de máquinas con las que se ha trabajado. Esas máquinas reciben el nombre de Tokamak y Stellarator, según el método con el que intenten mantener estable el plasma.

Otra línea de investigación, es la **fusión por confinamiento inercial**. Se intenta comprimir un gránulo de combustible, implosionándolo con la ayuda de rayos láser o haces de partículas dirigidas hacia él.

Diferencias energéticas entre procesos nucleares y químicos

Refiriéndonos a 1 molécula:



La ruptura enlace H–H necesita 4 eV, la ionización de un átomo de H: 14 eV

Comparamos con emisión de una partícula alfa de un núcleo radiactivo: unos 5000000 eV.

Fisión de un núcleo uranio: unos 200000000 eV

Fusión de un núcleo de deuterio con un núcleo de tritio para dar un núcleo de helio: 17600000 eV.

A.7.- En una bomba de hidrógeno se produce helio y un neutrón a partir de deuterio y de tritio. ¿Qué energía se desprende en la formación de 5 g de helio?

$$\Delta E = 2,12 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

5

APLICACIONES DE LA FÍSICA NUCLEAR

Análisis químicos, ciclos de los elementos.

Industria

Gammagrafía: empleo de radiación para hacer radiografías con objeto de detectar defectos internos en las placas metálicas, soldaduras, etc.

Medidas de espesores: de papel, láminas plásticas, bandas de caucho, chapas metálicas, etc.

Pararrayos: en el extremo se coloca una fuente radiactiva que ioniza el aire próximo facilitando la descarga eléctrica. Parece ser que son peligrosos por lo que su uso se está eliminando.

Derrames en tuberías (oleoductos).

Agricultura

Esterilización o conservación de alimentos: por irradiación se eliminan todas las bacterias.

Lucha contra las **plagas del campo**, esterilizando una gran cantidad de insectos machos.

Creación de **nuevas variedades de plantas**, por aplicación de radioisótopos se puede estimular el crecimiento de ciertas plantas, aumentando las cosechas o por mutaciones controladas para hacerlas más resistentes.

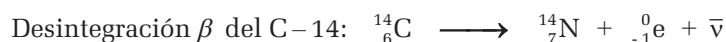
Medicina

Diagnóstico: del funcionamiento de la glándula tiroides con I-131 y otros isótopos de este elemento, que se acumulan en ella; del hígado, para diagnosticar la hepatitis crónica, la cirrosis o tumores malignos; del riñón para la hipertensión, nefropatías o cánceres; enfermedades del aparato digestivo, del páncreas o del bazo; medida del flujo sanguíneo, defectos circulatorios; gammagrafía cerebral para localizar lesiones, etc.

Radioterapia: utilización de la radiación para eliminar tumores malignos. Se utiliza la bomba de cobalto que contiene Co-60. Produce efectos secundarios, como la caída del cabello, cuando la irradiación es fuerte.

Arqueología: lo moderno, una ayuda para conocer lo antiguo

¿Cómo podemos saber de qué época es un trozo de madera, un trozo de tela, o un hueso? La radiactividad puede ayudarnos. En la naturaleza existe un isótopo del carbono, C-14, que es radiactivo.



Al ser radiactivo* su cantidad debería ir disminuyendo poco a poco, pero su cantidad permanece constante, ya que se produce continuamente por medio de otro proceso radiactivo que tiene lugar en las capas altas de la atmósfera al interaccionar los rayos cósmicos con los átomos de nitrógeno. La proporción del mismo es muy pequeña, pero como hemos dicho es constante* y se ha calculado su valor:

$$\frac{\text{átomos de carbono - 12}}{\text{átomos de carbono - 14}} = 10^{12}$$

Los seres vivos, plantas y animales, tienen una proporción constante de C-14 pues lo van incorporando las plantas, mediante la fotosíntesis, y los animales a través de la comida. Cuando mueren dejan de incorporar C-14, y el que tienen ya incorporado en el momento de su muerte comienza a disminuir, pues como hemos dicho es radiactivo y se va transformando en otros elementos.

Así pues, los trozos de madera, tela o huesos tienen una proporción menor de C-14 que la que existe en la actualidad en los seres vivos. Realizado el estudio de esa proporción, sabiendo que el período de semidesintegración del C-14 es 5730 años, se puede determinar la «edad» de esos materiales.

El carbono-14 puede utilizarse para fechar objetos de hasta 30.000 años, unas cinco veces su vida media, tiempo en el que la muestra tiene todavía una actividad medible. En el año 1960 se concedió el Premio Nobel a W. Libby por este método de utilización del ^{14}C para determinar la antigüedad de un fósil.

* A principio de los años 90 se comprobó que la técnica del C-14 subestima la edad de los objetos estudiados, especialmente cuando esa edad es superior a 10000 años. Además, el error aumenta con la edad.

¿Cómo se ha llegado a esa conclusión? Comparando la edad obtenida con la técnica del C-14 con la edad obtenida por otros procedimientos.

¿A qué puede ser debida la diferencia? La relación (C-12/C-14) ha cambiado debido a que el campo magnético terrestre va aumentando ligeramente con el tiempo, lo que dificulta la entrada de rayos cósmicos y la producción de C-14. Hace 10000 años la proporción de C-14 era un 20% superior a la actual y hace 30000 años era un 50% superior.

Mundo Científico, 1999

EJEMPLO

Una muestra de carbono obtenida de un árbol recientemente cortado, tenía una actividad específica de 15,3 desintegraciones/(min g). Si un trozo de madera conservada de la misma región tenía una actividad de 4,11 desintegraciones/(min g), calcula la antigüedad de esta última madera.

