

TEORÍA CUÁNTICA (UNIDAD 9 DE EDITEX)**1 Teoría Cuántica original. La hipótesis de Planck:**

- Sabemos que los cuerpos calientes emiten energía radiante a los cuerpos adyacentes de tres formas distintas: por **conducción** (por contacto directo con el sólido caliente), por **convección** (por los fluidos, agua o aire) y por **radiación** (sin medio material, a través de una onda electromagnética). Nos fijaremos en esta última.
- Dicha radiación es normalmente **invisible al ojo humano** (suele estar en el **infrarrojo, IR**), pero a veces vemos un cuerpo al rojo, al amarillo e incluso al azul de un soplete de acetileno (a mayor temperatura). Vemos que un cuerpo emite radiación electromagnética a una frecuencia cada vez mayor a medida que aumenta la temperatura, pero cada cuerpo sigue su propio patrón.
- **Gustav Robert Kirchhoff** (1824-1887) propuso para estudiar la emisión de dicha radiación tomar un modelo, un cuerpo patrón, al que denominó **cuerpo negro**. Un **cuerpo negro** es un cuerpo que emite (radia) toda la energía que se produce en él cuando se calienta, es un cuerpo emisor perfecto. Se le denomina negro porque un cuerpo que emite toda la radiación que produce tendría color negro (no absorbe ningún color, ninguna frecuencia, y por eso es negro). En la práctica se fabrica un cuerpo negro construyendo un horno al que se le hace un pequeño agujero y se recubre por el interior con negro de carbono (grafito). Si mirásemos por el agujero no veríamos nada, pero al calentarlo emite una radiación electromagnética que sale por dicho orificio.

- Si medimos la intensidad de la radiación emitida por dicho orificio ($I = \frac{\text{Potencia}}{\text{Superficie}} = \frac{P}{\Delta S} = \frac{W}{m^2}$ frente a la longitud de onda de la radiación emitida veremos que cumple una ley, las **leyes de la radiación de un cuerpo negro**:

- Para una temperatura dada, la I emitida posee un único máximo.
- A mayor temperatura, la I emitida aumenta para todas las λ .
- Que la λ a la que se produce el máximo de emisión disminuye al aumentar la temperatura (la frecuencia, $f = \frac{c}{\lambda}$ aumenta)

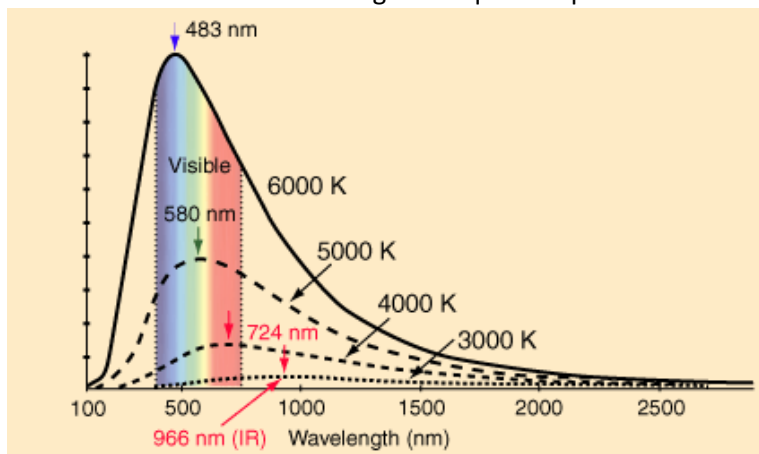


Figura 1.- Intensidad de emisión de un cuerpo negro en función de la longitud de onda, a dos temperaturas distintas.

- Estos aspectos fueron estudiados experimentalmente y dieron lugar a 2 leyes.

- La primera, la ley de **Stefan-Boltzmann** :

La intensidad total de la radiación emitida por un cuerpo negro (el área de la curva anterior) es directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta, es decir:

$$I_{\text{Total}} = \sigma T^4$$

Siendo $\sigma = 5,6687 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{T}^4$ la denominada constante de Stefan-Boltzmann

Con esta ley se puede determinar, por ejemplo, la temperatura de una estrella midiendo la intensidad total emitida.

- La segunda ley experimental es la ley del **desplazamiento de Wien**:

La longitud de onda de la radiación del cuerpo negro para la cual la energía es máxima (λ_{max}) es inversamente proporcional a la temperatura absoluta. Es decir:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{cte} = 2,897 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

- Wien intentó encontrar un modelo que explicará dichas curvas suponiendo que al calentar el cuerpo negro **los átomos de su superficie se ponen a oscilar a cada vez mayor frecuencia y como son cargas aceleradas, según la teoría de Maxwell, debían irradiar una onda electromagnética**. A pesar de que la idea es correcta, ni Wien, ni otros 2 investigadores británicos, Rayleigh y Jeans, que también lo intentaron, llegaron a ajustarse a las curvas experimentales (La teoría de Wien se ajustaba bien a la primera parte de la gráfica, para λ pequeñas, y luego se apartaba. La teoría de Rayleigh y Jeans concordaba con los datos experimentales a longitudes de onda altas, al final de la gráfica, pero predecía que $I = f(\lambda, T) = \frac{2ckT}{\lambda^4}$ y cuando $\lambda \rightarrow 0$, $I \rightarrow \infty$, lo cual no coincide con la realidad. Si esta teoría fuese cierta la emisión ultravioleta de los cuerpos llevaría consigo una energía infinita, que destruiría todo a su alrededor (efecto denominado como la "catástrofe ultravioleta"). Es sólo una catástrofe imaginaria (debida a que la teoría falla).

- En 1900, el físico austriaco Max Planck ajustó los datos experimentales a una ecuación algebraica (la ecuación es, por pura curiosidad, $I = f(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$) y demostró que para poder deducir dicha ecuación (y explicar por tanto la radiación del cuerpo negro) había que suponer que los átomos de las paredes se comportan como osciladores armónicos de una frecuencia dada f y que sólo pueden adquirir o emitir energía en “paquetes” o **cuantos**, cuyo valor es proporcional a f , $E_{\text{cuanto}} = hf$, siendo h la denominada constante de Planck, de valor igual a $6,6256 \cdot 10^{-34}$ J·s. Por tanto la energía de los osciladores estará **cuantizada**. La energía de un oscilador de frecuencia f sólo puede tener ciertos valores que son $0, hf, 2hf, 3hf, \dots, nhf$. En resumen:

La energía que un cuerpo absorbe o emite, E , sólo podía tener determinados valores, múltiplos de una cantidad de energía fundamental, a la que Planck denominó **cuanto**, de valor hf , siendo h la denominada constante de Planck, de cuyo valor es igual a $6,6256 \cdot 10^{-34}$ J·s, y f la frecuencia de la radiación emitida o absorbida por el cuerpo:

$$E = \text{múltiplo de } hf = nhf$$

- Con la hipótesis de los cuantos, Planck llegó a explicar perfectamente la radiación del cuerpo negro. Sin embargo, a pesar de este éxito, **la teoría cuántica no fue aceptada por los científicos de la época**. Fue **Einstein, en 1905**, el que, al **utilizar la teoría cuántica de Planck para explicar las leyes del efecto fotoeléctrico**, dio a dicha teoría el **empujón definitivo** para su aceptación. Un excelente resumen en <https://goo.gl/Rxa9FQ>.

2 Confirmación de la teoría de Planck:

2.1 Qué es el efecto fotoeléctrico.

El efecto descubierto por **Hertz**, denominado **efecto fotoeléctrico**: Cuando se exponen a la luz ciertas sustancias, especialmente los metales alcalinos, éstas emiten electrones. Este efecto se puede estudiar experimentalmente con el aparato ilustrado en la figura 1.

En una ampolla de cuarzo (material transparente a casi todas las frecuencias de la luz) en la que se ha hecho un alto vacío, se introducen dos placas metálicas unidas respectivamente a los polos de una batería. Si sobre la ampolla no incide luz alguna, por el circuito no pasa corriente (el amperímetro marcaría cero). Sin embargo, si el cátodo (placa negativa) se ilumina con luz, de dicha placa se desprenden electrones que son atraídos por el ánodo (placa positiva), cerrando el circuito de la batería, con lo que el amperímetro marcaría el paso de corriente. Al flujo de electrones a lo largo del tubo se le denomina **corriente fotoeléctrica**.

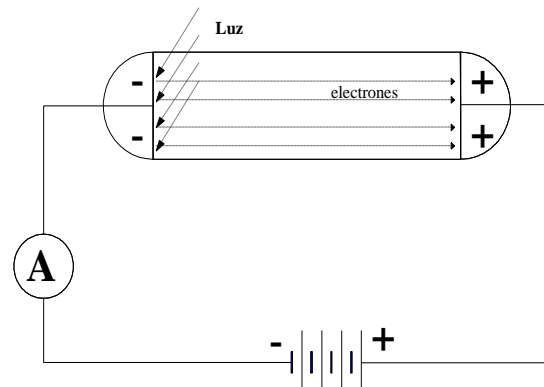


Figura 2 .- Esquema de un aparato para producir el efecto fotoeléctrico. Al incidir la luz en el cátodo, de éste se desprenden electrones que son acelerados por la d.d.p. hacia el ánodo, cerrando el circuito e indicando el amperímetro A el paso de corriente.

2.2 Leyes del efecto fotoeléctrico:

El estudio detallado de dicho efecto experimentalmente conduce a una serie de leyes, de imposible explicación si damos por buena la teoría ondulatoria para la luz. **Las leyes del efecto fotoeléctrico son fundamentalmente:**

- [1] Si sobre el cátodo se van proyectando luces monocromáticas (de una sola frecuencia) y ésta se va variando, se observa que el amperímetro **sólo marca el paso de corriente cuando la frecuencia de la radiación incidente es superior a un valor f_0 , frecuencia denominada frecuencia umbral y que es característica del metal que forma el cátodo.**

$$f > f_0$$

- [2] **La intensidad de la corriente fotoeléctrica es directamente proporcional a la intensidad de la radiación luminosa incidente.** Cuanto más intensa es la radiación, siempre que su frecuencia sea superior a la umbral, mayor será la intensidad de corriente.

$$I_{\text{corr}} \propto I_{\text{luz}}$$

- [3] Se puede medir experimentalmente el valor de la **energía cinética máxima** de los electrones emitidos por el cátodo, de forma que para una determinada frecuencia, **la energía cinética máxima de los electrones emitidos no depende de la intensidad de la luz incidente. Dicha energía cinética máxima sí depende de la frecuencia de la radiación, aumentando con ella proporcionalmente.**

$$E_{c, \text{max}} \propto f$$

$$E_{c, \text{max}} \neq f(I)$$

- [4] También se observa en el experimento que **el efecto fotoeléctrico se produce instantáneamente**: al incidir luz de una frecuencia superior a la umbral, aunque sea de poca intensidad, instantáneamente el amperímetro indica el paso de corriente.

Instantáneo

Todas estas características de la emisión fotoeléctrica **eran inexplicables desde la teoría ondulatoria de la luz** (o a veces la contradicen claramente).

- [1] La ley 1ª es inexplicable desde el punto de vista ondulatorio, puesto que si la energía de la luz es proporcional a la intensidad (si fuese una onda), el efecto fotoeléctrico se debería producir a partir de una intensidad dada, no para cualquier intensidad y a partir de la frecuencia umbral.
- [2] La ley 2ª no contradice el modelo ondulatorio, pero éste tampoco es capaz de explicarla.
- [3] Según la teoría clásica de la luz, la energía cinética máxima de los electrones emitidos debe ser función de la energía de la luz incidente y considerando a ésta como una onda su energía dependerá de su intensidad y no de su frecuencia (Clara contradicción con la 3ª ley comentada anteriormente).
- [4] Tampoco tenía explicación, dentro del marco de la teoría ondulatoria de la luz, que dicho efecto fuese instantáneo (4ª ley): Si la intensidad luminosa fuese menor, debería tardarse más tiempo en acumular la energía necesaria para arrancar el electrón de los átomos del cátodo.

Para medir esta energía cinética máxima de los electrones emitidos se coloca la batería en oposición (ver figura 3.-), de tal manera que el metal que emite los electrones sea positivo respecto al otro electrodo. En estas condiciones, cuando la batería genera un potencial V sólo llegarán al segundo electrodo los electrones cuya energía cinética $\frac{1}{2}mv^2$ sea igual o mayor que $e \cdot V$ (trabajo que debe vencer el electrón para llegar al otro electrodo). Aumentando el potencial, la intensidad de la corriente (n° de electrones que llegan al electrodo) disminuye y llegará un momento en que dicha intensidad se anulará; entonces ni los electrones que salen despedidos del metal con la velocidad máxima v_{\max} llegarán al otro electrodo cumpliéndose la ecuación:

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = eV_f$$

siendo V_f el valor del **potencial de frenado** que anula la corriente eléctrica.

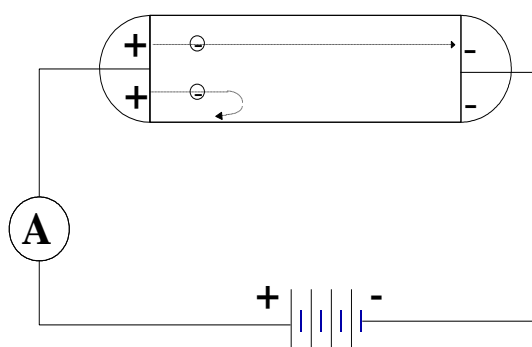


Figura 3.- Diagrama del montaje necesario para medir el potencial de frenado. se coloca la batería en oposición a la corriente fotoeléctrica y se va variando su potencial hasta que el amperímetro no marca el paso de la corriente. En ese momento, el potencial aplicado es capaz de parar a los electrones más veloces.

2.3 Confirmación de la hipótesis de Planck: Teoría fotonica de la luz de Einstein:

- La explicación satisfactoria de las leyes del efecto fotoeléctrico vino de la mano Albert Einstein en 1905. En él, Einstein ponía de manifiesto que la teoría de Maxwell se comportaba bien en la descripción del proceso de propagación de la luz y de los efectos ópticos asociados (Reflexión, refracción, interferencias, etc), pero no funcionaba cuando la luz interactuaba con la materia, tal y como ocurría en el efecto fotoeléctrico. Su nueva teoría no se oponía a la de Maxwell en cuanto a la propagación de la luz, sino que explicaba las interacciones de ésta con la materia.
- Einstein afirma que la luz está formada por **partículas denominadas fotones**, cuya energía es la de un **cuanto de energía**, es decir, $h \cdot f$. Einstein considera la luz como un "chorro" de fotones ("partículas") de energía $h \cdot f$, aunque considera que la teoría ondulatoria de la luz sigue siendo válida en los problemas de propagación (óptica), mientras que en los problemas de interacción luz-materia es necesario recurrir a la teoría cuántica. Así aparece en la luz una doble naturaleza de onda y corpúsculo (el fotón), hecho que se suele recoger con el término dualidad onda-corpúsculo.

