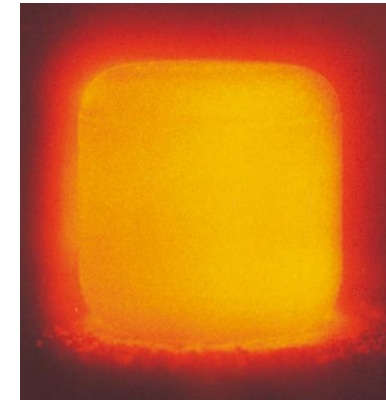
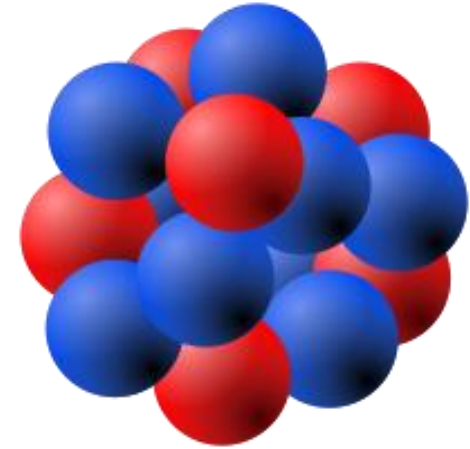


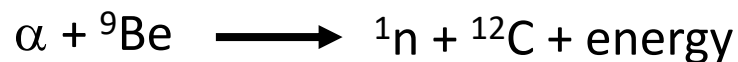
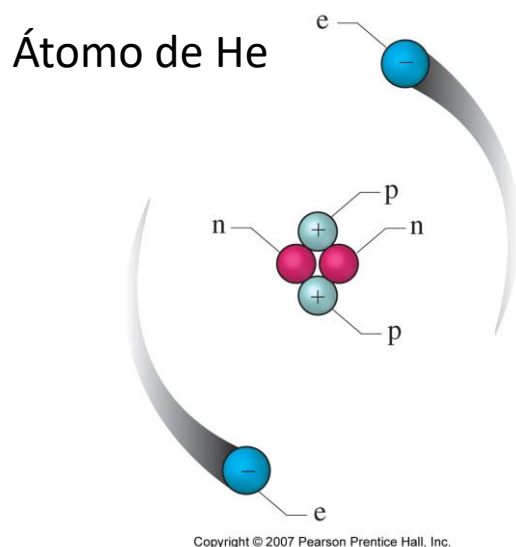
# Tema 2 – Estructura atómica: el núcleo

1. El modelo estándar de partículas elementales
  - 1.1. Partículas y fuerzas elementales
2. Estabilidad nuclear y decaimiento radiactivo
  - 2.1. Fuerza nuclear fuerte
  - 2.2. Interacción débil
  - 2.3. Radiactividad y tipo de emisiones radiactivas (Decaimiento)
    - 2.3.1. Decaimiento alfa
    - 2.3.2. Decaimiento beta y captura electrónica
    - 2.3.3. Decaimiento gamma
    - 2.3.4. Emisión de neutrones y protones
  - 2.4. Defecto y exceso de masa: energía por nucleón
3. Series radiactivas
4. Cinética de la desintegración radiactiva
  - 4.1. Actividad radiactiva
  - 4.2. Tiempo de semidesintegración y vida media
  - 4.3. Datación por carbono-14
5. Radiactividad natural
6. Reacciones nucleares
  - 6.1. Fisión nuclear
    - 6.1.1. Isótopos fisionables, combustible nuclear y masa crítica
  - 6.2. Fusión nuclear
    - 6.2.1. Deuterio-Deuterio y Deuterio-Tritio
  - 6.3. Bomba de hidrógeno
7. Nucleosíntesis estelar



# Estructura atómica: el núcleo

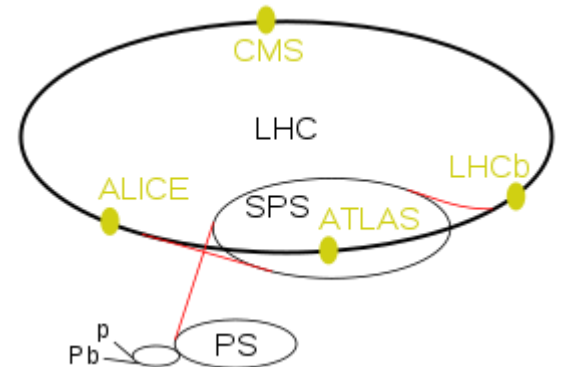
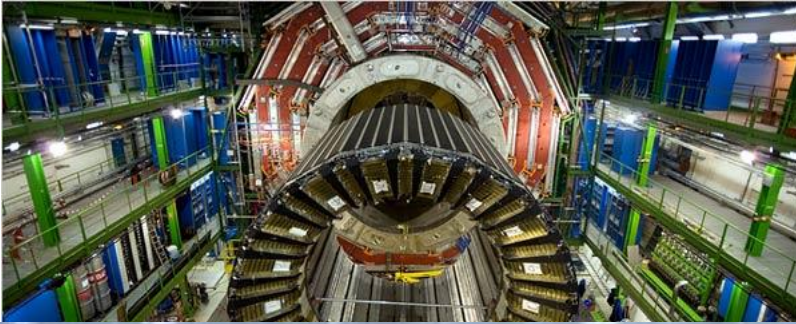
Tanto el descubrimiento del protón como el del neutrón, pusieron de manifiesto la importancia del núcleo atómico y las enormes energías que se intercambian cuando se forman o se destruyen.



# Estructura atómica: el núcleo

## LHC: el gran colisionador de hadrones

Las partículas con carga eléctrica se pueden acelerar con campos eléctricos y magnéticos con el objeto de facilitar el choque y la reacción (aceleradores de partículas) al impactar a gran velocidad (99.99% de  $c$ ) con el blanco. El neutrón y otras partículas neutras no se pueden acelerar dado su carácter neutro.



27 Km de recorrido



# Estructura atómica: el núcleo

## Otras partículas subatómicas: El modelo estándar de partículas elementales

Toda la materia del Universo está formada por :

### FERMIONES

2 tipos

#### QUARKS

Las partículas formadas por quarks se llaman hadrones. Los **protones** y los **neutrones** están constituidos por tres quarks, dando lugar a bariones. Se comportan como fermiones. Los quarks pueden también unirse con antiquarks para formar otras partículas llamadas mesones, como los **piones**. Se comportan como bosones.

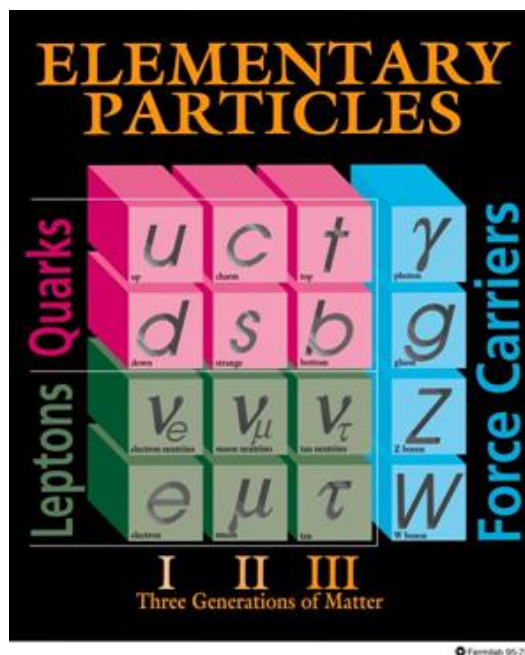
#### LEPTONES

Los leptones no están constituidos por quarks. Son leptones los **electrones** orbitales y otras partículas como muones, taus y neutrinos.

### BOSONES

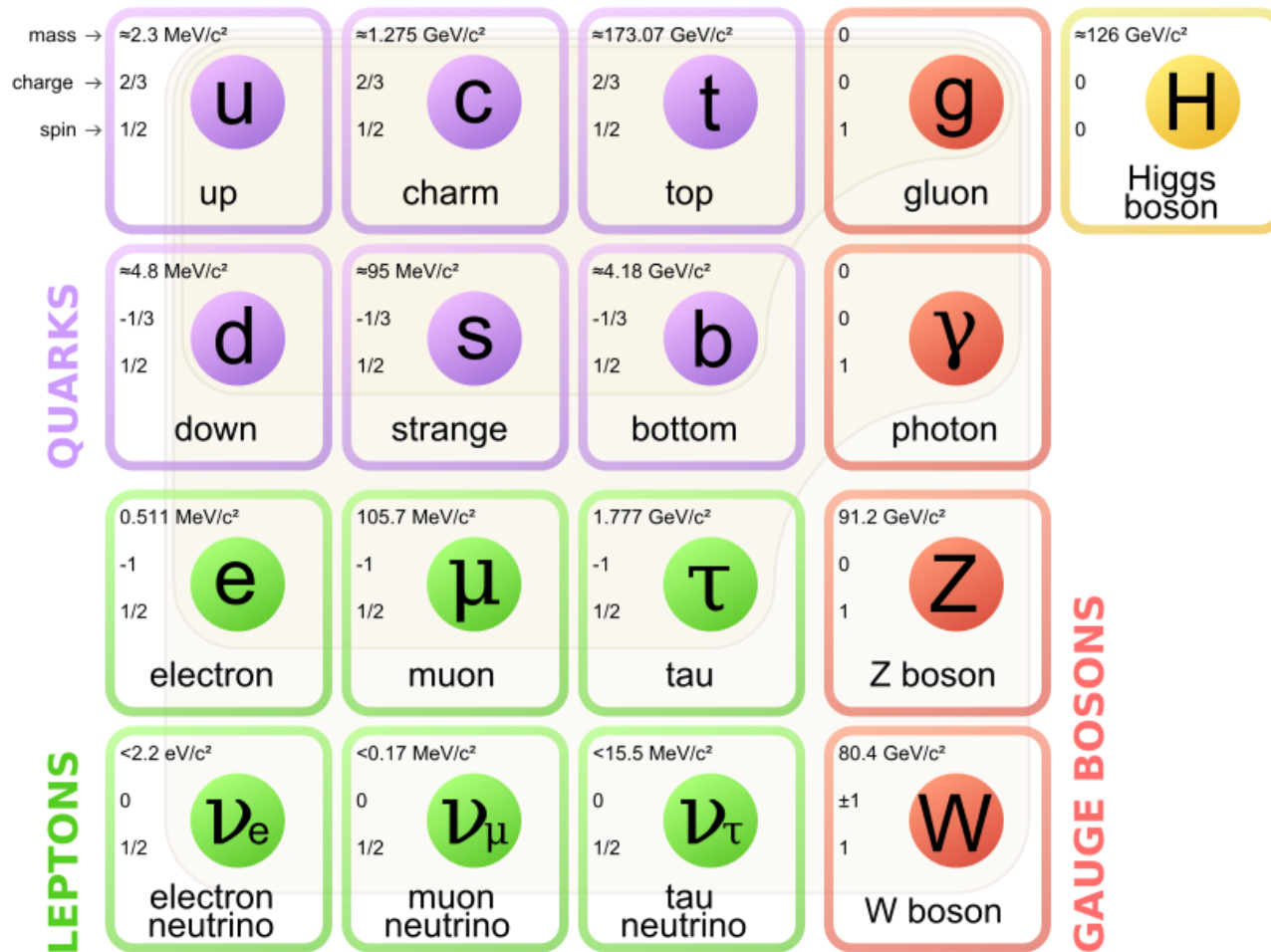
Las partículas que transfieren fuerzas entre la materia, que pueden ser:

- **Fotones**: son responsables de la fuerza electromagnética entre el núcleo y los electrones.
- **Gluones**: son los portadores de la fuerza nuclear fuerte
- Los **bosones W y Z** transfieren la interacción débil
- **Gravitones** (no observados todavía): se cree que son los responsables de la fuerza gravitatoria



# Estructura atómica: el núcleo

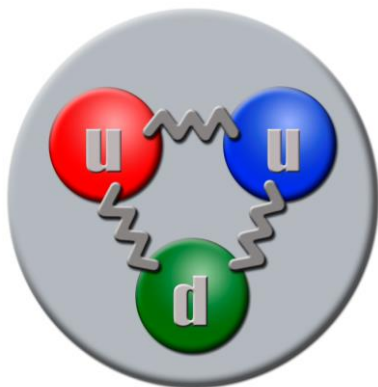
## Otras partículas subatómicas: El modelo estándar de partículas elementales



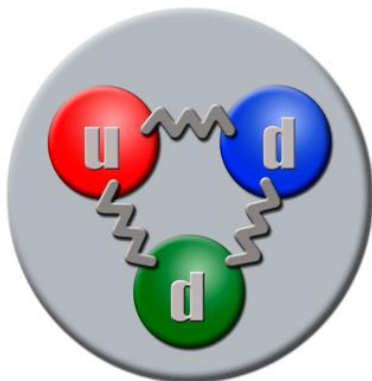
# Estructura atómica: el núcleo

## Fuerza nuclear fuerte

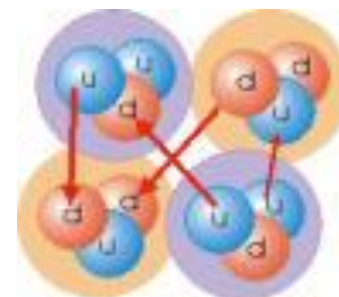
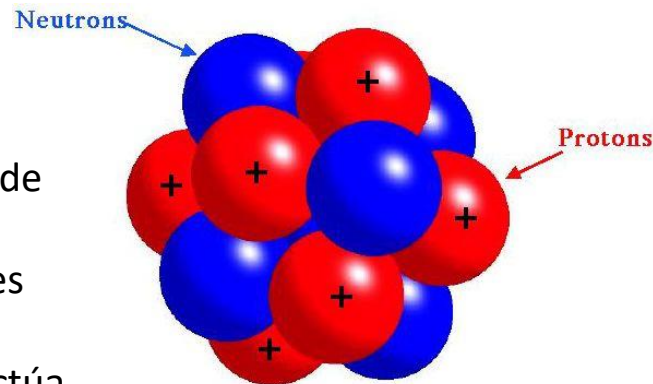
Protón



Neutrón



- Su radio de acción es del orden de  $10^{-15}$  m (del tamaño del núcleo)
- Actúa solo cuando los nucleones están muy próximos
- Es independiente de la carga. Actúa entre dos protones, dos neutrones y también entre un protón y un neutrón
- Son de mayor intensidad que las fuerzas electromagnéticas.
- Los gluones mantienen unidos a los quarks, mientras que entre nucleones hay un intercambio de piones (fuerza fuerte residual).



