

Tema 5º : INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA MODERNA

INDICE:

1. Insuficiencia de la Física Clásica
2. Sistemas de referencia
3. Postulados de la teoría de la relatividad especial y consecuencias sencillas sobre la longitud, el tiempo y la masa.
4. Equivalencia entre masa y energía.
5. Teoría cuántica de Planck
6. Efecto fotoeléctrico
7. Espectros discontinuos
8. Hipótesis de De Broglie. Dualidad onda-corpúsculo.
9. Principio de incertidumbre de Heisenberg. Relación de indeterminación posición-momento lineal.
10. Radiactividad natural y artificial.
11. Partículas elementales: electrón, protón, neutrón, neutrino y antipartículas.
12. Ley de desintegración radiactiva. Actividad. Constante de desintegración.
13. El núcleo atómico
14. Fuerzas nucleares.
15. Energía de enlace por nucleón.
16. Tipos de desintegración radiactiva. Ajuste y consideraciones energéticas.
17. Fisión y fusión nuclear: aspectos básicos.

1.5- INSUFICIENCIA DE LA FÍSICA CLÁSICA

A finales del siglo XIX con la mecánica clásica y con las leyes electromagnéticas de Maxwell los científicos podían explicar todos los fenómenos físicos conocidos hasta entonces, pero ya a finales del siglo XIX y a principio del siglo XX se produce una serie de descubrimientos que ponen de manifiesto la insuficiencia de las leyes de la física clásica cuando se aplica al mundo de lo muy pequeño o de lo muy grande, al átomo y al universo.

Cuando la velocidad de una partícula es próxima a la de la luz, la mecánica newtoniana debe sustituirse por la teoría especial de la relatividad, aunque esta conduce a aquella cuando la velocidad es pequeña dando origen a una nueva rama de la física que es la **física relativista**.

También sucede que cuando se estudia el comportamiento de las partículas muy pequeñas como la de los átomos y los electrones, la mecánica clásica tampoco sirve ya que tanto la luz como la materia tienen un comportamiento dual y hay que introducir otra parte de la física que es la **física cuántica**.

Por último el descubrimiento de la radiactividad por parte de Becquerel dio origen a otra rama de la física que es la **física nuclear**.

Estas 3 ramas de la física.

- Física relativista
 - Física cuántica
 - Física nuclear
- } Constituyen la **física moderna**

2.5- SISTEMAS DE REFERENCIA

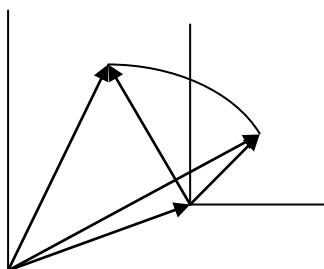
Un sistema de referencia, es un sistema de coordenadas, normalmente un sistema de ejes cartesianos, que lleva asociado un observador, provisto de un metro y un reloj, que mide la posición del móvil en cada instante.

En la mecánica clásica ya se considera que el movimiento de los cuerpos es un movimiento relativo que depende del sistema de referencia elegido que en el Universo nunca es fijo.

Si ahora elegimos dos sistemas de referencia para estudiar el movimiento y uno de los cuales lo consideramos fijo podemos considerar tres casos que son:

1^{er} Caso: que el 2º sistema de referencia permanezca fijo con respecto al primero.

Teniendo en cuenta la figura adjunta tenemos:



\vec{r} = vector de posición del punto con respecto al primer sistema

\vec{r}_0 = vector de posición del origen del 2º sistema con respecto al 1º

\vec{r}' = vector de posición del móvil con respecto al 2º sistema

$$\vec{r} = \vec{r}_o + \vec{r}' \quad \text{en donde } \vec{r}_o = \text{cte}$$

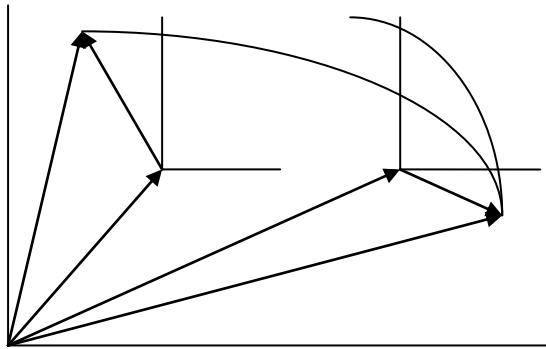
$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}_o}{dt} + \frac{d\vec{r}'}{dt} \Rightarrow \vec{v} = 0 + \vec{v}'$$

Y derivando \vec{v} con respecto a t

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{v}'}{dt} \Rightarrow \vec{a} = \vec{a}' \quad \text{y entonces } \Sigma \vec{F} = m\vec{a} \quad \text{y} \quad \Sigma \vec{F} = m\vec{a}'$$

En este caso la trayectoria, la velocidad y la aceleración es la misma para los dos observadores y solo es distinto el vector de posición, y como la aceleración del móvil es la misma para los dos sistemas de referencia, significa que en ambos casos se cumplen las leyes de Newton.

2º Caso: cuando el sistema de referencia se mueve con velocidad constante con respecto al 1º



$\vec{r} = \vec{r}_o + \vec{r}'$ En donde el punto O' se mueve con velocidad cte con respecto a O. Derivando:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}_o}{dt} + \frac{d\vec{r}'}{dt} \Rightarrow \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}'$$

Y como $\vec{v}_o = \text{cte}$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{v}'}{dt} + \frac{d\vec{v}_0}{dt} \Rightarrow \vec{a} = \vec{a}' + 0 \quad \text{y} \quad \text{entonces } \Sigma \vec{F} = m\vec{a} \quad \text{y} \quad \Sigma \vec{F} = m\vec{a}'$$

En este caso ni el vector de posición, ni la trayectoria, ni la velocidad es la misma para los dos observadores, pero la aceleración si, por lo tanto en este caso también se cumplen las leyes de Newton.

3º Caso: Cuando el 2º sistema se mueve con una aceleración con respecto al primero. Analizando la figura anterior, pero teniendo en cuenta que el punto O' se mueve con respecto al O con una aceleración tenemos:

$$\vec{r} = \vec{r}_o + \vec{r}' \quad \text{y derivando } \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}_o}{dt} + \frac{d\vec{r}'}{dt} \Rightarrow \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}' \quad \text{pero en este caso } \vec{v}_0 \text{ no}$$

$$\text{es cte y derivando } \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{v}'}{dt} + \frac{d\vec{v}_0}{dt} \Rightarrow \vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_0$$

En este caso ni el vector de posición, ni la trayectoria, ni la velocidad, ni la aceleración es la misma para los dos sistemas de referencia por lo tanto.

$\Sigma \vec{F} = m\vec{a} \neq \Sigma \vec{F} = m\vec{a}'$ ya que $\Sigma \vec{F} = m\vec{a} = m\vec{a}' + m\vec{a}_0$ y no se cumplen las leyes de Newton.

$$\Sigma \vec{F} - m\vec{a}_0 = m\vec{a}' \quad ; \quad \Sigma \vec{F} + \Sigma \vec{F}_i = m\vec{a}'$$

A $(-m\vec{a}_0)$ se le considera que es una fuerza denominada **fuerza de inercia** que no es una fuerza real sino ficticia porque no se ejerce sobre el cuerpo, sino que surge por el movimiento relativo del cuerpo con respecto al sistema de referencia.

