

FÍSICA MODERNA

PARTE III: FÍSICA NUCLEAR Y DE PARTÍCULAS

Luis Pardillo Vela <https://fisicayquimicaluis.wixsite.com/esoybach>

En el siglo IV a. de C., los filósofos griegos Demócrito y Leucipo consideraron que la materia era discontinua, es decir, no se podía dividir indefinidamente, sino que debería estar formada por unas últimas partículas que conservaban sus propiedades a las que llamaron átomos ("a" sin, "tomos" partes). Esta teoría no se impuso y fue rechazada por otros filósofos, entre ellos Aristóteles que mantenía que la materia se podía dividir indefinidamente.

TEORÍA ATÓMICA DE DALTON

En 1.808 Dalton, para explicar las leyes ponderales de las reacciones químicas (conservación de la masa, proporciones definidas, proporciones recíprocas y proporciones múltiples) enunció su teoría atómica:

- Los elementos están formados por partículas indivisibles e inalterables llamados átomos.
- Todos los átomos de un elemento son iguales en masa y propiedades.
- Los átomos de elementos distintos son diferentes en masa y propiedades.
- Las moléculas de los compuestos se forman por la unión de los átomos de los elementos en una proporción numérica sencilla.
- En una reacción química el número de átomos de cada elemento es el mismo antes y después de la reacción.

En su teoría, supone que el átomo es totalmente indivisible, sin estructura interna.

EL ELECTRÓN Y EL MODELO ATÓMICO DE THOMSON

En 1897, Joseph John Thomsom descubre una partícula que surge del átomo en experimentos con tubos de rayos catódicos, comprobando que esa partícula se comportaba como una carga negativa y una masa muy pequeña, la denominó electrón.

Por tanto, si esa partícula era negativa y con una masa muy pequeña, el resto del átomo debía tener carga positiva y la práctica totalidad de la masa. Basándose en ello Thomson propuso un modelo, según el cual *el átomo estaba formado por una masa de carga positiva en la cual están incrustadas unas partículas subatómicas de masa muy pequeña y carga negativa (electrones) que en conjunto iguala a la carga positiva del átomo*. Este modelo es conocido como "pastel de pasas"

EL ÁTOMO DE RUTHERFORD

Para estudiar el efecto de dispersión de las partículas al atravesar la materia, Rutherford (en 1911) bombardeó láminas de oro muy delgadas (0,0001 mm) con un delgado haz de partículas alfa (núcleos de helio, He^{2+}) y observando su trayectoria por el centelleo que producían al chocar con una pantalla fluorescente de ZnS, observó que la mayoría de las partículas alfa atravesaban la lámina sin desviarse y algunas se desviaban algo, pero, lo más importante, es que en ocasiones (muy pocas), eran desviadas en ángulos muy grandes, incluso en algunos casos (muy pocos) superiores a 180° (rebotadas).

Con los datos de los resultados experimentales, la única explicación coherente que encontró Rutherford es que el átomo estuviera prácticamente vacío, y que contenía un núcleo donde residía casi la totalidad de la masa y la carga positiva, siendo el núcleo 10.000 veces menor que el total del átomo, algo así como un guisante en el centro de una catedral. Por esta razón aquellas partículas de He^{2+} que pasaban por las cercanías del núcleo de carga positiva salían desviadas y aquellas muy pocas que casualmente impactaban contra el núcleo de oro salían rebotadas.

Alrededor de este núcleo los electrones giraban y no caen hacia el núcleo porque están en movimiento. Su velocidad orbital genera una tendencia a alejarse en línea recta (inercia), pero la atracción eléctrica del núcleo curva constantemente su trayectoria, manteniéndolos en órbita circular. Esta atracción actúa como fuerza centrípeta.

Es análogo al movimiento de un satélite alrededor de la Tierra: la gravedad no “hace girar” al satélite, sino que lo atrae hacia el centro mientras su velocidad tangencial impide la caída.

DESCUBRIMIENTO DEL NEUTRÓN. CONSTITUCIÓN BÁSICA DEL NÚCLEO

El bombardeo de Berilio con partículas alfa originaba una “radiación” cuya energía no se podía justificar como radiación electromagnética. En 1932 el físico inglés J. Chadwick propuso que esa radiación era en realidad un flujo de partículas sin carga eléctrica, procedentes del núcleo, a las que denominó neutrones, con una masa ligeramente mayor a la de los protones.

El átomo está formado por la corteza y el núcleo.

La corteza está formada por los electrones que intervienen en las reacciones químicas, radiación térmica, efecto fotoeléctrico...

$$m_e = 9,1094 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad q_e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Sin embargo, en este tema nos vamos a centrar en el núcleo.

Constitución básica del núcleo:

En el núcleo se encuentran los **nucleones**, que son los protones y los neutrones.

$$\begin{aligned} m_{p+} &= 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} & q_{p+} &= 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ m_n &= 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg} & q_n &= 0 \end{aligned}$$

Se define el número másico (A) de un núcleo a la suma del número de sus protones (Z) y de sus neutrones (N); es decir:

$$A = Z + N$$

Un núcleo cualquiera X se describe como: A_ZX aunque por cuestión tipográfica pueda aparecer de otras formas, pero en cualquier caso siempre serán distinguibles puesto que $A > Z$ salvo para el átomo de hidrógeno que son iguales.

Núclido es una especie atómica definida por la cantidad específica de protones (Z) y neutrones (N) en su núcleo.

