

7 Física nuclear y de partículas

Como sabes por tus estudios de química, la configuración de los electrones de un átomo determina si el átomo puede unirse a otros para formar compuestos y la manera como lo hace. También caracteriza las temperaturas de fusión y de congelación, la conductividad térmica y la conductividad eléctrica, así como el sabor, la textura, el aspecto y el color de las sustancias. En el tema anterior estudiamos que la luz visible estaba producida por el cambio de energía de los electrones. En este último tema nos adentraremos aún más en el átomo: hasta el propio núcleo atómico.

La física nuclear y la física de partículas, que como veremos están íntimamente ligadas, constituyen uno de los campos más relevantes de la ciencia contemporánea: la creciente importancia de la energía de origen nuclear, la existencia de instituciones internacionales como el CERN (Centre European de Recherche Nucleaire et Subnucleaire), con presupuestos fabulosos, la construcción de aceleradores de partículas y otros instrumentos de investigación cada vez más potentes... son prueba indudable de ello.

Pero no es la importancia social el único atractivo que presenta el estudio de esta nueva disciplina física. Los hechos que trata resultan absolutamente inexplicables por la física clásica y ponen de manifiesto, una vez más, la potencia explicativa de la mecánica cuántica.

1 Orígenes de la física nuclear

La primera evidencia de que el núcleo atómico posee una estructura interna y no puede considerarse como "un todo" inmodificable la proporcionó la radiactividad, fenómeno descubierto a finales del siglo XIX por el físico francés Henri Becquerel (1852-1908) y cuyo origen nuclear no tardó en ser establecido.

El descubrimiento tuvo lugar en el curso de una investigación sobre la posible emisión de rayos X por sustancias fosforescentes (sustancias que emiten radiaciones después de haber sido iluminadas). El procedimiento utilizado por Becquerel consistía en envolver una placa fotográfica con papel negro grueso, de forma que sólo pudiese ser atravesada por radiaciones muy energéticas, de elevada frecuencia, como los rayos X, y colocarle encima una sustancia fosforescente, exponiendo el conjunto a la luz solar. Esperaba así que, si alguna sustancia fosforescente emitiera rayos X, la placa resultaría velada. Los resultados fueron negativos hasta que utilizó un compuesto de uranio, que en efecto velaba la placa fotográfica.

Sin embargo, casi inmediatamente -y gracias a un acontecimiento fortuito- se vio que la radiación emitida no era resultado de la fosforescencia de los minerales, sino una radiación nueva. Según palabras de Becquerel los hechos ocurrieron de la siguiente manera:

[...] en aquellos días la luz solar era intermitente, por lo que guardé todos los dispositivos en un cajón del cuarto oscuro dejando allí también las sales de uranio. Como el sol tardó en lucir algunos días, revelé la placa fotográfica el 1 de marzo esperando encontrar las imágenes muy débiles. Pero, por el contrario, las siluetas aparecían con gran intensidad. Pensé en seguida que la acción de las sales debía continuar también en la oscuridad [...]

Nuevos experimentos confirmaron esta conjetura: el compuesto de uranio utilizado, así como otros compuestos de uranio, y el mismo uranio, emiten continuamente algún tipo de radiación capaz de atravesar el papel negro, e incluso otros cuerpos más gruesos y opacos, independientemente de que sean expuestos o no a la luz.

Sin duda el hecho más sorprendente de esta nueva radiación es su carácter continuo, persistente, sin necesidad de absorción de energía para su mantenimiento. En ningún otro fenómeno de los estudiados hasta entonces se había presentado algo similar: toda emisión continua de energía por un sistema exige, o bien que reciba energía del exterior, o bien su transformación -como en el caso de una combustión- hasta su agotamiento.

El trabajo iniciado por Becquerel fue proseguido en París por los esposos Curie. María Sklodowska (1867-1934), joven física polaca, casada con Pierre Curie (1859-1906), inició un estudio sistemático de gran número de sustancias con el propósito de encontrar otras que, como el uranio y sus compuestos, poseyeran la "actividad radiante" o radiactividad. Pudo constatar así que el torio y sus compuestos también presentaban dicha radiactividad. Ayudada por su esposo prosiguió la búsqueda de nuevos elementos con actividad radiante, llegando a aislar, mediante laboriosos procedimientos de separación,

una sustancia cuya actividad era cuatrocientas veces superior a la del uranio; se trataba de un nuevo elemento, para el que propuso el nombre de polonio, en honor a su país de origen. Algún tiempo después aisló otro nuevo elemento de actividad aún más intensa -novecientas veces mayor que la del uranio-, al que dio, dada su extraordinaria radiactividad, el nombre de radio.

La existencia de distintas sustancias espontáneamente radiactivas resultaba, con esta serie de trabajos, plenamente confirmada. Pero quedaban planteadas cuestiones clave en torno al nuevo fenómeno. La primera que vamos a abordar es la referida a la **naturaleza de la radiación** emitida.

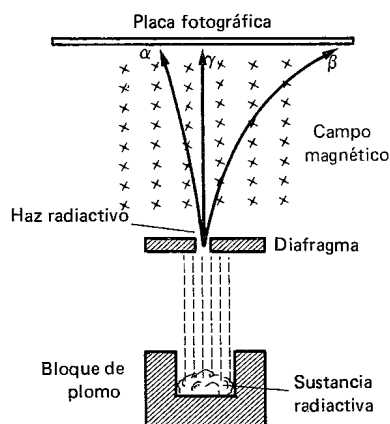


Figura 1 Cuando el haz radiactivo se hace pasar a través de un campo magnético se separa en tres tipos diferentes de radiación. La radiación α se comporta como si estuviera formada por partículas positivas, la radiación β como si estuviera formada por partículas negativas y la radiación γ no interacciona con el campo magnético, por lo que parece carecer de carga. También se observa que la desviación que sufre la radiación β es considerablemente mayor que la que sufre la radiación α .

Cuando el haz radiactivo se hizo pasar a través de un campo magnético se observó su separación en tres tipos diferentes de radiación, a los que se denominó respectivamente alfa, α , beta, β , y gamma, γ , (ver figura 1). Es evidente que la radiación alfa está formada por partículas cargadas positivamente y la radiación beta por partículas cargadas negativamente. En cuanto a la radiación gamma podemos concluir que carece de carga. Además de proporcionarnos esta información, el experimento nos permite separar los tres constituyentes de la emisión radiactiva para poderlos estudiar más a fondo. *Mediante diferentes técnicas se identificó al electrón como el constituyente de la radiación beta. De forma similar se llegó a la conclusión de que la radiación alfa estaba constituida por núcleos de helio, ${}^4_2\text{He}$, es decir, por partículas de carga $+2e$ y masa 4 uma^1 . Finalmente la radiación gamma fue caracterizada como radiación electromagnética de muy alta frecuencia, mayor incluso que la de los rayos X.*

Otro tema a dilucidar era el del **origen de estas radiaciones**. Resulta evidente que, al menos en lo que respecta a las partículas alfa, las emisiones radiactivas no podían proceder de la corteza electrónica, constituida exclusivamente por electrones. Además, cuando un elemento es radiactivo, lo es independientemente de su estado físico y lo son todos los compuestos en los que participa. Lo más razonable era suponer que las tres radiaciones eran de origen nuclear.

También sugiere lo mismo la magnitud de la energía asociada con la emisión radiactiva. Para ionizar el electrón de un átomo de hidrógeno se necesitan 14 eV , para ionizar el electrón más externo del átomo de sodio se precisan 25 eV , la ionización de los dos electrones del átomo de helio requiere 80 eV , en la formación de una molécula de agua a partir de moléculas de hidrógeno y oxígeno se desprenden 2 eV , en la combustión de un átomo de carbono se desprenden 24 eV . La energía de las radiaciones alfa, beta o gamma, es del orden del MeV (10^6 eV). Se trata de una cantidad de energía muy superior a las puestas en juego en los procesos químicos. Esta gran diferencia de energías es una prueba más de que las emisiones radiactivas no están relacionadas con procesos que ocurren en la corteza electrónica y

¹Para representar el núcleo del elemento X utilizamos la notación A_ZX , donde X es el símbolo químico del elemento, Z es su número atómico y A es su número másico. En un principio Z era el número de orden del elemento en el sistema periódico, pero rápidamente se identificó con el número de electrones que "orbitaban" el núcleo, y se entendió que representaba la carga del núcleo si se adoptaba como unidad el valor absoluto de la carga del electrón (si la carga de un electrón era $-e$, la carga del núcleo debía ser $+Ze$). Por lo que respecta a A , comenzó siendo el entero que aproximaba la masa del núcleo, si se adopta como unidad la uma . Tras el descubrimiento del neutrón, Z se identificó con el número de protones que constituyen el núcleo al tiempo que A se interpretó como el número total de protones y neutrones que constituyen el núcleo.

plantean, ya lo hemos señalado anteriormente, un serio problema de interpretación: ¿Cómo puede un elemento radiactivo emitir energía sin ayuda de ningún manantial energético exterior?

Todo induce a pensar que en los núcleos de los elementos radiactivos existen procesos de transformación que son la causa tanto de la emisión de las radiaciones alfa, beta y gamma, como de la enorme cantidad de energía liberada.

2 Modos de desintegración. Concepto de isótopo y reglas de Soddy

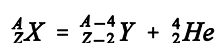
Rutherford y Frederick Soddy, en 1902, publicaron una teoría de las transformaciones radiactivas, que, sin pretender explicar el porque de las mismas - para lo que se carecía de la suficiente información-, trataba de describir los cambios producidos. *Su hipótesis consistía en admitir que un átomo cuyo núcleo ha emitido una partícula alfa o beta se transforma en otro átomo.* Dicha emisión constituiría así una ruptura del átomo en dos partes: la partícula emitida y el átomo residual, distinto del inicial. Este proceso, que fue denominado **desintegración o transmutación nuclear**, encontró confirmación experimental al observarse, por ejemplo, como en recipientes cerrados, que contenían inicialmente sólo el elemento radio, al cabo de cierto tiempo aparecía un nuevo elemento que se denominó radón y cuya masa difería de la del radio justamente en la correspondiente a una partícula alfa, es decir, *4 uma*. Estudios experimentales cuidadosos mostraron la existencia de series radiactivas constituidas por elementos, cada uno de los cuales se producía del anterior de la serie al emitir una partícula alfa o beta.

Pero existía un problema, en las transmutaciones radiactivas aparecían un elevado número de elementos radiactivos, aparentemente nuevos, para los que resultaba imposible encontrar huecos en el sistema periódico. Por otra parte, muchos de los nuevos elementos poseían propiedades químicas idénticas a las de los elementos ya conocidos, aunque diferían en algunas propiedades físicas.

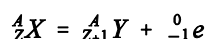
Fue Soddy quien, para explicar este hecho desconcertante, en 1910 emitió la hipótesis de que *un elemento químicamente puro puede estar formado por átomos de diferente masa y distinto comportamiento radiactivo. Estos átomos poseerían el mismo número atómico Z, es decir, la misma carga nuclear, y su estructura electrónica sería idéntica, por lo que tendrían las mismas propiedades químicas.* Como deberían ocupar el mismo lugar en el sistema periódico Soddy les llamó **isótopos** (del griego "isos", el mismo, y "topos", lugar). Toda la complejidad del gran número de "nuevos elementos" se resolvía así: cada "nuevo elemento" aparecía como isótopo de algún elemento ya conocido.

