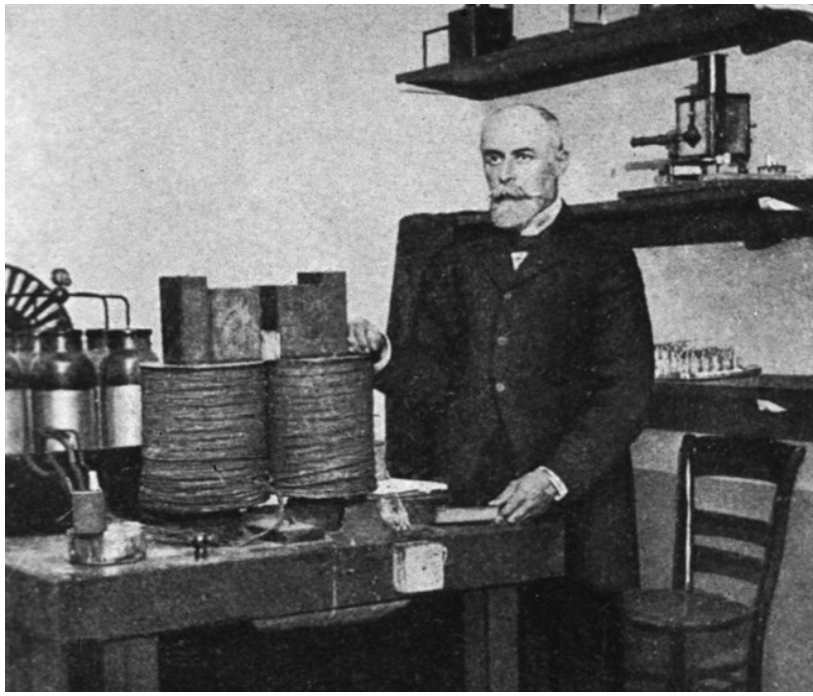
FÍSICA

2º CURSO

BLOQUE 5: FÍSICA DEL SIGLO XX

11. FÍSICA NUCLEAR



En este apartado se introducen la búsqueda de la partícula más pequeña en que puede dividirse la materia, el nacimiento del universo, la materia oscura, y otros muchos hitos de la Física moderna.

Rafael Artacho Cañadas

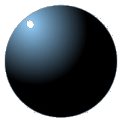
ÍNDICE

1. Evolución del modelo de átomo
2. Modelo nuclear del átomo
   2.1. Experimento de Rutherford, Geiger y Marsden
   2.2. Estructura del núcleo
   2.3. Tamaño y densidad del núcleo
3. Estabilidad del núcleo
   3.1. Interacción nuclear fuerte
   3.2. Estabilidad de los núcleos
   3.3. Energía de enlace
4. Radiactividad natural
   4.1. Tipos de radiactividad
   4.2. Leyes del desplazamiento radiactivo
   4.3. Ley de la desintegración radiactiva
   4.4. Usos prácticos de la radiactividad
5. Reacciones nucleares
   5.1. Reacciones nucleares artificiales
   5.2. Fisión nuclear
   5.3. Fusión nuclear
6. Interacciones fundamentales
7. La estructura más íntima de la materia
   7.1. Las partículas
   7.2. La interacción débil
   7.3. De la materia a los quarks
8. La conexión cósmica
   8.1. La línea del tiempo del Big Bang
   8.2. Materia y energía oscuras
   8.3. Problemas y perspectivas

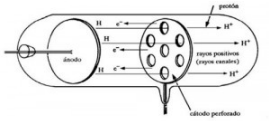
1. Evolución del modelo atómico

ARISTÓTELES
Sostiene que la materia era continua y estaba constituida por 4 elementos esenciales: Tierra, agua, aire y fuego.

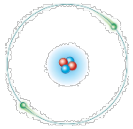
JOHN DALTON
Enuncia su TEORÍA ATÓMICA de la materia en la que sostiene al átomo como una esfera compacta, indivisible e indestructible.



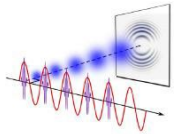
EUGEN GOLDSTEIN
Descubrió los rayos canales a los que posteriormente se les llamó **protones**.



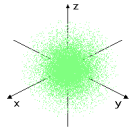
MAX PLANCK
Postuló que cualquier partícula emite energía llamado Cuanto, por lo que la energía emitida del electrón no es continua sino cuantizada.



LOUIS DE BROGLIE
Propuso que el electrón tendría propiedades ondulatorias y de partículas al igual que la energía lumínica.



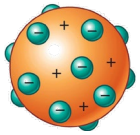
WERNER HEISEMBERG
Formuló el **Principio de Incertidumbre** el cual establece que es imposible determinar la posición y la velocidad exacta del electrón.



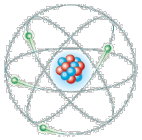
Siglos V-IV a.c.	1808	1897	1909	1910	1913	1924	1925	1926	1927

DEMÓCRITO - LEUCIPO
Sostenía que el universo está formado por una partícula indestructible llamado átomo del griego A=sin, TOMO=División.

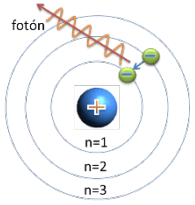
JOSEPH THOMSON
Estableció su propio modelo atómico en el que sostenía que el átomo era como una esfera de electricidad positiva en donde se encuentran distribuidos los electrones. Se asemeja a un pudin de pasas.



ERNEST RUTHERFORD
Propuso un modelo atómico que sostenía que el átomo estaba constituido por un núcleo central: descubre el **núcleo** atómico.

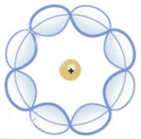


NIELS BOHR
Propuso un nuevo modelo para el átomo de hidrógeno aplicando la teoría cuántica de Planck

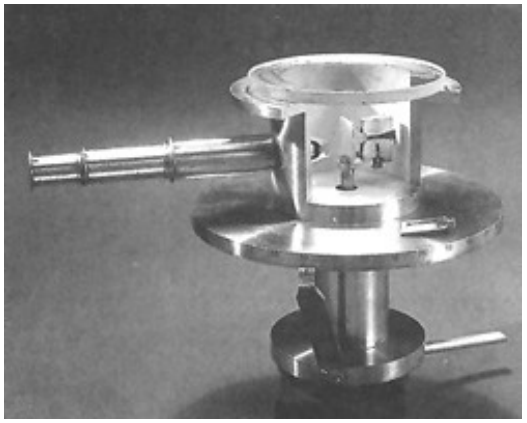


Aparece un **modelo Matemático** que explica el comportamiento del electrón en átomos que tienen más de un electrón. Se estableció el concepto de "orbital".

ERWIN SCHRÖDINGER
Propone una ecuación matemática quela la posición más probable del electrón en un átomo.

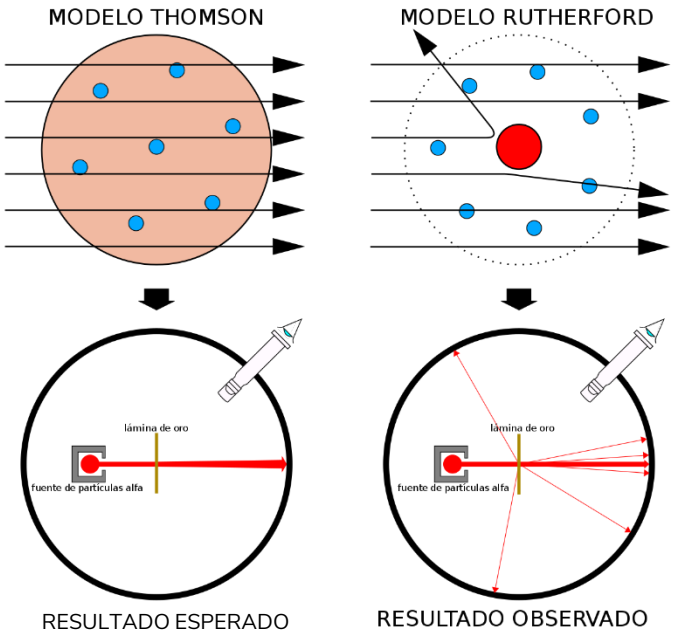


2.1. Experimento de Rutherford, Geiger y Marsden



En 1909 Ernest Rutherford propuso a Geiger y Marsden la realización de un experimento en el que deberían lanzar partículas alfa procedentes de una fuente radiactiva contra una lámina de oro de unos pocos átomos de espesor.

El *objetivo* del experimento era *corroborar* la idea de Rutherford de que las *partículas atravesarían la lámina metálica sin desviarse apenas*.



Ver simulación

2.1. Experimento de Rutherford, Geiger y Marsden

El análisis y las conclusiones que Rutherford extrajo del experimento las podemos resumir de la siguiente manera:

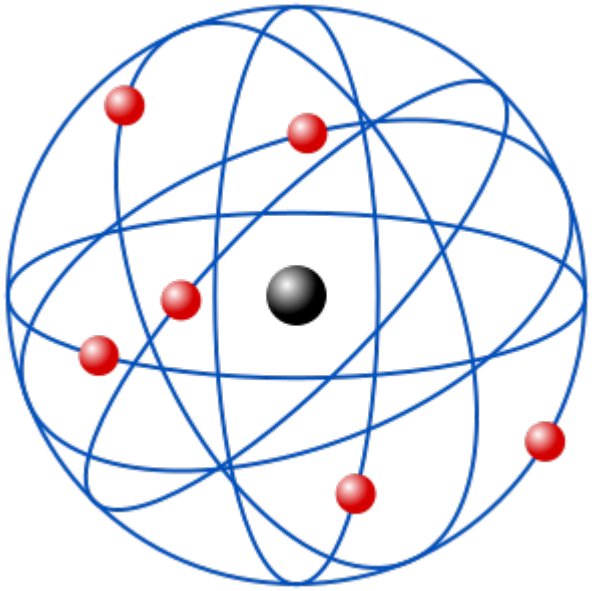
- Si la mayoría de las partículas α atraviesan la lámina de oro sin desviarse es porque no encuentran ningún obstáculo en su camino; de aquí se puede deducir que *la mayor parte del volumen del átomo está vacío*.
- Si hay un número significativo de partículas que sufren una desviación apreciable es porque, en su camino a través de la lámina, se ejerce sobre ellas una fuerza de la suficiente magnitud como para variar la dirección de su movimiento.
- Teniendo en cuenta que las partículas α viajan a velocidad elevada, que poseen una masa de 4 u aproximadamente y que tienen carga eléctrica positiva de valor doble que la del electrón, *la única explicación a la desviación es que sufran una fuerza eléctrica repulsiva por parte de alguna región del átomo con carga positiva*.
- Para que algunas partículas reboten, debe existir alguna parte del átomo con masa contra la que choque las partículas radiactivas.
- Por tanto, *debe existir en el interior del átomo una zona con partículas que posean masa y carga eléctrica positiva*. Esa clase de partícula subatómica recibió, más tarde, el nombre de *protón*.

2.1. Experimento de Rutherford, Geiger y Marsden

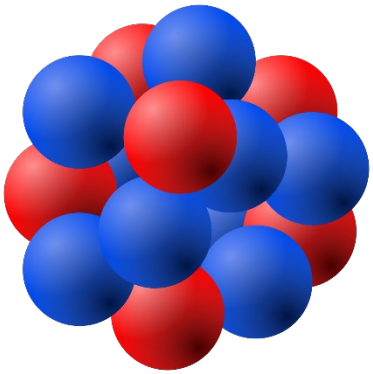
Modelo atómico de Rutherford

El átomo queda constituido por:

- Una zona central o núcleo donde se encuentra la carga total positiva (la de los protones) y la mayor parte de la masa del átomo, aportada por los protones y neutrones.
- Una zona externa o corteza donde se hallan los electrones, que giran alrededor del núcleo.
- Hay tantos electrones en la corteza como protones en el núcleo, por lo que el conjunto del átomo es eléctricamente neutro.



2.2. Estructura del núcleo



- Él experimento de Rutherford solo demostraba que existía un núcleo positivo.
- Más tarde, bombardeando núcleos atómicos con partículas aceleradas, demostró que los *protones* resultaban ser constituyentes básicos de los núcleos.
- La carga nuclear es múltiplo de la carga del protón +e.

  Carga nuclear = **+Ze** **Z** es el **número atómico**

- Ocurría que la masa de los núcleos no coincidía con la masa de los protones presentes. Esto llevó a la hipótesis de la existencia del *neutrón* que se descubrió más tarde (entre 1930 y 1932).

Todos los núcleos están compuestos de dos tipos de partículas: *protones* y *neutrones*. La única excepción es el núcleo de hidrógeno ordinario, que es un solo protón.

2.2. Estructura del núcleo

- el **número atómico Z**, que es igual al número de protones en el núcleo
- el **número de neutrones N**, que es igual al número de neutrones en el núcleo
- el **número de masa A**, que es igual al número de nucleones en el núcleo (nucleón es un término genérico que se usa para referirse a un protón o a un neutrón), A = Z + N

El símbolo que se usa para representar el núcleo es:

$$^{A}_{Z}X$$

donde X representa el símbolo químico del elemento.

Núclido: Especie nuclear particular. Dos o más núclidos pueden tener el mismo número atómico Z, y distinto número másico A, se dice entonces que son **isótopos**: $^{235}_{92}U$ y $^{238}_{92}U$

Todos los isótopos de un mismo elemento químico presentan idénticas propiedades químicas.