La constante de desintegración para el C-14, expresada en desintegraciones/año es:

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{5730 \text{ años}} = 0,0001209 \text{ año}^{-1}$$

La actividad de una muestra es proporcional al número de átomos radiactivos presentes en la muestra. Si comparamos dos actividades referidas a 1 gramo, una de madera antigua y otra de madera reciente, tendremos la relación entre el número de átomos de C-14 que hay en la madera recién cortada y el número de átomos de C-14 que hay en la madera cuando pasa el tiempo.

$$\frac{\text{actividad de la madera recién cortada}}{\text{actividad de la madera antigua}} = \frac{15,3}{4,11} = \frac{\lambda N_0}{\lambda N} = \frac{N_0}{N} = 3,72$$

Teniendo en cuenta la relación, que estudiamos en la unidad anterior, entre los átomos iniciales de una muestra y los que hay al cabo del tiempo, podemos calcular la antigüedad de la madera.

$$N = N_0 e^{-\lambda t}; \quad \frac{1}{e^{-\lambda t}} = \frac{N_0}{N} = 3,72; \quad e^{\lambda t} = 3,72;$$

$$\lambda t \ln e = \ln 3,72; \quad 1,3137 = 0,0001209t; \quad t = 10866 \text{ años}$$

A.8.- Una estatua de madera, hallada en Oriente Medio, contenía una cantidad de C-14 igual al 10,2 % de la que contenía un trozo de madera de un árbol de la misma región. Calcula la edad de la estatua, sabiendo que para el C-14, el periodo de semidesintegración es $T_{1/2} = 5730$ años.

edad: 18871 años

A.9.- La actividad radiactiva debida al ^{14}C ($T_{1/2} = 5730$ años) de un resto arqueológico es de 120 desintegraciones/segundo. La actividad de una muestra actual de igual masa y composición es de 360 desintegraciones/segundo.

a) Explique a qué se debe dicha diferencia y calcule la antigüedad de la muestra arqueológica.

b) ¿Cuántos átomos de ^{14}C tiene la muestra arqueológica en la actualidad? ¿Tienen ambas muestras el mismo número de átomos de carbono?

a) edad: 9082 años; b) $3,13 \cdot 10^{13}$ átomos de C-14

6

EL PELIGRO DE LAS RADIACIONES

Los fenómenos radiactivos producen tres tipos de emisiones: las partículas α , las partículas β y la radiación γ . Todas éstas, junto con otras como los rayos X, son emisiones de alta energía lo que les dota de un importante número de aplicaciones técnicas, acompañadas de un alto nivel de riesgo para la salud humana si no se toman las debidas precauciones.

Su peligro se debe a varias razones, entre ellas al hecho de que no tengamos órganos sensoriales que las detecten y nos indiquen cuándo somos irradiados, y a que sus efectos no son instantáneos, pueden aparecer muchas veces después de algunos años, además de ser acumulativos. Por tanto, nuestros tejidos dañados al recibir una dosis de radiación, no muestran lesiones en algún tiempo, o lo hacen cuando ya no hay un posible tratamiento. La corta historia del conocimiento de estas radiaciones muestra abundantes casos de su peligrosidad:

- La muerte de algunos de los primeros científicos que las investigaron como Marie Curie, su hija Irene Curie que murió de leucemia, y el marido de ésta, Frédéric Joliot, así como Enrico Fermi murieron de cáncer.

- El estado de los pacientes tratados con cobaltoterapia.

- Los radiólogos afectados por los rayos X.

- La muerte por cáncer de trabajadores que durante los años 20 afinaban los pinceles con sus labios para pintar esferas de reloj con derivados de radio.

- La muerte de muchos afectados por los accidentes en los reactores nucleares: Chernobil.

- El uso bélico de estas radiaciones: bombas lanzadas sobre Hiroshima y Nagasaki.

¿Cuál es la acción de estas radiaciones? Podemos decir que es de varios tipos, efectos térmicos al ser absorbidas, producción de roturas de las moléculas orgánicas, y por tanto iniciación de reacciones químicas no previstas en el organismo, etc.; pero en definitiva, la radiación destruye las células y sus conglomerados, los tejidos.

Los más propensos (más radiosensibles) son los tejidos menos especializados, aquellos cuyas células mantienen alto su poder regenerativo, es decir, que se multiplican bastante para cumplir su misión biológica: piel, aparato reproductor, células sanguíneas, médula ósea o las paredes del estómago e intestinos. La radiación produce células degeneradas, incapaces de dividirse. Si es alta la dosis, el número de estas células es tal que el tejido queda destruido.

Dosis grandes de radiación producen enrojecimiento de la piel y pueden dar lugar a una reproducción descontrolada de sus células, el llamado cáncer de piel, a la esterilización del sujeto o a cataratas en los ojos. Dependiendo de la dosis los tejidos se recuperarán, al menos aparentemente, o se producirán efectos permanentes.



Explosión atómica

Sobre la sangre actúa la radiación de varias formas, impide la formación de glóbulos rojos, lo que conduce a muerte por anemia, destruye los glóbulos blancos con lo que el individuo queda indefenso ante cualquier ataque bacteriano, también puede producir una superproducción de glóbulos blancos, enfermedad mortal conocida como leucemia; finalmente destruye las plaquetas con lo que suelen aparecer hemorragias internas.

Estos efectos junto con vómitos, diarreas, caída de pelo, fiebre y debilitamiento constituyen el llamado síndrome de la radiación.

Éstos son los efectos somáticos o lesiones que se producen en las personas irradiadas. Pero la radiación puede producir efectos genéticos que todavía hoy son poco conocidos. Éstos consisten en mutaciones genéticas que se transmiten de padres a hijos produciendo malformaciones y otros males. Ante semejantes peligros cabría pensar que se deberían tomar unas rígidas precauciones por parte de los responsables a nivel de gobiernos e instituciones, que tengan que ver con el manejo de estas radiaciones. Y aunque esto es así en algunos casos, en otros no parece existir sino una grave irresponsabilidad. Como ejemplos tenemos:

- El potencial de armas nucleares, capaces de destruir varias veces seguidas todo el planeta Tierra.