2.4 Interpretación del efecto fotoeléctrico:

El efecto fotoeléctrico dentro de la teoría fotónica de la luz se interpreta de la siguiente manera: Cuando un fotón choca con un electrón del metal, es absorbido completamente y su energía, $h \cdot f$, pasa íntegra al electrón (el fotón desaparece). Parte de dicha energía se invierte en arrancar al electrón de la atracción nuclear (la energía necesaria para arrancar a un electrón del metal se denomina E_0 o W , *trabajo de extracción*). El resto de la energía que tenía el fotón pasa al electrón en forma de energía cinética. Así pues, de acuerdo con el principio de la conservación de la energía tendremos que $hf = W + \frac{1}{2}mv^2$ o bien: $\frac{1}{2}mv^2 = hf - W$

que es la **ecuación fotoelectrónica de Einstein para el efecto fotoeléctrico**. En realidad, como los electrones de la superficie del metal no tienen igual grado de atracción nuclear, no necesitan todos la misma energía para ser arrancados. Llamaremos trabajo de extracción a la energía necesaria para arrancar el electrón mas externo, el más debilmente unido (el potencial de ionización en química). Por tanto, la energía cinética máxima será:

$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = hf - W$$

Si disminuimos la frecuencia, llegará un momento en que la velocidad será 0 y no habrá emisión. En ese momento, la frecuencia será la frecuencia umbral f_0 y se cumplirá que:

$$hf_0 - W = 0, \text{ es decir, } W = hf_0$$

Así pues, cuando la frecuencia de la radiación f sea inferior a f_0 , como entonces $hf < W$ y ningún electrón podrá ser arrancado de la superficie del metal (la energía cinética siempre es una magnitud positiva). Si sustituimos en las ecuaciones anteriores el valor del W por hf_0 , llegaremos a:

$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = hf - hf_0$$

Así se comprenden todas las leyes del efecto fotoeléctrico:

- [1] Si la radiación es de frecuencia ν inferior a la frecuencia umbral, f_0 , la energía del fotón será $h \cdot \nu$, menor que la energía necesaria para arrancar al electrón del átomo ($W = h \cdot f_0$). El trabajo de extracción y la frecuencia umbral sólo son función del material del cátodo.
- [2] la intensidad de corriente de saturación (número de electrones que circulan por el circuito por segundo) sólo dependerá de la intensidad de la luz, que indica el nº de fotones que porta la luz. A mayor intensidad, mayor nº de fotones llegan al cátodo, mayor nº de choques con los electrones, mayor nº de electrones emitidos. El nº de electrones emitidos, la intensidad de corriente de saturación, será proporcional a la intensidad de la luz y no dependerá de la frecuencia de esta.
- [3] la energía cinética máxima de los electrones emitidos será una función lineal de la frecuencia de la luz (energía de los fotones incidentes), como indican las ecuaciones anteriores, y no dependerá de la intensidad de la luz (del nº de fotones que choquen).
- [4] el efecto fotoeléctrico será instantáneo pues es producto de un choque fotón- electrón y este es instantáneo.

3 La naturaleza dual del electrón. Dualidad onda-corpúsculo (De Broglie, 1924)

Hemos visto anteriormente que la luz, que tradicionalmente se ha considerado una onda (y así se explican aún hoy día algunas de las propiedades que tiene, como la reflexión, la refracción en un prisma, la difracción al pasar por una rendija, etc.), también podía ser considerada como un chorro de partículas a las que llamamos fotones, con la energía de un cuanto, hf , para explicar, por ejemplo, el efecto fotoeléctrico (Explicación de Einstein, estudiada anteriormente).

Luis de Broglie pensó que si la luz tiene, según el tipo de experimento a la que la sometamos, esa doble naturaleza ondulatoria y corpuscular, a lo mejor las tradicionalmente consideradas partículas, como el electrón, podían ser estudiadas en cierto tipo de experimentos como una onda. Para ello, empezó planteándose que para los fotones¹: $E = mc^2 = mc \cdot c = pc$ (p =cantidad de movimiento= mv). En la luz en el vacío, como $v=c$, $p=mv=mc$)

Usando la teoría de Planck:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Combinando ambas:

$$pc = \frac{hc}{\lambda}; \lambda = \frac{h}{p} \text{ (para el fotón)}$$

Luis de Broglie pensó que esa fórmula, deducida para los fotones, podría ser válida para cualquier partícula, que llevaría asociada una onda cuya λ vendría dada por:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \text{ (para cualquier partícula)}$$

Resumiendo, Luis de Broglie formuló **su dualidad onda-corpúsculo (onda-partícula)** afirmando que:

Toda partícula lleva una onda asociada cuya longitud de onda viene dada por.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \text{ (para cualquier partícula)}$$

¿Y porque no hemos detectado esas ondas con anterioridad? Porque las ondas asociadas a los objetos macroscópicos son indetectables. Por ejemplo, un objeto de 1 kg que se mueve a 1 m/s tendría una longitud de onda $\lambda=6,63 \cdot 10^{-34}$ m, absolutamente indetectable (el mejor método para detectar una onda es difractarla

¹ Es una derivación un poco "chapuzas" de la verdadera $E=pc$, que es la que cumplen los fotones. La expresión $E=mc^2$ sólo se cumple en partículas en reposo y el fotón siempre se mueve con velocidad c en el vacío. Si quieres una explicación más detallada <https://goo.gl/r2kKLF>.

haciéndola pasar por una rendija de un tamaño similar a λ y no existen rejillas tan pequeñas). Si embargo, la λ de un electrón que se mueve a, digamos, 10^4 m/s, sería $\lambda=7,27 \cdot 10^{-8}$ m, longitud de onda del mismo orden de magnitud que las distancias internucleares en un cristal (del orden del Armstrong).

4 Principio de incertidumbre (Heisenberg, 1927).

Con el descubrimiento del comportamiento ondulatorio de los electrones surgió otro problema: ¿cómo se podía precisar la "posición" de una onda? Es imposible saber su posición exacta debido a que, como cualquier onda, no está localizado en un sitio, se extiende en el espacio.

Para describir el problema que significa localizar una partícula subatómica que se comporta como onda, **Werner Heisenberg** formuló una teoría que ahora se conoce como **principio de incertidumbre**:

Es imposible conocer con total precisión y simultáneamente la velocidad y la posición de un electrón.

Desde un punto de vista matemático se expresa como:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Siendo Δx y Δp los errores absolutos (las incertidumbres) que podemos cometer al medir, respectivamente, la posición x y la cantidad de movimiento o momento lineal, p , definido como $p=mv$. El producto de esos errores, por muy pequeño que sea, debe ser mayor que $h/4\pi$.

Ninguno de los 2 errores puede ser 0 (ninguna magnitud puede ser conocida con total precisión), pues entonces el producto $\Delta x \cdot \Delta p$ sería 0, lo que es imposible. Y además un error influye en el otro, cuanto mejor conozcamos una de las magnitudes mayor será el error cometido al medir la otra, pues el producto siempre debe ser mayor que $h/4\pi$.

¿Y en que afecta esto a la mecánica de Newton? Durante cursos anteriores has calculado, por ejemplo, cuánto tarda en caer un objeto que se deja caer desde una altura h , es decir, sabías que a $t=0$, su posición era h y su velocidad 0 y a partir de ahí hacías el seguimiento de la partícula. Si ahora no podemos disponer **con total precisión** de ambos datos **simultáneamente**, no podemos describir el movimiento. **Debemos renunciar a la descripción determinista del sistema (Newton) y comienza la descripción probabilística (Cuántica).**

Al aplicar el principio de incertidumbre de Heisenberg al modelo atómico de Bohr del átomo de hidrógeno vemos que no puede ser posible, ya que si el electrón viajase en órbita circular alrededor del núcleo podría ser factible determinar simultáneamente, y con total exactitud, la posición del electrón (a partir del radio de la órbita) y su momento (mediante su energía cinética), con lo cual se violaría el principio de incertidumbre

A veces se explica el principio de incertidumbre, manteniendo nuestras ideas clásicas de que el electrón es una partícula, usando la idea de que para observar algo hay que "perturbarlo" en cierto grado; es imposible efectuar una medida sin interactuar con el sistema que se desea medir. En el mundo macroscópico esta perturbación es despreciable, mientras que en el microscópico no ocurre así. Si, por ejemplo, queremos ver un electrón, es preciso que un fotón de luz interactúe con él, pero en ese mismo momento su velocidad se verá alterada por ese choque. Cuanto menor sea el tamaño de la partícula a observar, menor ha de ser también la longitud de la onda que se debe utilizar en el experimento para poder visualizarla adecuadamente; eso significa que la radiación utilizada será de mayor frecuencia y por tanto mayor energía (recuerda que la energía del fotón es hf) y alterará más la cantidad de movimiento del electrón estudiado.

Esta indeterminación obedece, según la interpretación moderna, a una inexistencia real de valores concretos de ambas magnitudes, existiendo sólo valores permitidos de la posición y el momento lineal con una cierta probabilidad cada uno. Teniendo esto en cuenta, a partir de entonces en la rama atómica solo se trabaja con valores estadísticos, probabilísticos.

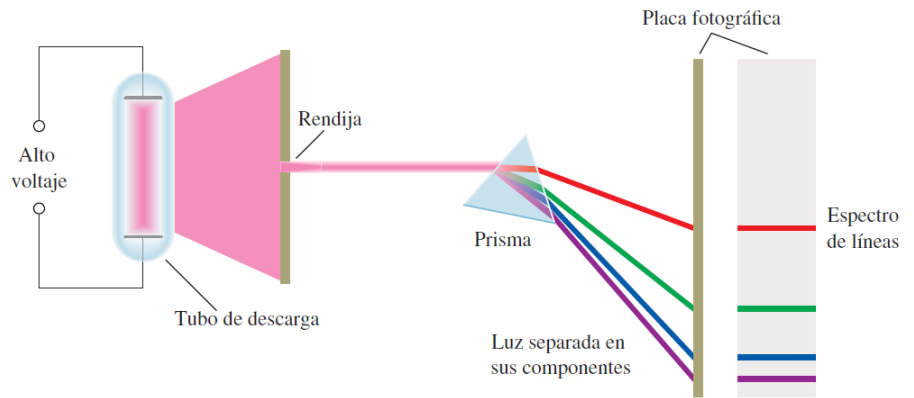
5 Espectros atómicos. Modelo atómico de Bohr (1913)

5.1 Espectros de emisión.

Si aplicamos energía (en forma de descarga eléctrica, por ejemplo) a una muestra de átomos que estén en estado gaseoso (bien porque sea un gas, como el H_2 , o porque se vaporice al aplicar la descarga, como el Hg en una ampolla cerrada y o el Fe entre 2 barras de carbono grafito entre las que salta una chispa eléctrica), esa muestra desprende un haz de luz de un determinado color, pero lo más interesante empieza al pasar esa luz por un prisma. Al dispersarse la luz NO aparecen todos los colores, como con la luz blanca, sino sólo unos pocos, que formarán unas rayas de colores al ser proyectados sobre una pantalla.

Este hecho, el **patrón de rayas** que se obtiene al dispersar la luz procedente de una muestra en estado gaseoso que ha sido sometida a una descarga eléctrica por un prisma de vidrio, se denomina **espectro atómico de emisión** y es muy importante porque viene a ser el DNI de cada elemento. Cada elemento tiene un espectro de emisión único.

El aparato para obtener estos espectros se denomina **espectroscopio** y fue desarrollado por Robert Bunsen (1811-1899) y Gustav Kirchhoff (1824-1887) a finales del s XIX. Su funcionamiento es muy sencillo: la luz emitida por esa muestra



gaseosa se pasa por un colimador (una fija rejilla) y por un prisma óptico y las rayas descompuestas se proyectan sobre una película fotográfica o cámara digital o sobre una regleta con una escala graduada de frecuencias (o longitudes de onda).

Otra forma de estudiar esos espectros son los denominados **espectros de absorción**, que consisten en hacer pasar la luz continua de un cuerpo incandescente (que, por tanto, contiene todas las frecuencias) por una muestra de gas que absorbe justo las frecuencias que emitía al ser calentada, por lo que al descomponer la luz que ha atravesado la muestra observaremos un espectro continuo al que le faltan justo la rayas del espectro de emisión.

El más sencillo de todos los espectros atómicos es el del hidrógeno. Su espectro en la zona visible fue estudiado por primera vez por Balmer y poco después se descubrió que las rayas tienen un patrón de regularidad muy grande (formula de Rydberg). El espectro del átomo de Hidrógeno no se podía explicar con la teoría clásica de la radiación.

5.2 El modelo atómico de Bohr.

En 1913 Niels Bohr propone el primer modelo "cuántico" del átomo de hidrógeno. En este modelo se interpreta el hecho experimental del espectro del átomo de hidrógeno, es decir, el por qué los átomos emiten o absorben luz a unas determinadas frecuencias o longitudes de onda. El modelo se puede resumir en tres postulados:

1. En un átomo, el electrón solo puede girar alrededor del núcleo en ciertas órbitas permitidas, **denominadas orbitas estacionarias**, en las cuales el electrón ni emite ni absorbe energía.
2. Las órbitas estacionarias son aquellas en las que se cumple que el momento angular del electrón en ellas, L , es un múltiplo de la constante de Planck h dividido por 2π : $L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$

Como curiosidad, la dualidad onda-partícula nos permite explicar, de una manera sencilla este postulado: una órbita será posible cuando la onda electrónica, la onda asociada al electrón, sea estacionaria, es decir, sea una onda que parece no moverse (y por tanto no transporta energía), de tal forma que al recorrer la onda la órbita del electrón, como si ésta fuese una cuerda cerrada, vuelve a coincidir su final con su principio, y esto ocurre, como puede verse en la imagen adyacente, cuando la longitud de la órbita sea un múltiplo entero de la longitud de onda electrónica. Si r es el radio de su órbita: $2\pi r = n\lambda$, sien " n " un número natural. Si sustituimos λ por su valor h/mv , nos quedaría $mvr = nh/2\pi$, el 2º postulado de Bohr.

3. Si un electrón pasa de una órbita estacionaria superior a otra inferior emite un fotón y si lo hace de una órbita estacionaria inferior a otra superior absorbe un fotón, siendo la ecuación:

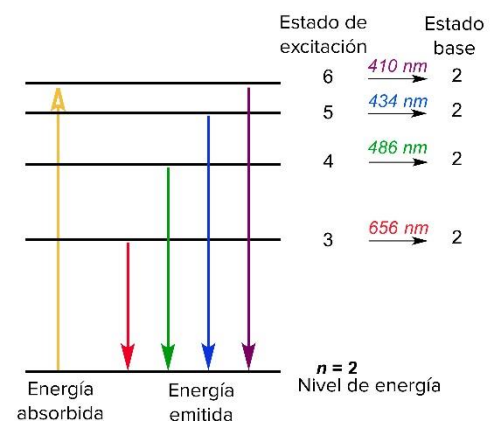
$$\Delta E = E_m - E_n = \pm hf. \text{ (Según absorba o emita energía)}$$

En la figura lateral podemos ver los niveles del energía del átomo de Bohr que viene dados por la expresión $E_n = -\frac{13,6}{n^2} eV$ (observese que la energía es negativa, como la energía de enlace de un satélite). Así, si queremos hallar, por ejemplo, la línea del espectro que se formaría cuando un electrón excitado a un nivel $n=3$ cae al nivel fundamental $n=1$ (espectro de emisión) de manera directa sería:

$$E_3 - E_1 = \left(-\frac{13,6}{3^2} + \frac{13,6}{1^2}\right) eV = 12,0888 eV \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{1 eV}$$

$$= 1,934 \cdot 10^{-18} J = hf;$$

$$f = 2,92 \cdot 10^{15} Hz; \lambda = \frac{c}{f} = 103 nm$$



FÍSICA NUCLEAR (UNIDAD 10 DE EDITEX)**1 Núcleo atómico. Generalidades.**

La existencia del núcleo atómico como parte independiente y central del átomo fue propuesta por Rutherford en su modelo atómico de 1.911. Según este modelo, el núcleo ocupa muy poco volumen en relación con el total del átomo, pero en él está concentrada la mayor parte de la masa de dicho átomo.

1.1 Nucleones.

Las partículas que forman parte del núcleo se denominan **nucleones**. Son de dos tipos:

-**Protones p^+** . Su masa es $m_p=1,007276$ u. y su carga $+1,602 \cdot 10^{-19}$ C (o sea $+e$).

-**Neutrones n** . Su masa es $m_n=1,008665$ u. y no tienen carga eléctrica.

La actual idea sobre la constitución de los nucleones (Modelo Estándar) postula que no son partículas indivisibles, sino que están formados por **quarks**, partículas que no se pueden hallar en estado libre. Los quarks tienen carga fraccionaria y otras propiedades curiosas tales como la "extrañeza", "color" y sabor" (aunque no en el sentido habitual de estos términos. Es una manera de referirse a los distintos posibles valores de sus números cuánticos). Dos de estos quarks son el quark *arriba* "up" con carga $+2/3$ y el quark *abajo* "down", con carga $-1/3$. Dos quarks "up" y un quark "down" formarían el protón ($1p^+=uud$), mientras que dos quarks "down" y un "up" formarían el neutrón ($1n=udd$). El color de los quarks (la llamada "carga de color") viene a ser como la carga de las partículas, atrayéndose los quarks con distinto color y repeliéndose los del mismo color (además, el u y el d se atraen al tener cargas de distinto signo). Los protones y los neutrones (bariones) deben tener color total blanco, por lo que cada uno de los quark que les forma tendrá un color: uno rojo, otro azul y otro verde.