El mismo Soddy y sus colaboradores propusieron que *en las transformaciones radiactivas debía conservarse tanto la carga eléctrica como la masa.* Este es el origen de las llamadas **reglas de desplazamiento**

Desintegración alfa. Cuando un núcleo emite una partícula alfa, la masa del átomo decrece en cuatro unidades de masa atómica, y su carga nuclear y, por tanto, su número atómico, en dos unidades. con lo que se conserva tanto la masa como la carga. Si el átomo inicial X posee una masa A , y un número atómico Z , la emisión de una partícula alfa supone una transformación del núcleo que origina un elemento Y de masa $A - 4$ y número atómico $Z - 2$



Desintegración beta. Cuando un núcleo emite una partícula beta (un electrón), la masa del átomo no sufre prácticamente cambio alguno, mientras que la carga positiva del núcleo aumenta en una unidad, de acuerdo con el principio de conservación de la carga. Si el átomo inicial X posee una masa A , y un número atómico Z , la emisión de una partícula beta supone una transformación del núcleo que origina un elemento Y de la misma masa A que el anterior y de número atómico $Z + 1$



Aplicando las reglas de Soddy a las transmutaciones del uranio ($Z=92$, $A=235$) se observa que el elemento estable al que se llega es el isótopo de plomo 206, mientras que, para la serie del torio ($Z=90$, $A=232$) el elemento resultante es el isótopo de plomo 208. Según esto los pesos atómicos del plomo obtenidos a partir de compuestos de uranio y de torio deberían diferir apreciablemente. Se trataba de una predicción cuantitativa que podía dar lugar a una contrastación experimental. Mediante la utilización del espectrógrafo de masas se pudo confirmar este hecho.

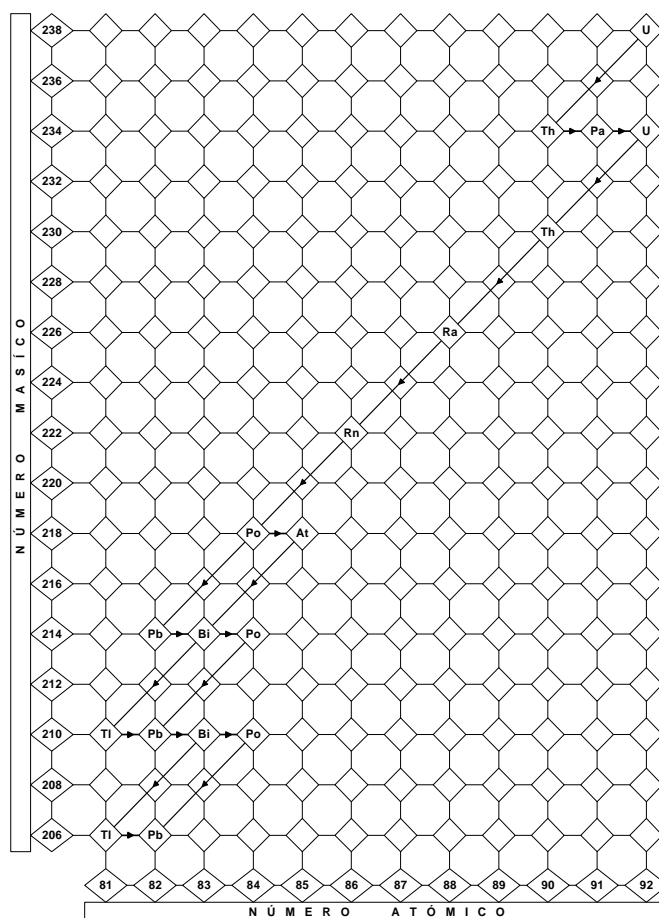


Figura 2 Serie radiactiva del uranio. Las flechas diagonales corresponden a desintegraciones alfa (el número atómico se reduce en dos unidades y el número másico en cuatro unidades) y las flechas horizontales a desintegraciones beta (el número atómico se incrementa en una unidad y el número másico no se modifica). Se observa como aparecen distintos isótopos de un mismo átomo.

Además, rápidamente se puso de manifiesto que el concepto de isótopo introducido tenía una validez más general que la relacionada con los elementos radiactivos. Pudo comprobarse que todos los elementos, excepto unos 20, aparecen en la naturaleza como una mezcla de isótopos. Así, por ejemplo, el oxígeno presenta tres isótopos, de masas 16, 17 y 18; aunque la proporción de presencia en la naturaleza del oxígeno 17 y el oxígeno 18 es muy baja, 0,0377% y 0,204% respectivamente. Lo mismo puede decirse del hidrógeno, cuyo isótopo hidrógeno 2, llamado deuterio, juega un papel muy importante en la física nuclear.

Por otra parte, el análisis de la composición isotópica de los elementos puso de manifiesto que las masas de todos los isótopos, medidas con el espectrógrafo, son, muy aproximadamente, múltiplos enteros de la unidad de masa atómica. La determinación mediante procedimientos químicos de masas atómicas fraccionarias se debe sencillamente a que, al trabajar con muestras macroscópicas, lo que se estima es la masa atómica media de la mezcla de isótopos de dicho elemento.

A.1 Completa las siguientes transformaciones radiactivas

- a) $^{238}_{92}\text{U} = ^4_2\text{He} + ?$ b) $^{234}_{90}\text{Th} = ^0_{-1}e + ?$ c) $^{266}_{88}\text{U} = ^?_{86}\text{Rn} + ?$
 d) $^{212}_{83}\text{Bi} = ? + \beta$ e) $? = ^{208}_{82}\text{Pb} + \alpha$ f) $^{32}_{15}\text{P} = ? + \beta$

A.2 De la definición de la unidad de masa atómica se deduce que 16 g del isótopo $^{16}_8\text{O}$ contienen 6.02×10^{23} átomos. Deduce cuantos kilogramos equivalen a una uma.

Selectividad 1999

2.1 Velocidad de desintegración y periodo de semidesintegración

Aunque inicialmente se pensara, debido a su larga duración, que la emisión de radiación era ilimitada, estaba claro que ello no podía ser así, y pronto se observó que la actividad de una muestra radiactiva

disminuía con el tiempo. Para estudiar cuantitativamente la actividad de los distintos elementos se emplean dos magnitudes: la velocidad de desintegración, y el periodo de semidesintegración.

Se llama **velocidad de desintegración** o **actividad** de una muestra radiactiva al número de átomos que se desintegran por unidad de tiempo. Si en un intervalo de tiempo Δt el número de átomos N de la muestra radiactiva disminuye en ΔN , la velocidad media de desintegración de la muestra, a_M durante el intervalo de tiempo considerado es

$$a_M = -\frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (11)$$

donde el signo negativo se introduce debido a que ΔN , al representar una disminución, siempre es negativo. La unidad de actividad es el **becquerelio**, Bq , que corresponde a una velocidad de desintegración de una desintegración por segundo. Un múltiplo del becquerelio es el **curio**, Ci , equivalente a $3.7 \times 10^{10} Bq$.

En todas las muestras radiactivas la velocidad de desintegración se hace cada vez más pequeña conforme transcurre el tiempo. Esto nos obliga a definir una velocidad o actividad instantánea de desintegración, a . Para ello consideramos en la expresión anterior el límite cuando Δt tiende a cero

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta N}{\Delta t} \right) = -\frac{dN}{dt} \quad (12)$$

La variación con el tiempo de la velocidad de desintegración observada en todas las muestras radiactivas se puede explicar si se supone que, en cada instante la velocidad de desintegración de la muestra es proporcional al número de átomos que quedan en la muestra sin desintegrarse

$$a = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (13)$$

La constante de proporcionalidad λ es característica del elemento que constituya la muestra y recibe el nombre de **constante de desintegración**. Se puede demostrar² que si en un instante inicial, t_0 , una muestra de un elemento radiactivo está formada por N_0 átomos, en un instante posterior t , los átomos que quedan sin desintegrarse son

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda \Delta t} \quad \text{siendo} \quad \Delta t = t - t_0 \quad (14)$$

La proporcionalidad entre la actividad de una muestra y el número de partículas que en ella quedan sin desintegrarse, tiene como consecuencia que la muestra no acaba nunca de desintegrarse. Si representamos el número de partículas sin desintegrarse en función del tiempo (en la *figura 3* se hace adoptando el instante $0 s$ como instante inicial en el que el número de partículas es N_0), observamos que la aproximación de la curva al eje temporal es asintótica.

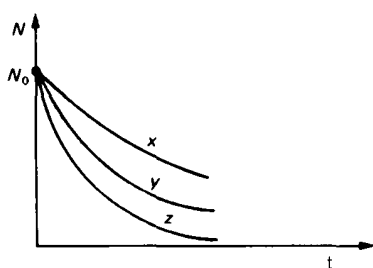


Figura 3 Evolución con el tiempo de la actividad para tres muestras de diferentes sustancias que inicialmente ($t_0 = 0 s$) tienen el mismo número de átomos N_0 . La constante de desintegración de la sustancia x es menor que la de la sustancia y . La sustancia z es la que tiene una constante de desintegración mayor. Se observa que el número de partículas se aproxima a cero asintóticamente cuando el tiempo transcurrido tiende a infinito.

Para dar una idea de la duración de un proceso de desintegración se emplea el concepto de **periodo de semidesintegración**, $T_{1/2}$. El periodo de semidesintegración de un átomo es el intervalo de tiempo que debe de transcurrir para que se desintegren la mitad de una muestra del mismo. A partir de esta

² Se puede demostrar que la derivada respecto al tiempo de la expresión propuesta satisface la relación (3). Para ello considera que el instante inicial es $t_0 = 0 s$ de manera que $\Delta t = t - t_0 = t$.

definición es inmediato deducir la relación que existe entre el periodo de semidesintegración se relaciona con la constante de desintegración por la fórmula

$$\begin{aligned} N(t=t_0+T_{1/2}) &= \frac{N_0}{2} \Rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow e^{\lambda T_{1/2}} = 2 \Rightarrow \lambda T_{1/2} = \ln 2 \Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (16) \\ N(t=t_0+T_{1/2}) &= N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \end{aligned}$$

También podemos escribir en función del periodo de semidesintegración una expresión equivalente a la (4) que describe como evoluciona con el tiempo el número de átomos sin desintegrar de una muestra radiactiva. si en un instante inicial, t_0 , una muestra de un elemento radiactivo está formada por N_0 átomos, en un instante posterior t , los átomos que quedan sin desintegrar son

$$N(t) = N_0 2^{-\frac{\Delta t}{T_{1/2}}} \quad \text{siendo } \Delta t = t - t_0 \quad (17)$$

Otra magnitud que se emplea en ocasiones es la de **vida media** representada por el símbolo τ . La vida media es la inversa de la constante de desintegración.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (19)$$

La expresión del proceso de desintegración en función de la vida media es

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \quad \text{siendo } \Delta t = t - t_0 \quad (20)$$

de forma que la vida media se puede interpretar como el tiempo que ha de transcurrir para que una muestra se reduzca en un factor e .³

A.3 ¿Cual es el periodo de cierto núcleo radiactivo cuya actividad disminuye en un octavo al cabo de un día?

Selectividad 1996

Solución: La actividad es proporcional al número de átomos sin desintegrar. Si al principio tenemos N_0 átomos, después de transcurrir un intervalo de tiempo $\Delta t = 24 \text{ h}$ el número de átomos sin desintegrar será $N = N_0/8$. Mediante la ecuación (6) determino la vida media

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\ln 8} \Delta t = \frac{\Delta t}{3} = 8 \text{ h}$$

A.4 El $^{134}_{55}\text{Cs}$ tiene un periodo de 30.8 s. Se parte de 6.2 μg . Determina: (a) El número de núcleos que hay en ese instante. (b) El número de núcleos 2 minutos después. La actividad en ese momento.

