

Tema 13. Física nuclear

- 1 Introducción
2. Constitución y características del núcleo atómico
- 3 Energía de ligadura
- 4 Modelos nucleares
- 5 Estabilidad de los núcleos
- 6 Fuerzas nucleares
- 7 Radiactividad natural
- 8 Desintegración espontánea o natural de los núcleos
- 9 Familias o series radiactivas
- 10 Radiactividad artificial
- 11 Ley del decrecimiento radiactivo
- 12 Reacciones de fisión y fusión
- 13 Usos de la energía nuclear



El aparato de la figura se emplea para la exploración interna del cuerpo humano, mediante la aplicación de la resonancia magnética nuclear, en cámara abierta. Los primeros aparatos de esta clase se empezaron a emplear en la década de 1980, sin embargo hasta llegar a éstas y otras aplicaciones, hubo que andar un largo camino.

El estudio de la energía nuclear comenzó cuando Henri Becquerel en Abril de 1897 después de experimentar con sales de uranio, encontró que emitía una radiación invisible cuya naturaleza era desconocida. Las contribuciones del matrimonio Curie, Rutherford, Niels Bohr, Chadwick, Yukawa, Fermi, María Goeppert Mayer, Hans Jensen, entre muchos, han permitido controlar a favor de la Humanidad una fuente de energía cuyas aplicaciones prácticas han sido extraordinarias para el desarrollo y el bienestar: Producción de energía eléctrica, disposición de nuevos y potentes medios de diagnóstico de las enfermedades, procedimientos curativos contra el cáncer, aplicaciones tecnológicas para la industria y datación de la edad de los materiales fósiles. Además, en el futuro se desarrollarán nuevas centrales de fusión que facilitarán la energía eléctrica a menor coste y por tiempo ilimitado.

El inconveniente de la energía nuclear es el riesgo que supone la contaminación radiactiva si se usa irresponsablemente, sin embargo, todos los centros donde se emplean materiales nucleares están muy controlados por las autoridades, en España es el Consejo de Seguridad Nuclear. Las centrales de fusión del futuro, utilizarán elementos radiactivos de vida media muy inferior a la de los isótopos empleados en la actualidad, con lo que el riesgo radiactivo se reducirá muchísimo.

1. Introducción

La Física tiene como objetivo el conocimiento de la constitución y estructura de la materia, ocupándose desde el conjunto del Universo, hasta las partículas de dimensiones submicroscópicas. Los elementos que son las sustancias más simples conocidas, se componen de átomos de cuya constitución forman parte los electrones en la periferia y el núcleo, en el interior.

El núcleo atómico era desconocido por los científicos, hasta los primeros años del siglo XX. A partir de los experimentos de Rutherford, con la dispersión de partículas α , en 1911, Fig.12.1, se inicia una nueva etapa de descubrimientos que llevan a los científicos a profundizar en el conocimiento de la organización de las partículas subatómicas -de tamaño inferior al del átomo- y a descubrir las leyes que describen su comportamiento.

En este empeño han colaborado grandes científicos y premios Nobel durante todo el siglo XX, modificando los modelos nucleares iniciales a medida que no podían adaptarse a los nuevos datos experimentales. Los físicos han creado nuevos conceptos (la mecánica cuántica, la teoría cuántica de campos) para explicar otras partículas que se han ido descubriendo y han desvelado dos fuerzas fundamentales nuevas, la nuclear fuerte y la nuclear débil. Actualmente, es el llamado "modelo estándar" el que pretende dar las últimas explicaciones de la estructura de la materia. Además, los físicos están intentando elaborar desde hace varias décadas una teoría unificada de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, estando el problema abierto todavía.

Recordemos que el átomo se compone de electrones en la corteza envolviendo a un núcleo central. Son los electrones y sus niveles de energía los que determinan las propiedades químicas de un elemento. El número de electrones de un átomo neutro es igual al de protones y es el que determina su número atómico. El número de neutrones modifica la masa atómica, pero no altera los niveles de energía de los electrones, ni modifica las propiedades químicas del átomo.

2. Constitución y características del núcleo atómico.

El núcleo es la parte central del átomo, donde está concentrada casi la totalidad de la masa atómica y cuyo radio es unas cien mil veces menor que el del átomo. El núcleo se compone de partículas llamadas *nucleones*, encontrándose dos tipos: los protones y los neutrones.

El *protón* tiene carga eléctrica positiva, e igual en valor absoluto a la carga del electrón $1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Su masa es 1836 veces mayor que la masa del electrón y tiene de valor $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

En 1919, Rutherford expuso nitrógeno gaseoso a una fuente radiactiva de partículas alfa, algunas de las cuales colisionaban con los núcleos de los átomos del gas. Como consecuencia de las colisiones los átomos de nitrógeno se convertían en átomos de oxígeno y el núcleo emitía una partícula cargada positivamente. Se verificó que estas partículas positivas eran iguales que núcleos del hidrógeno, denominándose **protones**.

El *neutrón* carece de carga eléctrica y su masa es similar a la del protón aunque algo mayor. Fue descubierto por James Chadwick en 1932.