Esta fuerza tiene siempre la misma dirección que el movimiento pero sentido contrario, es decir se opone siempre al movimiento del cuerpo.

A los sistemas que permanecen en reposo o se mueven con velocidad cte con respecto a otro que consideramos fijo se dice que son **inerciales**. Los que se mueven con una aceleración son sistemas **no inerciales**.

En los sistemas inerciales se cumple **el principio de la Relatividad de Galileo** que dice: “en todo sistema que permanece en reposo o se mueve con velocidad cte con respecto a otro que consideramos fijo, se cumplen las leyes de la mecánica de Newton” o lo que es lo mismo, es imposible determinar por métodos mecánicos si un sistema está en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme.

3.5- POSTULADOS DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL Y CONSECUENCIAS SENCILLAS SOBRE LA LONGITUD, EL TIEMPO Y LA MASA.

En la mecánica clásica, tanto el tiempo como el espacio y la masa son invariantes, es decir, que no dependen del sistema de referencia elegido, pero según hemos visto en el principio de la Relatividad de Galileo la velocidad de un móvil que se mueve con respecto a un sistema inercial no es una invariante ya que depende del sistema de referencia elegido.

A mediados del siglo XIX, una vez que se había descubierto que la luz tiene naturaleza ondulatoria, quedaba el problema de detectar el éter, ya que según aquella teoría, la luz necesitaba un medio material para propagarse. Como el éter lo llenaba todo, se podía considerar como un sistema de referencia fijo en donde se movía la Tierra y la velocidad de la luz para un observador que se moviera con la Tierra sería distinta si la Tierra se mueve en dirección hacia la luz o se aleja de la luz.

$$\left. \begin{array}{l} c' = v_T + c \Rightarrow \text{si se acerca} \\ c' = c - v_T \Rightarrow \text{si se aleja} \end{array} \right\} \begin{array}{l} c' = v \text{ con la que el observador ve la luz} \\ v_T = \text{velocidad de la Tierra} \text{ y } c = \text{velocidad de la luz} \end{array}$$

Michelson y Morley diseñaron un experimento para detectar estas variaciones de la velocidad de la luz, y descubrieron que la velocidad de la luz en el vacío es la máxima velocidad que se puede alcanzar, y siempre es la misma independientemente del sistema de referencia elegido, es decir, de la velocidad del foco emisor y del observador.

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

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

1^{er} Postulado: Las leyes de toda la Física son las mismas cualesquiera que sea el sistema de referencia inercial elegido, y además se representan con las mismas ecuaciones matemáticas.

2^o Postulado: La velocidad de la luz en el vacío es una constante universal, y es la máxima velocidad que se puede alcanzar. Además es independiente del sistema de referencia inercial elegido, por lo tanto no tiene sentido el éter, el éter no existe.

De la teoría de la relatividad especial se deducen tres consecuencias:

CONTRACCIÓN DEL ESPACIO: 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, de tal forma que la dimensión de un cuerpo que se mueve en el mismo sentido que el movimiento se contrae según la expresión:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Mientras que a las demás dimensiones del cuerpo no les ocurre nada, por eso, según la teoría de la relatividad, los cuerpos los vemos muy alargados.

En esta expresión “**L**” representa la longitud de la dimensión del cuerpo a la velocidad a la que se mueve; “**L₀**” es la longitud propia del cuerpo, es decir, la que se mide cuando el cuerpo está en reposo; “**v**” es la velocidad a la que se mueve el cuerpo y “**c**” la velocidad de la luz.

Para velocidades muy pequeñas como $v \ll c$ implica que **L** es prácticamente igual a **L₀**

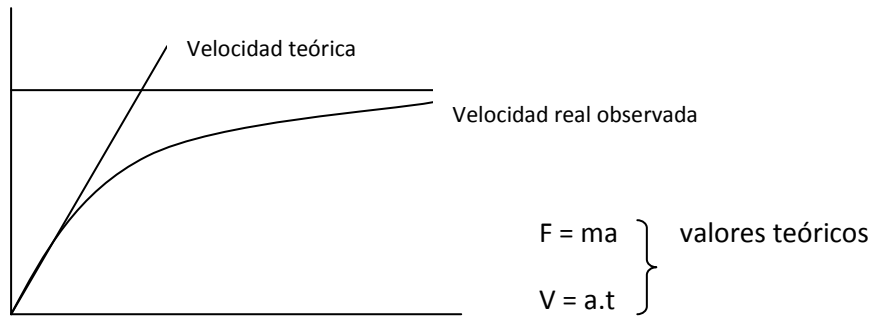
DILATACIÓN DEL TIEMPO: En la mecánica clásica el tiempo también era una invariante y no dependía del sistema de referencia elegido, pero en la teoría de la relatividad sí, y por eso el intervalo de tiempo entre dos sucesos depende del sistema de referencia elegido. Por lo tanto no tiene sentido hablar de la simultaneidad de dos sucesos ya que el tiempo para un sistema de referencia que se mueve, transcurre más lentamente que para un sistema que permanece en reposo, siendo esta variación del tiempo: ([Enlace](#))

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

En esta expresión, Δt es el intervalo de tiempo que transcurre entre dos sucesos según la teoría de la relatividad para un sistema de referencia que se mueve; Δt_0 es el intervalo de tiempo que transcurre entre esos dos sucesos cuando el cuerpo está en reposo.

RELATIVIDAD DE LA MASA: En la mecánica clásica la masa también es invariante y además si sobre una masa se ejerce una fuerza constante e indefinidamente, la comunicaría una velocidad que podría llegar a ser infinita, pero en la realidad al observar el movimiento de las partículas en un ciclotrón, se ve que a medida que transcurre el tiempo, la velocidad no

aumenta indefinidamente, ni sobrepasa la velocidad de la luz, siendo su representación gráfica:



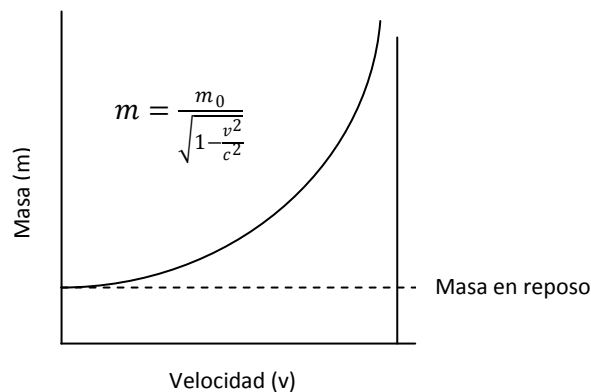
También se observa que la masa de las partículas aumenta con la velocidad, aunque lo que en realidad aumenta es su inercia.

La masa relativista se puede calcular mediante la expresión:

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

En donde “ m_0 ” es la masa propia es decir la que tiene el cuerpo en reposo.