1.2 Número atómico y número másico.

- **Nº atómico (Z, del alemán Zahl, número):** Introducido por Moseley en 1.913 para indicar el nº de cargas positivas de un átomo, es decir, el nº de protones. Todos los átomos de un elemento tienen igual Z, es decir, es lo que nos permite "**identificar**" a un átomo (no el nº de electrones, que puede variar en los iones, o el nº de neutrones que puede variar en los isótopos).
- **N, número de neutrones:** Puede variar de un átomo a otro de un mismo elemento por la existencia de los **isótopos**, átomos del mismo elemento (igual Z) pero con diferente masa (distinta N).
- **Numero másico (A, del alemán Atomgewicht, peso atómico, aunque no es exactamente lo mismo, ojo) es el número de protones y neutrones que tiene un átomo. $A=Z+N$. Se denomina así debido a que la masa de un núcleo es, de manera aproximada, A u. El átomo se representa A_ZX**

1.3 Isótopos, isóbaros, isótonos, abundancia.

- **Isótopos:** Átomos con igual número de protones y distinto número de neutrones (Igual Z, distinto A). Son átomos del mismo elemento (de ahí su nombre, ya que todos ocupan el mismo lugar en la tabla periódica) pero con diferente masa.

Notas importantes:

- La mayoría de los elementos presentan varios isótopos (sólo 21 elementos, como el Na o el Be tienen un único isótopo natural). El Hidrógeno tiene 3, con $N=0$ (protio), $N=1$ (deuterio) y $N=2$ (tritio). Se suelen representar con el nombre del elemento y separado por un guion el número másico: H-1, H-2 y H-3. El carbono tiene 3, C-12, C-13 y C-14 (inestable).
- La masa atómica atribuida a cada elemento y necesaria para cálculos estequiométricos es una media de la masa de los isótopos de ese elemento, pero no una media aritmética simple, sino la media ponderada teniendo en cuenta la **abundancia** de cada isótopo en la naturaleza.

Ejemplo:

El cloro natural está constituido por dos isótopos (sus masas están en unidades de masa atómica, u):

${}^{35}\text{Cl}$ de masa atómica 34,968852 u y porcentaje de abundancia 75,77%.

${}^{37}\text{Cl}$ de masa atómica 36,965903 u y abundancia isotópica 24,23%.

Por lo que la masa atómica media ponderada de los isótopos del cloro ${}^{35}\text{Cl}$ y ${}^{37}\text{Cl}$:

$$\frac{34,968852u \times 75,77 + 36,965903u \times 24,23}{100} = 35,452737u$$

- **Isobaros:** Átomos con igual número de nucleones (A) pero distinto número de protones (Z) y neutrones. Por ejemplo son isobaros $^{14}_7N$ y $^{14}_6C$. (Isobaros: igual peso)
- **Isótonos:** Átomos que poseen igual número de neutrones pero diferente número de protones. Por ejemplo los núcleos $^{13}_6C$ y $^{14}_7N$ son isótonos (isótonos: igual número de neutros).

1.4 Unidades de medida nucleares.

Para caracterizar las masas nucleares se precisa un patrón de masa acorde a las magnitudes medidas. Este patrón (ya lo conoces de química) se denomina unidad de masa atómica (u., u.m.a. o Dalton, Da). Desde 1.961 se define **la unidad de masa atómica** como la doceava parte de la masa del átomo de carbono-12 (nótese que se incluye la masa de los electrones porque decimos átomo).

La unidad de masa atómica se puede relacionar con el kg:

1 mol de carbono-12=12 g. nº de átomos en 1 mol de $^{12}_6C=N_A$ (nº de Avogadro)= $6,023 \cdot 10^{23}$ átomos.

La relación u-kg puede establecerse a partir del concepto de mol y la definición de u:

$$1 u = \frac{1}{12} \cdot \text{masa 1 átomo } ^{12}_6C = \frac{1}{12} \cdot \frac{12 \text{ g de } ^{12}_6C}{N_A \text{ átomos } ^{12}_6C} = \frac{1}{N_A} \text{ g} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

De forma similar a la masa también se utilizan unidades acordes al tamaño nuclear en cuanto a la longitud y la energía.

Unidades de longitud: Tamaño aproximado de los átomos: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$

Tamaño aproximado de los núcleos: $1 \text{ fm} = 1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$

Unidades de energía: Para procesos electrónicos: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Para procesos nucleares $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$

2 Fuerzas nuclear fuerte.

¿Cómo es posible que en una zona tan pequeña del átomo coexistan partículas, como los protones, que se repelen entre sí? Los neutrones no ayudan en nada, pues son neutros. La fuerza gravitatoria entre ellos podría ayudar, pero es extremadamente débil. Debe haber una fuerza atractiva que mantenga unidas a las partículas del núcleo en contra de la repulsión eléctrica. Esa fuerza es la denominada **fuerza nuclear fuerte**, propuesta por **Hideki Yukawa** en 1934.

Estas fuerzas no son centrales y según el modelo estándar se deben a las atracciones de los quarks con distinto color que componen cada uno de los nucleones (p^+ y n) del núcleo. Sus características más importantes son:

- **Independencia de carga:** Las fuerzas nucleares no dependen del signo de la carga del nucleón (actúan sobre protón y neutrón de la misma forma y son equivalentes las fuerzas $p^+ - p^+$, $p^+ - n^0$ y $n^0 - n^0$). Yukawa propuso que la interacción entre partículas se efectúa mediante el intercambio de una tercera partícula (gluón).
- **Es muy intensa:** al menos cien veces mayor que la fuerza electromagnética.
- **Fuerzas de muy corto alcance:** Su radio de acción se circunscribe al núcleo, es decir, a unos 10^{-15} m .

3 Energía de enlace de un núcleo.

3.1 Defecto de masa.

Cuando se estudia la masa de los núcleos sucede un hecho curioso: Su masa **siempre es** menor la masa de las partículas que lo constituyen. Por ejemplo, la masa del núcleo de $^{15}_7N$ es 15,0001 u, que es menor que la masa teórica calculada para ese núcleo, que sería 7 protones $\cdot 1,0073 \text{ u/protón} + (15-7)$ neutrones $\cdot 1,0087 \text{ u/neutrón} = 15,1020 \text{ u}$. Nos faltan $15,1020 - 15,0001 = 0,1819 \text{ u}$. Esa masa que falta se conoce como **defecto de masa**¹.

¹ Es curioso que en inglés se llame "mass excess".

Se denomina defecto de masa Δm de un núcleo a la diferencia entre la masa teórica que debería tener el núcleo y la masa real del mismo. En forma de fórmula:

$$\Delta m = \text{masa de las partículas sin unir} - \text{masa del núcleo} =$$

$$= Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M, \text{ siendo } \begin{cases} m_p = \text{masa del protón} \\ m_n = \text{masa del neutrón} \\ M = \text{Masa del núcleo ya formado} \end{cases}$$

3.2 Equivalencia de masa y energía.

Albert Einstein, en 1905, como una de las consecuencias de su Teoría de la Relatividad, expuso que la masa de un cuerpo puede transformarse íntegramente en energía, y viceversa. Un cuerpo, por tener masa, ya que tiene una energía intrínseca, que viene dada por la expresión $E=m \cdot c^2$ siendo c la velocidad de la luz en el vacío ($c=3 \cdot 10^8$ m/s). Este principio de equivalencia tiene una consecuencia importante: en una reacción (sobre todo en reacciones nucleares) la masa no se conserva. Sí se conservará, en cambio, la energía total del sistema (teniendo en cuenta la energía equivalente a la masa).

Podemos hallar cuanta energía contiene 1 u².

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 1,492 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 1,492 \cdot 10^{-10} \text{ J} \cdot \frac{1 \text{ MeV}}{1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}} = 931 \text{ MeV}$$

1 u de masa es equivalente a 931 MeV

¿Cómo nos ayuda esta expresión a entender el defecto de masa? **La energía de los nucleones aislados**, la masa teórica del núcleo, se correspondería con una energía $E=m_{\text{teórica}} \cdot c^2$, **mayor que la energía real del núcleo** que sería $E=m_{\text{real}} \cdot c^2$. La diferencia entre ambas energías sería $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$. O sea, que el **defecto de masa es una medida de la energía desprendida en la formación del núcleo**.

3.3 Energía de enlace.

Es la energía necesaria para desintegrar un núcleo en los nucleones que lo constituyen sin comunicarle energía cinética. Esta energía es igual a la que se libera cuando se forma dicho núcleo a partir de los nucleones.

Para calcular dicha energía de enlace usaremos la expresión anterior:

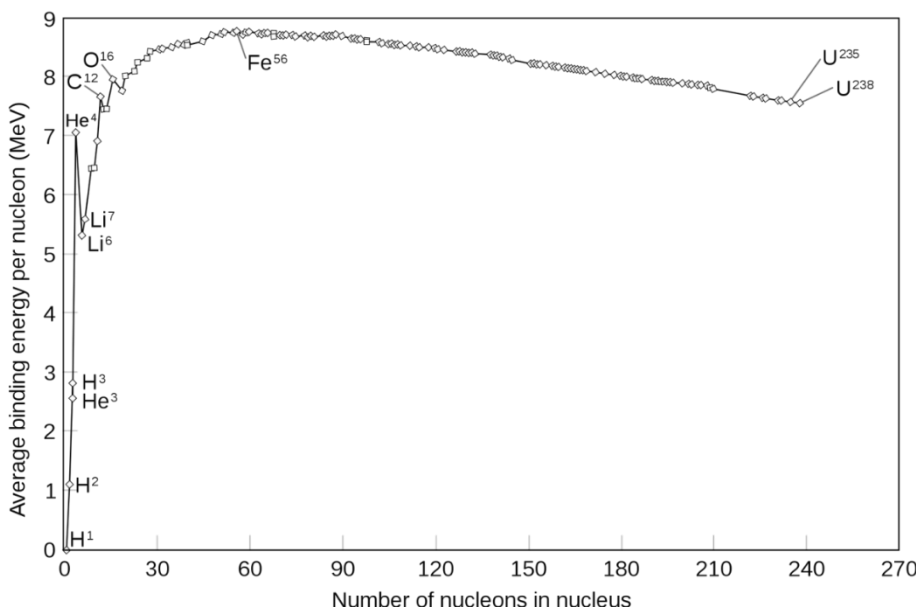
$$\text{Energía de enlace} = \Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

En el ejemplo anterior:

$$E_{\text{enlace}} ({}^{15}_7\text{N}) = 0,1819 \text{ u} \cdot \frac{1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1 \text{ u}} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \cdot \frac{1 \text{ MeV}}{1,66 \cdot 10^{-13} \text{ J}} = 169,84 \text{ MeV}$$

La energía de enlace nuclear tiene valores del orden de los MeV (1 MeV=10⁶ eV), valores muy elevados con respecto a la energía de los procesos electrónicos (recuerda efecto fotoeléctrico, $W_0 \approx$ algunos eV).

3.4 Energía de enlace por nucleón. Estabilidad nuclear.



Puesto que la energía de enlace de un núcleo depende del número de partículas que lo constituyen, a fin de comparar la estabilidad de los distintos núcleos se introduce el concepto de energía de enlace por nucleón. Se

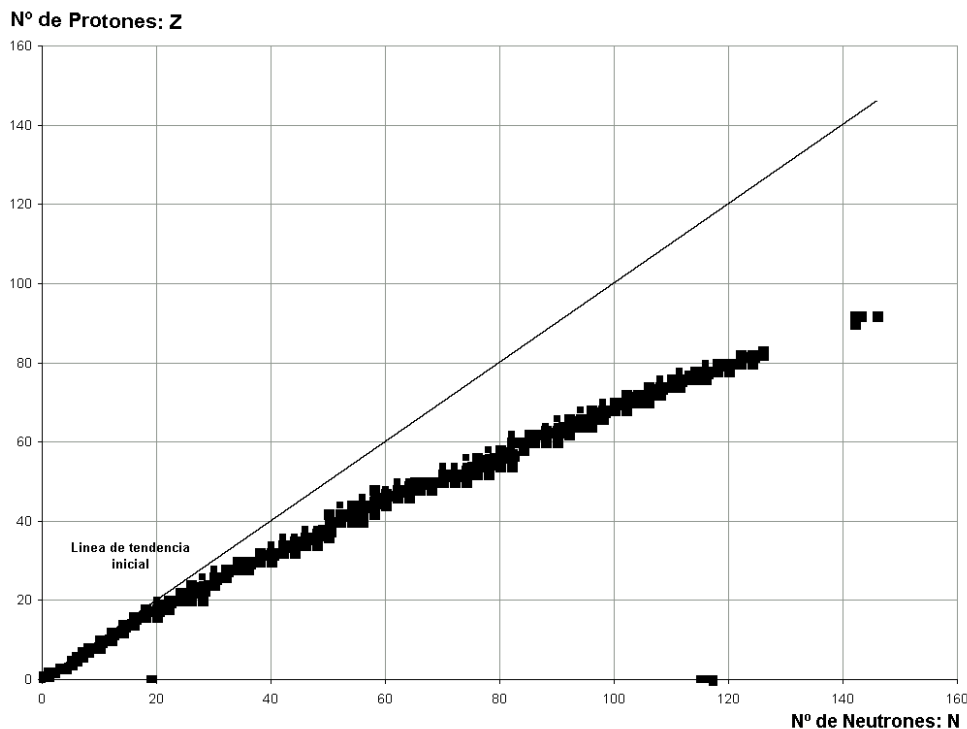
² Es muy habitual medir las masas de las partículas en MeV/c². Así, 1 u=931,944 MeV/c². El bosón de Higgs tiene una masa de 125 GeV/c².

obtiene dividiendo la energía de enlace entre el número de nucleones ($\Delta E/A$). **La energía de enlace por nucleón es un índice de la estabilidad del núcleo, que será más estable cuanto mayor sea aquella.**

Si se representa la energía de enlace por nucleón en función del número másico (A) se obtiene la gráfica adjunta. En ella se observa:

- En los núcleos ligeros se produce un aumento abrupto de la energía de enlace por nucleón frente al número másico A.
- La **energía de enlace por nucleón es por término medio** de unos 7-8 MeV/nucleón a partir de $A=20$.
- El **máximo** corresponde a un número másico de 56, es decir, al núcleo de ${}^{56}_{26}\text{Fe}$, que es el más estable de la naturaleza.
- Los núcleos con A comprendido entre 40 y 80 son los núcleos más estables (tienen mayor valor de $\Delta E/A$).
- Los núcleos **de los elementos más pesados** son más inestables (por ejemplo el uranio tiene 7,6 MeV/nucleón). Esto explica el hecho de que se produzca la ruptura de estos núcleos en otros menores que son más estables (Procesos de **fisión nuclear**).
- Los núcleos más ligeros tienen también menor energía por nucleón, lo que hace que se produzcan los procesos de **fusión nuclear** (Además estos procesos llevarían aparejada la emisión de una cantidad de energía aún mayor que los procesos de fisión).
- En esta región existen “picos” de energía que corresponden a núcleos especialmente estables, y son los que tienen A y N par (${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$). Los mínimos corresponden a átomos con cantidades impares de protones y neutrones. Este hecho apoya el modelo nuclear de capas.

Otra posibilidad de estudio de la estabilidad es representar los isótopos estables en función del número de protones y neutrones que los forman. Esto se hace en la gráfica contigua, en la que apreciamos las siguientes peculiaridades:



- Los núcleos estables con menos de 20 protones tienen aproximadamente el mismo nº de protones que de neutrones ($A - Z = N = Z$) y se sitúan en la bisectriz de la gráfica.
- Para $Z > 20$, la curva desciende por debajo de la bisectriz, lo que indica que el número de neutrones de los núcleos pesados se hace algo mayor que el número de protones. Esto aumenta su estabilidad porque el exceso de neutrones hace que disminuya la repulsión eléctrica de los protones, al intercalarse los neutrones entre ellos.

4 Radiactividad natural.

4.1 Naturaleza de las emisiones radiactivas. Leyes de Soddy.

Por **radiactividad** se entiende la **emisión de radiación (partículas, luz)** por parte de algunas sustancias, que se denominan radiactivas, **transformándose en otras**. Esta emisión puede ser espontánea (**radiactividad natural**), o producida por el hombre (**radiactividad artificial**). Este fenómeno puede ser observado por primera vez por el científico francés **Henri Bequerel** en 1896. Observó que unas sales de Uranio colocadas en su mesa de laboratorio ennegrecían las placas fotográficas que se encontraban dentro de uno de los cajones de la mesa. También **Marie y Pierre Curie**, en 1898, descubrieron nuevas sustancias que producían este efecto: el Polonio y el Radio. Posteriormente se han ido descubriendo más, hasta los aprox. 1300 nucleídos radiactivos conocidos actualmente.