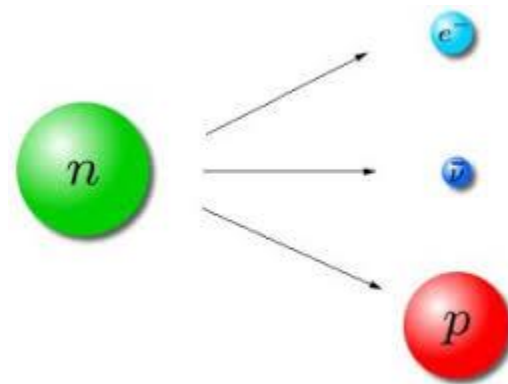
# Estructura atómica: el núcleo

## Interacción débil

Como esta interacción puede también afectar a los electrones de la corteza, se prefiere quitar la palabra nuclear. Más fuerte que la gravitatoria, si su valor fuese 1, la electromagnética sería 1000 y la nuclear fuerte 100.000.000.000

Sin embargo, es la que alimenta la combustión de las estrellas y permiten la generación de nuevos elementos a partir de otros. Así, la interacción de los bosones W ( $W^+$  y  $W^-$ ) con los quarks los puede transmutar, lo que provoca que **un protón se pueda transformar en un neutrón y viceversa** mediante la emisión de bosones W cargados (el bosón Z es neutro eléctricamente y su interacción con otras partículas es más difícil de detectar).

El proceso de transformación entre neutrones y protones por causa de la interacción débil se denomina **desintegración o decaimiento beta**, que puede ser beta negativo ( $\beta^-$ ) donde un neutrón se transforma en un protón, un electrón y un antineutrino, o beta positivo ( $\beta^+$ ), donde un protón se transforma en un neutrón, un positrón y un neutrino. Así, un elemento se puede ir transformando en otro.



# Estructura atómica: el núcleo

## Decaimiento radiactivo

El **decaimiento radiactivo** de un núcleo atómico es un *proceso espontáneo* de desintegración de dicho núcleo. Los eventos de decaimiento *se presentan en núcleos inestables*, es decir, donde la proporción entre el número de protones y el de neutrones no es energéticamente óptima. Así, cuando la fuerza de interacción nuclear fuerte no puede mantener al núcleo unido tiene lugar dicho proceso.

La periodicidad de este tipo de procesos (estadísticamente hablando) es característica para cada isótopo de cada elemento y no puede ser alterada artificialmente.

Existen tres tipos principales de decaimiento radioactivo: el decaimiento alfa, beta y gamma.

-El **decaimiento  $\alpha$**  se presenta, generalmente, en elementos más pesados que el bismuto. En este caso, tiene lugar el desprendimiento de un *núcleo de helio* (He-4), llamado partícula alfa.

-El **decaimiento  $\beta$**  se presenta, generalmente, en núcleos de menor peso atómico que el bismuto en donde las proporciones de protones y neutrones resultan inestables. Por ejemplo, los núcleos estables C-12 y C-13 tienen una proporción neutrones:protones de 6:6 (= 1) y de 7:6 (= 1.17), respectivamente, mientras que en los núcleos radioactivos C-11 y C-14 éstas son de 5:6 (= 0.83) y 8:6 (= 1.33), respectivamente. Bajo este supuesto de inestabilidad, en el interior del núcleo se lleva a cabo una *interconversión entre protones* (C-11 vía  $\beta^+$ ) y *neutrones* (C-14 vía  $\beta^-$ ).

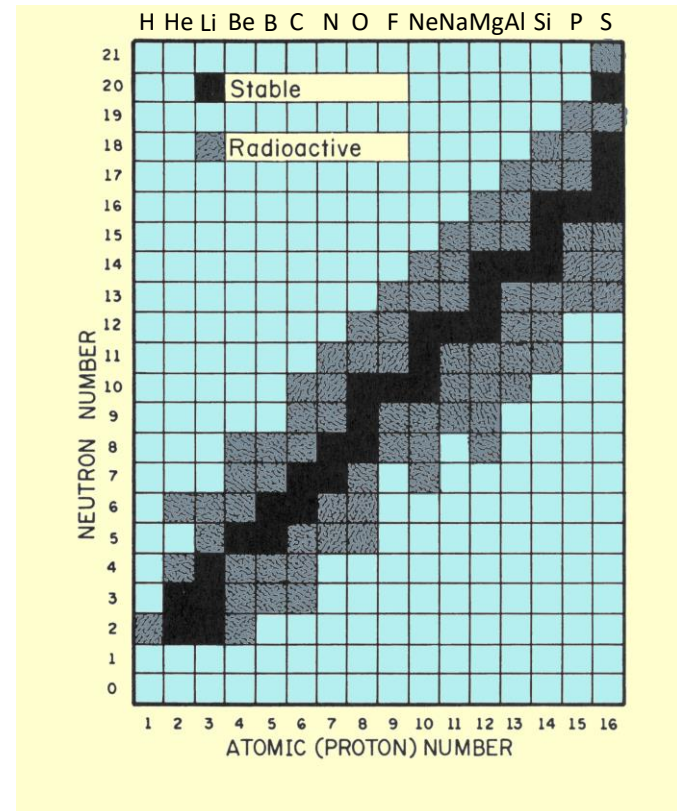
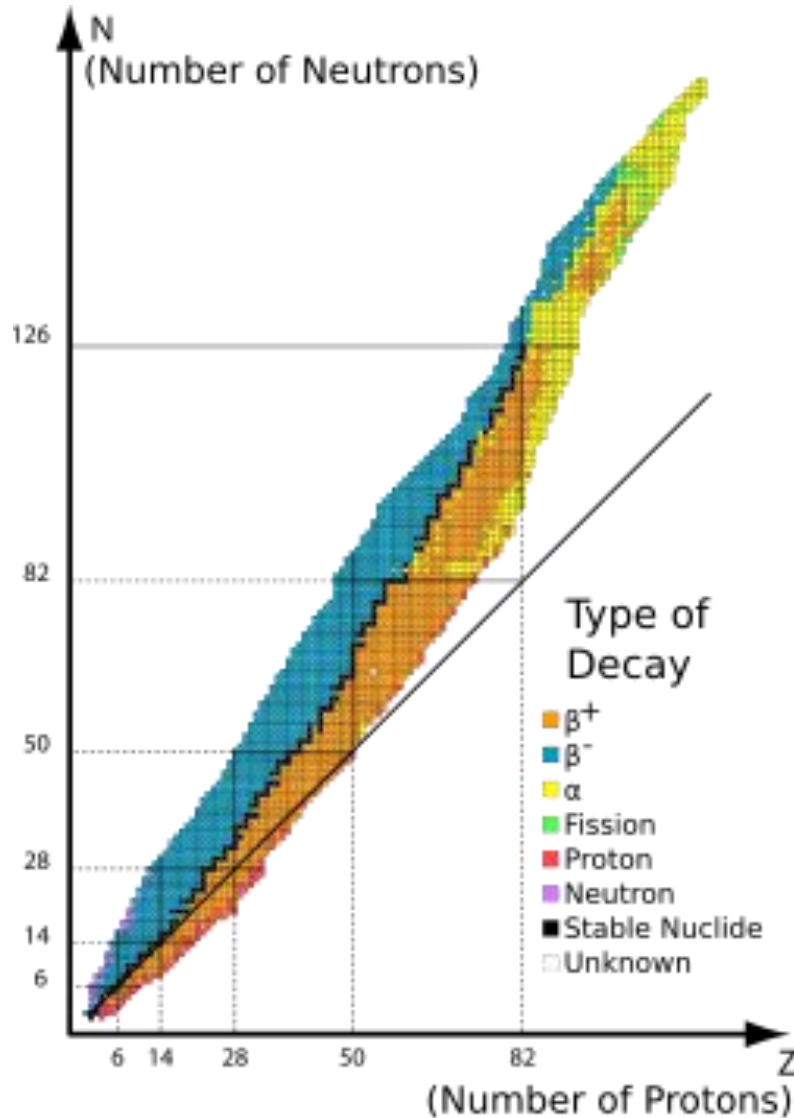
-El **decaimiento  $\gamma$**  se presenta en núcleos con un nivel energético excitado. La composición del núcleo no se ve alterada y solo se emite *un fotón* con un alto nivel de energía.





# Estructura atómica: el núcleo

## Decaimiento radiactivo y estabilidad nuclear

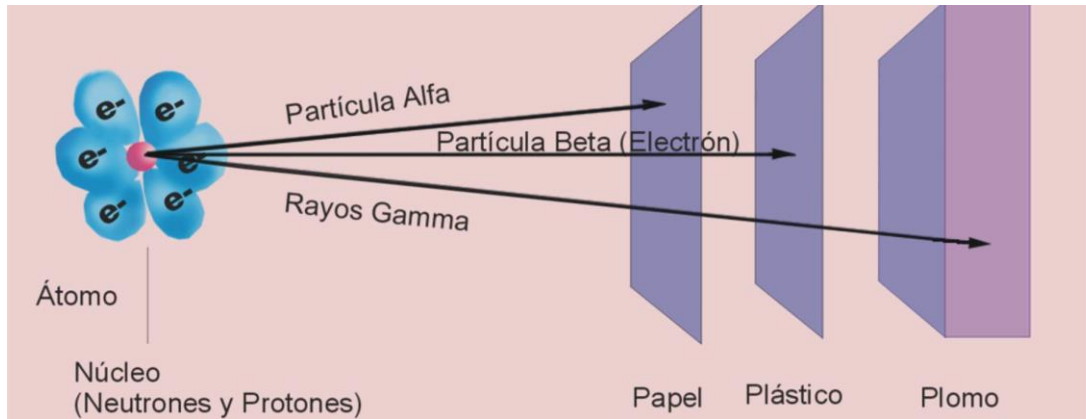


Existen muchos más núclidos inestables sometidos a decaimiento beta que a cualquier otro tipo.

