



Estos pretenden ser unos apuntes de resumen solamente de teoría. Se pueden ver ejercicios PAU asociados en [www.fiquipedia.es](http://www.fiquipedia.es), dentro bloque física moderna, que son simples, con pocos conceptos y fórmulas (defecto de masa, desintegración radiactiva). Estos apuntes van más allá de preparar PAU.

## 1. Física nuclear: Composición y estabilidad de los núcleos

### 1.1 Visión histórica núcleo atómico

El concepto de núcleo atómico surge tras el experimento con partículas  $\alpha$  (ver más adelante radiactividad) y una lámina de oro realizado en 1909 por Geiger y Marsden, que Rutherford (Nobel 1908) interpreta en su modelo atómico en 1911; existe un núcleo, una zona muy pequeña que concentra la carga positiva y la mayoría de la masa, rodeado por electrones con poca masa. Más tarde en 1911 van den Broek propone la asociación entre posición en la tabla/número atómico y carga nuclear, verificada en 1913 por Mosley.

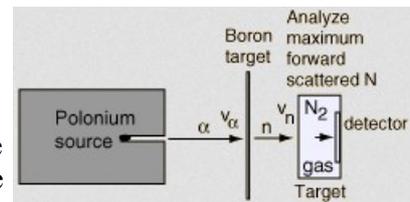
El **protón** fue propuesto por Rutherford en 1919 como una nueva partícula igual al núcleo del átomo de Hidrógeno. Lo hace tras identificar núcleos de Hidrógeno como producto de la reacción  $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{H}^+$  y suponer que el núcleo de H, que se sabía que era el elemento más ligero de todos, formaba parte del de N. El **neutrón** fue propuesto por Rutherford en 1921 como partícula neutra en el núcleo de masa similar al protón para explicar dos cosas:

-La masa atómica de la mayoría de los átomos era unas dos veces la asociada a su número atómico, que es el número de protones, y no era posible que hubiera pares de protones y electrones ligados en el núcleo.

-Debía haber unas partículas que de alguna manera realizasen una fuerza atractiva en el núcleo que venciese las fuerzas repulsivas entre protones y los mantuviese unidos.

El neutrón fue descubierto en 1932 por Chadwick (Nobel 1935), después de que en 1930 Bothe y Becker comprobasen que al bombardear elementos ligeros (B, Be) con partículas  $\alpha$  se producía una radiación neutra no ionizante y muy penetrante, y después de que Joliot e Irene Curie en 1932 comprobasen que esa radiación en parafina (con muchos átomos de H) generaba protones con tanta energía que hacía que no pudiesen ser rayos  $\gamma$ . Chadwick supone que esa radiación son los neutrones propuestos por Rutherford y que el choque

con los núcleos de Hidrógeno y Nitrógeno son elásticos; midiendo las velocidades máximas de los núcleos de H y N calcula la masa del neutrón.



[hyperphysics.phy-astr.gsu.edu](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu), copyright

>La existencia de los quarks, partículas que forman el protón (uud) y el neutrón (udd) se comenta en bloque de física cuántica. Confirmación experimental se realizó en los 60 con experimento similar al de Rutherford.

>La historia de la radiactividad, descubierta antes que el núcleo atómico, se comenta más adelante.

### 1.2 Composición de los núcleos

En general se habla de un núcleo compuesto por **nucleones**, que son tanto protones como neutrones.

La masa del neutrón, aunque ligeramente superior, es muy similar a la del protón, y ambas muy superiores a la del electrón (unas 1800 veces), por lo que en cálculos de masa atómica se suele considerar solo la nuclear.

Un átomo/núcleo de un elemento cuyo símbolo es X se representa como  $^A_Z X$

**Z: número atómico**, número de protones que identifica el elemento

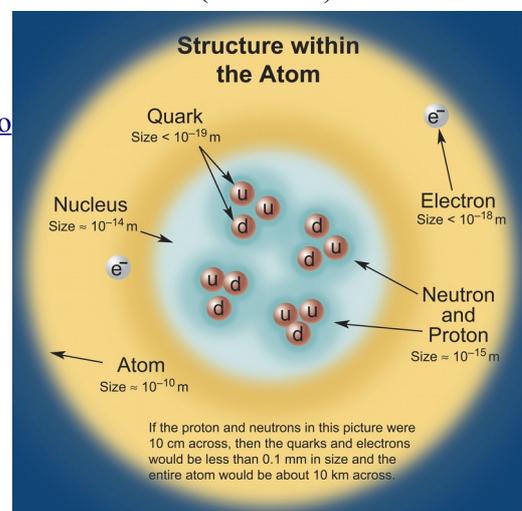
**A: número másico**, suma del número de protones Z y neutrones N, número total de nucleones.