Las emisiones radiactivas se pueden dividir en tres tipos diferentes, de las siguientes características:

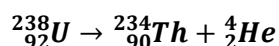
Emisión	Carga	m_0 (en .m.a.)	Naturaleza	Características
Alfa (α)	+2e	4	núcleo de helio	velocidad de $(1,5-2) \cdot 10^7$ m/s alta capacidad de ionización poca capacidad de penetración (la detiene una hoja de papel)
Beta (β)	-e	0,00054	electrones	alta velocidad (0,3c-0,9c) poca capacidad de ionización 100 veces más penetrante que la α (las detiene una lámina de 1 cm de Al)
Gamma (γ)	0	0	ondas electromagnéticas de menor longitud de onda que los rayos X	$v=c$. Mayor poder de penetración que los rayos X, atraviesan láminas de hierro de hasta 25 cm

4.2 Ajuste de reacciones nucleares.

En las reacciones nucleares se cumple lo siguiente:

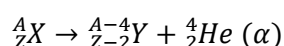
- **Se conserva la "masa"**: Ya hemos visto que en realidad parte de la masa se transforma en energía y lo que se conserva es la suma masa+energía, pero como la cantidad de masa perdida es muy pequeña (siempre mucho menor que un nucleón, p^+ o n , **se conservará el número de nucleones**. La suma de los superíndices de los núcleos situados a la izquierda de la flecha ha de ser igual a la suma de los superíndices de los que se encuentran a la derecha.
- **La carga se conserva**: El subíndice de la representación simbólica de un núcleo indica su carga (n° de p^+). Por tanto, la suma de los subíndices de los núcleos situados a la izquierda de la flecha es igual a la suma de los que se encuentran a la derecha. Por eso representaremos el electrón de la radiación β como ${}_{-1}^0e$, carga negativa y masa despreciable. Una partícula α será 4_2He , un protón 1_1p y un neutrón 1_0n .
- También se conserva la cantidad de movimiento.

Por ejemplo:



4.3 Estudio de las distintas emisiones radiactivas.

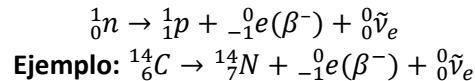
- **Radiación alfa**: en ella, un núcleo pesado emite una partícula alfa (o núcleo de helio 4_2He), lo que provoca su transmutación en un núclido con cuatro unidades másicas menos y un número atómico inferior en dos unidades. (**1ª Ley del desplazamiento de Soddy**)



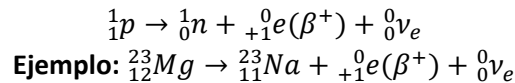
Los núcleos con $A > 100$ se estabilizan con la emisión α , pero ésta es especialmente importante a partir de $A > 200$. Las partículas alfa, que constituyen la radiación más pesada emitida por un núcleo, son poco penetrantes y basta una delgada lámina de aluminio para detenerlas.

- **La radiación beta**: consiste en la emisión de electrones negativos, es característica de los radionúclidos cuya proporción neutrónica es elevada y se explica mediante la conversión de un neutrón en un protón, un electrón y un antineutrino electrónico (partícula sin carga ni masa propuesta por Pauli para explicar que en esta emisión se conserva la energía y el momento lineal del sistema. Se detectó experimentalmente en

1957): el elemento resultante tiene idéntico número másico, pero su número atómico aumenta en una unidad. (**2ª Ley del desplazamiento de Soddy**).



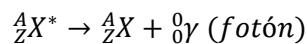
Existe una variante que consiste en la emisión de positrones o electrones positivos, según la reacción de conversión de un protón en un neutrón más un positrón más un neutrino electrónico. Un positrón es como un electrón pero de carga positiva, fue descubierto por 1932 con **Anderson** en los rayos cósmicos, es un componente de la **antimateria** (se desintegra al unirse a materia ordinaria, con conversión de toda la masa en energía, $E=mc^2$) y se representa como ${}^0_+1e(\beta^+)$. Así:



Fuerza nuclear débil:

¿Cómo puede salir un electrón de un núcleo, donde no existen? Si vemos las 2 primeras partículas, n y p⁺ y recordamos sus quarks, uud y udd. En este proceso, un quark down en un neutrón cambia en un quark up emitiendo un bosón W, que luego se rompe en electrones de alta energía y un antineutrino electrónico. En esta transformación está involucrada la denominada **fuerza nuclear débil**. Esta fuerza es del orden de 10¹³ veces menor que la fuerza nuclear fuerte y su alcance es muy pequeño, limitándose al tamaño de un nucleón (o sea una distancia más pequeña que la del núcleo). Fue explicada en 1.967 por Abdus Salam, Steven Weinberg y S. Glashow, que propusieron una teoría que unía esta interacción con la electromagnética (teoría de unificación electrodébil), recibiendo el Nobel por ello en 1.979. Más información en <https://goo.gl/FfNquf>.

- **La radiación gamma:** se produce cuando el núcleo atómico excitado pasa a su estado fundamental, con emisión de un fotón o cuanto de radiación electromagnética. No modifica ni el número atómico ni el másico del núcleo. La radiación gamma carece de masa y es la más penetrante, pudiendo atravesar gruesas pantallas de plomo. Suele acompañar a las emisiones α y β , estabilizando los núcleos formados.



La energía de los fotones emitidos cumple la ecuación de Planck, $E=hf$, siendo E la energía pérdida por el núcleo excitado y f la frecuencia del fotón.

5 Ley de la desintegración radiactiva. Parámetros de los procesos radiactivos.

La desintegración radiactiva es un proceso aleatorio para cada uno de los núcleos existentes en una muestra de producto. Por tanto es imposible saber el instante en que se va a desintegrar un átomo dado, pero sí se puede analizar estadísticamente la proporción de átomos que sufrirán ese proceso en un intervalo determinado. Para analizarlo vamos a definir algunos parámetros que usaremos:

- **Actividad (A):** o velocidad de desintegración **es el número de átomos que se desintegran por unidad de tiempo**. Si al comienzo ($t=0$) disponemos de N_0 núcleos y al cabo de un tiempo t quedan N núcleos sin desintegrar, se habrán desintegrado $N_0 - N = -\Delta N$. La velocidad de desaparición de núcleos será $v = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$. Para hallar la velocidad instantánea en cada momento haremos el paso al límite cuando $\Delta t \rightarrow 0$, la derivada.

$$\text{actividad} = A = -\frac{dN}{dt} \text{ [ecuación 1]}$$

(El signo negativo hará que la actividad sea un número positivo, puesto que el valor de la derivada es menor que cero, ya que el nº de núcleos existentes, N es cada vez menor).

La **actividad** se mide en el S.I. en Becquerel (Bq) que equivale a una desintegración por segundo. Una unidad aún más utilizada es el Curie o Curio (Ci) que es la actividad de 1 g de radio, en el cual se producen $3,7 \cdot 10^{10}$ desintegraciones cada segundo (Por tanto $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$). El Curie es una unidad muy grande, por lo que es muy típico usar submúltiplos como el mCi (10^{-3}), μCi (10^{-6}), nCi (10^{-9}) o pCi (10^{-12}).

- La actividad **es directamente proporcional al número de átomos presentes**, (cuanto mayor sea el nº de átomos existentes, mayor será el nº de desintegraciones).

$$\text{actividad} = \lambda \cdot N \quad [\text{ecuación 2}]$$

En esta expresión λ (lambda) es la **constante de desintegración**, que representa la probabilidad de desintegración por segundo, por cada átomo de la muestra existente. (Cuanto mayor sea, más rápidamente se desintegrará la sustancia). λ tiene unidades inversas de tiempo (t^{-1}). Si igualamos las ecuaciones 1 y 2 obtenemos la ley diferencial de la desintegración:

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

Operando e integrando la anterior ecuación obtenemos una relación entre el número de átomos existentes en la muestra y el tiempo transcurrido.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N; \quad -\frac{dN}{N} = \lambda \cdot dt; \quad \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda \cdot dt; \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t; \quad N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Por tanto:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Esta ecuación puede generalizarse a otras magnitudes que son proporcionales a la anterior. Podemos multiplicar a ambos lados por el factor $\frac{1 \text{ mol átomos}}{N_A \text{ átomos}}$ para convertir la expresión anterior a moles.

$$N \text{ átomos} \cdot \frac{1 \text{ mol átomos}}{N_A \text{ átomos}} = N_0 \text{ átomos} \cdot \frac{1 \text{ mol átomos}}{N_A \text{ átomos}} e^{-\lambda t};$$

$$n = n_0 e^{-\lambda t}$$

Si multiplicamos ambos lados por la masa molar tendremos masa en ambos lados:

$$n \text{ moles} \cdot \frac{M_{\text{molar}}}{1 \text{ mol átomos}} = n_0 \text{ moles} \cdot \frac{M_{\text{molar}}}{1 \text{ mol átomos}} \cdot e^{-\lambda t};$$

$$m = m_0 e^{-\lambda t}$$

La actividad presenta también un decaimiento exponencial. Como $A = -\frac{dN}{dt}$ y $N = N_0 e^{-\lambda t}$, si derivamos obtendremos:

$$A = -\frac{dN}{dt} = -\frac{d(N_0 e^{-\lambda t})}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t};$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Donde se ha introducido la actividad inicial A_0 , la actividad a tiempo 0, que es $A_0 = \lambda N_0$. Resumiendo:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}; \quad n = n_0 e^{-\lambda t}; \quad m = m_0 e^{-\lambda t}; \quad A = A_0 e^{-\lambda t}$$

- **Periodo de semidesintegración (T o $T_{1/2}$):** es el tiempo que debe transcurrir para que **una cantidad** determinada de sustancia radiactiva **se reduzca a la mitad**. Se representa con T (o $T_{1/2}$) y se mide en unidades de tiempo. Para deducir su expresión simplemente sustituimos en la expresión anterior que para $t=T$, $N=N_0/2$

$$\ln \frac{N_0/2}{N_0} = -\lambda T; \quad -\ln 2 = -\lambda T; \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

- **Vida media (τ):** Es el tiempo que tarda un núcleo cualquiera en desintegrarse por término medio. (*¡¡ Ojo!! No confundir con periodo de semidesintegración*). Este concepto es estadístico y se calcula a partir de una muestra amplia de núcleos radiactivos. Para ello calculamos el tiempo total de vida de la muestra dividido entre el número total de núcleos (N_0). Eso se escribiría matemáticamente como:

$$\tau = \frac{\text{tiempo total de vida de la muestra}}{\text{número total de núcleos de la muestra } (N_0)}$$

Para hallar el tiempo total de vida de la muestra, consideremos que, a $t=0$, están todos los núcleos sin desintegrar. Transcurre el tiempo y en un instante t se desintegran una pequeña cantidad de núcleo, que podemos representar por dN . Esos núcleos que se desintegran han vivido cada uno un tiempo t y, por tanto,

el tiempo total que han vivido todos esos núcleos será $t+t+t+\dots+t$ (dN veces), es decir, $t \cdot dN$. Para hallar el tiempo total vivido por la muestra sumamos (integramos) la cantidad anterior entre el número inicial de núcleos, N_0 , y 0, la cantidad final.

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} t dN}{N_0} = \frac{1}{N_0} \int_0^{N_0} t dN = \frac{1}{N_0} \int_{\infty}^0 t(-\lambda N dt)$$

Donde hemos sustituido dN por $-\lambda N dt$ y al cambiar la variable de integración hemos cambiado los límites.

Para $N=0$, $t=\infty$ y para $N=N_0$, $t=0$. Si sustituimos N por su expresión ($N = N_0 e^{-\lambda t}$) resulta:

$$\tau = -\frac{1}{N_0} \lambda N_0 \int_{\infty}^0 t e^{-\lambda t} dt = -\lambda \int_{\infty}^0 t e^{-\lambda t} dt$$

Tenemos que integrar por partes, denominando:

$$\left\{ \begin{array}{l} u = t \\ dv = \int e^{-\lambda t} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} du = dt \\ v = -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \end{array} \right\}$$

$$\tau = -\lambda \left[t \left(-\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \right) \right]_{\infty}^0 + \lambda \int_{\infty}^0 -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} dt = 0 + \lambda \left[\frac{1}{\lambda^2} e^{-\lambda t} \right]_{\infty}^0 = \frac{1}{\lambda}$$

La vida media es la inversa de la constante de desintegración.

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

6 Reacciones nucleares:

Se pueden conseguir artificialmente transformaciones en los núcleos atómicos "bombardeándolos" con partículas (α , p^+ , n , etc). El núcleo absorbe (capta) dicha partícula y emite otras, transformándose así en otro elemento diferente (puede llegar incluso a romperse en varios núcleos más pequeños).

El estudio de estas reacciones lo inició Rutherford en 1919, al bombardear nitrógeno con partículas α , y observar que aparecía oxígeno y se desprendían protones. En 1934, el matrimonio Joliot-Curie, bombardeando boro con partículas α , observaron que el elemento resultante, N-13, volvía a desintegrarse por sí solo, dando lugar a C-13. Habían conseguido fabricar un elemento radiactivo. Actualmente se fabrican muchos isótopos radiactivos, con amplias utilidades en industria y medicina (radioterapia, tratamiento de cáncer).

En toda reacción nuclear se van a conservar (además de energía y cantidad de movimiento, como en toda colisión)

- La carga eléctrica total antes y después del choque.
- El número total de nucleones (ΣA)
- La suma de los números atómicos (ΣZ)

La masa, sin embargo, no se va a conservar, ya que parte de la masa se convierte en energía (defecto másico), ya sea en forma de fotones, o como energía cinética de las partículas resultantes.

6.1 Energía de la reacción

Es la energía que se absorbe o se desprende en la reacción nuclear. Se debe a la transformación de parte de la masa de las partículas en energía. Así, se calculará a través del defecto másico mediante la ecuación de Einstein:

$$E_{\text{reacción}} = \Delta m \cdot c^2, \text{ siendo } \Delta m = \Sigma(\text{Masa de productos}) - \Sigma(\text{masa de reactivos})$$

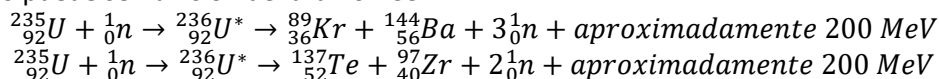
Las energías desprendidas en las reacciones nucleares son del orden de los MeV por cada núcleo que reacciona. Es una energía muy grande si la comparamos con la obtenida mediante reacciones químicas (del orden de eV por cada molécula que reacciona). También, para poder penetrar en el núcleo, la partícula que choque con él deberá tener una energía del mismo orden (MeV), sobre todo si tiene carga +. Estas grandes energías no se consiguieron en los laboratorios hasta la invención de los aceleradores de partículas (hemos visto su funcionamiento en el tema de electromagnetismo). Para estudiar la viabilidad de una reacción nuclear:

- Si $E_{\text{reacción}} < 0$, la reacción es exotérmica, y se producirá naturalmente.
- Si $E_{\text{reacción}} > 0$, la reacción es endotérmica, y no se producirá naturalmente. Habrá que suministrar energía a las partículas para que se dé la reacción.

7 Fisión nuclear.

Un proceso de fisión nuclear consiste en la escisión o rotura de un núcleo pesado (U, Th,...) en dos de masa intermedia más estables, desprendiéndose una gran cantidad de energía. El proceso se puede originar cuando un neutrón choca contra el núcleo, pasando éste a un estado energético excitado, del cual cae por ruptura en los núcleos resultantes. En el proceso se producen también neutrones.

Un ejemplo puede ser la fisión del uranio-235:



7.1 Reacción en cadena.

Una **reacción nuclear en cadena** o auto mantenida es una sucesión indefinida de fisiones nucleares, lo cual requiere que, en promedio, por lo menos uno de los neutrones resultantes de cada fisión llegue a desencadenar otra fisión. Si por los neutrones emitidos en una reacción se provoca una nueva, el proceso se mantiene controlado, pero si cada neutrón provoca una nueva fisión partiendo de una se producirán 3, después 9 y el proceso crecerá rápidamente y se producirá una reacción incontrolada (*Así se produce en la bomba atómica*).