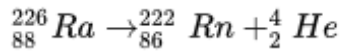


# Estructura atómica: el núcleo

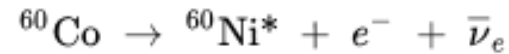
## Decaimiento radiactivo: ejemplos



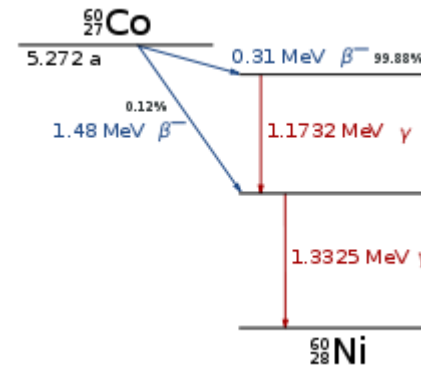
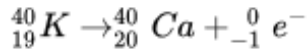
Decaimiento  $\alpha$ :



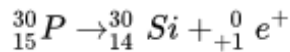
Decaimiento  $\gamma$ :



Decaimiento  $\beta^-$ :



Decaimiento  $\beta^+$ :



# Estructura atómica: el núcleo

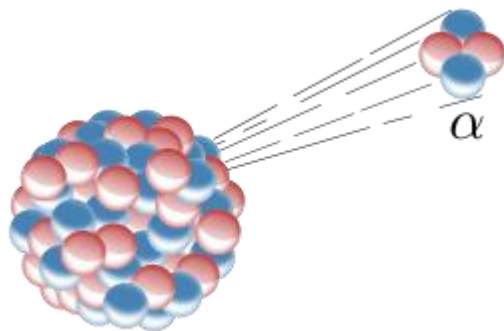
## Decaimiento alfa

La **desintegración alfa** o **decaimiento alfa** consiste en la emisión espontánea de núcleos de helio-4 ( ${}^4\text{He}^{2+}$ ) a través de un proceso de fisión nuclear espontánea. Este tipo de desintegración es típico únicamente de los núcleos atómicos muy pesados ya que es una forma rápida de aligerar el número de nucleones a través de la emisión de un núcleo particularmente estable como el del He (7.1 MeV/nucleón). Como resultado, se origina un nuevo núcleo con cuatro unidades menos de número másico y dos unidades menos de número atómico. El efecto colateral es que todo el helio que existe en la Tierra es debido a la desintegración alfa.

El telurio-106 ( $Z = 52$ ) es el isótopo más ligero para el que tiene lugar este tipo de desintegración en la naturaleza.

En teoría, la energía de una partícula alfa en el núcleo no es suficiente como para escapar, pero puede hacerlo por *efecto túnel* (efecto cuántico) según teorizó Gámov en 1928. El rango de energías a los que los núcleos emiten las partículas  $\alpha$  está entre 2 y 9 MeV.

Inductiveload – Trabajo propio



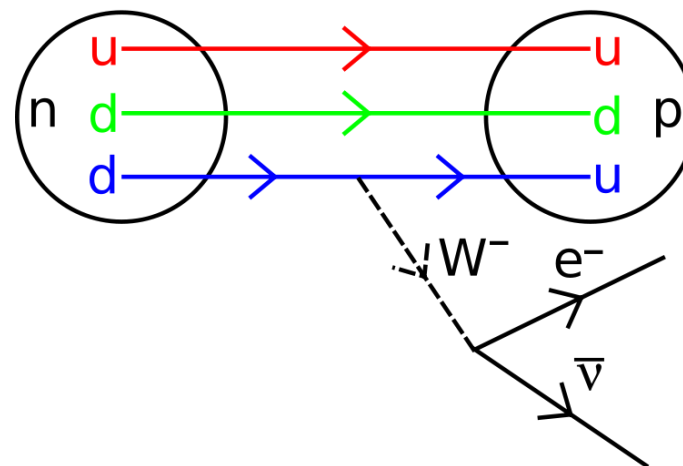
# Estructura atómica: el núcleo

## Decaimiento beta y captura electrónica

La mayoría de núcleos atómicos por debajo de un cierto peso atómico y que además presentan un equilibrio entre el número de neutrones y el número de protones son estables. Sin embargo, sabemos que los neutrones aislados (con un período de semidesintegración de 10 minutos) y los núcleos con demasiados neutrones (o demasiados protones) son inestables vía interacción débil:  $n \rightarrow p^+ + W^- \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$

La explicación de la estabilidad de los núcleos considerados estables reside en los piones ya que, dentro del núcleo atómico, la cercanía entre neutrones y protones hace que estos procesos sean mucho más rápidos vía interacción fuerte:  $n + p^+ \rightarrow (p^+ + \pi^-) + p^+ \rightarrow p^+ + (\pi^- + p^+) \rightarrow p^+ + n$

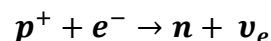
Esto hace que continuamente los neutrones del núcleo se transformen en protones, y algunos protones en neutrones. Así, la reacción de decaimiento beta apenas tiene tiempo de acontecer, lo que explica que los neutrones de los núcleos atómicos sean mucho más estables que los neutrones aislados.



# Estructura atómica: el núcleo

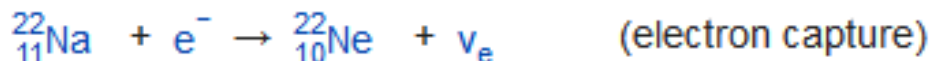
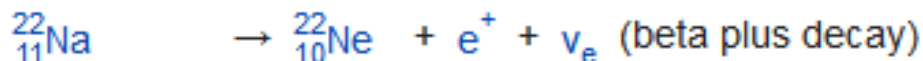
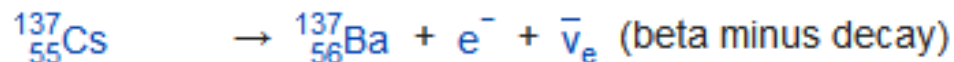
## Decaimiento beta y captura electrónica

Un protón aislado, en cambio, no sufre decaimiento  $\beta^+$  ya que el resultado es energéticamente desfavorable, pero sí puede suceder en el interior del núcleo. Cuando el decaimiento  $\beta^+$  está permitido, también lo está el proceso denominado **captura electrónica**, un proceso competitivo pero minoritario, que transforma un protón en un neutrón emitiendo un neutrino mediante la captura de un electrón (generalmente de la zona más próxima al núcleo):



Por ejemplo, el carbono-11, con un período de semidesintegración de unos 14 días, sufre un proceso de captura electrónica el 0.2% de las veces.

Así, para protones y neutrones del núcleo, estos procesos de decaimiento beta transmutan los elementos, aunque el número de nucleones permanece constante:



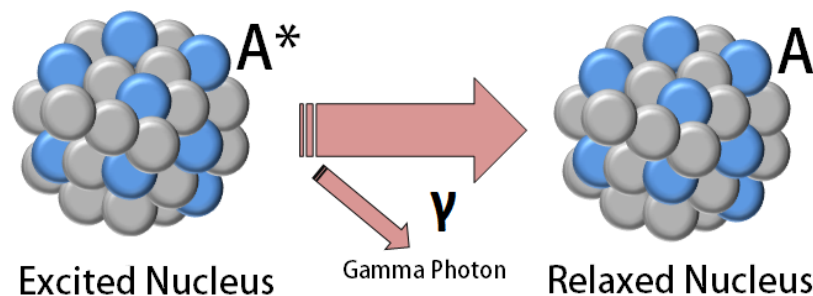
# Estructura atómica: el núcleo

## Decaimiento gamma

La radiación gamma consiste en fotones de alta energía emitidos por un núcleo en un estado excitado. Dicho estado se relaja emitiendo dicha energía de excitación en forma de radiación electromagnética. Es por ello que en este caso la composición del núcleo no se ve alterada ya que no se emiten partículas ni se ve modificada la carga. Es una radiación más penetrante que la alfa y beta.

Los protones y neutrones del núcleo se encuentran en diferentes niveles discretos de energía, de forma similar a los electrones en la corteza. Así, cuando un nucleón pasa a un estado excitado, generalmente precedido de un decaimiento alfa o beta, el núcleo resultante debe emitir dicho exceso de energía para devolver a su nucleón a su estado fundamental. En el caso de los electrones, los fotones emitidos al regresar a su órbita entran dentro del UV-visible, pero en el núcleo las diferencias de energía entre estados es mucho mayor, por lo que los fotones son igualmente mucho más energéticos.

Los emisores gamma más frecuentemente usados son: cobalto-60, cesio-137, y tecnecio-99m. El cobalto se usa para esterilizar equipos médicos, o pasteurizar alimentos. El cesio se usa ampliamente en radioterapia o para determinar la densidad del suelo en construcción. El tecnecio-99m es el radioisótopo más empleado en medicina ya que se utiliza como contraste en multitud de procedimientos.

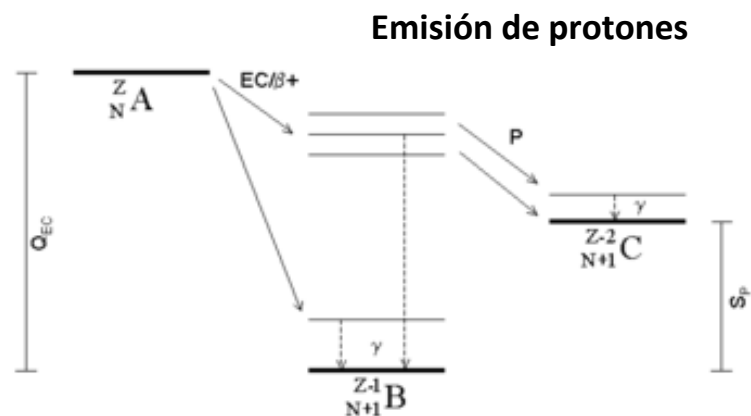
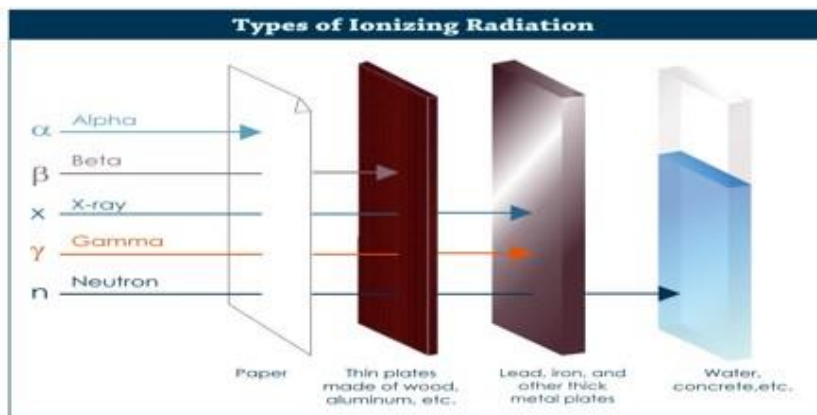


# Estructura atómica: el núcleo

## Emisión de neutrones y de protones

La emisión de neutrones es otra forma de decaimiento radiactivo en el caso de núcleos con exceso de neutrones o en algún estado excitado con necesidad de relajar la energía del sistema. Es la radiación más penetrante. Debido a que se trata de neutrones, no hay cambio de elemento, pero sí de isótopo. Por ejemplo, el berilio-13 pasa a berilio-12 y el helio-5 pasa a helio-4 siguiendo este proceso. También el proceso puede estar fotoinducido con radiación gamma.

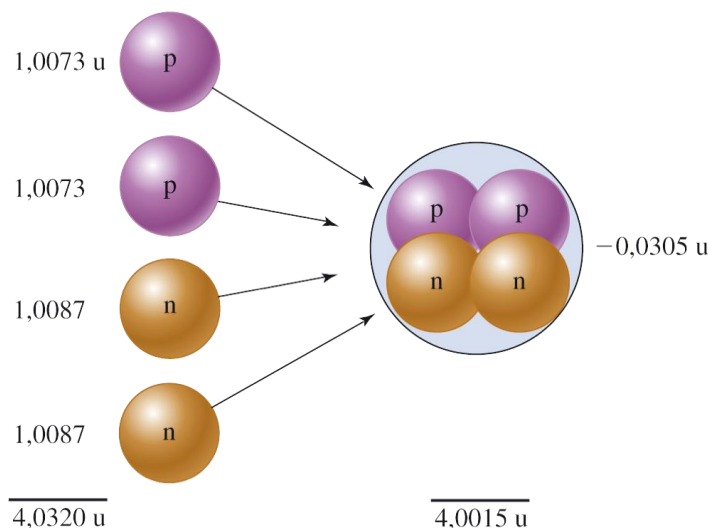
La emisión de protones, en cambio, es mucho más rara y no se observa de forma natural, pero sí en reacciones nucleares llevadas a cabo en aceleradores de partículas a partir de núcleos ricos en protones (Ej: cobalto-53 o una doble eliminación de protones en hierro-45) o en estados excitados de alta energía tras una emisión beta siempre que estén por encima de la energía del decaimiento del protón.



