Tema 5: Fundamentos de Física nuclear

1. INTRODUCCION

Aunque la primera información acerca del núcleo atómico procede del descubrimiento de la radiactividad realizada por Becquerel en 1896, no fue hasta 1911 cuando Rutherford postuló su existencia a partir de los experimentos de dispersión de partículas α, como ya se mencionó en un tema anterior.

Sin embargo, inicialmente se pensó que el núcleo podía estar constituido por protones y electrones. En 1920 fue Rutherford, de nuevo, quien sugirió que podía existir una partícula neutra, a la que denominó **neutrón** (según él, posiblemente sería un protón y un electrón estrechamente ligados), que formara parte del núcleo junto a los protones.

En 1932 James Chadwick consiguió detectar el neutrón propuesto por Rutherford. Aunque él seguía sugiriendo que posiblemente estaba compuesto por un electrón y un protón en estrecha combinación, se ha abandonado esa idea porque el espín del neutrón es 1/2, valor que no sería posible en la hipotética composición electrón + protón.

2. PROPIEDADES DEL NÚCLEO

Por tanto, los núcleos de los átomos están constituidos por protones y neutrones, los cuales de forma genérica reciben el nombre de **nucleones.** La única excepción es el núcleo del hidrógeno ordinario que consta de un único protón.

- Denominamos **número atómico *Z*** al *número de protones del núcleo.* Este número coincide con el número de electrones del átomo neutro.
- Denominamos **número de neutrones *N*** al *número de neutrones del núcleo.*
- Denominamos **número másico *A*** al *número de nucleones del núcleo.*

Evidentemente se cumple la relación:

$$A = Z + N$$

	Carga eléctrica	**Masa (10^{-30} kg)**	**Espín**
Electrón	$-e$	0,911	1/2
Protón	$+e$	1674	1/2
Neutrón	0	1675	1/2

Propiedades del electrón, el protón, y el neutrón.

Cada tipo o especie de núcleo se denomina **núclido** y se caracteriza por su número atómico y su número de neutrones. Cada núclido se puede representar por el símbolo del elemento al que pertenece y un superíndice que indica su número másico. Por ejemplo, el núclido «nitrógeno-14» se representaría como ^{14}N. No obstante, se acostumbra a dar también su número atómico como subíndice, es decir, $^{14}_{7}N$.

Para designar a núcleos que tienen el mismo valor de *A, N* o *Z* se utilizan los términos *isótopo, isótono* e *isóbaro.*

- Denominamos **isótopos** a dos núclidos que tengan el *mismo número de protones Z***,** como por ejemplo ${}^{12}_{6}C$ y ${}^{14}_{6}C$.
- Denominamos **isótonos** a dos núclidos con el *mismo número de neutrones N,* como por ejemplo ${}^{31}_{15}P$ y ${}^{32}_{16}S$.
- Denominamos **isóbaros** a dos núclidos con el *mismo número másico A,* como por ejemplo ${}^{14}_{6}C$ y ${}^{14}_{7}N$.

- Tamaño y densidad del núcleo:

La propiedad más característica del núcleo es su tamaño. Los resultados experimentales muestran que la **forma** de la mayoría de los núcleos es aproximadamente **esférica.** Además se han llevado a cabo diferentes tipos de experimentos para determinar el **tamaño de los núcleos,** obteniéndose una relación empírica entre el radio promedio *r* y el número másico *A:*

$$r = r_0 A^{1/3}$$

donde r_0 es una constante empírica de valor $1{,}2 \cdot 10^{-15}$ m ≡ 1,2 fm.

NOTA: 10^{-15} m es un fentómetro. Debido a que en Física nuclear esta distancia suele ser muy común, se la suele tomar como unidad de medida conocida usualmente por el nombre de fermi (fm), en honor a Enrico Fermi.

A partir de la expresión anterior se llega a la conclusión de que **todos los núcleos tienen casi la misma densidad.**

$$\rho = \frac{masa}{volumen} = \frac{kA}{\frac{4}{3}\pi \cdot r^3} = \frac{kA}{\frac{4}{3}\pi \cdot r_0^3 A} = \frac{3k}{4\pi \cdot r_0^3} \approx \text{constante}$$

- Estabilidad nuclear:

En la figura 1 se ha representado el número de neutrones *N* frente al número atómico Z para los núclidos estables, que recibe el nombre de *diagrama de Segre.* A partir de Z > 83 no existen núclidos estables. La línea punteada indica la posición en que *N = Z.* De los aproximadamente 1500 núclidos diferentes conocidos, alrededor de 300 son estables, en tanto que los demás son radiactivos (inestables) con vidas medias que van desde una pequeña fracción de segundo hasta muchos años.

Puede comprobarse que para valores bajos del número atómico $Z \leq 20$ los núcleos están constituidos generalmente por el mismo número de protones y de neutrones, y que el número de neutrones excede cada vez más el de protones conforme aumenta el número atómico.

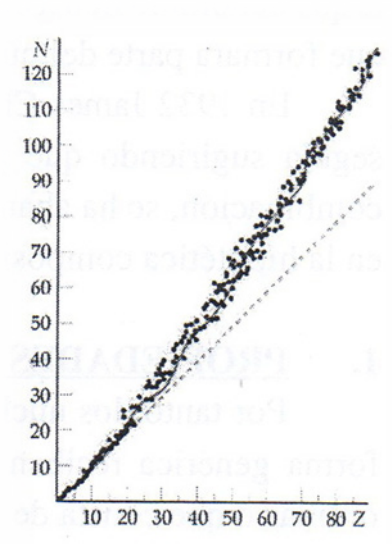


Figura 1: Diagrama de Segre

3. MASA NUCLEAR Y ENERGIA DE LIGADURA

3.1 - Fuerza nuclear y fuerza débil.