Dato: Número de Avogadro, $N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

(a) El número de núcleos inicial N_0 se calcula determinado la cantidad de sustancia de $^{134}_{55}\text{Cs}$, que se denota $n(^{134}_{55}\text{Cs})$. Se denota la masa de isótopo como $m = 6.2 \times 10^{-9} \text{ kg}$. La masa molar del isótopo es $A_m = A \text{ g mol}^{-1}$ donde $A = 134$ es el número másico del isótopo.

$$N_0 = n(^{134}_{55}\text{Cs}) \cdot N_A = \frac{m}{A_m} N_A = \frac{6.2 \times 10^{-6}}{124} N_A = 3 \times 10^{16} \text{ núcleos de } ^{134}_{55}\text{Cs}$$

(b) Denoto el periodo de semidesintegración como $t_{1/2} = 30.8 \text{ s}$ Después de transcurrir un intervalo de tiempo $\Delta t = 120 \text{ s}$; el número de núcleos sin desintegrar es

$$N = N_0 2^{-\frac{\Delta t}{T_{1/2}}} = 2.02 \times 10^{15} \text{ núcleos } ^{134}_{55}\text{Cs}$$

³ Hay textos que utilizan el término "vida media" como sinónimo de "periodo de semidesintegración"

La actividad se calcula multiplicando la constante de desintegración λ por el número de núcleos sin desintegrar

$$a = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N = 4.54 \times 10^{13} \text{ Bq}$$

A.5 La erradicación parcial de la glándula tiroidea en pacientes que padecen hipertiroidismo se consigue gracias a un compuesto que contiene el núcleo radiactivo $^{131}_{53}\text{I}$. Este compuesto se inyecta en el cuerpo del paciente, se concentra en el tiroides y destruye sus células. Determina cuantos gramos de isótopo se han de inyectar en un paciente para conseguir una actividad de 3.7×10^9 Bq. El periodo de semidesintegración de $^{131}_{53}\text{I}$ es 8.04 días.
Datos: $u = 1.66 \times 10^{-27}$ kg

Solución: Primero se determina el número de núcleos N que se necesitan y después se calcula la masa de los mismos. Denotamos el número másico del isótopo como $A = 131$. Denotamos la actividad como $a = 3.7 \times 10^9$ Bq. Denotamos el periodo de semidesintegración como $T_{1/2} = 694656$ s. El resultado que se obtiene es

$$N = \frac{a T_{1/2}}{\ln 2} \quad m = N A u = \frac{a T_{1/2}}{\ln 2} A u = 8.05 \times 10^{-10} \text{ Kg.}$$

A.6 El $^{131}_{53}\text{I}$ tiene un periodo de semidesintegración de 8.04 días. ¿Cuántos átomos de $^{131}_{53}\text{I}$ quedan en una muestra que inicialmente tiene N_0 átomos de $^{131}_{53}\text{I}$ después de 16,08 días? Considera los casos $N_0 = 10^{12}$ átomos y $N_0 = 2$ átomos. Comenta los resultados.

A.7 Un dispositivo utilizado en medicina para combatir, mediante radioterapia, ciertos tipos de tumor contiene una muestra de 0,5 g de $^{60}_{27}\text{Co}$. El periodo de semidesintegración de este elemento es 5.27 años. Determina la actividad, en desintegraciones por segundo, de la muestra de material radiactivo
Datos: $u = 1.66 \times 10^{-27}$ kg

Solución: La actividad se calcula multiplicando el número de núcleos sin desintegrar N por la constante de desintegración λ . La constante de desintegración se determina a partir del periodo de semidesintegración $T_{1/2} = 180509472$ s mediante la fórmula $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$.

Por otra parte, como la masa de cada núcleo es Au , donde $A = 60$ es el número másico del isótopo, el número de núcleos N contenido en una masa $m = 5 \times 10^{-4}$ kg es $N = \frac{m}{Au}$.

El valor de la actividad resulta $a = \lambda N = \frac{m \ln 2}{T_{1/2} A u} = 2.09 \times 10^{13} \text{ Bq}$

3 Composición nuclear

El descubrimiento de la radiactividad y la constatación de la existencia de isótopos indujo a que los científicos se plantearan el problema de la composición nuclear y, posteriormente, cuando se dispuso de suficiente información al respecto, la cuestión, mucho más compleja, de la estructura del núcleo. Comenzaremos tratando el primero de los temas planteados.

En un principio, el hecho de que la emisión de todos los elementos radiactivos conocidos (uranio, torio, polonio, radio...) estuviera constituida por *partículas alfa* y *partículas beta*, llevó a atribuirles a estas el carácter de *componentes básicos de los núcleos atómicos*. Sin embargo esta suposición debió ser rápidamente abandonada. Entre otras cosas, un modelo de núcleo formado por partículas alfa y beta no puede explicar ni siquiera el átomo más simple, el de hidrógeno, cuya masa es la cuarta parte de la de una partícula alfa y cuya carga nuclear es la mitad.

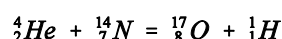
Precisamente la circunstancia de que tanto la carga como, aproximadamente, la masa de cualquier isótopo, fuera múltiplo de la del núcleo de hidrógeno, llevó a un segundo modelo, según el cual *cualquier núcleo estaría constituido por un cierto número núcleos de hidrógeno y de electrones*. El núcleo de hidrógeno recibió el nombre de protón, del griego "protos", primero. El núcleo de helio, por ejemplo, nos

lo podríamos imaginar constituido por cuatro protones y dos electrones (de masa prácticamente despreciable), con lo que su carga total sería $+2e$ y su masa $4u$.

El modelo de núcleo formado por protones y electrones también presentaba dificultades serias. La más importante era que no podía justificar la gran estabilidad del núcleo atómico. En un núcleo constituido por más protones que electrones resulta imposible imaginar como la atracción protón electrón puede vencer las repulsiones electrón electrón y protón protón. Y, sin embargo, todas las tentativas realizadas para romper núcleos por procedimientos químicos, elevadas temperaturas, intensos campos eléctricos... habían fracasado.

¿Cuales podían ser entonces los componentes del núcleo? ¿Qué tipo de fuerzas podían dar cuenta de su extraordinaria estabilidad? La respuesta a estos problemas exigía tener acceso al propio núcleo, conseguir su destrucción, como forma directa de constatar cuales eran sus componentes. El éxito de tal tarea está ligado al nombre de Rutherford. Como recordarás, Ernest Rutherford había propuesto la hipótesis del átomo nuclear al estudiar como se dispersaban partículas alfa lanzadas contra una lámina de metal. Fue precisamente bombardeando nitrógeno 14 con partículas alfa como llegó a observar, en 1919, un hecho sorprendente. Durante el bombardeo se producían partículas muy veloces que recorrían distancias mayores que las partículas alfa, describiendo trayectorias similares a las de los protones.

Tras una investigación cuidadosa del fenómeno observado, Rutherford sugirió que se trataba de una transmutación artificial: las partículas alfa penetraban en el núcleo, produciendo su transformación en un núcleo distinto, oxígeno 17, y la emisión de un protón, según la reacción



La liberación de protones en esta transmutación artificial reforzaba la idea de que los protones eran constituyentes del átomo. Para salir al paso de los problemas que planteaba un núcleo formado únicamente por protones y electrones Rutherford, en 1920, consideró la posibilidad de que el núcleo estuviera formado por protones y, junto a ellos, otras partículas de masa similar y carga nula, a las que denominó neutrones o "par electrón-protón". Ello permitía suponer que los núcleos de los distintos

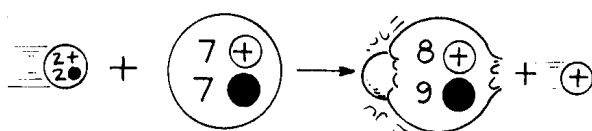


Figura 4 Rutherford, para explicar la transmutación por él descubierta, supuso que los núcleos estaban formados por Z protones y $A-Z$ neutrones.

elementos estaban constituidos por un número de protones igual a su número atómico Z , de modo que cada elemento de la tabla periódica tendría en su núcleo un protón más que el anterior. El número de neutrones sería el adecuado para justificar la masa del átomo. Un átomo de número másico A tendría $A-Z$ neutrones, Esta suposición de Rutherford carecía, sin embargo, de cualquier base experimental, y hubo que esperar hasta los años 30 para que la hipótesis del neutrón se viera confirmada.

A.8 Cuando el ${}^{22}_{12}\text{Na}$ se bombardea con deuterones ${}^2_1\text{H}$ se emite una partícula α . ¿Cual es el número atómico y la masa atómica del núcleo resultante?
Selectividad 1997

A.9 Cuando el núcleo de ${}^{235}_{92}\text{U}$ captura un neutrón se produce un isótopo del Ba con número másico 141, un isótopo del Kr (cuyo número atómico es 36) y tres neutrones. Determina el número atómico del Ba y el número másico del isótopo del Kr .
Selectividad 2002

En 1930 W. Bothe y H. Becker mostraron que al bombardear cierto número de elementos ligeros con partículas alfa se emitía una radiación extraordinariamente penetrante, que fue considerada inicialmente como radiación electromagnética. Pero los estudios referidos al poder de penetración de dicha radiación hicieron ver que su energía excedía con mucho a la de cualquier radiación gamma.

En efecto, Irene Curie -hija de los descubridores del radio- y su esposo, el físico frances Frederic Juliot, descubrieron que la nueva radiación era capaz de arrancar protones dotándoles de velocidades muy elevadas.

Fue este resultado el que condujo en 1932 a James Chadwick, que había sido colaborador de Rutherford, a rechazar la naturaleza electromagnética de la nueva radiación, y considerarla formada por los neutrones cuya existencia había sido propuesta diez años antes por Rutherford. Chadwick pudo comprobar que la masa del neutrón coincidía prácticamente con la del protón aplicando los principios de conservación de movimiento a choques entre un haz de protones y núcleos de hidrógeno.

La confirmación de la existencia del neutrón con una masa similar a la del protón, permitió elaborar un modelo de núcleo atómico que explicaba de forma sencilla los diferentes tipos de átomos que existían en la naturaleza y sus variaciones isotópicas.

En un átomo neutro, el número atómico Z corresponde al número de protones existentes en el núcleo y al número de electrones ligados a él por interacción electromagnética.

El número de protones nucleares -como el de electrones periféricos- aumenta en una unidad al pasar de un elemento a otro del sistema periódico, mientras que para cada elemento el número de neutrones puede variar dentro de ciertos márgenes, dando lugar a los distintos isótopos.

El número másico A representa el número total de protones y neutrones del isótopo, y aproxima la masa del mismo expresada en unidades de masa atómica (u) en la medida en la que tanto el protón como el neutrón tienen una masa de aproximadamente $1 u$.

Seguía, por otra parte, planteado el problema de la estabilidad nuclear. ¿Cual podía ser la naturaleza de las fuerzas capaces de dar cuenta de dicha estabilidad? ¿Qué papel jugaban los neutrones? Cuestiones estas de gran importancia, que solicitaron la dedicación de los físicos teóricos en los años siguientes al descubrimiento del neutrón

4 Interacciones nucleares y energías de enlace

En 1935, tres años después del descubrimiento del neutrón, el científico japonés Yukawa propuso la existencia de un nuevo tipo de interacción, conocida actualmente con el nombre de **interacción fuerte**, que sería la responsable de la estabilidad de los núcleos. Sus características más importantes son:

- Se trata de una interacción atractiva que no depende de la carga y que se presentan tanto entre protón y neutrón como entre dos protones o dos neutrones. De aquí el nombre de nucleones con el que se designa indistintamente a los protones y los neutrones.
- Su radio de acción es extraordinariamente corto, del orden de 10^{-15} m, el mismo orden de magnitud que el tamaño de los nucleones. En la práctica la interacción fuerte solo se manifiesta en el interior de los núcleos y presenta un carácter saturado, es decir, tiene un alcance tan limitado que únicamente interactúan entre si los nucleones en contacto.
- La intensidad de la interacción fuerte es muy superior a la de la electromagnética o la gravitatoria. Se trata de la forma de interacción más intensa conocida hasta la fecha: no solo contrarresta la repulsión recíproca de los protones existentes en el núcleo, sino que confiere a este una estabilidad muy notable.