# Estructura atómica: el núcleo

## Defecto y exceso de masa

El **defecto de masa** hace referencia a la menor masa que presenta un núcleo en particular, con relación a los nucleones constituyentes por separado.



$$\Delta m = +0.0305 \text{ u} \rightarrow 0.0305 \text{ u} \times 931.5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} = 28.41 \text{ MeV}$$

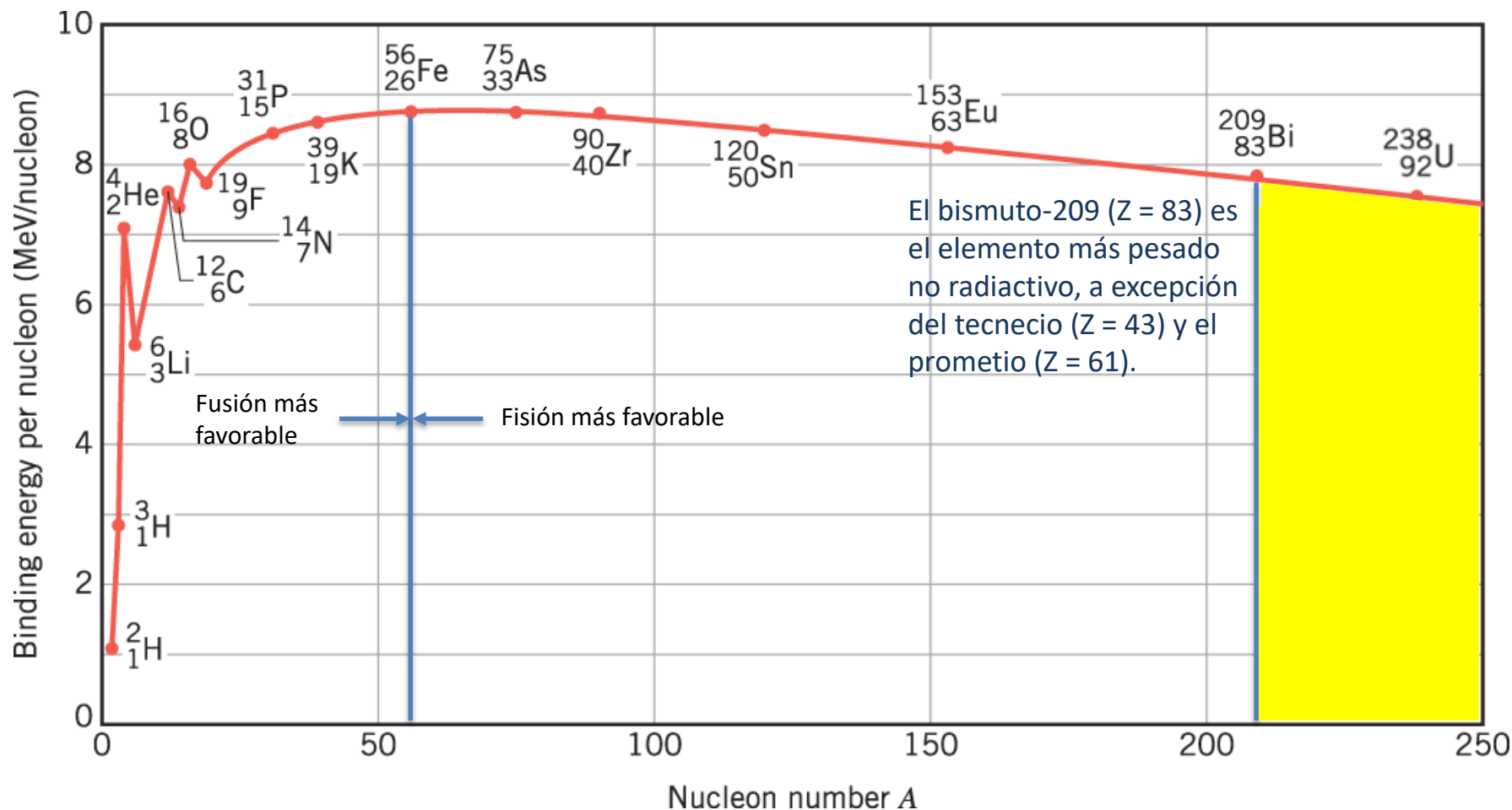
Ese defecto de masa se atribuye a la conversión de masa en energía, según la ecuación de Einstein  $E = mc^2$ , que se invertiría como energía de cohesión en el núcleo. Si dividimos Este valor entre el número de nucleones presentes, obtendremos la energía nuclear por nucleón, que para el helio resulta ser de 7.1 MeV/nucleón, tal y como muestra la gráfica anterior.





# Estructura atómica: el núcleo

## Estabilidad nuclear: energía de unión nuclear por nucleón



# Estructura atómica: el núcleo

## Defecto y exceso de masa

El **exceso de masa** hace referencia a la mayor masa que presenta un núcleo en particular, con relación a los nucleones constituyentes por separado, lo que le hace intrínsecamente inestable, pudiendo sufrir un decaimiento radiactivo para perder ese exceso de masa.

Por ejemplo, para la reacción del  $^{235}\text{U}$  para dar  $^{92}\text{Kr}$ ,  $^{141}\text{Ba}$ , y tres neutrones.



La masa del isótopo de uranio-236 es 236.045568 u, mientras que las masas combinadas de los isótopos kriptón-92 y bario-141 junto con tres neutrones es: 91.926156 u + 140.914411 u + 3 × 1.008665 u = 235.866562 u. El exceso de masa será la masa de los reactivos menos la de los productos. Por tanto, 236.045568 u - 235.866562 u = +0.179006 u, lo que implica que una reacción espontánea de fisión puede tener lugar.

Este exceso de masa puede convertirse en energía según  $E = mc^2$ : **166.7 MeV**



# Estructura atómica: el núcleo

## Serie radiactiva

Se llama **serie radiactiva** o **cadena de desintegración** al conjunto de radioisótopos (llamados hijos) que se generan durante el proceso de decaimiento hasta alcanzar un isótopo estable.

Hay 4 series radiactivas naturales, denominadas  $4n$ ,  $4n+1$ ,  $4n+2$  y  $4n+3$ . Esos nombres vienen de la división del número másico entre ellos para dar un número entero, de esa forma es fácil identificar cualquier isótopo natural dentro de su serie.

**$4n$** : serie del torio

Isótopo padre: torio-232

Isótopo final: plomo-208

**$4n+1$** : serie del neptunio (*acabada la natural existe hoy día debido a las pruebas y accidentes nucleares a partir del plutonio generado*)

Isótopo padre: neptunio-237

Isótopo final: bismuto-209 y talio-205

**$4n+2$** : serie del uranio (también llamada serie del radio)

Isótopo padre: uranio-238

Isótopo final: plomo-206

**$4n+3$** : serie del actinio

Isótopo padre: uranio-235

Isótopo final: plomo-207



# Estructura atómica: el núcleo

## Serie radiactiva

¿A qué serie pertenece el radioisótopo radón-222?

Si fuera  $4n$ , 222 sería divisible entre 4  $\rightarrow 222/4 = 55.5 \rightarrow$  **NO**

Si fuera  $4n+1$ , 221 debería ser divisible entre 4  $\rightarrow 221/4 = 55.25 \rightarrow$  **NO**

Si fuera  $4n+2$ , 220 debería ser divisible entre 4  $\rightarrow 220/4 = 55 \rightarrow$  **SÍ**

Si fuera  $4n+3$ , 219 debería ser divisible entre 4  $\rightarrow 219/4 = 54.75 \rightarrow$  **NO**

**Truco: dividir el número másico siempre entre 4.**

Si el resultado es entero  $\rightarrow 4n$  (Ej:  $^{232}\text{Th}$ )

Si el resultado es un decimal .25  $\rightarrow 4n + 1$  (Ej:  $^{237}\text{Np}$ )

Si el resultado es un decimal .5  $\rightarrow 4n + 2$  (Ej:  $^{238}\text{U}$ )

Si el resultado es un decimal .75  $\rightarrow 4n + 3$  (Ej:  $^{235}\text{U}$ )

Comprobar las series a las que pertenecen los siguientes radioisótopos:

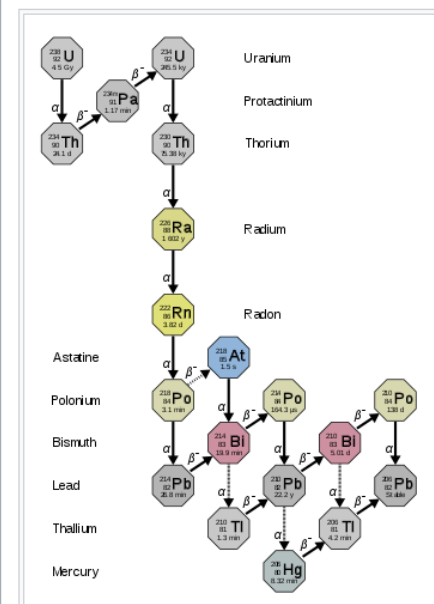
$^{234}\text{Th}$ ,  $^{223}\text{Fr}$ ,  $^{224}\text{Tl}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{233}\text{Pa}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{212}\text{Bi}$



# Estructura atómica: el núcleo

## Serie radiactiva: uranio-238 (4n+2)

parent nuclide	historic name (short) [citation needed]	historic name (long)	atomic mass [RS 1]	decay mode [RS 2]	branch chance [RS 2]	half life [RS 2]	energy released, MeV [RS 2]	daughter nuclide [RS 2]	Subtotal MeV
<sup>238</sup> U	U <sub>I</sub>	Uranium I	238.051	α	100 %	4.468 · 10 <sup>9</sup> a	4.26975	<sup>234</sup> Th	4.2698
<sup>234</sup> Th	UX <sub>1</sub>	Uranium X <sub>1</sub>	234.044	β <sup>-</sup>	100 %	24.10 d	0.273088	<sup>234m</sup> Pa	4.5428
<sup>234m</sup> Pa	UX <sub>2</sub> , Bv	Uranium X <sub>2</sub> , Brevium	234.043	IT	0.16 %	1.159 min	0.07392	<sup>234</sup> Pa	4.6168
<sup>234m</sup> Pa	UX <sub>2</sub> , Bv	Uranium X <sub>2</sub> , Brevium	234.043	β <sup>-</sup>	99.84 %	1.159 min	2.268205	<sup>234</sup> U	6.8110
<sup>234</sup> Pa	UZ	Uranium Z	234.043	β <sup>-</sup>	100 %	6.70 h	2.194285	<sup>234</sup> U	6.8110
<sup>234</sup> U	U <sub>II</sub>	Uranium II	234.041	α	100 %	2.455 · 10 <sup>5</sup> a	4.8598	<sup>230</sup> Th	11.6708
<sup>230</sup> Th	Io	Ionium	230.033	α	100 %	7.54 · 10 <sup>4</sup> a	4.76975	<sup>226</sup> Ra	16.4406
<sup>226</sup> Ra	Ra	Radium	226.025	α	100 %	1600 a	4.87062	<sup>222</sup> Rn	21.3112
<sup>222</sup> Rn	Rn	Radon, Radium Emanation	222.018	α	100 %	3.8235 d	5.59031	<sup>218</sup> Po	26.9015
<sup>218</sup> Po	RaA	Radium A	218.009	β <sup>-</sup>	0.020 %	3.098 min	0.259913	<sup>218</sup> At	27.1614
<sup>218</sup> Po	RaA	Radium A	218.009	α	99.980 %	3.098 min	6.11468	<sup>214</sup> Pb	33.0162
<sup>218</sup> At			218.009	β <sup>-</sup>	0.1 %	1.5 s	2.881314	<sup>218</sup> Rn	30.0428
<sup>218</sup> At			218.009	α	99.9 %	1.5 s	6.874	<sup>214</sup> Bi	34.0354
<sup>218</sup> Rn			218.006	α	100 %	35 ms	7.26254	<sup>214</sup> Po	37.3053
<sup>214</sup> Pb	RaB	Radium B	214.000	β <sup>-</sup>	100 %	26.8 min	1.019237	<sup>214</sup> Bi	34.0354
<sup>214</sup> Bi	RaC	Radium C	213.999	β <sup>-</sup>	99.979 %	19.9 min	3.269857	<sup>214</sup> Po	37.3053
<sup>214</sup> Bi	RaC	Radium C	213.999	α	0.021 %	19.9 min	5.62119	<sup>210</sup> Tl	39.6566
<sup>214</sup> Po	RaC'	Radium C'	213.995	α	100 %	164.3 μs	7.83346	<sup>210</sup> Pb	45.1388
<sup>210</sup> Tl	RaC''	Radium C''	209.990	β <sup>-</sup>	100 %	1.30 min	5.48213	<sup>210</sup> Pb	45.1388
<sup>210</sup> Pb	RaD	Radium D	209.984	β <sup>-</sup>	100 %	22.20 a	0.063487	<sup>210</sup> Bi	45.2022
<sup>210</sup> Pb	RaD	Radium D	209.984	α	1.9 · 10 <sup>-6</sup> %	22.20 a	3.7923	<sup>206</sup> Hg	48.9311
<sup>210</sup> Bi	RaE	Radium E	209.984	β <sup>-</sup>	100 %	5.012 d	1.161234	<sup>210</sup> Po	46.3635
<sup>210</sup> Bi	RaE	Radium E	209.984	α	13.2 · 10 <sup>-5</sup> %	5.012 d	5.03647	<sup>206</sup> Tl	50.2387
<sup>210</sup> Po	RaF	Radium F	209.983	α	100 %	138.376 d	5.40745	<sup>206</sup> Pb	51.7709
<sup>206</sup> Hg			205.978	β <sup>-</sup>	100 %	8.32 min	1.307649	<sup>206</sup> Tl	50.2387
<sup>206</sup> Tl	RaE''	Radium E''	205.976	β <sup>-</sup>	100 %	4.202 min	1.532221	<sup>206</sup> Pb	51.7709
<sup>206</sup> Pb	RaG	Radium G	205.974	stable	-	-	-	-	51.7709



# Estructura atómica: el núcleo

## Cinética de la desintegración de radioisótopos

La Cinética Química es la rama de la química que estudia cuantitativamente la **rapidez de una reacción química** y el estudio de los factores que determinan o controlan la rapidez de este cambio químico.