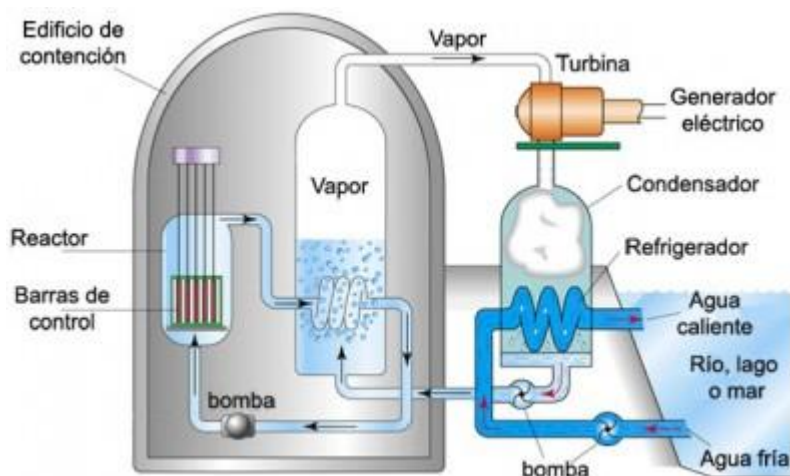
7.2 Masa crítica.

En la reacción en cadena, son determinantes aspectos tales como el tamaño, la forma y la masa de la materia reaccionante. Teniendo presente las enormes distancias relativas que separan los núcleos, se intuye que si el «combustible» donde se ha iniciado una reacción en cadena tuviera forma de hilo, la reacción se extinguiría, pues la mayoría de neutrones inicialmente liberados escaparían sin chocar con ningún núcleo de material fisible; dicho de otro modo, **existen un tamaño crítico y una masa crítica para el combustible nuclear, por debajo de los cuales no puede producirse la reacción en cadena**. En general, para cada material fisible y cada forma o disposición del mismo hay unos determinados masa y tamaño críticos.

7.3 Reactores nucleares de fisión.

El reactor nuclear es un dispositivo que permite mantener y controlar una reacción de fisión en cadena como fuente de energía térmica o radiante. Para ello la reacción de fisión tiene que mantenerse bajo control, de forma que los neutrones producidos sean detenidos en grado suficiente para que la reacción no transcurra violentamente. Ello se consigue con las **barras de control** (absorbentes de neutrones: bario o cadmio) que se ajustan para mantener constante el número de neutrones. La energía de los neutrones también es importante porque sólo los neutrones lentos son adecuados para nuevas reacciones. Frenarlos se consigue mediante un **moderador** que es una sustancia empleada para frenar los neutrones rápidos producidos en las fisiones y convertirlos en neutrones lentos ("térmicos"), capaces de provocar nuevas fisiones. Los reactores están proyectados para utilizar esencialmente los neutrones térmicos (lentos), cuya energía media es del orden de 0,025 eV; ahora bien, los neutrones resultantes de las fisiones, que deben alimentar la reacción en cadena, poseen una energía media muy alta, de 2 MeV, o sea, hay un predominio de los rápidos. Para reducir su energía, hay un procedimiento: la dispersión o "choque elástico" de los neutrones con nucleidos cuyo número másico sea bajo (agua, agua pesada: con deuterio en vez de hidrógeno, grafito, dióxido de carbono, berilio, etc.), de modo que los primeros vayan cediendo en cada choque una parte de su energía, hasta que ambos, neutrones y moléculas del moderador, posean la misma velocidad y energía cinética (equilibrio térmico).

En cuanto al proceso, las fisiones provocan un flujo de energía radiante y cinética, absorbida mayormente en forma de calor por el **refrigerante**, (líquido, generalmente, agua y que éste transfiere fuera de la vasija, hasta que se alcanza un equilibrio dinámico entre aportación y extracción de calor (reactor en estado crítico). El calor se utiliza para generar energía eléctrica.



El **principal inconveniente de las reacciones de fisión** es que, dado que la **mayoría de residuos radiactivos permanecen activos durante años o incluso milenios es imposible su eliminación**. Para almacenarlos hasta su estabilización final, hay que considerar cualquier imponderable (defectos en el envasado, guerras, cataclismos naturales). La solución más segura que se ha hallado consiste en levantar barreras sucesivas contra su eventual dispersión. Así, los residuos de larga vida y alta actividad se condensan o vitrifican; luego se encierran en contenedores de acero especial o cobre de 5 a 10 cm de espesor; después, se acumulan en pozos horadados en galerías de formaciones graníticas o salinas, a una profundidad de 300 a 1.000 m.

8 Fusión nuclear.

La fusión nuclear es una reacción consistente en la unión de dos núcleos atómicos ligeros para formar otro más pesado con un desprendimiento considerable de energía, puesto que la masa del núcleo obtenido es menor que la de los núcleos reaccionantes. Los núcleos se deben aproximar lo suficiente para que las fuerzas nucleares atractivas, superen la repulsión eléctrica de los protones por lo que previamente se debe suministrar esa energía a los núcleos que reaccionan. Una vez conseguido iniciar la reacción, esta se puede mantener puesto que la energía producida puede excitar nuevos núcleos y originar una reacción en cadena.

Ejemplos: ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$; ${}^2_1\text{H} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H}$

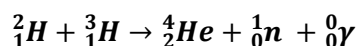
8.1 Ventajas de la fusión.

Las principales ventajas de la fusión nuclear frente a la fisión son:

- Produce (producirá) mayor rendimiento energético.
- Los productos originados no son radiactivos, con lo cual es una energía más “limpia” que la de fisión. Además, puede detenerse en cualquier momento (la parada del reactor de fisión debe ser planificada).
- Los reactivos son abundantes y fáciles de obtener (deuterio y tritio pueden extraerse del agua de mar).

8.2 Reactores nucleares de fusión.

La fusión nuclear, explicada por Hans Bethe en 1938, tiene lugar en el Sol, en las estrellas y en la explosión de una bomba H, pero no es fácil producirla bajo control. La principal reacción de fusión sobre la que hoy se trabaja ocurre entre un núcleo de deuterio (D) y otro de tritio (T), con producción de helio, un neutrón y radiación γ .



Para ello debemos superar 3 dificultades básicamente:

- La primera condición para poder efectuar dicha reacción es vencer la repulsión eléctrica que existe entre D y T, dotándolos para ello de energía cinética, o sea, calentándolos suficientemente como para poder superar esa repulsión.
- La segunda condición es la de obtener una densidad mínima de dichos núcleos que posibilite múltiples fusiones
- La tercera consiste en confinar esta masa de núcleos a altísima temperatura durante un cierto tiempo, para que la energía producida compense, por lo menos, la que se ha empleado en provocar la reacción.

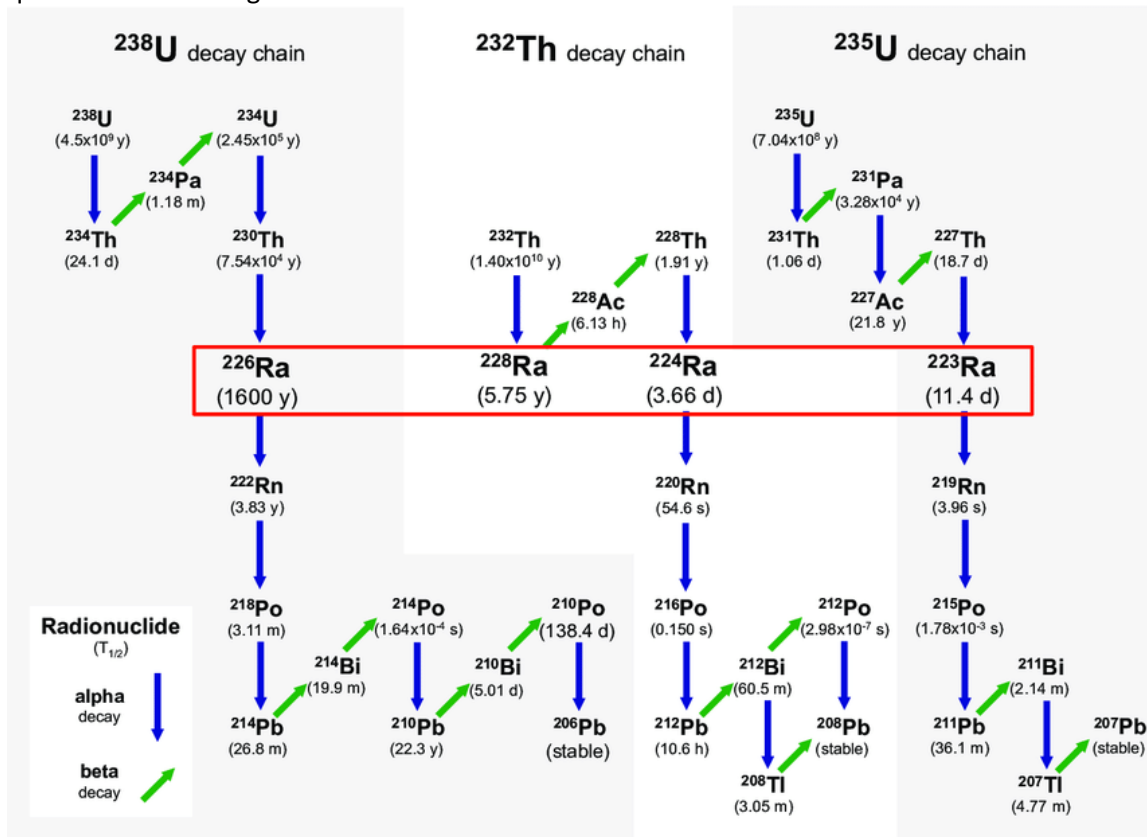
Un reactor nuclear en el que ocurra una reacción de fusión que produzca más energía de la que consume sigue siendo un objetivo aún inalcanzado. Desde 1952 se experimenta con reactores (Stellarator, Tokamak, etc.), que, paulatinamente, se van acercando a dicho criterio, a partir de un plasma de núcleos de deuterio y tritio (reacción D-T). Las dificultades empiezan con los materiales del reactor: a temperaturas de decenas de millones de grados no hay material que resista; para evitar el contacto del **plasma** (mezcla de núcleos y electrones arrancados de los átomos debido a la alta temperatura) con las paredes, se suspende el plasma en el vacío confinándolo magnéticamente. El reactor tiene un espacio sin aire de forma toroidal (como un “donut” vacío por dentro) donde se introduce el deuterio y el tritio y se los somete a la acción de una corriente eléctrica y de un campo magnético generado por grandes electroimanes que envuelven el reactor; así, se obtiene un plasma en forma de toro denso, concéntrico al toro que forma la pared del reactor y sin contacto con éste, que gira aceleradamente y se calienta; luego se le proyectan haces de radiaciones, hasta alcanzar temperaturas del orden de centenares de millones de grados: la reacción D-T tiene lugar, pero, o bien dura demasiado poco o bien la densidad es insuficiente. En 2035 se prevé que empiece a funcionar el proyecto de fusión fría ITER europeo. Más información en <https://goo.gl/wFmwkW>.

9 Series Radiactivas

Cuando un núcleo se va desintegrando, emite radiación y da lugar a otro núcleo distinto también radiactivo, que emite nuevas radiaciones. El proceso continuará hasta que aparezca un núcleo estable, no radiactivo. **Todos los núcleos que proceden del núcleo inicial (núcleo padre) forman una serie o cadena radiactiva.** Se conocen **cuatro series o familias radiactivas**, tres de las cuales existen en la naturaleza ya que proceden de los radionúclidos primigenios. Se llaman radionúclidos primigenios a aquellos que sobreviven en la Tierra desde su formación. Esto se debe a que su semivida es comparable a la edad de la Tierra.

Nº Másico	Cadena del	Padre	Semivida (años)	Producto final
4n	Torio	Th-232	$1.41 \cdot 10^{10}$	Pb-208
4n+1	Neptunio	Np-237	$2.14 \cdot 10^6$	Pb-209
4n+2	Uranio-Radio	U-238	$4.51 \cdot 10^9$	Pb-206
4n+3	Uranio-Actinio	U-235	$7.18 \cdot 10^8$	Pb-207

Las tres series que existen en la naturaleza son la del Th-232, U-238 y Ac-227, la otra serie radiactiva es la del Np-297, que se ha extinguido, pero se puede producir artificialmente en las pruebas nucleares realizadas y por lo tanto ha vuelto aparecer esta cadena radiactiva. En cada serie todos los núcleos están relacionados, en la del Th-232, por ejemplo, todos los núcleos de la serie tienen números másicos iguales a 4n, siendo n un número entero cualquiera. En la tabla siguiente están las distintas series radiactivas.



10 Las fuerzas en la naturaleza. Interacciones fundamentales (resumen).

Cualquier fuerza de las existentes puede clasificarse de acuerdo con las teorías físicas actuales en uno de los siguientes tipos:

- Interacción gravitatoria.
- Interacción electromagnética.
- Interacción nuclear fuerte.
- Interacción nuclear débil.

Interacción gravitatoria.

Se produce entre cualesquiera partículas con masa. Tiene alcance infinito. Es responsable del movimiento planetario entre otros y viene descrita por la ley de gravitación de Newton (Actualmente Teoría General de la Relatividad de A. Einstein). Su intensidad decrece con el cuadrado de la distancia entre partículas y

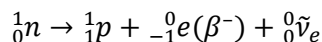
comparativamente es la menos intensa de las interacciones que se dan, aunque para nosotros sea la más apreciable por la gran masa de la Tierra. Se ha propuesto como partícula portadora del campo gravitatorio el gravitón, partícula sin masa y sin carga eléctrica, pero no se tiene constancia experimental de su existencia.

Interacción electromagnética.

Se produce entre partículas con carga eléctrica, bien en reposo (electrostática), o en movimiento (corriente eléctrica y magnetismo). La interacción puede ser atractiva o repulsiva en función de los signos de las cargas involucradas. Puede describirse mediante las ecuaciones de Maxwell y es responsable de la mayoría de los fenómenos macroscópicos que se detectan: rozamiento, fuerzas elásticas, enlaces entre átomos, fuerzas de contacto, luz, corriente eléctrica, imanes, etc. La intensidad decrece con el cuadrado de la distancia y su alcance es también infinito.

Interacción nuclear débil.

Es la responsable de la emisión radiactiva en la desintegración β. La desintegración β consiste en la emisión de un electrón en un proceso nuclear:



Las partículas que transmiten la interacción débil se llaman partícula W (de weak: débil) y Z. El alcance de este tipo de interacción es muy pequeño, limitándose al tamaño de un nucleón (o sea una distancia más pequeña que la del núcleo).

No fue explicada hasta el año 1.967 en que Abdus Salam, Steven Weinberg y S. Glashow propusieron una teoría que unía esta interacción con la electromagnética (teoría de unificación electrodébil), recibieron el Nobel por ello en 1979.

Interacción nuclear fuerte.

Se introdujo para explicar la estabilidad del núcleo atómico. Es la fuerza que une entre sí los nucleones. En realidad, une quarks entre sí formando protones y neutrones. La partícula mediadora en este proceso se denomina gluón.

La intensidad de estas fuerzas es muy grande, pero su alcance es limitado al tamaño del núcleo atómico (10⁻¹⁵ m). No se ha conseguido hasta la fecha una teoría que explique su relación con los otros tipos de interacción. De hecho, una de las principales líneas de la investigación en Física es la obtención de una **teoría del campo unificado** que explique la existencia de los cuatro tipos de interacción. Aunque se ha avanzado mucho en este sentido, aún quedan por resolver bastantes dificultades.