Para que existan los núcleos debe existir una fuerza de interacción que mantenga unidos a los nucleones dentro de una región del espacio extremadamente pequeña. A dicha fuerza se la denomina fuerza nuclear fuerte o más comúnmente **fuerza nuclear.**

- Características de la fuerza nuclear:

  - Los experimentos indican que la fuerza nuclear entre dos nucleones (protón-protón, protón-neutrón y neutrón-neutrón) es la misma y es independiente de su carga eléctrica.
  - El alcance de esta fuerza es del orden de 1 fm y su intensidad es unas 100 veces mayor que la fuerza electromagnética por lo que dicha fuerza supera a la fuerza eléctrica repulsiva entre un protón y los *Z - 1* restantes. Más allá de 10 fm la fuerza nuclear es despreciable.

Otra fuerza fundamental que actúa dentro del núcleo es la fuerza nuclear débil o **fuerza débil.**

- Características de la fuerza débil

  - Actúa entre partículas elementales y es responsable de algunas reacciones nucleares.
  - Actúa a distancias inferiores a 0,1 fm y su intensidad es unas 1000 veces menor que la fuerza electromagnética.
  - Es la responsable de la desintegración β y de la interacción entre ciertas partículas llamadas leptones (partículas con espín -1/2 (un **fermión**) que no experimentan interacción fuerte, es decir, la fuerza nuclear fuerte).

3.2 - Masa nuclear.

En física nuclear se utiliza una unidad de masa denominada **unidad de masa atómica unificada,** abreviadamente *u*, que se define como 1/12 de la masa del átomo «carbono-12» (núcleo de ${}^{12}_{6}C$ con seis electrones). Puede comprobarse que:

$$1\ u = 1{,}6605402\text{-}10^{-27}\ \text{kg}$$

Siendo las correspondientes masas del electrón, protón y neutrón de:

$$m_e = 0{,}0005486\ u$$
$$m_p = 1{,}0072766\ u$$
$$m_n = 1{,}0086652\ u$$

Resulta interesante notar que la masa de un neutrón es mayor que las masas de un protón más un electrón juntas.

Por otra parte, como la energía en reposo de una partícula viene dada por la expresión $E_0 = m_0 c^2$, es conveniente expresar tanto la unidad de masa atómica unificada como las masas de los electrones, protones y neutrones en términos de su equivalente energético. Así para *u*, tenemos:

$$E_0 = m_0c^2 = (1{,}6605402\text{-}10^{-27}\ \text{kg}) \cdot (2{,}99792458\text{-}10^{8}\ \text{m/s})^2 \approx 931{,}50\ \text{MeV}$$

Por tanto, 1 u = 931,5 MeV/c^2. Y a partir de este dato obtenemos:

$$m_e = 0{,}511\ \text{MeV/c}^2$$
$$m_p = 938{,}28\ \text{MeV/c}^2$$
$$m_n = 939{,}57\ \text{MeV/c}^2$$

3.3 - Energía de ligadura.

La masa de un núcleo es menor que la masa de sus constituyentes cuando están separados entre sí. La energía que equivale a esa diferencia de masa se denomina **energía de ligadura del núcleo**.

Así, la energía de ligadura de un núcleo sería la energía necesaria para separar al núcleo en sus nucleones constituyentes, suficientemente alejados entre sí y en reposo como para que la energía potencial de interacción entre ellos sea despreciable.

Aplicando el principio de conservación de la energía tendremos que la suma de las energías asociadas a los protones y neutrones constituyentes en reposo debe ser igual a la energía asociada al núcleo más la energía de ligadura E_b. Así:

$$Zm_{protón}c^2 + Nm_{neutrón}c^2 = m_{núcleo}c^2 + E_b$$

y, por tanto,

$$E_b = (Zm_{protón} + Nm_{neutrón} - m_{núcleo})\, c^2$$

Como, usualmente, se suelen tabular masas atómicas en vez de masas nucleares, podemos sustituir la masa del núcleo por:

$$m_{núcleo} = M_a - Zm_{electrón}$$

siendo M_a la masa atómica del elemento en cuestión. Además, la masa del protón la podemos obtener en función de la masa del átomo de hidrógeno M_H en la forma

$$m_{protón} = M_H - m_{electrón}$$

Sustituyendo en la expresión anterior llegamos a:

$$E_b = (ZM_H + N\, m_{neutrón} - M_a)\, c^2$$

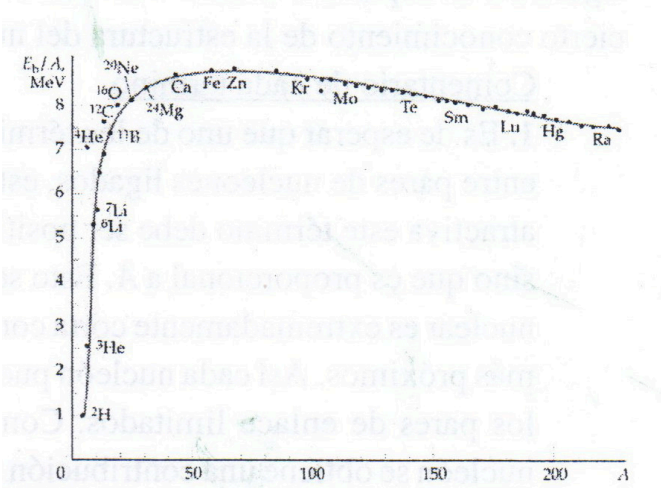


Figura 2

Por ejemplo, la energía de ligadura del $^{27}_{13}Al$ es de 225,0 MeV.

Para comparar la energía de ligadura de diferentes núclidos se suele utilizar la energía de ligadura por nucleón, es decir: E_b/A Para el $^{27}_{13}Al$ sería:

$$\text{Energía/nucleón} = \frac{E_B}{A} = \frac{225MeV}{27nucleones} = 8{,}332\ \frac{MeV}{nucleón}$$

En la figura 2 se muestra una gráfica de la energía de ligadura por nucleón en función del número másico. Puede comprobarse que a partir de A=20 el valor de E_b/A apenas varía con A, manteniéndose cerca de un valor medio de 8 MeV por nucleón, lo cual significa que la energía de ligadura de un núcleo es aproximadamente proporcional a A. Además es interesante observar que los núclidos con masa muy pequeña o muy grande tienden a estar menos ligados que los de masa intermedia, siendo los más estables los que están cerca de la posición del hierro A=56.