La masa del protón y del neutrón es aproximada a la *unidad de masa atómica*, u , definida como la doceava parte de la masa del isótopo del carbono 12 y de acuerdo con la ecuación de Einstein para la equivalencia

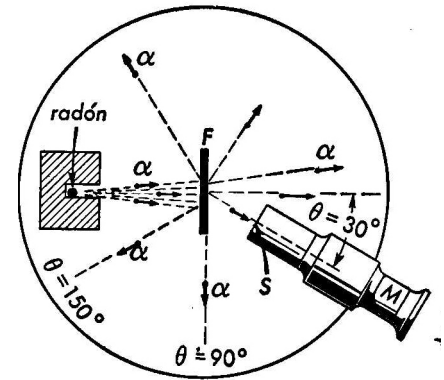


Fig.12.1. Experimento de dispersión de Rutherford de partículas α

Rutherford envió partículas α , (cargas positivas formada por núcleos del He), contra una fina lámina de oro y midió las direcciones en que eran dispersadas. Los resultados observados le indicaron que la carga positiva y la masa de cada átomo están confinadas en una región de diámetro comprendida entre 10^{-14} y 10^{-15} m. La propuesta de un átomo con núcleo fue formulada por Bohr algunos años después.

A la distancia 10^{-15} m, se le dio posteriormente el nombre de *fermi*, en reconocimiento de las contribuciones del físico italiano Enrico Fermi, a la Física Nuclear.

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

masa-energía, se puede determinar la correspondencia en energía de la unidad de masa atómica.

$$E = m \cdot c^2 \quad [12.1]$$

Donde $c = 3.10^8 \text{ m/s}$, es la velocidad de la luz en el vacío. Se puede determinar la equivalencia en energía correspondiente a la unidad de masa.

$$1 \text{ u} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \Rightarrow 931,1 \text{ MeV}$$

$$E = 1,6605 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ J} \frac{1 \text{ eV}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 931,1 \text{ MeV}$$

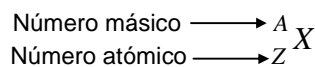
El número atómico Z, de cada elemento determina el número de protones de su núcleo y a su vez, el de electrones de la corteza.

El número de masa o número másico A, de un átomo, es igual a la suma de su número de protones Z, y de neutrones N.

$$A = Z + N \quad [12.2]$$

Se llaman **isótopos**, los átomos con igual número de protones en sus núcleos. Los que tienen el mismo número de neutrones se conocen como **isótonos** y los que tienen igual número másico se designan como **isóbaros**.

Hay átomos que tienen varios isótopos. Se llama **núclido** a cada una de las especies químicas, con un número atómico y un número másico definido. Se representa con el símbolo del elemento químico al que pertenece acompañado de un superíndice que es su número másico A y con subíndice que es su número atómico, Z. Para un elemento que designamos como X.



El oxígeno tiene varios isótopos, dos de ellos son:



El primer núclido tiene 8 protones y 8 neutrones, mientras que el segundo posee 8 protones y 16 neutrones.

Ejemplo 1

En la tabla se dan los números atómicos y de neutrones, de distintos núclidos. Cada columna tiene el mismo número atómico Z, y cada fila el mismo número de neutrones N. a) Sitúa en cada casilla el símbolo del núclido con su número másico, consultando la tabla periódica. b) Indica cuales son isótopos, isótonos e isóbaros.

Número atómico Z				
50	51	52	53	
				(Neutrones) 73
				72
				71

- a) Del número atómico Z se deduce el elemento y del número másico A, el núclido.

Masa del protón = 1,00728 u

Masa del neutrón = 1,00867 u

Masa del electrón = $5,486 \cdot 10^{-4}$ u

1 u = $1,6605 \cdot 10^{-27}$ kg

Número atómico Z				(Neutrones)
50	51	52	53	
^{123}Sn	^{124}Sb	^{125}Te	^{126}I	73
^{122}Sn	^{123}Sb	^{124}Te	^{125}I	72
^{121}Sn	^{122}Sb	^{123}Te	^{124}I	71

b) Son isótopos los núclidos de la misma columna. Son isótonos los núclidos de la misma fila. Son isóbaros los núclidos de las diagonales rayadas.

Tamaño del núcleo

Durante muchas décadas se tenía la creencia de que el núcleo atómico era esférico, sin embargo a partir de 1990, la necesidad de dar respuesta a nuevas observaciones experimentales derivó en tener que asignar al núcleo formas mucho más complejas, en la fig.12.2 se muestran algunas formas recientemente propuestas. Sin embargo, todavía sigue siendo útil la aproximación del núcleo por una esfera, verificándose que el volumen de un núcleo es proporcional al número de nucleones que contiene, es decir, a su número másico A.

Si es R, el radio de un núcleo, una ecuación que lo relaciona con el número másico A, es la siguiente:

$$R \approx R_0 \sqrt[3]{A} \quad [12.3]$$

Donde R_0 es una constante de valor: $R_0 \approx 1,1 \cdot 10^{-15} \text{ m} = 1,1 \text{ fm}$.

Ejemplo 2

Determina la densidad del núclido del uranio $^{238}_{92}\text{U}$, considerando que tuviese forma esférica.