- Los accidentes en centrales nucleares: Chernóbil es quizás el más dramático, aunque antes han ocurrido otros más leves.

- La ignorancia que en algunos casos presenta el personal médico y auxiliar sobre los isótopos radiactivos que manejan.

- La producción de sustancias conocidas con el nombre de freones, para frigoríficos y sprays. Estos freones deterioran la capa atmosférica de ozono, donde ya parece haber dos agujeros, en los correspondientes polos geográficos, permitiendo el paso hacia la superficie terrestre de las radiaciones cósmicas, de idéntica naturaleza y peligro que las radiactivas terrestres.

7

LA «GRAN CIENCIA» DE LAS PEQUEÑAS PARTÍCULAS

La expresión «gran ciencia», más usada en inglés «big science», se utiliza para referirse a los grandes costos económicos que suponen muchos proyectos científicos a partir de las primeras décadas del siglo XX. La investigación en física de partículas es quizás la más espectacular en los costes de sus experimentos, que ha exigido la financiación entre varios países. Mención especial merecen los aceleradores y detectores de partículas.

7.1 Aceleradores y detectores de partículas

Hasta finales de los años 30, los proyectiles que podían utilizar los científicos eran las partículas alfa o beta emitidas por los núcleos radiactivos, y los neutrones que se emitían por algunos núcleos como consecuencia de la radiactividad artificial. A veces también se observaban partículas que procedían del análisis de los rayos cósmicos que continuamente llegan a nuestra atmósfera.

Para observar las partículas se analizaban las trazas que dejaban en placas o emulsiones fotográficas.

A partir de los años cuarenta, la física de partículas tuvo un gran impulso debido fundamentalmente a las importantes aplicaciones militares (no olvidar que la bomba

atómica se utilizó en Hiroshima y Nagasaki en 1945) y al desarrollo de las centrales nucleares. Este impulso permitió la construcción de grandes máquinas «aceleradores de partículas», que permitían obtener proyectiles cada vez con más energía, lanzarlos contra núcleos que estuvieran en reposo o en movimiento en sentido contrario, y analizar las consecuencias de esos choques*.

Al mismo tiempo se desarrollaron de forma impresionante los sistemas para detectar las partículas. Se pasó de la cámara de niebla, o de la cámara de burbujas, (sistemas en el que el paso de una partícula deja una trayectoria de niebla o de burbujas de gas respectivamente), del tamaño aproximado de uno o dos metros, a detectores de chispas, contadores de centelleo, etc. cuyas dimensiones superan las de un edificio de tres pisos.

7.2 Un modelo para la materia: mediados del siglo XX

A lo largo de la historia las personas han intentado responder a las dos preguntas siguientes:

¿DE QUÉ ESTÁ HECHO EL MUNDO?	¿QUÉ LO MANTIENE UNIDO?
------------------------------	-------------------------

Desde las antiguas teorías de los cuatro elementos: aire, fuego, tierra y agua hasta los átomos del siglo XIX pasaron muchos siglos. A la atracción gravitatoria que explicaba el sistema solar y el universo observable se sumaron las fuerzas eléctricas y magnéticas responsables de la unión de los átomos en los cuerpos. Con una imagen casi completa, la radiactividad y otros fenómenos plantearon la necesidad del átomo divisible, formado por nuevas partículas (electrón, protón, neutrón, neutrino, etc.) y nuevas fuerzas, la llamada fuerte y débil. Haremos una breve introducción sobre cuáles eran las respuestas a las preguntas anteriores a mediados del siglo XX.

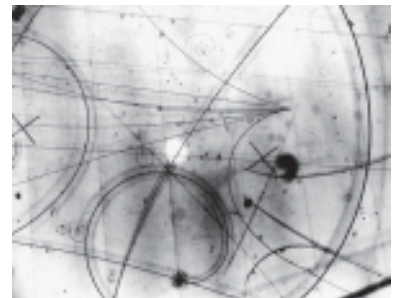
El mundo está hecho de partículas materiales

Con el desarrollo de los aceleradores de partículas cada vez más potentes y detectores de partículas cada vez más sensibles, se consiguió producir y estudiar las propiedades de centenares de partículas. El comportamiento de estas partículas se explicaba teniendo en cuenta propiedades como la carga eléctrica y la masa, así como otras propiedades como el spin o la extrañeza que los científicos les asignaron.

Muchas partículas son «inestables», sufren procesos en los que se transforman en otras, siendo destacable el escaso tiempo medio de duración de muchas partículas. Puede sorprender que el neutrón sea inestable, pero lo es cuando está libre, no cuando está ligado con otros neutrones y protones formando un núcleo atómico.

Cabe mencionar también la observación de las **antipartículas** que formarían la **antimateria**. Para cada partícula existe una antipartícula que es igual a la primera en todo los aspectos excepto en la carga eléctrica. (También difieren en otras propiedades, como las cargas de color, etc.). La antimateria se propuso por razones teóricas, siendo Dirac quien en 1929 propuso la existencia del antielectrón, partícula idéntica al electrón pero de carga positiva. Posteriormente esa partícula recibió el nombre de **positrón**. El positrón se descubrió en el año 1932 por Anderson y posteriormente se observaron las otras antipartículas, como el **antiprotón** en el año 1955 o el **antineutrón** en el año 1957. Las antipartículas se simbolizan mediante una barra colocada sobre el símbolo de la

* Las partículas alfa procedentes de las fuentes radiactivas naturales tienen una energía del orden de los 10 MeV. En uno de los primeros aceleradores, el Cosmotrón de Brookhaven, en 1952, se conseguía lanzar protones con una energía de 2800 MeV y en el acelerador de protones de Dubna (URSS, 1957), se alcanzaba la energía de 4500 MeV. En 1987, el acelerador LEP, en Ginebra, conseguía choques entre electrones y positrones que se mueven en sentido contrario con energías de 100000 MeV, y ese mismo acelerador modificado, conocido como LEP-200 ha alcanzado energías de 200000 MeV en 1998. Para el 2005 está previsto el funcionamiento del LHC, también en Ginebra, con el que se esperan alcanzar energías de 14000000 MeV.