4. MODELOS NUCLEARES

Hasta la fecha no existe un único modelo que explique todas las características de los núcleos atómicos y esto se debe posiblemente a que la naturaleza detallada de las fuerzas nucleares no ha sido comprendida perfectamente hasta el momento presente. No obstante, se han propuesto varios modelos nucleares que son útiles para entender algunas características de los datos nucleares experimentales, así como los mecanismos responsables de la energía de ligadura. Aquí estudiaremos los conocidos como:

a) Modelo de la gota líquida

b) Modelo de capas (o de partículas independientes)

Existe un tercer modelo conocido como **modelo colectivo** que combina algunas características de los dos anteriores que ha tenido mucho éxito para explicar muchos fenómenos nucleares.

a) Modelo de la gota líquida

Este modelo fue propuesto por Niels Bohr en 1936 y trata a los nucleones como si fueran moléculas en una gota de líquido ya que algunas de las propiedades de un núcleo son similares a éstas.

A partir de este modelo se ha obtenido una expresión semiempírica para la energía de ligadura del núcleo.

$$B = C_1A - C_2A^{2/3} - C_3Z\,(Z-1)\,A^{-1/3}$$

o bien

$$B/A = C_1 - C_2A^{-1/3} - C_3Z\,(Z-1)\,A^{-4/3}$$

Los valores de las constantes (C_1, C_2, C_3) se obtienen mediante el ajuste de los datos experimentales de la figura 2 a la primera expresión. La figura 3 ilustra la contribución de cada uno de los sumandos de la segunda expresión al ajuste de los datos de la figura 2.

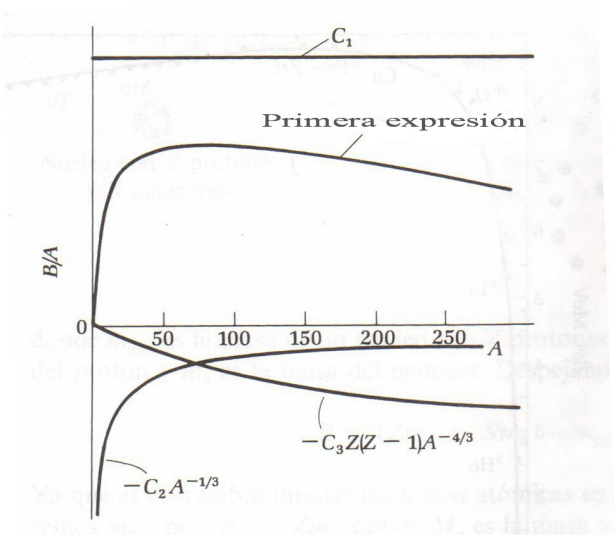


Figura 3.

El examen de cada término de la primera expresión nos proporciona cierto conocimiento de la estructura del núcleo.

- Comentario de cada término:

Recordemos que la energía de ligadura es la energía necesaria para disgregar el núcleo y separar sus nucleones.

-Una fuerza atractiva produce una energía potencial negativa y da una contribución positiva a la energía de ligadura.

-Una fuerza repulsiva produce una energía potencial positiva y da una contribución negativa a la energía de ligadura.

► Comenzamos examinando el **tercer sumando** el cual proviene de la fuerza de Coulomb.

$$C_3 Z\,(Z-1)\,A^{-1/3}$$

Consideraremos los protones como cargas puntuales. La contribución promedio de una pareja de protones a la energía potencial eléctrica de un núcleo es $(e^2/4\pi\varepsilon_0)(\overline{1/r})$, donde $(\overline{1/r})$ es la distancia promedio entre dos protones. A esta contribución se le llama *energía potencial de un par-promedio.* La energía potencial eléctrica del núcleo U_e , es el producto del número de pares de protones en el núcleo por la energía potencial de cada par ligado. El número de pares ligados con Z protones es $\frac{1}{2}\,Z(Z-1)$. Por tanto la contribución de la repulsión eléctrica de los protones a la energía de ligadura es:

$$B_e = -U_e = -\frac{1}{2} Z(Z-1)\,(e^2/4\pi\varepsilon_0)(\overline{1/r})$$

A continuación suponemos que $(\overline{1/r})$ varía de un núclido a otro de la misma forma que lo hace $1/R$, es decir, $(\overline{1/r}) \propto 1/R$. Como $1/R = 1/(R_0 A^{1/3})$, tenemos $(\overline{1/r}) \propto A^{-1/3}$. Esto nos da:

$$B_e = C_3 Z\,(Z-1)\,A^{-1/3}$$

► Sobre la base de nuestra experiencia en el desarrollo de B_e, podemos esperar que otro de los sumandos de la expresión sea debido a la interacción nuclear entre pares de nucleones ligados, esto implicaría un término proporcional a $\frac{1}{2}A(A-1)$. Como la fuerza nuclear es atractiva, este término debería ser positivo. No obstante, en vez de ser proporcional a $\frac{1}{2}\,A(A-1)$, el término positivo de la expresión, $C_1 A$, es proporcional a A, este es el **primer sumando**. Esta discrepancia se interpreta como una manifestación de que la distancia de interacción de la fuerza nuclear es muy corta, con lo que se limita la interacción de un nucleón a sus vecinos inmediatos.

A menudo se dice que esa interacción se *satura,* de forma que cada nucleón interacciona con un número máximo de nucleones y los pares ligados están limitados. Como el número de vecinos inmediatos es el mismo para cada nucleón (excepto para los próximos a la superficie), la naturaleza de corto alcance de la fuerza da lugar a una contribución a la energía de ligadura que es proporcional al número de nucleones *A*. En este sentido, un núcleo es como una **gota líquida** donde las moléculas sólo interaccionan con sus vecinas.