Dos o más núclidos pueden tener el mismo número atómico, Z, y distinto número másico, A; se dice entonces que son **isótopos**, y solo se diferencian en el número de neutrones y todas sus propiedades químicas son iguales, diferenciándose solo en algunas propiedades físicas como la densidad o la estabilidad del núcleo. Así cuando hablamos de hidrógeno nos estamos refiriendo a la combinación natural de sus tres isótopos ${}^1\text{H}_1$, ${}^2\text{H}_1$ y ${}^3\text{H}_1$ (hidrógeno o protio, deuterio y tritio), que químicamente son iguales, pero se diferencian en la densidad que en condiciones normales de presión y temperatura (1 atm y 0°C) son respectivamente 0.0899, 0.1780 y 0.2678 kg/m³ y una vida media (**hablaremos sobre este término**) que para el hidrógeno y deuterio es infinita y para el tritio de 12,32 años.

También tenemos los núclidos **isóbaros** que son los que tienen igual número másico (A) pero distinto número atómico (Z), como ${}^{60}_{30}\text{Zn}$, ${}^{60}_{29}\text{Cu}$, ${}^{60}_{28}\text{Ni}$. Al ser distintos elementos químicos tienen distintas propiedades químicas y físicas.

-Forma, tamaño y densidad del núcleo: El tamaño y la forma de un núcleo se pueden determinar bombardeándolo con partículas de alta energía y observando su dispersión. Una amplia variedad de experimentos sugieren que la mayoría de los núcleos son aproximadamente esféricos y sus radios son del orden de 10^{-15} m (se usa la unidad Fermi o fentómetro, fm, para el valor 10^{-15} m). Esas mismas técnicas han permitido establecer una fórmula empírica que relaciona el radio nuclear con el número másico, A:

$$r \approx 1,2A^{1/3} \text{ fm.}$$

Con esta fórmula para el radio y conociendo las masas de los neutrones y protones podemos calcular la densidad de cada núcleo, que resulta ser igual para todos salvo para el hidrógeno debido a su baja composición de nucleones. Esta densidad es:

$$m = 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot A \text{ kg} \quad v = 4\pi r^3/3 = 4\pi(1,2A^{1/3})^3/3 = 7,24 \cdot A \text{ fm}^3 = 7,24 \cdot (10^{-15})^3 = 7,24 \cdot 10^{-45} A \text{ m}^3$$
$$d = m/v = 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot A / 7,24 \cdot 10^{-45} A \Rightarrow d = 2,3 \cdot 10^{-17} \text{ kg/m}^3$$

Esta densidad es una barbaridad, recordemos que la densidad del agua es solo de 1000 kg/m^3 , un ejemplo comparativo es que el peso de una pelota de tenis rellena de neutrones o núcleos de átomos, pesaría lo que 3,6 millones de Torres Eiffel.

Y la pregunta que nos planteamos es ¿Qué enorme fuerza es la que compacta la materia del núcleo para alcanzar tan increíble densidad? ¿Y qué fuerza mantiene unidos a los protones del núcleo venciendo su repulsión?

FUERZAS NUCLEARES: LA INTERACCIÓN FUERTE

La física moderna nos enseña que el núcleo atómico, la pequeña región central de la materia, está compuesto por nucleones (protones y neutrones). Estudiar cómo se mantiene unido este núcleo nos obliga a introducir la **fuerza nuclear fuerte**, la más intensa de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza.

El Enigma de la Estabilidad Nuclear y la Fuerte Repulsión

La estabilidad de todos los núcleos atómicos, excepto el de hidrógeno común (^1H) presenta un profundo problema, ya que todo núcleo con dos o más protones presenta un desafío fundamental a la física: ¿cómo se mantienen unidos si existe una intensa repulsión eléctrica entre ellos?

- **Repulsión Electromagnética:** Los **protones** dentro del núcleo poseen carga eléctrica positiva. Según la Ley de Coulomb, estas cargas positivas deben **repelerse intensamente** entre sí, especialmente a las distancias extremadamente cortas que existen dentro del núcleo (10^{-15}m).

- **La Necesidad de Cohesión:** Sin una fuerza que contrarrestara esta repulsión, el núcleo debería desintegrarse instantáneamente. El hecho de que existan núcleos estables (como el de Helio, Carbono, etc.) demuestra que debe existir una **fuerza de atracción** de inmensa magnitud, operando solo dentro del núcleo, capaz de dominar a la repulsión electromagnética.

La Propuesta Revolucionaria de Hideki Yukawa

En 1934, el físico japonés Hideki Yukawa abordó este dilema proponiendo una solución brillante. Su propuesta, nacida más de una necesidad teórica que de una observación experimental directa, postuló la existencia de una fuerza nuclear de corto alcance, hoy asociada a la **interacción nuclear fuerte**:

- **Postulado:** Yukawa propuso la existencia de una fuerza de atracción de corto alcance, mucho más poderosa que la repulsión electromagnética, que actúa indistintamente entre **todos los nucleones**: protón-protón (p-p), neutrón-neutrón (n-n) y protón-neutrón (p-n).

- **Alcance Limitado:** Para explicar por qué esta fuerza no afecta a los electrones ni a los átomos vecinos, Yukawa dedujo que su alcance es extremadamente corto, del orden de 1 femtómetro (10^{-15} m), es decir, solo dentro de los límites del núcleo.

- **Partícula Mediadora (El Mesón):** Basándose en la mecánica cuántica, Yukawa pudo predecir que una fuerza de tan corto alcance debía ser mediada por el intercambio de una partícula con una masa significativa (posteriormente identificada como el **mesón o pion**).