**Isótopos** son átomos de mismo elemento (mismo Z) pero distinto n° de neutrones (distinto A).

**Núclidos** (en inglés *nuclide*, no está en RAE pero sí IUPAC) son las especies atómicas caracterizadas por A, Z, y un estado de energía nuclear, siempre que la vida media de este estado sea lo suficientemente larga para ser observable. A veces se usa **nucleido** (mal definido por la RAE!, en inglés *nucleide*: IUPAC [recomienda nuclide](http://www.iupac-nuclides.org)). Núclido engloba al de isótopo ya que incluye variaciones de isótopos "excitados", que se representan con \*.

### 1.3 Tamaño y densidad del núcleo

Rutherford ya estimó el radio nuclear en torno a  $10^{-14}$  m, por lo que casi todo está vacío: radio atómico es  $10^{-10}$  m. Mediante dispersión de partículas se ha determinado experimentalmente la expresión (para átomos grandes con  $A > 20$ )  $R = r_0 \cdot A^{1/3}$  m; siendo  $r_0 = 1,2-1,5$  fm ( $10^{-15}$  m). Esto supone que asumiendo forma esférica que tiene una densidad constante  $1,4 \cdot 10^{17}$  nucleones/m<sup>3</sup>, que lleva a unos  $2 \cdot 10^{17}$  kg/m<sup>3</sup>.



[cpephysics.org](http://cpephysics.org), copyright





## 1.4 Estabilidad de los núcleos

**Estabilidad en la atracción de nucleones:** con las interacciones electromagnética y gravitatoria no se justifica que el núcleo, conteniendo varios protones cargados positivamente y neutrones sin carga, sea estable manteniéndolos unidos. Es necesaria la existencia de **fuerzas nucleares** entre nucleones, mucho más intensas que la electromagnética para superar la repulsión entre protones, y de corto alcance para no afectar a otros núcleos, y de un tipo distinto a la electromagnética ya que afecta a neutrones que son partículas neutras. Antes del Modelo Estándar se pensaba que protones y neutrones eran partículas fundamentales y se hablaba de fuerzas nucleares entre ellos, mediante el modelo propuesto en 1935 por Yukawa (Nobel 1949) de intercambio entre neutrón y protón de mesones (partículas de masa media entre el electrón y nucleón), partículas que fueron identificadas en 1945 en rayos cósmicos (pión o “mesón pi”). En el Modelo Estándar las partículas fundamentales son los quarks, y la interacción fundamental es la **interacción fuerte** entre quarks mediante los gluones; las fuerzas nucleares son fuerzas fuertes residuales de la interacción fuerte de color entre los componentes de los hadrones, que son los quarks. Los mesones (los piones son los mesones más ligeros) son bosones combinación de quark y antiquark y también sufren la interacción fuerte; al ser bosones con mucha masa el alcance es corto.

**Estabilidad en la no desintegración radiactiva:** ver más adelante radiactividad.

**Estabilidad en conseguir configuración energética más favorable:** ver más adelante energía de enlace

## 2. Energía de enlace

La **energía de enlace** está asociada a varias partículas enlazadas en una situación favorable energéticamente: si queremos separarlas tenemos que aportar energía, y si las juntamos estando previamente libres, se libera energía. La **energía de enlace nuclear** o de empaquetamiento del núcleo es la necesaria para separar los nucleones de un núcleo / la liberada cuando se unen los nucleones para formar el núcleo. La masa de la asociación de partículas enlazadas disminuye según su energía de enlace según  $E=mc^2$ , con un **defecto de masa** que no es despreciable en enlaces nucleares, aunque sí en gravitatorios y electromagnéticos.

El **defecto de masa en los núcleos atómicos**, que se representa por  $\Delta m$ , es la diferencia entre su masa medida experimentalmente y la calculada para sistema de partículas desligadas que lo forman:

$$\Delta m = \text{Masa calculada (N,Z)} - \text{Masa Experimental. (Masa calculada} = N \cdot m_n + Z \cdot m_p)$$

De manera breve se puede decir que es la diferencia de masa entre los nucleones estado libres y ligados.