Sucesos detectados con una cámara de burbujas

protón: p; antiprotón: \bar{p}
 electrón: e; antielectrón: \bar{e}
 al antielectrón se le llama positrón

partícula correspondiente.

Los nombres leptones, mesones y bariones se referían, cuando fueron propuestos, a los más ligeros, los de masa media y los más pesados. En la actualidad hay leptones con más masa que algunos mesones o bariones, y el significado ha cambiado. Se llama leptones a los que no les afecta la fuerza fuerte nuclear y hadrones a los que sí les afecta la fuerza fuerte.

Algunas partículas materiales de las que se hablaba en los años 60 están recogidas en la tabla siguiente:

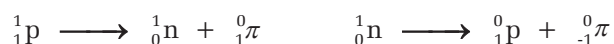
		Nombre y símbolo	espín	carga	extrañeza	masa en reposo (meV)	vida promedio (s)
LEPTONES		electrón e	1/2	- 1	0	0,511	estable
		muón μ	1/2	+ 1	0	105,7	2,2 10 ⁻⁶
		neutrinos ν	1/2	0	0	?	estables
HADRONES	MESONES	piones π	0	+1, 0	0	140	<10 ⁻⁶
		kaones K	0	-1, 0	+1	494	<10 ⁻⁸
	BARIONES	protón p	1/2	+1	0	938,3	estable
		neutrón n	1/2	0	0	939,6	918
		lambda Λ ⁰	1/2	0	-1	1116	<10 ⁻⁹
		omega Ω ⁻	3/2	- 1	-3	1672	<10 ⁻⁹

El mundo se mantiene unido por las interacciones fundamentales

Además de la gravedad y la teoría electromagnética, hubo que introducir la interacción fuerte y débil para explicar los procesos nucleares.

En 1935, Yukawa propuso, basándose en consideraciones mecano-cuánticas, la existencia de un «**campo de fuerzas nucleares**» entre los protones y neutrones y explicable por el intercambio de «algo» que constituiría la materia del campo nuclear. De la misma manera que las fuerzas electromagnéticas se explican por el intercambio de fotones (los cuantos del campo electromagnético), las fuerzas nucleares deberían explicarse por el intercambio de los cuantos del campo nuclear. Yukawa predijo las características de este cuanto: debería tener una masa en reposo 200 o 300 veces la del electrón y estar cargado eléctricamente. Esta partícula se llamó «**mesón**» por tener masa intermedia entre la del electrón y la del protón.

La gran estabilidad nuclear se interpretaba, pues, como el resultado del «intercambio de mesones» entre protones y neutrones, de forma que al emitir un mesón positivo, el protón pierde su carga positiva convirtiéndose en un neutrón, de igual manera que un neutrón puede perder un mesón negativo y transformarse en protón. Se puede representar de la forma siguiente:



El mesón o cuanto del campo nuclear, predicho por Yukawa, fue descubierto en los rayos cósmicos bastante más tarde, en 1947, por Lattes y otros; a esta partícula se la llamó mesón π (π), y su descubrimiento supuso un fuerte apoyo a la hipótesis mecano-cuántica según la cual, las fuerzas nucleares eran el resultado del intercambio de mesones entre los nucleones. La descripción esquemática que hemos realizado constituye, sin embargo, una aproximación muy simplista de la interacción real.

7.3 El modelo estándar: un modelo para la materia alrededor del año 2000

Se conoce como modelo estándar a la teoría más aceptada sobre los constituyentes últimos de la materia y las interacciones fundamentales que existen entre ellos. En este modelo, se establece que toda la materia está formada por los quarks (partículas que estudiamos a continuación) y los leptones a los que nos hemos referido. Entre esas partículas hay cuatro interacciones fundamentales: la gravedad, el electromagnetismo, la fuerza débil y la fuerza fuerte.

El mundo está hecho de partículas elementales

En los años 50 se realizaron unos experimentos dirigidos por Hofstadter que hicieron dudar sobre si los neutrones y protones eran elementales o tenían cierta estructura interna. Por otro lado, el hecho de que aumentase tanto el número de partículas subatómicas hizo sospechar (o desear) la existencia de un pequeño número de partículas cuya combinación pudiese explicar la diversidad encontrada.

En el año 1964, Gell-Mann propuso la existencia de unas partículas, a las que llamó «quarks», con cuya combinación podían explicarse los neutrones y los protones. Los llamó arriba y abajo, aunque son más conocidos por sus iniciales, **u** y **d**, (del inglés up y down). Junto con el quark **s**, (extraño), podían explicar todas las partículas conocidas*. Vemos que estos quarks fueron propuestos para explicar la existencia de partículas ya conocidas. Pero a partir de los años 70, el desarrollo teórico había avanzado tanto, que era capaz de hacer predicciones. Así, se predijo la existencia de otros tres quarks junto con sus propiedades, que fueron posteriormente «descubiertos»*, el **c** en el año 1974, el **b** en el año 1977 y el **t** en 1995.