► Cuando hemos explicado por qué la naturaleza de corto alcance de la fuerza nuclear produce una contribución a la expresión que estamos estudiando que es proporcional a *A*, hemos despreciado el efecto de la superficie. Los nucleones cercanos a ella tienen menos vecinos que el resto, con lo cual hay menos pares ligados en esta zona. El **segundo sumando**, $-C_2A^{2/3}$, describe este efecto.

El signo negativo es porque representa una reducción de la contribución positiva a *B* debida a la fuerza nuclear atractiva. Dicha contribución es proporcional al área de la superficie del núcleo, que a su vez es proporcional a $A^{2/3}$, ya que $4\pi R^2 = 4\pi(R_0A^{1/3})^2 \propto A^{2/3}$

Ahora tenemos un conocimiento cualitativo de la gráfica de *B/A* frente a *A* que podemos resumir en los siguientes puntos:

1. Debido a la naturaleza de corto alcance de la fuerza nuclear, *B* es aproximadamente proporcional a *A***,** lo que nos conduce a que *B/A* sea aproximadamente constante [primer sumando de la expresión].

2. Los nucleones cerca de la superficie tienen menos vecinos con que interaccionar. Como los núcleos con poca masa poseen una fracción mayor de nucleones cercanos a la superficie, tienden a ser menos estables que los núcleos de mayor masa [segundo sumando expresión].

3. La repulsión eléctrica entre los protones tiende a hacer el núcleo menos estable, especialmente para núcleos con *Z* grande. Cuando *Z* es grande se tiene que $Z(Z-1) \approx Z^2$, de forma que el tercer sumando de la expresión se puede expresar aproximadamente como $-C_3Z(Z-1)A^{-1/3}$**.** Como los núcleos tienden a tener aproximadamente el mismo número de neutrones que de protones*, Z* es aproximadamente proporcional a *A***,** lo que a su vez hace al tercer sumando proporcional a $-A^{5/3}$**.** Esto significa que pasado un cierto valor de *A***,** los núcleos son menos estables al aumentar *A***.**

Una descripción más completa del núcleo atómico basada en el modelo de la gota líquida da lugar a una expresión de *B* con más sumandos que los aquí considerados. Los sumandos adicionales representan algunos de los detalles más finos de la gráfica de *B/A* frente a *A.*

b) <u>Modelo de capas</u>

Una característica importante del Diagrama de Segre (Figura 2) es que para los núcleos con poca masa se cumple que $Z \approx N$. mientras que los de mayor masa tienden a poseer un número de neutrones superior al de protones**.** Además, los núcleos con ciertos números particulares de protones y/o neutrones son especialmente estables, estos valores son denominados *números mágicos*, y son $Z = 2, 8, 20. 28, 50$ y 82; y $N = 2, 8, 20, 28, 50, 82$ y 126.

La energía que se requiere para separar un nucleón de un núcleo con número mágico e**s** notablemente mayor a la media. Además el número de isótopos e isonos estables es comparativamente mucho mayor cuando el núclido corresponde a un número mágico, este hecho puede observarse con la ayuda de la figura 2, por ejemplo para Z = 50 hay diez isótopos estables y siete isótonos para $N = 82$. Un buen modelo de la estructura nuclear debe explicar estas propiedades.

Los números mágicos nucleares recuerdan la forma en que los electrones se disponen en los átomos formando capas y subcapas. En la primera capa hay dos electrones, ocho en la segunda, ocho en la tercera, dieciocho en la cuarta, etc. Por otra parte los números mágicos son 2, 10 (ó 2 + 8), 18 (ó 10 + 8), 36 (ó 18 + 18), y así sucesivamente. Recordar que un átomo era muy estable cuando tenía una capa electrónica completa, en este caso su energía de ionización era grande y químicamente era poco activo. Los elementos con estas características son los llamados gases nobles: He, Ne, Ar, Kr y Xe.

Como la estructura de capas del átomo surge de la aplicación del principio de exclusión de Pauli a los estados electrónicos cuánticos, podemos esperar que un tratamiento similar de los nucleones del núcleo también dé lugar a la aparición de una estructura de capas. Pero el problema nuclear es más difícil de tratar que el atómico ya que en el átomo se puede considerar que el núcleo masivo actúa como centro del movimiento de los electrones y todas las interacciones son debidas a la familiar fuerza de Coulomb. En el problema nuclear, los nucleones son como un enjambre de partículas, todas con masas casi iguales, e interaccionando entre sí por medio de la fuerza nuclear que es más complicada. Si la analogía clásica de un átomo es un sistema solar, la analogía del núcleo sería un sistema planetario sin estrella central, un sistema en que los planetas, con igual masa, se mueven en trayectorias complicadas e interaccionan mediante una fuerza desconocida.

A pesar de estas dificultades, el problema nuclear puede ser tratado haciendo algunas aproximaciones:

- Primero, trataremos cada nucleón como una partícula independiente *y* supondremos que se mueve en el campo de fuerzas promedio producido por los demás nucleones (debido a esta aproximación, el modelo de capas a menudo se denomina el *modelo de partículas independientes).*

- A continuación, guiados por nuestro conocimiento de que la fuerza nuclear es de corto alcance y fuertemente atractiva, usaremos unas funciones de energía potencial para la interacción entre protones y neutrones como las expuestas en la Figura 4.
- Podemos encontrar cómo emerge la estructura de capas resolviendo la ecuación de Schrödinger con estas funciones de energía potencial y llenando los niveles de acuerdo al principio de exclusión de Pauli separadamente para los protones y los neutrones.
- Sin embargo, los números mágicos que resultan de este método no encajan con los valores experimentales. Esta dificultad fue resuelta en 1949 por M. G. Mayer y J. H. Jensen, cuando ambos demostraron que el modele de capas da los números mágicos nucleares correctos cuando adicionalmente se tiene en cuenta un acoplamiento espín-órbita fuerte (Figura 5).