>La **definición de exceso de masa de IUPAC** utiliza masa calculada a partir de  $A$ , no usa  $N$  ni  $Z$  ni masas diferentes para protón y neutrón, para todos los nucleones toma como masa la unidad de masa atómica ( $u$ ), que se define como 1/12 de la masa del átomo  $^{12}\text{C}$ .  $u=1,66 \cdot 10^{-27}$  Kg; es el promedio de masa de nucleón (protón y neutrón) ya enlazados. Con definición IUPAC no coinciden exactamente  $\Delta m$  y energía de enlace.

Expresando  $\Delta m$  como energía ( $E=mc^2$ ) se obtiene  $E=931 \text{ MeV}/u$ ; la energía liberada al formar un núcleo ( $E$  enlace) es  $E_c = \Delta m (u) \times 931 \text{ MeV}$ .

Es habitual calcular la energía media de enlace por nucleón, que se obtiene dividiendo la energía de enlace del núcleo por sus  $A$  nucleones  $E_{mc} = (E_c/A)$ .

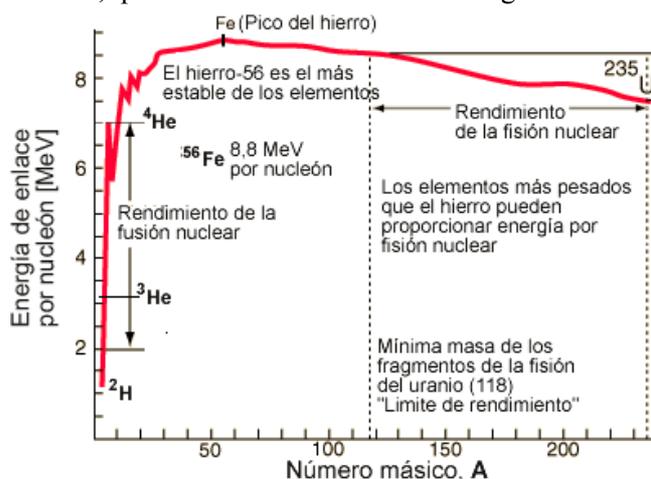
Se suele representar esta energía de enlace por nucleón frente al número másico  $A$ , para razonar la liberación de energía en procesos nucleares: el Fe es el elemento con mayor  $E$  media de enlace y más estable, al que todos “tienden”:

-Fisión: se divide núcleo pesado, se crean átomos de menor  $Z$  a partir de átomos con  $Z$  mayor al del Fe. “Ir hacia la izquierda en dirección al Fe”.

Ejemplo: Uranio 92 pasa a Xe 54 y Sr 38.

-Fusión: se unen núcleos ligeros, se crean átomos de mayor  $Z$  a partir de átomos con  $Z$  menor al del Fe. “Ir a la derecha en dirección al Fe”. Ejemplo: Hidrógeno forma Helio.

En ambos procesos se libera energía asociada a la pérdida de masa de los reactivos.



Energía de enlace por nucleón, Wikipedia, cc-by-sa

>Esta gráfica muestra algo importante: los elementos con  $Z$  mayor al del Fe no son “rentables” energéticamente, ya que en su formación se ha tenido que aportar y “gastar” energía: esto enlaza con la nucleosíntesis estelar y la formación de ciertos elementos químicos en explosiones de supernovas.





### 3. Radiactividad. Tipos, repercusiones y aplicaciones.

La radiactividad (RAE permite también [radioactividad](#)) es la emisión de radiación por núcleo para conseguir una situación más estable; enlaza con lo indicado en la estabilidad del núcleo.

#### 3.1 Historia

En 1896 **Becquerel** descubre la radiactividad: el Uranio emite rayos similares a los rayos X, penetrantes e ionizantes, y en 1898 el matrimonio **Curie** descubren Radio y Polonio; los tres reciben el Nobel en 1903.

En 1899 **Rutherford** clasifica y nombra dos tipos de radiación: alfa y beta.

En 1900 Becquerel identifica las partículas beta como electrones.