La fuerza nuclear fuerte es, por lo tanto, el "pegamento" que mantiene la materia nuclear unida, venciendo la inestabilidad inherente que genera la repulsión de los protones. Su alcance limitado explica su ausencia en el mundo macroscópico, haciendo del núcleo un dominio físico único.

ESTABILIDAD NUCLEAR. DEFECTO DE MASA Y ENERGÍA DE ENLACE

El concepto de la fuerza nuclear fuerte nos lleva directamente a cuantificar la energía necesaria para mantener el núcleo unido. Esta energía es el factor determinante de la estabilidad nuclear.

El Vínculo Energético con la Fuerza Fuerte

La fuerza nuclear fuerte es una fuerza de atracción que ejerce trabajo para formar el núcleo. Cuando los nucleones libres se unen para formar un núcleo estable, la fuerza fuerte vence la repulsión entre los protones y liga a las partículas. Al hacer esto, el sistema libera una inmensa cantidad de energía, conocida como Energía de Enlace (E_b). Esta liberación de energía ocurre porque el sistema unido (el núcleo) es más estable y, por lo tanto, tiene menos energía potencial que los nucleones libres por separado.

1. El Defecto de Masa (Δm)

Cuando un núcleo se forma a partir de sus nucleones (protones y neutrones), la masa del núcleo resultante es menor que la suma de las masas individuales de sus componentes. Esta diferencia se denomina defecto de masa (Δm).

$$\Delta m = (\text{Masa de nucleones separados}) - (\text{Masa del núcleo formado})$$

Este defecto de masa se debe a que, al formarse el núcleo y establecerse el enlace nuclear fuerte, se libera una gran cantidad de energía. De acuerdo con la relatividad especial, esta energía liberada corresponde a una disminución de masa del sistema.

2. La Energía de Enlace Nuclear (E_b de Binding Energy. En español puede verse como E_e , internacionalmente E_b)

La masa perdida (Δm) se ha convertido en la energía que mantiene el núcleo unido. La relación entre la masa y la energía está dada por la ecuación de la Relatividad Especial de Albert Einstein:

$$E = mc^2$$

Por lo tanto, la **energía de enlace (E_b)** de un núcleo es la energía equivalente al defecto de masa (Δm).

$$E_b = \Delta mc^2$$

La **Energía de Enlace** se define como la energía que se requiere para separar completamente un núcleo estable en sus protones y neutrones individuales. Cuanto mayor sea la energía de enlace de un núcleo, más difícil será desintegrarlo y, por lo tanto, más estable será el núcleo. **La interacción fuerte** es la fuerza que vence la repulsión electromagnética entre protones. La energía de enlace es la energía equivalente al defecto de masa, y representa la energía que se liberó al formarse el núcleo, o lo que es equivalente, la energía que ahora se necesitaría para separar el núcleo en sus nucleones individuales.

La **energía de enlace por nucleón** es una medida de la estabilidad de un núcleo, se calcula dividido la energía de enlace entre los nucleones que forman el núcleo y representa la energía necesaria para arrancar un nucleón del núcleo.

$$E_{\text{nucleón}} = \frac{E_b}{A}$$

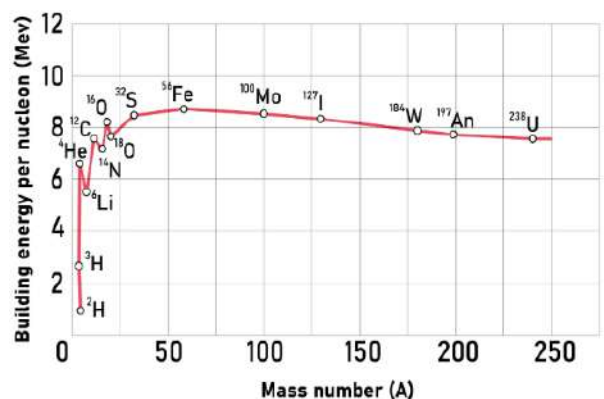
3. La Estabilidad y la Curva de Enlace

Para evaluar la estabilidad de un núcleo con respecto a otros, no se utiliza la energía de enlace total, sino la **energía de enlace por nucleón (E_b)**. Esta magnitud representa la energía promedio que mantiene a cada partícula individual dentro del núcleo.

- **Núcleos Ligeros ($A < 20$):** La energía de enlace por nucleón aumenta rápidamente a medida que A crece, indicando que los núcleos se vuelven progresivamente más estables.

- **El Pico de Estabilidad:** La estabilidad alcanza un **máximo** para los núcleos con número de masa alrededor de $A \approx 56$, que corresponde al hierro (^{56}Fe) y níquel (^{62}Ni). Estos son los núcleos más estables del universo.

- **Núcleos Pesados ($A > 56$):** La energía de enlace por nucleón decrece lentamente a medida que A aumenta. Esto se debe a que la fuerza nuclear fuerte tiene un alcance muy corto y es ineficaz a largas distancias, mientras que la repulsión electromagnética (que tiene alcance infinito) se acumula con cada protón adicional.



Esta **Curva de Energía de Enlace por Nucleón** es fundamental porque explica los dos procesos de liberación de energía más importantes:

- **Fusión Nuclear:** La unión de núcleos ligeros ($A < \text{Hierro}$) para formar núcleos más pesados libera energía.
- **Fisión Nuclear:** La ruptura de núcleos muy pesados (por encima del Hierro) para formar fragmentos más ligeros libera energía.

RADIOACTIVIDAD NATURAL

A finales del siglo XIX (1896), H. Becquerel descubrió de forma accidental la radiactividad; tenía sales de uranio que metió en un cajón en el que había varias placas fotográficas sin revelar. Después de varios días observó que las placas estaban veladas y llegó a la conclusión de que las sales de uranio eran capaces de velar las placas fotográficas incluso en la oscuridad mediante una radiación, término que acuñó Becquerel para este fenómeno.