La variación de la masa de una partícula con la velocidad se representa mediante la siguiente gráfica:



4.5- EQUIVALENCIA ENTRE MASA Y ENERGÍA

La energía cinética de una partícula en movimiento la podemos calcular:

$$E_c = \int_0^x F \cdot dr = \int_0^x \frac{dP}{dt} \cdot dr = \int_0^x \frac{d(mv)}{dt} \cdot dr = \int_0^x d(mv) \frac{dr}{dt} = \int_0^v v \cdot d(mv)$$

Integrando por partes, usando la expresión relativista de la masa resulta:

$$E_c = (m - m_0)c^2 = mc^2 - m_0c^2$$

Donde E_c es la energía cinética de la partícula en movimiento; m_0c^2 es la energía en reposo de la partícula y mc^2 es la energía total cuya expresión es:

$$E = mc^2 = E_c + m_0c^2$$

De esta expresión se deduce que si la partícula experimenta un cambio en su energía ΔE , su masa sufrirá una variación Δm que vendrá dado por $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$ expresión que constituye el principio de **equivalencia entre la masa y la energía**

Si el móvil se encuentra en reposo, su $E_c = 0$ y $mc^2 = m_0c^2 \Rightarrow E = m_0c^2$

Esta fórmula expresa que para velocidades pequeñas prácticamente toda la energía que comunicamos a la partícula se invierte en aumentar su velocidad, pero a medida que aumenta su velocidad y para velocidades próximas a la de la luz, parte de la energía que se comunica a la partícula se invierte en aumentar su valor y la otra parte en aumentar su masa, porque si toda la energía se invirtiera indefinidamente en aumentar la velocidad, llegaría un momento en que $v = \infty$ y para seguir aumentando la velocidad tendríamos que comunicarle una energía infinita. Como eso es imposible, significa que la máxima velocidad que puede alcanzar un cuerpo es la velocidad de la luz y si un cuerpo alcanza la velocidad de la luz se transforma en energía según la ecuación $E = m_0c^2$

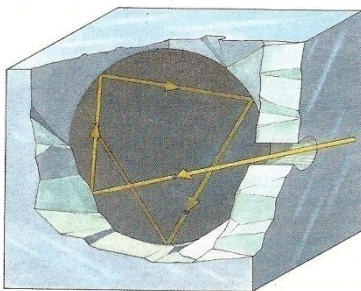
5.5- TEORÍA CUÁNTICA DE PLANCK

Los tres fenómenos que la física clásica no fue capaz de explicar y que dieron origen a la mecánica cuántica son:

- La radiación térmica
- El efecto fotoeléctrico
- La discontinuidad de los espectros atómicos

LA RADIACIÓN TÉRMICA

Se produce cuando calentamos un cuerpo y este emite energía en forma de calor. A temperaturas bajas esta radiación térmica se siente pero no se ve, pero a medida que aumentamos la temperatura del cuerpo pasa a un color amarillo, luego rojizo y por último blanco-rojizo, con lo cual emite la radiación en distintas longitudes de onda.

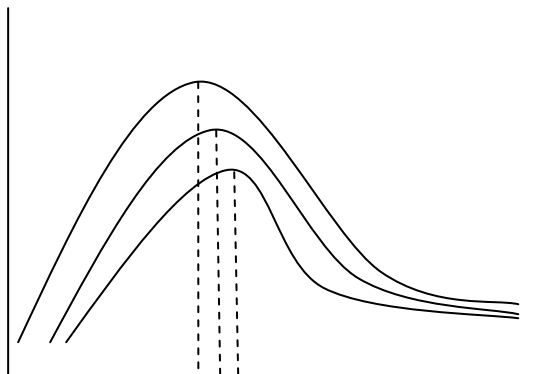


Se denomina cuerpo negro a aquel cuerpo que es capaz de absorber energía en todas las longitudes de onda, y por lo tanto a emitir energía también en todas las longitudes de onda.

Los cuerpos negros ideales no existen, pero en la práctica se puede construir un cuerpo negro mediante una cavidad en el interior de un cuerpo con unas

paredes rugosas y un pequeño orificio de entrada por el que entra la radiación y es absorbida al reflejarse en todas las direcciones de sus paredes, de tal forma que cuando se alcanza el equilibrio térmico emite radiación en las mismas longitudes de onda que ha absorbido.

Al estudiar la radiación térmica de un cuerpo negro y representa la energía emitida en función de su longitud de onda se obtienen las siguientes gráficas.



En las gráficas se observa:

1º) Para una temperatura determinada existe una longitud de onda para la cual la emisión de energía es máxima.

2º) A medida que aumentamos la temperatura, la longitud de onda para la cual la emisión de energía es máxima disminuye.

La radiación térmica sigue dos leyes deducidas de forma experimental:

1ª Ley: ley de Wien

La longitud de onda para la cual la emisión de energía radiante es máxima, multiplicada por la temperatura de la radiación es una constante que vale $2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$$

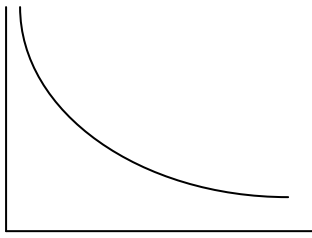
2ª Ley: ley de Stefan-Boltzman

La energía radiante total emitida por el cuerpo negro por unidad de superficie y por unidad de tiempo es directamente proporcional a la 4ª potencia de su temperatura.

$$E_T = \sigma \cdot T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} T^4 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}$$

Con la ley de Wien en la práctica podemos detectar la temperatura de cualquier estrella, simplemente averiguando a que longitud de onda la intensidad luminosa que se recibe de esa estrella es máxima.

Las leyes de la Física clásica no son capaces de explicar las curvas de la radiación térmica ya que según la Física clásica, como la λ de onda de cualquier radiación es inversamente proporcional a la frecuencia y $\lambda = \frac{v}{\nu}$, y como la energía de cualquier radiación es directamente proporcional a la $\nu^2 \rightarrow E = 2m\pi^2 A^2 \nu^2$ lo que tenía que suceder es que al aumentar la λ tendría que disminuir la energía de la radiación térmica siguiendo la siguiente gráfica:

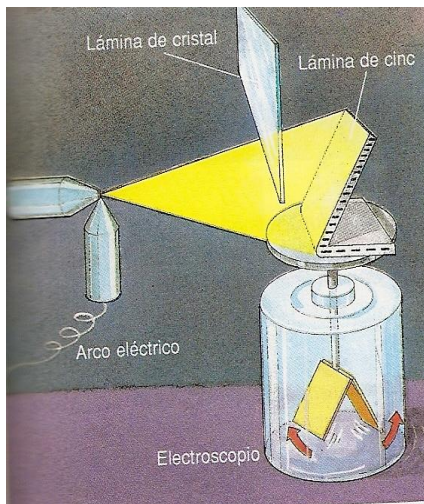


Planck para explicar la radiación térmica, supone que la emisión de esta radiación no es continua, sino discontinua, emitiéndose en forma de paquetes que son múltiplos enteros de una cantidad mínima a la que llama cuanto de energía, siendo la energía de cada cuanto:

$$E = h \cdot \nu \quad h = \text{cte de Planck} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Esto significa que la energía está cuantizada, y usando esta idea, Planck deduce una ecuación que es la **ley de la radiación térmica de Planck** cuya representación gráfica coincide perfectamente con la que había obtenido experimentalmente, cosa que no sucedía con las que se obtenían a partir de las leyes de la física clásica. ([Enlace](#))

6.5- EL EFECTO FOTOELÉCTRICO



En 1887, Hertz descubrió el efecto fotoeléctrico al observar que cuando se iluminaba con luz ultravioleta una lámina de cinc que se encontraba encima de un electroscopio, si la lámina estaba cargada negativamente se descargaba, pero si se ponía en medio un cristal, no pasaba nada y si estaba cargada positivamente tampoco pasaba nada, y si se iluminaba con una luz de menor frecuencia que la ultravioleta tampoco.