En 1900 Rutherford al estudia el Torio y descubre que sus emanaciones tienen cierta vida media y que la radiactividad decrece exponencialmente. En 1901 junto con Soddy proponen la idea de que las emanaciones son átomos radiactivos y la existencia de la transmutación ("*Rutherford, this is transmutation!*"; "*For Christ's sake, Soddy, don't call it transmutation. They'll have our heads off as alchemists.*")

En 1903 Rutherford nombra la radiación gamma, identificada por Villard en 1900.

En 1908 Rutherford indentifica que las partículas alfa son iones de Helio.

En 1913 Fajans y Soddy (Nobel 1921) formulan leyes de desplazamiento que definen cómo se transmutan los elementos al emitir los distintos tipos de radiactividad.

En 1930 Pauli propone la existencia de una nueva partícula, el neutrino, para que se conserve en la emisión beta momento lineal, angular y energía (relativista: se conserva en reacciones nucleares)

En 1932, además de descubrirse el neutrón y el positrón, se descubren otros tipos de radiactividad: emisión de neutrones, de protones, de positrones, captura electrónica.

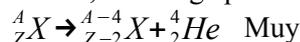
En 1956 Reines (Nobel 1995) detecta el neutrino.

#### 3.2 Tipos

**-De radiactividad:** natural (un elemento creado por la naturaleza) o artificial (elementos creados por el hombre, bombardeando núcleos que inicialmente no eran radiactivos con partículas que han sido aceleradas)

**-De radiaciones en la desintegración radiactiva:** los más comunes son los tres nombrados por Rutherford.

**Radiación  $\alpha$ .** Se emite núcleo de Helio, con carga positiva.



Muy ionizante, poco penetrante.

**Radiación  $\beta$ .** Dos tipos:

**$\beta^-$ :** se emite electrón.

Elemento Z transmuta a Z+1.

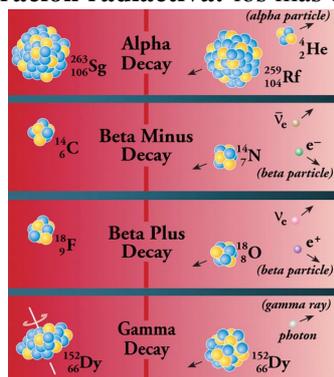
**$\beta^+$ :** se emite positrón.

Elemento Z transmuta a Z-1.

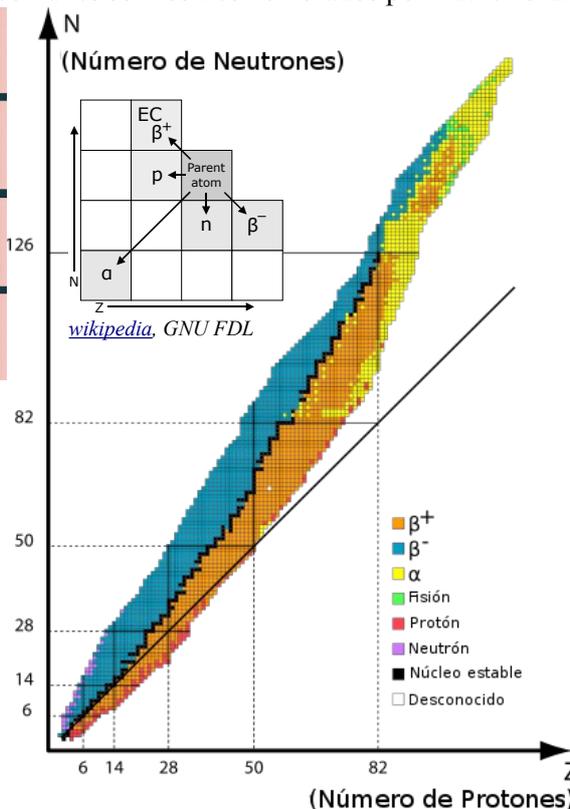
**Radiación  $\gamma$ .** Se emite fotón.

Elemento no trasmuta, igual Z.

Muy penetrante, frenada por metros hormigón o plomo. Ionizante de manera indirecta. Además de estas tres existen otras: emisión de neutrones, captura electrónica...