Tipo de interacción	Alcance	Intensidad a 10 ⁻¹³ cm en relación a la fuerza nuclear fuerte	Partículas transmisoras	Masa en reposo (GeV)	Espín	Carga eléctrica	Observaciones
Gravedad	Infinito	10 ⁻³⁸	Gravitón	0	2	0	Conjeturado
Electromagnetismo	Infinito	10 ⁻²	Fotón	0	1	0	Observado directamente
Nuc. débil	<10 ⁻¹⁸ m	10 ⁻¹³	Bosones vectoriales W ⁺	81	1	+1	Observados directamente
			W ⁻	81	1	-1	
			Z ⁰	93	1	0	
Nuc. fuerte	<10 ⁻¹⁵ m	1	Gluones	0	1	0	Confinado siempre

Uno de los avances más interesantes de la física de los últimos años del siglo XX ha sido la demostración de que a altas energías (o temperaturas) las cuatro fuerzas tienden a unificarse. En particular los experimentos del CERN, laboratorio europeo de partículas han demostrado que la fuerza débil y la electromagnética se funden en la fuerza electrodébil a energías por encima de 100.000 millones de eV (100 GeV). Esa energía corresponde a una temperatura de 4 billones de veces la temperatura ambiente y es la que se supone que tenía el Universo a los 10⁻¹⁰s de producirse el big-bang. Los hallazgos del CERN provocan la expectativa de que la fuerza fuerte se una con la electrodébil a 10¹⁵ GeV en una teoría de gran unificación (GUT) y que a una energía de 10¹⁹ GeV la fuerza de la gravedad se les una para formar una teoría del todo (TDT o TOE : Theory of everything). Lamentablemente los mayores aceleradores de partículas existentes alcanzan una energías máximas de unos 2000 GeV, por lo que ni ahora ni en un futuro es previsible que se alcancen las energías necesarias para comprobar así estas teorías. Para salvar estas dificultades se intenta recurrir a observaciones cosmológicas. La información ha seguido también el camino inverso, se utilizan los aceleradores de partículas para comprobar predicciones cosmológicas.

11 Modelo estándar

Es una teoría relativista de campo cuánticos desarrollada entre 1970 y 1973 basada en la idea de la unificación de todas las fuerzas (teoría del todo) que describe la estructura de la materia con un conjunto de partículas elementales que interactúan entre sí con las 4 interacciones fundamentales conocidas (excepto la gravedad cuya principal teoría, la relatividad general, no encaja con la mecánica cuántica). Forman parte de esta teoría la **electrodinámica cuántica** (unión del electromagnetismo con la cuántica, hecho por, entre otros, Dirac, Pauli, Heisenberg, Feynman), que se unió con la fuerza nuclear débil en la **teoría electrodébil** (Glashow, Weinberg, Salam) y finalmente la **Cromo dinámica cuántica** (que incluye la fuerza nuclear fuerte, con Fritzsche, Gell-Mann, Leutwyler, y luego por t'Hooft y otros). Veamos que partículas involucra.

Partículas subatómicas:

Se pueden clasificar, según su **spin**, en:

- **Bosones:** Tienen **spin entero**, y por tanto, no están sometidos al principio de exclusión de Pauli, por lo que 2 bosones pueden tener el mismo estado cuántico. Ejemplo: el fotón. Según el modelo estándar los bosones son 4 y son conocidos como bosones portadores, ya que son las partículas portadoras (o intermediadoras) de las 4 interacciones fundamentales de la naturaleza. Sus datos son:

Partícula	Símbolo	m_0 (GeV/c ²)	Carga	Spin	Interacción
Fotón	γ	0	0	1	electromagnética
Bosón W	W^\pm	80,4	± 1	1	Nuclear débil
Bosón Z	Z	91,187	0	1	Nuclear débil
Gluón	g	0	0	1	Nuclear fuerte

Faltarían en esta tabla otros 2 que hoy por hoy tienen el carácter de **partículas hipotéticas**

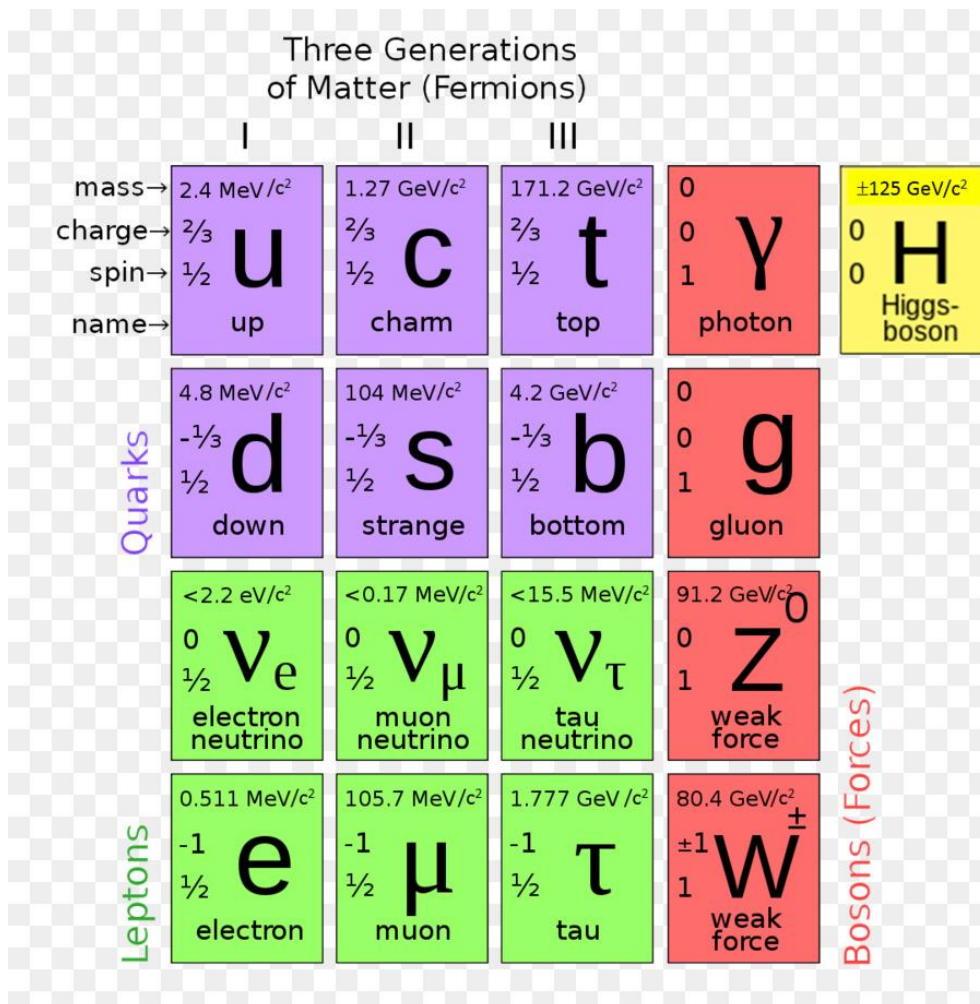
(conjeturadas teóricamente, pero sin confirmación): el **gravitón**, que sería el bosón intermediario de la fuerza gravitatoria, de spin 2 y masa nula, y el **Bosón de Higgs**, que sería el que les proporcionaría masa a todas las partículas elementales (pues por consideraciones de simetría todas deberían tener 0 de masa). El 4 de julio de 2012, el CERN anunció la observación de una nueva partícula "consistente" con el bosón de Higgs.

- **Fermiones:** Tienen **spin semientero** y por tanto obedecen al principio de exclusión de Pauli. Ejemplo: electrón, protón y neutrón, las 3 partículas constituyentes del átomo. En el modelo estándar existen dos tipos de fermiones fundamentales, los **leptones** y los **quarks**:
 - **Leptones:** Son partículas elementales (no tienen estructura interna) que no están sometidas a la fuerza nuclear fuerte. *Se pueden definir como un fermión fundamental sin carga hadrónica o de color.* Todos son fermiones (spin semientero). En el modelo estándar se proponen 6 leptones. Son el electrón (e), el muon (μ) y la partícula tau (τ) y sus 3 neutrinos asociados, el electrónico ν_e , el muónico ν_μ y el neutrino tauónico ν_τ . Los neutrinos, como su propio nombre indica, son neutros a diferencia de sus partículas de referencia, que son de carga negativa (-e). Todas, es decir, las seis partículas, tienen su correspondiente antipartícula (como el positrón o el antineutrino electrónico). Los leptones cargados tienen dos estados de espín posibles ($\pm 1/2$), mientras que se observa una sola helicidad en los neutrinos (todos los neutrinos son levógiros y todos los antineutrinos son dextrógiros).
 - **Quarks:** son los fermiones elementales masivos que interactúan con la fuerza nuclear fuerte. Forman los hadrones. Los quarks, por tanto, son las únicas partículas fundamentales que interactúan con las cuatro fuerzas fundamentales. Son partículas de espín $1/2$. Hay seis tipos o sabores distintos de quarks cada uno "portador" de un número cuántico del modelo de quarks.

Nombre	Alias (traducción)	Número cuántico
Quark u	up (arriba)	Isospin +1/2
Quark d	down (abajo)	Isospin -1/2
Quark c	charm (encanto)	encanto +1
Quark s	strange (extraño)	extrañeza -1
Quark t	top/truth (cima/verdad)	topness (superioridad) +1
Quark b	bottom/beauty (fondo/belleza)	bottomness (inferioridad) -1

También se habla a veces de **Hadrones**, aunque **no son realmente partículas elementales**, pues están constituidas por otras que, si lo son, los **quarks**. Están sometidas a la fuerza nuclear fuerte. Se pueden diferenciar en 2 grupos:

- **Mesones:** Formados por un quark y un antiquark.
- **Bariones:** Formados por un grupo de 3 quarks. Ejemplo: Protón, neutrón.



Nota sobre la masa de las partículas: Observa que sus masas se miden, tal como indica la ecuación $E=mc^2$, en unidades de $m=E/c^2=GeV/c^2$. Así, un eV/c^2 sería la masa que tendría por energía al aniquilarse completamente $1\text{ eV}=1,6\cdot 10^{-19}\text{ J}=mc^2=m(2,99792458\cdot 10^8\text{ m/s})^2$, de donde $m=1,78\cdot 10^{-36}\text{ kg}$. Esa sería su equivalencia $1\text{ eV}/c^2=1,78\cdot 10^{-36}\text{ kg}$. Un GeV/c^2 será 10^9 veces mayor, o sea, $1,78\cdot 10^{-27}\text{ kg}$, del orden de la masa de un protón. La ventaja de expresar la masa de las partículas en múltiplos del electrón voltio es que cuando hablamos de su aniquilación o del costo de producción de estas, el paso de energía a masa es directo. Es decir que si se ha destruido un electrón se habrán generado 511 keV de energía ya que la masa de esa partícula es de $511\text{ keV}/c^2$ que es un valor idéntico al de su energía en reposo. Por eso, frecuentemente se omite poner c^2 en las unidades y se habla de electronvoltios tanto si nos referimos a masa como a energía. Ver <https://goo.gl/z78TVM>.

FÍSICA RELATIVISTA (UNIDAD 10 DE EDITEX)**1 Sistemas de referencia inerciales y no inerciales.**

En mecánica newtoniana, un sistema de referencia inercial (SRI) es un sistema de referencia en el que las leyes del movimiento cumplen las leyes de Newton y, por tanto, la variación del momento lineal (la cantidad de movimiento, \vec{p}) de una partícula es igual a la suma de las fuerzas reales que actúan sobre ella (o como lo expresamos más habitualmente, la suma de fuerzas es igual a la masa por la aceleración), es decir, un sistema de referencia inercial (SRI) es aquel en el que:

$$\sum \vec{F}_{reales} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m\vec{a}; \quad \sum \vec{F}_{reales} = m\vec{a}$$

Si un sistema se mueve con v =constante con respecto a un SRI también será inercial. Vamos a intentar demostrarlo y descubriremos el principio de relatividad de Galileo.

Estamos interesados en obtener las ecuaciones que transformen las coordenadas de posición, velocidad y aceleración, de un objeto situado en un punto A, de un sistema de referencia OXYZ a otro O'X'Y'Z'.

Sea un sistema de referencia OXYZ, que en principio supondremos que está en reposo, y otro O'X'Y'Z', que se mueve con un MRU de velocidad " v_0 ", y para simplificar las cosas, en la dirección y sentido del eje X. En el dibujo se han representado sólo dos ejes, pero es igual de válido para los tres. Basta ver el dibujo para darse cuenta que se verifica la relación vectorial:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{OO'} = \vec{r}' + \vec{v}_0 t$$

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{v}_0 t \quad [\text{ec. 1}]$$

Esta ecuación vectorial se traduce en tres escalares (una en cada eje), a la que añadiremos otra de "sentido común" y es que el tiempo es absoluto y fluye por igual para los dos observadores inerciales, en la mecánica Newtoniana.

$$\text{Transformación de Galileo} \begin{cases} x' = x - v_0 t \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

Si derivamos en la expresión [ec 1] obtenemos la ecuación vectorial:

$$\frac{d\vec{r}'}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dt} - \vec{v}_0$$

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}_0 \quad [\text{ec. 2}]$$

Siendo v la velocidad del punto A respecto del sistema O y v' la velocidad de ese mismo punto A respecto del O' y v_0 es la velocidad del sistema O' respecto del O (por eso no lleva prima). Esa ecuación vectorial la podemos escribir, igual que antes, en 4 ecuaciones escalares:

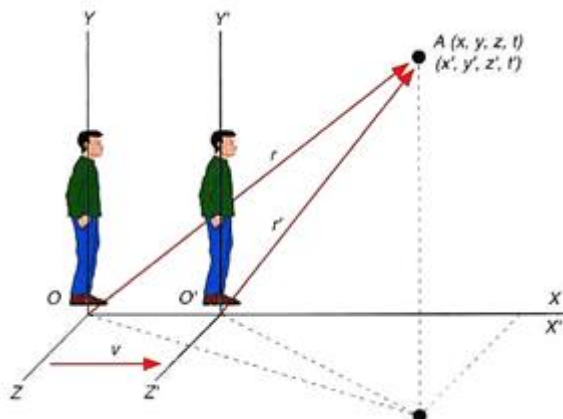
$$\text{Transformación de Galileo} \begin{cases} v'_x = v_x - v_0 \\ v'_y = v_y \\ v'_z = v_z \\ t' = t \end{cases}$$

La ecuación anterior es la regla clásica de adición de velocidades. Si estamos parados sobre la superficie terrestre (sistema OXYZ) y pasan 2 vehículos en el mismo sentido, el primero, un camión, con 120 km/h (sería nuestro punto A) y el segundo, un coche, con 100 km/h que va detrás (nuestro O'X'Y'Z') (esas velocidades están medidas con respecto a la carretera, nuestro sistema O). Podemos decir que la velocidad del 1er vehículo con respecto al 2º sería:

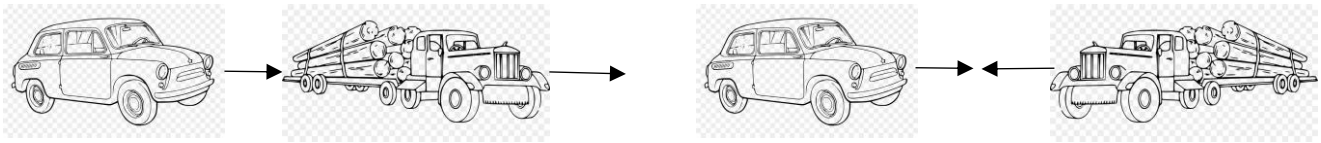
$$v'_x = v_x - v_0 = 120 - 100 = 20 \text{ km/h}$$

Desde el vehículo 2 el 1º lleva una velocidad que es la diferencia, 20 m/s. Si el segundo va en sentido contrario (hacia el coche, van al encuentro), su velocidad respecto de la carretera (sistema O) sería -120 km/h y su velocidad respecto al sistema móvil O' (vehículo 2) sería:

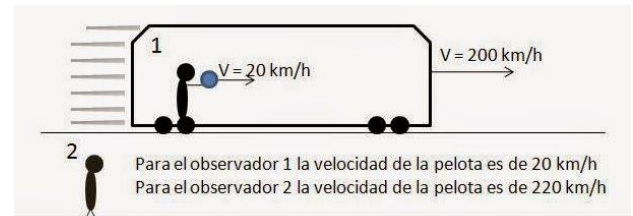
$$v'_x = v_x - v_0 = -120 - 100 = -220 \text{ km/h}$$



Es decir, el señor del coche ve acercarse el camión a una velocidad descomunal de 240 km/s, ya que ambas velocidades se suman (es negativa porque va en sentido negativo)



Este principio funciona perfectamente y también se puede aplicar a la situación descrita al lado. Si lanzamos un objeto dentro un tren con v' (con respecto al vagón, sistema O') de 20 km/h, con respecto al sistema O , a un observador exterior al vagón, su velocidad sería $v_x = v_x' + v_0 = 20 + 200 = 220$ km/h. Volveremos a esta expresión un poco más tarde y con la luz.