En la tabla de la página siguiente recogemos los nombres y símbolos de los quarks, así como algunas de sus propiedades. Observamos que se sigue cumpliendo la cuantización de la carga eléctrica, aunque ahora la carga más pequeña que se ha encontrado es 1/3 de la carga del protón (o del electrón).

Se ha utilizado para la masa unidades de energía, haciendo uso del principio de equivalencia de Einstein.

Hemos incluido los leptones, las otras partículas que podemos considerar elementales, es decir, que no están compuestas por otras partículas. Hay tres leptones diferentes, el electrón, el muón y el tauón o partícula tau, y asociado a cada uno hay un neutrino. La masa de los neutrinos está sin determinar, no se sabe si tienen masa, y en caso afirmativo sería muy pequeña, del orden del eV.

Se han agrupado las partículas elementales en familias. Resulta curioso que la materia ordinaria se pueda explicar sólo con la primera familia. Una de las preguntas que se hacen los científicos es: ¿para qué existen las otras dos familias de partículas si podríamos tener suficiente con la primera familia? No tiene respuesta, lo mismo que tampoco tiene respuesta ¿por qué tienen las partículas la masa que tienen? Son incógnitas a responder con más investigaciones.

*Composición en quarks de algunas partículas subatómicas

	Bariones	Mesones
Protón	u u d	pion ⁺ u \bar{d}
Antiprotón	\bar{u} \bar{u} \bar{d}	kaon ⁻ s \bar{u}
Neutrón	u d d	kaon ⁰ d \bar{s}
Lambda	u d s	rho ⁰ u \bar{d}

* ¿Qué se ha descubierto un quark quiere decir que lo hemos visto? Ni mucho menos. Ninguna partícula subatómica «se ve». La teoría predice incluso que los quarks no podremos separarlos. Descubrir un quark supone que sucedan fenómenos que se traduzcan, al final de todo, en la trayectoria de una partícula de la que se podrán medir una serie de propiedades, energía, carga, etc. que sólo puede ser compatible con la existencia de ese quark.

		nombre	símbolo	carga (e)	masa (MeV)	spin
1ª familia	quarks	arriba (up)	u	2/3	5 ± 3	1/2
		abajo (down)	d	-1/3	10 ± 5	1/2
	leptones	electrón	e	-1	0,511	1/2
		neutrino electrónico	ν_e	0	< 0,000007	1/2
2ª familia	quarks	encanto (charm)	c	2/3	1500 ± 300	1/2
		extraño (strange)	s	-1/3	200 ± 100	1/2
	leptones	muón	μ	-1	105,6	1/2
		neutrino muónico	ν_μ	0	< 0,3	1/2
3ª familia	quarks	cima (top)	t	2/3	180000 ± 6000	1/2
		fondo (bottom)	b	-1/3	4700 ± 200	1/2
	leptones	tau	τ	-1	1777,1	1/2
		neutrino tauónico	ν_τ	0	< 30*	1/2

A.10.- a) Comprueba que las cargas eléctricas del protón y del neutrón coincide con la suma de las cargas eléctricas de los quarks que los forman.

b) Escribe los nombres de los seis leptones conocidos. ¿Están formados los leptones por quarks? ¿De qué están formados?

Interacciones fundamentales en el modelo estándar

Lo que pretende el modelo estandar es dar una interpretación microscópica del origen de cada una de las fuerzas, interpretación que debe ser compatible con la relatividad y la mecánica cuántica. Se intenta que la forma de explicar cada interacción sea la misma, mediante el intercambio de una partícula intermedia que es característica de esta fuerza. La intensidad de la misma está relacionada con el tiempo de intercambio y con la distancia a que puede realizarse. Se cree, así mismo, que el radio de acción o alcance de las interacciones es inversamente proporcional a la masa de las partículas intercambiadas.

Interacción gravitatoria

Fue propuesta por Newton en el siglo XVII. Su efecto es extraordinariamente débil a nivel de partículas elementales. Su acción se transmite a la velocidad de la luz mediante partículas virtuales (que no han sido detectadas) llamadas **gravitones**. Dado que el alcance de esta interacción es infinito, se espera que esta partícula sea de masa nula. Todavía no se ha podido dar una interpretación dentro del modelo estandar para la interacción gravitatoria.

Interacción electromagnética

Corresponde con la fuerza que existe entre partículas que tienen la propiedad carga eléctrica. Hay dos tipos de carga eléctrica que llamamos positiva y negativa. Depen-

diendo de cómo sean las cargas, la fuerza electromagnética puede ser de atracción o de repulsión.

Para que exista fuerza entre partículas subatómicas es necesario que ambas partículas estén cargadas; existe fuerza protón-protón y protón-electrón pero no existe fuerza eléctrica protón-neutrón o electrón-neutrón. A ese tipo de fuerzas la llamamos fuerza electromagnética fundamental.

Sin embargo, a escala atómica o superior, es posible la existencia de fuerzas eléctricas entre cuerpos cuya carga neta es nula. Recordemos que un cuerpo cargado puede atraer a uno neutro, (fenómeno de inducción), y que dos átomos de cloro neutros se atraen formando una molécula diatómica. Esa atracción es un efecto neto debido a que las fuerzas de atracción entre las partículas cargadas de un cuerpo pueden ser mayor que las de repulsión, según la posición relativa que ocupen. A ese tipo de atracción la vamos a llamar **fuerza electromagnética residual**.

Se ha estudiado en capítulos anteriores que la teoría electromagnética de Maxwell daba explicación a la mayoría de los fenómenos observados, pero que a escala atómica y subatómica se presentaban problemas que dieron lugar a la mecánica cuántica. Hoy existe una teoría que tiene en cuenta la mecánica cuántica y la relatividad en la explicación de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Recibe el nombre de **electrodinámica cuántica**, y es la teoría más exacta jamás elaborada pues existe un acuerdo «casi perfecto» entre los valores que predice esa teoría y los valores que se pueden medir experimentalmente.