Más tarde, el matrimonio Curie descubrieron el Polonio y el Radio, que eran más activos que el Uranio, siendo el más activo Radio, y de ahí acuñaron el nombre de radioactividad (radiactividad).

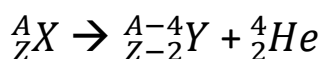
La radiactividad es un fenómeno que ocurre a nivel del núcleo. Éste, ya sea de forma natural o forzada, emite partículas de su interior. Esto trae como consecuencia que el número de nucleones del núcleo cambie (puede cambiar Z y A). Es decir, la sustancia inicial se transforma en otra diferente.

Se conocen básicamente tres tipos de radiactividad natural, representadas con α , β y γ , produciendo cada una de ellas alteraciones del núcleo mediante lo que se conoce como leyes de desplazamiento de Soddy y Fajans, enunciadas de forma independiente y simultáneamente en 1913.

A continuación se describen las características de cada una de las tres radiaciones naturales y la correspondiente ley de desplazamiento:

Radiación alfa (α): Son núcleos de Helio que han perdido sus dos electrones (${}^4_2\text{He}^{2+}$). Tienen escaso poder penetrante, se frenan en pocos centímetros de aire, una lámina de papel o la piel humana, pero son muy ionizantes, ya que al ser grandes y tener carga $+2$, arrancan electrones de los átomos con mucha facilidad cuando chocan con ellos.

1ª Ley de Soddy-Fajans: Cuando un núcleo X emite una partícula α , el elemento resultante se desplaza 2 unidades hacia la izquierda en el sistema periódico, es decir, se transforma en otro núcleo Y con 2 protones menos y con 4 unidades menos de número másico.

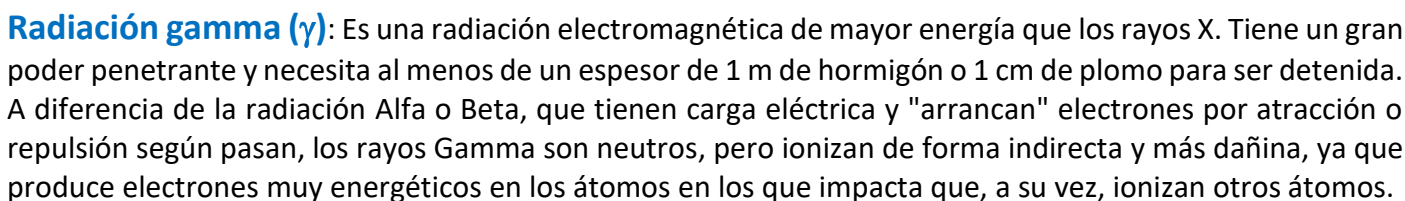
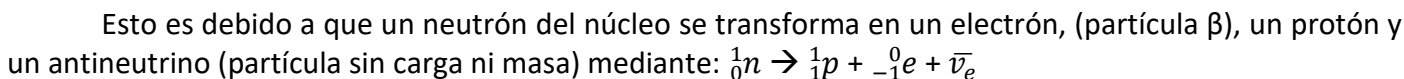


En realidad el ajuste de la reacción sería: ${}_{90}^{232}\text{Th} \rightarrow {}_{88}^{228}\text{Ra}^{2-} + {}_2^4\text{He}^{2+}$ pero la física nuclear se enfoca principalmente en lo que sucede **dentro del núcleo**, donde las cargas iónicas (electrones faltantes o sobrantes) son irrelevantes.

Radiación beta (β) (*): La desintegración β tiene lugar en los núcleos que tienen demasiados neutrones (desintegración β^-), en ella ocurre que un neutrón (n) se transforma espontáneamente en un protón (p^+) emitiendo en el proceso un electrón (e^-) y otra partícula neutra que se llama antineutrino ($\bar{\nu}_e$). Por tanto, las partículas β^- son precisamente electrones (pero formados en el núcleo, no son de la corteza).

Tiene un poder de penetración medio, pueden atravesar el papel, pero son detenidas por una lámina de aluminio de unos milímetros o unos metros de aire. Su poder ionizante es moderado, menor que la alfa por tener menos carga y masa.

2ª Ley de Soddy-Fajans: Cuando un núcleo X emite una partícula β^- , el elemento resultante se desplaza un lugar a la derecha del sistema periódico, es decir, se transforma en otro núcleo Y con un número atómico 1 unidad mayor e igual número másico.



Un núcleo un núcleo atómico que ha absorbido energía y se encuentra en un nivel de energía superior a su estado fundamental, estado excitado, se vuelve temporalmente inestable; para volver a su estado base, liberará esa energía extra, generalmente en forma radiación gamma. Por ello, la radiación gamma suele acompañar a desintegraciones α o β cuando el núcleo hijo queda en estado energético excitado.