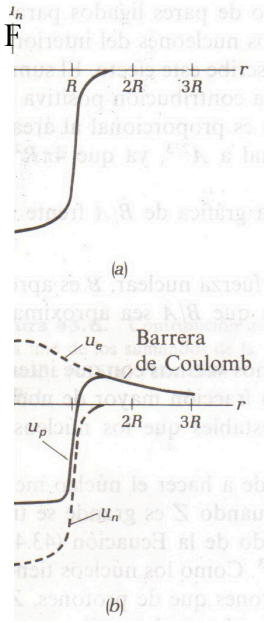


Figura 4

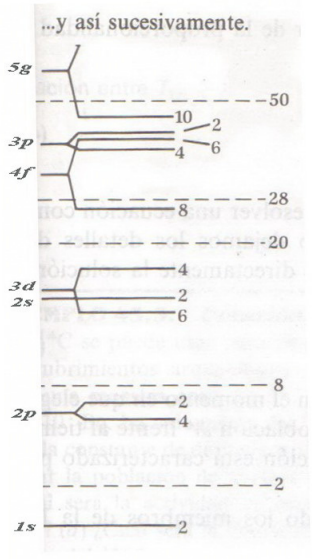


Figura 5

La aplicación del principio de exclusión de Pauli para el llenado de los niveles nucleares muestra porque $Z \approx N$ para los núcleos de menor masa. Como la fuerza nuclear domina en este caso, las posiciones de los niveles de energía de los protones y de los neutrones son casi iguales mientras que Z no sea grande, por tanto, la energía del núcleo es mínima cuando se llenan los niveles con igual número de protones que de neutrones. A medida que Z aumenta, la repulsión de Coulomb se hace más importante, entonces es energéticamente más favorable situar un exceso de nucleones en los niveles de los neutrones.

5. DESINTEGRACIONES RADIACTIVAS

Muchos núclidos son inestables y pueden emitir partículas de forma espontánea, proceso al que se denomina **radiactividad.**

Un núclido radiactivo puede emitir tres tipos de radiaciones llamadas alfa (α), beta (β) y gamma (γ). Éstas eran conocidas antes incluso de la primera observación de desintegración

radiactiva del uranio por Becquerel. Esta radiación se clasificó de acuerdo a su distancia de penetración en la materia.

- **Radiación α:** Es la radiación menos penetrante de todas. Puede penetrar una hoja de papel. Actualmente se sabe que las partículas α son núcleos de helio ${}^4_2He$.
- **Radiación β** Su grado de penetración es mayor que el de las partículas α, pero inferior a la radiación γ. Puede penetrar unos cuantos milímetros de aluminio. Estas partículas pueden ser electrones o positrones (de masa igual a la de los electrones pero con carga positiva).
- **Radiación γ:** Es la radiación más penetrante de las tres y está constituida por fotones de muy elevada energía emitidos por núcleos en estados excitados. Pueden penetrar varios centímetros de plomo.

- Cinética de la desintegración radiactiva:

La velocidad a la que se produce el proceso de desintegración radiactiva es proporcional al número de núcleos radiactivos presentes. Así, si *N* es el número de núcleos presentes en una muestra, tendremos:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

Siendo λ la denominada **constante de desintegración** o constante de decaimiento. El signo negativo indica que conforme transcurre el tiempo disminuye el número de núcleos radiactivos en la muestra. A partir de esta expresión podemos obtener, por simple integración, la expresión que relaciona el número de núcleos presentes en función del tiempo.

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN'}{N'} = -\lambda \int_0^t dt' \rightarrow \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t \rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

donde la constante N_0 representa el número de núcleos radiactivos presentes en el instante inicial $t = 0$.

A partir de la expresión obtenida anteriormente, podemos determinar la expresión de la **velocidad de desintegración, razón de decaimiento** o **actividad:**

$$R = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N = R_0 e^{-\lambda t}$$

En el Sistema Internacional de unidades la unidad de la velocidad de desintegración es el becquerel (1 Bq $\equiv$ 1 desintegración/segundo)

No obstante, existe una unidad que no pertenece a ningún sistema de unidades que suele utilizarse a menudo que es el denominado Curie (1 Ci = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ desintegraciones/segundo = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq)

La figura 6 representa la expresión del número de núcleos en función del tiempo. Obsérvese que si multiplicamos todos los datos por λ obtendríamos la gráfica de la razón de decaimiento que básicamente tendría la misma forma.

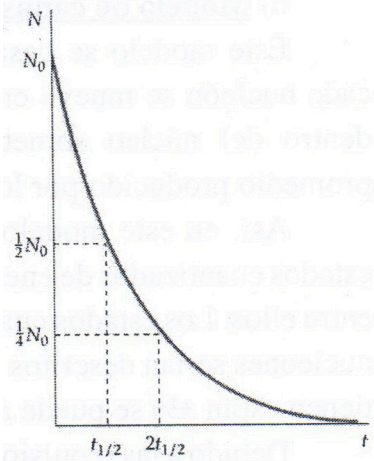


Figura 6

Un parámetro muy útil en los fenómenos de desintegración radiactiva es el denominado **periodo de semidesintegración** o **vida media** $t_{1/2}$ definida como el tiempo necesario para que tanto el número de núcleos como la velocidad de desintegración se reduzcan a la mitad. Así, tenemos:

2

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

- Desintegración *α:*

Muchos núclidos de masa grande se desintegran espontáneamente emitiendo una partícula α (${}^4_2He$), es decir perdiendo 2 protones y 2 neutrones. Un ejemplo es la desintegración de ${}^{238}_{92}U$ a ${}^{234}_{90}Th$. Al núclido que se desintegra se le denomina *padre, y* al resultado de la desintegración se le llama *hijo, hija* o *descendiente.* La reacción general de la desintegración α es, por tanto:

$$ {}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He $$

Se define la **energía de desintegración Q** como la energía liberada en el proceso de desintegración radiactiva, es decir:

$$Q \equiv (M_x - M_Y - M_\alpha) \cdot 931{,}5\ MeV/u$$

donde las correspondientes masas de los núclidos vienen expresadas en unidades de masa atómica unificada. Si el núcleo se desintegra en reposo, la energía Q corresponderá a los productos, de la que la partícula α se llevará la mayor parte debido a su masa mucho menor que la del núcleo hijo.