Yukawa fue capaz de elaborar un modelo cuántico de la interacción fuerte que predecía la existencia de una nueva partícula, el mesón pi, que juega un papel similar al del fotón. De la misma manera que el fotón es el "aspecto corpuscular" de las ondas electromagnéticas, el mesón pi es el "aspecto corpuscular" de las ondas de interacción fuerte. No fue sino hasta 1948 que Powell descubrió los mesones pi como constituyentes de los rayos cósmicos.

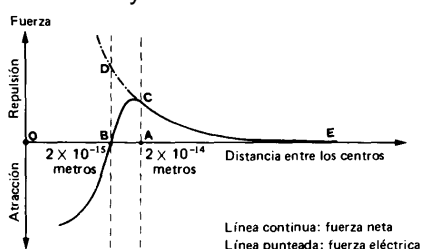


Figura 5 Valor de la fuerza entre dos protones en función de la distancia. Para distancias mayores de 2×10^{-14} m la atracción fuerte es inapreciable y la fuerza neta se identifica con la de repulsión eléctrica. Sin embargo para distancias inferiores a 2×10^{-15} m la atracción fuerte vence a la repulsión eléctrica y la fuerza neta comienza a ser atractiva.

4.1 Defecto de masa, energía de enlace y estabilidad nuclear

Desde un punto de vista energético, la gran estabilidad que presenta el núcleo quiere decir que para romper su estructura se precisa de una elevada cantidad de energía. Consecuentemente, si nos imaginamos la formación de un núcleo a partir de sus constituyentes, en el proceso se debería desprender mucha energía. Lo cierto es que las cantidades de energía involucradas en los procesos de transformación nuclear son de tal magnitud que se traducen en una sensible diferencia entre la masa de los nucleones constituyentes y la del núcleo resultante.

Conviene recordar que la teoría de la relatividad especial exige que toda absorción o emisión de energía posea un sustrato material. Existe una proporcionalidad entre la energía liberada (o absorbida) por un sistema, ΔE , y la disminución (o aumento) de masa por él sufrido, Δm , establecida por la ecuación

$$\Delta E = \Delta m c^2 \quad (42)$$

Aún cuando esta relación tiene carácter completamente general, puede ser ignorada cuando los intercambios energéticos son pequeños. Pero no es este el caso de la interacción fuerte.

A. 10 La masa isotópica del deuterio, ${}^2_1\text{H}$, obtenida experimentalmente, resulta ser $m_d = 2.01410 \text{ u}$, determina la energía que se liberaría al formar un átomo de deuterio a partir de sus constituyentes.

Datos: masa de protón, $m_p = 1.00728 \text{ u}$; masa del neutrón, $m_n = 1.00867 \text{ u}$;
masa del electrón; $1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Solución: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = (m_d - m_p - m_n) \cdot c^2 = -2.76 \times 10^{-13} \text{ J}$

A.11 Calcula en MeV el equivalente energético de una unidad de masa atómica.

Datos: $1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$; $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

Solución: $1 \text{ u} = 1.494 \times 10^{-10} \text{ J}$; $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$; $1 \text{ u} = 933.75 \text{ MeV}$

La masa de un isótopo es siempre menor que la masa de las partículas que lo componen. La diferencia recibe el nombre de **defecto de masa**. El equivalente energético del defecto de masa es la energía que se desprendería si el núcleo del isótopo se formara a partir de sus constituyentes. Es esta misma cantidad de energía la que haría falta para vencer la interacción fuerte y separa el núcleo en los nucleones que lo forman. Por ello el equivalente energético del defecto de masa se considera que es la **energía de enlace** nuclear.

La estabilidad de los distintos núcleos se compara mediante la energía de enlace. Pero como es evidente que dicha energía será tanto más elevada cuanto más enlaces se establezcan, es decir, cuantos más nucleones contenga el isótopo considerado, para medir la estabilidad nuclear se utiliza el concepto de **energía de enlace por nucleón**. Un núcleo es más estable que otro si su energía de enlace por nucleón es mayor.

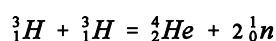
A. 12 Las masas atómicas del ${}^7_4\text{Be}$ y del ${}^9_4\text{Be}$ son 7.016930 u y 9.012183 u , respectivamente. Determina cual es más estable.

Datos: Masas atómicas: ${}^1_0\text{n}$: 1.008665 u ; ${}^1_1\text{H}$: 1.007825 u

Selectividad 1998

Solución: El defecto de masa por nucleón del berilio 7 es $-5.76 \times 10^{-3} \text{ u/nucleón}$ y el defecto de masa por nucleón del berilio 9 es $-6.94 \times 10^{-3} \text{ u/nucleón}$. El berilio 9 es más estable que el berilio 7.

A.13 Determina la energía, expresada en eV, que se libera en la siguiente reacción de fusión

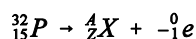


Datos: $m({}^3_1\text{H}) = 3.016049 \text{ u}$; $m({}^4_2\text{He}) = 4.002603 \text{ u}$; $m({}^1_0\text{n}) = 1.008665 \text{ u}$; $u = 931.5 \text{ MeV}$

Selectividad 1999

Solución: El defecto de masa de la reacción es $\Delta m = -0.012165 \text{ u}$. La energía desprendida es $\Delta E = -0.012165 \times 931.5 \text{ MeV}$

A.14 El núcleo ${}_{13}^{32}\text{P}$ se desintegra emitiendo un electrón según la reacción



(a) Determina los valores de A y Z del núcleo hijo. (b) Si la masa atómica del ${}_{13}^{32}\text{P}$ es 31.973908 u y la energía cinética del electrón es 1.71 MeV, calcula la masa del núcleo X.

Datos: masa del electrón, $m_e = 0.00055$ u; 1 u equivale a 931.5 MeV

Selectividad 1998

Solución: (a) Z = 16; A = 32. (b) 31.971522 u

En la figura 6 se representa la energía de enlace por nucleón para los isótopos naturales en función del número másico A, es decir, en función del número de nucleones. Se observa que la mayor estabilidad corresponde a los elementos de masa atómica media.

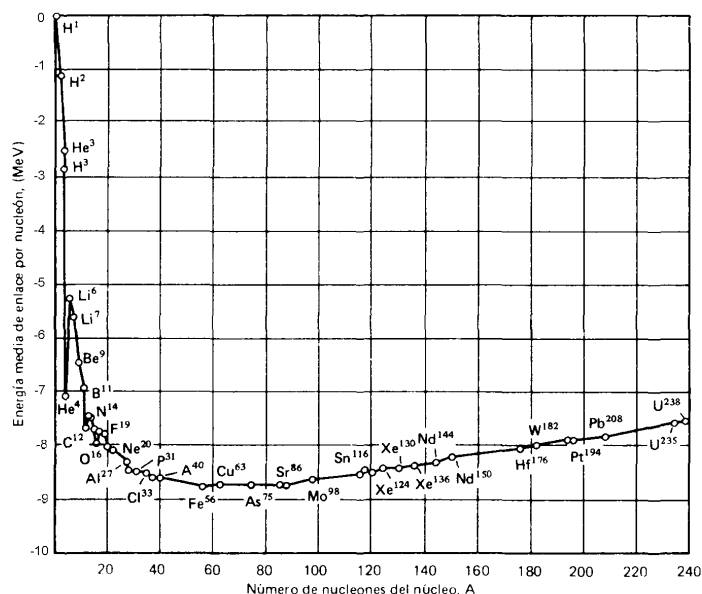


Figura 6 Energía de enlace por nucleón para isótopos naturales representada en función del número de nucleones. Se aprecia que la máxima estabilidad corresponde a isótopos de masa atómica media. La energía asociada a la interacción fuerte es negativa, como corresponde a una interacción de atracción.

Resulta fácil interpretar este hecho. La disminución progresiva de la estabilidad que se observa para los elementos de elevado número másico se comprende si tenemos en cuenta el corto alcance de la interacción fuerte. En núcleos voluminosos, cada nucleón no puede estar ligado más que con los nucleones más próximos. En vez de una unión general se tienen cadenas de unión. A esto se añade que el aumento de protones supone un crecimiento paralelo de la repulsión eléctrica y, en consecuencia los núcleos resultan menos estables. De hecho la proporción de neutrones aumenta conforme los átomos son mayores para contrarrestar el aumento de las fuerzas repulsivas. Así, por ejemplo, en el nitrógeno 14 encontramos 7 protones y 7 neutrones, mientras que en uranio 238 hay 92 protones y 146 neutrones.

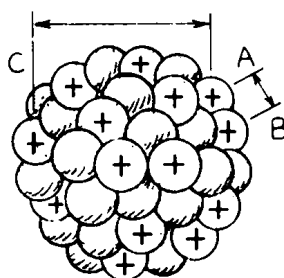


Figura 7 En un átomo voluminoso cada nucleón sólo está ligado por interacción fuerte con los nucleones próximos. Esto provoca que el núcleo sea más inestable. Entre los protones A y B existe atracción fuerte y repulsión eléctrica, pero entre los protones A y C la única interacción relevante es la repulsión eléctrica.

Por el contrario, en el caso de isótopos ligeros, cuyo núcleo es menos voluminoso, el incremento del número de nucleones provoca un aumento de la interacción fuerte superior al que experimentan las fuerzas de repulsión eléctrica entre protones, lo que origina un crecimiento de la estabilidad conforme aumenta el número atómico.

También se aprecian en la *figura 6* una serie de “picos” para el Helio 4, carbono 12 y oxígeno 16, que indican una estabilidad superior de dichos isótopos respecto a los más próximos. Todo parece indicar que en los núcleos existen agrupaciones de nucleones que poseen más estabilidad que otras.

4.2 La desintegración β y la interacción débil

El modelo de núcleo formado por protones y neutrones sometidos a interacción fuerte explicaba aceptablemente no solo la estabilidad nuclear sino también las emisiones de radiación alfa y gamma. Sin embargo, la radiación beta presentaba un problema grave de interpretación. La energía con la que era emitido el electrón no parecía cumplir la ley de conservación de la masa energía.

En cualquier proceso de desintegración, la cantidad de energía que se libera está determinada por la diferencia entre la masa energía inicial y la masa energía final. En una desintegración alfa particular cada partícula alfa lleva la misma energía cinética. Sin embargo, en una desintegración beta concreta la energía cinética de los electrones emitidos no siempre es la misma. Por ejemplo, en la desintegración beta del cobre 64 se produce un defecto de masa de 0.653 MeV. Cabría esperar que la energía cinética de los electrones emitidos fuera de 0.653 MeV. Pero de hecho la energía de los mismos tiene cualquier valor comprendido entre 0 y 0.653 MeV.

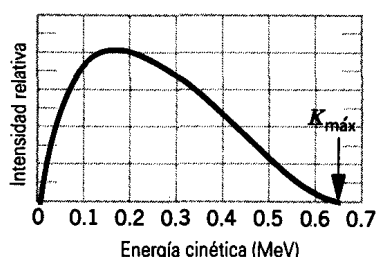
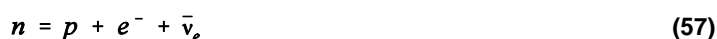


Figura 8 En la desintegración beta la energía del electrón emitido toma cualquier valor entre 0 y 0.653 MeV, pero en todos los casos se produce un defecto de masa de 0.653 MeV.