Posteriormente, se observa en el efecto fotoeléctrico que este se produce si se le ilumina con una frecuencia mínima denominada, **frecuencia umbral**, por debajo de la cual, no sucede el fenómeno fotoeléctrico, aunque la intensidad de la radiación luminosa sea muy grande.

En cambio, si la radiación luminosa tiene una frecuencia mayor que la frecuencia umbral y su intensidad es muy grande, se obtiene una corriente fotoeléctrica grande, y si la intensidad es pequeña, se obtiene una corriente fotoeléctrica pequeña, pero se produce el efecto fotoeléctrico.

La física clásica no explica el fenómeno fotoeléctrico porque según esta el efecto fotoeléctrico se produce porque cuando incide la radiación luminosa sobre el metal, le comunica una energía que sirve para arrancar los electrones, y cuanto mayor fuese la energía, mayor sería el nº de electrones que arrancasen, independientemente de la frecuencia de esa energía.

En 1905, Einstein usando la teoría de Planck, explica el fenómeno fotoeléctrico considerando que la luz está constituida por corpúsculos materiales sin masa en reposo, denominados **fonones**, siendo la energía de cada fotón $E = h \cdot \nu$

Por lo tanto, si la radiación tiene una frecuencia inferior a la frecuencia umbral, la energía de cada fotón no es suficiente para arrancar el electrón del metal, y no se produce el efecto fotoeléctrico. Y si la frecuencia es mayor que la frecuencia umbral, la energía del fotón es

suficiente para arrancar el electrón y además comunicarle una E_c , pudiéndose calcular esa E_c mediante la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico.

$$h\vartheta = h\vartheta_0 + \frac{1}{2}m_e v_e^2$$

$h\vartheta$ = energía del fotón incidente

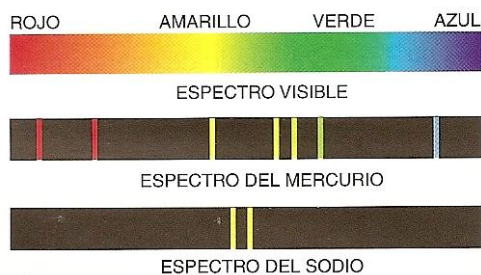
$h\vartheta_0$ = energía umbral (trabajo mínimo de extracción de electrones)

$\frac{1}{2}m_e v_e^2$ = energía cinética que comunicamos al e^-

Para radiaciones luminosas muy intensas con frecuencia superior a la frecuencia umbral se genera una corriente eléctrica de gran intensidad.

7.5- ESPECTROS DISCONTINUOS ([Enlace](#))

Otro problema que no podía explicar la física clásica eran los espectros discontinuos atómicos. El espectro de la luz solar es un espectro continuo de los diferentes colores que integran la luz blanca, pero el espectro de emisión de los átomos de un elemento químico es discontinuo y está formado por un conjunto de líneas de colores sobre un fondo oscuro y están situadas a una longitud de onda determina. Este hecho no lo puede explicar la física clásica mediante el modelo de Rutherford porque según este modelo el espectro tendría que ser continuo.



El espectro del átomo de hidrógeno es el más sencillo de todos los elementos químicos. En 1885 Johann Balmer descubre de forma empírica, que las longitudes de onda de la región del visible del espectro de hidrógeno responde a la fórmula:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Donde n es un número entero mayor que 2 y R es una constante (Rydberg) = $1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$

Todos los intentos efectuados para encontrar una explicación de la fórmula de Balmer fracasaron, hasta que en 1913 el danés Niels Bohr interpretó dicha fórmula dentro del marco de su modelo atómico que aplica el concepto de la cuantización de la energía de Planck y se basa en dos postulados que son:

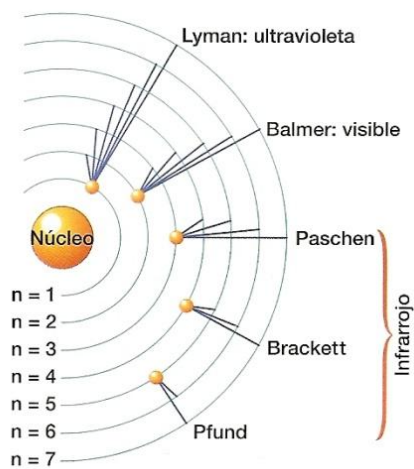
- 1) Los electrones giran en un número determinado de órbitas circulares alrededor del núcleo, sin emitir ni absorber energía radiante en las mismas.
- 2) Cuando el electrón pasa de una órbita a otra absorbe o emite energía en forma de fotón en una cantidad igual a $\Delta E = h\nu$

La interpretación teórica de los espectros atómicos se basa en que los electrones de los átomos pueden estar en ciertos estados, caracterizados por sus distintos valores de energía

llamados niveles. La transición entre dos niveles energéticos E_1 y E_2 da lugar a la emisión o absorción de radiación, cuya frecuencia viene dada por la ecuación: $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$

Si es absorción el electrón pasa a un nivel superior llamado estado excitado y la vuelta del estado excitado al fundamental directamente o a través de estados intermedios, hace que se puedan emitir fotones de frecuencias distintas. Cada una de estas transiciones dará origen a una línea en el espectro, lo que explica que en el espectro de un átomo aparezcan varias rayas o líneas, de forma que cada una de ellas tiene una frecuencia o longitud de onda determinada.

En los espectros de emisión aparecen las líneas de colores que corresponden a las frecuencias emitidas, mientras que en el espectro de absorción aparecen a las mismas frecuencias que en el espectro de emisión rayas negras que corresponden a las frecuencias absorbidas.



Los saltos electrónicos al nivel 1 corresponden a la serie de Lyman (ultravioleta); al nivel 2 la serie de Balmer (visible); al nivel 3 la serie de Paschen; al nivel 4 la serie de Brackett y al nivel 5 la serie de Pfund (estas 3 últimas corresponden al infrarrojo).

Aunque el modelo de Bohr tuvo que abandonarse cuando se dispuso de mejores espectroscopios porque aparecían desdoblamientos de las rayas que no era capaz de explicar y que luego se explicaron utilizando la mecánica cuántica, si supuso un gran éxito porque fue capaz de explicar que la energía de los átomos está cuantizada.

8.5- HIPOTESIS DE DE BROGLIE. DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO

A principio del siglo XX la luz se consideraba que era una onda, pero el descubrimiento del fenómeno fotoeléctrico y del efecto Compton hicieron pensar que la luz podía tener una doble naturaleza onda –corpúsculo.