- Desintegración β:

En este tipo de desintegración espontánea, el núclido pierde un electrón o un positrón (partícula de iguales características que el electrón pero con carga positiva). Hay que recalcar que dichas partículas se crean dentro del núcleo. Esto sólo es explicable porque un neutrón se transforma en un protón o viceversa.

$$n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$$
$$p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$$

donde $\bar{\nu}$ y ν fueron denominadas por Fermi **antineutrino** y **neutrino,** respectivamente. Las reacciones genéricas serían:

$$ {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + \beta^- + \bar{\nu} $$
$$ {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \beta^+ + \nu $$

Dos ejemplos típicos de estos procesos son:

$$ {}^{14}_6C \rightarrow {}^{14}_7N + \beta^- + \bar{\nu} $$
$$ {}^{12}_7N \rightarrow {}^{12}_6C + \beta^+ + \nu $$

Los resultados experimentales revelan que las partículas β se emiten sobre un rango continuo de energías, es decir que el núcleo que se desintegra emite electrones/positrones con

diferentes energías. Sin embargo, la energía de desintegración Q debería ser la misma en todos los casos. Esto significa que se viola el principio de conservación de la energía. Un análisis más detallado muestra que también son violados los principios de conservación tanto del momento angular como del momento lineal en este tipo de reacción.
Por esto, Pauli en 1930 propuso la existencia de una tercera partícula que llevaría la energía y el momento "perdido", a la que Fermi denominó **neutrino (ν)** y cuyas propiedades serían:

- Carga eléctrica nula
- Masa en reposo menor que la del electrón, o incluso nula. *(Experimentos recientes parecen sugerir que esto pudiera no ser cierto)*
- Tiene espín *1/2*
- Interactúa muy débilmente con la materia y, por ello, es muy difícil de detectar. El neutrino fue detectado experimentalmente en 1956.

- Desintegración γ:

A menudo cuando tienen lugar desintegraciones α o β **,** los núcleos hijo formados tienen un estado energético superior al fundamental. Se dice que los núcleos están en estado excitado. En estos casos dichos núcleos excitados al decaer hasta su estado fundamental emiten energía en forma de fotones. La energía de estos fotones puede ser extremadamente elevada (1 MeV a 1 GeV). A dichos fotones se les denomina fotones γ o radiación γ. La reacción genérica sería:

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma $$

6. REACCIONES NUCLEARES

A diferencia de los procesos de desintegración radiactiva que ocurren espontáneamente, existen otros procesos nucleares en los que es necesario intervenir para que se produzcan. Así, se denomina **reacción nuclear** a aquélla en la que se bombardea un núcleo atómico con partículas energéticas (protones, neutrones, partículas α, radiación γ...). La reacción general sería:

$$ a + X \rightarrow Y + b $$

siendo *a* la partícula energética que incide sobre el núcleo *X* para dar lugar al núcleo *Y* más otra partícula *b*. La energía de reacción Q se define de forma análoga a la energía de desintegración, esto es:

$$ Q \equiv (M_x + M_a - M_y - M_b) \cdot 931{,}5 \text{ MeV/u} $$

donde las correspondientes masas vienen expresadas en unidades de masa atómica unificada.

Por analogía con las reacciones químicas, decimos que las reacciones pueden ser **exotérmicas** si $Q>0$ (se desprende energía) o **endotérmicas** $Q<0$ (se necesita energía para iniciarlas).

Para que ocurra una reacción nuclear endotérmica es necesario que la partícula bombardeante tenga una energía cinética superior a *Q*. La energía mínima necesaria para que ocurra una reacción de este tipo se denomina **energía umbral.**

Dos tipos particulares de reacciones nucleares son las reacciones de fisión y de fusión.

- Reacción de fisión (Fisión nuclear)

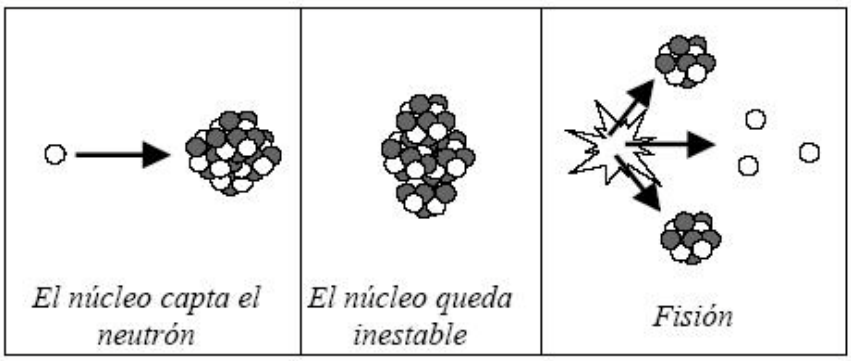
En la reacción de fisión nuclear un núclido de gran masa absorbe un neutrón y se divide en dos núclidos, que tendrán cada uno aproximadamente la mitad de la masa inicial, y se producen varios neutrones. Un ejemplo de este tipo de reacción es:

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3{}^{1}_{0}n $$

No obstante los productos de la fisión no son únicos, sino que pueden variar. Así, otra posible reacción de fisión del ${}^{235}_{92}U$ puede ser:

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{140}_{54}Xe + {}^{94}_{38}Sr + 2{}^{1}_{0}n $$

Puede observarse que el número de neutrones resultante no es fijo, siendo el promedio para este tipo de reacciones de 2,5 neutrones. Además, los productos de la fisión suelen ser inestables (radiactivos) porque usualmente tienen más neutrones de los correspondientes para ser estables y, por ello, suelen sufrir varias desintegraciones β^- (conversión de neutrones en protones) hasta alcanzar la estabilidad.



La importancia tecnológica de este tipo de reacción nuclear se debe a dos aspectos:

- La reacción es exotérmica y se liberan unos 200 MeV en cada suceso de fisión, energía que es muy superior a la podría alcanzarse en una reacción química típica. Para comparar se utiliza la denominada **densidad de energía** o *energía liberada por unidad de masa.* Así, incluso con un combustible nuclear del orden de tan solo el 3% de riqueza (3% de núcleos fisionables) la densidad de energía es unas 100.000 veces mayor que la proporcionada por los combustibles fósiles ordinarios (derivados del carbón y petróleo).