¿Cómo de rápido es una desintegración radiactiva?

Depende mucho de cada isótopo. Pueden ir desde fracciones de segundo hasta tiempos muy superiores a la edad del Universo actual. Conocer su cinética nos permite datar la edad de la Tierra, por ejemplo, en función del contenido de radioisótopos actualmente presentes.

Así, la **edad de la Tierra** recalculada recientemente (2010), indica que se formó hace unos 4470 millones de años  $\pm 1\%$  (70 millones de años menos que la anterior datación). Esta datación, se ha realizado basándose en el decaimiento del hafnio-182 en tungsteno-182 (decaimiento  $\beta^-$ ).

Ligar la tasa de variación de la concentración de una única sustancia con el tiempo transcurrido nos permite determinar la velocidad del proceso en unidades M/s (molar por segundo). Si la cinética es de primer orden, como la de las desintegraciones radiactivas (suponiendo que la desintegración solo depende del radioisótopo que sufre la desintegración) entonces hay una ley de proporcionalidad directa entre la velocidad de decaimiento y la concentración.



# Estructura atómica: el núcleo

## Cinética de la desintegración de radioisótopos

La cinética de una reacción es de orden uno cuando la velocidad de conversión es proporcional a la concentración de uno de los reactivos.

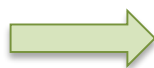
$$\text{velocidad} = - \frac{d[A]}{dt} = k [A]$$

cte. de velocidad

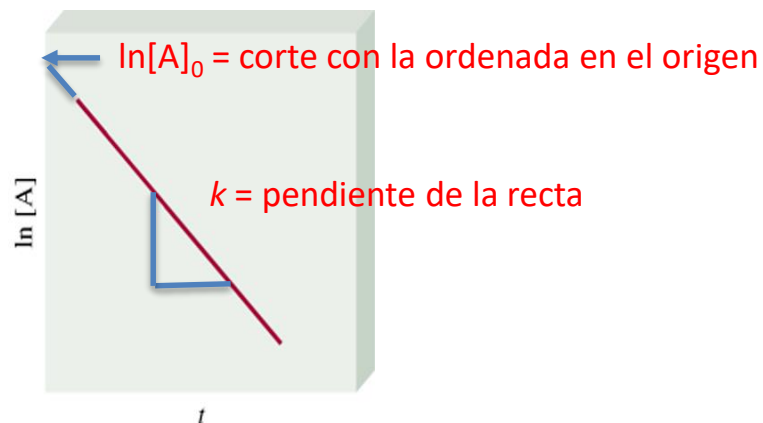
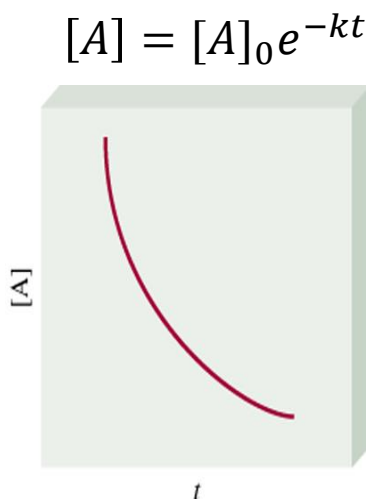
Ecuación de velocidad

Integrando:

$$\int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]} = - \int_0^t k dt$$



$$\ln[A] = \ln[A]_0 - kt$$



Las concentraciones, dado que son fracciones relativas del mismo elemento, pueden expresarse en cualesquiera unidades: moles, masa, número de isótopos, etc.



# Estructura atómica: el núcleo

## Cinética de la desintegración de radioisótopos: actividad

La ecuación de velocidad aplicada a la desintegración de los núcleos es lo que se conoce como **actividad radiactiva**.

$$\text{actividad} = - \frac{dN}{dt} = k N$$

Ecuación de velocidad

cte. de velocidad dice cómo de probable será la desintegración

Representa el número de desintegraciones (desaparición del isótopo en cuestión) por unidad de tiempo, y se mide en Becquerelios (Bq).

La actividad inicial de una muestra depende, por tanto, del número inicial de isótopos radiactivos. Para el carbono-14,  $k = 1.209 \times 10^{-4} \text{ años}^{-1}$

Si inicialmente tenemos un número de Avogadro de isótopos (unos 14 g), entonces la actividad inicial ( $a_0$ ) será:  $1.209 \times 10^{-4} \text{ años}^{-1} \cdot 6.023 \times 10^{23} \text{ isótopos}$   
 $a_0 = 7.28 \times 10^{19} \text{ desintegraciones/año} = 2.308 \times 10^{12} \text{ desintegraciones/segundo (Bq)}$   
(1 año =  $3.154 \times 10^7$  segundos)





# Estructura atómica: el núcleo

## Cinética de la desintegración de radioisótopos: período de semidesintegración

El **período de semidesintegración**, también llamado semivida, es el tiempo que debe de transcurrir para que, a partir de un número inicial de radioisótopos, se desintegren la mitad. Se toma la mitad de un conjunto debido al carácter aleatorio de la desintegración, la cual no se puede predecir.

$$\ln[A] = \ln[A]_0 - kt$$

$$[A] = [A]_0/2$$

$$\ln([A]_0/2) = \ln[A]_0 - kt_{1/2}$$

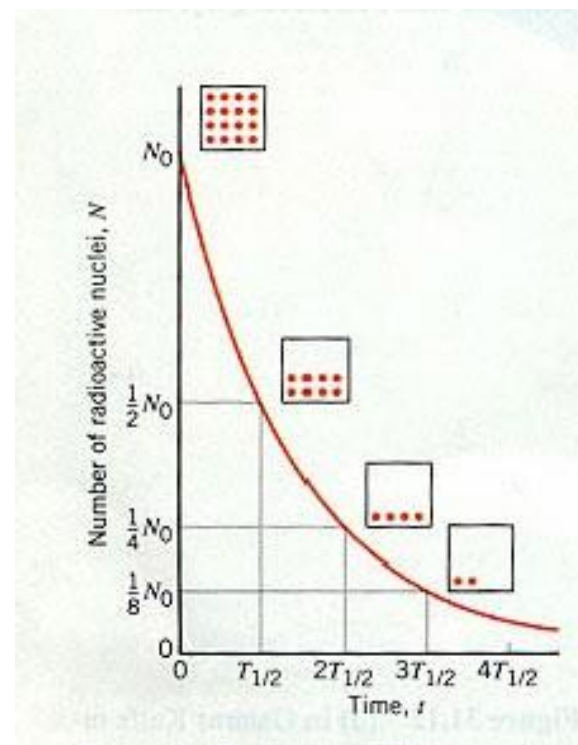
$$-\ln 2 = -kt_{1/2}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0.693}{k}$$

En este caso  $t_{1/2}$  es independiente del valor de la concentración inicial del reactivo de referencia

La **vida media** ( $\tau$ ), en cambio, es el promedio de vida de un núcleo o de una partícula subatómica libre antes de desintegrarse. En este caso,  $\tau = 1/k$ , por lo que se relaciona con  $t_{1/2}$  de la siguiente forma:  $t_{1/2} = 0.693\tau$

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} tN(t)dt}{\int_0^{\infty} N(t)dt} = \frac{\int_0^{\infty} te^{-\lambda t} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt}$$



# Estructura atómica: el núcleo

## Cinética de la desintegración de radioisótopos: período de semidesintegración

Curio (Ci): actividad de 1 g de radio-226 =  $3.7 \times 10^{10}$  Bq (desint/s)

Isotope	Half Life (yrs)	Radioactivity (Ci)	Isotope	Half Live (yrs)	Radioactivity (Ci)
Hydrogen-3	12.3	10,200,000	Europium-154	8.6	120,000,000
Carbon-14	5,700	95,000	Europium-155	4.8	22,000,000
Chlorine-36	300,000	750	Actinium-227	2.2	0.97
Iron-55	2.7	420,000	Thorium-230	75,000	18
Cobalt-60	5.3	27,000,000	Protactinium-231	33,000	2.1
Nickel-59	76,000	160,000	Uranium-232	69	2600
Nickel-63	100	22,000,000	Uranium-233	160,000	3.9
Selenium-79	64,000	30,000	Uranium-234	250,000	84,000
Krypton-85	10.7	150,000,000	Uranium-235	720,000,000	1,000
Strontium-90	29	3,000,000,000	Uranium-236	23,000,000	18,000
Zirconium-93	1,500,000	160,000	Uranium-238	4,500,000,000	20,000
Niobium-93m	16	110,000	Plutonium-241	14	3,200,000,000
Niobium-94	24,000	56,000	Plutonium-238	88	240,000,000
Technetium-99	210,000	950,000	Americium-241	430	220,000,000
Ruthenium-106	1	4,700	Curium-244	18	120,000,000
Palladium-107	6,500,000	8,800	Plutonium-240	6,500	36,000,000
Cadmium-133m	14	1,500,000	Plutonium-239	24,000	24,000,000
Antimony-125	2.8	3,600,000	Americium-243	7,400	1,900,000
Tin-126	1,000,000	59,000	Americium-242/242m	140	1,600,000
Iodine-129	17,000,000	2,400	Curium-242	0.45	1,300,000
Cesium-134	2.1	5,800,000	Curium-243	29	1,300,000
Cesium-135	2,300,000	36,000	Plutonium-242	380,000	140,000
Cesium-137	30	4,500,000,000	Neptunium-237	2,100,000	30,000
Promethium-147	2.6	18,000,000	Curium-245	8,500	29,000
Samarium-151	90	25,000,000	Curium-246	4,800	6,300
					~12 billion Ci

Source: DOE/EIS-0250 Appendix A.

Para una lista profusa: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_radioactive\\_isotopes\\_by\\_half-life](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_radioactive_isotopes_by_half-life)

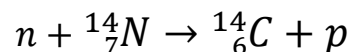


# Estructura atómica: el núcleo

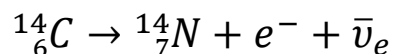
## Cinética de la desintegración de radioisótopos: datación por C-14

Desarrollado por Willard Libby en 1949 (Premio Nobel de Química de 1960)

El carbono-14 tiene un periodo de semidesintegración de  $5730 \pm 40$  años y debería haber desaparecido de la Tierra hace mucho tiempo si no fuera por los constantes impactos de rayos cósmicos sobre los átomos de la atmósfera, que originan neutrones que chocan con los átomos de nitrógeno para generar carbono y un protón:



El carbono-14 resultante se distribuye uniformemente sobre la atmósfera y reacciona con el dióxígeno para formar dióxido de carbono que es absorbido por los océanos y por las plantas y, en última instancia por lo animales. De esta forma, la proporción de carbono radiactivo y no radiactivo permanece constante en la biosfera. Sin embargo, tras la muerte de un organismo vivo no se incorporan nuevos átomos de  ${}^{14}\text{C}$  a los tejidos y su concentración comienza a disminuir mediante decaimiento radiactivo ( $\beta^-$ ) siguiendo una cinética de primer orden:  $N = N_0 e^{-kt}$



De esta manera es posible datar una muestra de tejido orgánico de hasta 50000 años. La fecha radiológica de referencia es hasta 1950 (BP), que es hasta donde hay un nivel constante de carbono-14. La fecha cronológica se hace usando calibraciones o medidas directas del número de isótopos mediante espectrometría de masas. De esta forma, para muestras de menos de 10000 años se pueden conseguir errores en la determinación de tan solo 40 años.



# Estructura atómica: el núcleo

## Radiactividad natural

Se denomina **radiactividad natural** a la radiactividad que existe en la naturaleza sin intervención humana. Depende de la localización por lo que hay cierta variabilidad en la superficie terrestre. Su descubridor fue Henri Becquerel, en 1896. Puede provenir de dos fuentes, constituyendo aproximadamente el 80% de la dosis de radiación anual recibida:

1. Materiales radiactivos existentes en la Tierra desde su formación, los llamados **primigenios**.
2. Materiales radiactivos generados por interacción de rayos cósmicos con materiales de la Tierra que originalmente no eran radiactivos, los llamados **cosmogénicos**.

