

TEMA 5

FÍSICA MODERNA

ÍNDICE

1.-FÍSICA CUÁNTICA:

- 1.1.-LA CRISIS DE LA FÍSICA CLÁSICA
- 1.2.-ANTECEDENTES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA
 - 1.2.1-Radiación del cuerpo negro
 - 1.2.2-Espectros atómicos
 - 1.2.3-Efecto fotoeléctrico
- 1.3.-MECÁNICA CUÁNTICA
 - 1.3.1-Dualidad onda-corpúsculo: hipótesis de De Broglie
 - 1.3.2-Principio de incertidumbre de Heisenberg
 - 1.3.3-El láser

2.-FÍSICA NUCLEAR:

- 2.1.-ÁTOMO: NÚCLEO Y ELECTRONES
- 2.2.-PARTICULAS NUCLEARES: PROTÓN Y NEUTRÓN
- 2.3.-NUCLEIDOS. NÚMERO MÁSCICO. ISÓTOPOS
- 2.4.-INTERACCIONES DOMINANTES
- 2.5.-PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA MASA-ENERGÍA
- 2.6.-ENERGÍA DE ENLACE Y DEFECTO DE MASA
- 2.7.-ESTABILIDAD NUCLEAR
- 2.8.-FISIÓN Y FUSIÓN.
- 2.9.-RADIOACTIVIDAD
- 2.10.-LEY DE LA DESINTEGRACIÓN RADIOACTIVA
- 2.11.-BALANCE ENERGÉTICO EN LAS REACCIONES NUCLEARES.
- 2.12.-INTERACCIONES FUNDAMENTALES. UNIFICACIÓN.

3.-FÍSICA RELATIVISTA (ESPECIAL)

- 3.1.-EL CONFLICTO ENTRE LA ELECTRODINÁMICA Y LA MECÁNICA DE NEWTON
- 3.2.-ANTECEDENTES DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL
- 3.3.-POSTULADOS DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL DE EINSTEIN
- 3.4.-CONSECUENCIAS DE LOS POSTULADOS DE EINSTEIN
- 3.5.-TRANSFORMACIÓN DE LORENTZ
- 3.6.-PRINCIPIOS DE LA DINÁMICA A LA LUZ DE LA RELATIVIDAD
- 3.7.-EVIDENCIAS EXPERIMENTALES DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

1.1 LA CRISIS DE LA FÍSICA CLÁSICA

A finales del siglo XIX tres grandes ramas conformaban lo que se ha dado en llamar Física Clásica:

- La **mecánica** de Newton
- La **electrodinámica** de Maxwell
- La **termodinámica** de Clausius y Boltzmann

Estas tres ramas, en conjunto, explicaban de forma satisfactoria la mayoría de los fenómenos físicos conocidos hasta entonces; se tenía, así, la sensación de que la física había llegado a su ansiada meta: explicar todos los fenómenos naturales. Sin embargo, la mecánica clásica incurría en fuertes contradicciones cuando se intentaba aplicar al ámbito de velocidades próximas a la de la luz. Surgió así la teoría de la relatividad restringida o especial. Por otra parte, ya algunos años antes de que Einstein publicara su teoría de la relatividad especial (1905), se venía observando el fracaso de la física clásica a la hora de explicar fenómenos que parecían tener una relación inmediata con la constitución más elemental de la materia. Entre ellos cabe citar **la radiación del cuerpo negro y los espectros atómicos**.

Sería, curiosamente, una persona reacia en un primer momento a la idea de la cuantización de la materia en forma de átomos la que introdujera el concepto de cuantización de la energía en forma de **cuantos**. En efecto, fue **Max Planck** quien, en 1900, al no ver otra posible alternativa para explicar la radiación térmica de los cuerpos calientes, dio el paso decisivo hacia una nueva física aplicable a la escala atómica y subatómica. En un principio, la noción del **cuanto** no fue bien acogida por la comunidad física, posiblemente porque su propio autor tampoco parecía demasiado satisfecho con ella.

En 1905, el joven **Einstein**, por entonces al margen de los círculos científicos tradicionales del pensamiento y la investigación, publicó en la revista *Annalen der Physik* un artículo sobre la producción y la transformación de la luz. En él retomó la idea de Planck aplicada a la luz y logró explicar con ella un fenómeno que ya había anunciado Hertz al generar y detectar las ondas electromagnéticas: **el efecto fotoeléctrico**, que consiste en la inducción de corriente eléctrica entre superficies metálicas al iluminarlas con fuentes ricas en radiación ultravioleta. Es ahí cuando empieza a tomarse en consideración la naturaleza cuántica de las radiaciones electromagnéticas y, con ella, la naturaleza dual onda-corpúsculo de la luz.

En la década de los años veinte, y con las aportaciones de **Louis De Broglie, Heisenberg, Schrödinger** y otros, nace la nueva mecánica del mundo atómico y subatómico: la **mecánica cuántica**.

La Física Clásica es una física determinista pues con ella se cree que se pueden determinar con precisión las magnitudes de un sistema (posición, velocidad...). Con la Física Cuántica, que se basa en la hipótesis de Max Planck, se abandona el determinismo y se entra de lleno en la probabilidad y en la estadística, siendo por tanto no determinista.

1.2 ANTECEDENTES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Materia y energía, los dos conceptos clave para entender las transformaciones que tienen lugar a nuestro alrededor, sufrirían importantes cambios conceptuales a principios del siglo XX. Si ya venía admitiéndose que la materia estaba cuantizada en forma de átomos, ahora empezaba a considerarse que la energía también lo estaba. Esta consideración venía avalada por los siguientes hechos:

- El problema de la radiación del cuerpo negro y la hipótesis de Planck
- Los espectros atómicos y la explicación de Bohr.
- El efecto fotoeléctrico y la explicación de Einstein

1.2.1 LA RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO Y LA HIPÓTESIS DE PLANCK

Nada más encender una hoguera o una chimenea, el carbón o la leña mantienen su aspecto y su color durante un tiempo; sin embargo, si acercásemos las manos notaríamos ya radiación de calor. Esa radiación invisible que percibimos es radiación infrarroja. A medida que la temperatura aumenta, la leña o el carbón empiezan a “ponerse al rojo”, es decir, ahora, aparte de la radiación infrarroja, emiten en las frecuencias más bajas del espectro visible. Si la temperatura sigue aumentando, el color rojo se hará más brillante y llegará un momento en el que las brasas emitirán luz de tonos amarillos o casi blancos (el blanco es la composición que nuestra retina hace de los colores que llegan a ella).

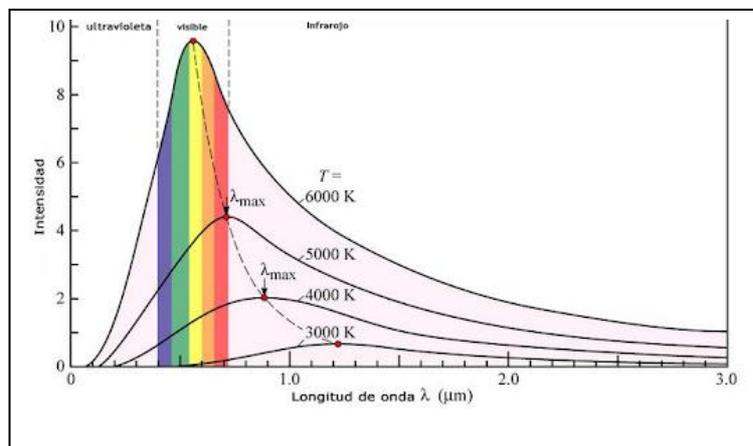
Del ejemplo anterior se desprende claramente que **la frecuencia de la radiación que emite un cuerpo caliente aumenta con la temperatura**. Sin embargo, la potencia irradiada (energía por unidad de tiempo) depende de las características del material; como vamos a ver, la máxima potencia irradiada se consigue con el llamado **cuerpo negro**.

En 1859, el físico alemán Gustav R. Kirchhoff estableció una ley básica: cuando un cuerpo está en equilibrio térmico, la energía que absorbe es igual a la que emite. Esto quiere decir que un buen absorbente es también un buen emisor. Se define como cuerpo negro aquel que absorbe todas las radiaciones, en consecuencia, es también un emisor ideal.

El concepto de cuerpo negro, como tantos otros en física, es un concepto ideal. No obstante, puede conseguirse una buena aproximación a un cuerpo negro de la siguiente manera: si construyésemos una caja herméticamente cerrada con un material que sea un absorbente térmico y practicásemos en ella un pequeño orificio, la radiación que penetrara por dicho orificio acabaría siendo absorbido tras numerosas reflexiones con las paredes internas de la caja; sus posibilidades de escapar a través del orificio serían pocas. En esas condiciones, podríamos examinar la radiación emitida por dicho cuerpo a medida que se calienta. Dicha radiación (análoga a la emitida por un cuerpo negro a idéntica temperatura) depende solo de la temperatura, y no de las características de la sustancia.

LA FORMA DE LAS GRÁFICAS DE EMISIÓN Y LA HIPÓTESIS DE PLANCK

El que la emisión de un cuerpo negro no dependiera de la naturaleza de las sustancias parecía dar a entender que nos encontrábamos ante una ley universal (como la de la gravitación, que se cumple con independencia de la naturaleza de las sustancias). Este hecho atrajo la atención de numerosos físicos que se empeñaron en encontrar una respuesta a la siguiente pregunta: ¿qué ley física podría explicar la forma de las gráficas de emisión del cuerpo negro?

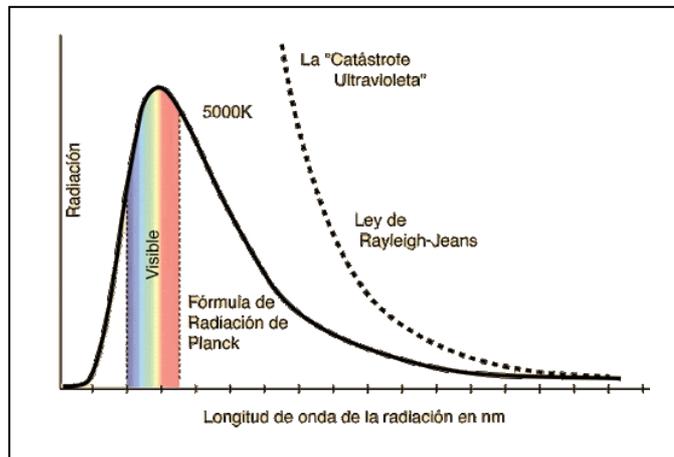


Por entonces no se tenían suficientes datos sobre la naturaleza de los átomos (el electrón fue descubierto por J.J. Thomson tres años antes). Sin embargo, se partía de una base sugerida por la teoría de Maxwell: **la radiación electromagnética era producida por las oscilaciones de las partículas cargadas de los átomos**.

Haciendo uso de la termodinámica y la electrodinámica, J.W. Rayleigh y J.H. Jeans realizaron el cálculo teórico de este problema a partir de las consideraciones de la física clásica. En esencia, la predicción clásica conduce a que la intensidad irradiada es proporcional a la temperatura e inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda.

Este resultado se ajustaba bien en el caso de valores altos de longitud de onda, pero conducía a una conclusión inconsistente: la potencia irradiada tendería a infinito para longitudes de onda muy pequeñas (del orden del ultravioleta). Este resultado es denominado **catástrofe ultravioleta**.

Llegados a este punto, la física clásica carecía de respuesta a este problema. Y es aquí donde el físico **Max Planck** decide abordar el fenómeno de un modo totalmente heterodoxo en la ciencia: se formula en primer lugar la ecuación matemática que se ajuste de un modo general a la forma de todas las gráficas y, una vez encontrada, se busca su interpretación física. Planck encontró dicha ecuación, y la única interpretación física que se ajustaba a ella obligaba a adoptar la siguiente hipótesis:



La energía emitida por los osciladores atómicos no puede tener cualquier valor, sino que debe ser un múltiplo entero de una constante h multiplicada por la frecuencia del oscilador

$$E = n \cdot h \cdot f$$

Donde “ n ” es un número entero, “ h ” es una constante a la que se dio el nombre de **constante de Planck** y cuyo valor es $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$, y “ f ” es la frecuencia del oscilador.

De este modo, la energía se emitía en forma de múltiplos de “paquetes mínimos de energía” de valor hf , que Planck denominó quanta (en singular, quantum) y que en castellano reciben el nombre de **cuantos de energía**.

La hipótesis de Planck lleva a considerar que, cuando un oscilador emite energía, pasa a tener, de modo discontinuo, un menor contenido energético y, por tanto, su frecuencia de oscilación disminuye “a saltos”. Sin embargo, este hecho, por sí solo, no explica la curva de emisión del cuerpo negro, pues, al fin y al cabo, los cuantos de mayor frecuencia podrán emitir mayores energías. Por ello, Planck propuso una segunda hipótesis complementaria:

El número de osciladores de baja frecuencia es muy superior al de osciladores de alta frecuencia.

Combinando estas dos hipótesis, logró explicar la forma de las curvas de emisión del cuerpo negro.

En resumen, el 14 de diciembre de 1900, Planck propuso que, al igual que la materia está cuantizada en forma de átomos, la energía lo está en forma de cuantos, y, del mismo modo que los átomos de distintos elementos tienen distintos tamaños, los cuantos de distintas frecuencias tienen diferentes tamaños energéticos. El tamaño de un cuanto viene dado por la expresión:

$$E = h \cdot f$$

1.2.2 ESPECTROS ATÓMICOS Y LA EXPLICACIÓN DE BOHR

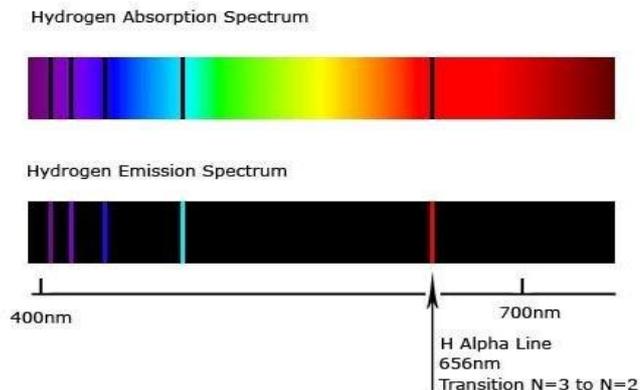
Al dar energía a los átomos de un elemento, estos se excitan y emiten radiación electromagnética (visible fundamentalmente, pero también UV e IR).

Si se analiza la radiación emitida en un espectroscopio (prisma o red de difracción) aparece un espectro de emisión discontinuo formado por una serie de rayas, cada una correspondiente a una distinta longitud de onda (λ). También existen espectros de absorción discontinuos.

Cada elemento químico tiene su propio espectro atómico de emisión o absorción que es

una característica de este elemento; es como su huella dactilar.

Los espectros atómicos de emisión son aquellos producidos por radiaciones emitidas por átomos en estado incandescente. En una placa fotográfica se recoge el resultado que da una serie de rayas coloreadas; a esto se le llama espectro atómico de emisión. Estas rayas corresponden a las distintas longitudes de onda emitidas por el foco luminoso.



Los espectros atómicos de absorción son aquellos producidos por la absorción parcial de las radiaciones emitidas por un foco luminoso cuando la luz producida por él atraviesa una sustancia compuesta por átomos de la misma clase. En la fotografía o pantalla se observan rayas oscuras que corresponden al mismo lugar donde antes estaban las coloreadas.

Luego los espectros atómicos de absorción y emisión son discontinuos. Esto implica que los electrones se encuentran en niveles de energía en los átomos.

En el espectro de hidrógeno se conocen cinco series de rayas (1ª serie de Lyman, 2ª serie de Balmer...). Se obtuvo experimentalmente una fórmula que relacionaba el orden de cada raya con la longitud de onda correspondiente.

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

Fórmula de Balmer-Rydberg

n_1 y n_2 son números enteros ($n_1 < n_2$)

$R_H = 1,90677 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ (constante de Rydberg)

MODELO ATÓMICO DE BÖHR

Mezcla principios de la mecánica clásica con la hipótesis de Planck. El modelo atómico de Bohr para el átomo de hidrógeno logró explicar el espectro de emisión discontinuo de éste.

Bohr logró llegar teóricamente a la fórmula experimental de los espectroscopistas. El modelo tiene tres postulados:

- 1º) El electrón gira alrededor del núcleo en órbitas circulares definidas, llamadas órbitas estacionarias, en las que no se emite ni se absorbe energía.
- 2º) La cantidad de movimiento del electrón multiplicada por la longitud de la órbita es un número entero de la constante de Planck.

$m_e \cdot v \cdot 2\pi r = nh$	$2\pi r =$ longitud de la órbita $n =$ primer número cuántico
---------------------------------	--

- 3º) Sólo se absorbe o se emite energía cuando el electrón pasa de una órbita estacionaria a otra órbita estacionaria.

$$E_2 - E_1 = h f$$

Donde E_2 es la energía de la órbita externa y E_1 es la energía de la órbita interna, siendo $E_2 > E_1$

Si el electrón pasa de una órbita externa a otra interna emite un cuanto de energía (fotón) (emisión)

Si el electrón pasa de una órbita interna a otra externa absorbe un cuanto de energía (absorción).

1.2.3 EFECTO FOTOELÉCTRICO Y LA EXPLICACIÓN DE EINSTEIN

Se llama efecto fotoeléctrico a la propiedad que presentan algunos metales de emitir electrones cuando se encuentran sometidos a la acción de la luz (visible o ultravioleta). Sus electrones así emitidos se llaman fotoelectrones. Este fenómeno fue descubierto por Hertz en 1887.

El efecto fotoeléctrico no se podía explicar con la teoría clásica de la radiación donde la energía se emite y se absorbe de forma continua.

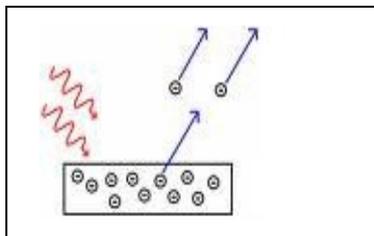
Albert Einstein amplió la hipótesis de Max Planck para poder explicar el efecto fotoeléctrico diciendo: “La energía no sólo se absorbe o se emite en forma discontinua, sino que también se propaga en forma discontinua en paquetes energéticos (cuantos de energía) a los que dio el nombre definitivo de fotones”

CONCEPTO DE FOTÓN

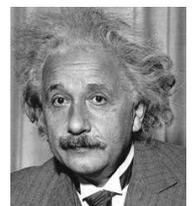
El fotón es una partícula cuya carga y masa en reposo son nulas y que se mueve continuamente a la velocidad de la luz. Con esto se ve que la energía está cuantizada y que la radiación tiene un aspecto corpuscular (propiedades de partícula).

El fotón tiene propiedades de onda y de partícula al mismo tiempo. El fotón es el cuanto energético que transporta la interacción electromagnética y al mismo tiempo transporta energía y cantidad de movimiento.

TEORÍA DE EINSTEIN DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO

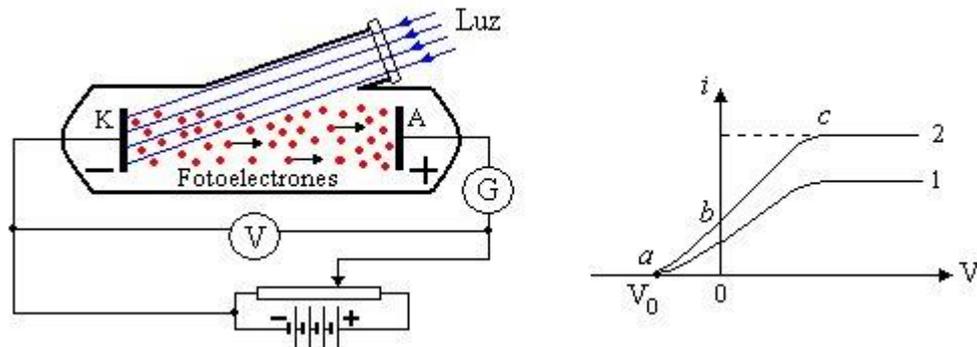


Este fenómeno fue descubierto por Hertz en 1887. Es un fenómeno que no se podía explicar con la Teoría Clásica de la Radiación. Einstein amplió y completó la hipótesis de Planck para explicarlo.