Se calcula el radio nuclear con [12.3]: $R \approx R_0 \sqrt[3]{A} = 1,1 \cdot 10^{-15} \sqrt[3]{238} = 6,81 \cdot 10^{-15} \text{ m}$

Se determina el volumen: $V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi (6,81 \cdot 10^{-15} \text{ m})^3 = 1,32 \cdot 10^{-42} \text{ m}^3$

Se halla la densidad: $\rho = \frac{m}{V} = \frac{238 \text{ u}}{1,32 \cdot 10^{-42} \text{ m}^3} = \frac{238 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1,32 \cdot 10^{-42} \text{ m}^3} = 3 \cdot 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

La densidad de un núcleo es elevadísima, unas 10^{14} veces la densidad de un material rocoso. Para que nuestro planeta cuya masa es de $6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, y radio 6370 km , tuviese una densidad como la de un núcleo atómico, la esfera terrestre debería reducir su radio a solo 168 m . En efecto:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{M}{\rho}; \quad R = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M}{4 \pi \rho}}$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{4 \pi \cdot 3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3}} \approx 168 \text{ m}$$

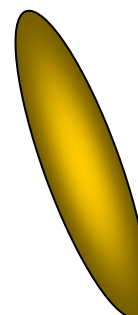
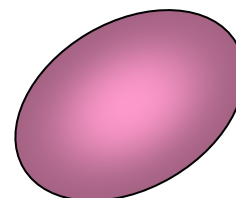
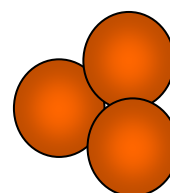
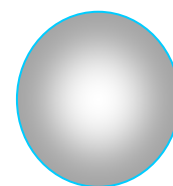


Fig.12.2 Algunas formas geométricas de los núcleo atómicos.

Mundo Científico nº 218, pág. 20.

3 Energía de ligadura o energía de enlace

Desde un punto de vista energético cabe preguntarse, ¿por qué se unen entre sí los nucleones para formar los núcleos atómicos, en lugar de seguir como elementos independientes?

Cuando los nucleones se asocian en un núcleo atómico sucede que la masa del sistema, es menor que la que tendrían los nucleones como partículas independientes. Se dice que se ha producido un **defecto de masa**, lo que de acuerdo con la ec.[12.1], significa que el núcleo formado, tiene menos energía que el conjunto de los nucleones antes de la formación de éste.

Sea un núcleo de masa M , número másico A y que contiene Z protones, siendo la masa del protón m_p y la del neutrón m_n . La pérdida de masa Δm , es la diferencia entre la masa de todas las partículas independientes, menos la masa de las partículas después de que ha formado el núcleo, es decir M .

$$\Delta m = [Z m_p + (A - Z) m_n] - M \quad [12.4]$$

La energía de este defecto de masa, determinada con la ec.[12.1] se conoce como **energía de ligadura**. Corresponde con la energía necesaria para disgregar un núcleo, llevando a los nucleones a distancias muy alejadas entre sí.

$$E_L = \Delta m \cdot c^2 = ([Z m_p + (A - Z) m_n] - M) \cdot c^2 \quad [12.5]$$

Un criterio útil para comparar la energía de ligadura de diferentes núcleos, es considerar **la energía de ligadura por nucleón**. Basta dividir la ec. [12.5] entre el número de nucleones A , fig.12.3. El valor máximo es $8,5 \text{ MeV/nucleón}$

$$e_L = \frac{E_L}{A}$$

Ejemplo 3

El deuterio es un isótopo del átomo de hidrógeno formado por un protón y un neutrón. Sabiendo que la masa del deuterio es $M_D = 2,014102 \text{ u}$. Determina: a) La energía de enlace del deuterio. b) La energía de enlace por nucleón.

Datos: $m_p = 1,00728 \text{ u}$; $m_n = 1,00867 \text{ u}$; $1 \text{ u} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

a) Aplicando la ec.[12.5].

$$E_L = ([Z m_p + (A - Z) m_n] - M_D) \cdot c^2 = ([1 \cdot 1,00728 \text{ u} + (2 - 1) 1,00867 \text{ u}] - 2,01210 \text{ u}) \cdot c^2$$

Expresándola en unidades del S.I.

$$E_L = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ u} \cdot c^2 = 3,85 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 5,75 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$E_L = 5,75 \cdot 10^{-15} \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} \approx 3,6 \cdot 10^6 \text{ eV} = 3,6 \text{ MeV}$$

b) La energía por nucleón es:

$$e_L = \frac{E_L}{A} = \frac{3,6 \text{ MeV}}{2} = 1,8 \text{ MeV}$$

- Siguiendo el mismo procedimiento verifica que para el núclido del oxígeno de masa atómica 16,00; la energía de enlace por nucleón es de $7,5 \text{ MeV}$.

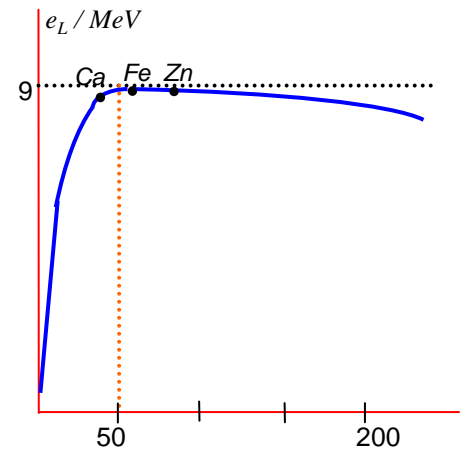


Fig.12.3 La energía de ligadura por nucleón alcanza sus máximos valores, para núcleos con números másicos A , comprendidos entre 50 y 70.