En 1923 De Broglie demuestra que efectivamente los fotones luminosos tienen una doble naturaleza de onda-corpúsculo mediante la siguiente demostración:

Un fotón según Planck tiene una energía:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

Y según Einstein por viajar a la velocidad de la luz la energía de un fotón también es $E = mc^2$

Por tanto igualándolos:

$$\left. \begin{array}{l} E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \\ E = mc^2 \end{array} \right\} \quad h \frac{c}{\lambda} = mc^2 \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{h}{mc}$$

Es decir, que un fotón que es un corpúsculo material que se mueve a la velocidad de la luz tiene asociada una longitud de onda λ que viene dada por la expresión $\lambda = \frac{h}{mc}$

De Broglie generaliza esta expresión a cualquier partícula material que se mueve con una determinada velocidad lleva asociada una longitud de onda que viene dada por la expresión:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad \mathbf{m} = \text{masa de la partícula y } \mathbf{v} = \text{velocidad de la partícula}$$

La hipótesis de De Broglie fue confirmada experimentalmente en 1927 mediante experimentos de difracción de electrones que luego sirvieron de base para la construcción del microscopio electrónico.

9.5- PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISEMBERG. RELACIÓN DE INDETERMINACIÓN POSICIÓN-MOMENTO LINEAL

Según la mecánica clásica, si en un instante determinado se conoce la velocidad y la posición de una partícula, transcurrido un tiempo t se puede determinar con precisión la nueva velocidad y posición de la partícula, pero si la masa de la partícula, pero si la masa de la partícula es muy pequeña, ya no se puede determinar con precisión y simultáneamente la posición y la velocidad de la partícula es decir, se puede determinar con precisión la velocidad pero no la posición y viceversa, esto es debido a que para ver la partícula hay que iluminarla y al iluminarla le comunicamos una energía que altera su velocidad inicial.

Esta imposibilidad de determinar la posición y la cantidad de movimiento de una partícula simultáneamente, constituye el **principio de indeterminación de Heisemberg** que dice:

“El producto de la indeterminación Δx de la medida de las coordenadas de una partícula por la indeterminación Δp de la medida de la cantidad de movimiento simultáneamente ha de ser igual o mayor que la constante de Planck”

Matemáticamente $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$

Este principio es la base de la mecánica cuántica que considera que toda partícula que se mueve tiene una doble naturaleza onda-corpúsculo, y la partícula se mueve dentro del tren de ondas asociado con lo que no podemos determinar con exactitud su posición, por eso no tiene sentido decir que sabemos con precisión la trayectoria del electrón cuando se mueve alrededor del núcleo y por eso lo que se representa es el cuadrado de la función de onda que nos indica el espacio alrededor del núcleo en el cuál la probabilidad de encontrar al electrón es máxima. A este espacio es al que se llama **orbital**.

10.5- RADIATIVIDAD NATURAL Y ARTIFICIAL.

La radiactividad fue descubierta de forma casual por Becquerel en 1896 cuando estaba estudiando la fosforescencia y la fluorescencia producida por unas sales de potasio y de uranio cuando incidía el Sol sobre ellas.

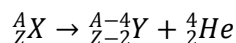
Un día que estaba nublado introdujo las sales en un cajón encima de una placa fotográfica y pocos días después cuando fue a sacarlas observó que la placa fotográfica estaba velada.

Unos años más tarde, los esposos **Curie** observaron que no solo el uranio, sino que otros elementos como el radio y el polonio también producían los mismos efectos, y además observaron que estas emanaciones radiactivas no estaban influidas ni por las reacciones químicas en las que intervenían los elementos, ni factores externos como la presión y la temperatura y que solo dependía del núcleo de los átomos y eran debidas a que los núcleos de estos átomos eran inestables, se desintegraban y producían **radiactividad**.

Al someter estas radiaciones a campos eléctricos y magnéticos se observaba que había tres tipos de radiaciones distintas **α , β y γ** .

- **Las radiaciones α** son núcleos de átomos de helio, por lo tanto tienen carga positiva y una masa relativamente alta, por lo que aunque su velocidad de propagación aún siendo alta es relativamente pequeña en comparación con las radiaciones β y γ , por eso su poder de penetración es pequeño, mientras que su poder de ionización es grande.

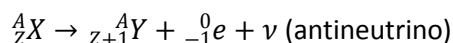
Este tipo de radiaciones las producen los núcleos de átomos pesados, y consiste en:



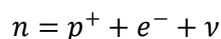
- **Las radiaciones β** pueden ser β negativa, que se da de forma natural, y β positiva que son las que se dan en los reactores nucleares de forma artificial.

Las radiaciones β negativas son electrones, por lo tanto son partículas con carga negativa y una masa relativamente pequeña, por lo tanto que su velocidad de propagación es muy grande, próxima a la de la luz, por eso su poder de penetración es grande mientras que su poder de ionización es pequeño.

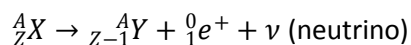
Este tipo de radiaciones las producen los núcleos ricos en neutrones, y el proceso que tiene lugar consiste en.



Como en el núcleo del átomo no hay electrones, en realidad el proceso que tiene lugar es:



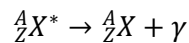
Las radiaciones β positivas no se producen en la naturaleza y la dan los átomos que tienen un exceso de protones, y consiste en la emisión de positrones (antipartícula del electrón), es decir una partícula idéntica pero con carga positiva (e^+) y que forma parte de la antimateria, no pudiendo existir los e^- y los e^+ juntos porque se destruyen emitiendo energía. El proceso que tiene lugar es el siguiente:



Y lo que sucede en realidad es:

$$p^+ = n^0 + e^+ + \nu$$

- **Las radiaciones γ** no son partículas, sino radiaciones electromagnéticas formadas por fotones muy energéticos parecidos a los rayos X. esta radiación acompaña a la radiación α y a la radiación β y se produce cuando los núcleos de los átomos excitados vuelve a su estado fundamental, ya que cuando se le comunica energía al núcleo de un átomo, sus nucleones absorben esta energía y pasan de su estado fundamental a un estado excitado, y cuando vuelve del estado excitado al fundamental, emiten una energía igual a la diferencia de energía entre estos dos estados en forma de radiaciones γ , siendo el proceso que tiene lugar:



En el fenómeno de la **radiactividad**, se tienen que cumplir todas las leyes de conservación de la física, que son: la ley de la conservación de la energía, la ley de la conservación de la cantidad de movimiento, la ley de la conservación de la carga y la ley de la conservación del número de nucleones.

11.5- PARTÍCULAS ELEMENTALES: ELECTRÓN, PROTÓN, NEUTRÓN, NEUTRINO Y ANTIPARTÍCULAS

En los aceleradores de partículas se han descubierto estos últimos años una gran cantidad de partículas elementales, pero a pesar de todo, se sigue considerando que los átomos están formados por tres tipos de partículas que son: n^0 ; p^+ y e^-

El electrón se considera una partícula elemental, ya que no se puede dividir, con carga negativa, mientras el protón y el neutrón no son partículas elementales porque están formados por quarks, el p^+ con carga positiva y el neutrón sin carga.