[cpepphysics.org](http://cpepphysics.org), copyright



[Isótopos: estabilidad, tipo radiación, n°s mágicos, wikipedia](#), cc-by

#### 3.3 Estabilidad, radiactividad y su tipo

La estabilidad de los diferentes isótopos en función de Z y número de neutrones N se puede ver en la gráfica: la mayoría de los isótopos no son estables, en general en los núcleos estables se cumple  $N \geq Z$ , y se aprecia relación de N/Z con del tipo de radiación. En la gráfica se reflejan algunos **números mágicos**; son los números 2, 8, 20, 28, 50, 82 de protones / neutrones y 126 solamente para neutrones, en los cuales hay gran estabilidad isótopos, y sugieren niveles energéticos en el núcleo que se llenan con ciertos números de nucleones, similar a electrones.

El neutrón no es estable fuera del núcleo, con una vida media de unos 15 minutos; es la interacción fuerte la que lo hace estable en el núcleo. El neutrón aislado se desintegra por interacción débil  $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ , pero en un núcleo es estable si hay combinaciones de protones y neutrones que permiten los intercambios de piones de Yukawa  $p^+ \leftrightarrow n^0 + \pi^+$  (esa es visión alto nivel nucleones y piones; bajo nivel quarks y gluones).





**Explicación de los tipos de radiación según estabilidad:**

**Radiación  $\alpha$ .** Núcleo inestable por tener N muy elevado. Emisión reduce. Ejemplo:  $^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{206}_{82}\text{Pb} + ^4_2\text{He}^{+2}$

**Radiación  $\beta$ .** Núcleo inestable por tener una relación entre N y Z muy descompensada.

>**Radiación  $\beta^+$ .** La relación N/Z es muy baja, aumenta N y se reduce Z: un protón se convierte en neutrón y se emite un  $e^+$  (positrón) y un neutrino electrónico. Ejemplo:  $^{30}_{15}\text{P} \rightarrow ^{30}_{14}\text{Si} + e^+ + \nu_e$  ( $p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ )

>**Radiación  $\beta^-$ .** La relación N/Z muy elevada, se reduce N y se aumenta Z: un neutrón se convierte en protón y se emite un  $e^-$  y un antineutrino electrónico. Ejemplo:  $^{24}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{24}_{12}\text{Mg} + e^- + \bar{\nu}_e$  ( $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ )

*Nota: es un error habitual pensar que los electrones de la radiación beta no provienen del núcleo.*

**Radiación  $\gamma$ .** Un núcleo se encuentra excitado y al pasar a su estado fundamental emite la energía en forma de radiación electromagnética de muy alta energía. El núcleo puede quedar en estado excitado por ejemplo tras emitir radiación alfa o beta, o tras un choque de un neutrón con el núcleo en la fisión nuclear. Ejemplo:  $^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow ^{60}_{28}\text{Ni}^* + e^- + \bar{\nu}_e$ ;  $^{60}_{28}\text{Ni}^* \rightarrow ^{60}_{28}\text{Ni} + \gamma$

**3.4 Leyes de la desintegración radiactiva**

Además de las leyes de desplazamiento, la descripción numérica de la desintegración radiactiva está asociada a una ley exponencial, y puede ser común a otras variaciones por ejemplo concentración en química.

La desintegración es al azar, pero sigue una **ley de decaimiento exponencial**  $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ , donde N(t) número de núcleos radiactivos en instante t,  $N_0$  número de núcleos radiactivos en instante inicial  $t=0$ .

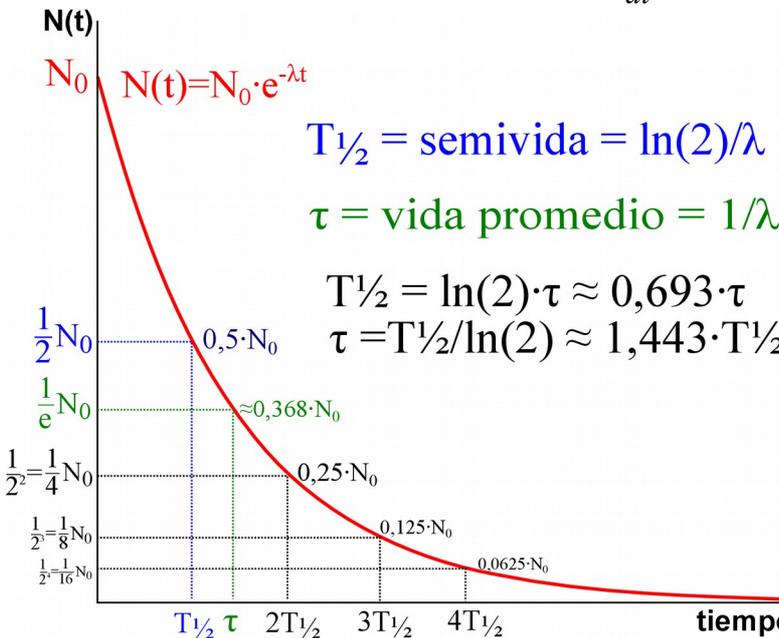
>Esta ley tiene una expresión similar para N, A, ó masa, y se pueden manejar como unidad N el mol.