4 Modelos nucleares

El primer modelo nuclear fue propuesto por Niels Bohr en 1937, considerándolo como una especie de *gota líquida* que contenía protones y neutrones moviéndose con una desordenada agitación, fig.12.4. Imaginó muchas partículas dentro de un núcleo pesado, de forma esférica, efectuando movimientos parecidos a los de las moléculas dentro de una gota de agua. En un núcleo estable los nucleones se mueven con poca energía cinética, pero cuando éstos se mueven muy rápidamente aumentaban las posibilidades de desintegración nuclear.

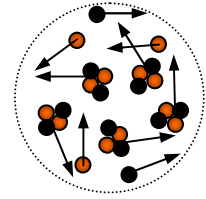


Fig.12.4. Modelo nuclear de la gota líquida, con los protones y neutrones en movimiento.

En 1949 María Goeppert Mayer y Hans Jensen (premios Nobel en 1963) descubrieron sorprendentes irregularidades en las propiedades del núcleo, sin embargo comprendieron que la estabilidad del núcleo dependía del número de protones y neutrones, y de su proporción mutua. Propusieron una nueva estructura del núcleo, en la que protones y neutrones estarían dispuestos independientemente unos de otros en capas distintas, obedeciendo las leyes de la mecánica cuántica, fig.12.5, y cuando éstos se disponen en la configuración de mínima energía, el núcleo se halla en el estado fundamental. Estas capas similares a las de una cebolla, tienen una capacidad limitada de nucleones y el número correspondiente al llenado completo de una capa, se designa como *un número mágico*. Entonces el núcleo adopta la forma esférica, conteniendo una capa cerrada de protones o neutrones.

Los números mágicos son: 2, 8, 20, 28, 40, 50, 82, 126 y 184 y aquellos núcleos en los que sus nucleones toman estos números son los más estables, en especial, los doblemente mágicos, en los que tanto el número de protones como el de neutrones corresponden con los números mágicos. Por ejemplo el helio 4 (2 protones y 2 neutrones), el oxígeno 16 (8 protones y 8 neutrones), el calcio 40 (20 protones y 20 neutrones), el níquel 56 (28 protones y 28 neutrones) o el plomo 208 (82 protones y 126 neutrones).

Representando en abscisas el número de neutrones N y en ordenadas el de protones Z , los distintos núclidos ocupan un punto del plano y aquellos que contienen los números mágicos son los de mayor estabilidad. Los núcleos más estables que se encuentran en la naturaleza ocupan una zona que se extiende hacia arriba partiendo del hidrógeno, e incluye los núcleos con números mágicos y doblemente mágicos

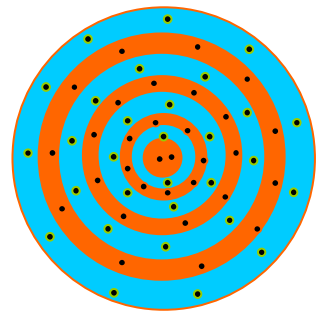


Fig.12.5 . El modelo de capas supone al núcleo formado por una serie de capas ocupadas por protones y neutrones. En la figura, las bandas rojas estarían ocupadas por protones y las azules por neutrones.

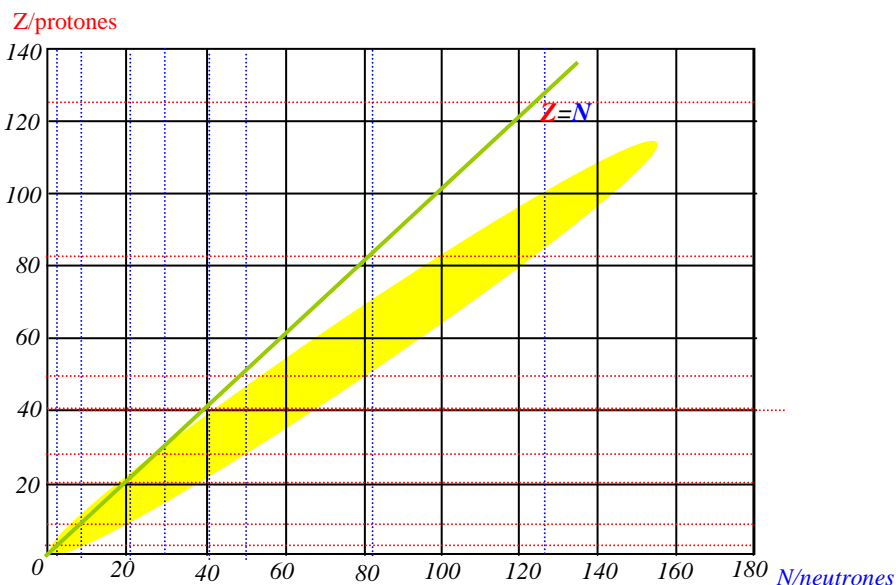


Fig.12.6. Zona de los núcleos de mayor estabilidad. Las líneas discontinuas representan a los números mágicos, protones en rojo y neutrones en azul.

Los núcleos cuyo número de protones y neutrones están cerca de los números mágicos también poseen buena estabilidad, lo que no sucede con aquellos que están más alejados.