El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones de la superficie de algunos metales, cuando ésta se ilumina con una luz (radiación) de una determinada frecuencia; entonces se observa con instrumentos adecuados que de la superficie metálica se produce una fotoemisión de electrones (fotoelectrones), los cuales salen con una determinada velocidad.

W_0 es la energía mínima necesaria para arrancar un electrón del metal, también llamado trabajo de extracción.



Hechos experimentales: partimos de una célula fotoeléctrica (Fotocélula). El cátodo está revestido de un metal fotosensible (Zn o Cs).

La pila crea una diferencia de potencial (ddp) entre los electrodos, pero como en la ampolla existe el vacío, el galvanómetro no indica paso de corriente. Entonces iluminamos la placa de Zn con luz, de determinada frecuencia f , y entonces desde la placa de Zn se produce una fotoemisión de electrones (fotoelectrones) que va desde el cátodo al ánodo y así se cierra el circuito y el galvanómetro detecta el paso de corriente.

- 1) **No se detecta paso de corriente para cualquier tipo de luz;** para un metal dado, la frecuencia de la luz debe sobrepasar un límite llamado frecuencia umbral f_0 (frecuencia de inicio). Por debajo de f_0 no se produce efecto fotoeléctrico por muy intensa que sea la luz incidente.
- 2) **La energía cinética de los electrones depende de la frecuencia de la luz y no de su intensidad.**
- 3) **La intensidad de la fotocorriente** (corriente de electrones) **depende de la tensión (ddp) aplicada (V)** de tal modo que, si V crece, la intensidad de corriente alcanza un límite constante o corriente de saturación, I_s .

Si V se hace negativo, la fotocorriente disminuye rápidamente, llega a anularse para $V = -V_0$, donde V_0 es la llamada Tensión de corte (Potencial de detención o frenado) (Voltaje de corte).

Una explicación satisfactoria de estos hechos la dio Einstein aplicando la hipótesis de Max Planck, en 1905 por lo que le dieron el premio Nobel. Einstein dice: “No sólo se emite y absorbe en forma discontinua, sino que también se propaga en forma discontinua, en forma de fotones (los cuantos de Planck)”, cuya fórmula es:

E =energía de un fotón

$E=h \cdot f$ h =constante de Planck (universal)

f =frecuencia de la radiación

Con esto, Einstein decía que la energía viajaba por el espacio concentrada en puntos. Se propaga mediante fotones que son de carácter dual (corpúscular y ondulatorio)

Explicación:

Aceptando el carácter corpuscular de la radiación, podemos imaginar la luz que incide sobre el metal fotosensible como un haz de partículas. La energía del fotón incidente se emplea de la siguiente forma:

- Una parte de esa energía en liberar (arrancar) un electrón de la superficie del metal; esta energía es constante para cada metal y recibe el nombre de Trabajo de extracción o Función trabajo del metal y se representa por W_0
- Otra parte de esa energía se emplea en suministrar energía cinética al electrón arrancado. Para los electrones situados en el nivel superior de energía dentro del metal, esa energía alcanza su valor máximo, ($E_{c_{max}}$).

En consecuencia, se obtiene la Ecuación de Einstein del Efecto Fotoeléctrico:

$$E = W_0 + E_{c_{max}}$$

Donde:

- E: energía del fotón incidente
- W_0 : trabajo de extracción (función trabajo o energía umbral); energía mínima necesaria para arrancar un electrón de la superficie del metal. Es una característica de cada metal.
- $E_{c_{max}} = \frac{1}{2} m_e (v_{max})^2$; energía cinética máxima a la que salen los electrones.

$$h \cdot f = W_0 + \frac{1}{2} m_e (v_{max})^2$$

De la teoría de A. Einstein se deduce que:

- El fotón es absorbido (sólo uno) completamente, y al desaparecer, cede su energía a un solo electrón. Es decir, un fotón interacciona con un solo electrón y éste absorbe toda su energía.
- La energía cinética con la que salen los electrones depende solamente de la frecuencia f del fotón incidente, puesto que h y W_0 son constantes.
- Si la frecuencia del fotón incidente va disminuyendo, la velocidad del electrón va disminuyendo.
- Al llegar a la frecuencia umbral f_0 (frecuencia mínima para que se produzca efecto fotoeléctrico) la velocidad del electrón será NULA, cumpliéndose la relación $W_0 = h \cdot f_0$

Se tiene entonces: $h \cdot f = h \cdot f_0 + \frac{1}{2} m_e (v_{max})^2$ (Ecuación de Einstein)

Como los fotones viajan a la velocidad de la luz: $c = \lambda \cdot f$; $f = \frac{c}{\lambda}$ ($c=300000$ km/s)

$$h \cdot \frac{c}{\lambda} = h \cdot \frac{c}{\lambda_0} + \frac{1}{2} m_e (v_{\max})^2$$

siendo λ la longitud de onda de la radiación incidente (del fotón incidente) y λ_0 la longitud de onda umbral (valor máximo). Por encima de este valor no se produce el efecto fotoeléctrico.

Además, se obtiene el potencial de frenado V_0 (potencial de corte o tensión de detención)

$$E_c = q_e \cdot V_o = \frac{1}{2} m_e v^2 \quad (\text{Si } E_c \text{ es máxima, la } v \text{ es } v_{\max}) \quad q_e \cdot V_o = \frac{1}{2} m_e (v_{\max})^2$$

V_0 es el voltaje al cual cesa la fotoemisión electrónica

Con esta teoría fotónica de la luz se explican las características del efecto fotoeléctrico:

- 1) Si $h \cdot f > h \cdot f_0$ (si $f > f_0$) se produce siempre el efecto fotoeléctrico y los electrones salen con velocidad distinta de cero. Esta velocidad depende solo de f .
- 2) Si $h \cdot f = h \cdot f_0$ ($f=f_0$) sí se produce, pero $E_c=0$; los electrones son sólo arrancados pero no abandonan la superficie del metal. Se produce efecto fotoeléctrico pero no hay fotocorriente.
- 3) Si $h \cdot f < h \cdot f_0$ ($f < f_0$) no se produce efecto fotoeléctrico; el fotón incidente es absorbido totalmente pero no posee la energía suficiente para arrancarlo. Si la energía del fotón incidente es inferior al trabajo de extracción, el efecto fotoeléctrico no se produce, por muy intensa que sea la luz.
- 4) El hecho de que el número de fotoelectrones sea proporcional a la intensidad luminosa se explica diciendo que: si la intensidad luminosa se duplica, también se duplica el número de fotones incidentes, duplicándose por tanto el número de electrones emitidos. Sin embargo, su E_c no depende de la intensidad luminosa.
- 5) El hecho de que los electrones se emitan casi instantáneamente es debido a que la energía está concentrada en fotones, en lugar de un frente de onda.

Nota aclaratoria:

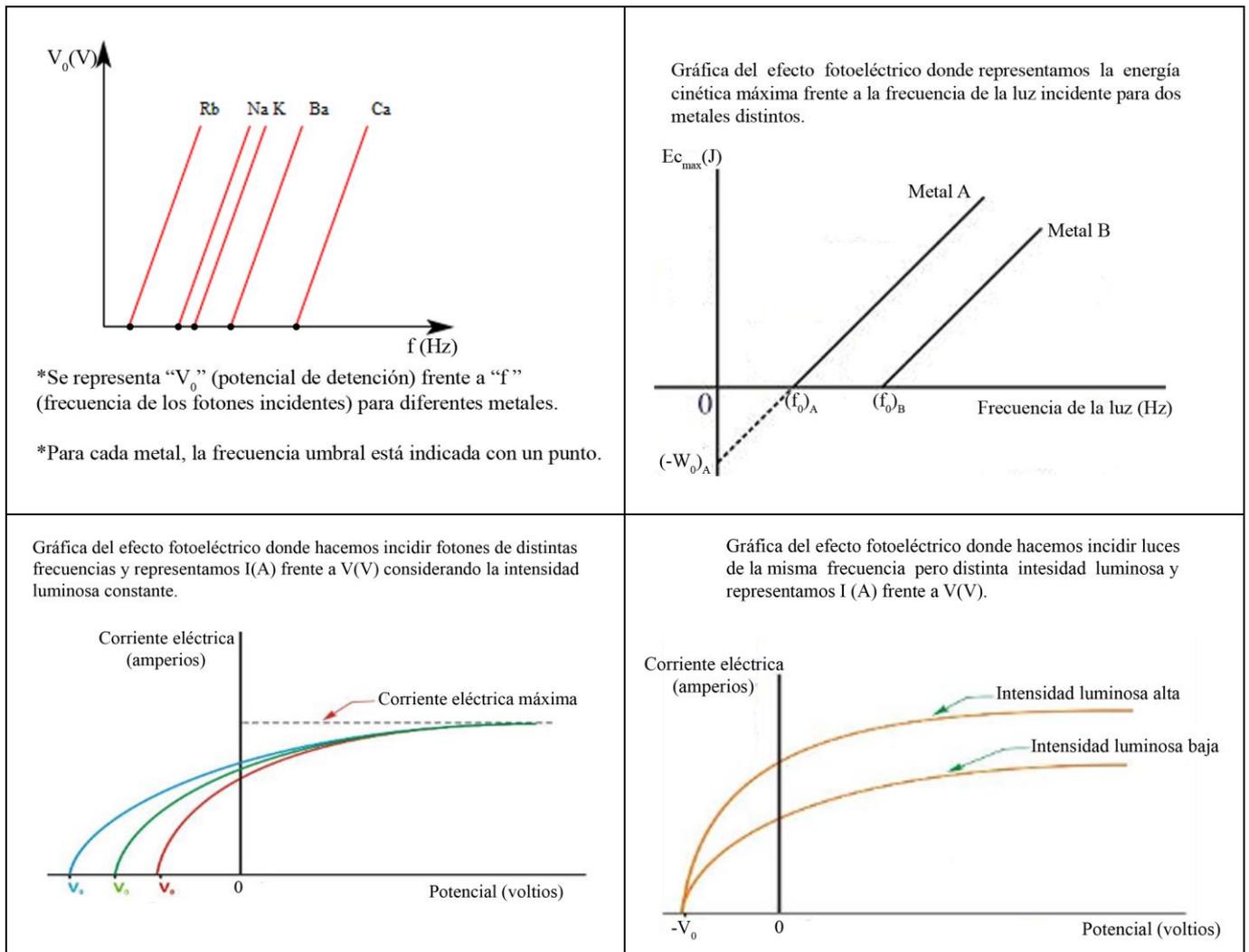
Si quiero detener la corriente fotoeléctrica (corriente de electrones), como la pila es variable, varío el potencial V hasta que $V=-V_0$ que es cuando cesa la fotoemisión de electrones.

Si cambio la polaridad de la pila (+) Cátodo \longrightarrow $e^- e^- e^- \longrightarrow$ Ánodo (-)

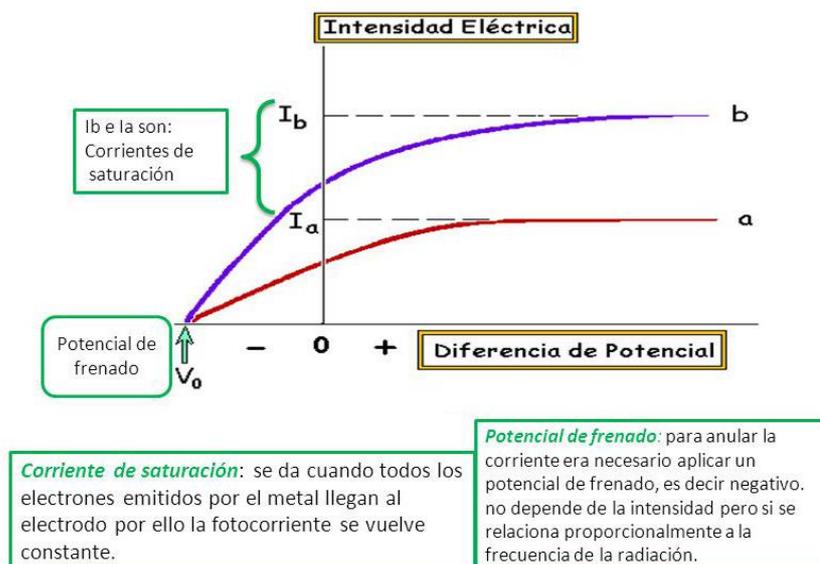
Al voltaje V_0 que produce esto se le llama Potencial o voltaje de corte (Tensión de frenado o Potencial fotovoltaico)

$$V_{\text{corte}} = V_0 = \frac{(E_p)_{\text{eléctrica}}}{q_e} ; (E_p)_{\text{eléctrica}} = q_e \cdot V_0 = E_{c_{\max}} = \frac{1}{2} m_e (v_{\max})^2$$

Algunas gráficas que se pueden realizar sobre el efecto fotoeléctrico:



La última gráfica se puede explicar así:



1.3 PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

1.3.1 DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO: HIPÓTESIS DE DE BROGLIE.

Para poder explicar la Radiación térmica y el Efecto fotoeléctrico se tuvo que resucitar la antigua teoría corpuscular de Newton de la luz, pero dándole los tintes y avances descubiertos; el fotón es una partícula energética cuya masa y carga en reposo es cero, y que viaja a la velocidad de la luz. (Las partículas de Newton para explicar la luz tenían masa).

Como sabemos la energía viaja concentrada en puntos y su velocidad es la de la luz. La energía que transporta un movimiento ondulatorio (onda) se encuentra concentrada en puntos en el frente de onda.

Basándose en este comportamiento “dual de la luz”, Louis De Broglie hizo unos cálculos y unas hipótesis y los resultados los amplió a la materia.

HIPÓTESIS DE LOUIS DE BROGLIE (1924):

Basándose en la dualidad onda-corpúsculo de la luz, extiende este comportamiento a la materia.



$$E=h \cdot f \text{ (hipótesis de Planck)}$$

$$E=m \cdot c^2 \text{ (ecuación de Einstein)}$$

$$h \cdot f = m \cdot c^2; \left\{ c = \lambda \cdot f; f = \frac{c}{\lambda} \right\}; \quad h \cdot \frac{c}{\lambda} = m \cdot c^2; \quad \frac{h}{\lambda} = m \cdot c; \quad \lambda = \frac{h}{m \cdot c} = \frac{h}{p}$$

m (masa asociada al fotón)

λ (longitud de onda del fotón)

c (velocidad de la luz)

h (constante de Planck, $6,63 \cdot 10^{-34}$ J s)

Al fotón en movimiento se le “asocia” una masa y su momento lineal es $p = \frac{h}{\lambda}$

De Broglie estableció que si la luz tiene propiedades de partícula, las partículas en movimiento tendrán propiedades de onda (propiedades ondulatorias):

- Toda partícula en movimiento lleva asociado un movimiento ondulatorio y todo movimiento ondulatorio tiene asociado propiedades de partícula; ambos aspectos son complementarios y aparece uno u otro según el fenómeno considerado y observado.
- Esto quiere decir que la Naturaleza tiene un comportamiento Dual (propiedades de partículas y propiedades de ondas al mismo tiempo).

De Broglie primero lo aplicó al electrón (partícula en movimiento)

$$\lambda = \frac{h}{m_e \cdot v_e} = \frac{h}{p_e}$$

Para cualquier partícula de masa m en movimiento con velocidad v se tiene:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{p}$$

La concepción actual asigna a los componentes últimos de la materia-energía una naturaleza dual: ni son ondas, ni son corpúsculos, sino que tienen simultáneamente propiedades de ambos.

En 1927 Davisson y Gemen, lograron la difracción de los electrones midiendo su longitud de onda. Todos sabemos que la difracción es un fenómeno exclusivo de las ondas (verificación experimental).

El microscopio electrónico no utiliza luz, sino un haz de electrones acelerados, cuya longitud de onda asociada es muy pequeña y así se logran aumentos de 100000 a 300000.

Debe ponerse de manifiesto que el concepto de dualidad supone una superación de la dicotomía partícula-onda característica de la Física clásica y cómo los aspectos corpusculares y ondulatorio resultan ser complementarios y no excluyentes.

La naturaleza ondulatoria de la materia se pone de manifiesto cuando la longitud de onda asociada λ , es del orden de los obstáculos con que tropiezan, produciéndose entonces la difracción. Si la velocidad de la partícula es muy grande (del orden de $c=300000$ km/s), entonces hay que tener en cuenta consideraciones relativistas.

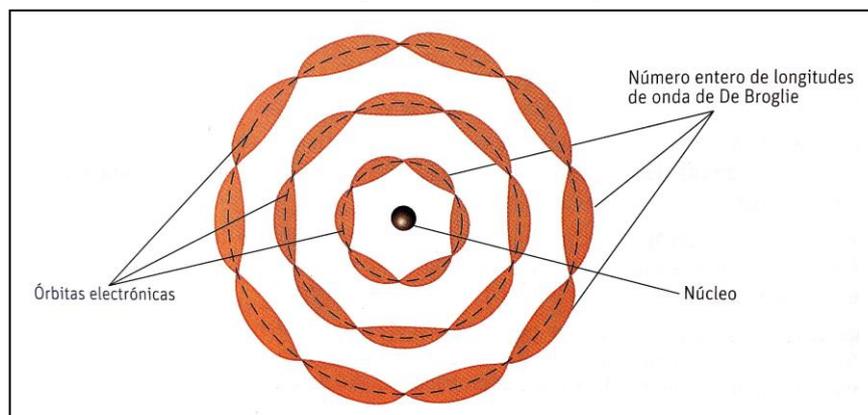
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad p = m v$$

En el macromundo, que es el mundo de nuestros sentidos, resaltan más, para la materia en movimiento, las propiedades de partícula que las propiedades de onda; cuando un cuerpo de masa apreciable se mueve con velocidad v , la doble naturaleza se da, pero sobresale mucho más la propiedad de partícula que la de onda, ya que al ser la longitud de onda asociada pequeñísima (debido al valor de h), no se detecta con nuestros aparatos de medida, pero esto no quiere decir que no exista.

La longitud de onda de las ondas de la materia sólo tendrá importancia para aquellas partículas materiales en las que p ($p=m \cdot v$) sea del orden de h ; esto se da en la microfísica (micromundo). En la macrofísica, como hemos dicho, p es mucho mayor que h y por eso no se ponen de manifiesto las propiedades ondulatorias de la materia.

Otros científicos lograron difractar protones y otras partículas del mundo subatómico; todos estos hechos experimentales le daban la razón a la hipótesis de De Broglie.

Una consecuencia importante de la hipótesis de De Broglie es que da una explicación de la cuantización del momento angular postulado por Bohr; equivalía a una condición de ondas estacionarias.



1.3.2 PRINCIPIO DE INDETERMINACIÓN DE HEISENBERG

El Principio de Incertidumbre de Heisenberg (1927) es una consecuencia inmediata de la Dualidad de la Naturaleza (Hipótesis de De Broglie de las ondas de materia).



Como dijimos, lo esencial del descubrimiento de Planck está en que ha surgido de lo íntimo de la Naturaleza Física una situación expresada por un número, una constante física universal pequeñísima, llamada cuanto fundamental h . Representa la “cosa” más pequeña posible en la Naturaleza.