Además todas estas partículas tienen sus consiguientes antipartículas

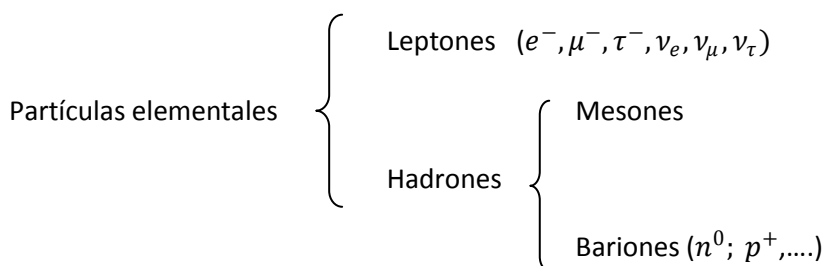
-Del e^- el positrón (e^+)

-Del p^+ el antiprotón (p^-)

-Del n^0 el antineutrón. Se diferencian en su momento magnético.

La materia y la antimateria no pueden existir juntas porque se destruyen y se transforman en energía.

En general, todas las partículas descubiertas se pueden clasificar en dos tipos:



Los leptones son partículas elementales que están sujetas a la interacción nuclear débil y son 6 : el electrón (e^-) ; el muón (μ^-) ; la partícula taun negativa (τ^-) ; el neutrino electrónico (ν_e) ; el neutrino muónico (ν_μ) ; el neutrino taun (ν_τ)

Normalmente los neutrinos van asociados a su partícula constituyente, y son partículas cuya masa en reposo vale 0 y no tienen carga, por eso son tan difíciles de detectar.

Los hadrones no son partículas elementales porque están formados por quarks, y son partículas que están sujetas a la interacción nuclear fuerte:

-Mesones: son los que tienen menos masa, solo están formados por un quark y un antiquark

-Bariones: son los que tienen más masa porque están formados por 3 quarks. Entre ellos los p^+ y los n^0 que están formados por 3 quarks.

Existen 6 quarks correspondientes que tienen sus correspondientes antiquarks.

12.5-LEY DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA. ACTIVIDAD. CONSTANTE DE DESINTEGRACIÓN

A principios del siglo XX, Rutherford y otros investigadores observaron que había algunos elementos como el radio y el torio que emitían unas emanaciones radiactivas y observaron que después de las emanaciones se transformaban en otros elementos distintos, por lo que elaboraron una teoría sobre la desintegración radiactiva según la cual, los núcleos de los elementos radiactivos son inestables, se desintegran y emiten partículas radiactivas transformándose en otros elementos distintos que si siguen siendo inestables vuelven a emitir partículas radiactivas transformándose en otro elemento y así sucesivamente hasta llegar a un elemento estable que suele ser un isótopo del plomo.

Los elementos que emiten radiación natural están comprendidos entre los n° atómicos 81 y 92 y al conjunto de todos los elementos que se obtienen en una desintegración radiactiva, se les llama series o familias radiactivas. Existen 4:

-La del Uranio }
-La del Torio } naturales
-La del Actinio }

-La del Neptuno → artificial

Las desintegraciones radiactivas siguen las leyes enunciadas en 1903 por Soddy, Fajans y Russell que dicen:

1ª Ley: Cuando un elemento radiactivo emite una partícula α , se transforma en otro elemento cuyo número másico disminuye en 4 unidades, y su número atómico en 2.

2ª Ley: Cuando un elemento radiactivo emite una partícula β , se transforma en otro elemento cuyo n° másico no varía y su n° atómico aumenta en una unidad.

Los elementos radiactivos sabemos que mas pronto o mas tarde se van a desintegrar, pero no sabemos con exactitud cuándo se van a desintegrar y por eso su estudio tiene que ser estadístico. ([Enlace](#))

Experimentalmente se comprueba que el nº de desintegraciones que sufre una muestra radiactiva un tiempo dt depende del nº de átomos radiactivos que tengamos inicialmente y de la naturaleza de las sustancias radiactivas, que se representa mediante la constante de desintegración radiactiva λ que indica el nº de desintegraciones radiactivas que sufre el núcleo de un elemento por unidad de tiempo, o lo que es lo mismo, la probabilidad de que un núcleo se desintegre en la unidad de tiempo.

Matemáticamente esta dependencia se representa por la expresión:

$$-dN = N \lambda dt$$

N = nº de átomos radiactivos en la muestra inicial

λ = constante de desintegración radiactiva

El signo negativo quiere decir que el nº de desintegraciones disminuye con el tiempo

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad \text{e integrando} \quad \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda dt \quad \Rightarrow \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad \Rightarrow \quad \boxed{N = N_0 e^{-\lambda t}}$$

Ley de la desintegración radiactiva en donde:

N = nº de átomos radiactivos que quedan sin desintegrarse después de transcurrido un tiempo t

N_0 = nº de átomos radiactivos que tenía inicialmente

λ = constante de desintegración radiactiva

t = tiempo para que N_0 se transforme en N

$$a \left| -\frac{dN}{dt} \right| = A \quad (\text{actividad de la sustancia radiactiva}) \quad \text{Luego} \quad \left| -\frac{dN}{dt} \right| = A = \lambda N$$

La actividad A indica la velocidad con la que se desintegra una sustancia radiactiva

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{multiplicando por } \lambda \text{ queda: } N\lambda = N_0 \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{y como } A = \lambda N \text{ queda: } \boxed{A = A_0 e^{-\lambda t}}$$

En donde:

A = actividad transcurrido un tiempo t

A_0 = actividad inicial

En el sistema internacional la unidad de actividad radiactiva es el Becquerel (Bq) que representa la cantidad de una muestra que sufre una desintegración por segundo. Como esta actividad es muy pequeña, suele usarse el Curio. **1 Ci = 3,7 · 10¹⁰ Bq**

Se llama **periodo de desintegración** al tiempo que tiene que transcurrir para que una muestra se reduzca a la mitad.

$$\text{Para } t = T \Rightarrow N = \frac{N_0}{2} \text{ sustituyendo } \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow \ln \frac{1}{2} = \ln e^{-\lambda T} \Rightarrow -\ln 2 = -\lambda T$$

$$\text{Implica } T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

La vida media es el tiempo que por término medio tarda en desintegrarse el núcleo de un átomo radiactivo.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\frac{\ln 2}{T}} = \frac{T}{\ln 2}$$

13.5- EL NÚCLEO ATÓMICO

A partir de mediados del siglo XIX se descubrió que la materia estaba constituida por átomos y estos a su vez por tres partículas elementales que son: electrón (-), protón (+) y neutrón (sin carga).

La física nuclear comienza en 1896 cuando Becquerel descubre por casualidad la radiactividad, pero no es hasta 1911 cuando Rutherford mediante un experimento descubre el núcleo de los átomos, ya que considera que los átomos están formados por una corteza en donde se encuentran los electrones girando alrededor del núcleo y un núcleo donde se encuentran los nucleones (protones y neutrones), por lo tanto el núcleo de los átomos tiene carga positiva y contiene la inmensa mayoría de la masa del átomo, estando prácticamente todo el átomo vacío.