Si una capa no está llena, los orbitales ocupados imponen su forma a la nube de nucleones y estos se deforman, siendo a veces la deformación tan grande que el núcleo puede ser doble de largo que de ancho, pudiendo provocar las deformaciones extremas, la ruptura del núcleo en fragmentos.

Una teoría actual es el *modelo estándar*. Considera el núcleo formado por nucleones pero estos en realidad no son partículas elementales, sino que tienen estructura interna, estando cada uno compuesto por tres quarks. Hay dos tipos de quarks denominados, "up" del inglés arriba y "down" abajo.

El protón con carga positiva, está formado por dos quarks arriba y un quark abajo (u,u,d), cada quark arriba tiene de carga eléctrica $+2/3$ y el quark abajo tiene de carga $-1/3$. El neutrón comprende dos quarks abajo y un quark arriba (u,d,d). Los quarks están unidos entre sí dentro de los nucleones mediante una partícula llamada gluón, fig.12.7.

5 Estabilidad de los núcleos

Los nucleones están sometidos en el núcleo a la interacción fuerte, a pesar de lo intensa que resulta esta fuerza de corto alcance el núcleo puede ser inestable y desintegrarse emitiendo partículas o energía electromagnética de alta frecuencia, el fenómeno se conoce como radiactividad. *La estabilidad de los núcleos depende del número de protones y neutrones y de su proporción correspondiente.*

El número atómico determina el de protones del núcleo y éste el de los electrones corticales, pues los átomos son neutros. El número de electrones y la disposición energética de los mismos determina las propiedades químicas de los elementos. Sin embargo, *el número de neutrones modifica la masa atómica, pero no altera los niveles de energía de los electrones por lo que no modifica las propiedades químicas del elemento.*

Todos los isótopos de un elemento actúan igual químicamente, pero tienen distinta masa atómica por tener diferente número de neutrones. No todos los isótopos tienen la misma estabilidad nuclear, los núcleos más fuertemente ligados son los que contienen un número de neutrones igual al de protones, o ligeramente superior. Así el núcleo del oxígeno con 8 protones y 8 neutrones, es el más estable de los 11 isótopos de este elemento.

En la Tierra se han encontrado unos 300 núcleos naturales y estos núcleos con la suficiente estabilidad para haber perdurado reúnen unas características en común: La energía que liga sus nucleones es fuerte y casi independiente del núcleo considerado, aproximadamente 8 MeV, por nucleón, además, la proporción entre neutrones y protones varía desde 1 para núcleos ligeros a 1,4 para los pesados y, finalmente la densidad de protones y neutrones en el interior del núcleo es prácticamente la misma.

Desde que Fréderick e Irene Joliot-Curie demostraran en 1934 que se pueden crear en el laboratorio nuevos núcleos artificiales, han sido más de 2000 las nuevas especies sintetizadas. La longevidad de los núcleos artificiales (también llamados exóticos) puede ir desde menos de una milésima de segundo, hasta varios años. Mediante la emisión de radiactividad van transformándose en núcleos más estables, que están situados en la zona central de la fig.12.6. Los núcleos más pequeños se sitúan sobre la recta o cerca de ella.

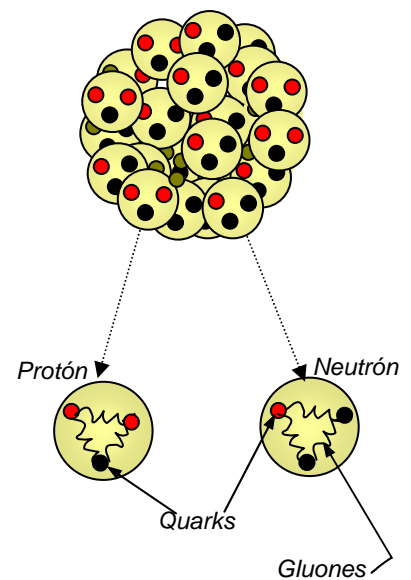


Fig.12.7 Núcleo atómico con protones, neutrones y quarks.

6 Fuerzas nucleares

Antes de descubrirse la radiactividad se habían identificado 2 fuerzas fundamentales, la gravitatoria y la electromagnética. Con los conocimientos relativos al núcleo y a los fenómenos radiactivos los físicos tuvieron que especular con la presencia de una nueva fuerza fundamental y no fue una, sino dos las que reconocieron.

Los físicos de los años treinta se preguntaban, ¿cómo es posible que los protones no se repelan en el núcleo, siendo cargas del mismo signo?. La razón es que experimentan una fuerza muy vigorosa que a corta distancia es más intensa que la fuerza electromagnética. En 1935, el japonés Yukawa, elaboró una teoría sobre esta fuerza nuclear, cuyos aspectos más generales aún siguen siendo aceptados, se designó enseguida como **fuerza nuclear fuerte**.

Como el tamaño del núcleo es muy pequeño, esta fuerza tendría que ejercerse a poca distancia, se llama de corto alcance. Cuando Chadwick descubrió el neutrón se demostró enseguida, que esta fuerza se ejercía también entre neutrones, entre protones o entre un protón y un neutrón.