La física clásica o macrofísica, es la que aplica las leyes de la Dinámica de Newton. Las leyes de la Dinámica de Newton son leyes deterministas. Esto del “determinismo” quiere decir que si conocemos el estado actual de un sistema (posición y velocidad inicial de una partícula en el caso más simple) y las fuerzas que actúan sobre él, podemos predecir su evolución; nada impedirá, en teoría, determinar con precisión total y simultáneamente la posición y la velocidad de la partícula antes citada.

La física clásica concibe el movimiento mecánico a partir de trayectorias perfectamente concebidas. El movimiento concebido según una trayectoria hace posible pronosticar con certidumbre (con certeza) el futuro a partir del pasado; es decir, se puede determinar todo. Con las leyes de la física clásica, si se conoce el estado inicial se puede determinar el estado final del sistema.

Por eso se dice que la física clásica es determinista, porque se tiene la certeza de localizar la posición de una partícula, su velocidad, su aceleración y todas las demás magnitudes.

En la física actual esta “posibilidad determinista” se desvanece, ya que la “Mecánica Cuántica” apuesta por una concepción nueva del movimiento mecánico: La mecánica cuántica abandona el concepto de “trayectoria” y lo sustituye por el concepto de probabilidad. En la Teoría Cuántica, si nos dan el estado inicial de un sistema con las leyes de esta mecánica nueva, no podemos predecir la evolución del sistema, sino la probabilidad de que esa evolución se dé (dicho pronóstico posee sólo carácter de probabilidad). Esto no niega las leyes del movimiento, puesto que las leyes de la mecánica cuántica se refieren a la probabilidad de que aparezcan “distintos valores”, pero no a estos valores mismos.

El Principio de Incertidumbre es una consecuencia de la dualidad onda-corpúsculo de De Broglie.

Cuando se entra en la microfísica (física del átomo y de las partículas subatómicas) la mecánica clásica no puede utilizarse, ya que los resultados que de ella emanan no tienen validez. Como hemos dicho anteriormente, en la macrofísica sí se cumple la mecánica clásica, pues el tamaño de los cuerpos es el que captan nuestros sentidos, y sobresale muy mucho el carácter corpuscular de la materia, quedando enmascarado el carácter ondulatorio por ser sus valores muy pequeños.

Pero en la microfísica el carácter ondulatorio de la materia tiene valores especiales, ya que los datos son del mismo orden que el tamaño de las partículas que estamos tratando vemos los valores de las partículas en el micromundo son del orden del valor de la constante de Max Planck (h), y según hemos dicho antes, la constante de Planck ha surgido de una situación física de la naturaleza. Por lo tanto este número nos va a indicar el límite de hasta dónde puedo conocer a la naturaleza.

$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$m_e \approx h$ (en valores numéricos)
$q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	
$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$	

El hecho de que una partícula en movimiento se considere como un grupo de ondas en lugar de un ente localizado, sugiere que exista un límite para la certeza con la que nosotros podamos medir sus propiedades corpusculares y entonces se entra de lleno en el mundo de la Probabilidad.

“Es imposible conocer simultáneamente y con precisión la posición y el momento lineal (cantidad de movimiento) de una partícula a niveles de la microfísica”.

La relación de Heisenberg que expresa esto es:

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

Δx : incertidumbre en la posición

Δp : incertidumbre en el momento lineal (sería Δp_x por tratarse de la incertidumbre de p en el eje x)

Existen tres formas de representar el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, en función del significado de Δx y Δp :

- Si Δx y Δp representan errores máximos

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

- Si Δx y Δp representan desviaciones típicas, es decir errores cuadráticos medios (los más probables)

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

- Si Δx y Δp representan errores medios

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

Hay que tener en cuenta que Δx y Δp_x no son errores experimentales, sino que representan una imposibilidad teórica de obtener una precisión mayor, por más perfectos que fuesen los aparatos de medida. Esto quiere decir que el proceso de medida introduce incertidumbres incontroladas.

El principio de Heisenberg nos dice que el propio proceso de medida impone un límite inferior a cada pareja de magnitudes físicas conjugadas. Para cada pareja de magnitudes físicas conjugadas el producto de sus incertidumbres debe ser mayor o igual que $h/2\pi$.

Por consiguiente, a diferencia de las leyes clásicas del movimiento, las leyes cuánticas encierran en sí la idea de probabilidad y esto no está relacionado con la imperfección de nuestros aparatos de medida, sino que reside en la propia naturaleza de las cosas.

El principio de incertidumbre está en contradicción con el determinismo de la física clásica. El principio de incertidumbre dice que tanto en el presente como en el futuro de un sistema físico, intervienen las leyes del azar.

El enunciado general del Principio de incertidumbre es:

“Siempre que se opere con variables conjugadas, el producto de los errores cometidos en la determinación simultánea de ambas variables ha de ser igual o mayor que la constante h de Planck”

Resumiendo, el principio de incertidumbre nos dice que el problema no está en el proceso de medida (método usado) ni en el instrumento usado, por muy avanzado que esté, sino en la propia naturaleza física de las cosas, la cual nos impone un límite a que uno la conozca perfectamente y este límite es la constante de Planck, h .

DOMINIO DE VALIDEZ DE LA FÍSICA CLÁSICA; DETERMINISMO Y PROBABILIDAD.

La física clásica es determinista y se apoya en trayectorias (certeza para conocer las magnitudes).

La física clásica conserva su validez en el dominio macroscópico. Es válida en la macrofísica, ya que en este dominio no se manifiesta la naturaleza ondulatoria de la materia, porque la longitud de onda asociada a las partículas materiales macroscópicas es mucho menor que las dimensiones del átomo y por lo tanto no pueden interaccionar con la materia.

Física clásica \longrightarrow Determinista \longrightarrow Certeza \implies Macrofísica

A partir de los hechos descritos, surge una nueva teoría, la Mecánica cuántica:

Mecánica cuántica \longrightarrow No determinista \longrightarrow Probabilidad \implies Se pierde la exactitud

El dominio de validez de la Mecánica cuántica es la microfísica. La Mecánica cuántica estudia la microfísica (física del átomo) basándose en las leyes de la probabilidad y la estadística. En la microfísica sí se manifiesta el carácter ondulatorio de la materia y entonces hay que tenerlo en cuenta; al tenerlo en cuenta, la física clásica pierde su validez en el micromundo: La Mecánica cuántica asocia una onda a cada partícula en lugar de una posición y una trayectoria perfectamente definidas; entonces se debe hablar de la probabilidad de encontrar la partícula en un punto del espacio (función de onda) y una ecuación de evolución temporal (ecuación de onda).

La Mecánica cuántica se basa en:

- 1) Hipótesis de Max Planck
- 2) Dualidad onda-corpúsculo (De Broglie)
- 3) Principio de incertidumbre de Heisenberg
- 4) Ecuación de ondas de Schrödinger

Además de aplicar la Relatividad de Einstein al micromundo (P. Dirac).

1.3.3 EL LÁSER

La sigla LASER corresponde a la expresión Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación) y hace referencia a un fenómeno cuántico.

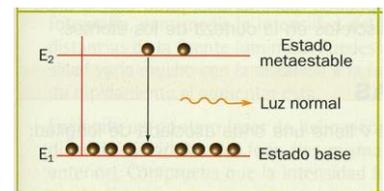
Aunque sus fundamentos ya fueron descritos por Einstein en 1916, su desarrollo no fue posible hasta que se dispuso de la tecnología adecuada.

- En 1953 el físico norteamericano C. Townes desarrolló un dispositivo precursor, el máser, basado en los mismos principios, que producía microondas coherentes en vez de luz visible.
- En 1960 el físico norteamericano T.H. Maiman construyó e hizo funcionar el primer láser de rubí, basándose en las ideas de Townes.

PRODUCCIÓN DE LUZ LÁSER

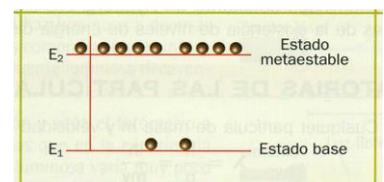
- ✓ Distribución electrónica normal y emisión espontánea
Los electrones de la corteza atómica presentan una distribución estadística normal, donde la cantidad de electrones en un nivel energético n es mucho mayor que en el nivel $n+1$.

La emisión espontánea de radiación se produce cuando caen los electrones de un nivel superior al nivel inferior, conforme la teoría de Bohr. Los fotones se emiten en distintos momentos, por lo que no tienen la misma fase y producen luz no coherente (luz normal).

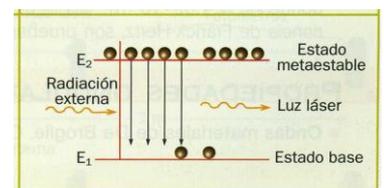


- ✓ Inversión de población mediante absorción inducida
Mediante sistemas adecuados, por ejemplo, con una lámpara flash, se proporciona energía a los átomos del material (un rubí en muchos casos) y se produce una inversión de la población electrónica. En este caso, la población de electrones en el nivel $n+1$ es mucho mayor que la existente en el nivel n .

Esta situación solo puede mantenerse en el tiempo mediante el mecanismo de bombeo-óptico producido por la lámpara flash.



- ✓ Emisión inducida de radiación
Se somete un material con inversión de población a una radiación externa con la frecuencia de la transición $n+1 \rightarrow n$. En estas condiciones, los electrones pasan al mismo tiempo del nivel superior al inferior y se produce una emisión inducida de radiación.



Los fotones emitidos, además de tener la misma frecuencia (luz monocromática) se emiten en fase (luz coherente).

En sus comienzos, la luz láser fue considerada una curiosidad científica sin aplicaciones concretas (fue llamada “una solución en busca de un problema”). Sin embargo, hoy la lista de dispositivos que usan luz láser es interminable:

- Telecomunicaciones: Lectores y grabadores de CD, DVD o Blu-Ray. Comunicaciones ópticas (fibra óptica). Impresoras láser
- Aplicaciones médicas (operaciones de vista, operaciones odontológicas, tratamiento de piedras en el riñón, etc.)
- Aplicaciones industriales (corte, soldaduras, etc.) y comerciales (lectores de código de barras y de códigos diversos).
- Múltiples aplicaciones científicas (mediciones de distancias precisas, producción de fenómenos diversos, etc.).

EJERCICIOS DE FÍSICA CUÁNTICA

1.- Un electrón salta de un nivel de energía más externo a otro más interno entre los que hay una diferencia de energía de $1,5 \cdot 10^{-15}$ J ¿Absorbe o emite energía? ¿Cuál es la frecuencia de la radiación?

Dato: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s

2.- Un átomo de hidrógeno está en un estado excitado 2 con una energía $E_2 = -3,40$ eV. Ocurre una transición hacia el estado 1 con una energía $E_1 = -13,6$ eV y se emite un fotón. Calcular la frecuencia de la radiación emitida.

Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s; $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C

3.- En el átomo de hidrógeno, cuando un electrón pasa de un estado excitado a un estado normal, emite un cuanto de energía (fotón) de energía 10,18 eV. ¿Cuál es la longitud de onda que corresponde a la raya emitida?

Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s; $c = 3 \cdot 10^8$ m s⁻¹; $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J.

4.- Una emisora de radio emite con una frecuencia de 1,2 MHz y una potencia de 2 kw. Calcular el número de cuantos de energía (fotones) en 5 segundos.

5.- La energía umbral del Cr es $7,04 \cdot 10^{-19}$ J. Determina:

- Si una onda (radiación) de $4 \cdot 10^{15}$ Hz es capaz de arrancar electrones del Cr
- La velocidad de escape de los electrones si es que el proceso se produce.

Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s ; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg

6.- La longitud de onda umbral del efecto fotoeléctrico para el Cesio es de 654 nm. Si sobre una célula fotoeléctrica de Cs incide una radiación de 600 nm, calcular:

- Velocidad máxima de los electrones a la salida del cátodo.
- Potencial necesario para que cese la emisión de electrones.

Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s ; $c = 3 \cdot 10^8$ m s⁻¹ ; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg ; $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

7.- Se hace incidir una onda de $f = 3,2 \cdot 10^{13}$ Hz sobre una superficie metálica, cuya energía umbral es $2 \cdot 10^{-20}$ J. Calcular la energía cinética con que salen los fotoelectrones emitidos.

Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s

8.- El potencial fotovoltaico (potencial de detención) de un metal es 0,1 V y el trabajo de extracción (función trabajo W_0) del metal es 10^{-18} J. ¿Cuánto vale la energía de la onda incidente (fotón incidente)?

Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s ; $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

9.- Calcular la energía cinética máxima y la velocidad máxima de los electrones arrancados de un metal por efecto fotoeléctrico, si la tensión necesaria para que no lleguen electrones al ánodo es 6 V.

Datos: $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg ; $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

10.- El trabajo de extracción del aluminio es 4,2 eV. Se ilumina una superficie de aluminio con radiación de 2000 Å. Determina:

- La longitud de onda umbral para el Al
- El potencial de frenado para detener a los electrones emitidos en la fotocélula. Datos:

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s ; $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J ; $1 \text{ Å} = 10^{-10}$ m.

- 11.- En un experimento diseñado para determinar la constante de Planck, se ilumina una superficie metálica con luz monocromática de 1800 \AA y se comprueba que la energía máxima de los electrones emitidos es $1,5 \text{ eV}$. Cuando la luz alcanza la longitud de onda de 2300 \AA , cesa el efecto fotoeléctrico. Calcula el valor de h (cte de Planck).
Datos: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$; $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.
- 12.- Una superficie metálica presenta efecto fotoeléctrico cuando se ilumina con una radiación de frecuencia f . Si se ilumina la superficie metálica con una radiación de frecuencia el doble, los fotoelectrones que se desprenden, ¿tendrán doble energía cinética? ¿Por qué?
- 13.- Un electrón posee una energía cinética de $1,14 \cdot 10^{-21} \text{ J}$. Calcula la longitud de onda de la onda de materia que le acompaña (longitud de onda asociada).
Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.
- 14.- Calcula la longitud de onda asociada de un electrón acelerado por una diferencia de potencial de 10 voltios.
Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.
- 15.- Un haz de protones se acelera hasta una energía de 8 MeV . Calcula:
a. Velocidad de las partículas
b. Longitud de onda asociada a los protones.
Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.
- 16.- a) ¿Qué longitud de onda asociada corresponde a un protón que se mueve con una velocidad de $2 \cdot 10^7 \text{ m/s}$? ¿Y a una bala de fusil que se mueve con una velocidad de 200 m s^{-1} ? Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $m_{\text{bala}} = 30 \text{ g}$.
b) Determina el cociente entre las longitudes de onda asociadas a un neutrón y a un electrón de la misma energía cinética.
- 17.- Se ha medido la velocidad de un electrón obteniéndose un valor de $4,00 \cdot 10^4 \text{ m s}^{-1}$ con una inexactitud de $0,002\%$. Calcular la incertidumbre de localizar este electrón.
Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- 18.- Un objeto muy pequeño cuyo diámetro es 10^{-6} m tiene una masa de 10^{-6} kg y se mueve con una velocidad de 10 m s^{-1} . Hemos determinado esa velocidad con un error (incertidumbre) de 10^{-3} m s^{-1} . ¿Cuál será la incertidumbre (error) en la determinación de la posición? ¿Cómo sería esa incertidumbre comparada con el tamaño de la partícula? Consideremos que hemos calculado la masa sin error.
Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

SOLUCIONES A LOS EJERCICIOS DEL TEMA 5 (FÍSICA CUÁNTICA)

1- Emite energía; $2,26 \cdot 10^{18}$ Hz

2- $2,46 \cdot 10^{15}$ Hz

3- $1,22 \cdot 10^{-7}$ m

4- $1,26 \cdot 10^{31}$

5- a) Sí se produce el efecto fotoeléctrico b) $2,07 \cdot 10^6$ m/s

6- a) $245135,2 \text{ m s}^{-1}$ b) $0,17 \text{ V}$

7- $1,26 \cdot 10^{-21}$ J

8- $1,06 \cdot 10^{-18}$ J

9- $9,612 \cdot 10^{-19}$ J ; $1452655,7 \text{ m s}^{-1}$

10- a) $2,96 \cdot 10^{-7}$ m b) 2 V

11- $6,63 \cdot 10^{-34}$ J s

12- No

13- $1,45 \cdot 10^{-8}$ m

14- $3,88 \cdot 10^{-10}$ m

15- a) $40405587 \text{ m s}^{-1}$ b) $1,0186 \cdot 10^{-14}$ m

16- a) $2,11 \cdot 10^{-14}$ m ; $1,105 \cdot 10^{-34}$ m b) $\sqrt{\frac{m_{\text{electrón}}}{m_{\text{neutrón}}}}$

17- $1,45 \cdot 10^{-4}$ m

18- $1,06 \cdot 10^{-25}$ m ; $1,06 \cdot 10^{-17}$ %

FORMULARIO DE FÍSICA CUÁNTICA

Nº	LEY / CONCEPTO	FÓRMULA	SIGNIFICADO DE LOS SÍMBOLOS	UTILIDAD / OBSERVACIONES
1	Frecuencia	$f = \frac{c}{\lambda}$	f : Frecuencia del fotón. (s^{-1} o Hz) c : Velocidad del fotón en el vacío. ($3 \cdot 10^8$ m s^{-1}) λ : Longitud de onda del fotón. (m)	Relación entre frecuencia y longitud de onda
2	Ecuación de Max Planck	$E = h \cdot f$	E : Energía del fotón. (J) h : Constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J s) f : Frecuencia del fotón. (s^{-1} o Hz)	Esta ecuación es la base de la Física Cuántica. Cada cuanto de energía se denominó fotón por A. Einstein.
3	Efecto fotoeléctrico (E.F.)	$E = W_0 + (E_C)_{\max}$	E : Energía que porta el fotón que incide sobre el metal. (J) W_0 : Trabajo de extracción de los electrones en el metal. (J) $(E_C)_{\max}$: Energía cinética máxima que pueden adquirir los electrones extraídos. (J)	Esta ecuación refleja la explicación que a A. Einstein le valió el premio Nobel.
4	Trabajo de extracción (E.F.)	$W_0 = h \cdot f_0 = h \cdot \frac{c}{\lambda_0}$	W_0 : Trabajo de extracción. (J)	W_0 es la energía necesaria para extraer un electrón de un átomo
5	Energía cinética máxima (E.F.)	$(E_C)_{\max} = \frac{1}{2} m_e \cdot (v_{\max})^2$	$(E_C)_{\max}$: Energía cinética máxima. (J) m_e : Masa del electrón. ($9,11 \cdot 10^{-31}$ kg) v_{\max} : Velocidad máxima del electrón extraído. (m s^{-1})	Esta expresión se refiere a la $(E_C)_{\max}$ porque correspondería con la velocidad que podrían adquirir los electrones de la última capa.
6	Potencial de frenado (E.F.)	$V_0 = \frac{(E_p)_{\text{eléctrica}}}{q_e}$ $q_e \cdot V_0 = E_{C_{\max}}$	V_0 : Potencial de frenado o de corte. (V) $(E_p)_{\text{eléctrica}}$: Energía potencial eléctrica en la que se transforma la energía cinética que portan los fotoelectrones. (J) q_e : Carga de un electrón. ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)	Sirve para calcular el potencial que hay que aplicar para frenar el efecto fotoeléctrico.
7	Hipótesis de De Broglie	$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{p}$	λ : Longitud de onda asociada a la partícula de masa m . (m) h : Constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J s) m : Masa de la partícula. (kg) v : Velocidad de la partícula. (m s^{-1}) p : Cantidad de movimiento de la partícula. (kg m s^{-1})	Con esta fórmula se puede calcular la longitud de onda asociada a cualquier cuerpo con masa y velocidad.
8	Principio de incertidumbre de Heisenberg	$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$	Δx : Incertidumbre en la posición. (m) Δp : Incertidumbre en el momento lineal. (kg m s^{-1}) h : Constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J s)	Δx y Δp representan los errores medios.