Ya tenemos una relación para las velocidades. Obtendremos ahora otra para las aceleraciones a y a' del punto A. Para ello derivamos las velocidades de la ec. 2.

$$\frac{d\vec{v}'}{dt} = \frac{d\vec{v}}{dt} - \frac{d\vec{v}_0}{dt}$$

$$\vec{a}' = \vec{a} \quad [\text{ec. 3}]$$

Recordemos que el sistema O' se movía con v_0 constante (MRU) con respecto al O . Por tanto, la aceleración de un objeto en ambos sistemas será la misma.

Si asumimos que el sistema en reposo $OXYZ$ era inercial (se cumplen en el las leyes de Newton, en especial $\vec{F} = m\vec{a}$) en el sistema $O'X'Y'Z'$ también se cumplirán las mismas leyes, puesto que las fuerzas serán iguales y la aceleración del cuerpo a' será la misma. Acabamos de demostrar que un sistema que se mueve con MRU con respecto a un SRI también es SRI. Si el sistema de referencia este acelerado con respecto a un inercial ya no es inercial (se llaman SRNI), porque la aceleración que mediríamos en él del cuerpo A sería:

$$\vec{a}' = \vec{a} - \vec{a}_0 \quad [\text{ec. 3}]$$

Y como las fuerzas son las mismas, si $f=ma$ en el sistema O no podría ser $F=ma'$ en el sistema O' , ya que las aceleraciones no serían las mismas.

En la superficie terrestre¹ se cumplen las leyes de Newton, ya que si dejamos caer un objeto su peso será igual a la masa del cuerpo por la aceleración que le produce, que será g . y si colocamos un péndulo suspendido veremos que se coloca vertical, tal que la suma de fuerzas reales que actúan sobre él, P y T , vale 0. Cualquier sistema que se mueve a velocidad constante sobre la superficie de la Tierra será también inercial, ya que aunque cambien las velocidades de los objetos lo único que aparece en la ecuación anterior es la aceleración, que es la misma. Así, si vamos en el AVE a 300 km/h de velocidad constante, la bolita del péndulo viajará a 300 km/h, pero seguirá vertical y $P=T$ y $a=0$.

En cambio, **un sistema de referencia no inercial (SRNI)** es aquel en el que no se cumplen las leyes de Newton se puede hacer un "truco" para reestablecer su "cumplimiento". Sabemos que $F=ma$ en el SRI y nos gustaría que $F=ma'$ en el SRNI. Usando la relación anterior:

$$F_{reales} = m\vec{a}, \text{ pero } \vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_0$$

$$F_{reales} = m\vec{a} = m(\vec{a}' + \vec{a}_0) = m\vec{a}' + m\vec{a}_0$$

$$F_{reales} - m\vec{a}_0 = m\vec{a}'$$

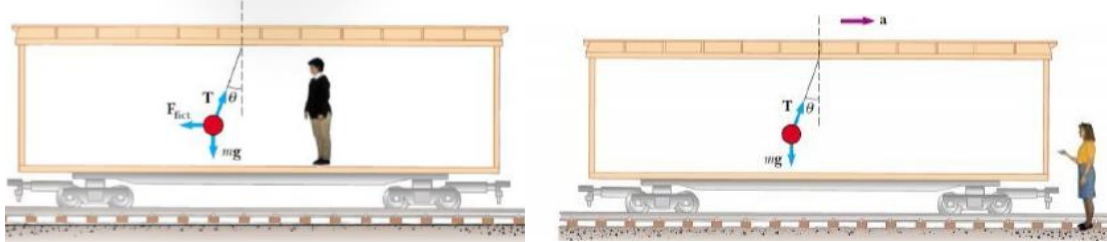
El término $-m\vec{a}_0$ tiene unidades de fuerza y se puede interpretar, dentro del sistema O' , como una fuerza real (aunque la llamaremos ficticia porque no aparece cuando nuestro sistema de referencia es un SRI). Si introducimos las fuerzas reales y las ficticias (o inerciales, que sería $m\vec{a}_0$) la segunda ley de Newton nos quedaría reestablecida:

$$\vec{F}_{reales} + \vec{F}_{ficticias} = m\vec{a}'$$

Por ejemplo, cuando el AVE del ejemplo anterior sale de la estación y empieza a coger velocidad, pasa de ser un SRI (cuando estaba en reposo) a ser un SRNI (al acelerar) y lo notaremos porque nuestro péndulo se irá hacia atrás formando un cierto ángulo (del sentido del movimiento del tren) de tal forma que, visto desde fuera del vagón, la suma de T y P daría ma (y por eso T se inclina). Pero el péndulo, con respecto al vagón, no tiene aceleración y sin embargo, al estar inclinado vemos que su suma de fuerzas no es cero. Vemos

¹ Hay una pequeña desviación de las leyes de Newton debida a la rotación de la Tierra (ver el péndulo de Foucault, por ejemplo). Por tanto, en sentido estricto, la Tierra no es un SRI.

que su ΣF no es cero y su aceleración sí. No se cumplen las leyes de Newton (es un SRNI, no hay problema) y para reestablecerlas (si queremos usar el sistema SRNI para hacer problemas) debemos inventarnos, dentro del vagón, una fuerza ficticia, F_{inercia} , que iría hacia atrás del tren, de módulo ma_{tren} y explicaría por qué el péndulo se inclina. En este SRNI, la suma de las 3 fuerzas, las 2 reales y la ficticia, darían 0 y las leyes de Newton volverían a reestablecerse. Desde fuera del tren, nuestro SRI, el péndulo se inclina porque él y el vagón tienen aceleración. Se cumplen las leyes de Newton sin introducir ninguna fuerza ficticia.

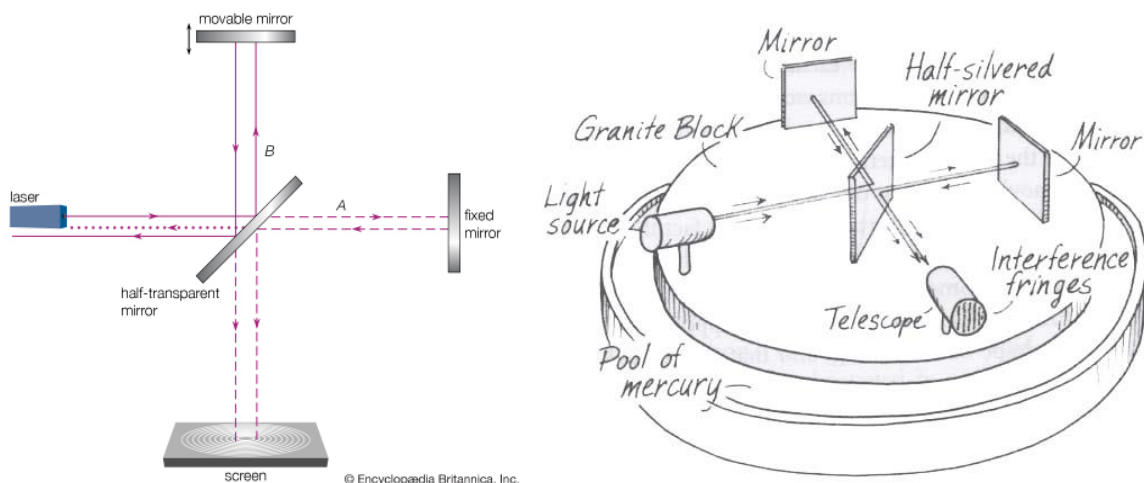


Como vemos, en los SRI es imposible distinguir si el sistema está en reposo o con MRU, ya que las leyes físicas de la mecánica son las mismas. Este es el principio de relatividad de Galileo.

2 Experimento de Michelson y Morley:

A mediados del siglo XIX, una vez que se había descubierto que la luz tiene naturaleza ondulatoria (experimento de la doble rendija de Young), quedaba el problema de detectar el éter, ya que hasta ese momento las únicas ondas conocidas eran las mecánicas y como éstas necesitaban un medio de propagación se pensaba que la luz, que se propagaba en el vacío, también tenía su medio de propagación, el éter, que

Y en principio se pensó, y aquí empiezan los problemas, en aplicar la transformación de Galileo, que tan bien funciona en mecánica, a la luz. Vivimos en un coche en movimiento, nuestra Tierra, con una velocidad de traslación alrededor del Sol ("inmóvil", SRI) de unos 30 km/s (Es fácil de hallar suponiendo órbita circular y que el radio de la órbita es 150 millones de km y se recorre la órbita en un año). Si enciendo una linterna (el camión) en la superficie terrestre y lo apunto en el sentido en que la Tierra se mueve alrededor del sol, según Galileo, la luz irá con respecto al éter en reposo (SRI) a c y por tanto con respecto a la Tierra (coche) a $c-30$, o sea, 299 970 km/s, pero si la linterna apuntase hacia atrás del sentido del movimiento de la Tierra la velocidad respecto a la Tierra (nosotros) sería $-c-30$, o sea, -300 030 km/s (300 030 km/s en valor absoluto, el signo indica el sentido). Como el éter lo llenaba todo, se podía considerar como un sistema de referencia fijo en donde se mueve la Tierra y la velocidad de la luz para un observador que se moviera con la Tierra (nosotros) sería distinta si la Tierra se mueve en dirección hacia la luz o se aleja de la luz.



En 1887, Michelson y Morley diseñaron un experimento famosísimo en la historia de la ciencia con el objetivo de medir esa diferencia de velocidad de la luz. Su aparato consiste en lanzar un rayo de luz, hacerlo pasar por un espejo semitransparente donde se bifurcará en 2 direcciones perpendiculares, A y B. los rayos que recorren esas direcciones chocan contra espejos situados a la misma distancia del semitransparente y hacen que los rayos vuelvan a ese espejo, que deja pasar a ambos hacia la pantalla. Si los rayos tardan lo mismo en hacer los 2 recorridos iguales (si van a la misma velocidad, en contra de los que pensaba Galileo) llegarán en fase y harán una interferencia constructiva. Si uno tarda más o menos que otro, lo que se esperaba, pues ambos forman 90° y uno puede ir en dirección al movimiento terrestre y el otro en dirección perpendicular) harán una interferencia de la que sabemos que al menos no será constructiva (al no tardar lo mismo no llegan en fase).

El experimento fue un fracaso (y por tanto le dieron el nobel de Física sólo a Michelson en 1907). Aunque el aparato se podía girar (flotaba sobre una piscina de mercurio para no notar ninguna vibración) por más vueltas que le daban no había ninguna variación en el patrón de interferencias de los 2 rayos perpendiculares. Se puede ver un símil con nadadores en <https://goo.gl/qTvsho>. (Por cierto, la idea del aparato es genial y se sigue usando en la actualidad para detectar, por ejemplo, ondas gravitacionales. Se llama interferómetro).

Además, la Física tenía otro problema: Hemos visto que **las leyes de la mecánica funcionan independientemente del SRI elegido, diremos que son invariantes bajo la transformación de Galileo, pero las leyes de Maxwell sobre el electromagnetismo no lo eran**. Se planteó en ese momento una situación muy incómoda para la física: o bien las transformaciones de Galileo no eran válidas al menos para la luz (y lo habían sido durante muchos años) o las recién estrenadas ecuaciones de Maxwell fallaban en algo.

Estos resultados no se podían explicar mediante la mecánica clásica, por lo que Einstein en 1905 publicó su teoría de la relatividad especial para sistemas inerciales, completada en 1916 cuando publicó la teoría de la relatividad general para los sistemas no inerciales.

3 Postulados de la teoría de la relatividad especial (Einstein, 1905)

Einstein optó por suponer que las ecuaciones de Maxwell estaban bien y era la transformación de Galileo la que no servía.

La teoría de la relatividad especial se basa en 2 postulados:

1^{er} Postulado (principio de relatividad): Las leyes de toda la Física (incluyendo el electromagnetismo) son las mismas cualquiera que sea el sistema de referencia inercial elegido, y además se representan con las mismas ecuaciones matemáticas. No hay ningún experimento, incluido el electromagnetismo, que te permita deducir si te mueves con MRU o estás en reposo. Por tanto, estos conceptos dejan de existir (Movimiento relativo)

2^o Postulado (invariancia de c): La luz siempre se propaga en el vacío con una velocidad constante c , que es independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor y del estado de movimiento del observador.

Si viajas en una nave espacial a $0,9c$ y ves pasar un rayo de luz por la ventana de la nave, medirás para él una velocidad de c , vaya el rayo en el mismo sentido que tu nave o en sentido contrario.

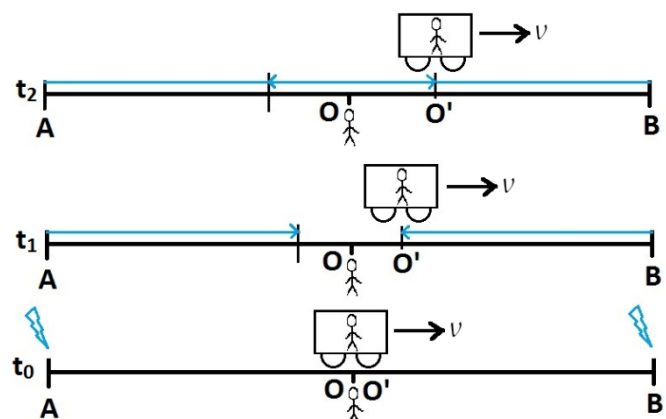
4 Consecuencias de la teoría de la relatividad.

4.1 La relatividad de la simultaneidad

La medición de tiempos e intervalos de tiempo implica el concepto de **simultaneidad**. En un sistema de referencia dado, un suceso es un acontecimiento con una posición y un tiempo definidos. Cuando decimos que despertamos a las siete de la mañana, queremos decir que dos sucesos (el despertar y que el reloj indicase 7:00) ocurrieron simultáneamente. El problema fundamental de la medición de intervalos de tiempo es éste: en general, dos sucesos que **son simultáneos en un sistema de referencia no lo son en un segundo sistema que se mueve respecto al primero**, aun cuando ambos sean sistemas inerciales.

Para entenderlo mejor vamos a reproducir un experimento mental del propio Einstein: Imaginemos un tren que se desplaza con una rapidez comparable a c , con velocidad uniforme. Caen dos rayos en la vía en 2 puntos marcados como A y B en la figura. Hay un observador cerca de las vías, situado en un punto O, equidistante de los puntos A y B, y otro observador que viaja en el centro del vagón, en el punto O', que también equidista de A y B en el momento de la caída de los rayos. Veremos que la caída de los rayos no es un fenómeno simultáneo para ambos observadores.

Cuando decimos que la producción de dos destellos de luz en A y en B es simultánea queremos decir que los rayos de luz que salen de los lugares A y B se reúnen en el punto medio O del tramo de vía que hay entre ellos. Para el observador situado en la vía ambos rayos caen simultáneamente, pues los 2 reflejos le llegan al mismo tiempo. Pero el observador situado en el vagón, en O', que en el

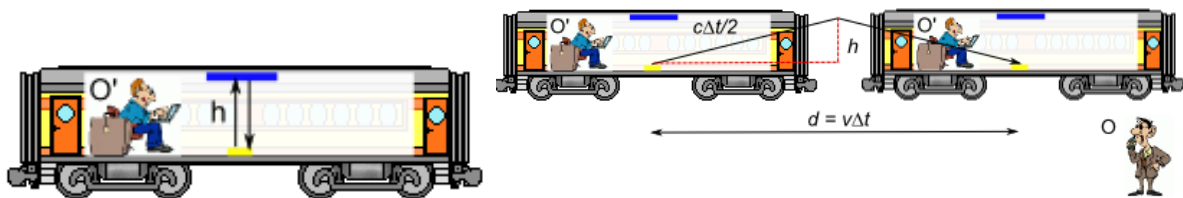


momento de caída de los rayos coincide con O, se mueve hacia la derecha con velocidad v . Aunque los 2 destellos viajan hacia él a velocidad c (recordar el 2º principio de la relatividad especial) él se mueve hacia el rayo que procede de B, va al encuentro del rayo B, por lo que lo verá antes que el rayo que procede de A, de modo que para este observador el destello B se ha producido antes que A. **Por consiguiente, sucesos que son simultáneos para un observador en la vía no lo son para un observador en el tren.** Todo esto significa que el **tiempo es relativo** para cada sistema de referencia y el intervalo de tiempo entre dos sucesos depende del sistema de referencia. La relatividad del tiempo es consecuencia de la existencia de una velocidad límite en la transmisión de señales.