La interacción electromagnética es tanto más repulsiva cuanto más protones halla y tanto más cerca se encuentren. La interacción nuclear fuerte es de corto alcance y cada nucleón solamente es atraído por sus vecinos cercanos. En definitiva la estabilidad de los núcleos dependerá de la relación entre la repulsión electrostática y la atracción fuerte entre los nucleones. Cuando el número de protones aumenta, la repulsión electrostática acaba por vencer la atracción fuerte y el núcleo se fractura. El arbitraje entre estas dos fuerzas corre a cargo de la mecánica cuántica y la estabilidad se alcanza cuando la relación entre el número de protones y de neutrones corresponde con los de los llamados números mágicos.

Sin embargo, con la fuerza nuclear fuerte no se podían explicar todos los sucesos que acontecían con el núcleo atómico, como por ejemplo la transformación de un neutrón en un protón, cuando desde un núcleo radiactivo se producía la emisión de un electrón (partícula β). Hizo falta introducir una cuarta fuerza fundamental de intensidad más débil que la anterior, que se designó como **fuerza nuclear débil**, de la que volveremos a hablar más adelante.

7 Radiactividad natural

Henri Becquerel en Abril de 1897 después de llevar experimentando más de un año con sales de uranio, confirmó, que emitía una radiación invisible que parecía no decaer con el tiempo y que desconocía su naturaleza y, ¿de dónde tomaba la energía emitida?. Se llamaron rayos Becquerel.

En Octubre del mismo año Marie Curie, opta por estudiar los rayos Becquerel, midiendo la intensidad de la radiación. Además se pregunta si también existirán otras sustancias que emitan espontáneamente radiaciones, capaces de ionizar el aire, descargar un electroscopio e impresionar una placa fotográfica puesta al lado en la obscuridad. Encuentra que hay otros metales como el torio y algunos más de pesos atómicos altos, pero destaca que hay dos sales de uranio (la peblenda y la calcolita) que tienen más actividad que el propio metal, lo que le hizo pensar que podrían contener otras sustancias más activas que el uranio. Tras un largo y tedioso proceso de concentración del mineral que daba mayor actividad, logra junto con su esposo Pierre Curie, descubrir un nuevo elemento, el polonio. En la publicación que hacen al respecto aparece por

Interacción fuerte

Se da en el núcleo atómico, su alcance es de 10^{-15} m. Le asignamos como intensidad relativa 1.

Electromagnética

Está en el átomo y entre los átomos, su alcance es infinito. Su intensidad es 10^{-2} veces la interacción fuerte.

Interacción débil

Aparece en las desintegraciones radiactivas, y el alcance es menor de 10^{-17} m. Su intensidad es 10^{-12} veces la interacción fuerte.

Interacción gravitatoria

Actúa entre las masas del universo, su alcance es infinito. Su intensidad es 10^{-38} veces la interacción fuerte.

primera vez **la palabra radiactiva**. A la vez, en el transcurso de la experiencia encuentran otra nueva sustancia mucho más radiactiva que el uranio, la designan como el radio.

La radiactividad da lugar al nacimiento de nuevas disciplinas como la física nuclear, la radioquímica, la datación radiactiva, etc. Las aplicaciones a la medicina y en particular la radioterapia se inicia en 1901, mientras que la utilización de la energía nuclear comienza en 1940. Becquerel y los esposos Curie reciben en 1903 el premio Nobel de Física por el descubrimiento de la radiactividad.

En los estudios realizados por Rutherford en 1899, concluye que la radiación del uranio es compleja y que está formada al menos por dos tipos de radiación, una la α , fácilmente absorbible y otra la β que es más penetrante. Los Curie descubren que los rayos β , tenía carga negativa por el modo en que eran desviados por los campos magnéticos y Becquerel que tenían masa. Paul Villard demuestra en 1900 que en la radiación del radio, había rayos no desviados pero muy penetrantes, denominados rayos γ , y que son considerados radiación electromagnética.

Numerosos experimentos confirmaron la semejanza entre los rayos catódicos y los rayos β . Estos rayos son electrones pero con velocidad mucho mayor que la de los rayos catódicos.

La determinación de la naturaleza de los rayos α , fue más complicado. Rutherford consigue desviarlos en un fuerte campo magnético, en 1902, comprendiendo que se trata de partículas pesadas con carga positiva y conjetura con Frederick Soddy que se trata de átomos de helio ionizados, lo que verifican posteriormente.

La materia radiactiva experimenta una transformación en la que se emite energía mediante partículas más pequeñas que el átomo, α y β , o como radiación electromagnética γ , fig.12.8

Los átomos radiactivos al emitir la radiactividad van transformando sus núcleos en otros elementos, pero su número decrece exponencialmente con el tiempo, siendo la intensidad de la radiación proporcional al número de átomos que quedan en cada instante. En definitiva, la radiactividad consiste en la transmutación espontánea de un elemento a otro, por emisión de radiación que puede ser mediante partículas cargada α ó β , y ondas electromagnéticas, radiación γ .

8 Desintegración espontánea o natural de los núcleos

Desde que se descubrió la radiactividad, causó mucho asombro que los núcleos expulsaran partículas α , β y γ , que eran distintas de las residentes en el núcleo atómico, protones y neutrones. Los físicos se preguntaban porque no se emitían estas partículas y ante la evidencia de los hechos experimentales, consideraron razonable suponer que entre las partículas estables del núcleo debería actuar la fuerza llamada interacción fuerte y esta interacción obligaría a un aporte de energía exterior, para que el núcleo pudiera expulsar un nucleón.