Núcleos Isótonos: Son núcleos que tienen el mismo número de N y distinto Z: $^{13}_{6}C$ y $^{14}_{7}N$

Núcleos Isóbaros: Son núcleos que tienen el mismo A y distinto Z distinto N: $^{28}_{13}Al$ y $^{28}_{12}Mg$

2.2. Estructura del núcleo

Unidad de masa atómica

Definimos la unidad de masa atómica:

$$1\,u = \frac{1}{12} m_{^{12}C} \qquad m_{^{12}C} = \frac{12\ g/mol}{6{,}022 \cdot 10^{23}\ átomos/mol} = 1{,}992 \cdot 10^{-23}\ g$$

$$1\,u = \frac{1{,}992 \cdot 10^{-23}\ g}{12} = 1{,}66 \cdot 10^{-24}\ g$$

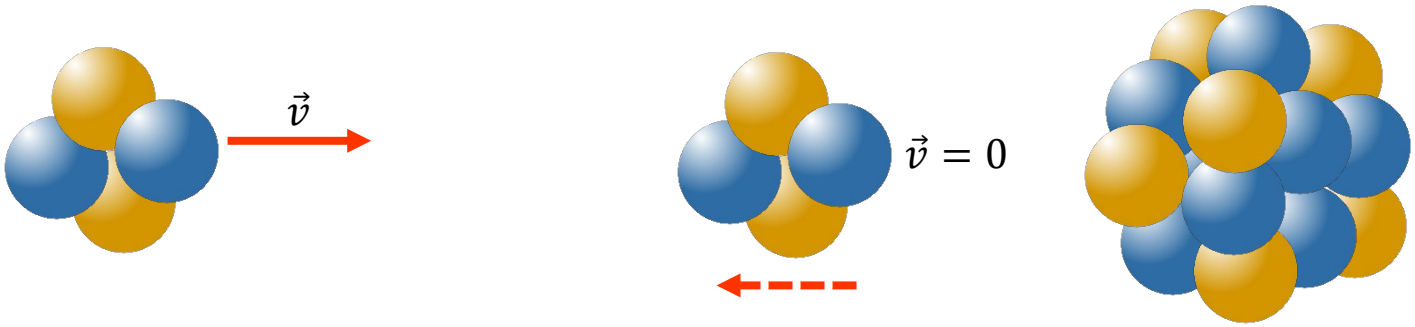
$$1\,u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ kg$$

Carga y masa del protón, neutrón y electrón

Partícula	Masa (u)	Masa (kg)	Carga (C)
Protones	1,007276	$1{,}67262 \cdot 10^{-27}$	$1{,}6 \cdot 10^{-19}$
Neutrones	1,008665	$1{,}67493 \cdot 10^{-27}$	No tienen
Electrones	1/1837	$9{,}1 \cdot 10^{-31}$	$-1{,}6 \cdot 10^{-19}$

2.3. Tamaño y densidad del núcleo

Al usar el principio de conservación de la energía, Rutherford encontró una expresión para cuán cerca una partícula alfa que se mueve directamente hacia el núcleo puede llegar a éste antes de ser repelido por la repulsión de Coulomb.



La energía cinética de la partícula α se habrá transformado en energía potencial electrostática:

$$\frac{1}{2} m_\alpha {v_\alpha}^2 = k \frac{2e \cdot Ze}{r} = k \frac{2Ze^2}{r} \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{r = \frac{4kZe^2}{m_\alpha {v_\alpha}^2}}$$

Para el oro el radio del núcleo era del orden de 10^{-14} m

El tamaño del átomo se estimaba en unos 10^{-10} m

2.3. Tamaño y densidad del núcleo

Posteriormente se han empleado técnicas de dispersión de electrones de elevado momento lineal, llegándose a la siguientes conclusiones:

- Los núcleos atómicos son *básicamente esféricos*, si bien sus *bordes son difusos*.
- El tamaño de los *núcleos pequeños es del orden de los* 10^{-15} m.
- Se ha podido establecer una fórmula empírica que relaciona el radio nuclear con el número másico, A:

$$r \cong 1{,}2 \cdot A^{1/3}\ fm$$

- La unidad en la que suele expresarse el tamaño del núcleo es el fentómetro o fermi, en honor a **Enrico Fermi** (1901-1954), (1 fm = $10^{-15}\ m$).

Densidad del núcleo

Si calculamos la densidad:

$$\boldsymbol{\rho} = \frac{m}{V} = \frac{(1{,}66 \cdot 10^{-27}) \cdot A\ kg}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{(1{,}66 \cdot 10^{-27}) \cdot A\ kg}{\frac{4}{3}\pi \left(1{,}2 \cdot A^{1/3}\ fm\right)^3} = \mathbf{2{,}4 \cdot 10^{17}\ kg\ m^{-3}}$$

¡Para todos los núcleos!

3.1. Interacción nuclear fuerte

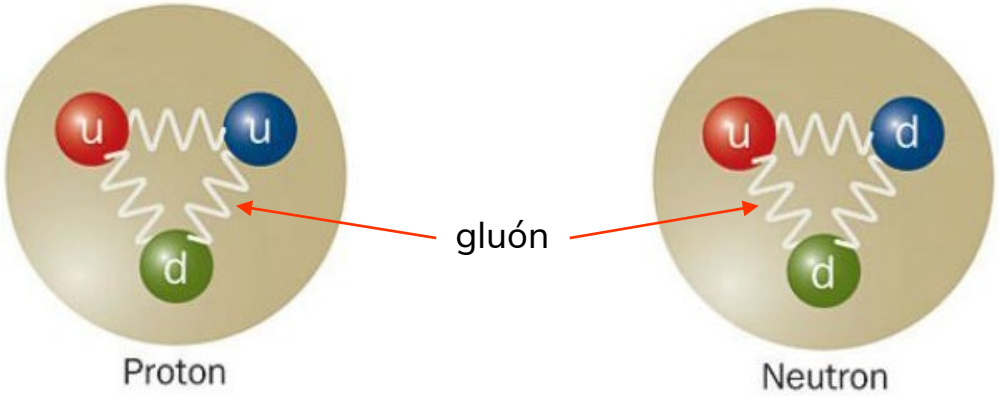
Antes de la década de 1970

- El núcleo consiste en una colección de protones y neutrones fuertemente empaquetados.
- Las grandes fuerzas electrostáticas repulsivas entre protones deben hacer que el núcleo se separe.
- Sin embargo, los núcleos son estables debido a la presencia de otra fuerza de corto alcance (aproximadamente 2 fm): la **fuerza nuclear**, una *fuerza atractiva* que actúa entre todas las partículas nucleares.
- Los protones se atraen mutuamente vía la fuerza nuclear y al mismo tiempo se repelen mutuamente mediante la fuerza de Coulomb. La fuerza nuclear atractiva también *actúa entre pares de neutrones y entre neutrones y protones*.
- La fuerza nuclear atractiva *es más fuerte que la fuerza repulsiva de Coulomb* dentro del núcleo (a distancias cortas).
- La fuerza nuclear fuerte es casi *independiente de la carga*.
- Las fuerzas nucleares asociadas con las interacciones protón-protón, protón-neutrón y neutrón-neutrón son aproximadamente iguales, aparte de la adicional fuerza de Coulomb repulsiva para la interacción protón-protón.
- El modelo de Yukawa (1935) explicaba satisfactoriamente muchos aspectos de la fuerza nuclear fuerte.

3.1. Interacción nuclear fuerte

Después del descubrimiento de los quarks

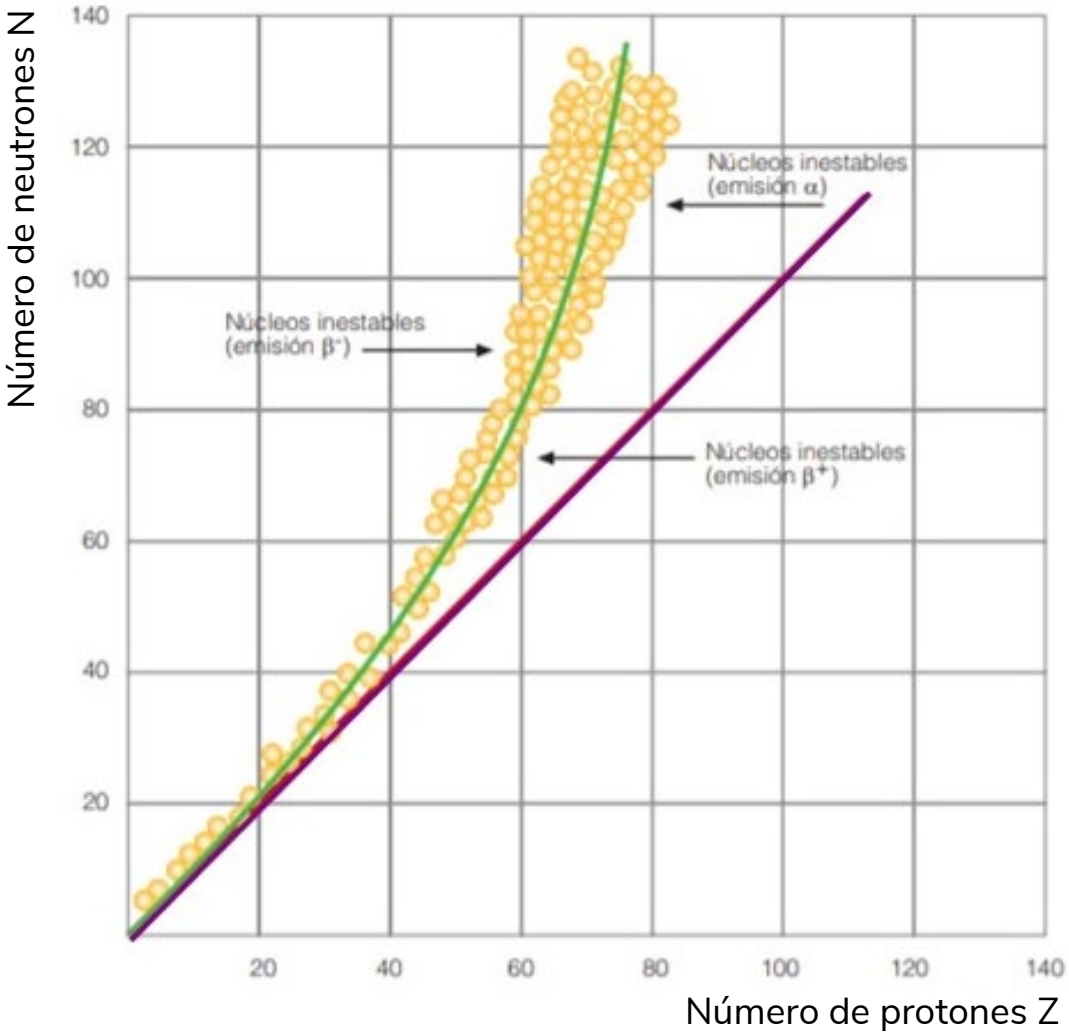
- Los protones y los neutrones que componen el núcleo, se consideran que están hechos de **quarks**.
- Las *fuerzas que mantienen unidos los quarks son mucho más fuertes* que las que mantienen unidos a neutrones y protones.
- Las fuerzas entre quarks son debidas a los **gluones** y son tan fuertes que producen el llamado confinamiento del color que imposibilita observar quarks desnudos a temperaturas ordinarias, mientras que en núcleos pesados sí es posible separar algunos protones o neutrones.
- La *fuerza fuerte entre los nucleones puede ser considerada como una fuerza de color residual*.



3.2. Estabilidad de los núcleos

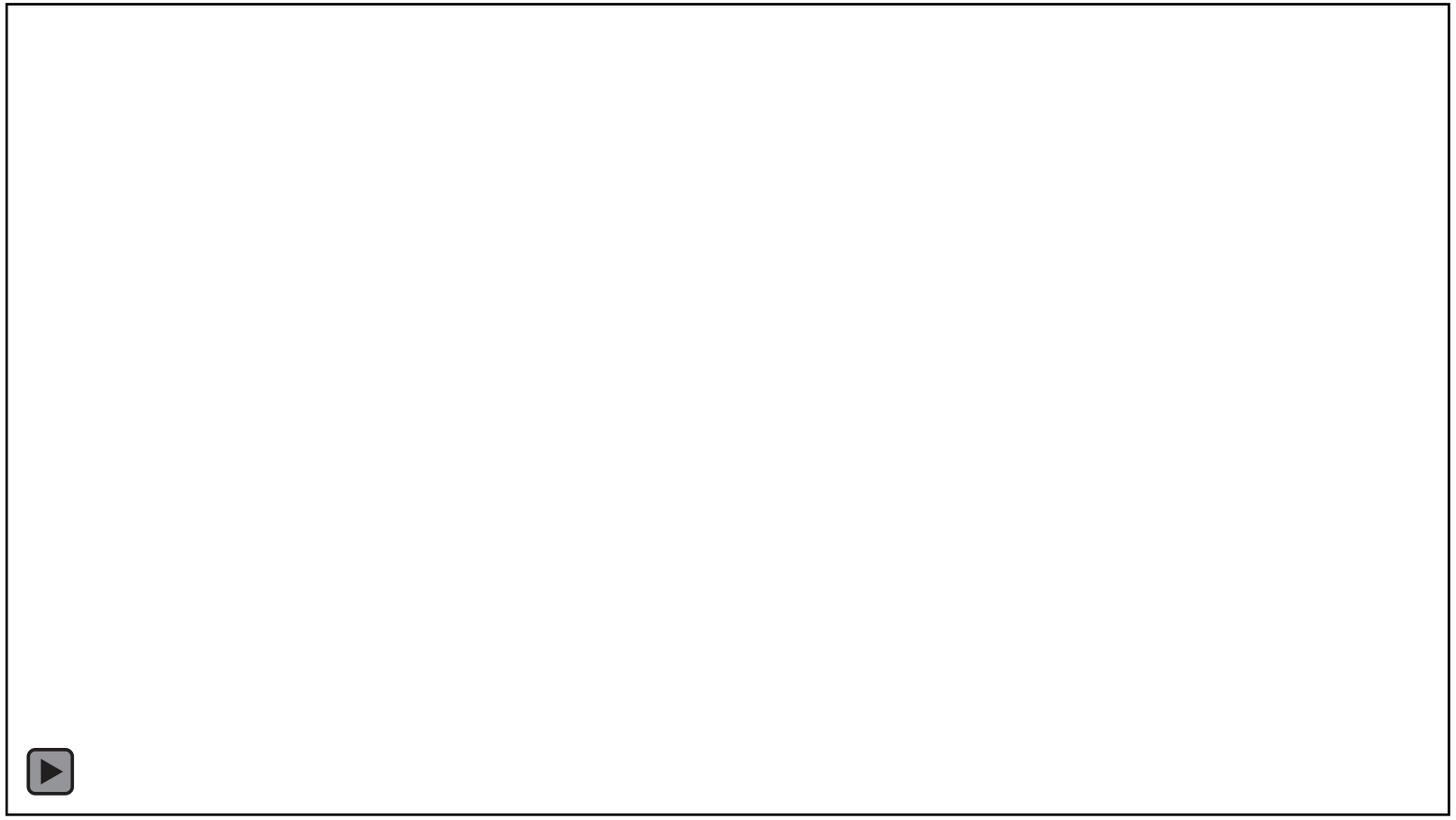
- Hay alrededor de 260 núcleos estables, otros cientos han sido observados, pero son inestables.
- Los *núcleos ligeros son más estables* si contienen igual número de protones y neutrones. Esta diferencia se puede entender en parte al reconocer que, conforme *aumenta el número de protones*, aumenta la intensidad de la fuerza de Coulomb, que tiende a romper al núcleo. Como resultado, *se necesitan más neutrones para mantener al núcleo estable* porque a los neutrones sólo los afecta la fuerza nuclear atractiva.
- Los neutrones adicionales "disminuyen" la densidad de carga nuclear. Eventualmente, *cuando Z = 83, las fuerzas repulsivas entre los protones no se pueden compensar mediante la adición de neutrones*. Los elementos que contienen más de 83 protones *no tienen núcleos estables* sino que, más bien, decaen o se desintegran en otras partículas en varios periodos.

3.2. Estabilidad de los núcleos



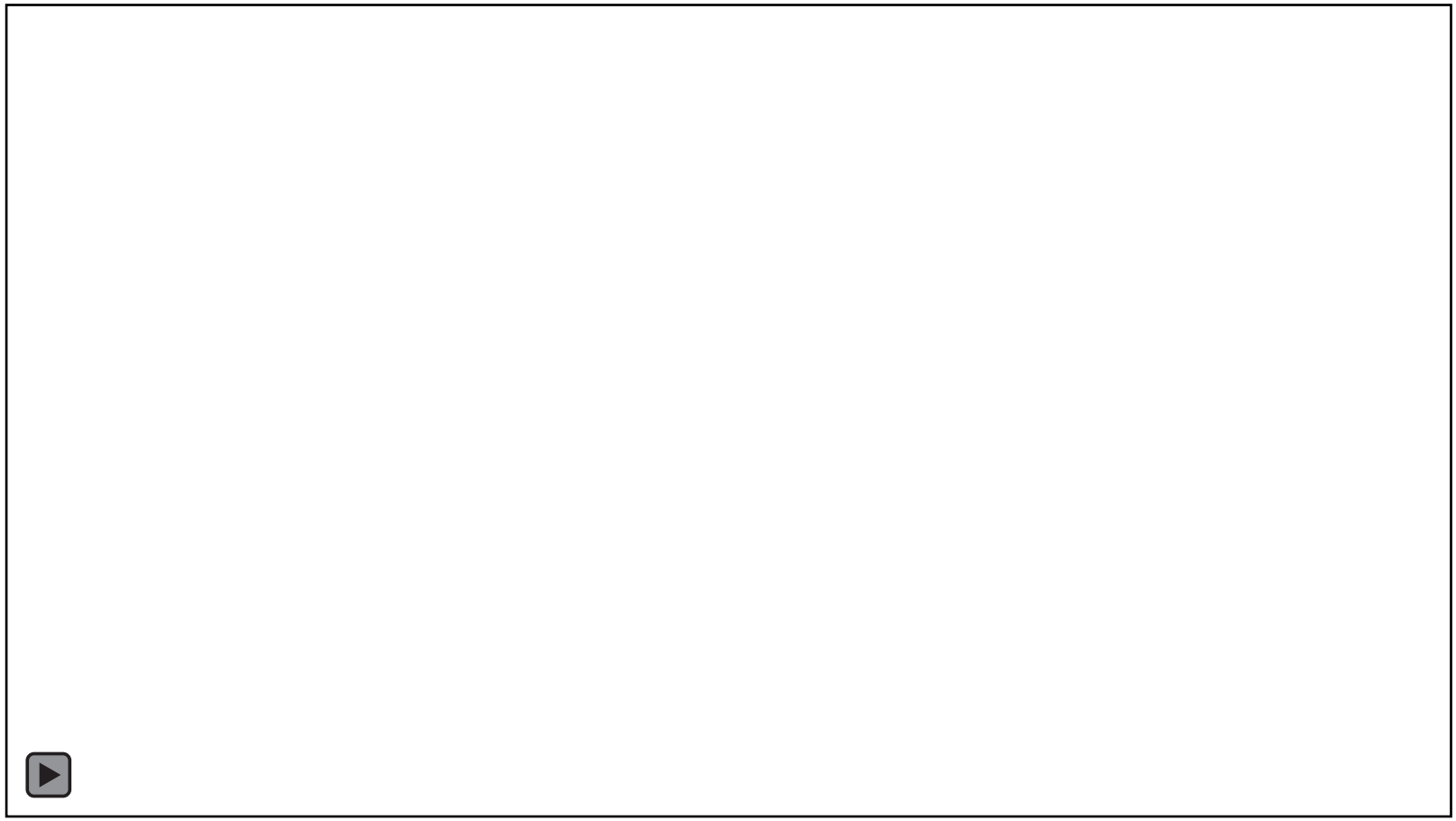
3.3. Energía de enlace

Equivalencia masa energía



3.3. Energía de enlace

Defecto de masa



3.3. Energía de enlace

Mediante técnicas de espectrometría se ha podido comprobar que la masa de los núcleos es menor que la suma de la masa de los nucleones.

Se define el **defecto de masa** como:

$$\Delta m = \sum m_{nucleones} - m_{núcleo}$$

Además, dado que la masa es otra manifestación de energía ($\Delta E = \Delta m \cdot c^2$), *la energía total del sistema enlazado* (el núcleo) *es menor que la energía combinada de los nucleones separados*. Esta diferencia en energía se llama **energía de enlace del núcleo** y se puede considerar como la *energía que se debe agregar a un núcleo para romperlo en sus neutrones y protones separados*.

$$\boldsymbol{\Delta E = \left(\sum m_{nucleones} - m_{núcleo} \right) \cdot c^2}$$

El equivalente de 1 u es:

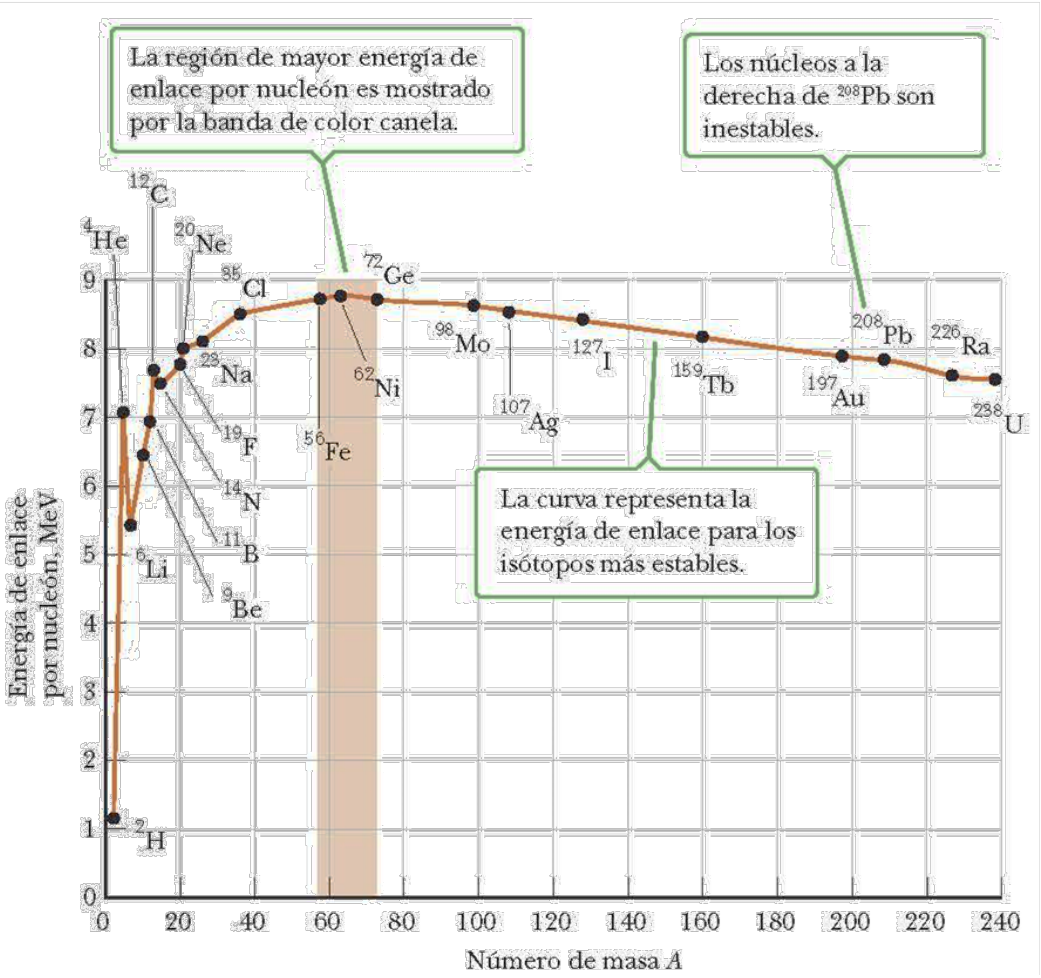
$$\Delta E = 1u \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}\right)^2 = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ kg \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}\right)^2 = 1{,}49 \cdot 10^{-10}\ J = \boldsymbol{931{,}5\ MeV}$$

3.3. Energía de enlace

Energía de enlace por nucleón

Al examinar una gráfica de **energía de enlace por nucleón**, *E*/*A*, como función del número de masa para varios núcleos estables, observamos:

- Excepto por los núcleos más ligeros, la energía de enlace promedio por nucleón es aproximadamente 8 MeV.
- Los núcleos *alrededor de A = 60 son los más estables*. Este hecho permite que se libere energía en las reacciones de fisión y fusión.
- La curva varía lentamente para *A > 40*, lo cual sugiere *que la fuerza nuclear se satura*.



Ejercicio resuelto 1

Para el núcleo ${}^{12}_{6}C$, cuya masa es 12,0000 u, calcula:
a) El defecto de masa.
b) La energía de enlace total y la energía de enlace por nucleón.
Datos: m_p = 1,0073 u; m_n = 1,0087 u; 1 u = 1,66·10^{-27} kg; c = 3·10^8 m s^{-1}

a) El defecto de masa se calcula a partir de la masa del núcleo y la masa de sus constituyentes. El núcleo de carbono tiene seis protones y seis neutrones, por tanto:

$$\Delta m = \left(6\, m_p + 6\, m_n\right) - m_{{}^{12}_{6}C} = (6 \cdot 1{,}0073 + 6 \cdot 1{,}0087) - 12 = 0{,}096\, u$$

b) La energía total de enlace se calcula multiplicando este exceso de masa por la velocidad de la luz.

$$\boldsymbol{\Delta E} = \Delta m \cdot c^2 = 0{,}096\, u \cdot \frac{1{,}66 \cdot 10^{-27}\, kg}{u} \cdot (3 \cdot 10^8\, m\, s^{-1})^2 = \mathbf{1{,}43 \cdot 10^{-11}\, J}$$

$$\boldsymbol{\Delta E} = 1{,}43 \cdot 10^{-11}\, J \cdot \frac{MeV}{1{,}6 \cdot 10^{-13} J} = \mathbf{89{,}64\ MeV}$$

Como hay doce nucleones:

$$\frac{\boldsymbol{\Delta E}}{\boldsymbol{A}} = \frac{89{,}64\, MeV}{12} = \mathbf{7{,}47}\ \frac{\boldsymbol{MeV}}{\boldsymbol{nucleón}}$$

ACTIVIDADES

1. *La masa de los isótopos* $^{12}_{6}C$ *y* $^{13}_{6}C$*, son* $12{,}0000$ *y* $13{,}0034\,u$*, respectivamente. Explique qué es el defecto de masa de un núcleo y calcule el de ambos isótopos.*
   Datos: $m_p = 1{,}007276\,u; m_n = 1{,}008665\,u$
   Sol: $\Delta m(^{12}_{6}C) = 0{,}095646\,u; \Delta m(^{13}_{6}C) = 0{,}100911\,u$

2. La masa atómica del isótopo $^{14}_{7}N$ es $14{,}0001089\,u$. Indique los nucleones de este isótopo y calcule su defecto de masa y calcule su energía de enlace.
   Datos: $m_p = 1{,}007276\,u; m_n = 1{,}008665\,u; 1u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,kg;\ c = 3 \cdot 10^{8}\,m\,s^{-1}$
   Sol: $\Delta m = 0{,}1114781\,u; \Delta E = 1{,}67 \cdot 10^{-11}\,J$

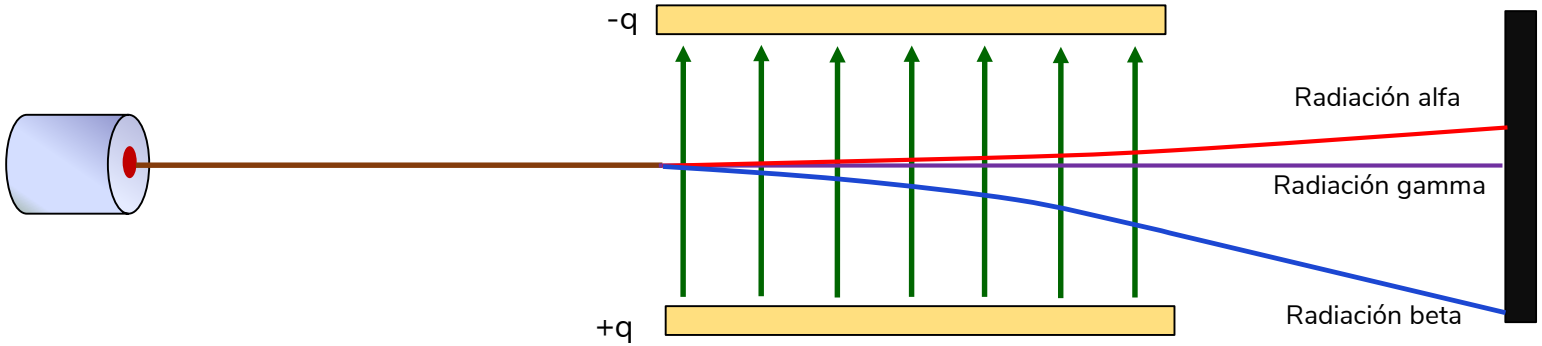
3. Considere los nucleidos $^{3}_{1}H$ y $^{4}_{2}He$, calcule la energía de enlace de cada uno e indique cuál de ellos es más estable y justifique la respuesta.
   Datos: $m_p = 1{,}007276\,u; m_n = 1{,}008665\,u; m(^{3}_{1}H) = 3{,}0160494\,u;$
   $m(^{4}_{2}He) = 4{,}00260\,u; 1u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,kg; c = 3 \cdot 10^{8}\,m\,s^{-1}$
   Sol: $\Delta E(^{3}_{1}H) = 1{,}28 \cdot 10^{-12}\,J;\ \Delta E(^{4}_{2}He) = 4{,}37 \cdot 10^{-12}\,J$

4. Calcule el defecto de masa de los núclidos $^{11}_{5}B$ y $^{222}_{86}Rn$ y razone cuál de ellos es más estable.
   Datos: $m\left(^{11}_{5}B\right) = 11{,}009305\,u; m(^{222}_{86}Rn) = 222{,}017574\,u;\ m_p = 1{,}007276\,u;$
   $m_n = 1{,}008665\,u; 1u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,kg; c = 3 \cdot 10^{8}\,m\,s^{-1}$
   Sol: $\Delta m\left(^{11}_{5}B\right) = 0{,}079065\,u; \Delta m(^{222}_{86}Rn) = 1{,}786602\,u$

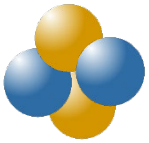
- En 1896, **Becquerel** descubrió accidentalmente que los cristales de sal de uranio emiten una radiación invisible que puede oscurecer una placa fotográfica incluso si la placa se cubre para excluir la luz.
- Después de muchas de estas observaciones bajo condiciones controladas, concluyó que la radiación emitida por los cristales era de un nuevo tipo, uno que no requería estimulación externa.
- Esta emisión espontánea de radiación pronto se llamó *radiactividad*.
- Experimentos posteriores de otros científicos demostraron que otras sustancias también eran radiactivas.
- Las investigaciones más significativas de este tipo las desarrollaron **Marie y Pierre Curie**. Luego de varios años de cuidadosos y laboriosos procesos reportaron el descubrimiento de dos elementos anteriormente desconocidos, ambos radiactivos. Estos elementos recibieron los nombres de *polonio* y *radio*.
- *Experimentos posteriores*, incluido el famoso trabajo de Rutherford sobre dispersión de partículas alfa, sugirió que *la radiactividad era resultado del decaimiento o desintegración, de núcleos inestables*.

4.1. Tipos de radiactividad

Una sustancia radiactiva puede emitir alguno de **tres tipos de radiación**: partículas alfa (α), en la que las partículas emitidas son núcleos ${}_2^4He$; partículas beta (β), en la que las partículas emitidas son electrones (e^-) o positrones (e^+); y rayos gamma (γ), en la que los "rayos" emitidos son fotones de alta energía.

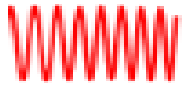


Radiación alfa (α) son núcleos de Helio emitidos una velocidad de unos 16.000 km/s



Radiación beta (β) son electrones que proceden del núcleo por desintegración de un neutrón y son emitidos por el núcleo a unos 260.000 km/s

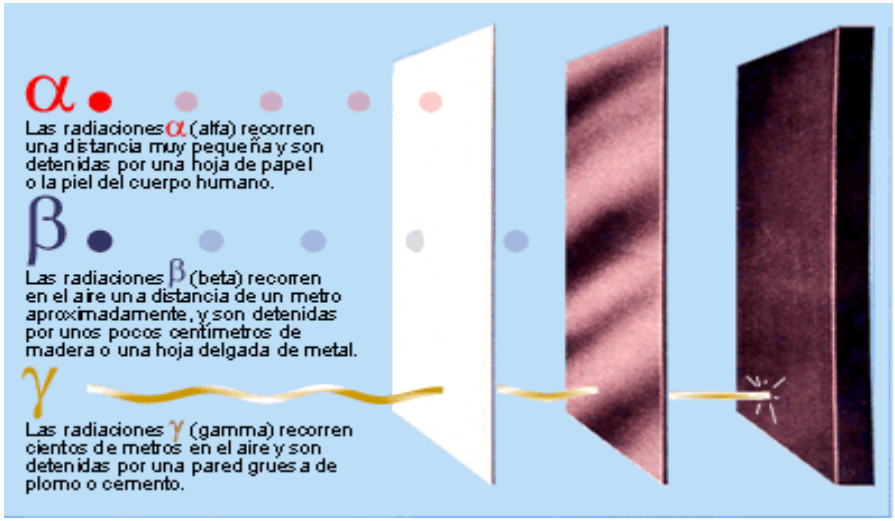
Radiación gamma (γ) es de naturaleza electromagnética



4.1. Tipos de radiactividad

Propiedades

Radiación	Masa	Carga	Poder de penetración	Poder de ionización
Alfa	4 u	+ 2	Absorbida por una hoja de papel	Muy grande
Beta	1/1840 u	- 1	Absorbida por una hoja de aluminio	Menor que la radiación alfa
Gamma	0	0	Absorbida por un bloque de plomo	Muy pequeño

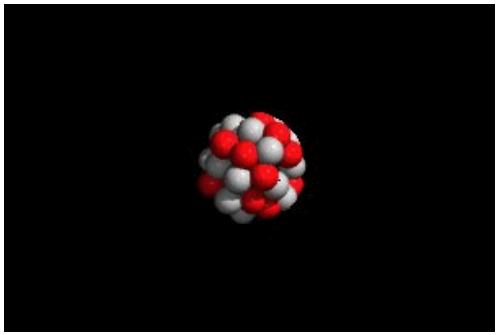


4.2. Leyes del decaimiento radiactivo (Rutherford y Sody)

Decaimiento alfa

Si un núcleo emite una partícula alfa ${}_2^4He$, pierde dos protones y dos neutrones. Por lo tanto, el número de neutrones *N* de un solo núcleo disminuye por 2, *Z* disminuye por 2 y *A* disminuye en 4.

$$ {}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4He $$



donde X se llama **núcleo padre** e Y se conoce como **núcleo hijo.**

- Para que ocurra emisión alfa, *la masa del padre debe ser mayor que la masa combinada del hijo y la partícula alfa*.
- En el proceso de decaimiento, este *exceso de masa se convierte en energía* de otras formas y aparece en forma de energía cinética en el núcleo hijo y la partícula alfa.
- La *cantidad de movimiento se conserva*, las dos partículas emitidas en el decaimiento de un núcleo en reposo deben tener cantidades iguales de movimiento, pero con dirección opuesta.

Ejercicio resuelto 2

Se demostró que el núcleo $^{226}_{88}Ra$ experimenta decaimiento alfa a $^{222}_{86}Rn$. Calcule la cantidad de energía liberada en este decaimiento.
Datos: m ($^{226}_{88}Ra$) = 226,025 402 u; m ($^{222}_{86}Rn$) = 222,017 571 u; m ($^{4}_{2}He$) = 4,002 602 u; 1 u = 1,66·10^{-27} kg; c = 3·10^{8} m s^{-1}

Escribimos la ecuación del decaimiento:

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

El defecto de masa:

$$\Delta m = m_{^{226}_{88}Ra} - \left(m_{^{222}_{86}Rn} + m_{^{4}_{2}He}\right) = 226{,}025\ 402 - (222{,}017\ 571 + 4{,}002\ 602) = 0{,}005\ 229\ u$$

La energía equivalente:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 0{,}005\ 229\ u \cdot \frac{1{,}66 \cdot 10^{-27}\ kg}{u} \cdot (3 \cdot 10^{8}\ m\ s^{-1})^2 = \mathbf{7{,}81 \cdot 10^{-13}}\ \boldsymbol{J} \cdot \frac{MeV}{1{,}6 \cdot 10^{-13}\ J}$$

$$\boldsymbol{\Delta E = 4{,}88\ MeV}$$

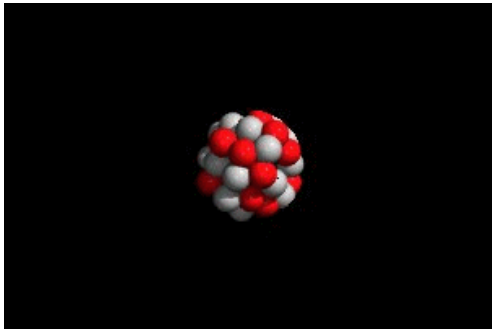
4.2. Leyes del decaimiento radiactivo (Rutherford y Sody)

Decaimiento beta

Cuando un núcleo radiactivo experimenta decaimiento beta, el núcleo hijo tiene el mismo número de nucleones que el núcleo padre, pero el número atómico cambia por 1:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e$$

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e$$



Como veremos más adelante, estos procesos no se describen por completo mediante estas expresiones.

La emisión de electrones de un *núcleo* es sorprendente porque, en todos los análisis anteriores, se afirmó que el núcleo está compuesto solamente de protones y neutrones.

Esta aparente discrepancia se puede explicar al notar que el electrón emitido se crea en el núcleo mediante un proceso en el cual un neutrón se transforma en un protón:

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e$$

Ejercicio resuelto 3

Encuentra la energía liberada en el decaimiento beta de $^{14}_{6}C$ a $^{14}_{7}N$.
Datos: m ($^{14}_{6}C$) = 14,003 242 u; m ($^{14}_{7}N$) = 14,003 074 u; 1 u = 1,66·10^{-27} kg; c = 3·10^{8} m s^{-1}

Escribimos la ecuación del decaimiento:

$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$$

El defecto de masa:

$$\Delta m = m_{^{14}_{6}C} - m_{^{14}_{7}N} = 14{,}003\,242 - 14{,}003\,074 = 0{,}000\,168\,u$$

La energía equivalente:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 0{,}000\,168\,u \cdot \frac{1{,}66 \cdot 10^{-27}\,kg}{u} \cdot (3 \cdot 10^{8}\,m\,s^{-1})^2 = \mathbf{2{,}5 \cdot 10^{-14}}\ \boldsymbol{J} \cdot \frac{MeV}{1{,}6 \cdot 10^{-13}\,J}$$

$$\boldsymbol{\Delta E = 0{,}156\ MeV}$$

4.2. Leyes del decaimiento radiactivo (Rutherford y Sody)

Decaimiento beta

La *energía calculada por lo general es más que la energía observada* en este proceso. La discrepancia condujo a una crisis en la física porque parecía que la energía no se conservaba.

En 1930, Pauli propuso que una tercera partícula debe estar presente para llevarse la energía "faltante" y conservar la cantidad de movimiento. Más tarde, Enrico Fermi llamó a esta partícula **neutrino** ("el pequeño neutro") porque debía ser eléctricamente neutro y tener poca o ninguna masa.

Ahora los procesos de decaimiento beta (β^- y β^+) se pueden representar en su forma correcta:

$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e + \tilde{\nu}_e \quad \rightarrow \quad {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + \tilde{\nu}_e$$

$$^{14}_{7}N \rightarrow {}^{14}_{6}C + {}^{0}_{+1}e + \nu_e \quad \rightarrow \quad {}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e + \nu_e$$

Donde, $\tilde{\nu}_e$ indica un **antineutrino**, ν_e indica un **neutrino**, ${}^{0}_{-1}e$ indica un **electrón** y ${}^{0}_{+1}e$ indica un **positrón**.

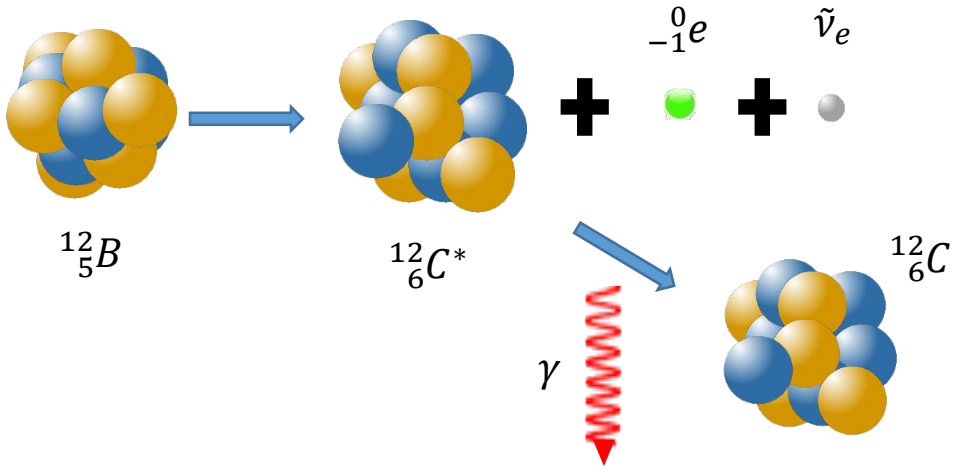
4.2. Leyes del decaimiento radiactivo (Rutherford y Sody)

Decaimiento gamma

Con mucha frecuencia un núcleo que experimenta decaimiento radiactivo se deja en un estado de energía excitado. Entonces el núcleo puede experimentar un segundo decaimiento a un estado energético más bajo, acaso incluso al estado base, al emitir uno o más fotones de alta energía (rayos gamma).

$$^{12}_{5}B \rightarrow {}^{12}_{6}C^{*} + {}^{0}_{-1}e + \tilde{\nu}_e \quad \rightarrow \quad {}^{12}_{6}C^{*} \rightarrow {}^{12}_{6}C + \gamma$$

Donde el asterisco en $^{12}_{6}C^{*}$ indica que el átomo de carbono está en un estado excitado después del decaimiento.



ACTIVIDADES

5. El $Ra-226$ se desintegra emitiendo una partícula alfa. Si la masa del $Ra-226$ es de $226{,}025\,406\,u$; la del $Rn-222$ es $222{,}017574\,u$, y la de la partícula $alfa$, $4{,}002603\,u$, determina: i) La energía cinética que se transfiere en el proceso de desintegración; ii) La velocidad con qué es emitida la partícula alfa.
   Datos: $1u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ kg; c = 3 \cdot 10^{8}\ m\,s^{-1}$
   Sol: i) $E_C = 7{,}81 \cdot 10^{-13}\ J$; ii) $v = 1{,}52 \cdot 10^{7}\ m\,s^{-1}$

6. El núcleo radiactivo ${}^{235}_{92}U$ se desintegra, emitiendo partículas alfa. Sabiendo que la desintegración de un átomo de ${}^{235}_{92}U$ produce unos $200\,MeV$ de energía, calcule la energía total liberada por cada gramo de dicho elemento.
   Datos: $m\left({}^{235}_{92}U\right) = 235{,}128\,u$; $1u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ kg; c = 3 \cdot 10^{8}\ m\,s^{-1}$;
   $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$
   Sol: $E = 8{,}2 \cdot 10^{10}\ J\ g^{-1}$

7. El ${}^{210}_{83}Bi$ emite una partícula beta y se transforma en polonio que, a su vez, emite una partícula alfa y se transforma en plomo. Escriba las reacciones de desintegración descritas.

4.3. Ley de la desintegración radiactiva

- En 1904 Rutherford descubrió que la **actividad** de una sustancia radiactiva disminuía exponencialmente con el tiempo.

- Se entiende por **actividad de una sustancia radiactiva** al número de partículas emitidas por unidad de tiempo, o lo que es lo mismo, el número de núcleos que se desintegran por unidad de tiempo y es proporcional a una constante característica de cada sustancia (**constante de desintegración radiactiva** λ) y al número de núcleos existentes en ese momento:

$$A = \left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda N \quad (Bq = desintegración/s \ - Bequerel)$$

- El número de núcleos que se desintegran en un d*t* será, por tanto:

$$dN = -\lambda N dt$$

- El número de núcleos existentes en un instante determinado se obtendrá:

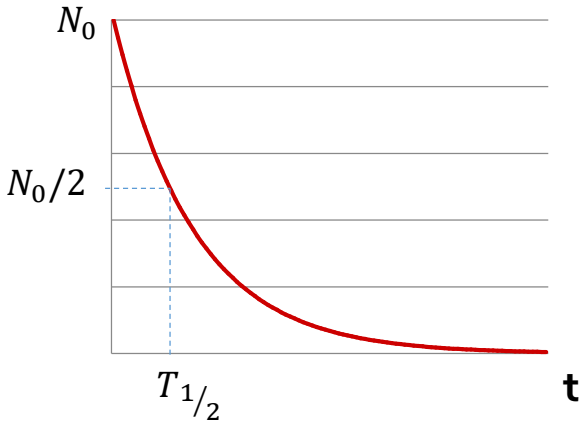
$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad \rightarrow \quad \int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\int_{0}^{t} \lambda dt \quad \rightarrow \quad lnN - lnN_0 = ln\frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

$$\boldsymbol{N = N_0 e^{-\lambda t}} \quad \textbf{Ley de la desintegración radiactiva}$$

4.3. Ley de la desintegración radiactiva

Período de semidesintegración o semivida

Periodo de semidesintegración o **semivida** es el tiempo que tarda en desintegrarse la mita de los núcleos iniciales.



$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \rightarrow 2 = e^{\lambda T_{1/2}} \rightarrow ln2 = \lambda T_{1/2}$$

$$\boldsymbol{T_{1/2} = \frac{ln2}{\lambda}}$$

Núclido	$T_{1/2}$
C-14	5370 años
Po-214	164 μs
Rn-222	3,82 días
Ra-225	14,8 días
Th-234	24,5 días
Np-237	$2{,}35 \cdot 10^6$ años
U-238	$4{,}468 \cdot 10^9$ años

Vida media

Vida media, τ, representa el promedio de vida que tenga un átomo y es:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

4.4. Usos prácticos de la radiactividad

Datación arqueológica por el método del carbono-14

- El C-14 tiene un periodo de semidesintegración de 5730 años.
- Se forma por los rayos cósmicos que producen neutrones en las capas altas de la atmósfera.
- Los neutrones colisionan con el N-14 y originan el C-14.

$$^{1}_{0}n + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{14}_{6}C + {}^{1}_{1}H$$

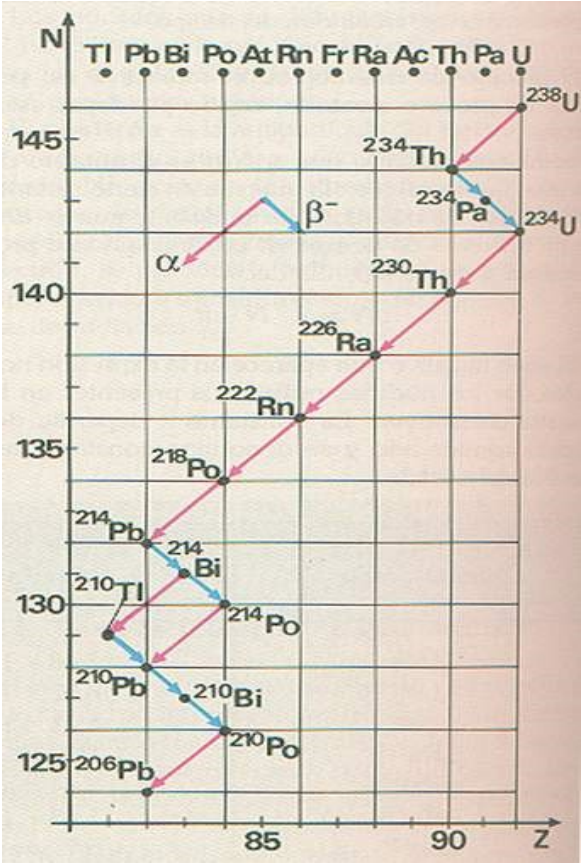
- El C-14 se mezcla con el isótopo estable C-12 y en el proceso de intercambio es ingerido por los seres vivos.
- Una vez el ser vivo fallece, finaliza el proceso de intercambio y el C-14 empieza a disminuir por desintegración beta:

$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}\beta + \tilde{\nu}_e$$

4.4. Usos prácticos de la radiactividad

Series radiactivas y geocronología

- Existen *tres series de núcleos que ocurren en la naturaleza*. Cada una comienza con un isótopo radiactivo específico de larga duración (4n: ^{232}Th; 4n+3: ^{238}U; 4n+4: ^{235}U) con vida media que supera la de cualquiera de sus descendientes.
- La *cuarta serie* con ^{237}Np (4n+2), un elemento transuránico que *no se encuentra en la naturaleza*. Este elemento tiene una vida media de "solamente" $2{,}14 \cdot 10^6$ años.
- Las dos series del uranio son un poco más complejas que la serie de ^{232}Th.
- La radiactividad natural constantemente suministra elementos radiactivos al ambiente, que de otra forma habrían desaparecido hace mucho tiempo.
- El conocimiento de los periodos de semidesintegración de los isótopos que componen la serie permite la datación de rocas y minerales por el método antes expuesto (**ley de la geocronología**).



Serie ^{238}U

Ejercicio resuelto 4

En el accidente de la central nuclear de Fukushima I se produjeron emisiones de yodo y cesio radiactivos a la atmósfera. El periodo de semidesintegración del $^{137}_{55}Cs$ es 30,23 años. Calcule la constante de desintegración de Cs-137 y el tiempo, medido en años, que debe transcurrir para que la actividad del Cs-137 se reduzca a un 1 % del valor inicial.

Teniendo en cuenta la expresión del período de semidesintegración:

$$T_{1/2} = \frac{ln2}{\lambda} \rightarrow \quad \boldsymbol{\lambda = \frac{ln2}{T_{1/2}} = \frac{ln2}{30{,}23\ años} = 0{,}022\ 929\ años^{-1}}$$

Para calcular el tiempo, multiplicamos cada uno de los miembros de la ecuación de la desintegración radiactiva por λ:

$$\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad \rightarrow \quad A = A_0 e^{-\lambda t} \quad \rightarrow \quad 0{,}01A_0 = A_0 e^{-\lambda t}$$

Tomando logaritmos y ordenando:

$$ln0{,}01 = \ln\left(e^{-\lambda t}\right) \quad \rightarrow \quad ln0{,}01 = -\lambda t \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{t = \frac{ln0{,}01}{-\lambda} = \frac{ln0{,}01}{-0{,}022\ 929} = 200{,}84\ años}$$

ACTIVIDADES

8. El período de semidesintegración del $^{226}_{88}Ra$ es de 1620 años. i) Determine la actividad para 1 g de $^{226}_{88}Ra$; ii) Calcule el tiempo necesario para que la actividad de una muestra de $^{226}_{88}Ra$ quede reducida a un dieciseisavo de su valor original.
   Datos: $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}; m(^{226}_{88}Ra) = 226{,}025406\ u$
   Sol:i) $A = 3{,}62 \cdot 10^{10}\ Bq$; ii) $t = 6480\ años$

9. Entre unos restos arqueológicos de edad desconocida se encuentra una muestra de carbono en la que sólo queda una octava parte del carbono $^{14}_{6}C$ que contenía originalmente. El periodo de semidesintegración del $^{14}_{6}C$ es de 5730 años. i) Calcule la edad de dichos restos. ii) Si en la actualidad hay 10^{12} átomos de $^{14}_{6}C$ en la muestra, ¿cuál es su actividad?
   Sol: i) $t = 17185\ años$; ii) $A = 3{,}84\ Bq$

10. El $^{126}_{55}Cs$ tiene un periodo de semidesintegración de 1,64 minutos. i) ¿Cuántos núcleos hay en una muestra de $0{,}7 \cdot 10^{-6}\ g$?; ii) Calcule la actividad para la muestra del apartado i) al cabo de 2 minutos.
    Datos: $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}; m\left(^{126}_{55}Cs\right) = 132{,}905\ u$
    Sol: i) $N = 3{,}17 \cdot 10^{15}\ núcleos$; ii) $A = 9{,}59 \cdot 10^{12}\ Bq$

Es posible cambiar la estructura de los núcleos al bombardearlos con partículas energéticas. Tales cambios se llaman **reacciones nucleares**.

Rutherford fue el primero en observar reacciones nucleares, usando fuentes radiactivas de la naturaleza para el bombardeo de partículas. Descubrió que se liberaban protones cuando se permitía que partículas alfa chocaran con átomos de nitrógeno. El proceso se puede representar simbólicamente como:

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

En 1931, **Frédéric Joliot** (1900-1958) e **Irene Curie** (1897-1956) descubrieron que la bombardear núcleos de berilio con partículas alfa, se producía una radiación muy penetrante que inicialmente supusieron que era radiación gamma. Análisis posteriores de **James Chadwick** (1891-1974) permitió identificarla como un **neutrón**:

$$^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n$$

5.1. Reacciones nucleares artificiales

En 1932 **John Cockcroft** (1897-1967) y **E.T.S. Walton** (1903-1995) bombardean núcleos de Litio con *protones artificialmente acelerados*, convirtiéndose en los primeros en desintegrar un núcleo atómico, primordial para el desarrollo de la energía nuclear:

$$^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{8}_{4}Be \rightarrow 2\,^{4}_{2}He$$

Reacciones nucleares con neutrones

- El núcleo se transforma en un isótopo de número másico A+1 y emite radiación gamma:

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U + \gamma$$

- El núcleo emite una partícula alfa:

$$^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He$$

- El núcleo emite un protón:

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}H$$

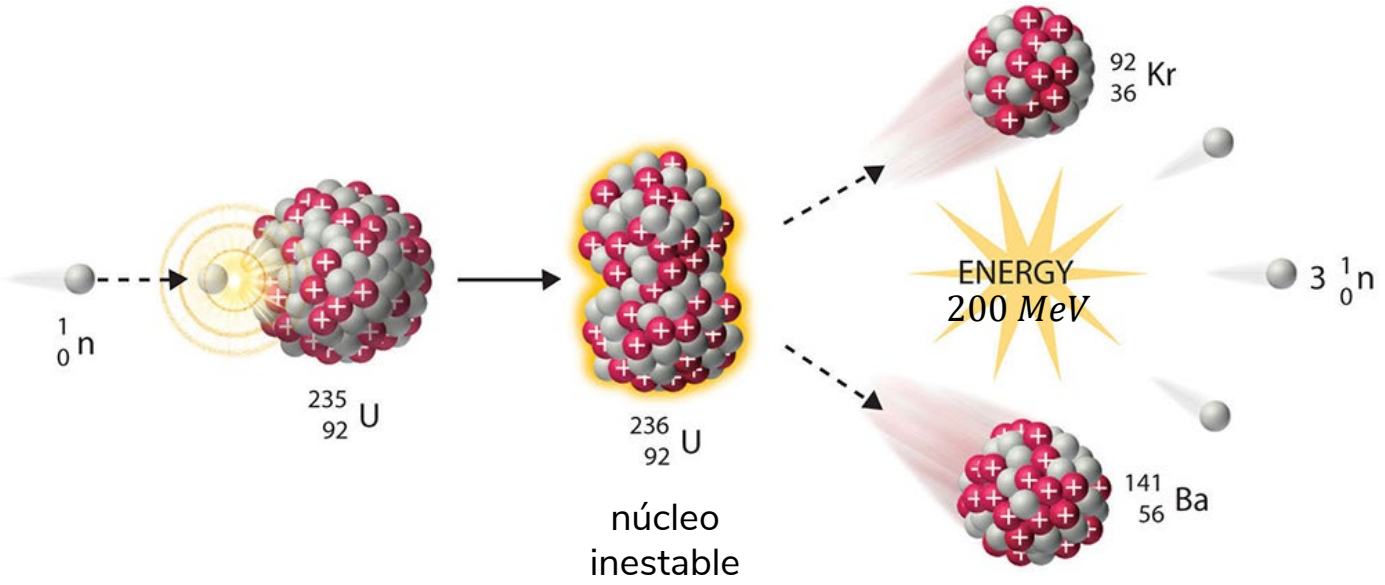
- Al capturar el neutrón, el núcleo se desestabiliza y se fragmenta en dos núcleos más pequeños: **fisión nuclear**.

5.2. Fisión nuclear

La **fisión nuclear** ocurre cuando un núcleo pesado, se divide o fisiona en dos núcleos más pequeños. En tal reacción, **la masa total de los productos es menor que la masa original del núcleo pesado**.

En 1938, **Otto Hahn** y **Frederic Strassman** observaron la primera fisión nuclear del U-235 utilizando neutrones lentos:

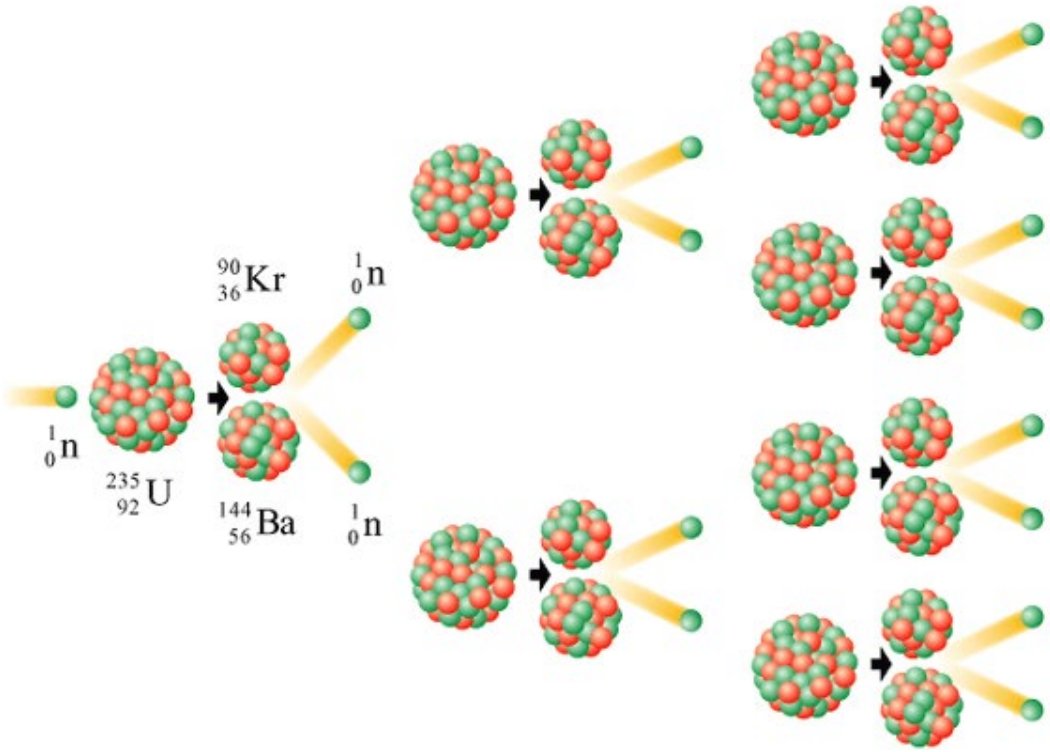
$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U^{*} \rightarrow ^{141}_{56}Ba + ^{92}_{36}Kr + 3\,^{1}_{0}n$$



5.2. Fisión nuclear

Reactores nucleares de fisión nuclear

Los neutrones emitidos cuando ^{235}U experimenta fisión a su vez pueden hacer que otros núcleos experimenten fisión, con la posibilidad de una *reacción en cadena:*



Un *reactor nuclear* es un sistema diseñado para mantener lo que se llama **reacción en cadena autosostenida**.

Para ello es necesaria una mínima cantidad de masa del combustible (**masa crítica**) y de un *moderador* absorbente de neutrones para controlar la reacción en cadena.

Ejercicio resuelto 5

a) Calcule la energía total liberada si 1 kg de ^{235}U experimenta fisión y considere que la energía de desintegración por núcleo es de Q = 208 MeV. b) ¿Cuántos kilogramos de ^{235}U se necesitarían para satisfacer el consumo de energía anual mundial (aproximadamente $4 \cdot 10^{20}$ J)?
Datos: $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$

a) Calculamos la energía total liberada de 1 kg de ^{235}U:

$$\Delta \boldsymbol{E} = N\mathrm{Q} = 1 \cdot 10^3\ g \cdot \frac{1\ mol}{235\ g} \cdot \frac{6{,}02 \cdot 10^{23}\ núcleos}{1\ mol} \cdot \frac{208\ MeV}{1\ núcleo} = \mathbf{5{,}32 \cdot 10^{26}\ MeV}$$

$$\Delta \boldsymbol{E} = 5{,}32 \cdot 10^{26}\ MeV \cdot \frac{1{,}6 \cdot 10^{-13}\ J}{MeV} = \mathbf{8{,}51 \cdot 10^{13}\ J}$$

b) Los kg necesarios:

$$\Delta E_T = N_{kg} \cdot E_{kg} \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{N_{kg}} = \frac{\Delta E_T}{E_{kg}} = \frac{4 \cdot 10^{20}\ J}{8{,}51 \cdot 10^{13}\ J\ kg^{-1}} = \mathbf{4{,}7 \cdot 10^6\ kg}$$

ACTIVIDADES

11. El uranio-235 tiene unos cuarenta modos posibles de desintegración por absorción de un neutrón. i) Completa la reacción nuclear siguiente, que ocurre cuando un núcleo de ^{235}U absorbe un neutrón: ${}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{95}_{38}Sr + {}^{b}_{a}X + 2{}^{1}_{0}n$. Indica también cuántos neutrones y protones tiene este núcleo de uranio; ii) Calcula la energía producida en la fisión de un núcleo de uranio 235, de acuerdo con la reacción anterior.
Datos: m_n = 1,008 66 u; m(^{235}U) = 235,124 u; m(^{95}Sr) = 94,9194 u; m(${}^{b}_{a}X$) = 138,919 u; c = $3 \cdot 10^8$ m s^{-1}; 1 u = 1,660 54·10^{-27} kg.
Sol:ii) $\Delta E = 4{,}138 \cdot 10^{-11}\ J\ núcleo^{-1}$

12. Considere la reacción nuclear: ${}^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{133}_{51}Sb + {}^{99}_{41}Nb + 4{}^{1}_{0}n$. Determine la energía liberada por átomo de Uranio. ¿Qué cantidad de ${}^{235}_{92}U$ se necesita para producir $10^6\ kW\ h$?
Datos: $m\left({}^{235}_{92}U\right) = 235{,}128\ u$; $m\left({}^{133}_{51}Sb\right) = 132{,}942\ u$; $m({}^{99}_{41}Nb) = 98{,}932\ u$; $m({}^{1}_{0}n) = 1{,}0086\ u$; $u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ kg$; $c = 3 \cdot 10^8\ m\ s^{-1}$; $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$
Sol: $E = 3{,}43 \cdot 10^{-11}\ J$; $m\left({}^{235}_{92}U\right) = 41{,}21\ g$

5.3. Fusión nuclear

Cuando dos núcleos ligeros se combinan para formar un núcleo más pesado, el proceso se llama fusión nuclear. Puesto que la masa del núcleo final es menor que la suma de las masas de los núcleos originales, hay una pérdida de masa, acompañada por la liberación de energía.

Todas las estrellas generan su energía a través de *procesos de fusión.*

La energía producida por fusión aumenta la presión dentro de la estrella y evita su colapso debido a la gravedad.

Antes de que las reacciones de fusión en la estrella puedan sostener sus necesidades de energía, se deben satisfacer *dos condiciones*.

- **Primera**: la *temperatura debe ser suficientemente alta* (alrededor de 10^7 K para el hidrógeno) para permitir que la energía cinética de los núcleos de hidrógeno con carga positiva supere su repulsión coulombiana mutua mientras chocan.

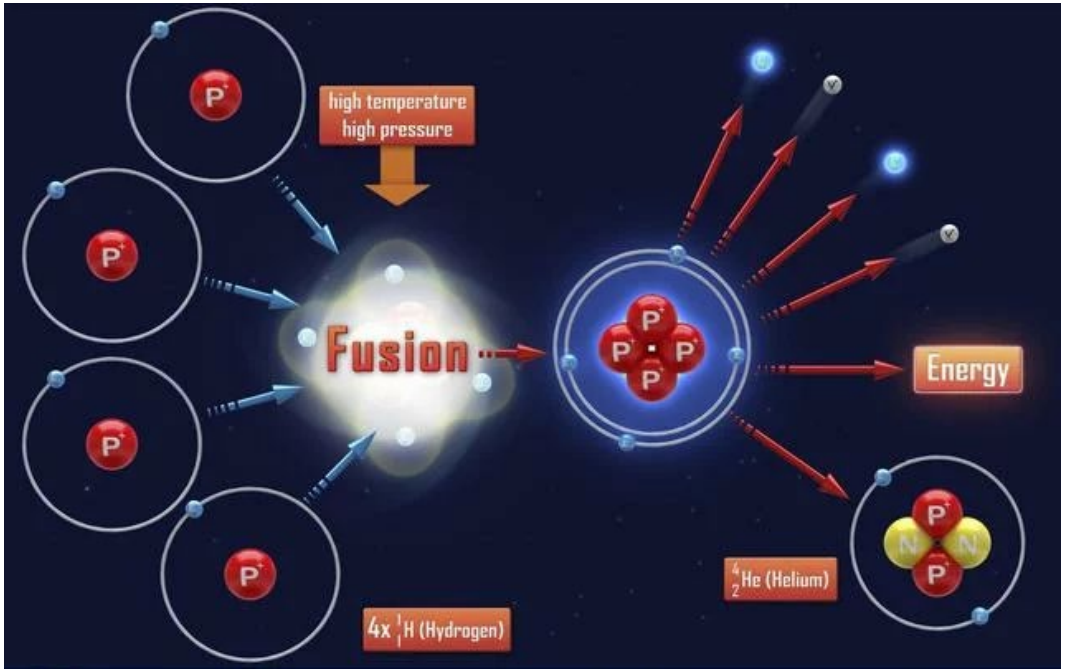
- **Segunda**: la *densidad de núcleos debe ser suficientemente alta* para asegurar una alta proporción de colisiones.

5.3. Fusión nuclear

El **ciclo protón-protón** es una serie de tres reacciones nucleares que se cree son las etapas en la liberación de energía en el Sol y otras estrellas ricas en hidrógeno.

Una visión global del ciclo protón-protón es que cuatro protones se combinan para formar una partícula alfa y dos positrones, con la *liberación de 25 MeV* de energía en el proceso.

$$4\,{}_1^1H \rightarrow {}_2^4He + 2\,{}_{+1}^{0}e + 2\nu_e + \gamma$$



5.3. Fusión nuclear

Reactores nucleares de fusión nuclear

Los **reactores de fusión nuclear** son proyectos experimentales viables, que se hallan en proceso de diseño y realización. Se utilizarán para la generación de energía a partir de la *fusión termonuclear* de *iones confinados* mediante una implosión o por campos magnéticos.

Con el fin de conseguir la fusión nuclear y superar la barrera electrostática-térmica funcional, el interior del reactor ha de ser calentado entre **1,500 y 2,500 millones de grados** hasta que el combustible alcance el *estado de plasma/alterado*. A esta temperatura es más fácil separar los electrones del núcleo y que éste se aproxime a otro venciendo las fuerzas de atracción electrostáticas-nucleares.

Existen varias clases de *confinamiento*:

- **Confinamiento magnético**: Se basa en creación de campos magnéticos, con el objetivo de confinar y guiar el gas plasmático ionizado en el interior del reactor.
- **Confinamiento inercial**: Se basa en generación rápida de energía antes que el plasma pueda expandirse.
- **Confinamiento por pinzamiento**: Consiste en comprimir el plasma en movimiento guiado por campos magnéticos opuestos: uno generado por el propio plasma en movimiento y el otro generado externamente.

Ejercicio resuelto 6

En algunas estrellas se producen reacciones de fusión del ciclo de carbono. En la etapa final un protón se une con el núcleo ${}^{15}_{7}N$ para dar ${}^{12}_{6}C$ y un núcleo de helio. i) Escribe la reacción nuclear correspondiente; ii) ¿Cuánta energía se genera al formar 10 kg de ${}^{12}_{6}C$?
Datos: $m({}^{1}_{1}H) = 1{,}007\ 825\ u$; $m({}^{15}_{7}N) = 15{,}000\ 108\ u$; $m({}^{12}_{6}C) = 12{,}000\ 000\ u$; $m({}^{4}_{2}He) = 4{,}002\ 603\ u$; $1\ u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ kg$; $c = 3 \cdot 10^{8}\ m\ s^{-1}$

i) Para completar la reacción hay que tener en cuenta que deben conservarse tanto el número de nucleones como la carga eléctrica. Por tanto:

$$ {}^{15}_{7}N + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{12}_{6}C $$

ii) Al formar un núcleo de ${}^{12}_{6}C$ se genera cierta energía que podemos calcular realizando el balance energético en la reacción nuclear anterior. Así:

$$ \Delta m = m({}^{15}_{7}N) + m({}^{1}_{1}H) - m({}^{4}_{2}He) - m({}^{12}_{6}C) = 5{,}333 \cdot 10^{-3}\ u $$

Entonces la energía generada durante la formación de un núcleo de ^{12}C es:

$$ \Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 5{,}333 \cdot 10^{-3}\ u \cdot \frac{1{,}66 \cdot 10^{-27}\ kg}{u} \cdot (3 \cdot 10^{8}\ m\ s^{-1})^2 = \mathbf{8{,}155 \cdot 10^{-13}\ J/átomo} $$

Como piden la energía liberada al formar 10 kg:

$$ 8{,}155 \cdot 10^{-13}\ \frac{J}{átomo} \cdot \frac{1\ átomo}{12\ u} \cdot \frac{1\ u}{1{,}66 \cdot 10^{-27}\ kg} \cdot 10\ kg = \mathbf{4 \cdot 10^{13}\ J} $$

ACTIVIDADES

13. Imagine una central nuclear en la que se produjera energía a partir de la siguiente reacción nuclear: $4\,{}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{16}_{8}O$. Determine la energía que se produciría por cada kilogramo de helio que se fusionase.
Datos: $m({}^{16}_{8}O) = 15{,}9950\,u$; $m({}^{4}_{2}He) = 4{,}0026\,u$; $u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,kg$; $c = 3 \cdot 10^{8}\,m\,s^{-1}$
Sol: $E = 8{,}65 \cdot 10^{13}\,J\,kg^{-1}$

14. En esta reacción nuclear se liberan 11,47 MeV, ${}^{A}_{Z}Li + {}^{1}_{1}H \rightarrow 2\,{}^{4}_{2}He$. Completa los números A y Z y calcula la masa atómica del isótopo de litio.
Datos: $m({}^{1}_{1}H) = 1{,}007\,8\,u$; $m({}^{4}_{2}He) = 4{,}002\,6\,u$; $u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,kg$; $c = 3 \cdot 10^{8}\,m\,s^{-1}$
Sol: $m(Li) = 7{,}009\,7\,u$

Todas las partículas en la naturaleza están sujetas a **cuatro fuerzas fundamentales**: las fuerzas *fuerte, electromagnética, débil y gravitacional*.

Las fuerzas entre dos partículas se transportan mediante *un intercambio de cuantos* de campo. Este proceso es análogo al enlace covalente entre dos átomos creado por un intercambio o compartición de electrones. La interacción electromagnética, por ejemplo, involucra un intercambio de fotones.

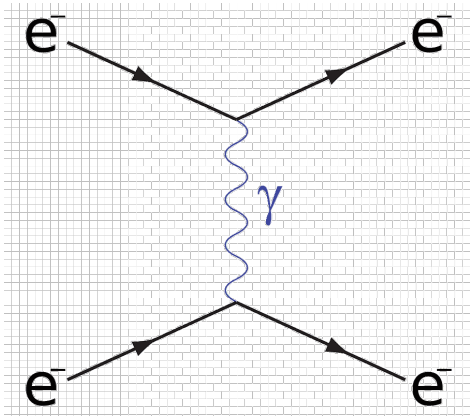
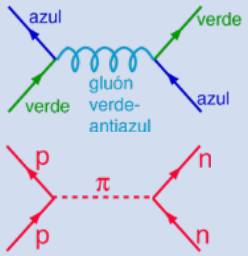
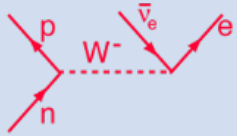


Diagrama de Feynman que representa un fotón que media la fuerza electromagnética entre dos electrones.

Fuerte	Electromagnética	Débil	Gravitatoria
La **fuerza fuerte** es responsable del firme *enlace de los quarks* para formar neutrones y protones y de la fuerza nuclear, una especie de **fuerza fuerte residual**, que *enlaza neutrones y protones* en núcleos. Es una fuerza de *muy corto alcance* y es despreciable para separaciones mayores que *aproximadamente* 10^{-15} *m* (el tamaño aproximado del núcleo).	La **fuerza electromagnética**, que es más o menos 10^{-2} *veces la intensidad de la fuerza fuerte*, es responsable del *enlace de átomos y moléculas*. Es una fuerza de *largo alcance* que disminuye en intensidad como el cuadrado inverso de la separación entre partículas en interacción.	La **fuerza débil** es una fuerza nuclear de *corto alcance* que se muestra en la inestabilidad de ciertos núcleos. Está involucrada en el *mecanismo de decaimiento beta* y tiene una intensidad de sólo 10^{-6} *veces la fuerza fuerte.*	La **fuerza gravitatoria** es una fuerza de *largo alcance*, con una intensidad de sólo aproximadamente 10^{-43} *veces la de la fuerza fuerte*. Aunque esta interacción conocida es la fuerza que *mantiene unidos los planetas, estrellas y galaxias*, su efecto sobre las partículas elementales es despreciable. La fuerza gravitacional es con mucho *la más débil de todas las fuerzas fundamentales*.
La partícula mediadora de la fuerza fuerte es el **gluon.** Para la fuerza fuerte residual el **pion.**	La partícula mediadora es el **fotón**.	La partícula mediadora son los **bosones W y Z**.	Se cree que la partícula mediadora es el **gravitón**.
			?

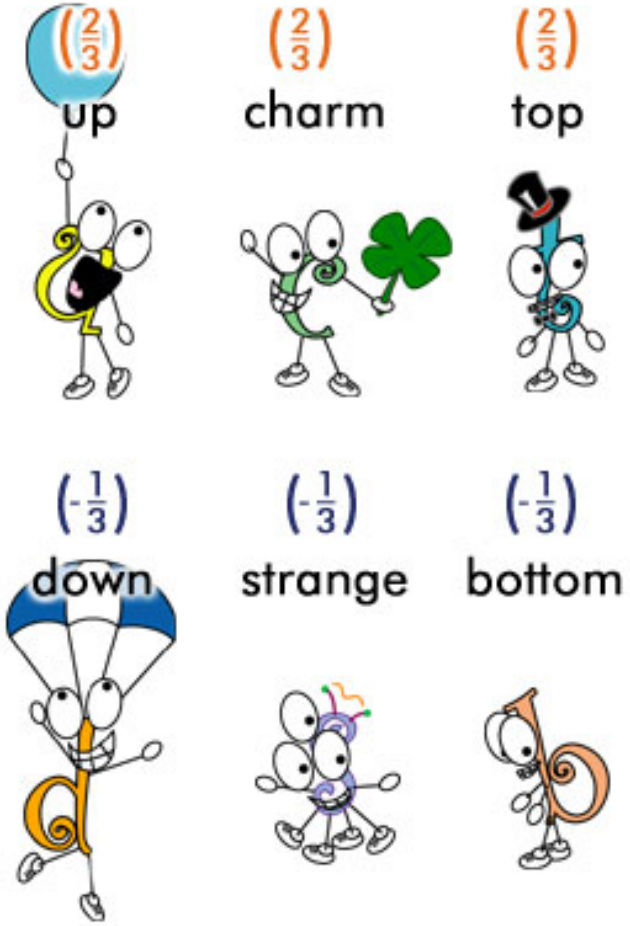
7.1. Las partículas

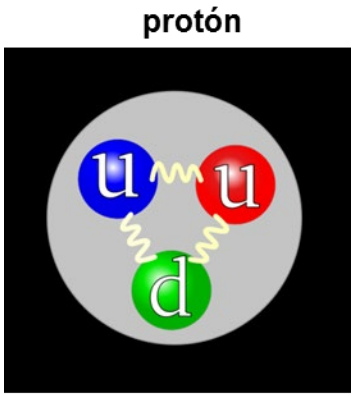
Una **partícula elemental** es aquella que no tiene estructura interna, es decir, si en su interior no hay partículas más simples.

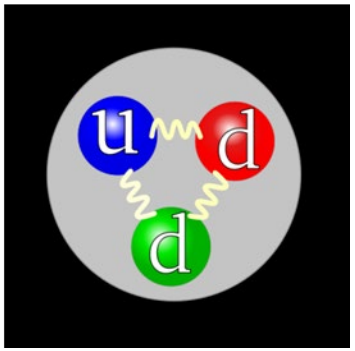
- En la década de 1930 se conocían: el **electrón**, el **protón** y el **neutrón** junto con el **fotón** (sin carga ni masa) que introdujo *Einstein* para explicar el efecto fotoeléctrico.
- En 1931 *Dirac* predijo la existencia del **positrón** (electrón con carga positiva), confirmado al año siguiente por Anderson.
- Se generalizó la idea de que toda partícula tiene su correspondiente **antipartícula**. Al conjunto de antipartículas se lo denomina **antimateria**.
- *Pauli* postula la existencia del **neutrino** (sin carga ni masa) asociado al electrón con el fin de asegurar las leyes de conservación en la desintegración beta (se confirmó en 1956).
- En 1953 Gell-Mann y *Zweig* postularon la existencia de los **quarks** (partículas elementales que componen los nucleones).
- Existen en los quarks seis "*sabores*". Los dos primeros componen la materia conocida: **up** (u) y **dowm** (d). Los otros cuatro se relacionan con la desintegración de ciertas partículas: **strange** (s), **charm** (c), **bottom** (b) y **top** (t).

7.1. Las partículas

De los seis quarks, únicamente los **u** y los **d** son constituyentes de la materia ordinaria.



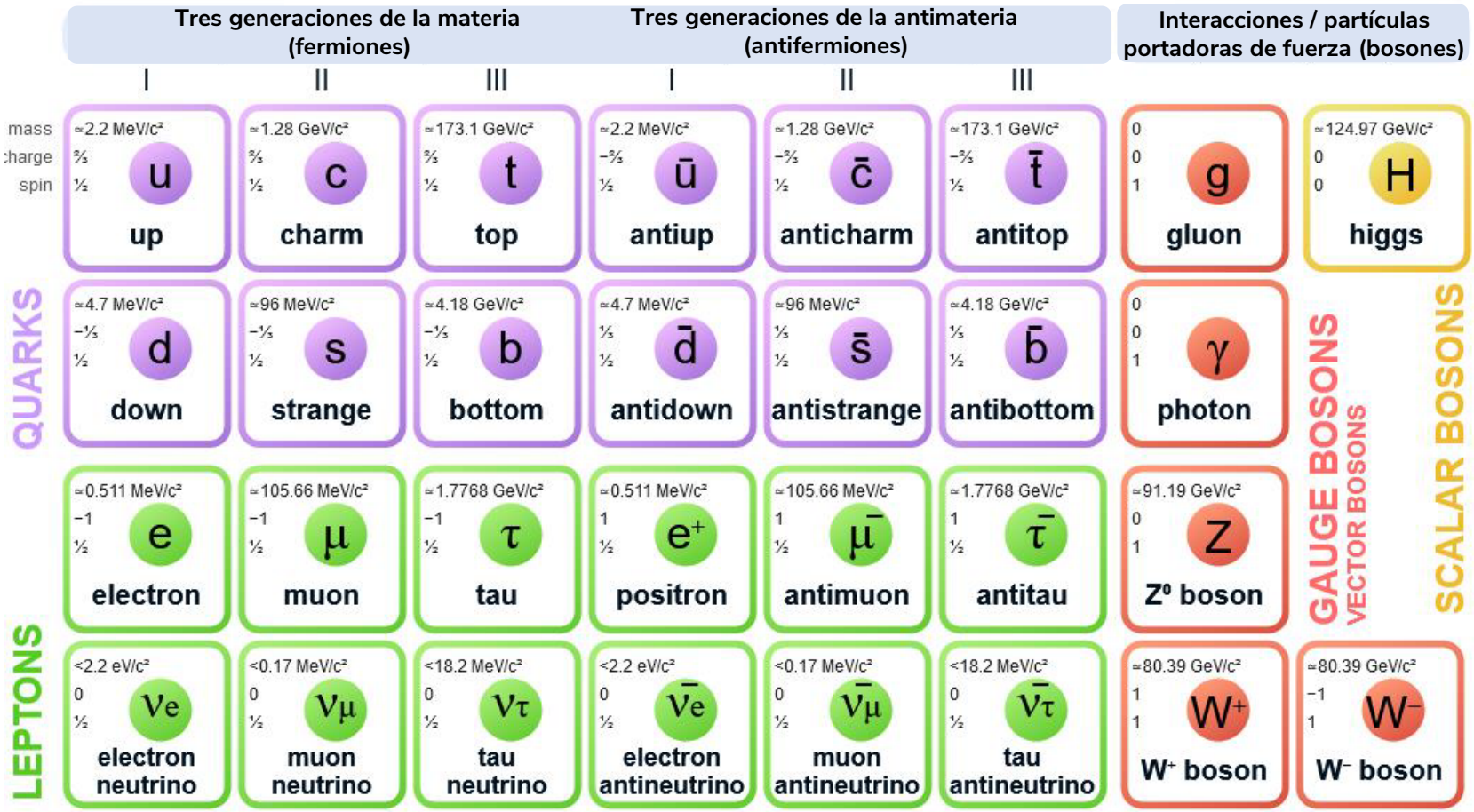




7.1. Las partículas

Clasificación de la materia

Modelo estándar de partículas elementales



7.1. Las partículas

El mecanismo de Higgs

El mecanismo de Higgs da masa a todas las partículas elementales, pero no se dice nada acerca de la masa del bosón de Higgs.

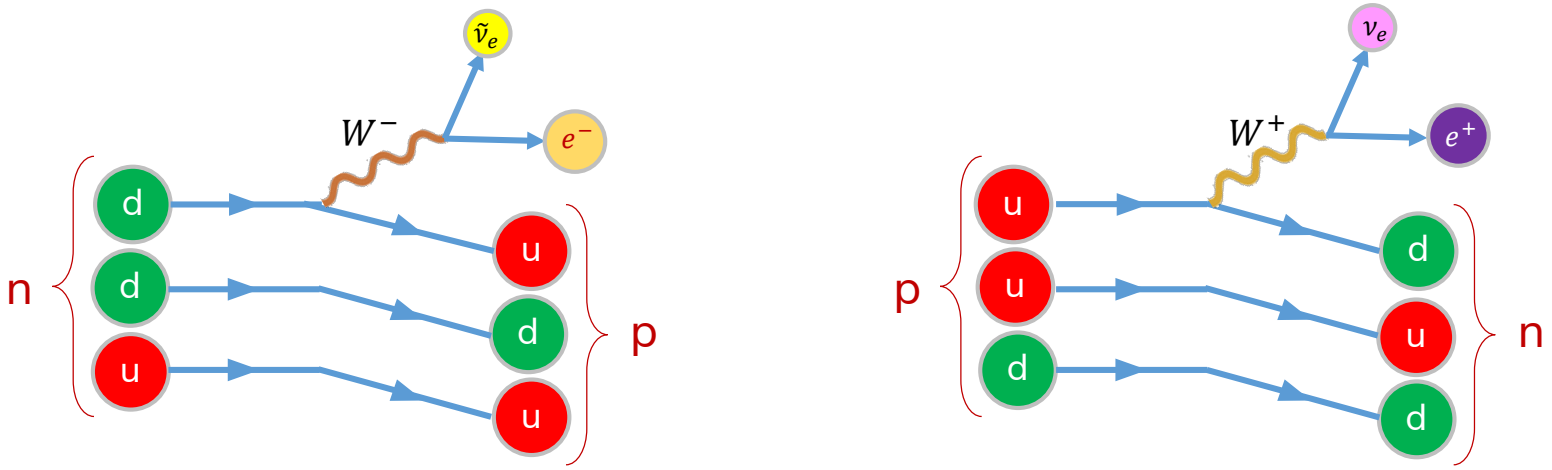
David Miller (CERN), propuso la siguiente explicación sencilla:

En una reunión de físicos, los huéspedes llenan toda la habitación de manera uniforme, como el *campo de Higgs* llena todo el espacio. *Einstein* que simboliza una *partícula elemental libre* de sus movimientos, su *masa inercial es igual a cero*.

A medida que avanza en la habitación, personas se agrupan alrededor de ello y es difícil de empujarlo, *adquiere una masa de inercia*.

7.2. La interacción débil

La interacción débil es responsable del *decaimiento* de los quarks *c, s, b y t* en los quarks *u* y *d* más ligeros y más estables, así como del decaimiento de los masivos leptones m y t en electrones (más ligeros).

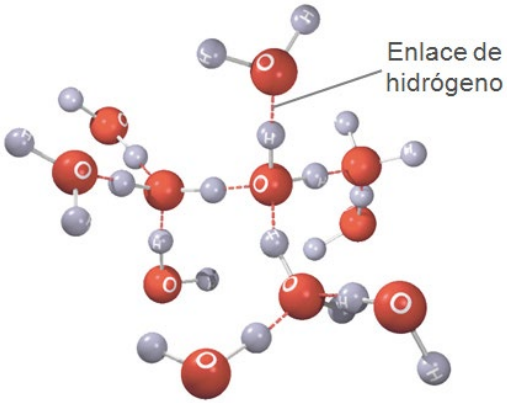


La interacción débil es muy importante porque gobierna la estabilidad de las partículas básicas de la materia.

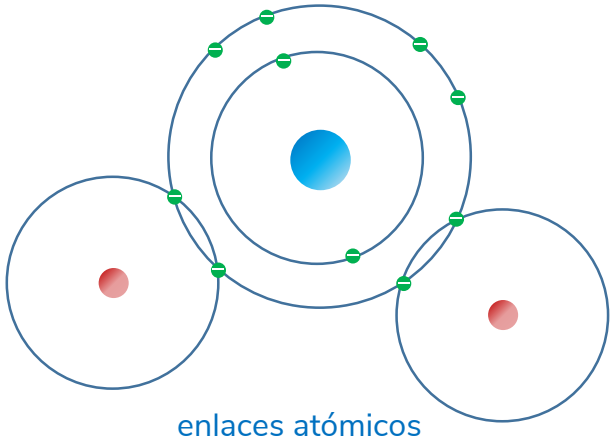
La **teoría electrodébil** unifica las interacciones electromagnética y débil. Esta teoría *postula* que las interacciones débil y electromagnética tienen la misma intensidad a energías de partícula muy altas y son diferentes manifestaciones de una sola interacción electrodébil unificadora.

7.3. De la materia a los quarks

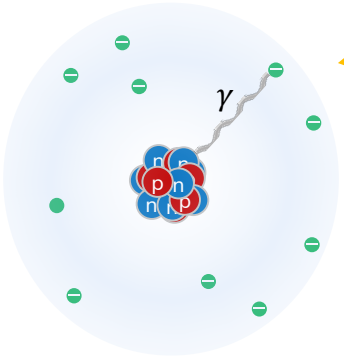
materia



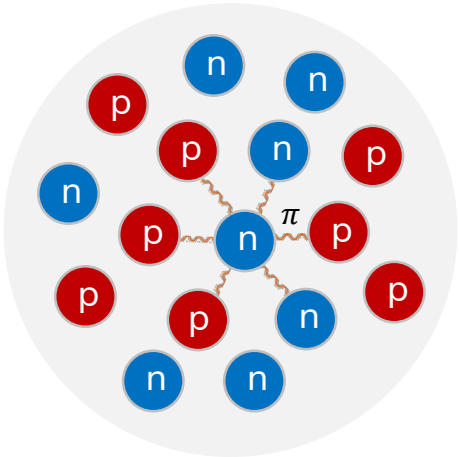
moléculas y enlaces moleculares



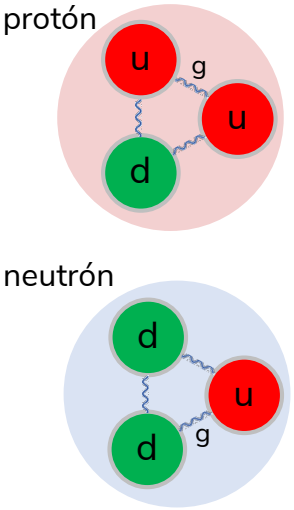
enlaces atómicos



átomo e **interacción electromagnética** (fotón)



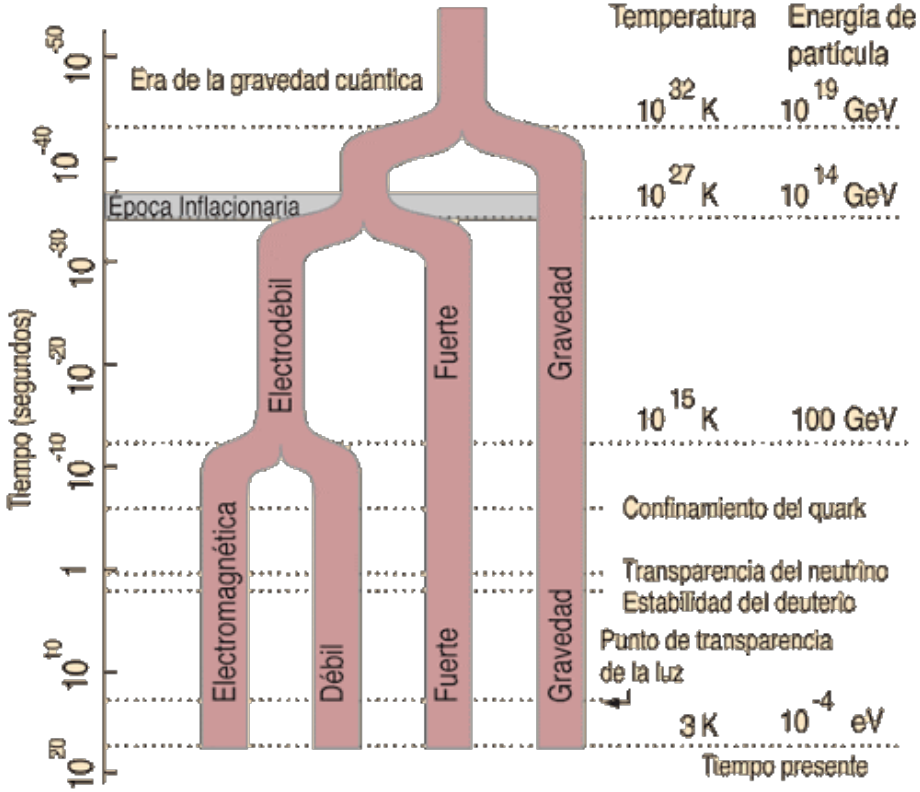
núcleo e **interacción fuerte residual** solo entre los más próximos (piones)



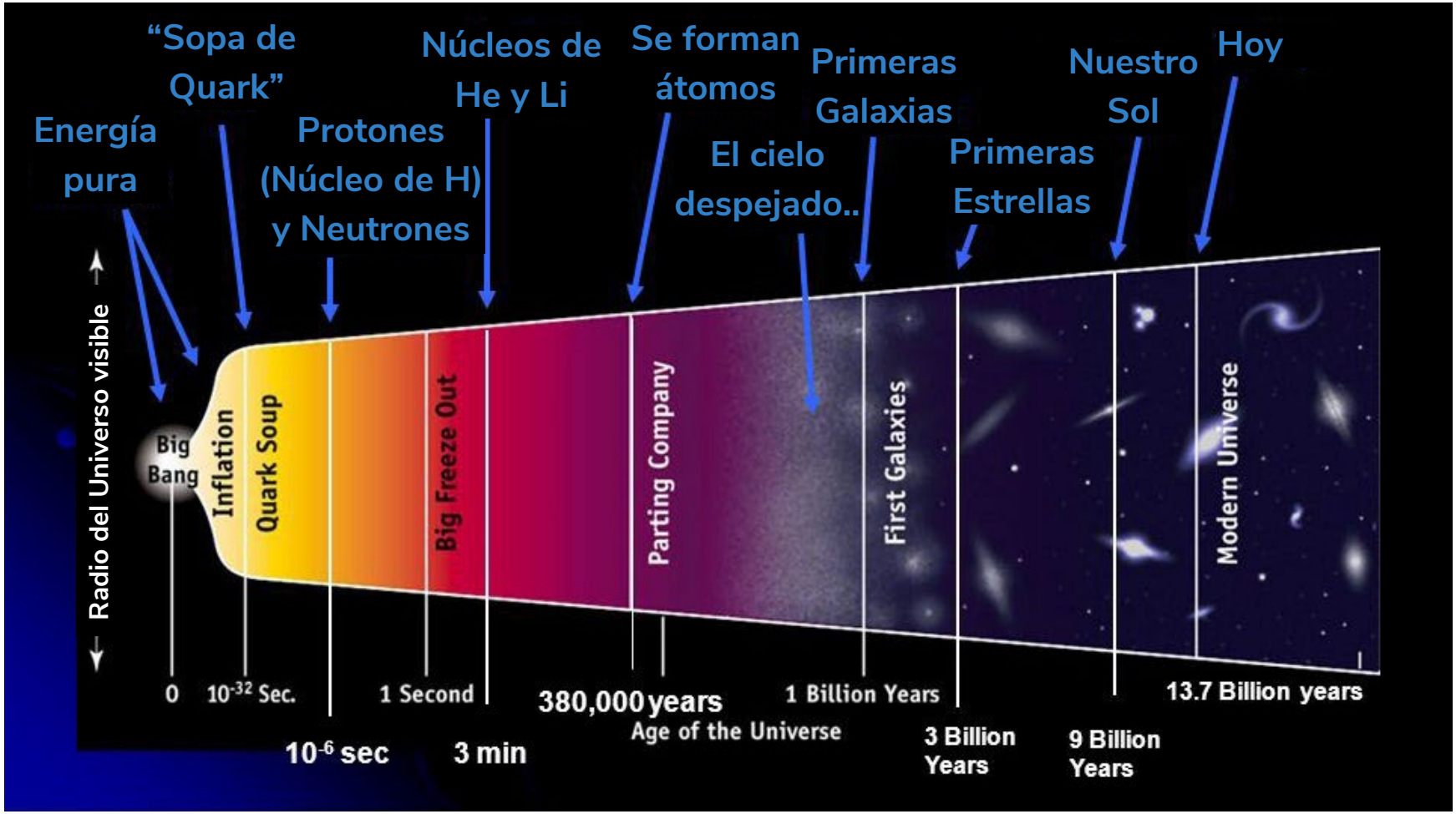
nucleones e **interacción fuerte** entre quarks (gluon)

8.1. Línea del tiempo del Big Bang

De acuerdo con la teoría del *Big Bang*, el Universo explotó a partir de una singularidad infinitamente densa hace aproximadamente 15 mil a 20 mil millones de años. Los primeros minutos después del Big Bang vieron tales extremos de energía que se cree que las *cuatro interacciones de la física estaban unificadas* y toda la materia estaba contenida en una "sopa de quarks" indiferenciada.



8.1. Línea del tiempo del Big Bang

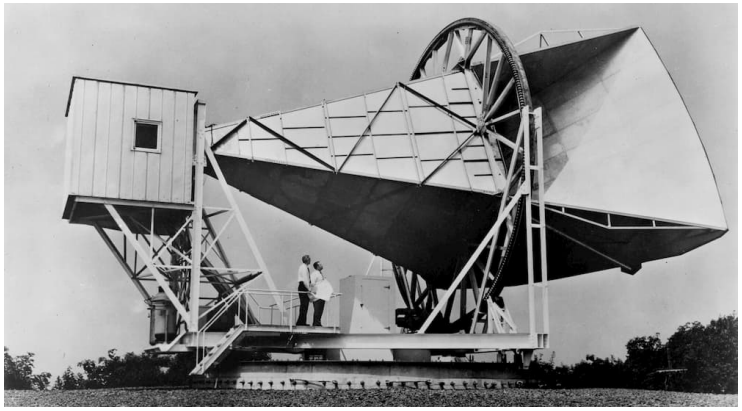


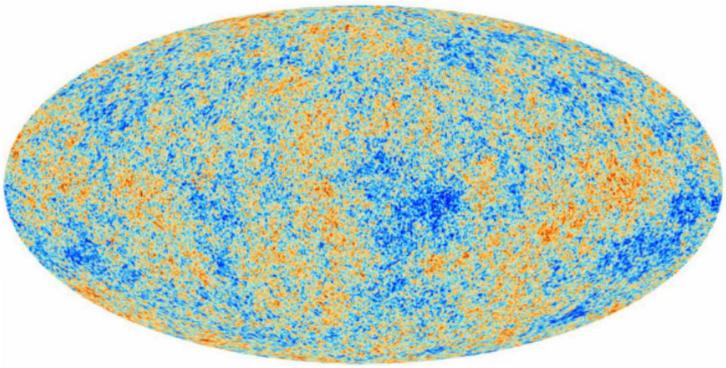
8.1. Línea del tiempo del Big Bang

Observación de la radiación de fondo

En 1965, Arno A. Penzias (n. 1933) y Robert W. Wilson (n. 1936), de los Laboratorios Bell, hicieron un sorprendente descubrimiento mientras probaban un sensible receptor de microondas.

Una molesta señal que producía un débil siseo de fondo interfería con sus experimentos de satélites de comunicaciones. A pesar de todos sus esfuerzos, la señal permanecía. A final de cuentas, se volvió claro que estaban observando *radiación de microondas de fondo* (a una longitud de onda de 7.35 cm) que representa el "brillo" *remanente del Big Bang*.





Radiación de fondo visto por satélite Planck (2013)
Las regiones azuladas y rojizas representan regiones en el cielo con temperaturas menores o superiores al promedio.

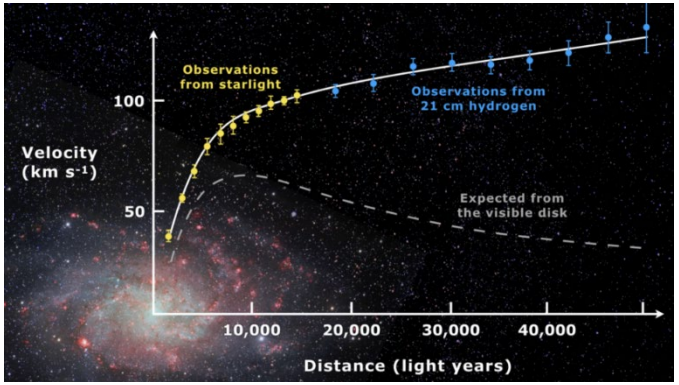
8.2. Materia y energía oscuras

Materia oscura

Cuando se miden las velocidades de las estrellas de nuestra galaxia, se encuentra que están viajando demasiado rápido como para mantenerse unidas por la gravedad de la Vía Láctea si la masa de la galaxia es debida a que se encuentra en estrellas luminosas.

Una teoría se han propuesto para explicar el comportamiento de las estrellas moviéndose demasiado rápido: o hay una nueva forma de **materia oscura** que no ha sido observada directamente, o la ley de la gravedad debe ser más fuerte que el inverso de la distancia al cuadrado. A partir del perfil de velocidad de las estrellas, *90% de la materia de la galaxia estaría compuesto por la materia oscura hipotética*.

Entre los *candidatos a materia oscura* están los *neutrinos*, que debido a "la oscilación de neutrinos", la espontánea evolución de un tipo de neutrino en otro, ahora se piensa que tienen masa.



La curva de rotación observada de la galaxia espiral Messier 33 (los puntos amarillos y azules con sus bandas de error), y una curva formada basada en la teoría Newtoniana debido a la distribución de la materia visible (línea gris). Las diferencias entre las dos curvas señalan el problema de la masa perdida.

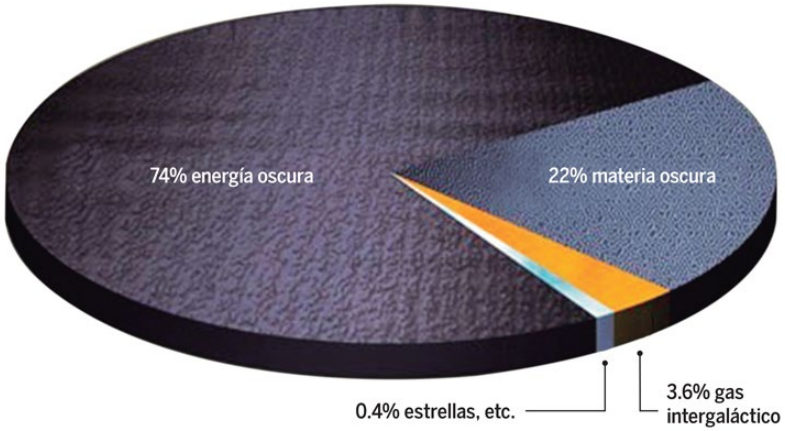
8.2. Materia y energía oscuras

Energía oscura

En 1998, las observaciones realizadas por dos grupos de astrónomos, uno liderado por Brian Schmidt y Adam Riess y el otro por Saul Perlmutter, demostraron que *el Universo se expande y acelera al mismo tiempo*.

La expansión acelerada no puede ser causada por la materia normal, ni por la materia oscura, ya que ejercen una fuerza gravitacional de atracción. En su lugar, se cree que un nuevo tipo de materia, llamada **energía oscura**, ejerce una fuerza repulsiva que hace que el Universo se expanda más rápidamente de lo predicho por la teoría de la relatividad general de Einstein.

Los átomos normales, el tipo del que estamos hechos, sólo representan alrededor de 4% del Universo, mientras que aproximadamente 22% es materia oscura y 74% es energía oscura.



Proporciones de la teoría de la materia, la materia y energía oscuras.

8.3. Problemas y perspectivas

La comprensión de la física a distancias cortas y grandes está lejos de ser completa.

Los físicos de partículas enfrentan muchas preguntas sin responder:

- ¿Cuál es el destino del Universo?
- ¿Por qué hay tan poca antimateria en el Universo?
- ¿Los neutrinos tienen una masa pequeña y, si es así, cuánto aportan a la "materia oscura" que mantiene unido gravitacionalmente al Universo?
- ¿Cómo se pueden entender las más recientes mediciones astronómicas, que muestran que la expansión del Universo es acelerada y que acaso exista un tipo de "fuerza antigravedad", o energía oscura, que actúa entre galaxias enormemente separadas?
- ¿Es posible unificar las teorías fuerte y electrodébil en una forma lógica y consistente?
- ¿Por qué los quarks y los leptones forman tres familias similares pero distintas?
- ¿Los muones son lo mismo que los electrones (aparte de sus masas diferentes), o tienen sutiles diferencias que no se han detectado?
- ¿Por qué algunas partículas tienen carga y otras son neutras?
- ¿Por qué los quarks portan una carga fraccional?
- ¿Qué determina las masas de las partículas elementales?
- ¿Los leptones y los quarks tienen una subestructura?

...

Información de Contacto

Rafael Artacho Cañadas
Dpto. de Física y Química
I.E.S. Padre Manjón

Gonzalo Gallas, s/n
18003 · Granada

artacho1955@gmail.com