Esa teoría elaborada a mediados del siglo XX, supone que la interacción entre dos partículas cargadas se hace mediante la transmisión de los fotones (cuantos del campo electromagnético) y su alcance es infinito.

Interacción débil

Es otro tipo de fuerza relacionada con las interacciones dentro del núcleo de los átomos. Se le llama débil porque su intensidad es más pequeña que la electromagnética.

La interacción débil* está relacionada con una propiedad que recibe el nombre de **carga de sabor**.

Las partículas intermediarias son los bosones intermedios (W^+ , W^- , Z^0). Estas partículas han sido detectadas, siendo sus masas de 80, 80 y 91 GeV respectivamente. Tal como predice la mecánica cuántica, al ser grande la masa de las partículas intermediarias el alcance de la interacción es muy corto.

Las interacciones débiles tienen importancia en algunos fenómenos que se dan en los núcleos de los átomos, como la desintegración β , según la cual un neutrón se desintegra emitiendo un protón, un electrón y un neutrino. También son las responsables de que los quarks y leptones más pesados se transformen en quarks y leptones más ligeros. Por eso, en la materia ordinaria lo que observamos son sólo las partículas elementales de la primera familia, las más ligeras.

Interacción fuerte

Se introdujo para explicar la estabilidad del núcleo, contrarrestando las fuerzas de repulsión eléctrica entre los protones. También permite explicar, en el modelo estándar, cómo se unen los quarks entre sí para formar protones y neutrones. Las partículas mediadoras de esta interacción se llaman **gluones** de los que hay 8 diferentes.

La **interacción fuerte fundamental** está relacionada con una propiedad que recibe el nombre de **carga de color***. Esa propiedad sólo la tienen los quarks y los gluones; por eso, la interacción fuerte fundamental sólo afecta a los quarks y a los gluones. Su valor

A escala macroscópica es la responsable de los fenómenos eléctricos y magnéticos.

* La carga de sabor es otra propiedad de la materia. Sólo aquellas partículas que tienen carga de sabor son afectadas por la interacción débil.

Dibujo de la desintegración beta.

Un quark d de un neutrón emite una partícula W^- , convirtiéndose en un quark u. Esto convierte el neutrón en un protón. Al mismo tiempo, la partícula W^- se descompone emitiendo un electrón y un antineutrino.

depende de la distancia, siendo crítica la distancia de 10^{-15} m; para distancias mayores de 10^{-15} m la fuerza entre los quarks aumenta cuando lo hace la distancia, lo que impide que podamos separar los dos quarks ya que se necesitaría una cantidad casi infinita de energía. Por eso decimos que los quarks están **confinados**. Para distancias menores de 10^{-15} m la fuerza disminuye cuando lo hace la distancia por lo que los quarks, cuando están muy cercanos, se mueven casi libremente.

Los protones y neutrones están formados por quarks pero en conjunto no tienen carga de color. La atracción entre los protones y los neutrones, que mantiene unido el núcleo, se debe a la **fuerza fuerte residual**. Esa fuerza es algo parecido a la fuerza eléctrica residual que existe entre dos átomos que son neutros, y que los mantiene unidos formando una molécula.

Se trata de una interacción extremadamente compleja que se conoce desde hace poco tiempo. Las características de las fuerzas nucleares que se ponen de manifiesto en la interacción fuerte residual las podemos resumir así:

- a) No dependen de la carga eléctrica de las partículas: es la misma entre dos protones o entre dos neutrones o entre un protón y un neutrón.
- b) Son atractivas para distancias del orden de $4 \cdot 10^{-16}$ m, para distancias menores son repulsivas.
- c) Se ponen de manifiesto en distancias muy cortas. Para distancias superiores a 10^{-15} m son de intensidad despreciables
- d) No son fuerzas centrales, es decir no están dirigidas en la dirección de la recta que une las partículas.

Se ha intentado establecer una conexión entre los cuatro tipos de interacciones o sus campos correspondientes, de manera que quedaran reducidos a un sólo campo (teoría del campo unificado), que sirviera para explicarlos todos. Se han logrado notables avances, pero quedan aún bastantes dificultades por resolver para la consecución del campo unificado. Por ejemplo, se ha conseguido unificar la interacción electromagnética y la débil en una sola teoría, la teoría de la fuerza electrodébil, lo que supone un avance, pero no se ha podido avanzar en la posible unificación de la gravitación con las otras interacciones.

La tabla siguiente resume las características de las cuatro interacciones.

* Lo mismo que la electromagnética está relacionada con la carga eléctrica o la gravitatoria con la masa, la interacción fuerte está relacionada con la carga de color. Sabor o color no tienen en estos casos el significado habitual, son nombres, poco imaginativos, que se dan a propiedades de la materia.

Las partículas formadas por quarks son «blancas», es decir, no tienen color. Igual que un átomo, está formado por partículas con cargas positivas y negativas (protones y electrones) pero en conjunto es neutro, un protón está formado por quarks cada uno de los cuales tiene carga de color, pero el conjunto es neutro (aquí se dice blanco), respecto a esta propiedad.