Los núcleos que designamos como inestables, recurren a otros mecanismos para expulsar aquellas partículas que constituyen la radiactividad y que ahora analizaremos separadamente. En todas las reacciones nucleares las partículas expulsadas salen con energía cinética, aunque su valor no se indique explícitamente mediante un número, junto a la reacción nuclear.

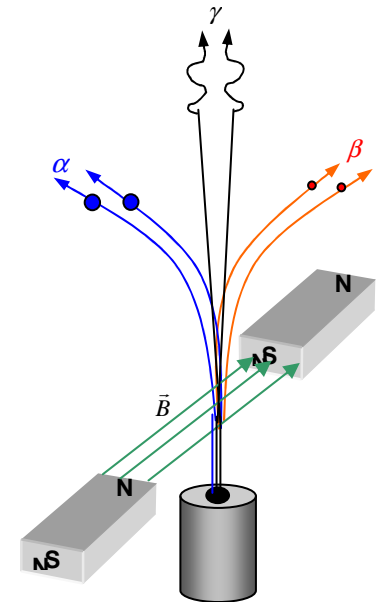


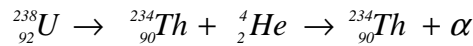
Fig.12.8. Al introducir en un orificio practicado en un bloque de plomo, un elemento radiactivo emisor de partículas, α , β y γ , las radiaciones salen en línea recta. Si se sitúa un campo magnético \vec{B} perpendicular a la dirección de las partículas, éste desvía las α y β , en sentido contrario, demostrando que tienen carga eléctrica de signo opuesto. Por el contrario, las partículas γ (que en realidad no son partículas) no son desviadas por el campo magnético de modo que carecen de carga eléctrica. Se trata de radiación electromagnética muy energética.

Emisión de núcleos de helio o partículas α

Determinados núcleos pesados como por ejemplo el núclido del uranio 238, tiene 92 protones y 146 neutrones. Al contener tantos nucleones resulta inestable y tiene que evacuar el exceso de nucleones, entonces para conseguirlo emite una partícula α . La razón de esta expulsión es que el sistema constituido por el elemento resultante y la partícula α , tienen una masa menor que la que tendría el sistema formado por el mismo átomo con los dos neutrones y dos protones libres. En consecuencia el proceso hacia la transición α es espontáneo.

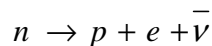
Al emitir una partícula α , el núcleo desprende dos neutrones y dos protones, y se transforma en un elemento del Sistema Periódico, cuyo número atómico Z retrocede en 2 unidades y el número másico A , en 4.

El uranio 238 al emitir una partícula α , se transforma en el torio (Th) 234. La reacción nuclear conocida como radiactividad α , se expresa.



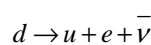
Emisión de partículas β que son electrones

Uno de los grandes enigmas de los físicos era explicar porque el núcleo que contenía neutrones y protones, podría emitir electrones que eran cargas negativas. La búsqueda de la respuesta no fue fácil, pues además la emisión de partículas β parecía que se violaba además, el principio de conservación de la energía. Wolfgang Pauli fue el primero en sugerir que al mismo tiempo que el electrón, podría emitirse otra partícula eléctricamente neutra y no detectada, que fuera portadora de la energía que se echaba en falta. Enrico Fermi bautizó a la supuesta partícula con el nombre de *neutrino* -pequeño neutrón- y elaboró la primera explicación de la radiactividad β , considerando que el neutrón se desintegraba en un protón, un electrón y un neutrino ν (partícula sin carga y de masa despreciable). En realidad, como se demostró posteriormente se trataba de la antipartícula del neutrino, llamada antineutrino $\bar{\nu}$, fig.12.9.



El proceso debe cumplir el principio de conservación de la carga eléctrica, creándose dos partículas con cargas iguales y de signos opuestos y el principio de conservación de la energía, sin embargo para dar coherencia a esta transformación fue necesario introducir la cuarta fuerza fundamental, la interacción débil.

La descripción de la radiactividad β se modificó en la década de los setenta, sin embargo la explicación no contradecía la dada por Fermi. Cuando se supo que el protón y el neutrón no era partículas fundamentales, por tener una estructura interna de quarks, fig.12.10. La transformación de un neutrón en protón, supone la transformación de un quark abajo, tipo d , en otro quark arriba, tipo u , es decir: $(u, d, d) \rightarrow (u, u, d)$. En consecuencia:



Pasando la interacción débil a ser una fuerza que actúa sobre los quarks, los electrones y los neutrinos.

En la emisión de radiación β , el número másico del núcleo progenitor no cambia, pero si varía el número atómico que aumenta en una unidad, por la

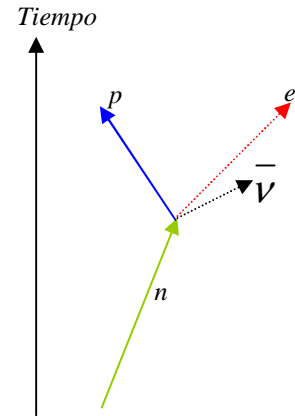


Fig.12.9. Diagrama de Feynman de acuerdo con la teoría de Fermi, en la que se representa la desintegración del neutrón a lo largo del tiempo. El neutrón se transforma en un protón, un electrón y un antineutrino.