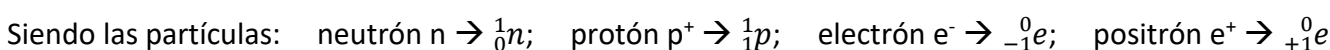
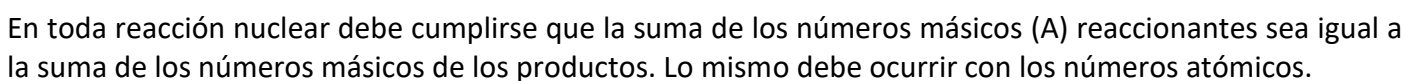
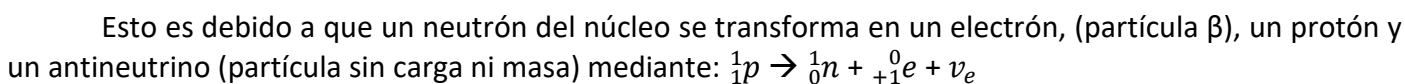
3ª Ley de Soddy-Fajans: Cuando un núcleo excitado emite radiación electromagnética (γ), no varían ni A ni Z, solo pierde energía.



(*) Existe otra radiación β que no es natural, la β^+ , descubierta en 1934 por Frédéric e Irène Joliot-Curie y que llamarían radiactividad artificial.

Si la desintegración β tiene lugar en los núcleos que tienen demasiados neutrones, la **desintegración β^+** ocurre cuando los núcleos que tienen menos neutrones de los necesarios para su estabilidad, por lo que un protón (p^+) se transforma espontáneamente en un neutrón (n) emitiendo en el proceso una partícula denominada positrón (e^+), con carga positiva y masa igual a la del electrón, y otra partícula neutra que se denomina neutrino (ν_e). Por tanto, las partículas β^+ son positrones.

Ampliación de la 2ª Ley de Soddy-Fajans: Cuando un núcleo X emite una partícula β^+ , el elemento resultante se desplaza un lugar a la izquierda del sistema periódico, es decir, se transforma en otro núcleo Y con un número atómico 1 unidad menor e igual número másico



SERIES RADIATIVAS

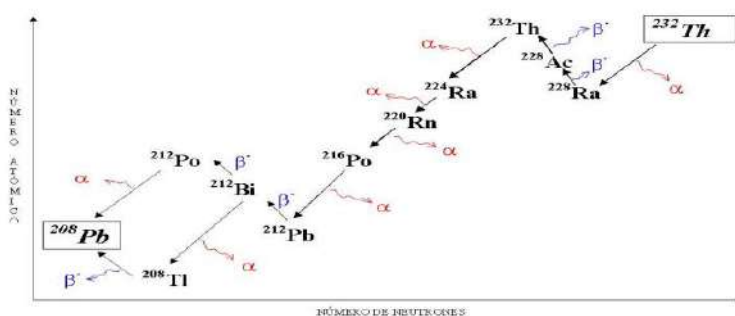
Cuando un núcleo inestable sufre un proceso de desintegración no da lugar de inmediato a un nuevo núcleo estable, sino que lo hace a través varias etapas (entre 10 y 14) con emisiones de radiación α , β y γ . El conjunto de núcleos intermedios por los que pasa un núcleo inestable original hasta llegar a un núcleo definitivamente estable (generalmente un isótopo de Pb) constituye lo que denominamos una serie radiactiva.

Existen cuatro series radiactivas. Para el torio, ${}^{232}_{90}\text{Th}$, su número másico es múltiplo de 4 y en su serie todos los núcleos intermedios por los que pasa al ir emitiendo partículas α y/o β , tienen igualmente número másico múltiplo de 4, por lo que se denomina serie radiactiva 4n. La serie del neptunio, ${}^{237}_{93}\text{Np}$, por las mismas razones de multiplicidad se la denomina 4n+1, la del ${}^{238}_{92}\text{U}$, 4n+2 ; y la del ${}^{235}_{92}\text{U}$, 4n+3.

La siguiente tabla resume los núcleos iniciales y finales de cada serie. La otra figura representa las etapas de la serie del torio, $^{232}_{90}\text{Th}$.

Familia			A	Denominación
Primero	Periodo (años)	Último		
${}^{232}_{90}\text{Th}$	$T=13.9 \times 10^9$	${}^{208}_{82}\text{Pb}$	$4n$	Torio
${}^{241}_{94}\text{Pu}$	$T=2.2 \times 10^6$	${}^{209}_{82}\text{Pb}$	$4n + 1$	Neptunio
${}^{238}_{92}\text{U}$	$T=4.5 \times 10^9$	${}^{206}_{82}\text{Pb}$	$4n + 2$	Uranio-Radio
${}^{235}_{92}\text{U}$	$T=7 \times 10^8$	${}^{204}_{82}\text{Pb}$	$4n + 3$	Actinio

http://nuclear.fis.ucm.es/webgrupo/labo/archivos/RADIOACTIVIDAD_CLASE_PPT.pdf



LEY DE DESINTEGRACIÓN RADIACTIVA

La evolución temporal de una muestra radiactiva que va desintegrándose a lo largo del tiempo tiene un hábito exponencial negativo. Si tomamos una muestra de material radiactivo, con un número inicial de núcleos N_0 que irán desintegrándose, a medida que transcurre el tiempo, el número de núcleos que van desintegrándose disminuye. La rapidez de esta disminución depende de dos factores:

- **Naturaleza de la sustancia:** Que viene marcada por la llamada **constante de desintegración radiactiva, λ** , característica de cada isótopo radiactivo, y que se mide en s^{-1} . Cada sustancia radiactiva tendrá su λ , que indica la probabilidad de que un núcleo se desintegre en la unidad de tiempo.
- **Número de átomos que quedan en cada momento: N**

De lo que se deduce que la velocidad de desintegración de los núcleos, $\frac{dN}{dt}$, en cada momento es directamente proporcional a su constante de desintegración λ y al número de núcleos existentes, N:

$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$ El signo menos indica que la desintegración de los núcleos disminuye con el tiempo.