De todas las fuentes de radiaciones ionizantes naturales la proveniente del  $^{222}\text{Rn}$  equivale al 50% de la dosis total recibida. Dado que es un gas, y que tiene un periodo de semidesintegración muy breve (3,8 días) hacia una serie de metales que ya no son gaseosos por lo que no pueden ser expulsados (terminando en plomo-210 con un período de semidesintegración de 22 años), puede llegar a ser muy preocupante al estar relacionado con numerosos cánceres de pulmón.

Incluso la comida que comemos o el aire que respiramos presentan isótopos radiactivos. Nosotros mismos somos radiactivos. 8000 átomos de potasio-40 y carbono-14 se desintegran en nuestros cuerpos cada segundo.

El **sievert** (símbolo **Sv**) es una unidad derivada del SI que mide la dosis de radiación absorbida por la materia viva, corregida por los posibles efectos biológicos producidos. 1 Sv es equivalente a un julio por cada kilogramo ( $\text{J kg}^{-1}$ ). La radiactividad natural media anual es de unos 2.5 mSv, valor para el que se supone que no hay efectos perjudiciales.



# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares

Cuando los núcleos no sufren un proceso de desintegración espontáneo (decaimiento radiactivo), sino que se usan a modo de reactivos para romperse o combinarse entre sí, hablamos de reacciones nucleares. *Una reacción nuclear, por tanto, es un proceso donde dos núcleos, o un núcleo y una partícula sub-atómica exterior (protón, neutrón o electrón de alta energía), colisionan para dar uno o más núclidos diferentes de los reactantes.* Se representa mediante una ecuación química que muestra dicho proceso. Dicha ecuación tiene que estar balanceada en carga y masa. Además, la energía relativista también se conserva a través de cambios de masa según la ecuación  $E = mc^2$ .

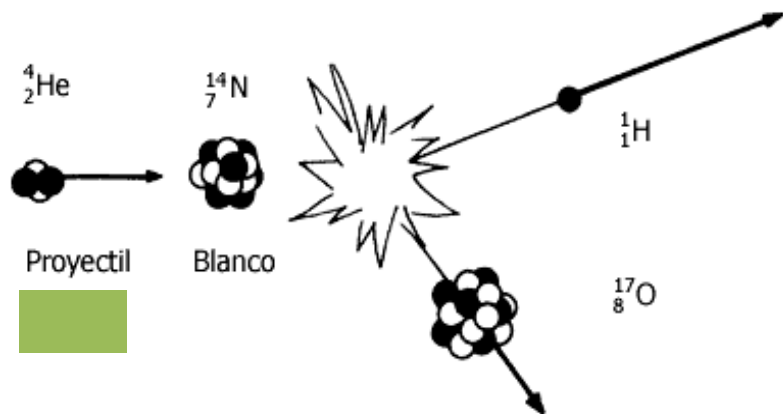
REACCIONES QUÍMICAS	REACCIONES NUCLEARES
Interacción electrónica entre moléculas y átomos	Colisión entre nucleones, es decir, protones y neutrones
Los productos se generan por ruptura y formación de enlaces químicos	Los elementos y/o isótopos participantes de la reacción se convierten entre sí
En la ruptura y formación de enlace solo participan los electrones de los niveles más externos del átomo	Participan protones, neutrones y otras partículas subatómicas presentes en el núcleo del átomo
El producto obtenido es una nueva molécula	El producto obtenido es un nuevo átomo
Siguen el Principio de la Conservación de la masa	Siguen el Principio de la Conservación de la masa-energía
Absorben o liberan energía en cantidades relativamente discretas	Absorben o liberan energía en grandes cantidades



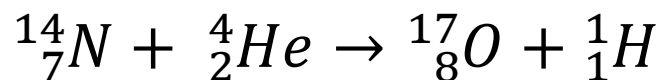
# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares

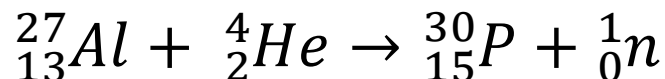
La primera reacción nuclear (diferente a la desintegración radiactiva) estudiada fue por parte de Rutherford en 1919, lo que permitió el descubrimiento del protón: consistió en el bombardeo de núcleos de nitrógeno-14 con partículas  $\alpha$  (procedentes de la desintegración del radio-226):



Reacción nuclear



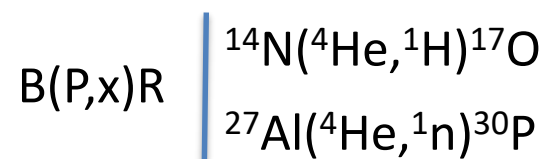
El primer isótopo radiactivo artificial fue el fósforo-30, sintetizado por el matrimonio Joliot-Curie (la mujer era la hija de Pierre y Marie Curie), lo que les valió el Nobel de química de 1935:



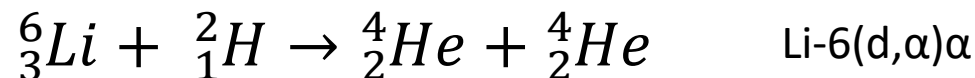
# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: nomenclatura

Blanco (B) + Proyectoil (P) → partícula emitida (x) + Núcleo residual (R)



Normalmente se utilizan abreviaturas: p para un protón, n para un neutrón, d para el deuterón,  $\alpha$  para una partícula alfa,  $\beta$  para una partícula beta (electrón o  ${}_{-1}^0e$ ),  $\gamma$  para un fotón gamma, etc ....



Si queremos calcular también la energía involucrada en el proceso:

Li – masa atómica: 6.0151 u //  ${}^2\text{H}$  – masa atómica: 2.0141 u // Total = 8.0292 u

${}^4\text{He}$  – masa atómica: 4.0026 u // Total = 8.0052 u

Defecto de masa: 8.0292 u – 8.0052 u = 0.0240 u

$$1 \text{ u } c^2 = (1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}) \times (2.99792 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 1.49242 \times 10^{-10} \text{ J}$$

$$1.49242 \times 10^{-10} \text{ J} \times (1 \text{ MeV} / 1.60218 \times 10^{-13} \text{ J}) = \mathbf{931.49 \text{ MeV}}$$

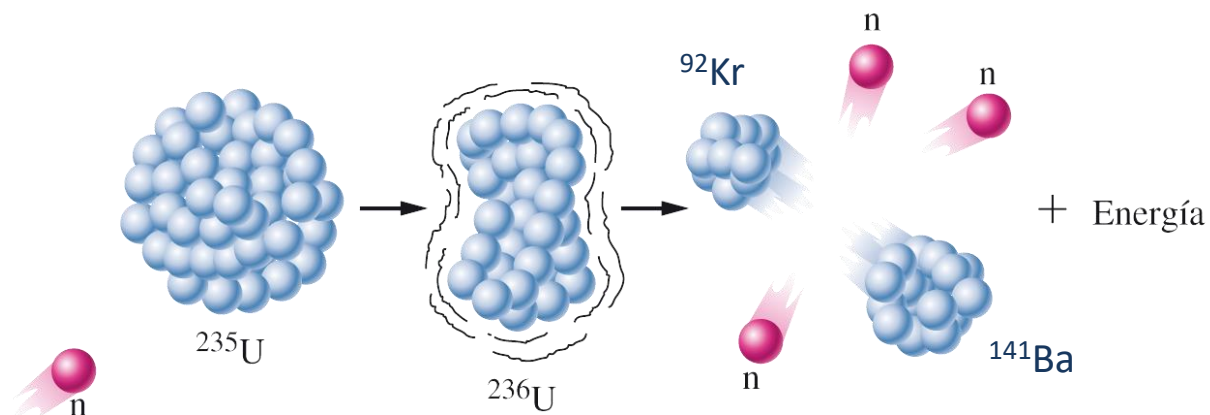
Por lo que la energía desprendida es: 0.0240 u  $\times$  931.49 MeV/(u  $c^2$ ) = **22.36 MeV/ $c^2$**



# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: fisión

La fisión nuclear de elementos pesados fue descubierta en 1938 por Otto Hahn. Generalmente se realiza bombardeando un núcleo pesado con neutrones, dando como resultado núcleos más pequeños (aunque hay cierta variabilidad, se generan casi siempre los mismos) y liberando una gran cantidad de energía.



Los neutrones liberados en esta reacción pueden ser los que originen nuevas fisiones en otros núcleos. Esto es lo que denomina **reacción nuclear en cadena**. Cuando la energía se libera de forma controlada, entonces podemos mantener un sistema estable de producción de energía, como en las centrales nucleares. Cuando se hace de forma incontrolada, sus usos pasan por las armas nucleares.





# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: fisión

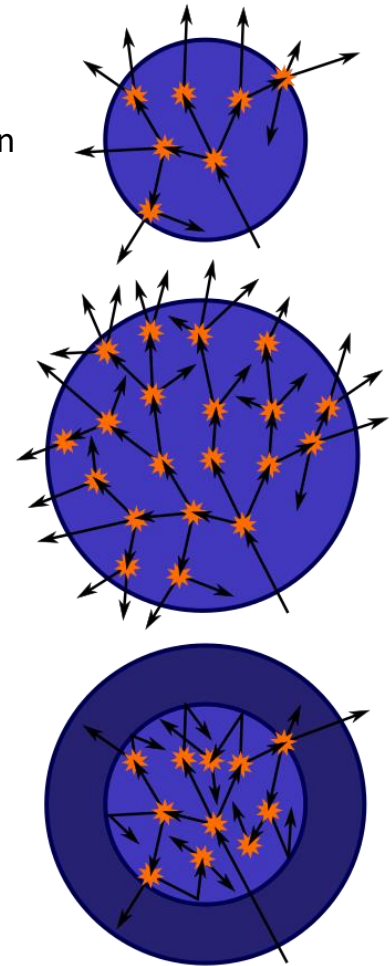
Se dice que un isótopo es **fisionable** o **fisible** si puede experimentar una reacción de fisión estimulada con neutrones libres de cualquier energía. Los isótopos fisionables son (De estos, solo el  $^{235}_{92}\text{U}$  es natural):

- Uranio:  $^{232}_{92}\text{U}$ ,  $^{233}_{92}\text{U}$ ,  $^{235}_{92}\text{U}$
- Neptunio:  $^{236}_{93}\text{Np}$ ,  $^{237}_{93}\text{Np}$
- Plutonio:  $^{239}_{94}\text{Pu}$ ,  $^{240}_{94}\text{Pu}$ ,  $^{241}_{94}\text{Pu}$ ,  $^{242}_{94}\text{Pu}$
- Americio:  $^{241}_{95}\text{Am}$ ,  $^{242m}_{95}\text{Am}$ ,  $^{243}_{95}\text{Am}$
- Curio:  $^{244}_{96}\text{Cm}$ ,  $^{245}_{96}\text{Cm}$ ,  $^{246}_{96}\text{Cm}$ ,  $^{247}_{96}\text{Cm}$
- Californio:  $^{249}_{98}\text{Cf}$ ,  $^{251}_{98}\text{Cf}$

Al conjunto de isótopos que mantienen la reacción en cadena se le denomina **combustible nuclear**. Los más usados son el uranio-235 y el plutonio-239, dando como resultado productos de fisión comúnmente entre 85 y 150 u. Por supuesto, estos combustibles experimentan una desintegración espontánea (son radiactivos), pero es muy lenta comparada con la inducida con neutrones que tiene lugar en un reactor nuclear, por ejemplo. Estos neutrones provienen en primera instancia de reacciones previas que suponen el 'encendido' del reactor.

Existe una **masa crítica** para cada isótopo que es la mínima cantidad para la que se puede mantener una reacción en cadena, aunque esto depende de bastantes factores: proporción de combustible, forma, temperatura, densidad, uso de reflectores de neutrones, etc ...

Se denomina **material nuclear fértil** a aquellos isótopos que se convierten en fisionables por captura neutrónica.