- La partícula incidente que comienza la fisión, el neutrón, está entre los productos de la reacción, lo que nos lleva a la posibilidad de una reacción en cadena, porque algunos de esos neutrones producidos pueden desencadenar, a su vez, otra reacción de fisión, repitiéndose el proceso. Para mantener la reacción en cadena se necesita un mínimo número de núcleos capaces de fisionarse, de forma que los neutrones no escapen del

material combustible. A esa cantidad mínima del material de la denomina **masa crítica,** la cual depende del núclido particular de que se trate y de su entorno.

Una de las aplicaciones más importantes de este tipo de reacción nuclear es la obtención de energía eléctrica que se lleva a cabo en las centrales nucleares con los llamados reactores nucleares.

Para poder obtener estos aparatos generalmente deben tenerse en consideración determinadas peculiaridades.

1) Un reactor nuclear es un dispositivo diseñado para mantener una **reacción en cadena autosostenida.**
2) En el caso de usar como combustible uranio, se debe tener en cuenta que el (99,3% del uranio natural) puede fisionarse por medio de colisiones con neutrones rápidos, en tanto que el que es el 0,7% restante del uranio natural puede fisionarse tanto con neutrones rápidos como con los denominados neutrones termales o lentos (con energía del orden de *kT).*
3) Para poder conseguir la reacción en cadena autosostenida debemos conseguir que, en promedio, uno de los 2,5 neutrones producidos en cada proceso de fisión ocasione a su vez la fisión de otro núcleo de uranio. Para ello se suele utilizar la denominada **constante de reproducción K** definida como el *número promedio de neutrones por cada evento de fisión que causa otro evento.* Aunque **K** tiene un valor máximo de 2,5 en la práctica es algo menor, pero incluso se debe mantener cercano a 1 para lograr la reacción autosostenida. Cuando **K=1** se dice que el reactor es **crítico**. Cuando **K<1** se dice que el reactor es **subcrítico** y se apaga. Cuando **K** es significativamente mayor que 1 se dice que el reactor es **supercrítico** y puede dar lugar a una reacción en cadena descontrolada. Para poder controlar este parámetro se utilizan barras de control hechas de elementos que absorben neutrones sin experimentar ningún tipo de reacción en cadena adicional (generalmente cadmio). Si no se controla el número de neutrones, la energía desprendida es tan grande que se produce una explosión nuclear.
4) Además hay que tener en cuenta que las reacciones de desintegración β^- de los productos de reacción producen un promedio de 15 MeV adicionales de energía. Este hecho plantea un serio problema de control ya que no existe ningún método para controlar esta desintegración. Así, después de apagar el reactor nuclear hay que seguir refrigerándolo para controlar el calor producido por la desintegración de los productos.

Problemas de los reactores de fisión:

- Posibilidad de que el flujo de agua de refrigeración se vea interrumpido. (Síndrome de China)
- Disposición y eliminación del material radiactivo de desecho.
- Robo de combustible nuclear en su transporte para la fabricación de bombas atómicas.
- Contaminación térmica del entorno (ríos, atmósfera,..).
- Productos de la reacción radiactivos, con vidas medias elevadas.

- Reacción de fusión (Fusión nuclear)

En la reacción de fusión nuclear dos núclidos de pequeña masa se combinan para dar lugar a un núclido de mayor masa y usualmente algunos fragmentos.

Ciclo protón-protón

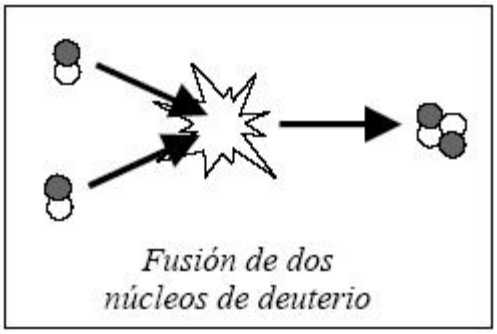
$$ {}_1^1H + {}_1^1H \rightarrow {}_1^2H + \beta^+ + \nu $$
$$ {}_1^1H + {}_1^2H \rightarrow {}_2^3He + \gamma $$

a su vez esta segunda reacción puede ir seguida por una de estas dos siguientes:

$$ {}_1^1H + {}_2^3He \rightarrow {}_2^4He + \beta^+ + \nu $$
$$ {}_2^3He + {}_2^3He \rightarrow {}_2^4He + 2{}_1^1H $$

Ésta es la forma en que se produce energía en el interior del Sol donde la temperatura es de unos 5 millones de kelvin y la presión es extraordinariamente elevada. De hecho hace falta esta altísima temperatura para poder activar estas reacciones. Es por ello por lo que también se suele denominar a estas reacciones termonucleares.

Todas las reacciones vistas antes son exotérmicas y pueden sintetizarse en que 4 protones se combinan para formar una partícula α y dos positrones con la liberación de 25 MeV de energía en el proceso.



Fusión de dos núcleos de deuterio

Actualmente es impensable obtener un reactor nuclear de fusión que utilice el ciclo protón-protón. Sin embargo, sí existen reacciones de fusión que podrían llegar a convertirse con el tiempo en candidatas a conseguir un reactor de fusión. Estas reacciones son las que usan deuterio (${}_1^2H$) tritio (${}_1^3H$).

$$ {}_1^2H + {}_1^2H \rightarrow {}_2^3He + {}_0^1n \quad Q = 3{,}27 \text{ MeV} $$
$$ {}_1^2H + {}_1^2H \rightarrow {}_1^3He + {}_0^1n \quad Q = 4{,}03 \text{ MeV} $$
$$ {}_1^2H + {}_1^3H \rightarrow {}_2^4He + {}_0^1n \quad Q = 17{,}59 \text{ MeV} $$

Hay que resaltar que aunque Q en la fusión es menor que en el caso de la fisión, la densidad de energía es mayor.