FÍSICA NUCLEAR**2.1. ÁTOMO: NÚCLEO Y ELECTRONES**

El primer modelo atómico nuclear es el de Rutherford:

Núcleo: prácticamente la totalidad de la masa del átomo se encuentra en el núcleo. Allí se encuentran los protones (carga +) y neutrones (carga neutra).

Corteza: en la corteza electrónica se encuentra toda la carga negativa, que la poseen unas partículas muy pequeñas llamadas electrones, los cuales se encuentran girando a modo de microsistema planetario.

El modelo de Rutherford es un modelo aproximado y tiene fallos. El modelo actual es el modelo de la Mecánica Cuántica o Modelo de la Nube de Carga, en el que el concepto de órbita queda sustituido por el concepto de orbital; los electrones se encuentran en los orbitales.

2.2. PARTÍCULAS NUCLEARES: PROTÓN Y NEUTRÓN.

En el núcleo se encuentran los protones y los neutrones. A las partículas del núcleo se les llama nucleones

$$p^+ \quad {}_1^1 p \quad m_p = 1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$n \quad {}_0^1 n \quad m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

La representación de un núcleo atómico es: ${}_Z^A X$, siendo $A=Z+N$

Z =nº atómico (nº de protones en el núcleo)

N =nº de neutrones en el núcleo

A =nº másico (índice de masa: nº de nucleones)

Las propiedades químicas de un elemento dependen prácticamente en su totalidad de la corteza electrónica. La radiactividad de un elemento es una propiedad exclusiva del núcleo de los átomos. La corteza electrónica no interviene prácticamente en los procesos radioactivos.

2.3. NUCLEIDOS (NÚCLIDOS). NÚMERO MÁSIICO. ISÓTOPOS.

Definición de nucleidos:

Se llaman nucleidos o núclidos a los distintos núcleos atómicos que existen en la naturaleza o pueden producirse artificialmente.

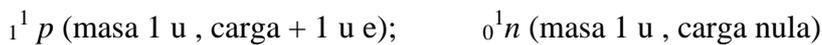
Definición de número másico

Es el número de nucleones en el núcleo (es el nº entero más próximo a su masa atómica)

$$\text{Ejemplos} \quad {}_1^1 H \quad {}_2^4 He \quad {}_6^{12} C$$

$$\text{Pat(He)} = 4,003 \text{ u} \quad \Longrightarrow \quad A=4 \quad (4 \text{ nucleones})$$

Las partículas del núcleo se representan de la siguiente manera:



Clasificación de los nucleidos. Isótopos.

Los nucleidos se clasifican de la siguiente forma:

- 1) Isótopos
- 2) Isóbaros
- 3) Isótonos
- 4) Isómeros nucleares

Isótopos:

Se llama isótopos a átomos de un mismo elemento que tienen el mismo nº atómico y distinto nº másico.

Ejemplos:

Hidrógeno	${}_1^1H$: Protio (el más abundante, 99,98 %) ${}_1^2H$: Deuterio ${}_1^3H$: Tritio
Carbono	${}_6^{12}C$: El más abundante (98,93%) ${}_6^{13}C$: ${}_6^{14}C$:
Uranio	${}_{92}^{234}U$: ${}_{92}^{235}U$: El más abundante (99,27 %) ${}_{92}^{238}U$:

Los isótopos se pueden clasificar en isótopos no radiactivos, de los que aproximadamente hay unos 300, e isótopos radiactivos, de los que aproximadamente hay unos 2000.

Todos los isótopos tienen las mismas propiedades químicas, pero distintas propiedades nucleares.

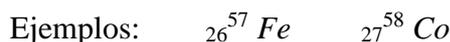
Isóbaros:

Son nucleidos de igual número másico pero distinto número atómico (Z).



Isótonos:

Son nucleidos con igual número de neutrones en el núcleo, pero con distinto número atómico y distinto número másico.



Isómeros nucleares:

Tienen el mismo nº atómico, el mismo número másico y el mismo número de neutrones en el núcleo, pero se encuentran en diferentes estados energéticos; esto quiere decir que unos núcleos están más excitados que otros energéticamente. Este diferente estado energético se debe a una diferente disposición de los nucleones en el núcleo.



2.4 INTERACCIONES DOMINANTES EN LOS ÁMBITOS ATÓMICO-MOLECULAR Y NUCLEAR. ÓRDENES DE MAGNITUD DE LAS ENERGÍAS CARACTERÍSTICAS EN LOS FENÓMENOS ATÓMICOS Y NUCLEARES.

La interacción dominante en el ámbito atómico-molecular es la interacción electromagnética, cuya expresión matemática nos viene dada por la siguiente fórmula:

$$\text{Felectromagnética} = q [\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})] \text{ Fuerza de Lorentz}$$

El orden de magnitud en el que actúa esta interacción es en el tamaño de 10^{-10}m (tamaño del átomo) $d \geq 10^{-10} \text{ m}$. El orden de magnitud de las energías características en esta interacción es de 1eV en adelante. $(\text{Energía})_{\text{electromag.}} \geq 1 \text{ eV}$. La partícula que transporta esta interacción es el fotón ($h\nu$)

Interacción nuclear fuerte (INF) : Interacción que mantiene unidos a los nucleones en el núcleo. El orden de magnitud de actuación de esta interacción es aproximadamente el tamaño del núcleo $\approx 10^{-14} \text{ m}$. Fuera del núcleo, la interacción nuclear fuerte no existe.

El orden de magnitud de las energías características de la interacción nuclear fuerte es de 1 MeV en adelante. $(\text{Energía})_{\text{INF}} \geq 1 \text{ MeV}$

Las características de la INF son:

- Alta intensidad (de fuerza)
- Corto alcance
- Atractiva-repulsiva
- Es independiente de la carga eléctrica
- Se satura

Hoy, la teoría que explica perfectamente la interacción nuclear fuerte es la Cromodinámica Cuántica o Teoría de los Quarks, en la que el protón y el neutrón no son partículas fundamentales, sino que están formadas por varios quarks.

Partículas fundamentales	Fermiones	Quarks (6+6)	Quarks de la materia: U(up), c(charm), t(top), d(down), s(strange), b(bottom) Hay otros seis quarks para la antimateria
		Leptones (6+6)	Leptones de la materia: electrón (e), muon (m), tau (T), electrón neutrino (ν_e), muon neutrino (ν_m) , tau neutrino (ν_T) Hay otros seis leptones para la antimateria
	Bosones (5 ¿+1?)	Fotón (Y), gluon (g), fuerza débil (Z_0), fuerza débil (W_{+-}), bosón de Higgs (H), ¿gravitón (G)?	
Partículas compuestas	Hadrones (partículas con carga entera)	Mesones (21) (compuestos por un quark y un antiquark) Ej: piones	
		Bariones (19) (compuestos por tres quarks) Ej: neutrón, protón	
Las partículas fundamentales de la antimateria difieren a las correspondientes de la materia en su carga eléctrica, la cual es de diferente signo.			

El núcleo de un átomo no es un estado estático, sino que es un estado dinámico; el núcleo

generalmente tiene un movimiento sobre sí mismo, al que se le llama spín nuclear. Los nucleones en el interior del núcleo tampoco están quietos, sino que se mueven y giran. Generalmente el núcleo de un átomo suele ser aproximadamente esférico y tiene un radio del orden de 10^{-14} m.

Hay varios modelos nucleares que sirven para explicar el comportamiento del núcleo de un átomo:

- 1) Modelo de la gota líquida: Es debido a Böhr. A semeja las propiedades de un núcleo a las propiedades de una gota líquida.
- 2) Modelo de capas: Fue debido a M. Mayer. Dice que en el núcleo atómico los nucleones están distribuidos en niveles energéticos, de forma parecida a los niveles energéticos de la corteza electrónica.
- 3) Modelo colectivo o mixto: También llamado modelo unificado. Es una mezcla de los anteriores y de otros modelos.

2.5 PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA MASA-ENERGÍA

En microfísica no es conveniente medir la masa en gramos o en kilogramos, sino que hay que introducir una nueva unidad de masa, llamada unidad de masa atómica (u), que se define como la doceava parte de la masa del átomo del isótopo de C-12.

$$1 \text{ u} = 1/12 \text{ m(C-12)} \quad 1 \text{ u} = 1,6604 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

La Física mide la energía de varias formas:

- 1) En Julios (J) (Macrofísica)
- 2) En eV o MeV (Microfísica)

$$V_{AB} = \frac{W_A^B}{q'}$$

Si la carga es la de un electrón: $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ y la diferencia de potencial es $V_{AB} = 1 \text{ V}$

$$W_A^B = V_{AB} \cdot q' = 1 \text{ eV} \quad (\text{un eV es la energía que adquiere un electrón sometido a una diferencia de potencial de 1 V})$$
$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- 3) En unidades de masa:
 - kg
 - g
 - u (microfísica)

Principio de equivalencia masa-energía.

En 1905, Albert Einstein publicó su primer resultado de la Teoría de la Relatividad, la cual consta de las siguientes partes:

- 1) Teoría restringida (sólo para sistemas de referencia inerciales)

2) Teoría general (para todos los sistemas, inerciales y no inerciales).

En la Teoría restringida hay un capítulo donde aparece el Principio de Convertibilidad de la masa en energía y viceversa, que venía dado por la siguiente

ecuación:

$$E = m c^2$$

E: energía

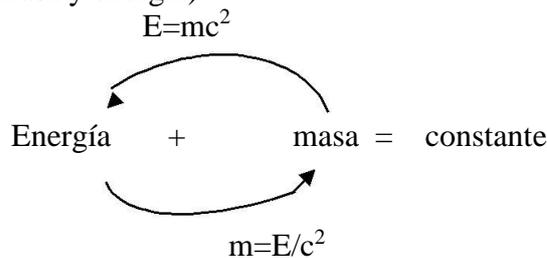
m: masa

c: velocidad de la luz = $3 \cdot 10^8$ m/s = 300.000 km/s

Esta fórmula nos dice:

- 1) “La energía es igual a la masa multiplicada por una constante”
- 2) Con esta fórmula se ve que la masa y la energía son la misma cosa, pero observadas desde diferentes puntos de vista.
- 3) La masa es energía superconcentrada; la energía es masa superdesconcentrada.

Con esta fórmula, el Principio de Conservación de la Energía engloba al Principio de Conservación de la masa: “La energía total de un sistema es siempre una constante” (englobamos masa y energía).



Con esto se ve que en la Teoría de la Relatividad la masa no es una constante, como sí era en la Mecánica Clásica de Newton.

Veamos a cuántos Julios equivale una unidad de masa atómica: (la energía también se mide en u):

$$1 \text{ u} = 1,6604 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad E = m \cdot c^2 = 1,6604 \cdot 10^{-27} \text{ kg} (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 \approx 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad 1 \text{ u} = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

Vamos a ver cuántos eV y cuántos MeV tiene una u.

$$q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} ; 1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} ; 1 \text{ u} = 1,6604 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

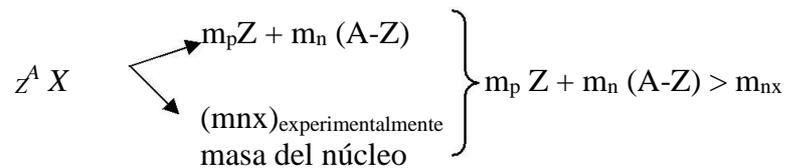
$$1 \text{ u} = 1,49226 \cdot 10^{-10} \text{ J} \cdot \frac{1 \text{ eV}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 931,5 \cdot 10^6 \text{ eV} = 931,5 \text{ MeV}$$

2.6 ENERGÍA DE ENLACE Y DEFECTO DE MASA.

Nos planteamos cuál es la energía de ligadura (energía de enlace) que mantiene unidos a los nucleones en el núcleo.

Ley General: Todo sistema en su formación tiende a un estado de energía mínima, para lograr de esta forma la máxima estabilidad. Cuando el sistema se forma, tiende a un desprendimiento de energía máxima y él se queda con la mínima energía posible.

Se sabe experimentalmente que, si un núcleo de un elemento químico se forma teóricamente a partir de sus nucleones, el núcleo real tiene menos masa que el que resultaría de sumar la masa de los nucleones que forman el núcleo.



A la diferencia de masa se le llama defecto de masa: $\Delta m = m_p Z + m_n (A-Z) - m_{nX}$

Δm es la energía de enlace expresada en unidades de masa. Es la energía que se desprende en la formación de un núcleo. Se mide en kg, g o u.

Veámoslo de otra forma:

Pueden darnos la masa atómica del elemento X, (m_{max}), y entonces hay que tener en cuenta la corteza electrónica.

$$\Delta m = m_p Z + m_e Z + m_n (A-Z) - m_{\text{max}} \quad m_{\text{max}} = m_{nX} + m_e Z$$

Masa atómica = masa del núcleo + masa de los electrones

Este defecto de masa se puede expresar en unidades de energía (J, eV y MeV) y entonces, se le llama energía de enlace o energía de ligadura del núcleo.

Para hacer el paso de Δm a E, se usa la fórmula: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ donde ΔE es la energía de enlace o energía de ligadura o amarre de un núcleo.

Definición de energía de enlace o energía de ligadura:

Es la energía que se desprende en la formación de un núcleo a partir de sus nucleones. Ésta sería la energía mínima necesaria que habría que suministrar a este núcleo para romperlo.

Definición de energía de enlace por nucleón:

La energía de enlace por nucleón teóricamente suele ser la energía mínima necesaria para arrancar o extraer un nucleón del núcleo.

$$\Delta E_{\text{nucleón}} = \frac{\Delta E}{A} \quad \text{número de nucleones : } A = Z + N$$

Dados dos núcleos es más estable aquel que tiene mayor energía de enlace por nucleón.

2.7 ESTABILIDAD NUCLEAR

Hemos dicho que los nucleidos o núclidos se podían clasificar en nucleidos estables o inestables:

Nucleidos {	1) <u>Nucleidos estables</u> : Aproximadamente son 300. No son radiactivos en su forma natural	{	a) Nucleidos inestables naturales
	2) <u>Nucleidos inestables</u> Son aprox. 2000 y radiactivos.		b) Nucleidos inestables artificiales

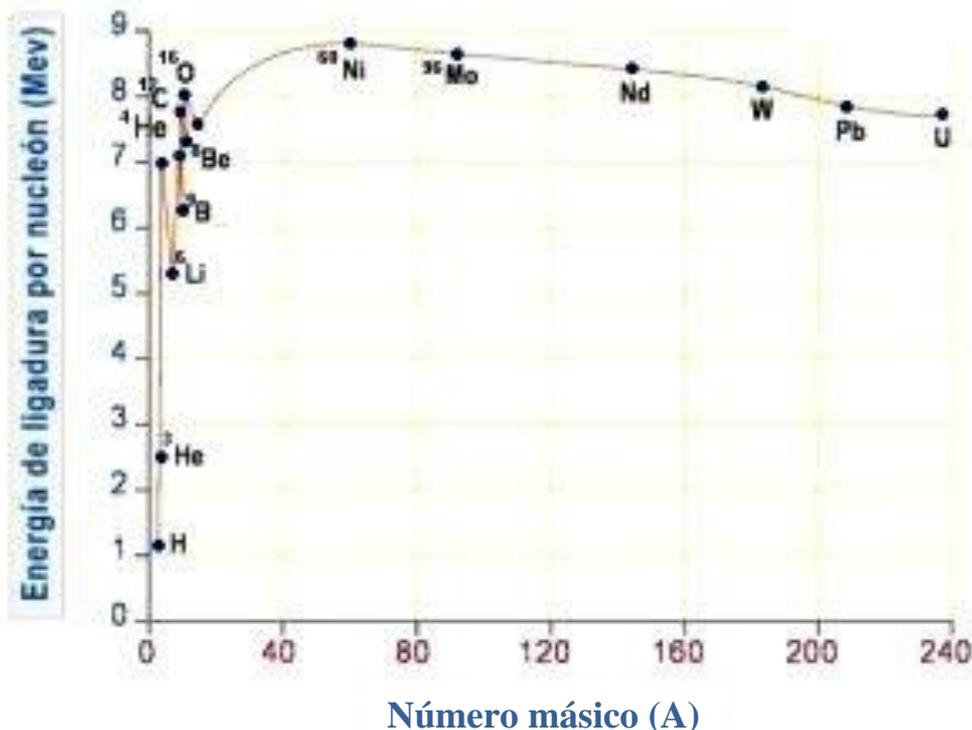
Nucleidos inestables naturales: son aquellos que son radiactivos espontáneamente y existen de esta manera en la naturaleza.

Nucleidos inestables artificiales: son radiactivos porque se les induce a serlo artificialmente, bombardeándolos con partículas adecuadas.

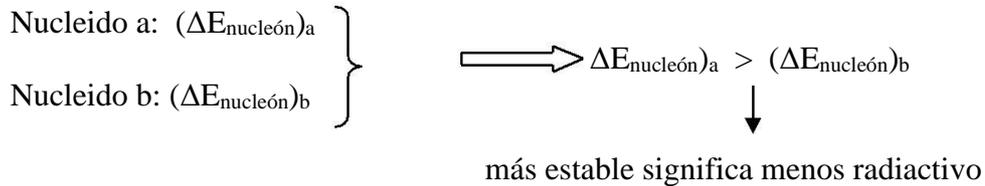
El problema de la estabilidad o inestabilidad de un núcleo es un problema de la relación N/Z. Generalmente son nucleidos radiactivos aquellos que tienen un exceso de protones o neutrones en su núcleo. La radiactividad generalmente es un problema de la relación N/Z; es un desajuste de la relación N/Z y un exceso de energía en el núcleo. Lo que provoca la radiactividad es la Interacción Nuclear Débil (IND).

Curva de estabilidad $\Delta E_{\text{nucleón}}/A$

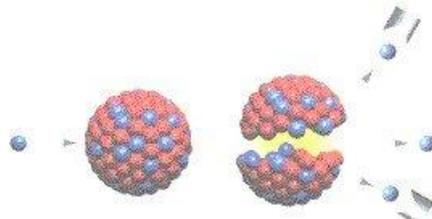
$$\Delta E_{\text{nucleón}} = \frac{\Delta E}{A}$$



- a) Las mayores energías de enlace por nucleón se presentan para los números másicos comprendidos entre 20 y 100 aproximadamente. La energía de enlace por nucleón (MeV/nucleón) es de alrededor 8,7 MeV/nucleón para los valores de A entre 20 y 100. Este valor decrece para números másicos pequeños y para números másicos grandes. Un nucleido es tanto más estable cuanto mayor es su energía de enlace por nucleón y viceversa. Dados dos nucleidos y sus respectivas energías de enlace por nucleón, es más estable aquél que tiene mayor energía de enlace por nucleón.



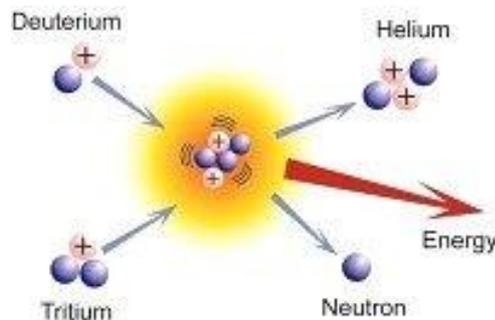
- b) Viendo la gráfica se entiende que los procesos de Fisión (“rotura”) se hacen desde los elementos más pesados a los menos pesados. La fisión nuclear se basa en dividir núcleos muy pesados en núcleos más ligeros y más estables, bombardeándolos con partículas adecuadas (neutrones)



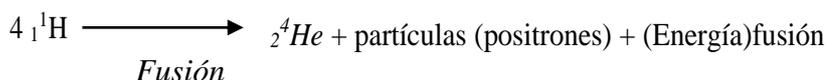
Ejemplos:

- Bomba atómica (reacción de fisión descontrolada)
- Reactores nucleares de fisión (reacción de fisión controlada)

Los procesos de Fusión nuclear, por el contrario, siguen la línea ascendente. La fusión nuclear consiste en unir dos o más núcleos ligeros para formar otros más pesados y estables.



$$(\text{Energía})_{\text{fusión}} \gg (\text{Energía})_{\text{fisión}}$$



(En las estrellas y el Sol)

2.8 REACCIONES NUCLEARES DE FISIÓN Y DE FUSIÓN

Con las curvas de estabilidad nuclear pueden justificarse cualitativamente las reacciones nucleares de fusión y fisión nuclear.

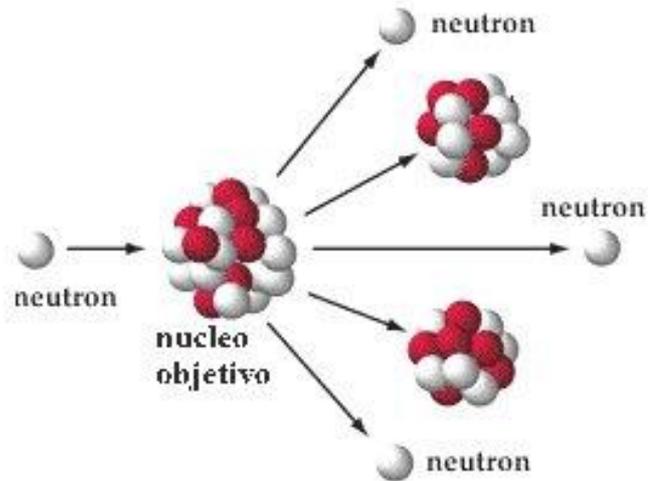
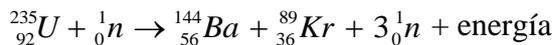
FISIÓN NUCLEAR (Fisión = Rotura) :

Es una reacción nuclear que consiste en bombardear con neutrones más o menos rápidos un núcleo pesado (generalmente uranio o plutonio, pero puede ser otro núcleo pesado).

El núcleo pesado, al sufrir el bombardeo se rompe o fisiona normalmente en dos fragmentos que suelen tener, aproximadamente, una masa intermedia.

La fisión nuclear es la base de la bomba atómica y de los reactores nucleares de fisión.

Una posible reacción de fisión nuclear es la siguiente:



Fisión nuclear

El neutrón es la partícula ideal para abrir los átomos que no tienen carga. Como se ve, en el 2º miembro hay 3 neutrones que salen muy rápidos y éstos empiezan a colisionar con los núcleos intermedios, obteniéndose una reacción nuclear en cadena, que es la base de la bomba atómica (bomba A).

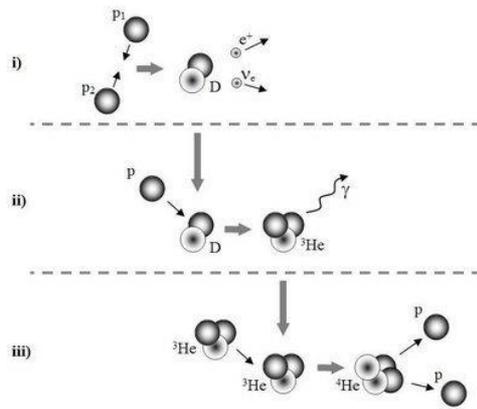
Como hemos visto, los neutrones que se obtienen en el 2º miembro de la reacción de fisión nuclear, salen a gran velocidad y pueden ser utilizados como proyectiles de bombardeo de otros núcleos de Uranio. Si se van retirando estos neutrones rápidos de la reacción de fisión nuclear, se obtiene una reacción de fisión controlada, que es el fundamento de los reactores nucleares. Si no se retiran estos neutrones rápidos, entonces se tiene una reacción nuclear no controlada, que es la base de la bomba A.

El desprendimiento de energía en una reacción nuclear de fisión es enorme, millones de veces más grande que si se quema una tonelada de gasolina.

FUSIÓN NUCLEAR (Fusión = Unión):

Consiste en la unión o fusión de núcleos ligeros para formar un núcleo más pesado. La energía que se libera en una fusión nuclear es notablemente superior a la energía que se libera en una fisión nuclear.

$$(\text{Energía})_{\text{fusión}} \gg (\text{Energía})_{\text{fisión}}$$



Los núcleos ligeros que generalmente suelen ser 1_1H , 2_1H , 3_1H .

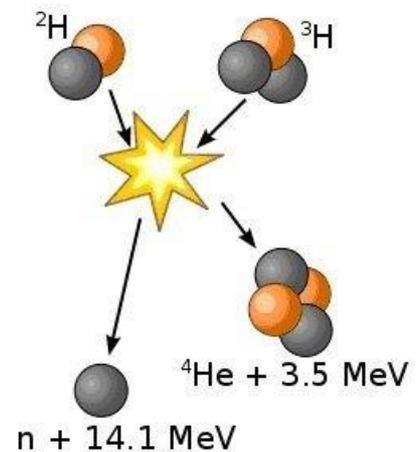
Veamos una reacción de fusión nuclear, que es la que se cree que se produce en las estrellas y en nuestro Sol.

Los protones colisionan para formar deuterio, desprendiendo un neutrino y un positrón (i), posteriormente otro protón colisiona con deuterio para formar helio 3 con desprendimiento de energía (ii), por último, dos partículas de helio 3 colisionan dando lugar a helio 4 y desprendiendo dos protones que volverían a iniciar el proceso (iii).

La bomba H (bomba de hidrógeno) es una bomba de fusión nuclear. La reacción de fusión nuclear que tiene lugar en la bomba H es la siguiente:

Para que se fusionen estos núcleos, tienen que alcanzar una temperatura de millones de grados centígrados y para lograr esto, se utiliza como detonador una bomba A, que es de fisión.

La bomba A es la que actúa como cerilla de ignición de la bomba H. A estas temperaturas tan elevadas, los átomos pierden los electrones y se forma un gas que consta de cationes y electrones, llamado plasma (4º estado de la materia). Hay que confinar el plasma en un recipiente sin paredes, pues ningún material soportaría estas temperaturas sin fundirse. Se investiga en dos caminos: confinamiento magnético y confinamiento inercial.



Efectos biológicos de las radiaciones:

Al interaccionar la radiación con la materia, en su recorrido a través de ella, le cede su energía total o parcialmente.

La materia receptora de estas radiaciones sufre diversas alteraciones como ionización, excitación o transformaciones nucleares de los átomos y moléculas. La radiación puede causar daños biológicos que en caso extremo provocan la muerte.

Etapas de la radiación sobre el organismo:

Se pueden dar cuatro fases:

Fase inicial:

En ella se presentan los primeros síntomas debidos a la radiación, como malestar general, mareo y vómitos.

Fase de latencia:

Período donde no se aprecia síntoma alguno y nada indica que el organismo está irradiado.

Fase de estado:

Es en la que se presenta el cuadro patológico del individuo afectado por las radiaciones. Se exterioriza mediante fuertes vómitos, diarreas, hemorragias nasales, fiebres, caída de pelo, alteraciones sanguíneas, etc...

Fase final:

Período que puede conducir a la recuperación o a la muerte del individuo. Las lesiones pueden ser somáticas (del cuerpo) o genéticas (genes).

Aplicaciones de la radioactividad:

Utilizándola en dosis y forma adecuada, la radioactividad no presenta efectos perjudiciales y tiene muchas utilidades:

- En medicina se usa para tratamiento y diagnóstico del cáncer y la esterilización de material quirúrgico.
- En industria se usa para examinar planchas de acero, soldaduras y construcciones.
- En química se utiliza para estudiar mecanismos de reacciones y para fabricar productos químicos.
- En otros campos se utiliza para esterilizar organismos nocivos para la agricultura, datar muestras orgánicas, fabricar relojes de precisión,...

Utilización de los radioisótopos y reactores nucleares.

Los Radioisótopos se utilizan:

1. Atendiendo a las acciones de la materia sobre la radiación :

Se usan en las medidas de densidades y espesores, así como en el control de calidad de los productos que se van a utilizar (alimenticios, industriales, ...) o en la localización de fugas en embalses.

2. Atendiendo a las acciones de las radiaciones sobre la materia: Sus aplicaciones son las siguientes:

- Eliminación de electricidad estática
- Ionización de tubos de descarga
- Pararrayos: últimamente se está demostrando que los pararrayos situados cerca de la población son peligrosos y esto se detecta con radioisótopos.
- Esterilización y conservación de alimentos
- Lucha contra las plagas.

3. Trazadores:

Algunos isótopos se utilizan como trazadores; esta utilización se basa en incorporarlos en una determinada sustancia y observar su comportamiento en ella para detectar el problema que se busca.

REACTORES NUCLEARES:

La radiactividad, como hemos visto, tiene aplicaciones beneficiosas en medicina, en la industria y en la agricultura. Además de esto, las reacciones nucleares tienen una aplicación muy importante, que son los reactores nucleares.

Un reactor nuclear es un dispositivo que puede provocar, automantener y controlar una reacción nuclear en cadena. Las partes fundamentales de las que consta un reactor nuclear son:

1. Núcleo
2. Moderador
3. Reflector y blindaje
4. Refrigerante
5. Sistema de control y seguridad.

1. Núcleo:

El núcleo de un reactor nuclear es el centro o corazón de éste y en él se tiene el material fisible o fisionable, que generalmente consiste en isótopos del Uranio, que suelen ser ^{233}U , ^{235}U (útil), y ^{238}U . También se pueden usar isótopos del Plutonio y del Torio.

2. Moderador:

Son sustancias que frenan la velocidad de los neutrones, haciéndolos lentos o térmicos (los neutrones térmicos tienen menos energía que los lentos). Se utilizan como moderadores las siguientes sustancias: grafito (carbón), cadmio, berilio, agua pesada ($^2\text{H}_2\text{O}$) y agua natural (H_2O). También se utiliza BeO (óxido de berilio).

3. Reflector y blindaje:

El reflector es el material que rodea al núcleo del reactor nuclear y que tiene la misión de evitar la salida de neutrones hacia el exterior. El blindaje de un reactor nuclear consiste en gruesas capas de plomo y hormigón.

4. Refrigerante:

Tiene por objeto extraer la energía liberada en la fisión en forma de calor, para después convertirla en energía aprovechable (energía eléctrica, generalmente). Se utiliza normalmente como refrigerante: agua, vapor de agua, sodio fundido o CO_2 .

5. Barras de control:

Tienen por objeto controlar la reacción en cadena, impidiendo que ésta se haga divergente (que desemboque en una explosión nuclear) y garantiza la seguridad del espacio que rodea al reactor. Para el sistema de control se utilizan barras muy absorbentes de neutrones (boro, cadmio o gadolinio).

2.9. RADIATIVIDAD: INTERACCIÓN DÉBIL. MAGNITUDES Y LEYES FUNDAMENTALES DE LA DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

Estudiaremos qué es la radiactividad y veremos que hay una interacción llamada Interacción Nuclear Débil que explica la radiactividad y la desintegración β .

La interacción débil es la responsable de la radiactividad y es la que dirige (controla, encauza) los procesos de emisión. Actúa sobre todas las partículas de spin semientero. No es una fuerza ni atractiva ni repulsiva, ya que no ejerce efecto de tirar o empujar directamente. La IND es de corto alcance ($d \approx 10^{-17} \text{m}$); para distancias mayores desaparece. La IND es la causante de las reacciones nucleares que tienen lugar en el Sol y las estrellas.



Breve reseña histórica de la radiactividad.

A finales del siglo XIX (1896), H. Becquerel descubrió de forma fortuita accidental la radiactividad; tenía un mineral de uranio y lo metió en un cajón en el que había varias placas fotográficas sin revelar. Después de varios días observó que las placas estaban veladas y llegó a la conclusión de que el mineral de Uranio se comportaba como un sol en miniatura, el cual tendría que lanzar radiaciones que impresionaran las placas fotográficas.



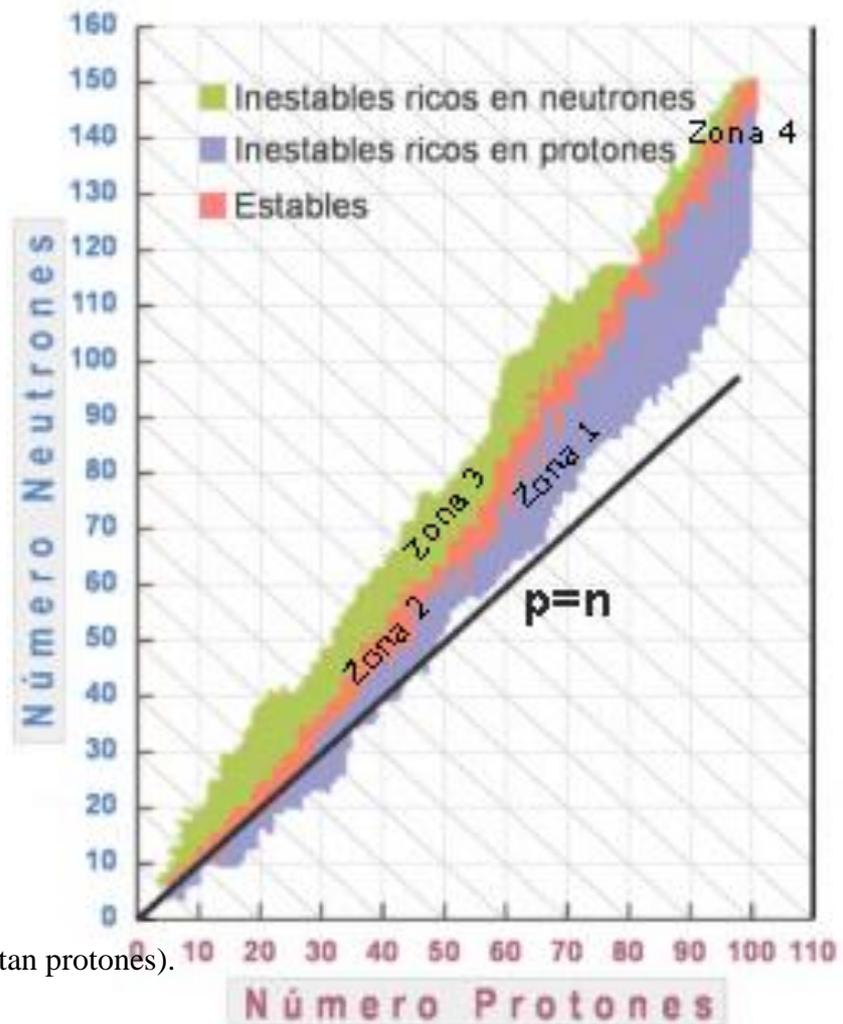
Más tarde, el matrimonio Curie observó que no sólo el Uranio emitía radiaciones, sino que el Polonio y el Radio eran más activos que el Uranio. El más activo era el Radio, y de ahí viene el nombre de radiactividad. Posteriormente se han descubierto más elementos radiactivos.

¿Qué es la radiactividad?

La radiactividad es un fenómeno nuclear (exclusivo de los núcleos) que se rige por las leyes de la probabilidad y la estadística, y que consiste en la emisión espontánea o artificial de partículas y energía desde el núcleo de átomos inestables o inducidos a la inestabilidad. Desde el núcleo salen los llamados rayos α , rayos β y rayos γ (esta es la radiactividad natural o espontánea). La interacción nuclear débil es la responsable de la radiactividad y sobre todo de la desintegración β .

Curva de estabilidad N/Z

- Zona 1 (la relación n/Z es la menor de todas) (Inestabilidad)
Esta zona es una zona de inestabilidad nuclear y sus nucleidos son radiactivos. Estos elementos radiactivos se caracterizan por emitir positrones (e^+) y por la captura electrónica. Se da la relación N/Z menor cuando al núcleo le sobran protones (o le faltan neutrones).
- Zona 2 ($1 \leq n/Z \leq 1,56$) (Estabilidad)
Esta es la zona de estabilidad, donde los nucleidos son estables y no son radiactivos generalmente.
- Zona 3 ($n/Z > 1,56$) (Inestabilidad)
Esta es una zona de inestabilidad nuclear y sus nucleidos son radiactivos. Su radiactividad consiste en la emisión de electrones (e^-) y esto se da cuando al núcleo le sobran neutrones (o le faltan protones).
- Zona 4 (Inestabilidad)
Esta zona es de núcleos pesados. Tienen excesos de protones y de neutrones. Alcanzan la estabilidad emitiendo partículas α (${}^4_2\text{He}^{2+}$).



Descripción de los procesos α , β y γ . Justificación de las leyes del desplazamiento radiactivo (Leves de Soddy y Fajans).

Rayos α (partículas α)

Consisten en partículas cargadas positivamente que salen del núcleo a gran velocidad (entre 15000 y 22500 km/s aproximadamente). Se supo que estas partículas estaban cargadas positivamente y que tenían masa, y, más tarde se calculó su masa y su carga y se vio que coincidían con núcleos de Helio. Luego los rayos α son núcleos de Helio que salen a gran velocidad del núcleo.



Las partículas α son poco penetrantes y muy ionizantes.

Rayos β (partículas β)

Consisten en partículas cargadas negativamente y con masa, que salen del núcleo a gran velocidad, la cual es una fracción de la de la luz. Se descubrió que las partículas β tenían carga negativa y masa, y midiéndolas se comprobó que eran electrones que salían del núcleo a gran velocidad. El poder de penetración de las partículas β es mayor que el de las α , pero son menos ionizantes.

partículas $\beta = e^-$

Rayos γ (Energía)

Es radiación electromagnética de alta energía. No tienen ni masa ni carga, por lo que no son desviados por campos eléctricos ni magnéticos como las anteriores (α y β). Los rayos γ consisten en energía en forma de ondas electromagnéticas (salen a la velocidad de la luz). Son fotones que salen del núcleo a dicha velocidad. Los rayos γ son muy penetrantes y menos ionizantes que los anteriores.

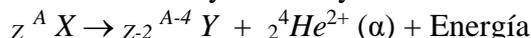
Ley de Soddy - Fajans	TIPO DE DESINTEGRACIÓN		PARTÍCULA EMITIDA	RESULTADO	PROCESO
1ª	Desintegración α (alfa)		α (${}^4_2\text{He}$)	${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He}$	
2ª	Desintegración β (beta)	β^-	e^- (electrón)	${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + e^- + \bar{\nu}$	${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p^+ + {}^0_{-1}e^- + \bar{\nu}$
		β^+	e^+ (positrón)	${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + e^+ + \nu$	${}^1_1p^+ \rightarrow {}^1_0n + {}^0_1e^+ + \nu$
		Captura electrónica		${}^A_Z\text{X} + {}^0_{-1}e^- \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + \nu$	${}^1_1p^+ + {}^0_{-1}e^- \rightarrow {}^1_0n + \nu$
3ª	Desintegración γ (gamma)		Fotones γ	${}^A_Z\text{X}^* \rightarrow {}^A_Z\text{X} + \gamma$	
			${}^A_Z\text{X}^*$ (núcleo X excitado)	$\bar{\nu}$ (antineutrino); ν (neutrino)	

Leyes del desplazamiento radiactivo (Leyes de Soddy y Fajans).

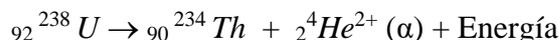
A estas leyes se les llama también leyes de la transmutación de los elementos y se refieren a la radiactividad natural o espontánea.

1ª Ley de Soddy y Fajans (desintegración α):

Cuando un núcleo radiactivo emite una partícula α , este núcleo retrocede dos lugares en la tabla periódica (su número atómico disminuye en dos y su número másico disminuye en cuatro).



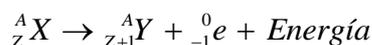
Ejemplo:



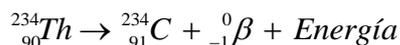
La 1ª Ley es un claro ejemplo de núcleos que tienen un exceso de protones. La desintegración α se produce sobre todo en núcleos grandes (pesados).

2ª Ley de Soddy y Fajans (desintegración β):

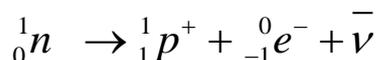
Cuando un núcleo radiactivo emite una partícula β ($\beta=e^-$), éste se transforma en un nuevo núcleo; este nuevo elemento avanza un lugar en la tabla periódica (su número atómico aumenta en una unidad y su número másico permanece constante). La Interacción nuclear débil es la responsable total de la desintegración β .



Ejemplo:



¿Cómo es posible que salgan electrones del núcleo si en el núcleo no existen electrones? Lo que sucede en el núcleo es lo siguiente:



En el núcleo, un neutrón se transforma en un protón y en un electrón. El antineutrino fue predicho por Fermi para que se conservara el momento lineal de este proceso; más tarde se confirmó su existencia.

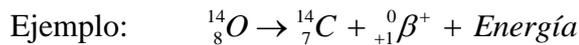
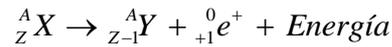
Ampliación de la 2ª Ley de Soddy-Fajans:

La radiactividad artificial consiste en bombardear un núcleo con partículas adecuadas y el núcleo se transforma en radiactivo. Haremos algunas consideraciones en relación a la radioactividad natural:

β^- : β^- (e^-) negatrón o electrón

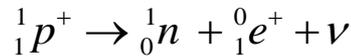
β^+ (e^+) positrón (antimateria del electrón) (R. artificial)

Ampliación de la ley: cuando a un núcleo estable se le induce a la radiactividad artificial, además de los procesos normales α , β y γ , también puede emitir una partícula β^+ (positrón); entonces, el núcleo se transforma en un nuevo elemento, el cual retrocede una posición en el Sistema Periódico (su número atómico disminuye en una unidad y su número másico permanece constante).



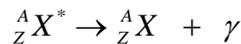
¿De dónde procede ese electrón positivo?

En el núcleo, un protón se ha transformado en un neutrón y en un positrón

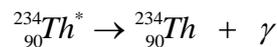


3ª Ley de Soddy y Fajans (emisión γ):

Cuando un núcleo radiactivo emite un rayo γ (energía) su número atómico y su número másico no se alteran; sólo sucede que el núcleo pasa de un estado excitado a otro menos excitado; lo que se ha producido es una reorganización energética dentro del núcleo y éste expulsa lo que le sobra en forma de energía.



Por ejemplo:



Un rayo γ acompaña generalmente a todo proceso α o β . Estos rayos γ son siempre de la misma naturaleza que la luz, pero mucho más energéticos.

2.10. LEY DE LA DESINTEGRACIÓN RADIATIVA.

Velocidad de desintegración

- Denominamos:
 - N_o : número de núcleos radiactivos iniciales
 - N : número de núcleos radiactivos finales
 - Δt : periodo de tiempo transcurrido desde que la muestra tenía N_o hasta que tiene N
 - $\Delta N = N - N_o \Rightarrow -\Delta N = N_o - N = \text{núcleos desintegrados}$

- Definimos la velocidad media de desintegración: $\bar{v}_{\text{desintegración}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$

Por lo que la velocidad instantánea de desintegración: $(v_{\text{desintegración}})_{\text{instantánea}} = -\frac{dN}{dt}$

A esta velocidad instantánea de desintegración se le denomina actividad (A):

$$(v_{\text{desintegración}})_{\text{instantánea}} = A$$

- La actividad se mide en el S.I. en desintegraciones por segundo (DPS), unidad denominada “Becquerel”(Bq):

$$1Bq = 1 \frac{\text{núcleo desintegrado}}{\text{segundo}} = 1 \frac{\text{desintegración}}{\text{segundo}}$$

El Becquerel es una unidad pequeña, por lo que a veces se utiliza el curio (Ci) donde 1 Ci=3,70 10¹⁰ DPS. Un curio es la actividad de un gramo de ²²⁶Ra.

Ley de desintegración radiactiva

- Experimentalmente, se observa que la velocidad de desintegración radiactiva de una muestra, la denominada actividad radiactiva, es directamente proporcional al número de núcleos presentes en ese instante en la muestra”

$$(v_{\text{desintegración}})_{\text{instantánea}} = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N = A$$

Donde λ es la constante de desintegración radiactiva (se mide en s⁻¹)

- Vamos a obtener la Ley de desintegración radiactiva integrando la expresión anterior en forma diferencial:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \Rightarrow -\frac{dN}{N} = \lambda \cdot dt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda \cdot dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{Ln}[N]_{N_0}^N = -\lambda \cdot t \Rightarrow \text{Ln}N - \text{Ln}N_0 = -\lambda \cdot t \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{Ln} \frac{N}{N_0} = -\lambda \cdot t \Rightarrow \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

- Esta Ley de desintegración radiactiva nos sirve para saber la cantidad de sustancia radiactiva que hay en un instante determinado en función de la cantidad inicial y la constante de desintegración radiactiva. Esta ley la podemos encontrar de diferentes maneras:

Fórmula	En función de...	Significado de los símbolos
$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$	...el número de núcleos radiactivos	<p>N: número de núcleos radiactivos en el instante final (t).</p> <p>N₀: número de núcleos radiactivos en el instante inicial.</p> <p>λ: constante de desintegración radiactiva (depende de la sustancia)</p> <p>t: tiempo transcurrido desde la situación inicial a la final.</p>

$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$	...la masa de núcleos radiactivos	m: masa de núcleos radiactivos en el instante final (t). m ₀ : masa de núcleos radiactivos en el instante inicial.
$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$	...la actividad radiactiva	A: actividad radiactiva de la muestra en el instante final (t). A ₀ : actividad radiactiva de la muestra en el instante inicial.
$n = n_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$	...el número de moles de núcleos radiactivos	n: número de moles de los núcleos radiactivos en el instante final (t). n ₀ : número de moles de los núcleos radiactivos en el instante inicial.
$c = c_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$	...la concentración de núcleos radiactivos	c: concentración de núcleos radiactivos en el instante final (t). c ₀ : concentración de núcleos radiactivos en el instante inicial.

Periodo de semidesintegración ($t_{1/2}$)

Se define el periodo de semidesintegración como el tiempo que tiene que transcurrir para que la actividad de una muestra radiactiva se reduzca a la mitad, es decir, el tiempo necesario para que el número de núcleos de una muestra radiactiva se reduzca a la mitad.

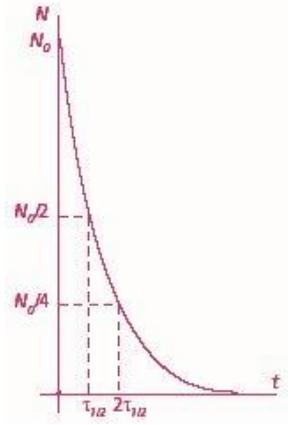
$$\begin{aligned}
 A &= A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow \left\{ A = \frac{A_0}{2} \right\} \Rightarrow \frac{A_0}{2} = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} \Rightarrow \\
 \Rightarrow \frac{1}{2} &= e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} \Rightarrow \text{Ln} \frac{1}{2} = \text{Ln} e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} \Rightarrow \text{Ln} 1 - \text{Ln} 2 = -\lambda \cdot t_{1/2} \Rightarrow \\
 \Rightarrow -\text{Ln} 2 &= -\lambda \cdot t_{1/2} \Rightarrow t_{1/2} = \frac{\text{Ln} 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}
 \end{aligned}$$

Vida media (τ)

Se define la vida media (τ) como el inverso de la constante de desintegración radiactiva. El concepto de vida media para un núcleo radiactivo determinado representa lo mismo que la “esperanza de vida” para un ser humano, es decir, se trata de un promedio de la vida que se espera que tenga un núcleo antes de sufrir el proceso de desintegración radiactiva.

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

La representación gráfica del número de núcleos en función del tiempo transcurrido sería de la forma que se indica en la gráfica adjunta.



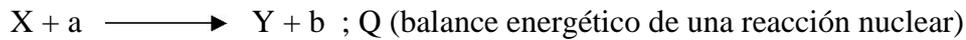
Unidades del S.I. : $t(s)$ $\lambda(s^{-1})$ $t_{1/2}(s)$ $A(Bq)$ $\tau(s)$

2.11 BALANCE ENERGÉTICO (MASA-ENERGÍA) EN LAS REACCIONES NUCLEARES

En las reacciones nucleares se tiene que cumplir necesariamente que la energía antes de la reacción tiene que ser igual a la energía después de la reacción. También se tiene que cumplir siempre que el número de nucleones antes de la reacción tiene que ser igual al número de nucleones después de la reacción. Hay que tener en cuenta que en el concepto de energía se engloba también la masa.

Definición de reacción nuclear: Se denomina reacción nuclear a las transformaciones que sufren los núcleos por la acción de partículas elementales. También se puede definir como “el proceso a través del cual un núcleo se bombardea con partículas y se transforma en otro núcleo distinto”.

Una reacción nuclear se representa de la siguiente manera:



Q es la energía absorbida o liberada en una reacción nuclear.

X(a,b)Y	X : blanco	a : partícula de bombardeo
	Y : núcleo resultante	b : partícula resultante

$$Q = m_x c^2 + m_a c^2 - (m_y c^2 + m_b c^2) = \Delta m c^2 ;$$

$$Q = \Delta m \cdot c^2$$

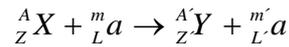
$$\Delta m = m_x + m_a - (m_y + m_b)$$

Leyes que debe cumplir una reacción nuclear:

De las que vamos a ver, las más importantes son la 1, la 2, la 3 y la 4 para hacer problemas, pero las demás también se cumplen.

1. Ley de conservación de la carga:

“La suma de los subíndices en un miembro debe ser igual a la suma de los subíndices en el 2º miembro”



$$Z + L = Z' + L'$$

2. Conservación del número de nucleones:

“La suma de los superíndices en un miembro es igual a la suma de los superíndices en el otro miembro”

$$A + m = A' + m'$$

3. Conservación de la energía (masa-energía):

“La energía antes de la reacción nuclear tiene que ser igual a la energía después de la reacción”

$$(\Sigma \text{Energía})_{\text{antes}} = (\Sigma \text{Energía})_{\text{después}}$$

4. Conservación del momento lineal :

“El momento lineal antes de la RN es igual al momento lineal después de la RN”

$$(\Sigma p_i)_{\text{antes}} = (\Sigma p_i)_{\text{después}} \quad (p = m \cdot v)$$

5. Conservación del momento cinético

$$(L_T)_{\text{antes}} = (L_T)_{\text{después}}$$

6. Conservación de la paridad

La paridad es un tratamiento matemático de lo que podría ser descrito como la simetría especular de muchos fenómenos naturales.

2.12 INTERACCIONES FUNDAMENTALES DE LA NATURALEZA. BÚSQUEDA DE LA UNIFICACIÓN

La Naturaleza y el Universo conocido se pueden explicar hoy día por cuatro interacciones fundamentales que son:

1. Interacción gravitatoria
2. Interacción electromagnética
3. Interacción nuclear fuerte (Interacción cromodinámica, INF)
4. Interacción nuclear débil (IND)

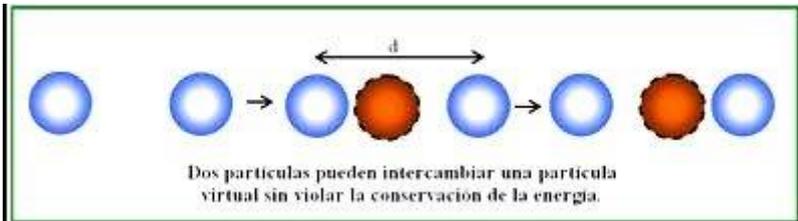
Con estas cuatro fuerzas se pueden explicar todas las interacciones que existen en el Universo.

En los últimos años, muchos científicos del mundo están tratando de unificar en una sola teoría

estas cuatro interacciones. Así han surgido las teorías siguientes:

- Teoría de la supergravedad.
- Teoría de las supercuerdas.

La Teoría de la Gran Unificación fue comenzada por Albert Einstein, que murió en 1955. La Teoría moderna que explica la interacción entre dos sistemas es mediante el intercambio de una partícula. Esta teoría es debida a H. Yukawa.



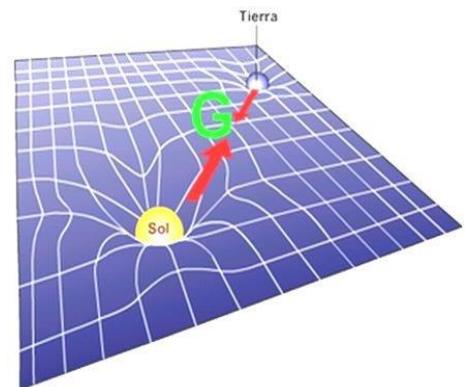
La partícula transporta la interacción.

INTERACCIÓN GRAVITATORIA

Es el resultado de la unión de la gravedad terrestre y la gravedad celeste, que fue realizada por Newton en 1686. Esta interacción se expresa mediante esta ley:

$$\vec{F} = -G \frac{m \cdot m'}{r^2} \vec{u}_r$$

La fuerza gravitatoria actúa sobre todas las partículas con masa y el alcance es ilimitado (infinito). El origen o fuente de esta interacción reside en la masa y el dominio de influencia en el Cosmos (Universo).



La partícula energética que produce la interacción gravitatoria es el gravitón, que aún no se ha descubierto, pero los cálculos predicen su existencia. Su masa en reposo es cero. El gravitón es el cuanto fundamental de energía gravitatoria y es la partícula energética que transporta la interacción gravitatoria.

INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La fuerza electromagnética es la unión de la fuerza eléctrica y la fuerza magnética, que fue hecha por J. C. Maxwell en 1864.

$$F_{\text{electromagnética}} = F_{\text{eléctrica}} + F_{\text{magnética}}$$

$$\vec{F}_{\text{eléctrica}} = K \frac{q \cdot q'}{r^2} \vec{u}_r$$

$$\vec{F}_{\text{electromagnética}} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{- Ley de Lorentz completa -}$$

$$\vec{F}_{\text{magnética}} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

El campo magnético es creado por cargas en movimiento. La interacción electromagnética se expresa cuantitativamente y cualitativamente por las cuatro ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo.

El origen o la fuente de esta interacción está en la carga (positiva y negativa). El dominio de influencia de esta interacción es el atómico-molecular.

Las fuerzas electromagnéticas actúan entre partículas cargadas y su alcance es ilimitado (infinito). La partícula que se intercambian dos campos electromagnéticos es el fotón (para explicar esta interacción).

El fotón es una partícula energética cuya masa en reposo es cero y es el cuanto elemental que transporta la interacción electromagnética.

INTERACCIÓN NUCLEAR FUERTE:

La interacción nuclear fuerte es la causante de la fuerza que mantiene unidos a los nucleones en el núcleo de los átomos.

$${}^A_Z X \quad A=Z+N \text{ (nº de nucleones)} \quad r_{\text{núcleo}} \approx 10^{-14} \text{ m}$$

Las propiedades de la interacción nuclear fuerte son:

1. Es una fuerza fuerte de corto alcance. Solo existe dentro del núcleo.
2. Tiene una efectividad máxima a la distancia aproximada de 10^{-15} m (1 Fermi).
3. La fuerza nuclear fuerte es independiente de la carga que haya en el núcleo.

$$F_{nn} = F_{pp} = F_{pn} ; \quad F_{NF} \approx 10^2 F_{\text{electromagnética}}$$

F_{nn} = fuerza entre neutrones

F_{pn} = fuerza entre un p^+ y un 0^1n

4. La fuerza nuclear fuerte es saturada. Estas fuerzas sólo se manifiestan entre un nucleón y sus vecinos más próximos.

La fuerza entre nucleones es un residuo de la fuerza cromodinámica que se da entre quarks.

El núcleo de un átomo no es nunca un sistema estático, sino que es un sistema dinámico en constante cambio. Hasta hace poco se creía que la partícula que se intercambiaban los nucleones (protones y neutrones) eran los mesones π ; esta teoría primaria es de H. Yukawa. Esta teoría se sabía que era inestable (la teoría de los mesones).

Existe una teoría moderna que explica perfectamente la interacción nuclear fuerte, llamada Interacción Cromodinámica y se basa en la teoría de los quarks. La teoría de los quarks nos dice que el protón y el neutrón no son partículas fundamentales, sino que están formadas por varios quarks. Los quarks son partículas coloreadas; tienen una carga de color (rojo, azul, verde). Luego el origen o fuente de la interacción nuclear fuerte es la carga

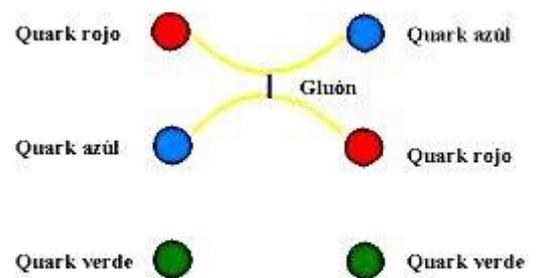


Diagrama de Feynman de la interacción fuerte

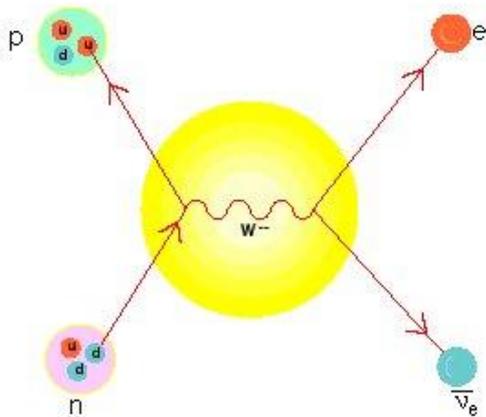
de color. Hoy se sabe que hay 6 quarks y con ellos se explican todas las partículas fundamentales. El dominio de influencia de la INF es: explica los núcleos y la existencia de la materia.

Los constituyentes fundamentales de los núcleos de los átomos son los quarks. Las partículas que se intercambian dos quarks para explicar la INF es el gluón (hay 8).

gluon (partícula energética que transporta el color y es eléctricamente neutra)

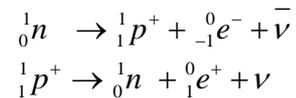
El gluon es una partícula sin masa, eléctricamente neutra.

INTERACCIÓN NUCLEAR DÉBIL (INTERACCIÓN UNIVERSAL DE FERMI)



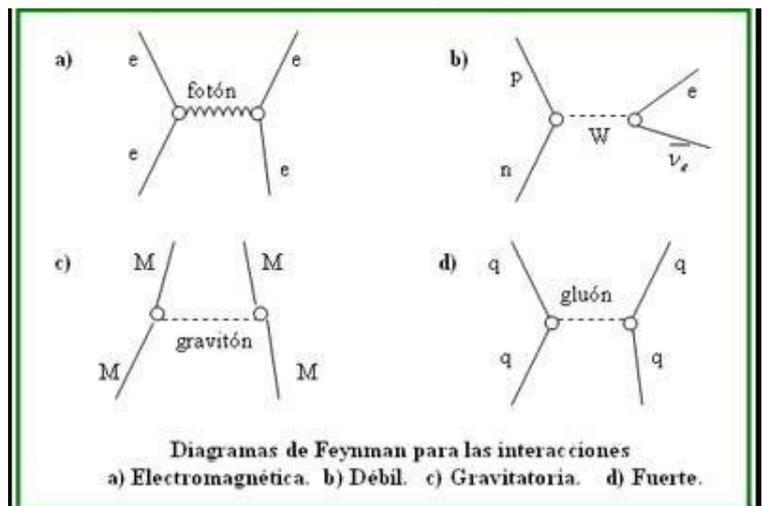
La interacción nuclear débil existe entre todo par de partículas elementales y es de corto alcance. El origen o fuente de esta interacción es la carga débil que poseen las partículas fundamentales. El dominio de influencia de la IND es que es la responsable de la radiactividad y, sobre todo, de la desintegración radiactiva β y de algunas reacciones nucleares que tienen lugar en las estrellas.

Ejemplos de IND:



La distancia efectiva a la que actúa esta interacción es aproximadamente $10^{-17}m$. Esta fuerza actúa principalmente entre electrones, neutrinos y quarks.

Las partículas que transportan esta Interacción se llaman bosones vectoriales intermedios (Z^0 , W^\pm). Estas partículas tienen masa y son las partículas materiales que transportan la IND.



A modo de resumen, se exponen los tipos de interacciones y los tipos de partículas:

Bosones	Existencia	Espín	Carga EM	Carga de color	Interacción	Masa (MeV/c ²)
<u>Fotón</u>	Confirmada	1	Neutra	Neutra	<u>electromagnética</u>	0
<u>Bosón W</u>	Confirmada	1	± 1	Neutra	<u>débil</u>	80.000
<u>Bosón Z</u>	Confirmada	1	Neutra	Neutra	<u>débil</u>	91.000
<u>Gluón</u>	Confirmada	1	Neutra	color+anticolor	<u>fuerte</u>	0
Gravitón	Hipótesis	2	Neutra	Neutra	gravitatoria	
Bosón de Higgs	Hipótesis	0	Neutra	Neutra	masa	
Axión	Hipótesis	1	Neutra	Neutra		

La existencia del Bosón de Higgs está confirmada desde marzo de 2013.

Comparando las cuatro interacciones, si a la fuerza nuclear fuerte se le da el valor 1, entonces

$$F_{NF} = 1 \qquad F_g \approx 10^{-40} F_{NF}$$

$$F_{\text{electromag}} \approx 10^{-2} F_{NF} \qquad F_{ND} \approx 10^{-15} F_{NF}$$

Hoy día los científicos de todos los países están tratando de unificar estas cuatro interacciones.

CUESTIONES Y PROBLEMAS DE FÍSICA NUCLEAR

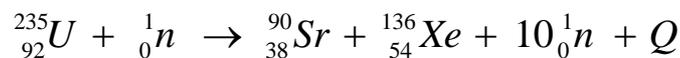
1.- Calcula el defecto de masa, energía de ligadura y energía de enlace por nucleón del siguiente nucleido $^{12}_6\text{C}$.

Datos: $m_p = 1.007277 \text{ u}$; $m_n = 1.008665 \text{ u}$; $m_{\text{C-12}} = 12.0000 \text{ u}$; $1 \text{ u} = 1.6604 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}$; $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

2.- De los núclidos $^{16}_8\text{O}$ y $^{206}_{84}\text{Po}$, ¿Cuál es más estable? Razona la respuesta.

Datos: $(\Delta E_{\text{nucleón}})_{\text{O-16}} = 7.98 \text{ MeV/nucleón}$; $(\Delta E_{\text{nucleón}})_{\text{Po-216}} = 7.84 \text{ MeV/nucleón}$

3.- Calcula en MeV la energía desprendida en la fisión de un núcleo de U-235 de acuerdo con la siguiente reacción:



Datos: $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}$; $^{235}\text{U} = 235,0439 \text{ u}$; $^{90}\text{Sr} = 90,00734 \text{ u}$; $^{136}\text{Xe} = 135,9072 \text{ u}$; ${}^1_0\text{n} = 1,0087 \text{ u}$

4.- Calcular en MeV la energía que se libera en la fusión de 4 átomos de hidrógeno para formar uno de helio según la reacción nuclear siguiente:



Datos: $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}$; ${}^4_2\text{He} = 4,002603 \text{ u}$; ${}^1_1\text{H} = 1,007825 \text{ u}$; ${}^0_{+1}\text{e} = 0,000548 \text{ u}$

5.- La fisión de un núcleo ^{235}U produce una energía de 200 MeV. Calcula la cantidad que habría que quemar de un carbón de poder calorífico 6000 kcal/kg, para que produjese la misma energía que la fisión de 1 g de ^{235}U .

Datos: $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ partículas/mol}$; $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $1 \text{ J} = 0,24 \text{ cal}$.

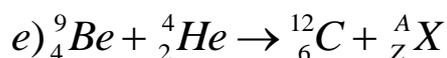
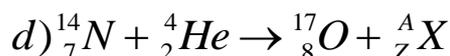
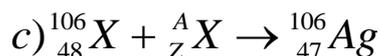
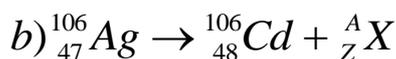
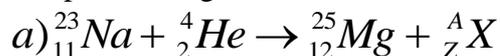
6.- Una reacción de fisión nuclear del $^{235}_{92}\text{U}$ produce $^{94}_{38}\text{Sr}$ y $^{140}_{54}\text{Xe}$ liberándose dos neutrones:

a. Escribe la ecuación de dicha reacción de fisión y calcular la variación de masa

b. Calcula la energía liberada en J(Julios) si 50 g de U-235 sufren esa reacción.

Datos: $^{235}\text{U} = 234,9943 \text{ u}$; $^{94}\text{Sr} = 93,9754 \text{ u}$; $^{140}\text{Xe} = 139,9196 \text{ u}$; ${}^1_0\text{n} = 1,0089 \text{ u}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ partículas/mol}$

7.- Completa las siguientes reacciones nucleares:



8.- Cuando se bombardea con neutrones el flúor de masa atómica 18,9984 u y número atómico 9 se forma un nuevo elemento y se emite una partícula α . Describe la ecuación correspondiente a esta transmutación y deduce a partir de ella los números másicos y atómico del nuevo elemento. ¿De qué elemento se trata?

9.- El Th-234 se desintegra emitiendo dos partículas β seguidas de dos partículas α .

- Escribe las reacciones nucleares que tiene lugar
- Determina el isótopo resultante.

Dato: El número atómico del Th es 90.

10.- Durante su vida, los organismos vivos absorben C – 14, que es radiactivo, y esta absorción cesa con la muerte del organismo. Debido a la presencia de este isótopo, que tiene un periodo de semidesintegración de 5560 años, se encontró que restos de un yacimiento arqueológico tenían una actividad de 26 Ci (curios). Un esqueleto reciente da una actividad de 32.6 Ci. Calcular la edad de los especímenes arqueológicos.

11.- El período de semidesintegración del ^{90}Sr es de 28 años. Calcula:

- La vida media y la constante de desintegración
- La actividad de una muestra de 2 mg de ^{90}Sr
- Tiempo que tiene que transcurrir para que dicha muestra se reduzca a 0,5 mg.
- La actividad de dicha muestra de 0,5 mg.

Dato: $N_A=6,023 \cdot 10^{23}$ partículas/mol.

12.- El período de semidesintegración del elemento radiactivo ^{238}X , que se desintegra emitiendo partículas α es de 28 años.

- ¿Cuánto tiempo tiene que transcurrir para que su masa se reduzca al 75% de la muestra original?
- Si en un momento dado la masa es de 0,1 mg, ¿Cuántos núcleos de helio se formarán por unidad de tiempo en ese instante?

Dato: $N_A=6,023 \cdot 10^{23}$ partículas/mol

13.- El período de semidesintegración del ^{226}Ra es de 1620 años. Calcula la actividad de 1 g de Radio-226.

Dato: $N_A=6,023 \cdot 10^{23}$ átomos/mol

SOLUCIONES A LOS EJERCICIOS DEL TEMA 5 (FÍSICA NUCLEAR)

1- 0,095652 u ; 89,10 MeV ; 7,43 MeV · (nucleón)⁻¹

2- ${}_8^{16}\text{O}$

3- 47,56 MeV

4- 25,71 MeV

5- 3284,7 kg

6- a) ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{38}^{94}\text{Sr} + {}_{54}^{140}\text{Xe} + 2{}_0^1\text{n}$ b) $1,73 \cdot 10^{15} \text{ J}$

7- a) ${}_1^2\text{H}$ b) ${}_{-1}^0\beta$ c) ${}_{-1}^0\beta$ d) ${}_1^1\text{H}$ e) ${}_0^1\text{n}$

8- ${}_{9}^{19}\text{F} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_7^{16}\text{X} + {}_2^4\alpha$; ${}_7^{16}\text{X} = {}_7^{16}\text{N}$

9- a) (i) ${}_{90}^{234}\text{Th} \rightarrow {}_{92}^{234}\text{X} + 2{}_{-1}^0\beta$; (ii) ${}_{92}^{234}\text{U} \rightarrow {}_{88}^{226}\text{X} + 2{}_2^4\alpha$; (${}_{90}^{234}\text{Th} \rightarrow {}_{88}^{226}\text{X} + 2{}_2^4\alpha + 2{}_{-1}^0\beta$) b)
 ${}_{88}^{226}\text{X} = {}_{88}^{226}\text{Ra}$

10- 1814,6 años

11- a) $0,02476 \text{ años}^{-1}$; 40,4 años b) $1,0496 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ c) 56 años d) $2,63 \cdot 10^9 \text{ Bq}$

12- a) 11,6 años b) $6,26 \cdot 10^{15}$ núcleos de helio formados por año o bien $1,986 \cdot 10^8$ partículas alfa por segundo

13- $3,615 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

FORMULARIO DE FÍSICA NUCLEAR

N°	LEY / CONCEPTO	FÓRMULA	SIGNIFICADO DE LOS SÍMBOLOS	UTILIDAD / OBSERVACIONES
1	Defecto másico	$\Delta m = m_p Z + m_n (A - Z) - m_x$	Δm : Defecto másico. (kg) m_p : Masa de un protón. ($1,6725 \cdot 10^{-27}$ kg) Z : Número atómico (número de protones) m_n : Masa de un neutrón. ($1,6748 \cdot 10^{-27}$ kg) A : Número de nucleones (protones y neutrones) m_x : Masa del núcleo del átomo X. (kg)	Esta expresión sirve para calcular el defecto másico al formarse un núcleo a partir de sus nucleones.
2	Energía de enlace	$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$	ΔE : Energía de enlace. (J) Δm : Defecto másico. (kg) c : Velocidad de la luz en el vacío. ($m \cdot s^{-1}$)	Con esta fórmula podemos calcular la energía de enlace en un núcleo a partir de su defecto másico.
3	Energía de enlace por nucleón	$\Delta E_{nucleón} = \frac{\Delta E}{A}$	$\Delta E_{nucleón}$: Energía de enlace por nucleón. (J) ΔE : Energía de enlace. (J) A : Número de nucleones (protones y neutrones)	El núcleo que tiene mayor energía de enlace por nucleón es más estable energéticamente.
4	1ª Ley de desplazamiento radiactivo: Desintegración alfa (α)	${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4} Y + {}_2^4 He$	${}_2^4 He = {}_2^4 \alpha$	Esta radiación es muy ionizante pero poco penetrante.
5	2ª Ley de desplazamiento radiactivo: Desintegración beta negativa (β^-)	${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z+1}^A Y + {}_{-1}^0 e^- + \bar{\nu}$ ${}_0^1 n \rightarrow {}_1^1 p^+ + {}_{-1}^0 e^- + \bar{\nu}$	${}_{-1}^0 e^- = {}_{-1}^0 \beta^-$: Electrón $\bar{\nu}$: Antineutrino ${}_0^1 n$: Neutrón ${}_1^1 p^+$: Protón	Esta radiación es menos ionizante pero más penetrante que la α .
6	2ª Ley de desplazamiento radiactivo: Desintegración beta positiva (β^+)	${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-1}^A Y + {}_1^0 e^+ + \nu$ ${}_1^1 p^+ \rightarrow {}_0^1 n + {}_1^0 e^+ + \nu$	${}_1^0 e^+ = {}_1^0 \beta^+$: Positrón ν : Neutrino	El positrón (antimateria) emitido se desintegrará rápidamente al entrar en contacto con partículas de materia.

7	Captura electrónica	${}^A_ZX + {}^0_{-1}e^- \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \nu$ ${}^1_1p^+ + {}^0_{-1}e^- \rightarrow {}^1_0n + \nu$	${}^1_1p^+$: Protón ${}^0_1e^+ = {}^0_1\beta^+$: Positrón 1_0n : Neutrón ν : Neutrino	Es el único tipo de desintegración nuclear que no emite ninguna partícula.
8	3ª Ley de desplazamiento radiactivo: Desintegración gamma (γ)	${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$	${}^A_ZX^*$: Núcleo excitado A_ZX : Núcleo desexcitado γ : Radiación gamma	Esta radiación no es ionizante pero es muy penetrante.
9	Velocidad de desintegración radiactiva	$v_{desin} = -\frac{dN}{N} = \lambda \cdot N = A$	v_{desin} : Velocidad de desintegración. (núcleos/s) dN : Diferencial del número de núcleos. N : Número de núcleos radiactivos. λ : Constante de desintegración radiactiva. (s^{-1}) A : Actividad radiactiva. (desintegraciones/s = Bq)	Relaciona la actividad radiactiva con el número de núcleos radiactivos presentes en la muestra.
	Ley de desintegración radiactiva	$N = N_0 e^{-\lambda t}$	N : Número de núcleos radiactivos finales. N_0 : Número de núcleos radiactivos iniciales. e : Número e (2,71828...) t : Tiempo transcurrido. (s)	Esta ecuación nos permite conocer la antigüedad de una muestra de origen orgánico.
	Periodo de semidesintegración	$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$	$t_{1/2}$: Periodo de semidesintegración (s)	El periodo de semidesintegración es el tiempo que transcurre para que se reduzca a la mitad el número de núcleos radiactivos.
	Vida media	$T = \frac{1}{\lambda}$	T : Vida media. (s)	La vida media representa el promedio de la vida como núcleo radiactivo.

**FÍSICA CUÁNTICA Y FÍSICA NUCLEAR: EJERCICIOS DE SELECTIVIDAD EN ANDALUCÍA
2004**

1. a) En la reacción del ${}^6_3\text{Li}$ con un neutrón se obtiene un núclido X y una partícula alfa. Escriba la reacción nuclear y determine las características del núclido X resultante. b) Calcule la energía liberada en la reacción de fusión:



$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $m({}^4_2\text{He}) = 4,0026 \text{ u}$; $m({}^1_1\text{H}) = 2,0141 \text{ u}$

SOL: a) ${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^4_2\text{He}$; el núclido es el Tritio b) $\Delta E = 3,82 \cdot 10^{-12} \text{ J}$

2005

2. a) Enuncie la hipótesis de De Broglie. Comente el significado físico y las implicaciones de la dualidad onda-corpúsculo.

b) Un mesón π tiene una masa 275 veces mayor que un electrón. ¿Tendrían la misma longitud de onda si viajasen a la misma velocidad? Razone la respuesta.

SOL: b) La longitud de onda sería 275 veces menor

2006

3.- Al incidir luz de longitud de onda 620 nm en la superficie de una fotocélula, la energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos es 0,14 eV.

a) Determine la función trabajo del metal y el potencial de frenado que anula la fotoemisión.

b) Explique, con ayuda de una gráfica, cómo varía la energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos al variar la frecuencia de la luz incidente.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}; h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J s}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

SOL: a) $W_{\text{ext}} = 2,98 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $V_f = 0,14 \text{ V}$

4.- El período de semidesintegración del ${}^{226}\text{Ra}$ es de 1620 años.

a) Explique qué es la actividad y determine su valor para 1 g de ${}^{226}\text{Ra}$.

b) Calcule el tiempo necesario para que la actividad de una muestra de ${}^{226}\text{Ra}$ quede reducida a un dieciseisavo de su valor original.

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

SOL: a) $A_{\text{ct}} = 3,62 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$ b) $t = 6480 \text{ años}$

2007

5. a) Comente la siguiente frase: “debido a la desintegración del ${}^{14}\text{C}$, cuando un ser vivo muere se pone en marcha un reloj...” ¿En qué consiste la determinación de la antigüedad de los yacimientos arqueológicos mediante el ${}^{14}\text{C}$?

b) ¿Qué es la actividad de una muestra radiactiva? ¿De qué depende?

6. Todas las fuerzas que existen en la naturaleza se explican como manifestaciones de cuatro interacciones básicas: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil.

a) Explique las características de cada una de ellas.

b) Razone por qué los núcleos son estables a pesar de la repulsión eléctrica entre sus protones.

3.1.-CONFLICTO ENTRE LA ELECTRODINÁMICA Y LA MECÁNICA DE NEWTON

La teoría dinámica del electromagnetismo de **Maxwell** (electrodinámica) establecía que las ondas electromagnéticas, entre ellas la luz, se propagaban en el vacío a una velocidad de aproximadamente 300000 km/s. Maxwell consideraba que las ondas electromagnéticas se desplazaban por un medio que inundaba el espacio y envolvía a los cuerpos y que denominó **éter luminífero**. Dada la velocidad de propagación de las ondas, dicho éter debía tener unas propiedades asombrosas: una gran elasticidad y rigidez que hiciera posible la propagación de ondas transversales y una densidad despreciable que permitiera a la luz propagarse por él a una velocidad tan elevada.

Pese a lo increíble de estas propiedades, la existencia del éter fue aceptada como premisa fundamental por la comunidad científica de finales del siglo XIX.

Sin embargo, al poco de publicarse esta teoría, comenzaron a surgir algunas preguntas: ¿tendría la velocidad de la luz el mismo valor si se mediera en dos sistemas de referencias inerciales distintos, independientemente de que uno se moviera con una velocidad determinada con respecto al otro? Si la velocidad de la luz tuviese el mismo valor, no sería aplicable a la electrodinámica el principio de relatividad galileano (composición de velocidades), cuando era un hecho más que probado su validez en las leyes de la mecánica. Por el contrario, si esto no era así, debería existir un sistema de referencia privilegiado, en reposo con respecto al hipotético éter, en el que la luz se propagara a la velocidad calculada por Maxwell. Sería el ansiado “sistema de referencia absoluto”.

Por otra parte, el hecho de que la velocidad de la luz pudiese depender del movimiento relativo del observador o sistema de referencia añadía complicaciones adicionales, pues la formulación de Maxwell no contemplaba esos supuestos y la aplicación del principio de relatividad galileana introducía contradicciones difíciles de asumir.

El último año de su vida (1879), el propio Maxwell sugirió, en una carta dirigida a un amigo suyo del U.S. Nautical Almanac Office, un posible método para medir la velocidad de nuestro planeta con respecto al éter. El valor que se encontrara permitiría establecer el sistema de referencia absoluto, ligado al éter. El entonces instructor naval **Albert A. Michelson** tomó en consideración dicha propuesta y realizó uno de los experimentos que más trascendencia han tenido en la física de todos los tiempos. Lo sorprendente es que dicha trascendencia se debe a sus resultados negativos, como se comentará más adelante.

En 1905, **Albert Einstein**, por entonces empleado en la oficina de patentes de Berna, publicó en la revista *Annalen der Physik* tres trabajos que supondrían una auténtica revolución para los aparentemente bien establecidos principios de la física. Estos trabajos marcan el comienzo de lo que se da en llamar “física moderna”. En torno al contenido de uno de ellos (“Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”) y a sus asombrosas implicaciones gira la presente unidad.

Merece la pena destacar que, a diferencia de lo que venía siendo habitual en la física del siglo XIX, en la que las teorías solían formularse después del conocimiento experimental de algunos fenómenos, la teoría de Einstein es una construcción intelectual cuyas proposiciones habían de ser comprobadas a posteriori y recibir, de ese modo, una confirmación experimental.