	GRAVITATORIA	ELECTRODÉBIL		FUERTE	
		Débil	Electromagnética	Fundamental	Residual
Propiedad de la que depende	Masa-energía	Carga de sabor	carga eléctrica	Carga de color	ver información
Partículas sobre las que actúa	Todas	Leptones y quarks	Las que tengan carga eléctrica	Quarks y Gluones	Hadrones
Partículas que se intercambian	Gravitón	W^+ , W^- , Z^0	Fotones	Gluones	Mesones
Alcance	ilimitado	muy corto	ilimitado	muy corto	muy corto
Intensidad para: 2 quarks a 10^{-18} m 2 quarks a $0,3 \cdot 10^{-17}$ m 2 protones en el núcleo	10^{-41} 10^{-41} 10^{-36}	0,8 0,0001 0,0000001	1 1 1	25 60 No aplicable	No aplicable a quarks 20

A.11.- Las distintas interacciones se pueden clasificar en orden creciente de intensidad de la siguiente forma: gravitatoria, débil, electromagnética y fuerte.

- a) Escribe con qué propiedad está relacionada cada una.
- b) En qué sentido podemos decir que la interacción gravitatoria es pequeña cuando es la responsable de fuerzas tan grandes como la atracción Tierra-Luna o de aquellas fuerzas que mantienen unido al sistema solar.
- c) ¿Por qué se desprecian las fuerzas gravitatorias cuando se están estudiando los fenómenos nucleares?
- d) ¿Respecto a qué se clasifica una interacción como fuerte o débil?
- e) ¿Por qué no se tiene en cuenta a la interacción fuerte cuando se estudia el giro de la Luna alrededor de la Tierra, o en el diseño de un electroimán?
- f) ¿Por qué siendo ilimitado el alcance de la interacción electromagnética no se tiene en cuenta al estudiar la atracción Tierra-Luna?
- g) Escribe los nombres de las partículas elementales (que no tienen estructura) y que podemos suponer constituyen toda la materia.
- h) Escribe los nombres de las partículas cuyo intercambio se supone para explicar la actuación de cada una de las interacciones fundamentales.

Algunos problemas pendientes

* El problema de los neutrinos solares. El flujo de neutrinos que procedentes del Sol atraviesa la Tierra es menor del que predice la teoría. Según el conocimiento que se tiene de los procesos de fusión que ocurren en el Sol y la sensibilidad de los experimentos que se usan para detectarlos deberíamos observar mayor cantidad. Para explicarlo se proponen diversas alternativas, entre ellas que los neutrinos tengan masa, lo que significaría que puedan oscilar. Eso quiere decir que parte de los neutrinos electrónicos que proceden del Sol, cambiarían a neutrinos muónicos o tauónicos, por lo que se detectarían menos neutrinos solares. Los últimos experimentos realizados parecen apuntar a que los neutrinos tendrían masa.

* Inexistencia de una teoría cuántica de la gravitación lo que lleva a la imposibilidad de un modelo de gran unificación que abarque todas las interacciones fundamentales.

* ¿Por qué tienen las partículas las masas que tienen? ¿Se descubrirá el bosón de Higgs en los experimentos que a partir de 2005 se llevará a cabo en el LHC. El LHC es el nuevo acelerador que se construye en el CERN, en Ginebra. En él se observarán las colisiones frontales entre protones de una energía de 14 TeV, y se espera que del resultado del análisis de esos choques podamos confirmar muchos juicios de nuestras teorías y quizás muestre sucesos que requieran modificaciones importantes.

* ¿Por qué existe el muón? Sigue siendo un misterio, igual que cuando se descubrió.

* ¿Por qué hay las partículas elementales que hay? ¿Por qué son tantas? ¿Por qué hay tres familias? etc.

ACTIVIDADES DE RECAPITULACIÓN

A.1.- Un núcleo de helio ${}^4_2\text{He}$ cuya masa atómica es 4,00260 u, se ha formado por la unión de dos neutrones (*masa* = 1,00866 u) y dos protones (*masa* = 1,00727 u). Calcula el defecto de masa y la energía de enlace por nucleón.
 $\Delta m = 0,02926$ u; $B/A = 6,8$ MeV/nucleón

A.2.- Si un átomo de hidrógeno de masa $1,673 \cdot 10^{-27}$ kg, se une con un átomo de litio de masa $11,648 \cdot 10^{-27}$ kg para formar dos átomos de helio de masa $6,636 \cdot 10^{-27}$ kg, calcula:

- La energía cinética, en julios, que es liberada en esta reacción.
- El número de átomos de hidrógeno que tendríamos que transformar para generar 10 J.

$$E_c = 4,41 \cdot 10^{-12} \text{ J}; 2,27 \cdot 10^{12} \text{ átomos}$$

A.3.- Sabiendo que el período de semidesintegración del Po-210 es de 138 días, calcula:

- La constante de desintegración.
- La actividad de 1 miligramo de polonio-210.

$$\lambda = 5,81 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}; A = 4,5 \text{ Ci}$$

A.4.- Escribe la reacción nuclear y calcula la energía liberada en MeV en el siguiente caso: acción de un neutrón sobre un núcleo de hidrógeno pesado (deuterio), con formación de un núcleo de tritio y emisión de un rayo gamma.
 $\Delta E = 6,3$ MeV

A.5.- El período de semidesintegración del Ra-226 es 1620 años. Calcula: a) La actividad de 1 g de Ra-226. b) El tiempo necesario para que la muestra quede reducida a un dieciseiavo de la muestra primitiva.

$$A = 1 \text{ Ci}; t = 6480 \text{ años}$$

A.6.- Si bombardeamos el N-14 con partículas alfa se forma O-17 y se libera una partícula.