**$\lambda$  Constante de desintegración radiactiva:**  $\lambda = \frac{A}{N}$  Unidades: tiempo<sup>-1</sup>. Es una constante resultado del

cociente entre el número de desintegraciones por unidad de tiempo (actividad A) y el número de núcleos radiactivos presentes en un instante cualquiera. También es la probabilidad de desintegración por unidad de tiempo. Es una constante propia de cada radioisótopo.

**A Actividad radiactiva ó Velocidad de desintegración.** Unidades en SI: Bequerel (Bq) = desintegración/s. (Otras unidades: Ci (curio), 1 Ci =  $3,7 \times 10^{10}$  Bq, aproximadamente la asociada a 1 g de Radio). Número de

desintegraciones por unidad de tiempo.  $A(t) = \frac{-dN(t)}{dt}$   $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$   $A = \lambda \cdot N$  (A y N mismo t)



**$\tau$  (mean lifetime)**  $\tau = \frac{1}{\lambda}$  “tiempo de vida [media ó promedio], periodo de vida medio”

Promedio estadístico de vida de una partícula antes de desintegrarse. Tiempo que tarda un núcleo elegido al azar en desintegrarse.

**$T_{1/2}$  (halflife):**  $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$  “periodo de semidesintegración, **semivida**, vida mitad, periodo, semiperiodo”: Tiempo necesario para que se desintegren la mitad de los núcleos de una muestra inicial de una sustancia radiactiva. También es el tiempo asociado a que el número de núcleos radiactivos y la actividad se reduzca a la mitad.

Tanto  $\tau$  como  $T_{1/2}$  son términos con unidades de tiempo, relacionados pero que es muy importante no confundir. Entre ambos términos hay una diferencia numérica  $T_{1/2} = \ln(2) \cdot \tau \approx 0,693 \cdot \tau$ . Se nombran primero los términos en inglés para evitar la ambigüedad asociada al castellano donde el término “media” es polisémico y significa tanto promedio / media estadística (mean) como semi / mitad (half).

> Personalmente recomiendo usar vida promedio para  $\tau$  y semivida para  $T_{1/2}$ .

> En la gráfica se muestra la variación con el paso del tiempo (a veces se representa  $N/N_0$  frente a  $t/T_{1/2}$ ).

En la expresión alternativa  $N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$  se puede ver que si  $t = T_{1/2}$ , se reduce a la mitad, y cuando

$t = n \cdot T_{1/2}$  queda un  $100/2^n$  % de núcleos radiactivos, lo que para  $n=10$  supone un 0,1% y es el límite que se





suele considerar para datación basada en isótopos con esa semivida; para  $^{14}\text{C}$  con semivida de 5730 años se toman unos 60000 años.

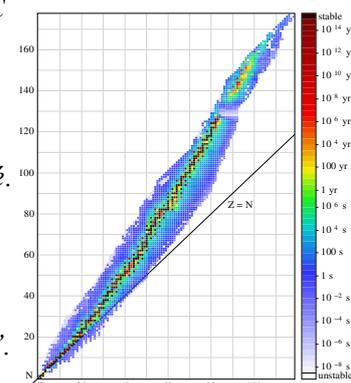
>  $A=\lambda N$  también se puede ver expresado como  $A\tau=N$

> Los enunciados de problemas a veces son confusos, ya que por ejemplo “vida media” podría asociarse a ambos; lo importante es dejar claro en la solución que existen ambos significados, y decir que se opta por uno y por qué.

> Los valores de vida promedio / semivida tienen un rango muy amplio.

> **Concepto importante: en la desintegración radiactiva los núcleos no desaparecen.** Se reduce la cantidad de núcleos radiactivos y la masa de ellos asociada. A veces la palabra “desintegrar” se malinterpreta al explicar o al formular la pregunta: ejemplo PAU 2012 “qué masa quedará sin desintegrar”.