El nº de protones y por lo tanto también el nº de electrones si el átomo es neutro, viene dado por su nº atómico (Z) mientras que el nº de nucleones viene dado por su nº másico (A)

A los átomos que tienen el mismo nº de protones y de neutrones (igual valor de Z y de A) se les llama **núclidos**, y a los que tienen el mismo valor de Z pero distinto valor de A (tienen distinto nº de neutrones) se les dice que son **isótopos**

Al estudiar la difracción de electrones, se sabe que el núcleo de los átomos tiene forma esférica, y que la distancia entre los nucleones que forman el núcleo es del orden de un fermi (10^{-15} m)

14.5- FUERZAS NUCLEARES

Si la distancia entre nucleones es del orden de 1 fermi, y los protones tienen carga positiva, entre ellos tendrían que aparecer fuerzas de repulsión coulombianas muy fuertes, que no serían contrarrestadas por las fuerzas de atracción gravitatoria entre las masas de los nucleones ya que estas fuerzas tienen una intensidad unas 10^{36} veces más pequeñas que las fuerzas de atracción coulombianas. Esto significa que si solo actuaran estas dos fuerzas en el núcleo, este se tendría que desintegrar.

Si esto no sucede es porque está actuando una tercera fuerza nuclear que es la **interacción nuclear fuerte**.

Esta fuerza tiene las siguientes características:

1ª) Solo actúa a pequeñas distancias (1 fermi) para distancias mayores no actúa y para distancias más pequeñas de 1 fermi, se vuelve repulsiva en lugar de atractiva.

2ª) Se establece entre todos los nucleones (entre protón y protón ; neutrón-protón y neutrón-neutrón)

15.5- ENERGÍA DE ENLACE POR NUCLEÓN

Como el tamaño de los átomos es muy pequeño, para medir su masa se utiliza como unidad la u.m.a (unidad de masa atómica) en donde una u.m.a es la masa de la doceava parte de la masa de un solo átomo de carbono.

Cuando se mide con precisión la masa del núcleo de los átomos, se observa que siempre esta masa es menor que la masa teórica, pudiendo calcularse esta diferencia de masa mediante la expresión:

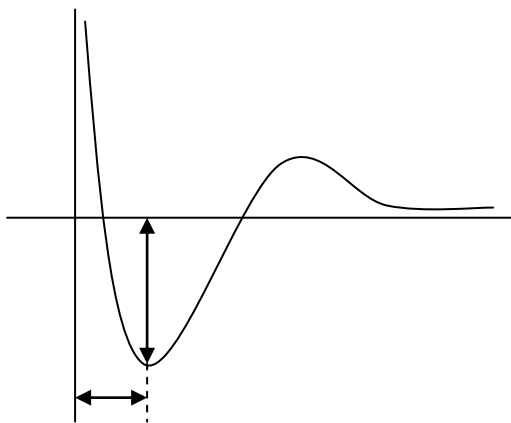
$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_N - M_r$$

Δm = variación de masa

$Zm_p + (A - Z)m_N$ = masa teórica

M_r = masa real

A este defecto de masa si le aplicamos la ecuación de Einstein $E = \Delta mc^2$ se obtiene una energía que coincide con la energía de enlace del núcleo del átomo, es decir, con la energía que hay que aplicar al núcleo que se separen todos los nucleones que lo forman o la energía que se desprende cuando se unen todos los nucleones que forman el núcleo.

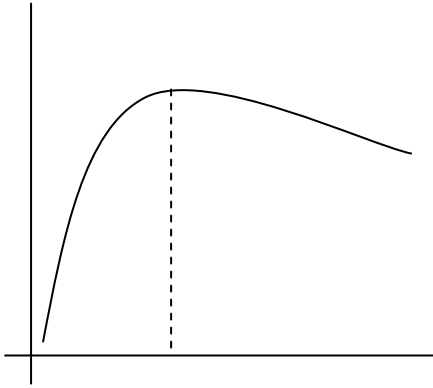


Si representamos esta energía en función de la distancia entre los nucleones, se obtiene La siguiente gráfica en la que se ve que a medida que acercamos los nucleones las fuerzas de repulsión aumentan, pero para una distancia próxima a la distancia de enlace, la energía disminuye porque aparece la interacción nuclear fuerte y para distancias menores las fuerzas de repulsión aumentan rápidamente.

Para números atómicos bajos, el nº de protones y de neutrones es similar, pero a medida que

aumenta el nº atómico, aumenta mas deprisa el nº de neutrones que el de protones, lo que hace que el núcleo de los átomos se vuelvan mas inestables, pero la estabilidad de un núcleo atómico se mide por su energía de enlace por nucleón.

Cuanto mayor sea la energía de enlace por nucleón, más estable es el núcleo. Esta energía se calcula dividiendo la energía total de enlace del núcleo por el nº de nucleones, y si representamos esta energía de enlace por nucleón (E/A) con respecto al nº másico.



Los valores máximos de la energía de enlace por nucleón, están comprendidos entre los nº másicos 40 y 80, siendo el valor máximo el del hierro 56. Por eso, si se unen dos átomos ligeros para formar uno más pesado que es más estable, se desprende energía y a este proceso se le llama **Fusión Nuclear** y también si se rompe un átomo muy pesado en átomos más ligeros también se desprende energía y al proceso se le llama **Fisión Nuclear**.

16.5- TIPOS DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA. AJUSTE Y CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS

En la naturaleza, los núcleos de los elementos comprendidos entre los nº atómicos 81 y 92 se desintegran espontáneamente, constituyendo la radiactividad natural, pero en los reactores se puede obtener de forma artificial isótopos de elementos radiactivos. Estos isótopos radiactivos tienen la ventaja de que participan en las mismas reacciones químicas que los isótopos no radiactivos del mismo elemento, pero son trazadores, es decir, se puede seguir su rastro radiactivo con lo que tienen mucha utilidad en la industria, medicina, investigación, etc.

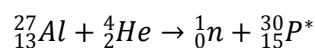
Una reacción nuclear es una reacción entre los núcleos de los átomos para que se produzca una reorganización de los nucleones en esos núcleos.

Cuando se aproximan los núcleos de dos átomos, hay que vencer las repulsiones colombianas que hay entre esos núcleos, por eso las reacciones nucleares consisten en bombardear el núcleo de un átomo con partículas muy pequeñas a una gran velocidad, normalmente con neutrones porque al no tener carga no son repelidos.

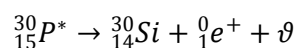
Al núcleo del átomo bombardeado se le denomina diana, y a la partícula proyectil.

Si el choque entre la partícula y la diana es elástico no ocurre nada porque sale rebotada, pero si es inelástico el núcleo absorbe la partícula, adquiere una gran energía, se vuelve inestable y se rompe.

El tipo de reacciones nucleares depende del tipo de proyectil utilizado, pero la primera reacción nuclear artificial es debida a los esposos Joliot-Curie cuando bombardearon un isótopo del aluminio con partículas alfa según la reacción:



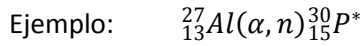
Obteniendo un isótopo del fósforo ${}_{15}^{30}\text{P}^*$ que era radiactivo



Las reacciones nucleares se suelen representar:

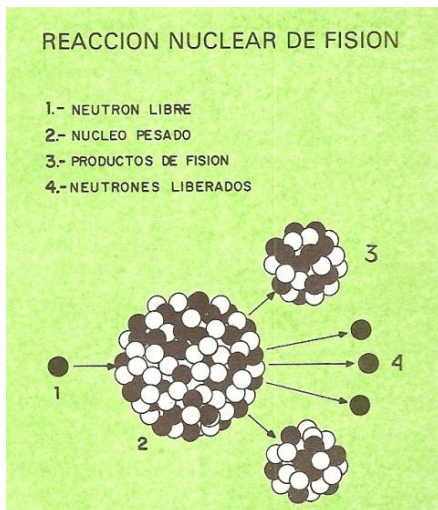
- En 1^{er} lugar el elemento que hace de diana

- A continuación entre paréntesis la partícula que se usa como proyectil, separada por una coma de la partícula que se produce en la reacción nuclear.
- Por último el elemento que se obtiene en la reacción nuclear:



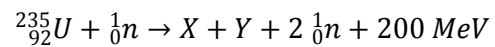
En esta reacción como en cualquier reacción química se tiene que conservar el nº de nucleones y la carga.