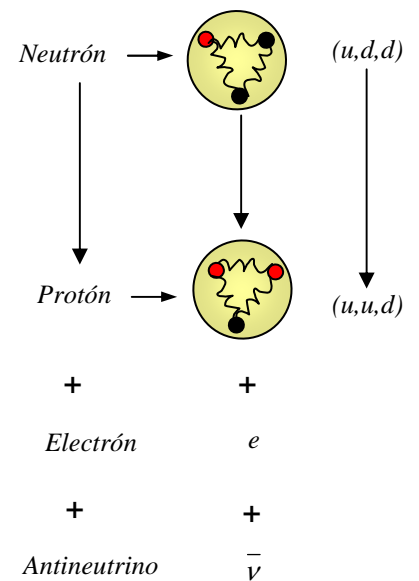
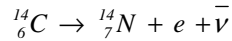


Fig.12.10 Emisión de radiactividad β mediante la transformación de un neutrón en protón, como modificación de un quark, d , en un quark u .

transformación de un neutrón en un protón. Así, el carbono ${}^{14}_6\text{C}$ pasa por emisión β , al nitrógeno ${}^{14}_7\text{N}$.



Emisión de radiactividad γ

Una buena parte de los núcleos poseen estados excitados, siendo entonces menos estables que en el estado fundamental, por tener más energía. Estos estados suelen tener una duración muy breve 10^{-10} s, porque los núcleos excitados emiten la energía en exceso en forma de radiación electromagnética de alta frecuencia, como **rayos γ** . Es un proceso similar a lo que acontece con los electrones, cuando el átomo se excita por una interacción exterior que desplaza a los electrones a niveles de energía más lejanos del núcleo, después, se desexcita emitiendo cuantos de radiación (luz).

Los protones y neutrones excitados, se reorganizan en el núcleo sin modificar sus respectivos números y al hacerlo liberan la energía excedente, que sale emitida en forma de un cuanto de frecuencia ν , (fotón) verificándose la ecuación de Planck, $\Delta E = h \cdot \nu$.

La radiactividad γ va asociada con otras formas de radiactividad α o β , pues en las desintegraciones radiactivas pueden quedar los núcleos excitados y la forma de relajarse es emitiendo un fotón γ .

La desintegración β del cobalto 60, produce el níquel 60 en un estado excitado, que adquiere la estabilidad después de emitir dos fotones γ sucesivos, con distintas energías.

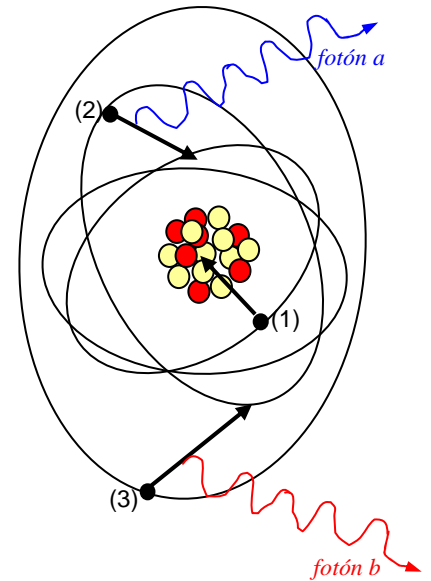
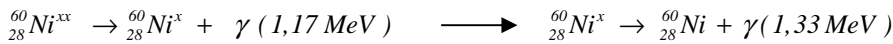
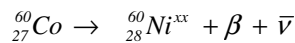
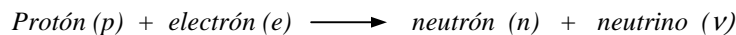


Fig.12.11. Al ser atrapado por el núcleo el electrón (1), inmediatamente salta a ocupar esta vacante en la órbita, el electrón (2), emitiendo el **fotón a**. A su vez, el electrón (3) pasa a ocupar la nueva vacante en la órbita más interna, emitiendo el **fotón b**.

Captura electrónica

Cuando un núcleo posee un número de protones que es excesivo respecto del número de neutrones, la solución más rentable energéticamente para conseguir la estabilidad, es transformar un protón en un neutrón, realizando la inversa de la radiactividad β , es decir, tomar un electrón y absorber a la par un antineutrino. Sin embargo, la probabilidad de que puedan producirse a la vez estos dos sucesos simultáneos es prácticamente nula, entonces el núcleo actúa absorbiendo un electrón de sus capas electrónicas y emite simultáneamente un neutrino, lo que equivale a la captura de un antineutrino. La reacción nuclear es:



Al igual que en la radiactividad β , la fuerza responsable de la transformación es la nuclear débil. Fue descubierta por Luis Walter Alvarez en 1937.

El electrón capturado es por lo general perteneciente a las capas electrónicas más internas, fig.12.11, por lo que deja un hueco que inmediatamente tiende a ser ocupado por electrones más lejanos al núcleo cubriendo esta vacante. De este modo se origina una cascada de fotones emitidos que va desde los rayos X hasta el visible, durante el tiempo en el que se estabiliza la corteza electrónica.