> La idea de tiempos de vida para desintegración núcleos se puede asociar a otras partículas como muones.



$T_{1/2}$  isótopos, [wikipedia](http://wikipedia), public domain

### 3.6 Repercusiones

En general el efecto de la radiación es dañino para los organismos, ya que son de alta energía, ionizan las células y crean radicales libres. A veces ese daño es el objetivo buscado (radioterapia). Puede producir daños somáticos: cáncer y radiopatías (náuseas, pérdida de pelo, fatiga...) y daños genéticos al producir mutaciones en células reproductoras. Por ello es importante la gestión de residuos radiactivos (no sólo de centrales nucleares, también en hospitales) y la protección radiológica, controlando las dosis de radiación absorbidas.

Errores de concepto habituales:

-Confundir efectos de contaminación y radiación. La radiación es dañina pero tiene un alcance limitado. La contaminación nuclear (una nube de polvo de una explosión nuclear) es material radiactivo que sí puede ser arrastrado por aire y agua y puede producir radiación en otros puntos.

-Pensar que cuando un material recibe radiación se convierte en radiactivo. No ocurre con  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , sólo en algunos casos con radiación de neutrones.

### 3.7 Aplicaciones

Aparte de la energía nuclear de fisión y fusión que se trata en un apartado aparte, se pueden citar

**Medicina:** Diagnóstico; se inyectan radiofármacos que absorben ciertos tejidos y se detectan sus emisiones, por ejemplo tomografía por emisión de positrones (PET).  $T_{1/2}$  suele ser bajo. Radioterapia; haz de rayos X ó  $\gamma$  hacia tumores. A veces inserción en el tumor de fuente radiactiva.

La Resonancia Magnético Nuclear no está asociada a radiactividad, pero se basa en conocimiento del núcleo.

**Datación:** objetos de origen orgánico menos de 50000 años con  $^{14}\text{C}$ ,  $T_{1/2}$  de unos 5730 años.

**Agricultura e industria:** rayos  $\gamma$  para esterilizar insectos, para mejorar conservación algunos alimentos, posibilidad esterilizar dentro envase final. Análisis con rayos  $\gamma$  de estructuras metálicas. Detectores de humo y pararrayos por ionización del aire.

## 4. Reacciones nucleares de fisión y fusión, aplicaciones y riesgos

Las **reacciones nucleares** son reacciones en las que se producen modificaciones en los núcleos tras aportar energía de activación mediante el choque de una partícula con el núcleo, que produce un núcleo excitado.

Los núcleos pierden la energía de excitación modificándose de distintas maneras: emite partículas ó división.

Un choque con el núcleo debe vencer la repulsión electrostática para el protón, pero no para un neutrón.

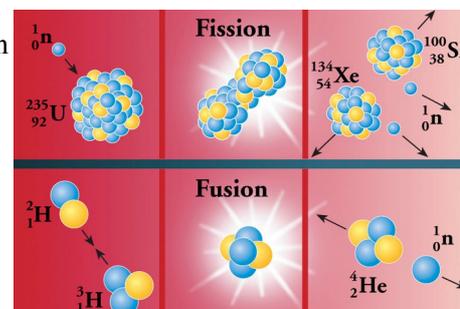
Los conceptos de fisión y fusión se han descrito al hablar de energía de enlace por nucleón.

La fisión ocurre de manera natural para elementos pesados, aunque a un ritmo lento. En los reactores nucleares se realiza de manera acelerada, controlada y automantenida: los neutrones que libera la fisión un átomo se utilizan para fisionar otros, en una reacción en cadena. El combustible es un material fisionable como el Uranio.

La fusión ocurre de manera natural en las estrellas, requiere gran cantidad de energía para iniciarse ya que hay que aproximar los núcleos a fusionar y eso supone mucha energía cinética, que supone gran temperatura (millones de K). No se ha conseguido todavía de manera controlada y rentable, aunque hay proyectos para conseguirlo. El combustible es Hidrógeno.

Las aplicaciones de la fisión nuclear es la producción energética en reactores nucleares, aparte de usos militares.

Los riesgos son los accidentes y el control de los residuos radiactivos, especialmente los de larga duración.



[cpepphysics.org](http://cpepphysics.org), copyright