17.5- FISIÓN Y FUSIÓN NUCLEAR: ASPECTOS BÁSICOS



En 1939 Otto Hann observa que cuando se bombardea el isótopo de Uranio 235 con un neutrón lento, se produce la **fisión** de este átomo originando otros dos con masas atómicas comprendidas entre 72 y 149 y 2 o 3 neutrones rápidos que pueden proseguir la reacción originando una reacción en cadena.

En este proceso se desprende una gran cantidad de energía del orden de 200 MeV por cada núcleo fisionado, siendo el proceso que tiene lugar:



Se denomina factor de multiplicación:

$$K = \frac{n^{\circ} \text{ de neutrones emitidos}}{n^{\circ} \text{ de neutrones perdidos} + n^{\circ} \text{ de neutrones absorbidos}}$$

- Si el factor K es igual a 1, la reacción es crítica y se mantiene
- Si el factor K es mayor que 1, la reacción es supercrítica y se produce la reacción en cadena
- Si el factor K es menor que 1, la reacción es subcrítica y la reacción se para

La primera aplicación de la fisión nuclear fue la bomba atómica, en donde K es mayor que 1, pero en 1942 Fermi construyó el 1^{er} reactor nuclear para obtener energía eléctrica de la fisión nuclear.

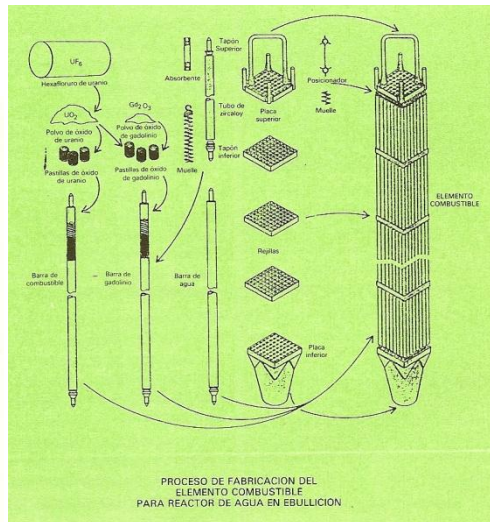
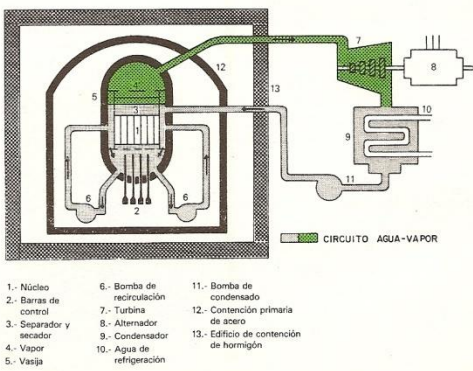
Los reactores de las centrales nucleares, utilizan como combustible el Uranio-235 enriquecido entre un 3 y un 5% ya que en la naturaleza abunda en un 0,7% mientras que el 99,3% restante es Uranio-238.

El combustible está en forma de pastillas de óxido de Uranio-235 que se mete en unos tubos de zircalón, y entre ellos se introducen unas barras de control que contienen boro o cadmio y todo el conjunto se encuentra en el reactor inmerso en agua que actúa como moderador y refrigerante.

La función de las barras de control es absorber neutrones para controlar la reacción y mantener un valor de K igual a 1, mientras que la función del moderador, que suele ser agua, agua pesada o grafito es frenar los neutrones rápidos que se producen en la reacción de fisión para convertirlos en neutrones lentos. ([Enlace](#))

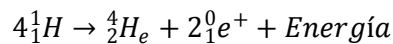
Hoy día algunas centrales nucleares son de reactores rápidos, que utilizan como combustible el isótopo del Plutonio-239, que se obtiene en el mismo reactor al chocar los neutrones rápidos obtenidos en la fisión del Uranio-235 cuando chocan con el Uranio-238 en los mismos tubos de zircalón.

ESQUEMA DE UNA CENTRAL NUCLEAR EQUIPADA CON UN REACTOR TIPO BWR (agua en ebullición)

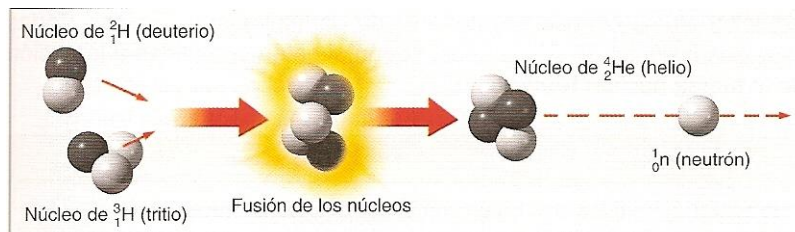
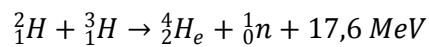


FUSIÓN NUCLEAR

La fusión nuclear es un proceso que se produce en las estrellas en las que tiene lugar el siguiente proceso:



Este proceso necesita una gran cantidad de energía para iniciarse, y en los reactores de fusión nuclear la reacción que se produce es la siguiente:



Este proceso tiene la ventaja, con respecto a la fisión nuclear:

1. El combustible es mucho más abundante
2. No produce residuos radiactivos

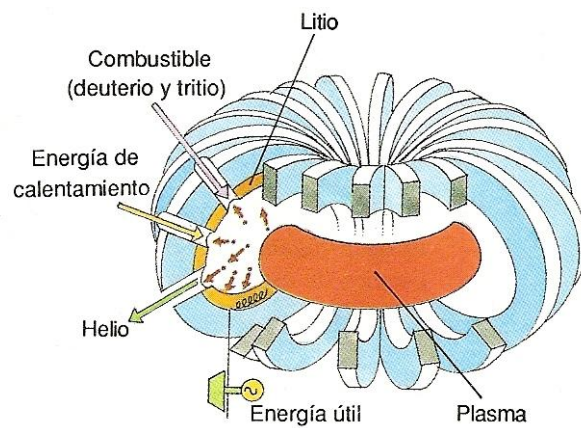
3. La energía que nos proporciona por nucleón es unas 3 veces mayor que la que nos proporciona la fisión nuclear.

El gran inconveniente de la fusión es que para que se inicie se necesitan alcanzar unas temperaturas de millones de grados centígrados y una gran densidad, y no existe ningún material que aguante estas temperaturas.

A pesar de todo actualmente se experimenta con dos métodos:

1. El confinamiento magnético
2. El confinamiento inercial

El confinamiento magnético consiste en unos grandes imanes superconductores que confinan el plasma dentro de un campo magnético.



El confinamiento inercial consiste en bombardear desde todas las direcciones el plasma para confinarlo mediante láseres de alta potencia.