- Escribe la ecuación que represente al proceso anterior, indicando cuál puede ser la partícula emitida.
- Si suponemos que el O-17 formado y la partícula emitida están en reposo, calcula la energía cinética mínima que debe tener la partícula alfa.
- La energía cinética de la partícula alfa deberá ser superior ya que la suposición que hemos hecho es imposible que se cumpla. ¿Qué ley de conservación se violaría si los productos de la reacción estuviesen en reposo.

$$\Delta E_k > 0,68 \text{ MeV}$$

A.7.- El período de semidesintegración del Sr-90 es de 28 años y su masa atómica 89,90775 u. Determina la actividad de 1 mg y exprésala en becquerel y en curies.

$$A = 5,25 \cdot 10^9 \text{ Bq} = 0,142 \text{ Ci}$$

A.8.- Halla la masa de radón-222 cuya actividad es igual a 1 Ci.

$$m = 0,0065 \text{ mg}$$

A.9.- (Selectividad) Una de las reacciones de fisión posibles del ${}^{235}_{92}\text{U}$ es la formación de ${}^{94}_{38}\text{Sr}$ y ${}^{140}_{54}\text{Xe}$, liberándose 2 neutrones.

- Formule la reacción y haga un análisis cualitativo del balance de masa.
- Calcule la energía liberada en la fusión de 20 g de uranio.

$$m(\text{U}) = 234,9943 \text{ u}; m(\text{Sr}) = 93,9754 \text{ u}; m(\text{Xe}) = 139,9196 \text{ u}; m(\text{n}) = 1,00866 \text{ u}; N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

A.10.- (Selectividad) a) ¿Por qué los protones permanecen unidos en el núcleo, a pesar de que sus cargas tienen el mismo signo?

b) Compare las características de la interacción responsable de la estabilidad nuclear con las de otras interacciones, refiriéndose a su origen, intensidad relativa, alcance, etc.

A.11.- (Selectividad) En un reactor tiene lugar la reacción: ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} = {}^{141}_{56}\text{Ba} + {}^{92}_{z}\text{Kr} + a {}^1_0\text{n}$

- Calcule el número atómico, Z, del Kr, y el número de neutrones, a, emitidos en la reacción, indicando las leyes de

conservación utilizadas para ello.

b) ¿Qué masa de $^{235}_{92}\text{U}$ se consume por hora en una central nuclear de 800 MW, sabiendo que la energía liberada en la fisión de un átomo de $^{235}_{92}\text{U}$ es 200 MeV?

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$$

A.12.- a) ¿Cuáles son los posibles residuos de una central nuclear de fisión? ¿Cómo se almacenan esos residuos?

b) ¿Qué papel juega el moderador en un reactor nuclear? ¿Y las barras de control?

c) ¿Qué se llama masa crítica?

A.13.- a) ¿Cuáles son las partículas elementales que componen la materia ordinaria? Escribe sus nombres y símbolos, así como la carga eléctrica y masa de cada una.

b) ¿Cuáles son las partículas mediadoras en las interacciones fundamentales?

c) ¿Cómo se mantienen unidos en el núcleo los protones y electrones?

A.14.- (Selectividad) Responda breve pero razonadamente a las siguientes preguntas:

a) ¿Por qué se postuló la existencia del neutrón?

b) ¿Por qué la masa de un núcleo atómico es menor que la suma de las masas de las partículas que lo constituyen?

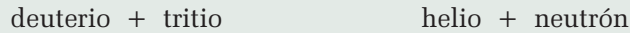
EJEMPLO

¿Qué cantidad de deuterio y de tritio consumiría una central de fusión nuclear cada hora, si su potencia fuese similar a las actuales de fisión, es decir 1000 MW?

El deuterio y el tritio son isótopos del hidrógeno de números másicos 2 y 3 respectivamente.

Masas atómicas: deuterio = 2,014102 u, tritio = 3,01605 u; helio = 4,00260 u; neutrón = 1,008665 u.

El proceso nuclear es:



El defecto de masa, por cada átomo de helio formado, es la diferencia entre la suma de las masas de deuterio y tritio y la suma de las masas del helio y del neutrón. Su valor es:

$$\Delta m = (2,014102 + 3,01605) - (4,00260 + 1,008665) = 0,018869 \text{ u} = 3,13 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

Este defecto de masa equivale a una disminución de la energía del sistema en un valor que se puede obtener por la relación de Einstein, energía que si ha disminuido en el sistema será porque habrá sido cedida al exterior:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 3,13 \cdot 10^{-29} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 2,82 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

El valor obtenido es la energía liberada en la formación de **1 átomo** de helio. La pregunta se refiere a la energía liberada en la formación de 5 gramos de helio. Para eso, calcularemos el número de átomos que hay en 5 gramos, calculando los moles y conocido el número de Avogadro:

$$N = (5/4,00260) \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 7,52 \cdot 10^{23} \text{ átomos}$$

La energía liberada será el producto de la liberada en la formación de un átomo por el número de átomos formados:

$$\Delta E = 2,82 \cdot 10^{-12} \cdot 7,52 \cdot 10^{23} = 2,12 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

b) Para que la potencia sea de 1000 MW, en 1 hora se tendría que transformar una cantidad de energía igual a:

$$\text{Energía} = \text{potencia} \cdot \text{tiempo} = 10^9 \cdot 3600 = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

Ya que a partir de un átomo de deuterio y uno de tritio se obtiene $2,82 \cdot 10^{-12} \text{ J}$, el número de átomos necesarios será:

$$\text{Número de átomos de deuterio o tritio} = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ J} / (2,82 \cdot 10^{-12} \text{ J/átomo}) = 1,28 \cdot 10^{24}$$

$$\text{Número de moles} = 1,28 \cdot 10^{24} / 6,02 \cdot 10^{23} = 2,13 \text{ moles}$$

Esto supone que se necesitan:

de deuterio: $2,13 \cdot 2,014 = 4,29 \text{ g}$

de tritio: $2,13 \cdot 3,016 = 6,42 \text{ g}$

Fíjate en la cantidad tan pequeña de «combustible» que sería suficiente para el funcionamiento de una central de fusión. La lástima es que aún no se ha podido dominar el sistema para que se pueda utilizar.