$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt$ Si en el instante inicial $t_0=0$ tenemos N_0 núcleos, para ver en un instante posterior t cuantos núcleos N quedan sin desintegrar, tenemos que integrar la ecuación:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_{t_0}^t \lambda dt \Rightarrow \ln N - \ln N_0 = -\lambda(t - t_0) \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \Rightarrow \quad \mathbf{N = N_0 e^{-\lambda t}}$$

Si tenemos en cuenta que cada núcleo representa un átomo (sin electrones) podemos dividir la ecuación anterior por el número de Avogadro (N_A) y obtener la proporción en en moles:

$n = n_0 e^{-\lambda t}$ y dividiendo por la masa atómica obtener la relación en masas: $m = m_0 e^{-\lambda t}$

Actividad o velocidad de desintegración: En la ecuación inicial teníamos $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$, donde el término $\frac{dN}{dt}$ se corresponde con el número de desintegraciones por unidad de tiempo, es decir, la **velocidad de desintegración, que se denomina como Actividad (A)**:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N \Rightarrow A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \text{ donde } \lambda N_0 = A_0 \text{ es la actividad inicial } \Rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$$

La actividad, en el SI, se mide en **Becquerel (1 Bq = una desintegración radiactiva por segundo)**, pero al ser una medida muy pequeña se suele utilizar el curio, (Ci), donde $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

Periodo de semidesintegración o semivida, $T_{1/2}$: Es el tiempo que tarda la muestra radiactiva inicial en reducirse a la mitad, $N = N_0/2$. Introduciendo este valor en la ley de desintegración radiactiva tenemos:

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

Vida media (τ): Es el tiempo promedio que tarda en desintegrarse un núcleo (podemos compararlo con la esperanza de vida o vida media de los habitantes de una nación). Es la inversa de la constante de desintegración: $\tau = \frac{1}{\lambda}$

REACCIONES NUCLEARES. FISIÓN Y FUSIÓN NUCLEAR

En las reacciones químicas se produce una recombinación de los electrones de valencia para formar nuevas uniones de átomos que van a dar moléculas distintas a las iniciales, pero todos los átomos que estaban al inicio de la reacción seguirán estando al final de la misma con sus núcleos intactos. Sin embargo, en las reacciones nucleares sí hay cambios en los núcleos.

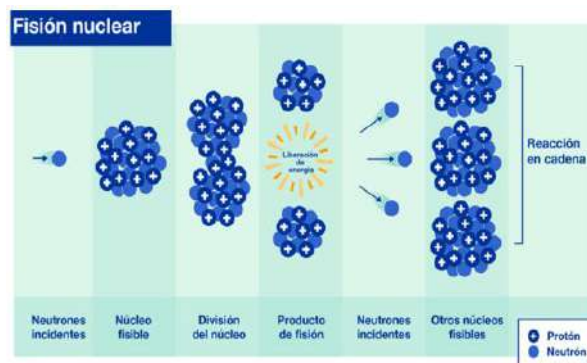
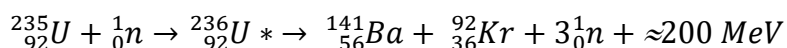
Se pueden conseguir artificialmente transformaciones en los núcleos atómicos "bombardeándolos" con partículas alfa, neutrones, protones y otros. El núcleo absorbe dicha partícula y emite otras, transformándose en otro elemento diferente, otro isótopo del mismo elemento o incluso romperse en varios núcleos de elementos más pequeños.

El estudio de estas reacciones lo inició Rutherford en 1919, al bombardear nitrógeno con partículas α , y observar que aparecía oxígeno y se desprendían protones. En 1933, el matrimonio Irène Joliot-Curie y Frédéric Joliot, bombardeando aluminio con partículas α , observaron que el elemento resultante, ^{30}P , volvía a desintegrarse por sí solo. Habían conseguido fabricar un elemento radiactivo. Nació la radiactividad artificial, actualmente de gran utilidad en la industria, medicina (detección y tratamiento del cáncer), investigación...

Fisión nuclear:

La fisión nuclear consiste en la ruptura de núcleos pesados mediante el bombardeo con neutrones. El núcleo de ^{235}U , al captar un neutrón se genera un estado excitado de ^{236}U . Posteriormente, el núcleo comienza a vibrar entre la forma esférica y la elipsoidal hasta que la vibración supera la tensión superficial que mantiene unido al núcleo y se divide generando dos (o más) nuevos fragmentos, neutrones y energía como consecuencia de la diferencia de masas entre los productos finales e iniciales (*): $E = \Delta mc^2$

Una reacción típica es:



Fisión nuclear (Gráfico: A. Vargas/OIEA)

También puede ocurrir: $^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow ^{236}_{92}\text{U}^* \rightarrow ^{137}_{52}\text{Te} + ^{97}_{40}\text{Kr} + 2^1_0\text{n} + \approx 200 \text{ MeV}$

En cualquier caso, cada reacción desprende un mayor número de neutrones de los que absorbe y estos nuevos neutrones podrán chocar con nuevos átomos de Uranio, volviéndose a producir la fisión, con desprendimiento de energía y más neutrones, y así sucesivamente, esto es lo que se denomina reacción en cadena, que ocurre aproximadamente en una millonésima de segundo en una bomba atómica, pero en una central nuclear se puede controlar la velocidad de la reacción para que la energía se desprenda en un largo periodo de tiempo, absorbiendo los neutrones como luego veremos.