Ejemplos de masa crítica

$^{235}\text{U} = 52 \text{ Kg}$

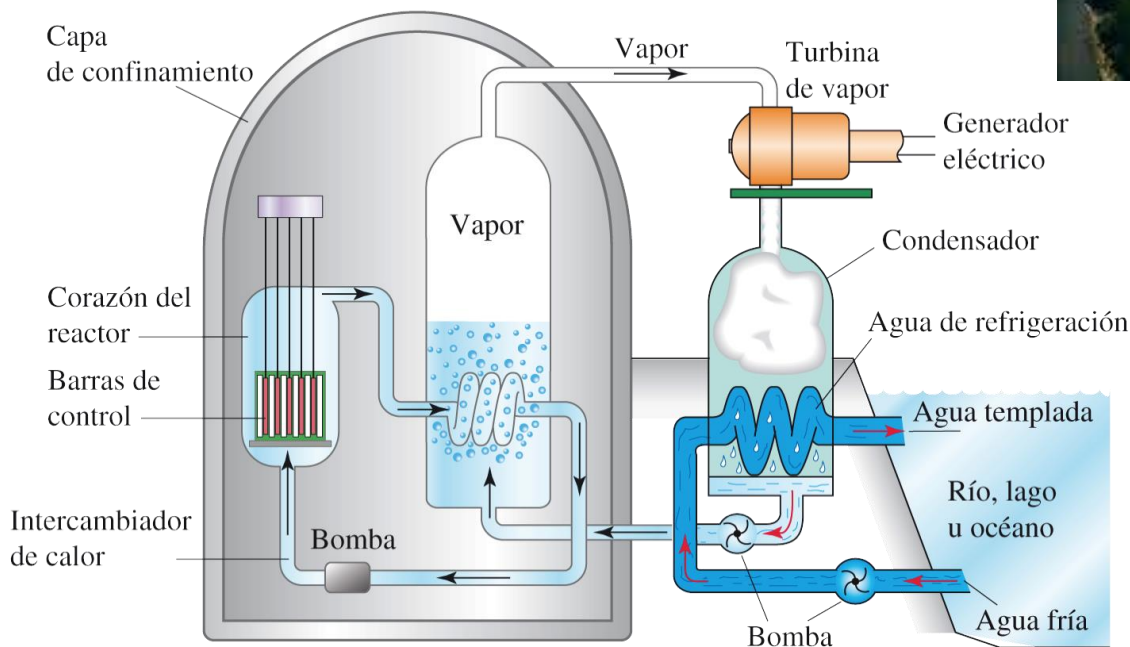
$^{239}\text{Pu} = 10 \text{ Kg}$



# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: reactores de fisión

1<sup>er</sup> problema: El uranio-235 se encuentra solo en un 0.7% dentro del uranio-238 natural (99.8% de abundancia isotópica), que no es fisible. Así, es necesario enriquecerlo previamente hasta el 3-5%, donde no existe riesgo de explosión espontánea y puede mantenerse refrigerado con agua.



2<sup>o</sup> problema: El uranio-238, por el contrario, reacciona con un neutrón generando uranio-239 que sufre un decaimiento beta a neptunio-239, el cual beta-decae también a plutonio-239, mucho más radiactivo que el uranio de partida, y con una semivida de 24000 años. Estos son, entre otros, los problemáticos residuos nucleares.

**Partes del reactor: Combustible, moderador, refrigerante, reflector, elementos de control y blindaje.**



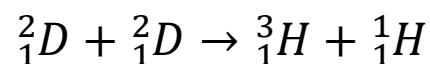
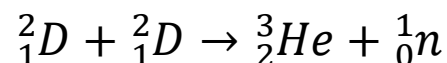
# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: fusión

La fusión de dos núcleos que dé como resultado un núcleo mayor (pero más pequeño que el hierro), genera (por lo general) una gran cantidad de energía. Sin embargo, la energía de activación para iniciar procesos de fusión nuclear es muy alta debido a la elevada fuerza electrostática causada por la repulsión nuclear (no hay que olvidar que la fuerza que mantiene unidas a las partículas del núcleo es de muy corto alcance). Así pues es muy difícil iniciar y mantener una reacción de fusión de tal forma que provea de más energía de la que consume.

Las reacciones de fusión que tienen el mayor potencial como productores de energía comercial involucran a los dos isótopos pesados del hidrógeno: el deuterio (D),  ${}^2\text{H}$ , y el tritio (T),  ${}^3\text{H}$ .

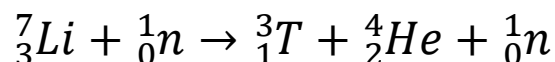
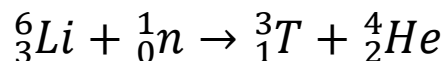
El deuterio es un isótopo natural que se encuentra en un 0,015% del hidrógeno terrestre (1 de cada 6500 átomos de hidrógeno), y su aporte es relativamente barato al poderse obtener fácilmente del agua. Se pueden obtener a partir de él dos series de productos de fusión casi con igual probabilidad:



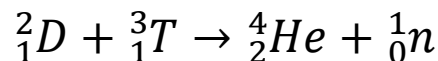
# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: fusión

También puede emplearse tritio para la fusión. El tritio (con un período de semidesintegración de unos 12 años decayendo a helio-3 mediante emisión beta) también es un isótopo natural, pero se encuentra solo a nivel de trazas en la Tierra por lo que es necesario generarlo primero. Esto se hace a partir del litio (el Li-6, con una abundancia isotópica del 7.5% es 26000 veces más eficaz capturando neutrones térmicos):



El tritio obtenido se fusiona ahora con deuterio según el proceso:



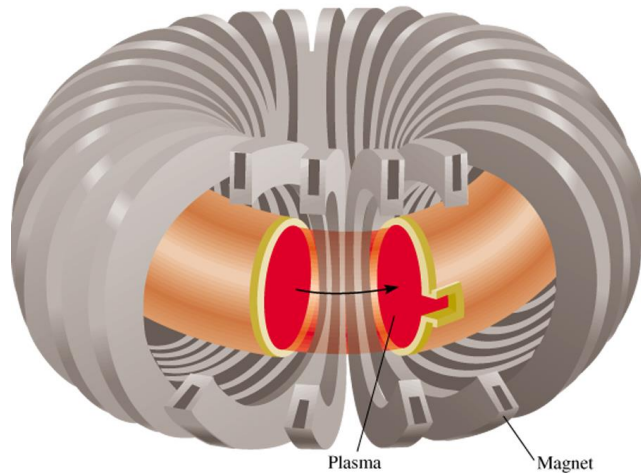
La fusión usando tritio produce más energía, pero la ventaja del deuterio es que no necesita litio, y los neutrones generados son de mucha más baja energía, lo que hace que el daño neutrónico sobre el material de confinamiento sea mucho menor.

Esta reacción se lleva a cabo introduciendo el combustible en un campo electromagnético a muy alta presión y temperatura. Antiguamente el diseño era toroidal, pero actualmente se hace en una cavidad cilíndrica.

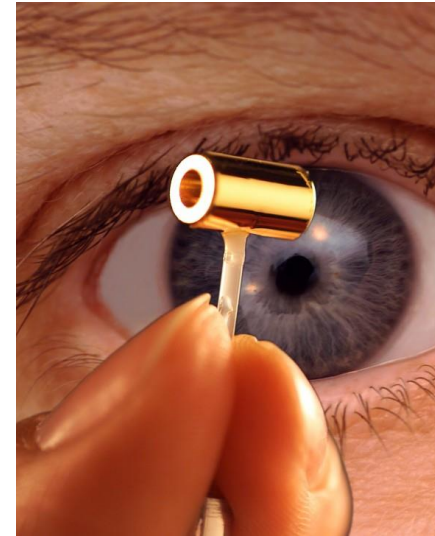


# Estructura atómica: el núcleo

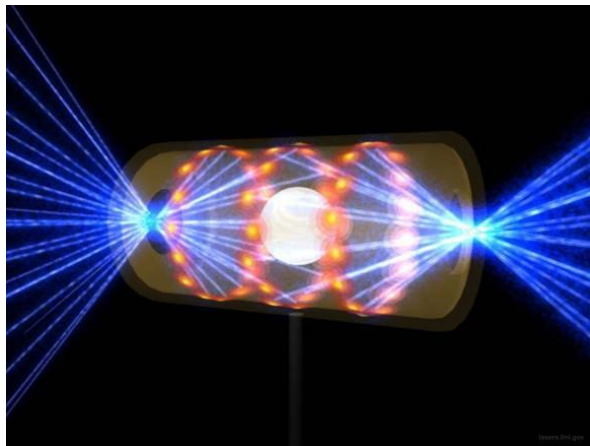
## Reacciones nucleares: fusión



Tokamak magnetic plasma confinement



Prototipo de hohlraum (botella magnética) hecho de oro



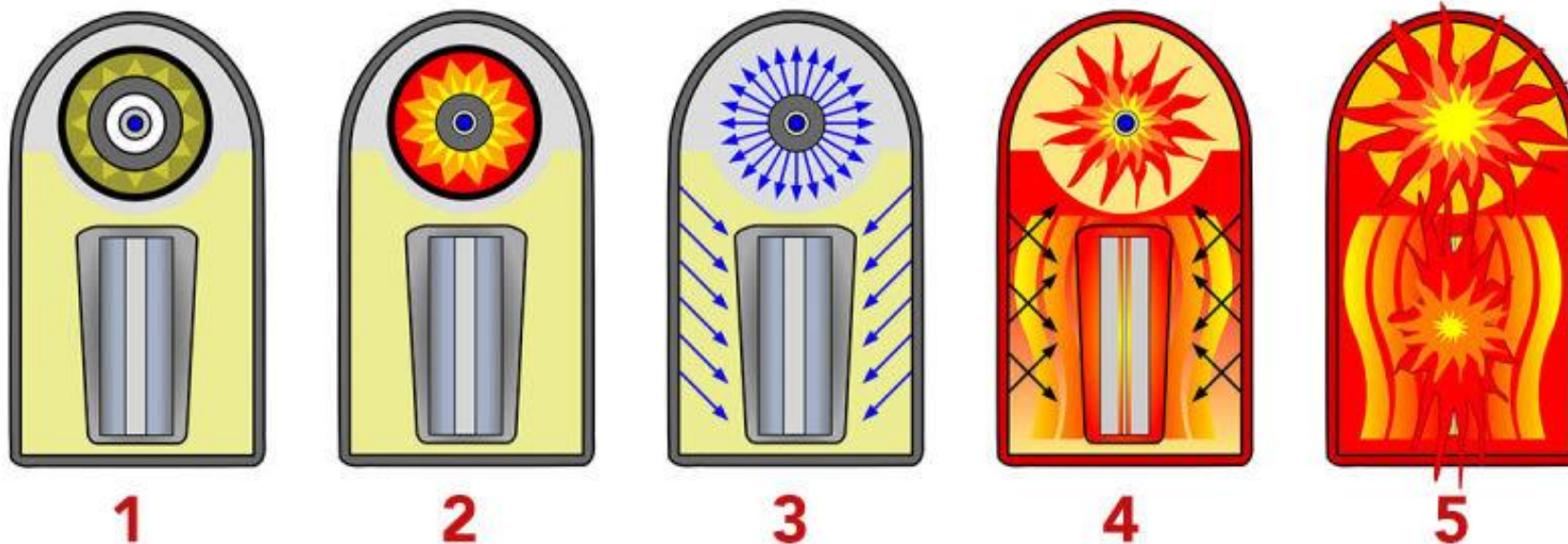
Simulación de la vista del hohlraum con el pellet en su interior. Los haces láser (en azul) se reflejan y dan lugar a rayos X que hacen implosionar y fusionar el combustible nuclear.



# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: bomba de hidrógeno

Las reacciones de fusión tienen lugar de forma natural en el Sol y las estrellas, gracias a las altas temperaturas de su interior. De forma artificial, en cambio, el ser humano sólo ha conseguido (hasta ahora) la fusión en cadena de forma explosiva (incontrolada): se trata de la bomba de hidrógeno o bomba H. Mediante una bomba atómica de fisión se alcanza la temperatura necesaria para llevar a cabo la reacción de fusión, es decir, en una bomba H una bomba atómica es el detonador.



# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: nucleosíntesis estelar

La **nucleosíntesis estelar** es el conjunto de reacciones nucleares que tienen lugar en las estrellas durante el proceso de evolución estelar previo al colapso gravitatorio.

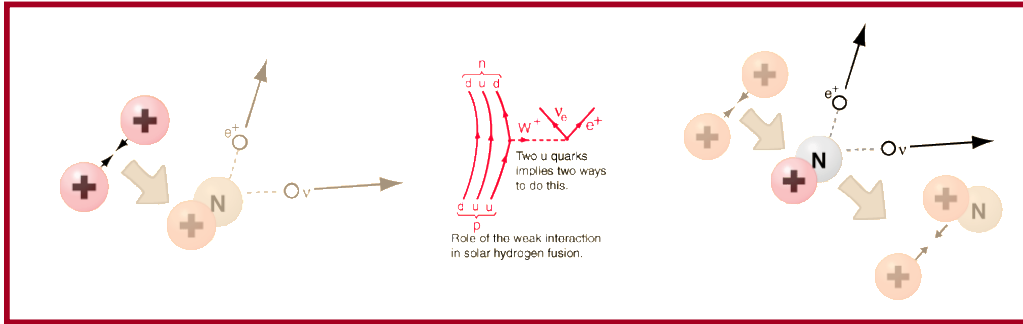
¿Qué reacciones de fusión son las que tienen lugar en las estrellas? Las más representativas son:

1a. Quema del hidrógeno. **La cadena protón-protón.** El proceso de fusión nuclear típico comienza con la fusión de dos protones. Para hacerlo hace falta una gran cantidad de energía que supere la repulsión electromagnética entre ambos, pero si se consiguen acercar lo suficiente, entrará en juego la fuerza nuclear fuerte para mantenerlos unidos. El núcleo formado es un núcleo inestable de helio con solo dos protones ( ${}^2\text{He}$ ). Ahora entra en juego la fuerza de interacción nuclear débil. El exceso de protones en el  ${}^2\text{He}$  lleva a que uno de ellos sufra desintegración beta positiva y se transforme en un neutrón, emitiendo para ello un bosón  $W^+$  que se desintegra dando un positrón y un neutrino. Al continuar con la fusión, se van formando núcleos mayores y más estables, hasta que eventualmente se forman núcleos estables de  ${}^4\text{He}$ . La masa final es menor que la suma de los núcleos iniciales por separado y en el proceso se liberan grandes cantidades de energía que retroalimentan la reacción.