Este resultado era tan desconcertante que condujo a muchos físicos de renombre, incluido Bohr, a especular que quizá la ley de la conservación de la energía, en las desintegraciones beta, solo tenía validez estadística. Una hipótesis más lógica fue propuesta en 1931 por Pauli y desarrollada posteriormente como teoría en 1934 por Fermi. Consistía en suponer que, al mismo tiempo que el electrón, se emitía otra partícula, de manera que el defecto de masa de la desintegración se repartía entre la energía cinética de ambas partículas, satisfaciéndose la conservación de la masa energía. La nueva partícula debería ser neutra (puesto que el núcleo, al perder un electrón, ve aumentada su carga positiva en una unidad) y de masa muy pequeña, prácticamente nula. Estas características de neutralidad y pequeña masa llevaron a designarla como **neutrino**, que en italiano quiere decir pequeño neutrón. En la actualidad se la conoce como antineutrino electrónico y se designa por $\bar{\nu}_e$. Evidentemente se trataba de una partícula difícilmente detectable y, efectivamente, se tardó más de 25 años en tener alguna prueba experimental de su existencia.

Resuelto el problema de la conservación de la masa energía, todavía quedaba por explicar el propio origen de los electrones que, como sabemos, no forman parte del núcleo. La respuesta la proporcionaría el estudio del comportamiento de los neutrones libres, fuera del núcleo. Un neutrón libre es inestable y se transforma en un protón con emisión de un electrón y un antineutrino electrónico, según el proceso



Es cierto que la situación del neutrón en el interior del núcleo es muy diferente a cuando se encuentra libre y, gracias a la interacción fuerte, el neutrón es estable (más adelante desarrollaremos esta idea). Pero cuando un núcleo se encuentra en un estado inestable, debido a una proporción inadecuada de protones y neutrones, la estabilidad puede alcanzarse gracias a la transformación de neutrones en protones con la consiguiente emisión de electrones y antineutrinos electrónicos.

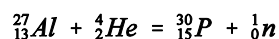
La desintegración beta fue explicada por Fermi mediante una teoría que la podemos considerar como una generalización de la propuesta por Bohr para justificar los espectros discontinuos de los átomos. Un átomo emite un fotón (cuanto de radiación electromagnética) cuando un electrón cambia de nivel energético. En el transcurso de la desintegración beta el neutrón no cambia de energía, sino de naturaleza, pues se convierte en protón, pero, a fin de cuentas, se trata de una “transición”. Fermi supuso que el cuanto liberado en esta “transición” consistía en una pareja de partículas, el electrón y el antineutrino electrónico. Pero para que la descripción fuera coherente necesitó suponer la existencia de un nuevo tipo de interacción fundamental que llamó **interacción débil**. El alcance de la interacción débil es del orden de 10^{-15} m, similar al de la interacción fuerte, pero su intensidad es mucho menor, unas 10^7 veces más pequeña. Es por ello que *la interacción débil no juega ningún papel en la estabilidad nuclear siendo sólo relevante en procesos de desintegración de partículas elementales*.

5 Reacciones nucleares

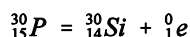
En un principio, las únicas reacciones nucleares que se podían estudiar eran las que se producen, de forma espontánea, en los procesos de desintegración de los isótopos radiactivos que se encuentran en la naturaleza. Esto suponía una limitación a la hora de investigar la composición y estructura del núcleo que fue superada en 1919 por Rutherford, al conseguir la primera reacción nuclear artificial bombardeando nitrógeno con partículas alfa (ver página 7). A partir de entonces la técnica del bombardeo se ha utilizado para inducir innumerables reacciones nucleares cuyo análisis nos ha permitido descubrir la extraordinaria complejidad del mundo subnuclear. Pero el interés por las reacciones nucleares no fue nunca sólo teórico. Desde el principio atrajo la idea de poderlas emplear como fuente de energía. Y antes de que ello fuera posible condujeron al descubrimiento de la radiactividad artificial.

5.1 La radiactividad artificial

En 1934 Irene Curie y F. Foliot, cuyos trabajos habían tenido gran relevancia en la detección experimental del neutrón (ver página 8), realizaron un descubrimiento sorprendente. Estudiaban la producción de neutrones bombardeando aluminio 27 con partículas alfa según la reacción



cuando constataron que, además de los protones, se obtenían otras partículas, los llamados positrones, cuya masa era la misma que la de los electrones y cuya carga también era como la de los electrones, pero positiva. Por entonces los positrones ya se conocían, su presencia había sido detectada en los “rayos cósmicos”, es decir, en las radiaciones llegadas a la Tierra desde el espacio exterior. Lo realmente importante era que, a diferencia de los neutrones, la emisión de positrones no cesaba cuando dejaba de bombardearse el aluminio. Esta emisión decrecía con el tiempo de forma exponencial, como ocurre con las emisiones radiactivas. La conjetura más razonable era considerar que el isótopo fósforo 30 era un isótopo radiactivo que se desintegraba espontáneamente emitiendo positrones según la reacción



La comprobación de esta hipótesis condujo a suponer *la existencia de muchos más elementos radiactivos que, debido a su corto período de semidesintegración, no se encontraban en la naturaleza*.

Un gran número de investigadores se interesó por el nuevo fenómeno de la radiactividad artificial y se llegaron así a obtener alrededor de un millar de isótopos radiactivos artificiales, muchos de ellos de gran interés en todo tipo de investigaciones (ver Anexo I).

Por otra parte la emisión de positrones puso de manifiesto que podían existir otros modos de desintegración además de las desintegraciones alfa y beta observadas en la radiactividad natural. Se comprobó que la desintegración con emisión de positrones tenía las mismas características que la desintegración beta: requería la emisión de algún tipo de partícula adicional para que se satisficiera la conservación de la masa energía. Es por ello que recibió el nombre de radiación beta positiva, β^+ y, en el contexto de la teoría de Fermi, se entendió como la consecuencia de la “transición” de un protón a un neutrón

$$p = n + e^+ + \nu_e \quad (60)$$

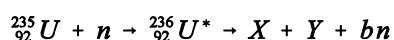
El neutrino que se emite en este caso tiene la misma masa que el de la desintegración beta⁴, pero no es exactamente igual. Se llama neutrino electrónico. Más adelante, cuando hayamos introducido los conceptos de partícula y antipartícula reflexionaremos sobre las simetrías presentes en la pareja de desintegraciones beta.

5.2 La fisión nuclear

Desde el momento en el que se descubrió el neutrón (ver página 8) se pensó que sería muy útil para bombardear núcleos de gran tamaño. En este tipo de núcleos las partículas alfa y los protones no son buenos proyectiles al ser frenados por la elevada carga positiva del núcleo. Sin embargo los neutrones, al carecer de carga, no experimenta ninguna repulsión eléctrica cuando se acercan a la superficie nuclear. Así, pese a que los neutrones no pueden ser acelerados mediante diferencias de potencial, y son lentos en comparación con las velocidades que es posible conferir a protones y partículas alfa, pueden llegar a interactuar con cualquier núcleo por grande que sea. De hecho, los llamados neutrones térmicos, que son neutrones cuya velocidad es la debida a la temperatura ambiente, son partículas de bombardeo efectivas.

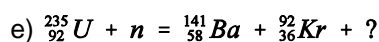
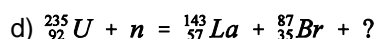
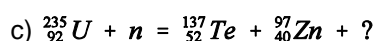
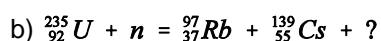
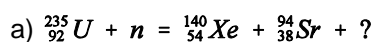
Fue el propio Fermi quien comprobó que al bombardear diversos elementos con neutrones se conseguían fabricar nuevos isótopos radiactivos. En 1939, los químicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann, continuando el trabajo iniciado por Fermi, realizaron un descubrimiento sorprendente. Al bombardear uranio ($Z=92$) con neutrones térmicos, entre los nuevos isótopos radiactivos que aparecían detectaron uno que correspondía al bario ($Z=56$). ¿Cómo era posible que a partir de un elemento pesado se hubiera producido uno de masa media? No tuvieron más que pasar unas semanas para que los físicos Lise Meitner y Otto Frisch desvelaran el enigma. Demostraron que el núcleo de uranio, tras absorber un neutrón, se dividía en dos partes casi iguales. A este proceso lo llamaron fisión nuclear.

Cuando el neutrón alcanza el núcleo de uranio 235 se forma el isótopo uranio 236. Este isótopo es muy inestable e inmediatamente se parte en dos. Los fragmentos de la fisión no siempre son los mismos. Se trata de núcleos de masa media que por lo general son altamente radiactivos. El proceso genérico puede representarse por



donde X e Y son los fragmentos de la fisión y b corresponde al número de neutrones liberados, que en promedio es de 2.47.

A. 14 A continuación se indican incompletas algunas de las reacciones típicas de fisión del uranio 235. Indica en cada caso cuantos neutrones se producen.



La radioactividad de los fragmentos de fisión se debe a que contienen un exceso de neutrones. En los núcleos grandes como el de uranio, la proporción de neutrones es considerablemente mayor que en los núcleos medianos. Así, pese a que en la fisión se liberan neutrones, los fragmentos siguen poseyéndolos en exceso y alcanzan la estabilidad mediante sucesivas desintegraciones beta.

Si observamos la figura 6, en la que se representa como varía la energía de enlace por nucleón en función del número másico, podemos apreciar que los isótopos que resultan de la fisión del uranio 235 tienen mayor energía de enlace por nucleón que este. Como la energía de enlace es negativa, si al final hay más energía de enlace por nucleón, ello quiere decir que la energía ha disminuido y, por tanto, se ha desprendido energía. La enorme trascendencia que tuvo el descubrimiento de la fisión del uranio 235

⁴ En ocasiones, para distinguir claramente los dos tipos de desintegración beta, se llama desintegración beta negativa, β^- a la desintegración con emisión de electrones. Si no se especifica la desintegración beta debe entenderse como desintegración beta negativa.

se debe a que se trata de un proceso en el que se liberan ingentes cantidades de energía. La energía que se origina en la fisión de un átomo de uranio 235 es siete millones de veces la energía que se produce en la explosión de una molécula de TNT.

Además es relativamente sencillo darse cuenta de que la fisión del uranio 235 puede originar una reacción en cadena. Un solo neutrón produce la fisión del núcleo y en el proceso se emiten, por término medio, dos o tres neutrones. Estos neutrones pueden a su vez provocar la fisión de dos o tres nuevos núcleos, lo que produce entre cuatro y nueve neutrones más. Si cada uno de ellos consigue dividir un núcleo, el siguiente paso de la reacción generará entre 8 y 27 neutrones, y así sucesivamente. Si se dispone de la suficiente cantidad de uranio 235 la reacción en cadena que se genera origina una terrible explosión. En esto consiste una bomba atómica.

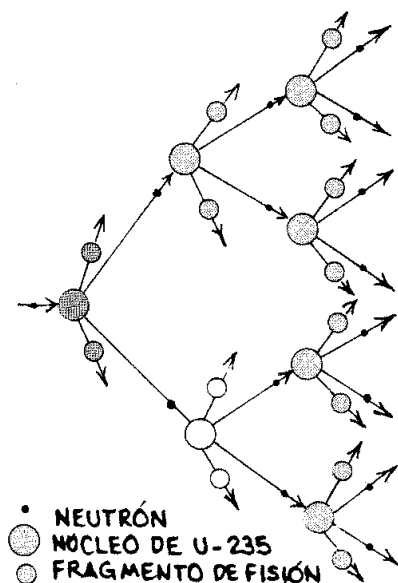


Figura 9 Por término medio la fisión de un núcleo de uranio 235 produce entre 2 y tres neutrones. Un solo neutrón puede originar una reacción en cadena en la que el número de núcleos que se fisionan crece muy rápidamente.

¿Por qué no se producen reacciones en cadena en los depósitos de mineral de uranio que existen en la naturaleza? Esto ocurriría si todos los isótopos de uranio se fisionasen con la misma facilidad. La fisión se da principalmente en el isótopo 235, que constituye tan solo el 0.7% de los átomos de uranio. Mucho más abundante es el isótopo 238 que tiene la capacidad de absorber los neutrones procedentes de la fisión del 235 sin dividirse. De esta manera, el uranio 238, gracias a su capacidad de absorber neutrones, amortigua toda reacción en cadena que pueda iniciarse en el uranio natural.