Además, no existe base alguna para afirmar que un observador tiene razón y el otro está equivocado. De acuerdo con el principio de relatividad, ningún sistema inercial de referencia es más correcto que cualquier otro para la formulación de leyes físicas. Cada observador está en lo correcto en su propio sistema de referencia. En otras palabras, **la simultaneidad (y por tanto, el intervalo de tiempo entre 2 sucesos) no es un concepto absoluto.**

4.2 Dilatación de los intervalos de tiempo

Figura 1: El reloj de luz en un tren en movimiento visto por un observador dentro del tren (izquierda) y un observador en el andén (derecha).



Considera un tren que se mueve con velocidad v en movimiento uniforme rectilíneo (con respecto al andén de la estación). **El pasajero en el tren dispone de un reloj de luz**, que consiste en dos espejos colocados uno encima de otro a una **altura h** y un pulso de luz que viaja continuamente entre los dos espejos. El pasajero que viaja dentro del tren medirá que el tiempo que tarda la luz en subir y bajar entre los dos espejos es:

$$\Delta t_0 = \frac{2h}{c}$$

Al intervalos de tiempo Δt_0 se le denomina tiempo propio, ya que el inicio del suceso (partida del pulso de luz desde el suelo) y final del suceso (llegada al receptor del suelo) ocurren en el mismo lugar. **Se le pone el 0 porque el "reloj" de espejo está en reposo con respecto a este sistema de referencia.** Hay un solo marco de referencia en el que un reloj está en reposo, y existe un número infinito de ellos en el que está en movimiento. Por consiguiente, el intervalo de tiempo medido entre dos sucesos (por ejemplo, dos tics del reloj) que ocurren en el mismo punto en un sistema de referencia determinado es una magnitud más fundamental que el intervalo entre sucesos medidos en puntos diferentes. **Utilizamos el término tiempo propio para describir el intervalo de tiempo Δt_0 entre dos sucesos que ocurren en el mismo punto.**

Un observador en el andén verá este mismo fenómeno de manera distinta: para él la luz sale del espejo de abajo, pero llega al espejo de arriba después de un tiempo $t/2$ cuando el tren se ha desplazado una distancia $vt/2$ y otra vez al espejo de abajo después de un tiempo t cuando el tren se la desplazado una distancia vt (véase Figura 1). Para el observador en el andén, la luz recorre una trayectoria más larga y, dado que la velocidad de la luz es la misma que para el pasajero, habrá pasado más tiempo entre que la luz sale y llega otra vez al espejo de abajo.

Concretamente, la distancia que recorre la luz al subir es, por el teorema de Pitágoras:

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + h^2$$

de lo que podemos despejar t como:

$$\Delta t = \frac{2h/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Tiempo impropio Δt : El inicio (partida del pulso de luz desde el suelo) y final del suceso (llegada al receptor del suelo) ocurren en distinto lugar.

Podemos generalizar este importante resultado. En un sistema de referencia específico, supóngase que ocurren dos sucesos en un mismo punto del espacio. El intervalo de tiempo entre estos sucesos, medido

por un observador en reposo en este mismo sistema (al cual denominamos el sistema en reposo de este observador), es Δt_0 . En estas condiciones un observador en un segundo marco que se desplaza con rapidez constante v respecto al sistema en reposo medirá un intervalo de tiempo Δt , donde:

$$\Delta t = \frac{2d/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Como Δt es una **función creciente de v , que siempre es mayor que 1** diremos que **el intervalo de tiempo que se mide es mayor desde el sistema en movimiento, el tiempo se ha dilatado**. Observa sin embargo que para velocidades mucho más pequeñas que la velocidad de la luz, $v \ll c$, $\gamma \approx 1$ de modo que estos efectos relativistas son completamente despreciables en la vida cotidiana.

Piense en un reloj antiguo de péndulo en el que transcurre un segundo entre cada tic, medido por un observador en el sistema en reposo del reloj (en el tren del ejemplo); esto es Δt_0 . Si el sistema en reposo del reloj se desplaza respecto a observador de la vía, éste mide un tiempo Δt de más de un segundo entre cada tic. En pocas palabras, los observadores perciben que cualquier reloj marcha más despacio si se desplaza respecto a ellos. **Adviértase que esta conclusión es un resultado directo del hecho de que la rapidez de la luz en el vacío es la misma en ambos marcos de referencia.**

En las ecuaciones que siguen se usa un factor, denominado factor **gamma**²,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Este factor tiende a 0 cuando $v \rightarrow 0$, tiene a ∞ cuando $v \rightarrow \infty$ y siempre es ≥ 1 . Así,

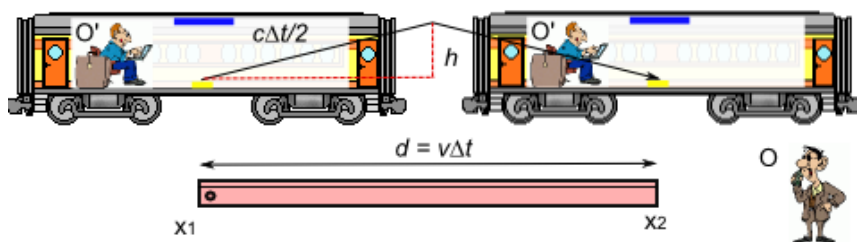
$$\Delta t = \gamma \Delta t_0$$

Un ejemplo clásico: Las partículas subatómicas de alta energía que llegan del espacio interactúan con los átomos de las capas altas de la atmósfera terrestre y producen partículas inestables llamadas muones. Un muón se desintegra con una vida media de $2,20 \cdot 10^{-6}$ s medido en un sistema de referencia en el que se halla en reposo. Si un muón se desplaza a $0.990c$ (aproximadamente $2,97 \cdot 10^8$ m/s) respecto a la Tierra, ¿cuál será su vida media medida por nosotros (un observador que se encuentra en la Tierra)?

S: $15,6 \cdot 10^{-6}$ s.

Nuestro resultado predice que la vida media del muón en el sistema de referencia terrestre (Δt) es alrededor de siete veces más larga que en el sistema de referencia del muón (Δt_0). Esta predicción se ha comprobado experimentalmente; de hecho, fue la primera confirmación experimental de la fórmula de dilatación del tiempo.

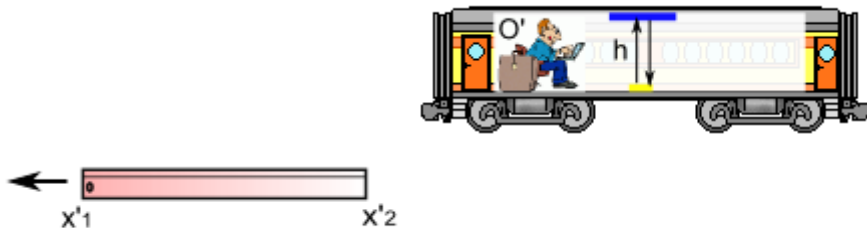
4.3 Contracción de las longitudes de los cuerpos:



Un fenómeno relacionado con el de la dilatación del tiempo es el de la **contracción de la longitud** de un objeto, cuando es medida desde un sistema de referencia respecto del cual se está moviendo. Imaginemos una regla en reposo respecto al observador O, cuya longitud es $l = x_2 - x_1$, donde x_1 es el punto en el que se emitió el destello desde el tren y x_2 , el punto donde el destello vuelve reflejado al suelo. **Esta distancia será la longitud propia de la regla, pues ha sido medida desde un SR respecto del cual la regla está en reposo, será l_0 .** Además, según O, es la misma que recorre el tren, que se desplaza con velocidad v , en el tiempo Δt , así que la longitud de la regla según O es:

$$l_0 = x_2 - x_1 = v\Delta t$$

Veamos ahora qué longitud medirá O', el pasajero a bordo del



² En algunos textos se define gamma de otra forma, con lo que cambian las ecuaciones.

tren. Según este observador, la regla se desplaza con una velocidad relativa de valor v (hacia atrás). Sin embargo, el tiempo transcurrido desde que ve pasar un extremo de la regla hasta que pasa el otro es el tiempo que él mide para el trayecto de ida y vuelta del destello de luz, que es Δt_0 . En consecuencia, la longitud que medirá para la regla es: $l = v\Delta t_0$

Pero como

$$\Delta t_0 = \frac{\Delta t}{\gamma} = \Delta t \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Entonces:

$$l = v\Delta t_0 = v\Delta t \sqrt{1 - v^2/c^2} = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} = \frac{l_0}{\gamma}$$

resulta que $l < l_0$, es decir, **la longitud de un objeto medida desde un sistema de referencia respecto al cual se mueve resulta contraída en la dirección del movimiento con relación a su valor propio**. Otra vez recordamos que una longitud medida en el sistema de referencia en el que el cuerpo está en reposo (el sistema en reposo del cuerpo) recibe el nombre de **longitud propia**, l_0 . En nuestro ejemplo la regla no se mueve respecto del sistema O y por tanto lo que mide en dicho sistema es su longitud propia l_0 . La longitud medida en cualquier otro sistema de referencia será menor que l_0 . **Este efecto se llama contracción de la longitud**.

Esta conclusión invalida la que se deriva de la transformación galileana, según la cual la distancia entre dos puntos del espacio es la misma para todos los observadores en movimiento rectilíneo y uniforme relativo.

Según la mecánica clásica el espacio es una invariante porque no depende del sistema de referencia elegido para medirlo, mientras que según la teoría de la relatividad depende del sistema de referencia elegido y por tanto de su estado de movimiento, de tal forma que la longitud de un cuerpo que se mueve, l , **se contrae** con respecto a la misma longitud, l_0 , medida desde un sistema con respecto al cual el cuerpo no se mueve, según la expresión:

$$l = \frac{l_0}{\gamma} = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Como $\gamma \geq 1$, $l < l_0$. A las demás dimensiones que no están en el sentido del movimiento no les ocurre nada. Por eso, **según la teoría de la relatividad, los cuerpos los veríamos muy alargados**.

Si volvemos al problema de los muones, podemos entender ahora porqué llegan a la tierra. Viajan a $0,990c$, por lo que si espacio y tiempo fuesen absolutos, recorrerían $s=0,990c \cdot \Delta t_0=6534$ m y no se detectarían en la superficie, en contra de lo que realmente ocurre. Visto desde la Tierra, su tiempo se ha dilatado $t' = \gamma t_0 = 7,09t_0$, recorriendo ahora 46300 m aproximadamente (llegan a la superficie). Visto desde el punto de vista del muon, es el espacio terrestre el que se está contrayendo, haciéndose 7,09 veces más pequeño, por lo que esos 10 km de altura a los que se forma el muon le parecen 1400 m, espacio que puede recorrer antes de desintegrarse en $2,2 \cdot 10^{-6}$ s.

Ejemplo: Una nave espacial pasa volando cerca de la Tierra con una rapidez de $0.990c$. Un miembro de la tripulación a bordo de la nave mide la longitud de ésta, y obtiene un valor de 400 m. ¿Qué longitud miden los observadores que se hallan en la Tierra? **S: 56,4 m**

4.4 **Aumento de la masa:**

Hay dos formas de medir la masa de un cuerpo. Una de ellas consiste en pesarlo, el valor así obtenido se denomina "masa gravitatoria" del objeto. La otra forma consiste en calcular el cociente entre la fuerza que se aplica al cuerpo y la aceleración que se le produce, según la segunda ley de Newton,

$$m = \frac{F}{a}$$

obteniendo un resultado que se llama "masa inercial". Ahora bien, para medir una aceleración, hay que hacer medidas de longitudes y de tiempos, luego si estas, como sabemos, dependen del sistema de referencia elegido y de la velocidad del objeto, está claro que el valor obtenido para la masa inercial también dependerá de dicha velocidad.

Einstein dedujo la siguiente expresión para la masa de una partícula en movimiento:

$$m = m_0 \gamma = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

donde m_0 es la '**masa en reposo**', valor de la masa medido en el sistema de referencia constituido por el propio objeto. De esta expresión se deduce que ningún objeto puede ser acelerado hasta alcanzar la

velocidad de la luz, puesto que cuando v se acerca a c , m se hace infinita y se requeriría una energía infinita para lograrlo. Por eso, los fotones tienen $m_0=0$, ya que viajan a c .

Nota sobre la masa inercial y gravitatoria:

En principio, la masa gravitatoria y la masa inercial son dos atributos de la materia muy diferentes. El primero es una medida de la intensidad con que un cuerpo atrae a otro por la acción de la gravedad (ley de la gravitación universal de Newton, $F = G \frac{m_{g1}m_{g2}}{r^2}$ y de esta $P = m_g g$ y el segundo es una medida de la resistencia a cambiar su estado de movimiento, es decir, la masa de $F = m_{inercial} a$. Si ambas coinciden, $m_g = m_i$, el movimiento de un cuerpo en caída libre es independiente de la masa, pues entonces $P=F$ y $m_g g = m_i a$, de donde $a = g$. Se ha comprobado experimentalmente que ambas tienen el mismo valor (entre 1889 y 1908 el barón húngaro Eotvos y colaboradores usaron la famosa balanza de torsión) y de hecho Einstein con su principio de equivalencia zanjó la discusión: un observador en una nave espacial, alejada de cualquier campo gravitatorio externo, ve caer dos objetos cualesquiera con la misma aceleración cuando el cohete se enciende, lo que implica que ambos caeran libremente con la misma aceleración en un campo gravitatorio.

4.5 **Energía relativista:**

Einstein obtuvo una expresión para la energía cinética de una partícula que se mueve:

$$E_c = mc^2 - m_0c^2 = \gamma m_0c^2 - m_0c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0c^2$$

Se puede demostrar que cuando v tiende a 0, la fórmula tiende a nuestro famoso $\frac{1}{2}mv^2$ (desarrollando la fórmula en una serie).

La ecuación de la energía cinética, la energía debida al movimiento de la partícula, incluye un término de energía, que depende del movimiento mc^2 (ya que m aumenta con v) y un segundo término de energía m_0c^2 que es independiente del movimiento. Al parecer, **la energía cinética de una partícula es la diferencia entre cierta energía total $E=mc^2$ y una energía m_0c^2 que tiene incluso cuando está en reposo**. Por consiguiente, podemos reformular la ecuación anterior como:

$$E = mc^2 = (mc^2 - m_0c^2) + m_0c^2 = E_c + m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma m_0c^2$$

En el caso de una partícula en reposo ($E_c=0$), vemos que $E=m_0c^2$. **La energía m_0c^2 asociada con la masa en reposo m_0 , y no con el movimiento, se conoce como la energía en reposo de la partícula.**

De hecho, tenemos pruebas experimentales directas de que la energía en reposo existe realmente. El ejemplo más simple es la desintegración de un pión neutro. Se trata de una partícula subatómica de masa en reposo m_π ; cuando se desintegra, desaparece y en su lugar aparece radiación electromagnética. Si un pión neutro no tiene energía cinética antes de desintegrarse, la energía total de la radiación una vez que se ha desintegrado resulta ser igual a exactamente $m_\pi c^2$.

Nota:

La teoría de la relatividad no termina aquí, pues de hecho se le llama restringida, porque sólo se dedica al estudio de cuerpos que se mueven respecto a sistemas inerciales, con MRU y velocidades cercanas a la de la luz. **Once años después de publicar esta teoría, Einstein expuso su teoría general de la relatividad** en la que incluye a los sistemas no inerciales, ampliando uno de los postulados de la anterior, indicando que las leyes de la física son válidas para todos los sistemas de referencia, cualesquiera que sean sus movimientos.

Hasta tal punto es importante la teoría general de la relatividad, que el estudio de la evolución del Universo se ha de realizar basándose en esta teoría, y a la mecánica cuántica. Con todo se ha de tener presente que la Teoría de la Relatividad General (y por tanto la restringida) es una teoría clásica, como lo es la mecánica de Newton.

Referencias:

- http://agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/24092013/8e/es-an_2013092412_9141319/NDOIAND-20080317-0001/especialsegeso.html
- Física Universitaria, Vol II-Sears, Zemansky, Young y Freedman. Capítulo 37.
- Apuntes de Eduardo Verde.