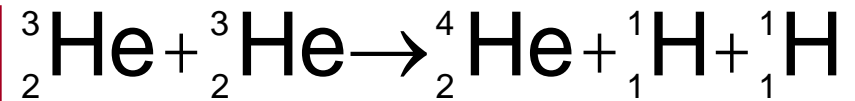
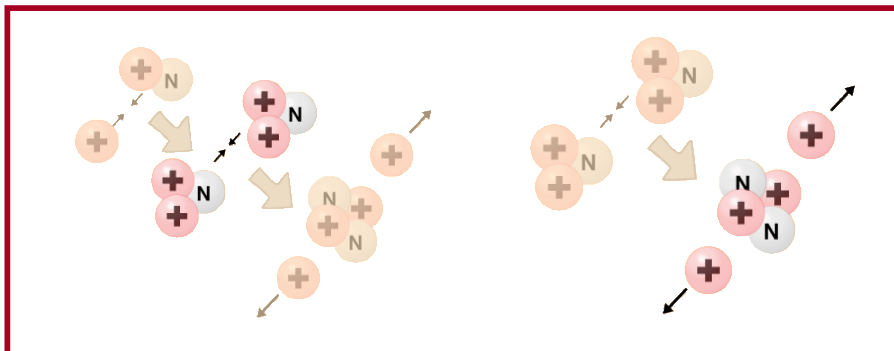
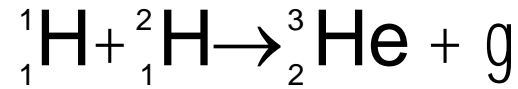
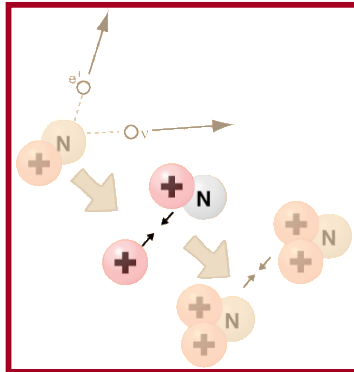
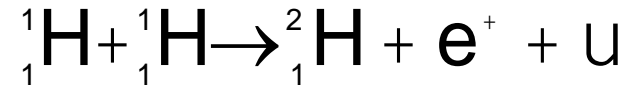


# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: nucleosíntesis estelar



### Cadena protón-protón





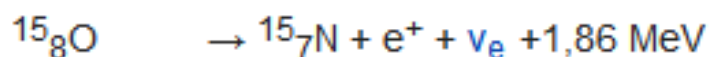
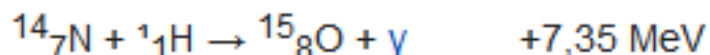
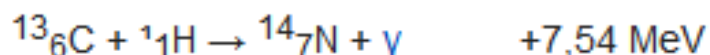
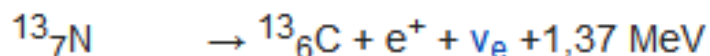
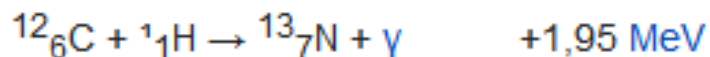
# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: nucleosíntesis estelar

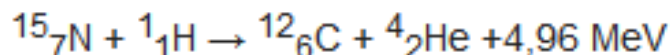
La **nucleosíntesis estelar** es el conjunto de reacciones nucleares que tienen lugar en las estrellas durante el proceso de evolución estelar previo al colapso gravitatorio.

¿Qué reacciones de fusión son las que tienen lugar en las estrellas? Las más representativas son:

1b. Quema del hidrógeno. **El ciclo CNO**. En estrella muy masivas, en cambio, el ciclo dominante para la transformación de hidrógeno en helio es el ciclo carbono-nitrógeno-oxígeno (CNO), donde estos átomos actúan como catalizadores, obteniéndose de nuevo al final del proceso.



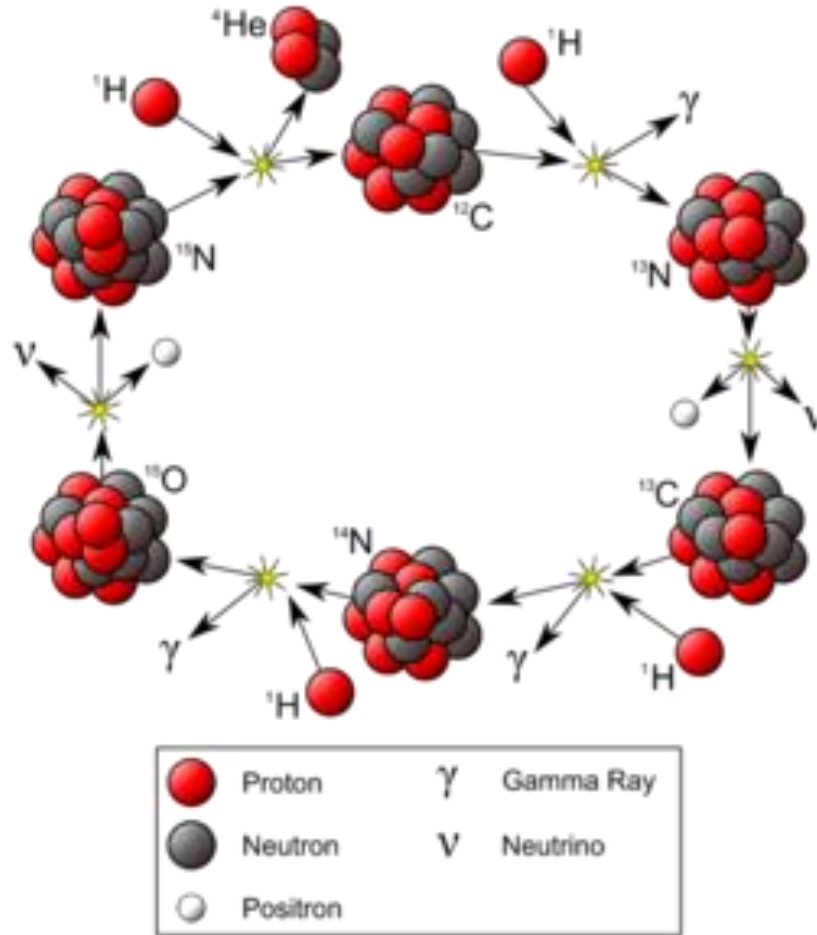
Rama 1 (99,96% de todas las reacciones):



# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: nucleosíntesis estelar

### Ciclo del carbono



# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: nucleosíntesis estelar

La **nucleosíntesis estelar** es el conjunto de reacciones nucleares que tienen lugar en las estrellas durante el proceso de evolución estelar previo al colapso gravitatorio.

¿Qué reacciones de fusión son las que tienen lugar en las estrellas? Las más representativas son:

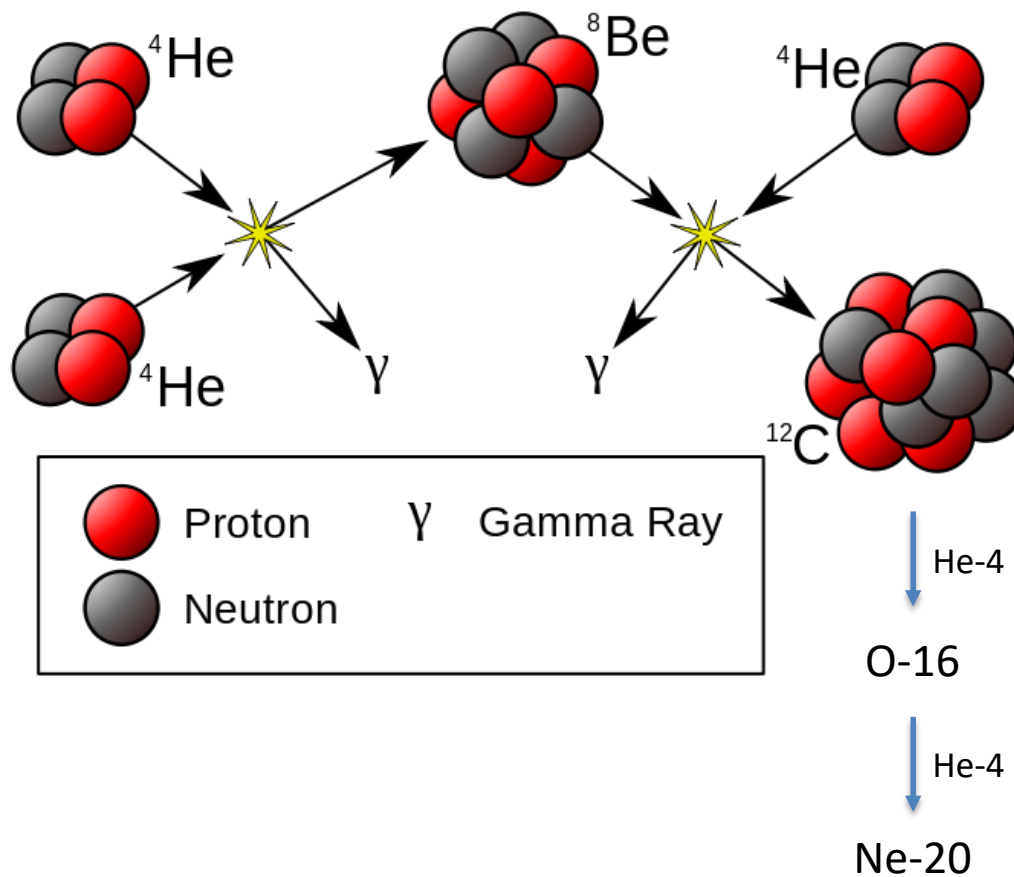
2. Quema del helio. **El proceso triple alfa**. Es el proceso por el que tres núcleos de helio se transforman en un núcleo de carbono. Se en estrellas más viejas, que han consumido su hidrógeno, donde hay abundancia de He y cuya contracción permite alcanzar unos 100 millones de Kelvin. Una reacción secundaria es la captura de otro núcleo de helio por parte del carbono formado generando un núcleo de oxígeno. De la misma forma, pequeñas cantidades de neón pueden también formarse.



# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: nucleosíntesis estelar

### Proceso triple alfa

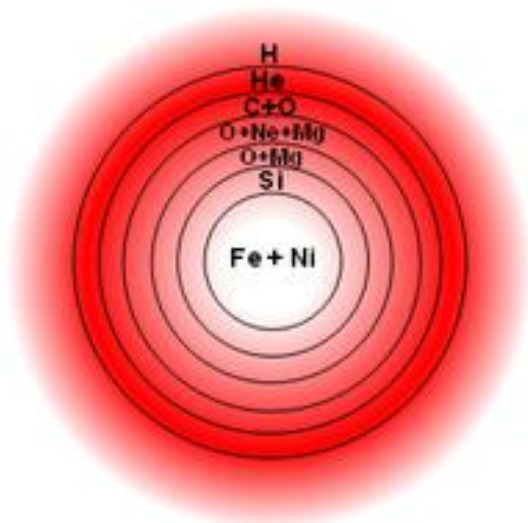


# Estructura atómica: el núcleo

## Reacciones nucleares: nucleosíntesis estelar

La **nucleosíntesis estelar** es el conjunto de reacciones nucleares que tienen lugar en las estrellas durante el proceso de evolución estelar previo al colapso gravitatorio. ¿Qué reacciones de fusión son las que tienen lugar en las estrellas? Las más representativas son:

3. **Quema de metales.** Si al agotarse el helio en el núcleo de la estrella, la masa de la estrella es lo suficientemente grande (entre 4 y 8 masas solares), el núcleo será capaz de comprimirse (200 mil  $\text{Kg}/\text{cm}^3$ ) y calentarse lo suficiente (600 millones de grados) como para emprender la fase siguiente de fusión del carbono, que genera oxígeno, neón, algo de magnesio y trazas de silicio. El sodio generado se consume totalmente. Terminada esta etapa, y en estrellas muy masivas pueden consumirse el oxígeno, el silicio y otros elementos llegando hasta el hierro (> 12 masas solares).



Capas de una estrella agonizante antes del colapso final