En los reactores de las centrales nucleares se genera calor mediante procesos de fisión de uranio 235 que se mantienen controlados para que no den lugar a reacciones en cadena. El control se consigue mediante materiales que absorban neutrones, para que el ritmo de fisiones se mantenga constante sin incrementarse. El combustible consiste en un 3% de uranio 235 diluido en un 97% uranio 238 y, además, en él se insertan barras de sustancias como el cadmio o el boro que tienen una gran capacidad para absorber neutrones.

5.3 La fusión nuclear

Si observamos la gráfica de la figura 6, en la que se representa como varía la energía de enlace por nucleón en función del número másico, podemos apreciar que el intervalo de mayor pendiente es el que va del hidrógeno al hierro. En el caso de los núcleos ligeros se obtiene energía cuando los núcleos se fusionan o se unen, y no cuando se dividen. Es este el proceso de fusión nuclear, opuesto al de fisión nuclear. Mientras que en la fisión se libera energía cuando los núcleos pesados se dividen, si se trata de núcleos ligeros se obtiene energía cuando dichos núcleos se fusionan. Después de la fusión de núcleos ligeros, la masa total es menor que antes de la fusión, de la misma manera que después de la fisión de un átomo pesado la masa resultante también es menor que antes de la fisión.

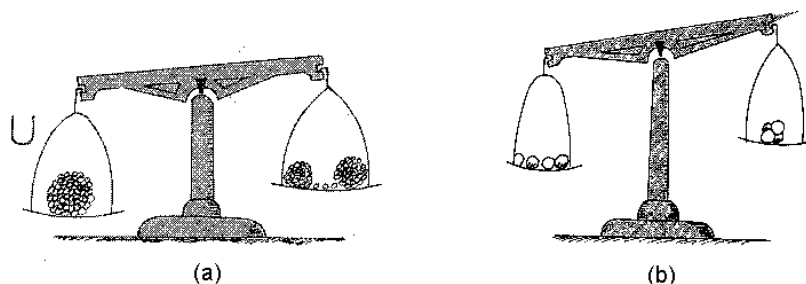


Figura 10 (a) En la fisión de un átomo pesado, la masa de los productos que resultan de la fisión es menor que la masa del átomo inicial. (b) En la fusión de dos átomos ligeros, la masa del átomo resultante es menor que la masa de los átomos que se fusionan. El defecto de masa corresponde a la energía que pierden los nucleones en el proceso. Esta energía se libera de diversas formas: como energía cinética de las nuevas partículas, ondas electromagnéticas...

Como los núcleos atómicos tienen carga positiva, para que se produzca la fusión es preciso que choquen con velocidades muy elevadas a fin de vencer la repulsión eléctrica. Las velocidades necesarias corresponden a las altas temperaturas del Sol y las estrellas. Cuando la fusión se lleva a cabo gracias a que la temperatura es muy alta, se llama fusión termonuclear: Las elevadas temperaturas del Sol permiten que unos 657 millones de toneladas de hidrógeno se transformen en 653 millones de toneladas de helio cada segundo. Los 4 millones de toneladas de diferencia se emiten en forma de energía radiante. La fusión termonuclear es análoga a la combustión química ordinaria. En ambos casos se requieren temperaturas altas para iniciar la reacción; pero una vez desencadenada, la energía liberada por la propia reacción mantiene la temperatura adecuada para que ésta continúe produciéndose.

Los científicos han sido capaces de generar reacciones de fusión termonuclear incontroladas, son las llamadas bombas de hidrógeno, en las que la temperatura necesaria para que comience la fusión se obtiene mediante la explosión de una bomba atómica de fisión. Sin embargo, nos encontramos todavía muy lejos de lograr reacciones de fusión en condiciones controladas, que pudieran ser utilizadas como fuentes de energía pacífica. El problema fundamental es que cualquier material se funde y se evapora a las temperaturas a las que tiene lugar la fusión.

6 Partículas elementales

La búsqueda de los constituyentes últimos de la naturaleza a partir de los cuales interpretar la complejidad de la realidad, está presente en toda la actividad científica desde sus orígenes. Hacia finales del siglo XIX, el concepto de átomo parecía que iba a proporcionar una respuesta definitiva. En aquellos tiempos, aún cuando la tabla periódica no estaba ni mucho menos completa, todo hacía suponer que cuando ello se lograra, se dispondría de un catálogo relativamente escueto de todos los posibles entes distintos que conformaban la materia.

Con el descubrimiento de que el átomo poseía estructura, la búsqueda de los constituyentes últimos pasó de la química a la física atómica y nuclear. El mundo subatómico rápidamente mostró ser de una complejidad extraordinaria. El estudio de los procesos de desintegración llevó a intuir que tanto los protones como los neutrones debían tener estructura, ya que se transformaban unos en otros en las desintegración beta positiva y beta negativa, emitiendo electrones, positrones y neutrinos. Paralelamente el análisis de la radiación cósmica permitió descubrir nuevas partículas distintas de las anteriores. Conforme ha sido posible desarrollar experimentos más complejos, el número de partículas detectadas ha crecido; actualmente pasa con mucho del centenar.

En este nuevo dominio de la física, conocido como física de partículas o física de alta energía, encontramos un gran número de problemas para los que en el presente carecemos de solución. Quisiéramos poder contar con una teoría que nos permitiera comprender por qué existen las partículas elementales que existen, y por qué tienen las propiedades que tienen. En otras palabras, esperamos que sea posible formular unos pocos principios fundamentales que nos permitan explicar la gran multitud de fenómenos que han sido observados. Pero hoy por hoy no existe una teoría general de las partículas elementales. Solo contamos con resultados parciales.

6.1 Partículas y antipartículas

A finales de los años veinte el físico Paul Dirac estaba intentando desarrollar una versión de la mecánica cuántica de Heisenberg y Schrödinger que a su vez cumpliera con los postulados de la relatividad especial. En el curso de su trabajo dio con un resultado sorprendente: la ecuación que había obtenido para describir un electrón libre, es decir un electrón no sometido a interacción, admitía la existencia de valores de energía negativos. A primera vista parecía una predicción absurda. Un electrón sólo puede tener energía negativa si está ligado por una atracción, por ejemplo cuando forma parte de un átomo. Dirac interpretó que las soluciones de energía negativa del electrón en verdad no correspondían al electrón sino a una partícula de la misma masa del electrón y carga de igual magnitud, pero positiva. Esta partícula fue detectada en los rayos cósmicos y en la desintegración beta positiva y se llamó positrón.

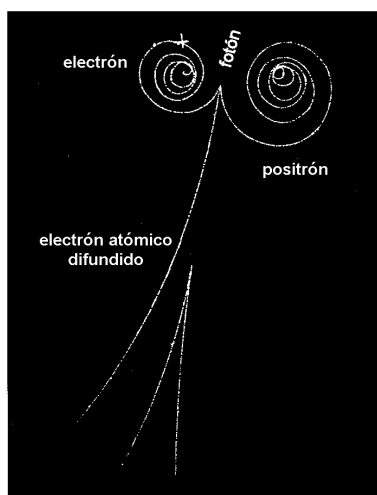


Figura 11 Creación de una pareja electrón positrón debido a la colisión de un fotón gamma con un electrón atómico. El fenómeno se ha estudiado en una cámara de burbujas (medio en el que las distintas partículas dejan trazas de su trayectoria) sometida a un fuerte campo magnético. El fotón entra por la parte superior (no deja traza) y colisiona con un electrón atómico. Como consecuencia del choque el electrón atómico es arrancado del átomo y se difunde con una gran velocidad (el radio de curvatura de su trayectoria es muy grande). En el choque se genera una pareja de electrón positrón con velocidades claramente inferiores a las del electrón difundido. Como el electrón y el positrón tienen cargas opuestas, en el campo magnético en el que se encuentran giran con sentidos contrarios.

Los positrones son partículas muy raras en nuestro universo. Es posible detectar la aparición de parejas electrón positrón en fenómenos en los que participan los fotones de alta energía de la radiación gamma. Por ejemplo cuando un fotón gamma choca con un electrón atómico. Pero la vida de los positrones es muy corta ya que interactúan con los electrones produciendo a su vez fotones gamma.

Tras el descubrimiento del positrón, quedó patente que a cada tipo de partícula le correspondía una antipartícula, dotada de la misma masa y cantidades conservadas similares aunque con valor de carga eléctrica contrario. Así tenemos protón y antiprotón, neutrino y antineutrino...

En las desintegraciones beta podemos observar ciertas simetrías partícula antipartícula. Si las comparamos

$$\begin{aligned} \text{desintegración } \beta^+ & \quad p = n + e^+ + \nu_e \\ \text{desintegración } \beta^- & \quad n = p + e^- + \bar{\nu}_e \end{aligned} \quad (67)$$

vemos que el positrón que se emite en la desintegración beta positiva es la antipartícula del electrón que se emite en la beta negativa. Y lo mismo ocurre con los neutrinos. El antineutrino de la desintegración beta negativa es la antipartícula del neutrino de la desintegración beta positiva. Si en la transición del protón al neutrón se emite una pareja partícula antipartícula resulta que en la transición contraria se emite la combinación opuesta de partícula antipartícula.

6.2 Las partículas mediadoras de las interacciones llamadas bosones

La ley de la gravitación de Newton y la ley de la electrostática de Coulomb se asentaban en la idea de acción a distancia. Las partículas se ejercen fuerzas entre sí sin que la interacción esté sustentada en ninguna realidad material. Más adelante este concepto se reemplazó por la noción de campo. Dos partículas interactúan a través de los campos que establecen. Una partícula crea un campo y la otra interactúa con ese campo, en lugar de directamente con la primera partícula. La teoría cuántica lleva esta noción más allá, al suponer que los campos mismos están cuantizados. Desde este punto de vista, en lugar de decir que la primera partícula crea el campo, decimos que emite cuantos de campo. La segunda

partícula absorbe estos cuantos de campo. Por ejemplo, la fuerza electromagnética entre dos partículas puede interpretarse como emisión y absorción de fotones (los cuantos del campo electromagnético). Cada tipo de interacción tiene sus cuantos de campo propios.

Tabla 1 Partículas mediadoras de las interacciones

Interacción	Partícula	Símbolo	Carga (e)	Energía en reposo (GeV)
Gravitación	Gravitón (?)	?	0 (?)	0
Débil	Bosones (3)	W^+ y W^-	± 1	80.6
		Z^0	0	91.2
Electromagnética	Fotón	γ	0	0
Fuerte	Gluones (8)	g	0	0

Hoy en día tenemos constancia experimental de los cuantos asociados con todas las interacciones conocidas menos la gravitatoria. Además disponemos de una teoría unitaria capaz de describir conjuntamente la interacción débil y la interacción electromagnética. También pensamos que estas partículas son elementales, es decir, carecen de estructura y no están formadas por otras.

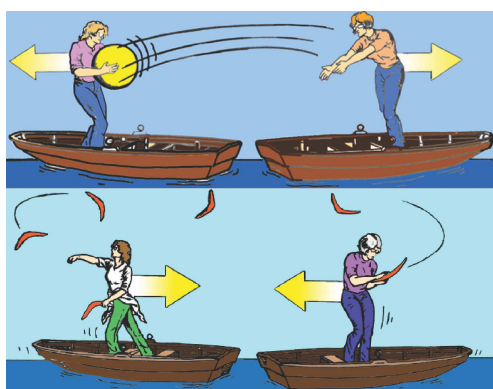


Figura 12 En la figura se aparece una analogía que suele utilizarse para explicar la interacción entendida como intercambio de partículas. Si dos personas sobre sendas barcas se lanzan un balón la una a la otra, el efecto sería equivalente al de una repulsión entre ellas. Si por el contrario se lanzaran un bumerang el efecto sería equivalente al de una atracción. Como toda analogía no hay que tomarla al pie de la letra. Si pensamos en la atracción y repulsión eléctrica como intercambio de fotones no hay que considerar que hay fotones "pelota" y fotones "bumerang".

6.3 Los bosones y la indefinición energía tiempo

Cuando hablamos de los fotones como partículas mediadoras de la interacción electromagnética hablamos de unos fotones que se han generado de una forma completamente diferente a los fotones que se emiten cuando una carga vibra o cuando un electrón cambia de nivel energético en un átomo.

Para entenderlo vamos a recurrir a una analogía financiera. Para empezar imagina un banco social que presta dinero sin interés (aunque no lo creas existen). Cuando una persona coge dinero del banco puede hacer el uso de él como quiera, pero el dinero nunca será suyo. Siempre será del banco. Más pronto o más tarde la persona debe devolver el dinero. Como se trata de un banco social devuelve exactamente la misma cantidad que cogió.

Ahora vamos a pensar en otro tipo de banco. Lo vamos a llamar banco social cuántico. Este banco tiene unas reglas un poco extrañas. La primera regla es que si coges dinero del banco resulta que el dinero es realmente tuyo durante un intervalo de tiempo y solo debes devolverlo si continuas poseyéndolo pasado dicho intervalo de tiempo. Ello quiere decir que si durante el intervalo de tiempo que el dinero es tuyo, tú se lo entregas a otra persona, no debes devolverlo al banco. La segunda regla es que el tiempo que el dinero es de tu propiedad es inversamente proporcional a la cantidad de dinero. Así, si el banco te traspasa la propiedad de un euro durante un segundo, la propiedad de un millón de euros te la traspasaría durante una millonésima de segundo. La tercera y última regla es que todas las transacciones

se hacen de golpe. Sea un euro o un millón lo que has cogido, debes traspasarlo íntegramente a otra persona, o devolverlo íntegramente al banco.

¿Qué tiene todo eso que ver con los fotones como partículas mediadoras de la interacción electromagnética? Resulta que el espacio vacío entendido como campo electromagnético funciona como un banco social cuántico. Un electrón puede coger energía del campo para emitir fotones, pero esta energía solo será propiedad del fotón durante un determinado tiempo, pasado el cual el fotón desaparece y la energía vuelve al campo. Se dice que el electrón emite *fotones virtuales*. Todo es como si no emitiera nada... menos en caso de que el *fotón virtual*, durante su limitada existencia, se encuentre con otro electrón. Entonces desaparece produciéndose la interacción entre ambos electrones.

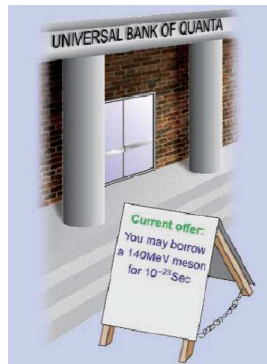


Figura 13 La analogía del banco cuántico permite entender como se generan los bosones virtuales que son intermediarios de las interacciones

Debemos llamar la atención que este mecanismo supone una violación local de la conservación de la energía. Es cierto que al final del proceso global la energía se conserva (la energía que el fotón virtual extrae del campo finalmente se convierte en movimiento de los dos electrones que interactúan o retorna al campo) pero localmente, durante un intervalo de tiempo, suponemos que la conservación de la energía se viola al generarse el fotón virtual a partir del campo. Como en el caso del banco cuántico se satisface que cuanto más energía tiene el fotón virtual durante menos tiempo existe. En otras palabras. Cuanto mayor es la violación de la conservación de la energía durante menos tiempo se mantiene dicha violación.

¿Cómo podemos aceptar esta violación de la conservación de la energía? Aunque parezca sorprendente se deduce de los principios en los que se basa la física cuántica. De hecho se justifica a partir del único de los postulados de la física cuántica que has estudiado. En su momento vimos que una de las relaciones de indefinición de Heisenberg establecía una relación entre la indefinición de la energía de un sistema ΔE y el intervalo característico de su evolución $\Delta \tau$

$$\Delta E \Delta \tau \geq \frac{\hbar}{2\pi} \quad (68)$$

En su origen esta expresión se entendió como una limitación a la hora de determinar con precisión la energía de un sistema. Si para medir la energía de un sistema necesitamos utilizar un intervalo de tiempo $\Delta \tau$, entonces la medida de dicha energía está indefinida en una cantidad ΔE . Esto permite admitir que se viole la conservación de la energía en una cantidad ΔE , siempre que esta violación dure menos que $\Delta \tau$

Lo sorprendente es que esta forma extraña que tiene el campo de prestar energía a las partículas virtuales que median las interacciones explica de forma simple como la intensidad de las interacciones decrece con la distancia. Si un electrón emite un fotón virtual de mucha energía, este produce una interacción muy fuerte, pero como dura muy poco tiempo, esa interacción fuerte solo puede ser con electrones próximos al emisor, por el contrario, si el fotón tiene poca energía, tendrá una existencia mas larga, puede viajar más lejos, aunque la interacción resultante será más pequeña.

6.4 Los leptones y los quarks

Actualmente clasificamos las partículas en función de las interacciones en la que participan. Con este criterio podemos considerar dos familias de partículas: los leptones y los hadrones. La diferencia entre ellas consiste en que los leptones no participan en la interacción fuerte mientras que los hadrones sí. Tanto leptones como hadrones sufren la interacción electromagnética y la interacción débil.

Hoy en día conocemos seis **leptones** (con sus correspondientes antipartículas) que aparecen como tres pares de partículas. Cada par incluye una partícula cargada negativamente y una partícula sin carga. De una de estas parejas ya hemos hablado. Son el electrón (e^-) y el neutrino del electrón (ν_e). Las otras dos parejas son las formadas por el muon (μ^-) y el neutrino del muon (ν_μ) y el tau (τ^-) y el neutrino del tau (ν_τ).

El electrón, el muón y el tau tienen la misma carga negativa pero diferente masa. De ellos solo el electrón es estable. Tanto el muón como el tau sufren procesos de desintegración que conducen a la formación de electrones con emisión de diferentes tipos de neutrinos y antineutrinos.

Por lo que se refiere a los neutrinos, de acuerdo con ciertas teorías carecen de masa (en consecuencia viajan a la velocidad de la luz) y son estables. Otras teorías pronostican que los neutrinos tienen una masa pequeña y se transforman entre sí. Hasta la fecha no existe evidencia experimental suficiente para dilucidar esta controversia, aún cuando la opinión generalizada es la de que los neutrinos tienen una masa muy pequeña.

Hasta el día de hoy, consideramos que los leptones son partículas elementales en el mismo sentido que las partículas que median las interacciones. Si bien los leptones se transforman unos en otros, en ningún experimento se ha conseguido descomponerlos en entes menores. Tampoco ha sido posible detectar su tamaño.

Tabla 2 Los leptones

Partícula	Símbolo	Carga (e)	Energía en reposo (MeV)	Vida media (s)
Electrón	e^-	-1	0.511	∞
Neutrino del electrón	ν_e	0	<0.0000022	∞
Muon	μ^-	-1	105.66	2.2×10^{-6}
Neutrino del muon	ν_μ	0	<0.19	∞
Tau	τ^-	-1	1776.84	3.0×10^{-13}
Neutrino tau	ν_τ	0	<18.2	∞

El número de **hadrones** conocido pasa del centenar. Dos hadrones a los que hemos hecho referencia son el protón y el neutrón. A partir de mediados de los años sesenta del siglo XX comenzó a imponerse la idea de que los hadrones tenían estructura interna. Estaban formadas por otras partículas llamadas quarks.

Como en el caso de los leptones conocemos seis quarks (con sus correspondientes antipartículas) que aparecen en parejas. Cada pareja está formada por un quark de carga eléctrica positiva $2/3 e$ y otro de carga eléctrica negativa $-1/3 e$. La primera pareja que se descubrió es la formada por el quark arriba (u) y el quark abajo (d), el primero de carga eléctrica positiva y el segundo de carga eléctrica negativa. Estos quarks son los constituyentes de los protones y los neutrones. Un protón está formado por dos quarks u y un quark d , mientras que un neutrón está constituido por un quark u y dos quarks d .

Las dos parejas de quarks restantes son las formadas por el quark de carga positiva encanto (c) y el quark de carga negativa extraño (s) y por el quark de carga positiva cima (t) y el quark de carga negativa fondo (b).

Como en el caso de los leptones los quarks también se transforman unos en otros. Un ejemplo es la desintegración beta negativa.

$$n = p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (69)$$

La conversión de un neutrón (quarks ddu) en un protón (quarks duu) quiere decir que un quark d se ha transformado en un quark u produciéndose en el proceso la emisión del electrón y el antineutrino electrónico.

Tabla 3 Los quarks

Partícula	Símbolo	Carga (e)	Energía en reposo (MeV)
Up (Arriba)	u	+ 2/3	3
Down (Abajo)	d	- 1/3	6
Charm (Encanto)	c	+ 2/3	1240
Strange (Extraño)	s	- 1/3	95
Top (Cima)	t	+ 2/3	172500
Bottom (Fondo)	b	- 1/3	4200

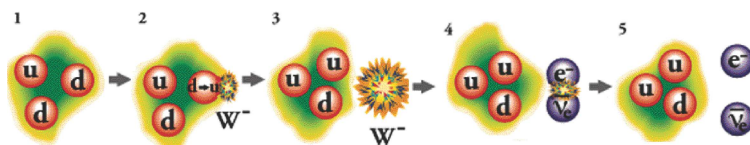


Figura 14 Explicación fundamental de la desintegración β^- . Uno de los quarks d del neutrón se transforma en un quark u emitiendo un bosón W^- . Este bosón se transforma en un electrón y un antineutrino electrónico.

Entender que partículas elementales, carentes de estructura, puedan transformarse unas en otras parece una contradicción irresoluble y, de hecho, es uno de los retos que hoy po hoy tiene planteados la física. En la actualidad una de las especulaciones más atarctivas, no carente de problemas, es la llamada teoría de cuerdas. En ella las partículas elementales son consideradas como pequeñas cuerdas en vibración. Desde este punto de vista las diferentes partículas elementales corresponderían a distintos modos de vibración de un único tipo de cuerda subyacente, como la escala de notas que produce la cuerda de un violín.

¿Será esta la última gran unificación? También puede ocurrir que bajo la simplicidad alcanzada se esconda una nueva capa de complejidad, que los propios quarks y leptones tengan estructura y por ello se transformen unos en otros. En cualquier caso este es un adecuado punto final para el presente curso de física.

Las tres generaciones de la Materia (Fermiones)

	I	II	III	
masa→	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0
carga→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre→	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	6 MeV $-\frac{1}{3}$	95 MeV $-\frac{1}{3}$	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$	0
	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2 eV 0	<0.19 MeV 0	<18.2 MeV 0	90.2 GeV 0
	$\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	Z fuerza débil
Leptones	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$	106 MeV -1 $\frac{1}{2}$	1.78 GeV -1 $\frac{1}{2}$	80.4 GeV ± 1 1
	e electron	μ muon	τ tau	W^\pm fuerza débil

Bosons (Fuerzas)

Figura 15 Cuadro resumen de las partículas elementales. La primera columna corresponde a las partículas que forman los átomos de la materia ordinaria. La segunda y tercera columna son partículas elementales inestables que terminan decayendo a partículas de la primera columna. La cuarta columna corresponde a las bosones responsables de intermediar las interacciones.

Anexo I: Aplicaciones de la radiactividad

Bombardeando materiales con neutrones y otras partículas se ha conseguido hacer isótopos radiactivos de todos los elementos. Dichos isótopos son baratos, abundantes y útiles para la investigación científica y la industria.

Los investigadores de la agricultura mezclan una pequeña cantidad de isótopos radiactivos con los fertilizantes antes de aplicarlos a las plantas. Al crecer las plantas, la cantidad de fertilizante que absorben se mide fácilmente por medio de detectores de radiación. A partir de estas mediciones, los investigadores pueden informar a los agricultores sobre la cantidad correcta de fertilizante que se ha de usar. Cuando se emplean de esta manera los isótopos radiactivos se conocen como **indicadores**.

En medicina, los indicadores se utilizan para estudiar el proceso de la digestión y la forma en que se desplazan las sustancias químicas en el cuerpo. Un paciente ingiere alimentos que contienen una pequeña cantidad de isótopos radiactivos; esto permite seguirles la pista con ayuda de un detector de radiación. Este método también se usa para estudiar la circulación sanguínea.

Los ingenieros estudian el desgaste de diversas partes de un motor experimental haciendo las paredes de los cilindros de un material radiactivo. Cuando el motor está en funcionamiento, las juntas de los pistones rozan las paredes de los cilindros. Las diminutas partículas de material radiactivo que se desprenden por desgaste caen al aceite lubricante, donde sus cantidades pueden medirse por medio de un detector de radiación. La prueba se repite usando distintos tipos de aceite. De esta manera el ingeniero puede determinar cual produce el menor grado de desgaste.

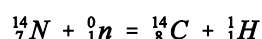


Figura 16 Otra aplicación de los isótopos radiactivos como indicadores es la de localizar fugas de agua en tuberías.

Hay cientos de ejemplos adicionales del uso de isótopos radiactivos como indicadores. Lo importante es que esta técnica permite detectar y contar átomos de muestras de materiales que son tan pequeñas que ni se podrían observar por el microscopio.

Los isótopos radiactivos también se emplean como **fuentes de radiación**. En medicina los tumores cancerígenos se tratan irradiándolos. En agricultura la radioactividad sirve para esterilizar alimentos, combatir plagas, o inducir cambios genéticos con los que crear especies transgénicas. En química determinadas reacciones se activan mediante radiación.

Otra aplicación de los isótopos radiactivos es su utilización como **datadores**. El datador más conocido es el carbono 14. La parte superior de la atmósfera recibe un bombardeo continuo de rayos cósmicos (partículas de alta energía y radiación gamma procedente del espacio exterior). En consecuencia muchos átomos de las capas superiores de la atmósfera sufren transmutaciones. Debido a ello por toda la atmósfera se dispersan protones y neutrones. La mayoría de los protones no tardan en atrapar electrones sueltos para convertirse en átomos de hidrógeno en las capas más elevadas de la atmósfera, pero los neutrones recorren grandes distancias gracias a que no tienen carga y no interactúan eléctricamente con la materia. Tarde o temprano muchos de ellos chocarán con los átomos de las capas inferiores de la atmósfera. Si los captura un núcleo de nitrógeno puede producirse la siguiente reacción

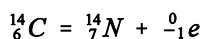


como consecuencia de la cual se origina el isótopo carbono 14 que es inestable, es decir, radiactivo.

Casi todo el carbono que existe está en forma del isótopo estable carbono 12. Pero debido a la radiación cósmica existe en la atmósfera una porción de carbono 14 que representa menos de una cienmillonésima

parte del carbono atmosférico. Estos dos isótopos se combinan con el oxígeno para formar dióxido de carbono, que es absorbido por las plantas. Así resulta que todas las plantas contienen una pequeña cantidad de carbono 14 radiactivo. Ahora bien, todos los animales comen plantas o comen animales que comen plantas, por lo tanto, tienen un poco de carbono 14. En definitiva, todo ser vivo contiene un poco de carbono 14.

El carbono 14 sufre desintegración beta, convirtiéndose otra vez en nitrógeno según la reacción



Como las plantas vivas absorben continuamente carbono 14, la desintegración queda compensada por este permanente reabastecimiento. Los átomos que se desintegran son sustituidos por nuevos átomos de carbono 14. De esta forma se establece un equilibrio gracias al cual la proporción de átomos de carbono 14 respecto a los de carbono 12 es constante. El reabastecimiento se interrumpe cuando el animal o la planta muere. El porcentaje de carbono 14 empieza entonces a disminuir. Cuanto más tiempo haya estado muerto el organismo, menor es la cantidad de carbono 14 que queda.

Sabemos que la vida media del carbono 14 es de unos 5730 años. Esto significa que la mitad de los átomos de carbono 14 que contiene actualmente un cuerpo, planta o árbol, se habrán desintegrado al cabo de 5730 años. Por tanto la radioactividad de los seres vivos decrece poco a poco, a un ritmo sostenido, después de la muerte.

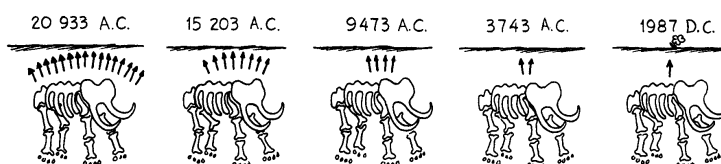


Figura 17 El número de isótopos de carbono radiactivo que contiene el esqueleto se reduce a la mitad cada 5730 años.

Los arqueólogos hacen uso de la prueba del carbono 14 para establecer la época de artefactos de madera y esqueletos. Esta técnica tiene una incertidumbre de alrededor del 15% debido a la fluctuación en la producción de carbono 14 a lo largo de los siglos.

A. 15 Una muestra de carbón de madera procedente de un tronco de ciprés de la tumba de un faraón egipcio tiene una relación carbono 14 / carbono 12 que es el 54.2% de la que presenta el carbón actual. Determina aproximadamente cuando se cortó el ciprés.

Dato: periodo de semidesintegración del carbono 14 = 5730 años

Solución: Denotamos el periodo de semidesintegración como $T_{1/2}$. Si consideramos que el número de átomos de carbono 14 que inicialmente tiene la muestra es N_0 , transcurrido el intervalo de tiempo Δt que queremos determinar, la fracción de átomos sin desintegrar es $N/N_0 = 0.542$. Se obtiene entonces que

$$\Delta t = -T_{1/2} \frac{\log \frac{N}{N_0}}{\log 2} = 5063 \text{ yr}$$

Anexo II: Radiactividad, efectos sobre el organismo y dosis.

La radiactividad es más antigua que la especie humana. Forma parte de nuestro entorno tanto como el Sol o la lluvia. Es la fuente de calor de la Tierra y mantiene su interior fundido. De hecho, es la desintegración radiactiva en el interior de la Tierra lo que calienta el agua de un geiser o de un pozo natural de aguas termales. Incluso el helio del globo de un niño no es otra cosa que partículas alfa que fueron producidas por desintegración radiactiva.

La mayor parte de la radiación a la que estamos expuestos tiene un origen natural. Se encuentra en el suelo que pisamos y en los tabiques y piedras de los edificios que nos rodean. Hasta el aire más puro que respiramos es levemente radiactivo. Esta radiación de fondo natural ya existía antes del surgimiento de la humanidad. Si nuestros cuerpos no estuviesen hechos para tolerarla no estaríamos aquí.

Gran parte de la radiación a la que estamos expuestos es radiación cósmica, que se compone de núcleos atómicos provenientes del Sol, las estrellas y otros objetos astronómicos. El campo magnético de la Tierra desvía la mayor parte de los rayos cósmicos, así que jamás llegan a la superficie. La atmósfera también nos protege de la mayor parte de los rayos cósmicos. La radiación es relativamente más intensa a mayor altitud. En dos viajes de ida y vuelta entre Madrid y Moscú recibes tanta radiación como en una radiografía pectoral. El tiempo que pasan en el aire los empleados de las líneas aéreas se restringe debido a esta radiación adicional.

El bombardeo cósmico más intenso viene en la forma de las partículas que menos daño nos pueden hacer, los neutrinos. Los neutrinos son las partículas más pequeñas que conocemos, su masa es casi nula, no tienen carga y se producen con mucha frecuencia en desintegraciones radiactivas. Son las partículas con alta rapidez más comunes que conocemos, se encuentran por todo el universo y cada segundo varios millones de millones de ellos atraviesan nuestro cuerpo sin encontrar obstáculo alguno. Pueden atravesar la Tierra de parte a parte, interactuando sólo ocasionalmente. Un bloque de plomo tendría que tener un espesor de 6 años luz para absorber la mitad de los neutrinos que inciden sobre él. En promedio, un neutrino se aloja en tu cuerpo alrededor de una vez al año. No oímos hablar mucho de los neutrinos porque los neutrinos no nos hacen el menor caso.

De los diversos tipos de radiación que hemos estudiado, el más peligroso es con mucho la radiación gamma. Emana de los materiales radiactivos y constituye la mayor parte de la radiación de fondo. La exposición a los rayos gamma debe reducirse al mínimo. Las células de los tejidos vivientes se componen de moléculas de intrincada estructura, rodeadas de una solución salina rica en iones. Cuando la radiación gamma incide sobre esta ordenada sopa produce daños a escala atómica. Una partícula beta hace menos daño, pues al atravesar tejidos vivientes choca con un porcentaje reducido de moléculas dejando a su paso un conjunto azaroso de moléculas alteradas o disociadas. Ya sea que el daño se deba a la radiación gamma o a la radiación beta, estas moléculas alteradas son con más frecuencia nocivas que benéficas para los procesos de la vida. Por ejemplo, una molécula de ADN alterada puede producir mutaciones genéticas perjudiciales.

Si la radiación no es demasiado intensa, las células pueden reparar la mayor parte del daño causado a las moléculas. Por eso podemos tolerar dosis pequeñas de radiación. Pero las personas que trabajan en entornos donde hay elevadas concentraciones de materiales radiactivos debe recibir capacitación y protección especiales a fin de evitar el riesgo de contraer cáncer. Lo anterior es válido para personas relacionadas con la medicina, los empleados de las plantas nucleares y la tripulación de barcos impulsados por energía nuclear. La probabilidad de contraer cáncer y vivir menos es mayor para las personas que reciben dosis elevadas de radiación (del orden de 1000 veces la radiación natural, o más). Siempre que sea posible es preciso evitar exponerse a la radiación. Pero la radiación natural que siempre han absorbido los seres vivos es inevitable.

La dosis de radiactividad es la cantidad de energía que se absorbe por unidad de masa sometida a radiación. En el Sistema Internacional se mide en **gray** que corresponde a 1 J/kg. Un submúltiplo es el **rad**, que corresponde a 10^{-2} J/kg.

Sin embargo, esta unidad no es la más significativa para medir el daño biológico causado por la radiación. Para ello se define la **dosis equivalente** que es el producto de la dosis absorbida por la **eficacia biológica relativa** (EBR). La EBR es el número de rad de radiación X de 250 W que produce el mismo daño biológico que 1 rad de la radiación dada. La unidad es el **rem**, que se define $1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times \text{EBR}$.

Según esta definición, un rem de un tipo cualquiera de radiación produce la misma magnitud de daño biológico. Pero 50 rem de neutrones rápidos son sólo 5 rad, mientras que 50 rem de rayos X son 50 rad, porque su EBR es, respectivamente, de 10 y 1.

Algunas legislaciones especifican el límite superior de radiación permisible para un individuo fijándolo en 0,5 rem. No obstante, como se cree que dosis aún más bajas aumentan los peligros de cáncer o de defectos genéticos, lo recomendable es mantener la dosis de radiación lo más baja posible. Dosis mayores pueden enrojecer la piel, reducir el número de glóbulos blancos y producir náuseas, fatiga y pérdida de vello. Una dosis de 400 rem durante un tiempo no muy grande es fatal en el 50% de los casos.