El deuterio está disponible en cantidades casi ilimitadas en lagos y océanos y su extracción es muy económica, pero el tritio al ser radiactivo, con vida media de 12,3 años, y realizar una desintegración β hasta helio-3 debe ser producido artificialmente porque no existe en grandes cantidades en la naturaleza.

Para que se fusionen dos núcleos ligeros debe vencerse la repulsión culombiana entre ellos. Para ello son necesarias temperaturas extraordinariamente elevadas que no son fáciles de

obtener en el laboratorio. Además, los átomos se ionizan y lo que tenemos es una *colección de electrones y núcleos* a la que se denomina **plasma.** La *temperatura para la cual la generación de potencia excede a la pérdida de energía* (por ejemplo por pérdidas por radiación) se le llama **temperatura crítica de ignición.** Para la reacción Deuterio-Deuterio es aproximadamente de 400 millones de Kelvin, en tanto que para la reacción Deuterio-Tritio es de unos 45 millones de Kelvin.

También existen otros dos parámetros críticos:

- **Densidad de iones** (n): Número de iones por unidad de volumen.
- **Tiempo de confinamiento** (τ): Tiempo que se mantienen los iones interactuantes a una temperatura igual o superior a la de ignición.

Los dos parámetros deben ser lo suficientemente grandes para que se libere más energía de fusión que la requerida para calentar el plasma. John Lawson estableció un criterio para que fuera posible una producción neta de energía:

$$n\tau \geq 10^{20}\ \text{s/cm}^3$$

Actualmente el principal problema es alcanzar un tiempo de confinamiento suficientemente elevado que permita alcanzar el criterio de Lawson. El segundo problema consiste en cómo confinar un plasma con tan elevada temperatura por periodos superiores a 1s.

7. APLICACIONES DE LA RADIACTIVIDAD Y LAS REACCIONES NUCLEARES:

- Aplicaciones de los isótopos radiactivos:

Los radioisótopos se comportan química y biológicamente igual que sus isótopos estables, entrando a formar parte en los mismos compuestos. Además, son fácilmente detectables, lo que permite seguirlos en cualquier proceso. Algunas utilidades:

Medicina: Localización y tratamiento de tumores cancerosos, destrucción de tejidos malignos (son más sensibles a la radiación), estudio de circulación sanguínea, tratamiento de leucemia (P-32)

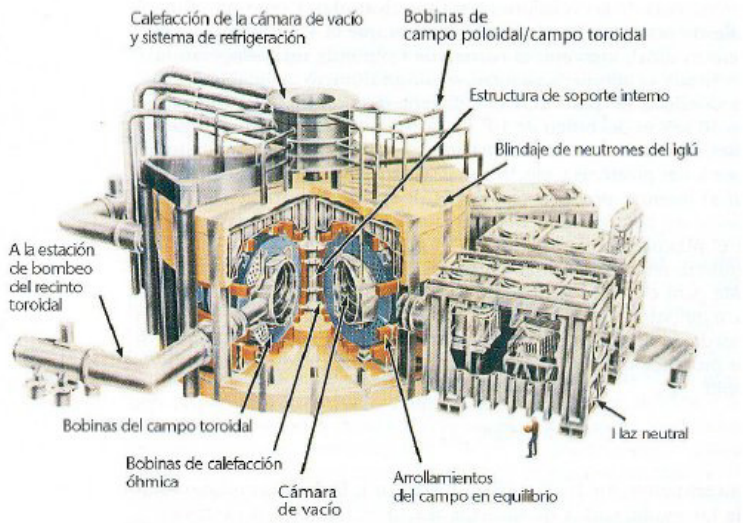
Biología: Estudio de fotosíntesis (C-14). Estudio de acción de antibióticos en el organismo (marcadores de azufre). Estudio de fijación de calcio en los huesos. Estudio de la migración de las aves. Producción de esterilidad en especies nocivas, plagas...

Química e Industria: Análisis químico y de reacciones, Control de insecticidas y otros productos. Control de espesores y desgaste de planchas metálicas, paredes, etc. ; Control de circulación de petróleo en oleoductos (Ba-140). Control de movimientos de aire y agua en la atmósfera (trazadores). Determinación de edad de rocas y fósiles (C-14. método Libby-Arnold). (U-238)

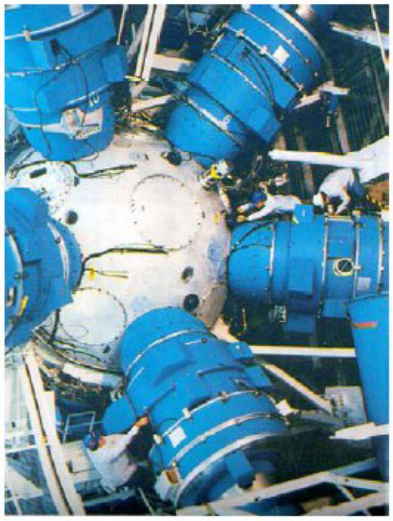
- Obtención de energía. Centrales nucleares:

La energía de reacción desprendida en la fisión de algunos elementos (U, Pu) puede usarse para calentar agua, transformarla en vapor a alta presión y hacer que éste mueva la turbina de un generador de corriente eléctrica. Ese es el funcionamiento básico de una central nuclear. En España, las centrales nucleares generan el 33% de la energía eléctrica.

Centrales nucleares de Fusión: Aunque están todavía en fase experimental, los diferentes tipos que existen ***(tokamacs, stellarators, JET)*** consisten básicamente en este procedimiento. El combustible (hidrógeno) es calentado hasta estado de plasma (los átomos se desprenden de sus electrones, quedando con carga +), y es mantenido en movimiento mediante un campo magnético. Mediante un láser u otro procedimiento, se consigue la energía necesaria para que se produzca la fusión. Hasta ahora no se ha conseguido que la reacción se automantenga.



Tokamak



Stellarator

Criado Aldeanueva, F., Aguiar, J. y Gómez Merino, A. (2011) Ampliación de Física en la Ingeniería
OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike