FÍSICA

2º Bachillerato

Física Nuclear

Prof. Jorge Rojo Carrascosa

Índice general

1. FÍSICA NUCLEAR **2**
1.1. EL NÚCLEO ATÓMICO 2
1.1.1. ESTABILIDAD DEL NÚCLEO ATÓMICO 3
1.1.1.1. MODELO NUCLEAR DE LA GOTA LÍQUIDA . . 5
1.1.1.2. MODELO NUCLEAR DE CAPAS 5
1.2. RADIACTIVIDAD 6
1.2.1. LEYES DEL DESPLAZAMIENTO RADIACTIVO 7
1.2.2. CINÉTICA DE LA DESINTEGRACIÓN RADIACTIVA . . . 8
1.3. REACCIONES NUCLEARES 9
1.3.1. FISIÓN NUCLEAR 10
1.3.2. FUSIÓN NUCLEAR 11
1.4. APLICACIONES 11
1.5. ANEXOS 13
1.5.1. EL MODELO ESTANDAR 13
1.5.1.1. PARTÍCULAS SUBATÓMICAS 13
1.5.1.2. PARTÍCULAS FUNDAMENTALES 15
1.5.2. COSMOLOGÍA 17
1.6. PROBLEMAS RESUELTOS 21

Capítulo 1

FÍSICA NUCLEAR

La comprensión del núcleo atómico ha traido grandes hazañas en la investigación, en el conocimiento y en el desarrollo social y cultural de la humanidad, sin embargo, paralelamente a su desarrollo ha surgido una vertiente cataclismica por el mal uso que puede hacerse de esta fuente de energía.

La primera mitad del siglo XX trajo consigo impensables avances en la física del núcleo, investigación básica, conocimiento de la materia y del propio Universo, transformaciones de elementos, reactores nucleares,. . . , pero la malograda bomba nuclear desató lo peor de la humanidad y aún hoy, todavia suenan los ecos del aquel doloroso despertar.

1.1. EL NÚCLEO ATÓMICO

El primer *modelo atómico* fue propuesto por *Thomson*, en él, el átomo estaba constituido por una distribución continua de cargas positivas y negativas, siendo las positivas las que tendrían mayor masa dentro del átomo y como consecuencia, mayor volumen. En este *plum-pudding* las cargas positivas estarían repartidas por todo el átomo y las negativas se encontrarían en unas posiciones fijas pero en número suficiente para que el conjunto resultara neutro. De esta forma este modelo explicaba la formación de iones positivos o negativos, la electricidad estática y la corriente eléctrica.

Rutherford, comprobando la validez del modelo de Thomson bombardeando con partículas α procedentes del Radio una lamina de Au, da una nueva interpretación para el átomo. En el *modelo nuclear de Rutherford* la totalidad de la carga positiva se encontraba en un núcleo central y los electrones giraban alrededor de él para no caer sobre él por atracción eléctrica. Estas partículas positivas eran los protones,

(número atómico, **Z**), cada uno de ellos con carga eléctrica igual a la de los electrones pero positiva, $+1,6 \cdot 10^{-19}\ C$. Además, Rutherford postuló la existencia de un nuevo tipo de partículas en el núcleo que fueran neutras ya que los calculos de dispersión que realizó mostraban un nucleo con mayor masa que la que ofrecian los protones.

En 1932, Chadwick descubrió los neutrones (**N**) cuya masa era muy parecida al del protón pero que, como predijo Rutherdford, no tenian carga eléctrica.

Las partículas que forman el núcleo se denominan **nucleones** y el número total de nucleones existentes en el átomo se denomina **número másico**, **A**.

$$A = Z + N$$

Cualquier **núclido** se representa con el simbolo químico correspondiente y con los valores de los nucleones correspondientes que presenta. Se denominan **isótopos** a atomos de un mismo elemento pero con diferente número másico, es decir, con distinto número de neutrones.

${}^{A}_{Z}X$	${}^{1}_{1}H$	${}^{2}_{1}H$	${}^{3}_{1}H$
Núclido	*Protio*	*Deuterio*	*Tritio*

El núcleo atómico tiene una forma esférica cuyo radio se ha comprobado, mediante medidas de dispersión con partículas alfa, que es proporcional a la cantidad de núcleones que contiene. Al contener casi toda la masa del átomo en una región muy pequeña, casi infinitesimal, su densidad es muy elevada. Para hacernos una idea, el núcleo del átomo de carbono-12 tiene una masa de $1,993 \cdot 10^{-26}\ kg$, un volumen de $5,024 \cdot 10^{-44}\ m^3$ y por tanto, una densidad abrumadora, $3,967 \cdot 10^{17}\ kgm^{-3}$.

1.1.1. ESTABILIDAD DEL NÚCLEO ATÓMICO

Puesto que dentro del núcleo aparecen cargas positivas, éstas, segun la electrostática clásica deberían repelerse. Sin embargo, esto no ocurre como consecuencia de la **fuerza nuclear fuerte**. Esta interacción actúa a distancias de femtómetros y mantiene unidos a los protones y los neutrones dentro del núcleo. En el estudio de los fuerzas nucleares no se tiene en cuenta la interacción gravitatoria puesto que es del orde de 10^{36} veces más pequeña que la nuclear fuerte.

Además de la interacción nuclear fuerte existe la **interacción nuclear débil**, sin embargo está no es exclusiva del núcleo atómico, puede actuar fuera de él en partículas parecidas al electrón, es la responsable de la desintegración β y es fundamental en la formación de los elementos químicos más pesados.

La interacción nuclear fuerte es **atractiva** para distancias del orden del tamaño de los nucleones pero repulsivas para distancias menores, se vuelven nulas a distancias superiores a 10^{-15} m. Además de ser una fuerza de muy corto alcance son **saturadas**, es decir, cada nucleón del núcleo está ligado a un número determinado de nucleones.

El fisico japones H. Yukawa, estudiando la estabilidad de los núcleos descubrió que la fuerza nuclear fuerte se debe al intercambio de una partícula subatómica denóminada **mesón**, más concretamente un **pión** (π). Posteriormente se observó que los mesones no son partículas fundamentales, si no que éstas se encuentran formadas por quarks. Para ver una descripción más detallada del zoo de particulas visitar el anexo correspondiente al modelo estandar, 1.5.1

El estudio de los núcleos atómicos mediante los espectrógrafos de masas reveló que éstos tenían una masa menor que la suma de los nucleones por separado que formaban ese núcleo. Esto es lo que se conoce como **defecto de masa** y se puede calcular facilmente:

$$\boxed{\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M}$$

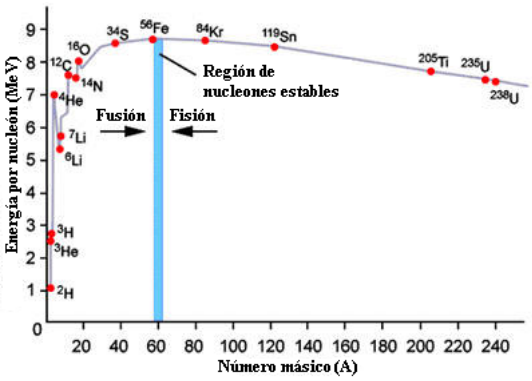
Donde M es la masa del núcleo, m_n la masa del neutrón y m_p la masa del protón.

La **energía de enlace o de ligadura del núcleo**, ΔE, es la energía que se libera al formarse un núcleo a partir de los nucleones que lo constituyen, se corresponde con la energía que corresponde al defecto de masa y viene dada por la ecuación de Einstein.

$$\boxed{\Delta E = \Delta mc^2}$$

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

Cuanto mayor sea la energía de enlace por nucleón más estable será el núcleo.



Analizando la gráfica observamos dos consecuencias, el núcleo más estable es el ^{56}Fe y a cada lado de él se producen dos reacciones nucleares antagonistas, la **fusión nuclear** y la **fisión nuclear**.

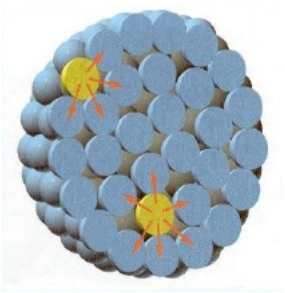
La liberación de energía es mayor al fusionarse dos núcleos ligeros que al dividirse

un núcleo pesado. Las reacciones nucleares que se generan en las estrellas y que producen tanta luz y calor son de fusión.

En el estudio del núcleo atómico se siguen dos modelos complementarios que hacen más comprensible el sistema cuántico existente:

1.1.1.1. MODELO NUCLEAR DE LA GOTA LÍQUIDA

Desarrollado por Niels Bohr, postula que cada nucleón interacciona con determinado número de nucleones de su entorno, no con el total de nucleones del átomo.



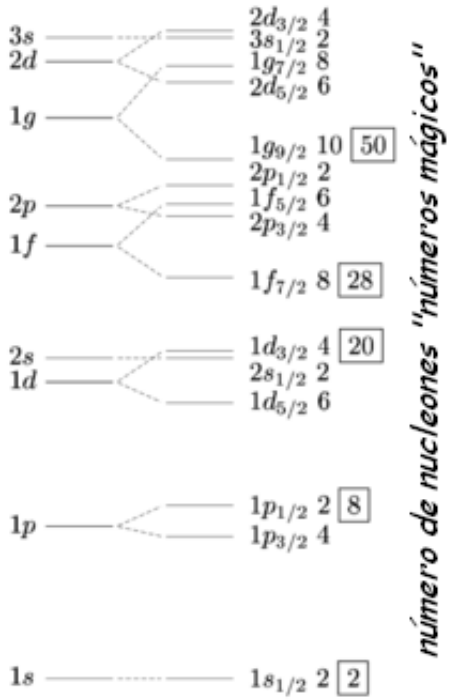
Al igual que en una gota de agua, el movimiento de sus partículas se realiza al azar, sin embargo, para aquellos nucleones que se encuentran en la superficie y que no compensan sus fuerzas sobre el vecindario, aparecen las fuerzas de cohesión o de tensión superficial que hacen al núcleo que tenga forma esférica.

1.1.1.2. MODELO NUCLEAR DE CAPAS

En este modelo coloca a los nucleones tal y como lo hacen los electrones en el átomo. Los núcleos que presentan capas cerradas son más estables, así, aquellos núcleos con 2,8,20,28,50,... nucleones son más estables y abundantes en la naturaleza.

Este modelo fue propuesto por Marie Mayer y, a diferencia del de la gota líquida, postula que cada nucleón interacciona con un campo de fuerzas creado por el resto de nucleones.

Los nucleones se sitúan en capas de energía creciente, siendo las transiciones entre cada capa de energía muy grande, lo que da lugar a emisión de rayos γ.



1.2. RADIACTIVIDAD

En 1896, *Henri Becquerel* descubrió la radiactividad al estudiar la luminiscencia de una sal de uranio. Al igual que los Rayos X descubiertos en 1895 por *Röntgen*, la radiación emitida por este mineral era capaz de impresionar placas fotograficas que no estaban expuestas a la luz solar. En su estudio, Becquerel descubrió que parte de esta radiación estaba compuesta por electrones provinientes del Uranio.

Dos años más tarde, *Pierre y Maire Curie* descurieron que está propiedad no sólo era una característica del uranio y de sus sales si no que existían otras sustancias, como el Radio y el Polonio, que también eran capaces de velar placas fotográficas, ionizar gases o atravesar cuerpos. A este fenómeno le dieron el nombre de **radiactividad**.

En sus investigaciones, además de comprobar que la radiactividad era proporcional a la cantidad de sustancia radiactiva, también pudieron comprobar el efecto peligroso que tenía sobre los seres vivos. Estaban ante un fenómeno nuevo que requería replantear los modelos de la materia de la física clásica.

Así pués, la ***radiactividad*** *quedo definida como aquella propiedad intrínseca que presentan algunos átomos, denominadas radiactivos, capaces de ionizar el aire, provocar la fluorescencia de otros materiales, impresionar placas fotográficas y penetrar en cuerpos opacos mediante la emisión de sus radiaciones al desintegrarse sus núcleos.* En los primeros años del siglo XX, *Rutherford*, utilizó la radiactividad para bombardear el núcleo atómico y presentar un nuevo modelo atómico. En estas investigaciones, halló que la radiactividad estaba compuesta por tres tipos de radiaciones, la radiación α, la radiación β y los rayos γ.

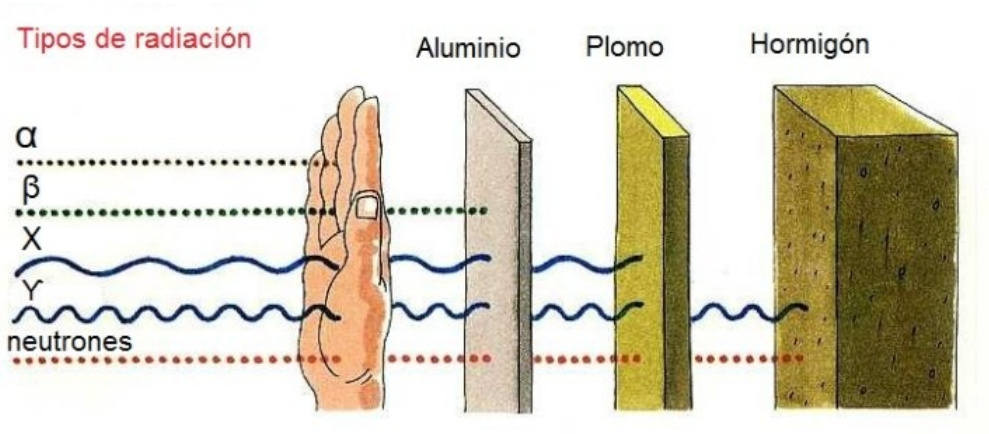
- **Radiación α**: Son núcleos de Helio que han perdido sus dos electrones ($^4_2$He), tienen escaso poder penetrante, se frenan por pocos centimetros de aire pero son muy ionizantes. Las energías de las partículas oscilan por debajo de los 10 MeV.

- **Radiación β**: Son electrones o positrones que provienen del núcleo al desintegrarse un neutrón o un protón respectivamente. Tienen mayor poder de penetración que la radiación α, se necesitan varios metros de aire para frenarlos. Debido a su poca masa, son menos ionizantes que los rayos α.

  El estudio de está radiación supuso el descubrimiento de los neutrinos, más concretamente de un antineutrino electrónico.

- **Radiación γ**: Es una radiacción electromagnética muy intensa, es decir, fotones de frecuencia muy alta, mayor que la de los Rayos X. Se produce por

transiciones de nucleones presentes en estados excitados a su estado fundamental. No transportan ni masa ni carga eléctrica, tienen un gran poder penetrante y se necesita paredes de hormigón o plomo para frenarla.



1.2.1. LEYES DEL DESPLAZAMIENTO RADIACTIVO

Estas leyes confieren el desplazamiento radiactivo de los átomos al sufrir uno de los tres tipos de radiación. Se conocen como **Leyes de Soddy o Leyes de desplazamiento radiactivo** pero fueron enunciadas en el mismo año (1913) independientemente por el radioquímico *F. Soddy* y el físico *K. Fajans*.

De igual forma que en la reacciones químicas existen principios de conservación de carga y masa, **en la reacciones nucleares hay que tener en cuenta que se conserva el número atómico y el número másico**.

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

$$^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

  En las desintegraciones α se produce una estabilización a los núcleos de más de 210 nucleones.

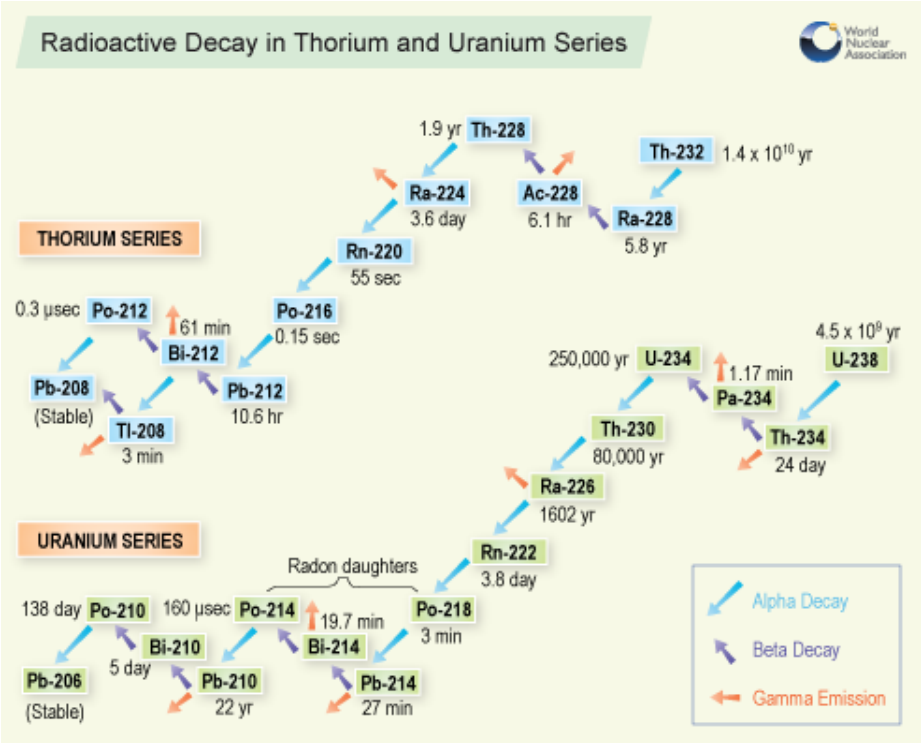
- **2ª Ley de soddy**: Cuando un núcleo X emite una partícula β, el elemento resultante se desplaza un lugar a la derecha del sistema periódico, es decir, se transforma en otro núcleo Y con un número atómico mayor e igual número másico.

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

- **3ª Ley de soddy**: En este caso el núcleo se desexcita energéticamente pero no sufre ninguna transformación.

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

Se llaman **series o cadenas radiactivas** al conjunto de radioisótopos que se producen a partir de un núcleo inicial. Actualmente existen tres series naturales y todas ellas acaban en un isótopo estable del plomo.



1.2.2. CINÉTICA DE LA DESINTEGRACIÓN RADIACTIVA

La evolución temporal de una muestra radiactiva que va desintegrandose a lo largo del tiempo tiene un hábito exponencial negativo. Si tomamos una muestra de material radiactivo N_0 que va desintegrandose, a medida que transcurre el tiempo, el número de núcleos que irán desintegrándose disminuye. Partiendo de está premisa y puesto que el número de desintegraciones radiactivas por unidad de tiempo es directamente proporcional al de núcleos existentes, N, tenemos

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

Siendo λ la **constante radiactiva**, característica de cada radioisótopo y que se mide en s^{-1}. El signo menos indica que la desintegración de los núcleos radiactivos a lo largo del tiempo disminuye.

Integrando esta ecuación se obtiene la **ley de emisión radiactiva** que índica como varía a lo largo del tiempo desde instante inicial ($t_0 = 0\ s$) el número de núcleos que quedan por desintegrarse.

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\lambda dt \ \Rightarrow \ \boxed{N = N_0 e^{-\lambda t}}$$

Las magnitudes que hay que tener en cuenta en las desintegraciones son:

- **Actividad o velocidad de desintegración, $A = \left|\frac{dN}{dt}\right|$**: Se corresponde con el número de desintegraciones por unidad de tiempo,

  $$A = \left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda N \ \Rightarrow \ \boxed{A = A_0 e^{-\lambda t}}$$

  En el SI se mide en **becquerel (Bq)**, pero al ser una medida muy pequeña se suele utilizar el **curio, (Ci)**, donde $1\ Ci = 3,7 \cdot 10^{10}\ Bq$. $A_0 = \lambda N_0$ es la actividad inicial de la muestra.

- **Período de semidesintegración o semivida, $t_{1/2}$**: Es el tiempo que tarda la muestra radiactiva inicial en reducirse a la mitad, $N = \frac{N_0}{2}$. Introduciendo este valor en la ley de desintegración radiactiva observamos que se corresponde con una cinética de primero orden,

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

- **Vida media, τ**: Es el tiempo medio que tarda un radioisótopo en desintegrarse. Es la inversa de la constante radiactiva,

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

1.3. REACCIONES NUCLEARES

A diferencia de las reacciones químicas donde se produce una recombinación de los electrones de valencia para formar una nueva sustancia, en la reacciones nucleares intervienen nucleos atómicos y la energía que se desprende en cada una de estas

reacciones es bastante superior a la producida en un reacción química, MeV frente a los eV de una reacción química.

La primera reacción nuclear fue llevada a cabo por Ernest Rutherford en 1919 al bombardear ^{14}H con partículas alfa. Lo normal en las reacciones nucleares es bombardear un núcleo con otra partícula de menor tamaño (neutrones, partículas alfa, electrones,...). *En la recciones nucleares se conserva el número atómico y el número másico.*

$$^{14}_{7}\text{N} + ^{4}_{2}\text{He} \longrightarrow ^{17}_{8}\text{O} + ^{1}_{1}\text{H}$$
$$^{9}_{4}\text{Be} + ^{4}_{2}\text{He} \longrightarrow ^{12}_{6}\text{C} + ^{1}_{0}\text{n}$$

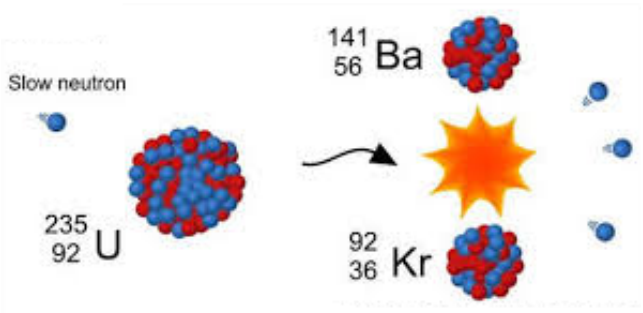
En la colisión el núcleo se excita hasta que algún nucleón puede abandonarlo. Ademas de dividirse en nuevos núcleos pueden emitirse rayos γ, mesones u otras partículas. La barrera energética que hay que superar en una colisión nuclear efectiva recibe el nombre de **barrera de Coulomb**. Ésta representa la repulsión electrostática del núcleo a la entrada de otras partículas de carga positiva, depende de las cargas de la partícula y del tipo de núcleo.

1.3.1. FISIÓN NUCLEAR

La fisión nuclear consiste en la ruptura de nucleos pesados en dos o más núcleos más ligeros denominados fragmentos.

En la fisión del Uranio-235, al excitar el núcleo con un neutron lento se genera un estado excitado pasando a un núcleo inestable, el ^{236}U. Posteriormente, el núcleo comienza a vibrar entre la forma esférica y la elipsoidal hasta que la inercia de la vibración supera la tensión superficial que mantiene unido al núcleo y se divide generando dos nuevos fragmentos, neutrones y energía como consecuencia de la diferencia de masas entre los productos finales e iniciales.

$$^{235}_{92}\text{U} + ^{1}_{0}\text{n} \longrightarrow ^{144}_{56}\text{Ba} + ^{89}_{36}\text{Kr} + 3^{1}_{0}\text{n} + 200\ MeV$$



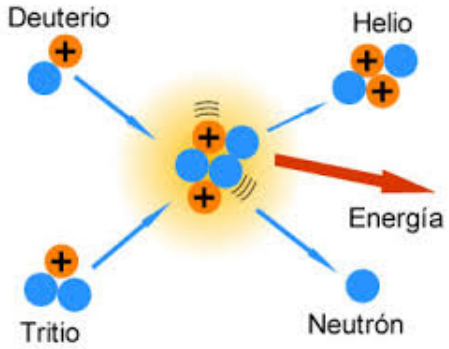
En está fisión se liberan neutrones que hacen posible iniciar una *reacción en cadena* para producir una cantidad enorme de energía. No sólo el uranio puede generar una fisión, también núcleos de torio, plutonio y proactinio pueden ser fisionables utilizando neutrones.

1.3.2. FUSIÓN NUCLEAR

En la fusión se consigue la unión de dos núcleos ligeros para formar uno más pesado, más estable y liberando energía. Este es el proceso por el que las estrellas generan tal cantidad de energía, dependiendo de las temperaturas que se alcanzan las estrellas pueden generar reacciones nucleares de protón-protón, las correspondientes al ciclo de carbono o las de fusión del helio.

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} \; + \; {}^{3}_{1}\mathrm{H} \; \longrightarrow \; 4\,{}_{2}He \; + \; {}^{1}_{0}\mathrm{n} \; + \; 17,6\; MeV $$

Tecnologicamente es muy dificil generar reacciones de fusión, los núcleos deben acelerarse hasta que alcancen velocidades muy altas para que al chocar venzan a las fuerzas de repulsión electrostática de los protones, esto provoca temperaturas muy elevadas ($10^8\ K$). Actualmente está en construcción uno de los mayores proyectos científicos de nuestra era, el ITER.



En él participan muchos paises e intenta conseguirse la fusión controlada de isótopos de hidrógeno para producir Helio y gran cantidad de energía. Este tipo de energía es sostenible ya que la cantidad de materia prima es abundante y además, barata. Además, los residuos radiactivos son menores y más seguros que los que produce los reactores nucleares de fisión.

1.4. APLICACIONES

Además de las aplicaciones energéticas mediantes reactores nucleares, las sustancias radiactivas nos ayudan en el diagnostico y cura de distintas enfermedades, en investigación biomolecular, como combustible en exploraciones espaciales, para detectar imperfecciones de materiales industriales, para realizar modificaciones genéticas de plantas y cultivos,...

- RADIOTERÁPIA: Existen células cancerosas que absorven más radiación que las células normales y podemos eliminarlas mediantes una dosis correcta. Para

ello se puede utilizar radiacción β sobre el propio tejido o ingerir soluciones radiactivas. Dependiendo del tumor se utilizan distintos isótopos, leucemia (^{30}P), linfoma (^{131}I),...

- MEDICINA NUCLEAR: Además de los Rayos X utilizados para realizar radiografías también se inyectan distintos isótopos radiactivos que sirven de contraste para técnicas de diagnostico por imagen como son las gammagrafías, PET, RMN's,...
- DATACIÓN RADIOMÉTRICA: Normalmente se utiliza el isótopo radiactivo del carbono (^{14}C) para determinar la edad de muestras orgánica e inorgánicas. El (^{14}C) tiene un periodo de semidesintegración de 5750 años y se genera en la atmosfera a partir de la reacción nuclear entre los rayos cósmicos y el dinitrogeno. Para la datación de rocas suele usarse ^{40}K o ^{40}Ar.
- ESTERILIZACIÓN: En este caso se utilizan rayos γ para esterilizar material médico como catéteres, equipos de diagnóstico, instrumentos quirúrgicos,, sin que el envase se tenga que abrir.
- IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS: Conocido con el nombre de pasteurización fría o ionización de alimentos, se hace pasar los alimentos por un control e radiacción X o γ para eliminar bacterias u hongos para mejorar su conservación. Los isótopos utilizados suelen ser (^{60}Co) o (^{137}Cs).

1.5. ANEXOS

1.5.1. EL MODELO ESTANDAR

En la naturaleza existen cuatro interacciones fundamentales: la gravitatoria, la electromagnética, la nuclear fuerte y la nuclear débil. Las dos primeras son de alcance infinito y las dos últimas tienen un alcance limitado al núcleo atómico. Por orden de intensidad, la nuclear fuerte es la de mayor fuerza seguida de la electromagnética (100 veces menor), de la nuclear débil y por último, la gravedad.

La interacción gravitatoria afecta a todas las partículas y es la responsable de la estructura del Universo; la electromagnética influye sobre los fotones y las partículas cargadas electricamente, gracias a esta interacción los átomos y moléculas son estables; la interacción nuclear débil interactua con toda la materia y es la responsable de la desintegración β y por último, la interacción nuclear fuerte explica la estabilidad de los núcleos atómicos.

Todas ellas se pueden definir mediante una *teoría cuántica de campos* y estás, predicen la aparición de una partícula portadora en su interacción denominada **bosón**. Así, para la interacción electromagnética tenemos el *fotón*, para la interacción nuclear fuerte tenemos el *Gluón*, para la nuclear débil los bosones vectoriales W^+, W^- y Z y para la interacción gravitatoria el **gravitón**, el cuál aún no se ha observado.

Con el nombre de **modelo estandar** se hace referencia a una teoría cuántica de campos que quiere englobar las interacciones fundamentales y relacionarlas con las partículas fundamentales. Hasta hora, con este modelo se encuentran unificadas la interacción nuclear débil y la electromagnética en la **teoría electrodébil** y la interacción fuerte en la **interacción fuerte-electrodébil** a muy altas temperaturas. Sin embargo, la interacción gravitacional estan aún lejos de unificarse en gran medida, por la no detección del gravitón.

Sobre este modelo aún pesan muchas incognitas (masa de los neutrinos, materia y energía oscura,. . .) y los físicos no están del todo convencidos en que sea el camino a seguir, de ahí que existan variantes teóricas como la teoría de cuerdas, supercuerdas o teoría M.

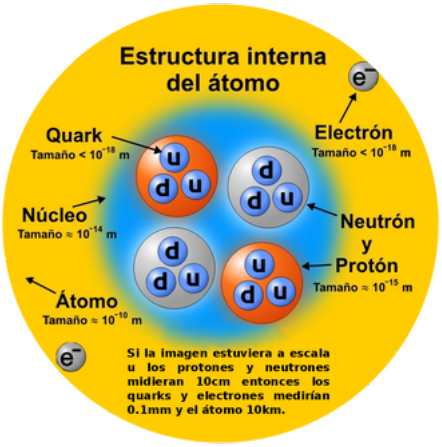
1.5.1.1. PARTÍCULAS SUBATÓMICAS

Gracias a los avances tecnológicos en el campo de aceleradores de partículas como los del CERN, se ha podido comprobar la existencia predicha teoricamente de muchas partículas más allá de los protones y neutrones. Así la clasificación de las partículas

subatómicas se puede realizar bajo dos criterios:

- **Según su espín**:
  - **BOSONES**: Son partículas subatómicas con espín entero, no cumplen el principio de exclusión de Pauli y son las transmisoras la fuerzas. Son el foton (s=0), el gluón (s=1),...
  - **FERMIONES**: Tiene spin semientero, cumplen el principio de exclusión de Pauli y constituyen la materia. A este grupo pertenecen el electrón, el protón o el neutrón.
- **Según su estructura**:
  - **LEPTONES**: Son fermiones elementales, es decir, sin estructura interna y no están sometidos a la intercción nuclear fuerte. Se conocen seis y sus características se encuentran en la tabla adjunta de partículas elementales.
  - **HADRONES**: Tienen estructura interna y se pueden desintegrar. Están formados por partículas elementales denominados **quarks***. Se clasifican en:
    - **MESONES**: Bosones que se desintegran en leptones y fotones. Se encuentran formados por un quark* y un antiquark*.
    - **BARIONES**: Son fermiones no elementales compuestos por un trio de quarks*. Los bariones más conocidos son los protones y los neutrones.

Bajo este prisma, el modelo de átomo conocido con un núcleo formado por protones y neutrones, tendría la siguiente estructura. Como vemos, el protón y el neutrón, ambos bariones, se encuentran formados por tres quarks, para el protón (uud) y para el neutrón (ddu).

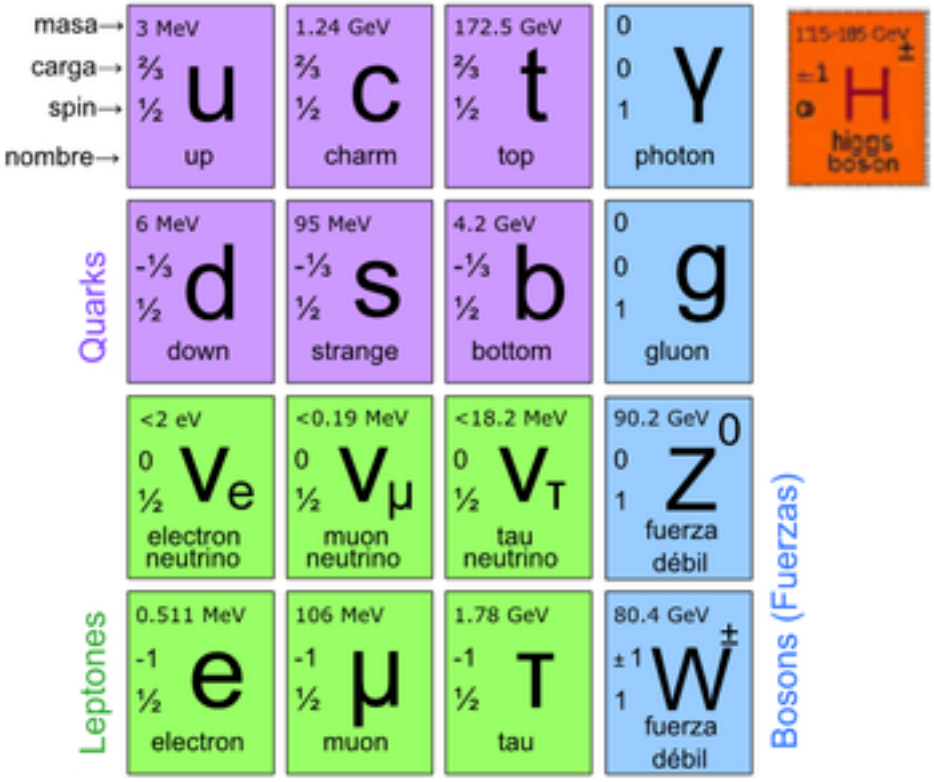


* Los quarks (cuarks) o antiquarks (anticuarks) son partículas de materia fundamentales con espín semientero.

1.5.1.2. PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

Por definición, una partícula fundamental es aquella que carece de estructura interna o que es portadora de una interacción fundamental. Por tanto, son los leptones, los quarks y las partículas portadoras o bosones.

En el cuadro siguiente se muestran todas las partículas fundamentales descubiertas hasta la fecha: quarks, leptones y los bosones portadores o bosones Gauge.



Como vemos, los leptones todos tienen espín semientero de valor 1/2, carga negativa exceptuando los neutrinos que son neutros y además, estables. Sólo el muón (μ) y el tauón (τ) se desintegran formando neutrinos, antineutrinos y electrones. La particula tau, al tener gran masa también puede dar lugar a hadrones.

Los quarks sólo han sido detectados en aceleradores de alta energía, tienen carga electrica fraccionaria y por cada uno de ellos existen tres variedades según su *color* (rojo, verde y azul). Estos *colores* distinguen distintos estados cuánticos de los quarks.

Por cada una de las partículas fundamentales existe su correspondiente antipartícula, se suelen simbolozar con una raya horizontal encima del simbolo de la partícula.

El bosón o campo de Higgs confiere masa a las partículas fundamentales. En la evolución teórica y experimental del modelo estandar las particulas mediadores carecen de masa, así el campo de Higgs se acopla a todas las partículas elementales e interacciona con ellas dificultando su movimiento, lo cuál es equivalente a la masa.

El bosón de Higgs tiene una masa muy grande, es muy inestable (vida media de 10^{-22} s), su espín es cero, no tiene carga eléctrica y sólo interacciona con las partículas que tienen masa. Su hallazgo experimental completa el modelo estandar, explica la masa de las partículas y la propia existencia del cosmos.

1.5.2. COSMOLOGÍA

Muchas veces se confunden términos como cosmología, astronomía o astronaútica. La ciencia que estudia el origen y la evolución del universo es la cosmología, la astronomía es más concreta, analiza el origen y la evolución de los distintos cuerpos celestes del universo y la astronaútica, es la ciencia que investiga la exploración humana en el espacio.

La cosmología se asienta sobre tres pilares teóricos y otros tres experimentales.

- **Modelos teóricos**:
  - **Teorís general de la Relatividad**: La relatividad general propuesta por Einstein es el marco teórico para el estudio de los sistemas con movimiento acelerado como es el que ocurre con las galaxias. El concepto de curvatura espacio tiempo define el flujo de energía del espacio y por ende, dar una evolución cosmológica.
  - **La teoría cuántica**: El estudio de las interacciones de las partículas que forman el cosmos debe realizarse bajo un prisma adecuado y coherente.
  - **El principio cosmológico**: El estudio de nuestro entorno local infiere que el universo tiene las mismas característica en todos sus puntos, es decir, el universo es homogéneo e isótropo.
- **Modelos experimentales**:
  - **Existencia de miles de millones de galaxias**: Edwin Hubble demostró a comienzos de 1920 que la **Vía Láctea** era una de millones de galaxias en el cosmos, cada una con miles de millones de estrellas.
  - **El universo se expande**: A finales de 1930, Edwin Hubble y George Lemaître, observaron que las galaxias se alejaban de nosotros midiendo el corrimiento al rojo mediante la técnica de efecto Doppler. Este estudio dio lugar a la ley de Hubble y puesto que nuestra galaxia no forma parte de ningún lugar privilegiado dentro del cosmos, todas las galaxias se alejan unas de otras.
  - **El fondo cósmico de microondas**: En 1965, Penzias y Wilson, realizando estudios de comunicaciones por satelit para los laboratorios Bell, observaron un ruido inherente a todo análisis espectral de frecuencias. Este ruido es el fondo cósmico de microondas cuyo origen es el mismísimo Big Bang y cuya temperatura es de 2,73 K. Es el denominado **eco** del Big Bang.

Actualmente, todos los científicos admiten el modelo cosmológico del Big Bang para explicar el origen y evolución del universo. Esta teoría fue propuesta por George Lemaître en 1927 y posteriormente, en 1948, George Gamow la completo con la cosmogénesis y la nucleosíntesis estelar.

En el instante del Big Bang, toda la materia del universo estaba concentrado en un volumen menor al de un protón y las cuatro interacciones fundamentales estaban unificadas, el espacio y el tiempo estaban recogidos en ese volumen infinitesimal de densidad casi infinita (**singularidad**). A 10^{-43} segundos la gravedad se separa y a los 10^{-35} segundos lo hace la fuerza nuclear fuerte.

Estas transiciones liberaron tal cantidad de energía que se produjo una inflación cósmica, en ella el universo se acelera a un ritmo exponencial que explica por que el universo observable es homogéneo e isótropo. Al termino de esta etapa, el universo sigue expandiendos a un ritmo menor y sufre un calentamiento que genera toda la materia (quarks, electrones, neutrinos,...) y energía que contiene hoy en día. Además, la interacción electrodébil se separa.

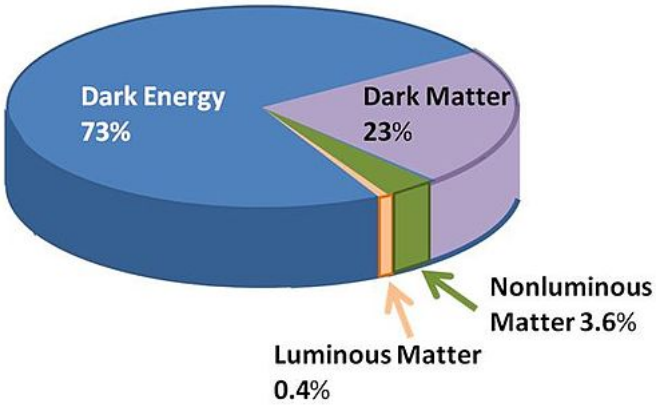
A los 10^{-4} segundos la materia aniquiló a la antimateria produciendo energía y permitiendo la existencia del Universo que hoy conocemos, se generan los protones, neutrones y fotones. A los tres minutos del Big Bang comienzan a unirse los protones y neutrones dando lugar los primeros núcleos de hidrógeno y helio.

Pasados unos 380000 años, los electrones se unen a los núcleos formando átomos de hidrógeno y helio, la radiacción electromagnética se desacopla de la materia y ese es el eco de la radiación de fondo de microondas. Las primeras estrellas se formaron a los 550 millones de años y las primeras galaxias a los 750 millones de años desde el Big Bang.

Nuestro sistema solar se formo hace 4600 millones de años y la vida surge en la Tierra hace 3800 millones de años.

La materia y/o Energía que observamos en el Universo es tan sólo el 5 %, el resto se corresponde con los conceptos de materia y energía oscura. Se desconoce cuál es la naturaleza de ambos fenómenos sin embargo podemos detectarlos por su acción gravitatoria sobre la materia visible. Los últimos cálculos indican que existe un 23 % de materia oscura y un 72 % de energía oscura. La energía oscura es la responsable de la expansión acelerada de las galaxias ya que ejerce una fuerza gravitatoria negativa que las repele. La materia oscura no interacciona con la radiación electromagnética y provoca anomalias en las velocidades de rotación de las galaxias y anisotropías en

la radiacción de fondo de microondas.



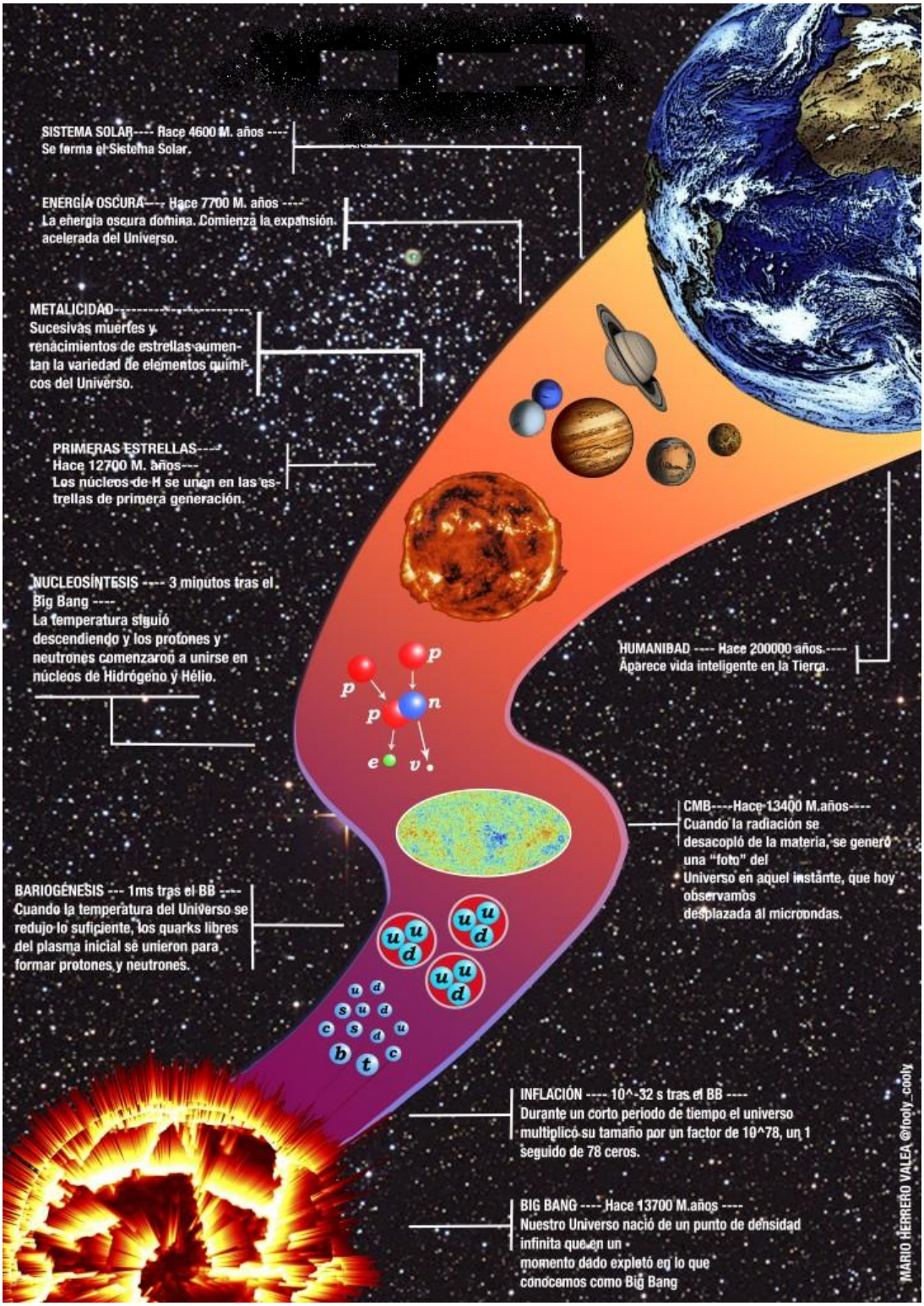
Distribución de materia-energía en el universo

El futuro del universo no esta claro y existen varias posibilidades en función de la relación entre energía oscura, materia oscura y gravedad:

1. Si la expansión del Universo continua indefinidamente, puede provocar la desintegración de las partículas que lo forman y dar lugar a un desgarramiento del Universo (**big rip**).

2. Si la materia oscura contiene el ritmo de expansión, podría llegar un momento en el que la materia volvería a concentrarse en un punto y tal como ocurrio en la singularidad inicial, se produciría un **big crunch**. Posteriormente podría dar lugar a un nuevo big bang y dar lugar a Universo oscilante.

3. Por último, podría darse la muerte térmica del Universo. Esto es, el Universo seguiría expandiendose, alejandose cada vez más unas galaxias de otras hasta que desaparecieran todas las estrellas y su Energía fuera consumiendose hasta que fuera nula.


SISTEMA SOLAR---- Hace 4600 M. años ----
Se forma el Sistema Solar.
ENERGÍA OSCURA---- Hace 7700 M. años ----
La energía oscura domina. Comienza la expansión acelerada del Universo.
METALICIDAD----
Sucesivas muertes y renacimientos de estrellas aumentan la variedad de elementos químicos del Universo.
PRIMERAS ESTRELLAS----
Hace 12700 M. años---
Los núcleos de H se unen en las estrellas de primera generación.
NUCLEOSÍNTESIS ---- 3 minutos tras el Big Bang ----
La temperatura siguió descendiendo y los protones y neutrones comenzaron a unirse en núcleos de Hidrógeno y Helio.
HUMANIDAD ---- Hace 200000 años.----
Aparece vida inteligente en la Tierra.
CMB----Hace 13400 M.años----
Cuando la radiación se desacopló de la materia, se generó una "foto" del Universo en aquel instante, que hoy observamos desplazada al microondas.
BARIOGÉNESIS --- 1ms tras el BB ----
Cuando la temperatura del Universo se redujo lo suficiente, los quarks libres del plasma inicial se unieron para formar protones y neutrones.
INFLACIÓN ---- 10^-32 s tras el BB ----
Durante un corto periodo de tiempo el universo multiplicó su tamaño por un factor de 10^78, un 1 seguido de 78 ceros.
BIG BANG ---- Hace 13700 M.años ----
Nuestro Universo nació de un punto de densidad infinita que en un momento dado explotó en lo que conocemos como Big Bang
MARIO HERRERO VALEA @tooly_cooly

1.6. PROBLEMAS RESUELTOS

1. Sabiendo que el oxigeno-16 tiene 8 protones en su núcleo y su masa atómica es 15,9949 u, calcula:

   a) Su defecto de masa

   b) La energía de enlace en julios

   c) La energía de enlace por nucleón, tambien en julios

   Datos: $m_p = 1,0073\ u$, $m_n = 1,0087\ u$, $1u = 1,660610^{-27}\ kg$, $c = 3 \cdot 10^8\ ms^{-1}$

   a) Puesto que el núcleo contiene 8 protones, el número de neutrones utilizando la relación entre estos y elnúmero másico, $A = Z + N$, es también, de 8 neutrones. El defecto de masa, en kilogramos, será:

   $$\Delta m = 8m_p + 8m_n - m_{núcleo} = 0,1331\ u$$

   $$\Delta m = 0,1331\ u \frac{1,660610^{-27}\ kg}{1\ u} = 2,2110^{-28\ kg}$$

   b) La energía de enlace,

   $$E_{enlace} = \Delta mc^2 = 1,9910^{-11}\ J$$

   c) Pra hallar la energía de enlacepor nucleón tan sólo tenemos que de dividir la energía de enlace entre el número másico,

   $$\frac{E_{enlace}}{A} = \frac{1,9910^{-11}\ J}{16} = 1,2410^{-12}\ \frac{J}{nucleon}$$

2. El ^{22}Na es un nucleido radiactivo con un periodo de semidesintegración de 2,6 años. En un instante inicial t=0, una muestra tiene $4,3 \cdot 10^{16}$ núcleos.

   a) Calcula su actividad expresada en becquerels, en ese momento.

   b) Calcula su actividad al cabo de un año.

   a) Utilizando la expresión de la semivida o semidesintegración, en segundos, calculamos la constante de desintegración y posteriormente hallar el valor de la actividad,

   $$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = 8,5 \cdot 10^{-9}\ s^{-1}$$

   $$A = \left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda N = 3,7 \cdot 10^8\ Bq$$

b) Al cabo de un año tendremos los siguientes núcleos,

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = 3,3 \cdot 10^{16}\ núcleos$$

$$A = \left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda N = 2,8 \cdot 10^{8}\ Bq$$

3. La actividad del ^{14}C de un resto arqueológico es de 60 desintegraciones por segundo. Una muestra actual de identica composición e igual masa posee una actividad de 360 desintegraciones por segundo. El periodo de semidesintegración del ^{14}C es de 5700 años. Explique a que se debe tal diferencia y calcule la antiguedad de la muestra arqueológica.

   Los atomos de ^{14}C están presentes en cualquier materia orgánica. Al morir un organismo vivo, éstos se reducen a medida que pasa el tiempo según la ley de desintegración radiactiva $A = \lambda N$.

   El valor de la constante radiactiva para el carbono-14 es,

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 1,216 \cdot 10^{-4}\ años^{-1} =$$

   Calculamos el número de átomos de C-14 de ambas muestras y loa relacionamos para conocer la antiguedad de la muestra,

$$\text{M. arqueológico} \Rightarrow\ N = \frac{A}{\lambda} = \frac{60}{1,216 \cdot 10^{-4}\ años^{-1}} \cdot \frac{365 \cdot 24 \cdot 3600\ s}{1\ año} = 1,56 \cdot 10^{13}\ átomos$$

$$\text{M. actual} \Rightarrow\ N = \frac{A}{\lambda} = \frac{360}{1,216 \cdot 10^{-4}\ años^{-1}} \cdot \frac{365 \cdot 24 \cdot 3600\ s}{1\ año} = 9,34 \cdot 10^{13}\ átomos$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow\ t = \frac{\ln \frac{N_0}{N}}{\lambda} = 1477\ años$$

4. Determina la energía, en julios, que se desprendería en la fisión completa de una muestra de 1000,00 g de U-235 suponiendo un rendimiento en las reacciones de fisión del 90 %. Datos: $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}\ mol^{-1}$, $M(U-235) = 235,04393\ u$

   A partir de la cantidad en moles de la muestra es,

$$1000,00\ g \cdot \frac{1\ mol}{235,04393\ g} = 4,25452\ mol$$

   podemos calcular la cantidad de nuclidos

$$4,25452\ mol \cdot \frac{N_A\ átomos}{mol} = 2,562 \cdot 10^{24}\ núcleos$$

podemos calcular la cantidad de nuclidos en la reacción

$$4,25452\ mol \cdot \frac{N_A\ átomos}{mol} \cdot \frac{90}{100} = 2,306 \cdot 10^{24}\ núcleos$$

Teniendo en cuenta la reacción de fisión

$$^{235}_{92}\text{U} + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{144}_{56}\text{Ba} + ^{89}_{36}\text{Ba} + 3\ ^{1}_{0}n + 200\ MeV$$

$$2,306 \cdot 10^{24}\ núcleos \cdot \frac{200\ MeV}{núcleos} \cdot \frac{10^6\ eV}{1\ MeV} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19}\ J}{1\ eV} = 7,38 \cdot 10^{13}\ J$$