En los dos ejemplos descritos de fisión del ^{235}U se producen unos 200 MeV. Veamos cuanta energía representan esos 200 MeV:

$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ y $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow 200 \text{ MeV} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$. Es una energía muy pequeña, pero es la de un solo núcleo. Un mol de ^{235}U son 235 g y $6,022 \cdot 10^{23}$ núcleos $\Rightarrow 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 1,927 \cdot 10^{13} \text{ J}$, que por gramo serán $1,927 \cdot 10^{13} / 235 = 8,2 \cdot 10^{10} \text{ J}$

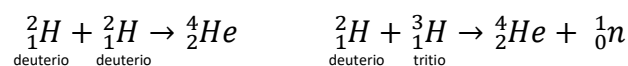
1 g de TNT produce $4,18 \cdot 10^3 \text{ J} \Rightarrow$ Dividimos una energía entre la otra: $8,2 \cdot 10^{10} \text{ J} / 4,18 \cdot 10^3 \text{ J} \approx$ **20 millones de veces** más energética la fisión del $^{235}_{92}\text{U}$ que la explosión del TNT por unidad de masa.

(*) Puede parecer contradictorio hablar de pérdida de masa cuando el número másico se conserva. La explicación es que el número másico es solo el recuento de nucleones, mientras que la **masa real del sistema no es exactamente un número entero** y puede variar ligeramente.

En los procesos de fisión, la masa total de los productos es **ligeramente menor** que la de los reactivos. Esta pequeña diferencia de masa se transforma en energía liberada, de acuerdo con la relación de Einstein $E=mc^2$. Esto ocurre porque el núcleo pesado original tiene una **menor energía de enlace por nucleón**, es decir, sus nucleones están menos ligados y el sistema se encuentra en un **estado energético más alto y menos estable**. Tras la fisión, los núcleos más pequeños formados presentan una **mayor energía de enlace por nucleón**, lo que corresponde a estados energéticos más bajos y más estables. Al pasar de un estado de mayor energía a otro de menor energía, el sistema libera la diferencia en forma de energía cinética de los fragmentos y radiación, lo que se observa experimentalmente como una **disminución de la masa total**

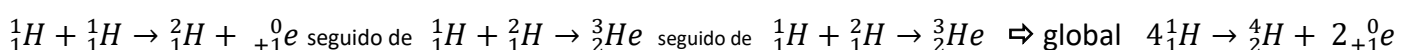
Fusión nuclear

Es el proceso inverso al de la fisión, ya que la fusión nuclear consiste en la unión de núcleos ligeros para formar otros más pesados. Cuando se unen dos núcleos ligeros se obtiene otro más estable; es decir, con una energía de enlace por nucleón mayor, por lo que se libera energía. Por ejemplo:



Las reacciones de fusión son muy difíciles de obtener con la tecnología actual, ya que para unir dos núcleos hay que vencer las fuerzas eléctricas de repulsión de los protones de los núcleos. Para conseguirlo, los núcleos deben chocar entre sí a velocidades muy altas, lo que requiere temperaturas de varios millones de grados. De momento solo se ha conseguido una fusión incontrolada (bomba de hidrógeno) mediante la explosión de una bomba de fisión nuclear.

En el Sol la enorme gravedad comprime los núcleos de hidrógeno a una altísima presión y temperatura, y se produce el siguiente ciclo:

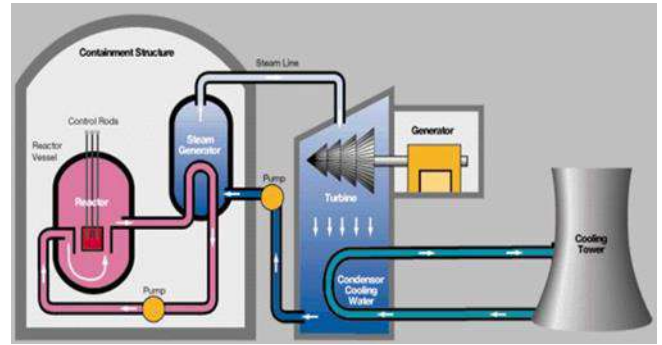


La energía que se obtiene por unidad de masa es 4-5 veces que la del ^{235}U , pero esta tiene un límite de masa (masa crítica que explota por si sola), mientras que la de hidrógeno no tiene masa crítica y se puede hacer tan grande como se quiera. La bomba del Zar, detonada en 1961, fue como 3300 veces la de Hiroshima.

CENTRALES NUCLEARES

En una central nuclear se aprovecha la energía liberada en la fisión de núcleos como el $^{235}_{92}\text{U}$ (y, en algunos reactores, también $^{239}_{94}\text{Pu}$) para calentar agua, llevarla a ebullición y hacer que el vapor mueva una turbina acoplada a un alternador que produce corriente eléctrica.

Para que la reacción de fisión no genere un exceso de calor, se emplean **moderadores**, cuya función es **frenar los neutrones** y controlar la velocidad de la reacción. Los moderadores más habituales son el agua desmineralizada, el grafito o el agua pesada (D_2O).



El reactor nuclear es el corazón de la central, donde se libera la energía, pero esta se transporta mediante **tres circuitos independientes de agua**:

- **Circuito primario** (color rosa). El agua circula por el interior de la vasija del reactor, pasando entre las barras de combustible y absorbiendo el calor generado en la fisión. Debido a la radiación y a la posible activación del agua y de sus impurezas, este circuito es **radiactivo** y permanece siempre confinado dentro del edificio de contención.
- **Circuito secundario** (color azul). El agua del circuito primario cede su calor, a través de un intercambiador, al agua del circuito secundario sin mezclarse con ella. Esta agua se transforma en vapor y mueve las turbinas que generan electricidad.
- **Circuito terciario** (color verde). Su función es enfriar el vapor del circuito secundario para condensarlo de nuevo en agua. Utiliza agua de un río, del mar o de torres de refrigeración, y **no presenta radiactividad**.

Las centrales nucleares no emiten gases contaminantes a la atmósfera; sus emisiones visibles son vapor de agua. El principal problema asociado es la gestión de los residuos radiactivos, que deben almacenarse de forma segura en lugares geológicamente estables.

En una central nuclear no puede producirse una explosión nuclear como la de una bomba atómica, ya que el combustible no posee el grado de enriquecimiento necesario. Los accidentes de Chernóbil y Fukushima se debieron, respectivamente, a graves fallos de diseño y mala programación de una prueba de seguridad, y a una inundación provocada por un tsunami.

Centrales nucleares de fusión: Dada la complejidad del proceso y las altísimas temperaturas que se necesitan, están solo en fase de estudio. Sin embargo, si en un futuro próximo la tecnología es capaz de controlar el proceso de una forma segura, se podría afirmar que el problema de suministro de energía estaría resuelto. Los residuos de la fusión nuclear son mucho menos conflictivos que los de la fisión y la materia prima es abundante y barata.

LAS CUATRO INTERACCIONES FUNDAMENTALES DE LA NATURALEZA

La Naturaleza y el Universo conocido existen cuatro interacciones fundamentales que son:

1. Interacción gravitatoria
2. Interacción electromagnética
3. Interacción nuclear fuerte (INF)
4. Interacción nuclear débil (IND)

Estas cuatro fuerzas explican todos los fenómenos interactivos que existen en el Universo.

Interacción gravitatoria:

Afecta a todos los cuerpos con masa.

Es siempre atractiva.

Es de largo alcance, sin límite, pero disminuyendo su intensidad con el cuadrado de la distancia.

Es la más débil de las cuatro interacciones. Su constante característica, G , es independiente del medio en el que los cuerpos (vacío, aire, agua ...).

Explica: la sensación de peso, la caída de los cuerpos, el movimiento de los planetas y galaxias.

Interacción Electromagnética:

Afecta a cuerpos con carga eléctrica y a cargas en movimiento.

La carga puede ser positiva o negativa y la acción ser atractiva o repulsiva, según el signo de las cargas.

Es de largo alcance, sin límite, pero disminuyendo su intensidad con el cuadrado de la distancia.

Es una interacción fuerte. Su constante característica, K , depende del medio en el que estén ambos cuerpos

Explica: Las fuerzas eléctricas y magnéticas, el comportamiento de los imanes, la estructura de los átomos y moléculas, los enlaces y reacciones químicas, y todos los fenómenos eléctricos y magnéticos a escala macroscópica.

Interacción nuclear fuerte:

Afecta a partículas nucleares constituidas por quarks (protones, neutrones...). No afecta a los electrones.

Es atractiva y de muy corto alcance (aprox. 10^{-15} m, el tamaño del núcleo atómico)

Es, con mucha diferencia, la más fuerte de las interacciones.

Explica: Estructura del núcleo atómico, reacciones nucleares, algunas desintegraciones radiactivas...

Interacción nuclear débil:

Afecta a las partículas llamadas leptones (electrón, neutrinos...)

No es propiamente atractiva ni repulsiva.

Es responsable de la transformación de unas partículas en otras

Es de muy corto alcance (aprox 10^{-18} m)

Es una interacción débil, aunque más fuerte que la gravitatoria.

Explica: Radiactividad, cambios en partículas subatómicas, supernovas...

Es responsable de la desintegración radiactiva, específicamente la desintegración beta, y del proceso de fusión nuclear en las estrellas.

MODELO ESTÁNDAR DE LA MATERIA: QUARKS Y ELECTRONES.

Toda la materia ordinaria que vemos (tú profe, una mesa o el Uranio de una central nuclear) está formada únicamente por **dos tipos** de partículas fundamentales:

1. Los Quarks (Los "ladrillos" del núcleo)

Son las partículas que forman los protones y los neutrones. Para la materia estable, solo nos interesan dos:

- **Quark up (u):** Carga $+2/3$.
- **Quark down (d):** Carga $-1/3$.

La receta del núcleo:

- **Protón:** Se forma con **uud**. (Suma de cargas: $2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$).
- **Neutrón:** Se forma con **udd**. (Suma de cargas: $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$).

2. Los Leptones (Los "ligeros")

De esta familia, la partícula estrella es el **Electrón**:

- No está hecho de nada más pequeño (es puntual).
- Tiene carga -1 .
- Se encarga de la estructura de los átomos y de los enlaces químicos mediante la **interacción electromagnética**.

¿Cómo se mantienen unidos? (Las fuerzas)

1. **Fuerza Nuclear Fuerte:** Mantiene unidos a los quarks dentro de protones y neutrones, y a los protones y neutrones dentro del núcleo. Es responsable de la enorme energía de enlace nuclear que se libera en procesos como la fisión.
2. **Fuerza Electromagnética:** Mantiene a los electrones ligados al núcleo determinando la estructura de los átomos y de los enlaces químicos. También es responsable de la repulsión entre los protones dentro del núcleo, repulsión que debe ser vencida por la fuerza nuclear fuerte.

Resumen (La jerarquía):

- **Materia** → Átomos.
- **Átomos** → Electrones + Núcleo.
- **Núcleo** → Protones + Neutrones.
- **Protones/Neutrones** → Quarks.

Existen más partículas elementales (otros quarks aparte del up y down, y leptones además del electrón), pero su estudio no es necesario para comprender la estructura de la materia a este nivel.