3.2.-ANTECEDENTES DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

¿Cómo se gestó el cambio que supuso la teoría de la relatividad especial de Einstein? ¿En qué modo afectó a nuestras concepciones de la física? ¿Por qué aún hoy, más de un siglo después de enunciada, sigue resultándonos sorprendente la teoría propuesta por Einstein?

La respuesta a esta última pregunta hay que buscarla en el esfuerzo de abstracción con respecto a la realidad cotidiana que supone la teoría especial de la relatividad, cuyas consecuencias resultan chocantes para el sentido común. Este hecho motivó que, en un primer momento, las ideas de Einstein no tuviesen una aceptación inmediata, salvo en Alemania. Sin embargo, su éxito

universal vino casi de la mano de su teoría general de la relatividad (teoría de la gravitación), enunciada unos diez años después.

La corroboración experimental de que fueron objeto algunas predicciones de la teoría de la relatividad elevó a Einstein a la merecida categoría de “Newton del siglo XX”. Pero... ¿cuáles fueron los antecedentes de la teoría del científico alemán? Evidentemente, muchos; sin embargo, aquí nos centraremos en los dos principales:

- La relatividad de Galileo y Newton (relatividad galileana).
- Los resultados negativos arrojados por la experiencia de Michelson y Morley, así como algunos de los análisis realizados sobre dichos resultados (como el de Lorentz).

3.2.1.-La relatividad de Galileo y Newton

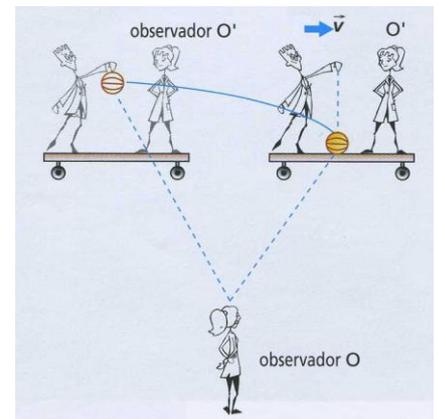
Galileo y Newton ya se plantearon en su día el problema de cómo serían interpretados los movimientos de los cuerpos y las leyes físicas que los describen desde el punto de vista de dos observadores que se encontrasen en movimiento relativo uniforme. En este sentido, debemos recordar que el propio Galileo concebía el movimiento parabólico como la composición de dos movimientos independientes.

La conclusión a la que llegaron ambos científicos fue que:

Las leyes físicas son las mismas en todos los sistemas de referencias inerciales.

Se entiende aquí por sistemas de referencia inerciales los que se encuentran ya sea en reposo relativo o en movimiento rectilíneo uniforme.

Analicemos cómo se llega a esta conclusión; para ello imaginemos que dos observadores (O y O') tratan de describir el movimiento que efectúa una pelota A.



Transformación galileana de la posición y la distancia

Supongamos que los dos observadores O y O' se encuentran en el tiempo $t=0$ en la misma posición y que se mueven relativamente el uno con respecto al otro con movimiento uniforme. Sea, por ejemplo, x la dirección del desplazamiento relativo, y v , la velocidad constante con la que se separan los dos observadores.

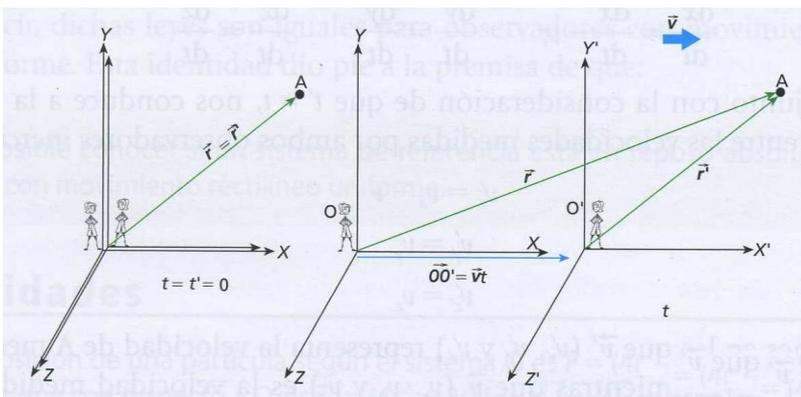
De este modo, en un instante cualquiera t , la distancia entre ambos será $OO' = vt$

La cuestión que ahora nos planteamos es cómo se relacionan las posiciones relativas de A en ambos sistemas de referencia.

Como puede verse en la figura: $\vec{r} = \vec{OO'} + \vec{r}'$

Por lo que: $\vec{r}' = \vec{r} - \vec{OO'} = \vec{r} - \vec{v}t$

Teniendo en cuenta que hemos elegido la dirección del eje X como la del movimiento, cabe concluir lo siguiente:



concluir lo siguiente:

Las transformaciones galileanas de las coordenadas de posición entre dos sistemas con movimiento relativo uniforme son:

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

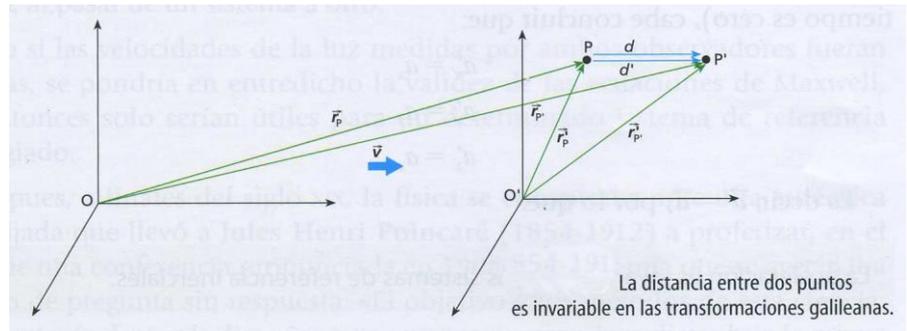
$$z' = z$$

siempre que supongamos que $t' = t$

La concepción del tiempo que implica esta suposición es clave en la mecánica clásica, que parte de la idea de que el tiempo transcurre independientemente y por igual en todos los sistemas de referencia; en otras palabras, el tiempo es considerado como una realidad absoluta y universal. En la siguiente figura se aprecia otro hecho clave en la relatividad galileana: si el cuerpo A se desplaza desde P hasta P' en la dirección del eje X, ambos observadores miden la misma distancia desde los dos sistemas de referencia:

- Observador O: $d = x_{P'} - x_P$
- Observador O': $d' = x'_{P'} - x'_P = (x_{P'} - vt) - (x_P - vt)$

Por lo que $d' = d$



Así pues, desde el punto de vista de las transformaciones galileanas, puede afirmarse que: **La distancia entre dos puntos es invariable para cualquier sistema inercial.**

Transformación galileana de la velocidad

Si derivamos las expresiones de la posición con respecto al tiempo, obtenemos las relaciones entre las velocidades que miden los dos observadores para el mismo movimiento de A:

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - v \qquad \frac{dy'}{dt} = \frac{dy}{dt} \qquad \frac{dz'}{dt} = \frac{dz}{dt}$$

Esto, junto a la consideración de que $t' = t$, nos conduce a la relación existente entre las velocidades medidas por ambos observadores inerciales:

$$v'_{x'} = v_x - v \qquad v'_{y'} = v_y \qquad v'_{z'} = v_z$$

expresiones en las que $\vec{v}'(v'_{x'}, v'_{y'}, v'_{z'})$ representa la velocidad de A medida por el observador O', mientras que $\vec{v}(v_x, v_y, v_z)$ es la velocidad medida por el observador O.

En este caso queda claro que la velocidad medida desde cada sistema no es la misma y depende del movimiento relativo entre ambos.

La velocidad es variable al pasar de un sistema de referencia inercial a otro.

A diario encontramos hechos que avalan esta idea. Así, por ejemplo, la persona que está sentada a nuestro lado en el autobús se encuentra en reposo ($v=0$) con respecto a nuestro sistema, pero se halla en movimiento con respecto al del peatón que circula por la acera.

Transformación galileana de la aceleración

Analicemos finalmente el hecho más trascendental del principio de la relatividad galileana. Si la partícula A está dotada de movimiento acelerado o variable en general, ¿medirán ambos observadores la misma aceleración? De no ser así, debemos admitir que las fuerzas que actúan sobre la partícula dependen del sistema de referencia, por lo que no tendrán carácter universal. Sin embargo, en el caso de que la aceleración medida sea la misma, se verá afirmado el principio de

universalidad, por el que las leyes físicas son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales, principio que se ha aplicado, entre otras fuerzas, a la gravitatoria.

Si derivamos las expresiones de la velocidad obtenidas en el apartado anterior en función del tiempo y tenemos en cuenta que la velocidad relativa entre ambos sistemas, v , es constante (y que, por tanto, su derivada con respecto al tiempo es cero), cabe concluir que:

$$a'_{x'} = a_x \qquad a'_{y'} = a_y \qquad a'_{z'} = a_z$$

Es decir, $\vec{a}' = \vec{a}$, por lo que:

La aceleración es invariable en los sistemas de referencia inerciales.

Esto significa, por ejemplo, que la aceleración de caída libre que medirían dos observadores inerciales tendría el mismo valor, con independencia de su movimiento relativo. En consecuencia, ambos observadores harían referencia a la misma fuerza para explicar dicha aceleración. Y este hecho da pie a lo que se conoce como **enunciado del principio de relatividad galileano**.

Según dicho principio:

Las leyes básicas de la naturaleza son las mismas para observadores que se encuentran en sistemas de referencia inerciales.

Es decir, dichas leyes son iguales para observadores con movimiento relativo uniforme. Esta identidad dio pie a la premisa de que:

Es imposible conocer si un sistema de referencia está en reposo absoluto o se mueve con movimiento rectilíneo uniforme.

3.2.2.-La relatividad galileana y el problema de la luz

Las transformaciones galileanas estudiadas son también respaldadas por experiencias cotidianas. Así, un objeto cae de la misma manera tanto si nos hallamos en el interior de un avión, de un tren o de un autobús en movimiento uniforme, como si nos encontramos dentro de nuestra casa.

Sin embargo, al intentar adaptar este principio a la electrodinámica desarrollada por Maxwell, surge un problema. Según el científico inglés, la velocidad máxima a la que pueden propagarse las perturbaciones electromagnéticas viene dada por la expresión:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Al sustituir en ella las constantes por su valor ($\epsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N m}^2$; $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$), se obtiene la velocidad de la luz en el vacío. Sin embargo, ¿sería la misma la velocidad de propagación de la luz medida por un observador en movimiento con velocidad v que por otro que estuviese en reposo? De ser así, se violaría el principio de relatividad galileano, que indica que la velocidad es variable al pasar de un sistema a otro.

Pero si las velocidades de la luz medidas por ambos observadores fueran distintas, se pondría en entredicho la validez de las ecuaciones de Maxwell, que entonces solo serían útiles para un determinado sistema de referencia privilegiado.

Así pues, a finales del siglo XIX, la física se encontraba ante una auténtica encrucijada que llevó a Jules Henri Poincaré (1854-1912) a profetizar, en el inicio de una conferencia pronunciada en 1904, el panorama que se avecinaba a modo de pregunta sin respuesta: “El objetivo y los métodos de esta ciencia, ¿se presentarán dentro de diez años ante nuestros sucesores inmediatos

bajo la misma luz con que los vemos nosotros, o, por el contrario, estamos llamados a ser testigos de una profunda transformación??"

La constancia o la variación de la velocidad de la luz al pasar de unos sistemas a otros encerraba la clave.

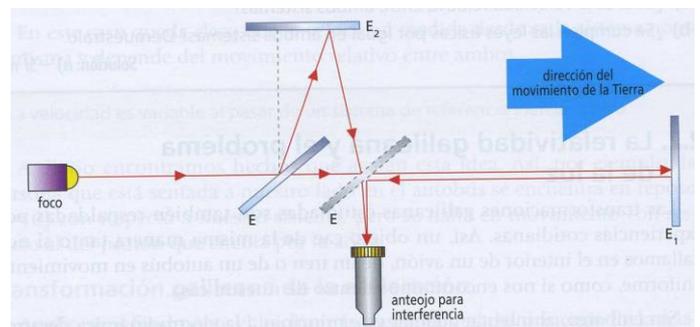
3.2.3.-Experimento de Michelson y Morley

En 1881, cuando **Albert A. Michelson** (1852-1931) afrontó su primer experimento, se admitía la existencia de un sistema de referencia privilegiado, en reposo con respecto al éter, en el que la velocidad de la luz tendría su conocido valor c . En consecuencia, el valor de la velocidad de la luz debería ser ligeramente distinto en cualquier otro sistema inercial, de acuerdo con las transformaciones galileanas.

Un buen ejemplo de dicho sistema podría ser, en intervalos relativamente cortos de tiempo, la propia Tierra en su movimiento alrededor del Sol, con un valor de velocidad de unos 30 km/s. Sin embargo, este valor es casi despreciable comparado con la velocidad de la luz, de manera que pretender medir su posible efecto por métodos mecánicos sería ilusorio.

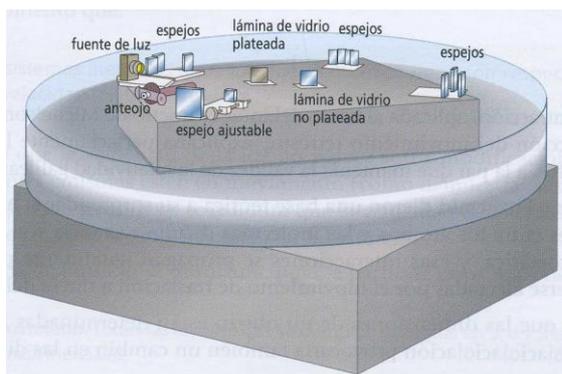
Michelson ideó una forma de medir la velocidad de la Tierra con respecto al éter por métodos ópticos, al desarrollar lo que se conoce como **interferómetro**. El esquema del interferómetro es el que se detalla en la figura.

El fundamento del dispositivo consiste en dividir un haz que parte de una fuente luminosa en dos haces distintos que se desvían por caminos perpendiculares al atravesar un espejo semiplateado. Estos haces son posteriormente reflejados por los espejos E_1 y E_2 y enfocados hacia un anteojo en el que se observaban los patrones de interferencia. Michelson calibró el aparato intentando garantizar que los caminos recorridos por la luz fuesen iguales en ambas direcciones.



La idea de Michelson era la siguiente: orientando adecuadamente el interferómetro, podía conseguirse que la dirección de uno de los haces coincidiera con el movimiento orbital de la Tierra, mientras que el otro se desplazaría en dirección perpendicular a dicho movimiento. En esta situación, las velocidades de los haces serían ligeramente distintas; en el caso del que se propaga en la dirección orbital de la Tierra, el haz de ida tendría una velocidad igual a $c-v$ con respecto al espejo E_1 , mientras que el de vuelta tendría una velocidad de $c+v$ con respecto al mismo espejo, donde v es, en ambos casos, la velocidad orbital de la Tierra. Por otra parte, el haz perpendicular al movimiento orbital se movería con una velocidad igual a la composición vectorial $\vec{c} + \vec{v}$ (mutuamente perpendiculares).

Dada la diferencia de velocidades de ambos haces, estos llegarían al anteojo con un ligero desfase de tiempo y darían lugar a un patrón de interferencia. Girando poco a poco el interferómetro, el desfase iría variando y, de ese modo, las franjas del patrón de interferencia sufrirían ligeros desplazamientos. La medida de esos desplazamientos permitirían calcular la velocidad de la Tierra (v) con respecto al éter.



En abril de 1881, Michelson realizó su primer experimento, y los resultados fueron negativos, es decir, no obtuvo el desplazamiento de franjas que cabía esperar. **Hendrik A. Lorentz** (1853-1928) llamó la atención sobre posibles defectos de procedimiento, así como sobre cierto error matemático en el cálculo de la velocidad del

haz perpendicular, lo que llevó a Michelson a mejorar el dispositivo y repetir la experiencia en 1887, en compañía de **Edgard W. Morley** (1838-1923). Se trata del ya clásico **experimento de Michelson y Morley**. En esta ocasión, para mejorar la precisión, se procedió a reducir las vibraciones del aparato. Con este fin, se montó el dispositivo óptico sobre un gran bloque de piedra que flotaba en mercurio, lo que facilitaba, además, su rotación. Se aumentó también la longitud recorrida por los haces de luz mediante múltiples reflexiones en espejos.

No obstante, pese a la gran precisión con que se llevó a cabo el nuevo experimento, los resultados volvieron a ser negativos: los desplazamientos esperados no se observaron. Esto significa que **los haces se movían siempre con una velocidad constante, independientemente de su orientación**. Al no modificarse la velocidad, no se producían cambios en los patrones de interferencia.

En su artículo *Sobre el movimiento relativo de la Tierra y el éter luminífero*, Michelson y Morley concluyeron que “de todo lo que antecede parece razonablemente cierto que si existe algún movimiento relativo entre la Tierra y el éter luminífero debe ser pequeño”. Aventuraron que dicho movimiento no existía y que el éter se hallaba en reposo con respecto a la superficie de la Tierra.

La siguiente analogía puede ayudarte a comprender la sorpresa que supuso este resultado negativo. Imagínate que vas en el interior de un coche que sabes que se está moviendo y asomas la cabeza por una ventanilla. La experiencia te dice que has de sentir el viento en la cara, con tanta mayor intensidad cuanto mayor sea la velocidad del coche. ¿Cuál sería tu sorpresa si al sacar la cabeza no percibieras viento alguno? Las conclusiones que te verías forzado a extraer solo pueden ser dos: o bien el aire se mueve de modo que esté en reposo con respecto al coche, o bien simplemente no existe.

Pues bien, Michelson y Morley se encontraron ante semejante tesitura. Al no tener suficientes argumentos para desechar la existencia del éter luminífero, optaron por explicar la ausencia del “viento del éter” suponiendo que este permanecía en reposo con respecto a la superficie terrestre. En cualquiera de los casos, las conclusiones que se derivaban eran:

- Las transformaciones de Galileo no se cumplen en el caso de la luz.
- La velocidad de la luz es siempre constante, independientemente del movimiento del foco emisor.

3.2.4.-Proposición de Lorentz y Fitzgerald

Los resultados negativos de Michelson y Morley llenaron de perplejidad a la comunidad de físicos. ¿Cómo es posible que un principio (el de la relatividad galileana) que estaba tan demostrado pareciera no tener validez en el marco de las leyes de la electrodinámica, igualmente probadas?

En un intento por conjugar los resultados del experimento y la validez de la relatividad galileana en la electrodinámica, Hendrik A. Lorentz y George F. Fitzgerald (1851-1901) propusieron, de modo independiente, una misma hipótesis, conocida como “hipótesis de la contracción de la longitud” de los cuerpos en movimiento a través del éter. Según los cálculos derivados de ella, la longitud de un cuerpo se reduciría en la dirección del movimiento en un factor:

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

Esta contracción, aplicada al brazo del interferómetro de Michelson orientado en la dirección del movimiento terrestre, explicaba perfectamente la ausencia de resultados, a la par que mantenía la validez de la relatividad galileana.

Lorentz y Fitzgerald dieron una base teórica a su sorprendente hipótesis: si las uniones entre los átomos y las moléculas de una sustancia son de naturaleza electrostática, y esas interacciones se propagan igualmente por el éter, podrían verse afectadas por el movimiento de traslación a través del mismo.

Puesto que las dimensiones de un objeto están determinadas por dichas interacciones, su variación provocaría también un cambio en las dimensiones del objeto.

Sin embargo, el sustento teórico de dicha hipótesis resultaba ciertamente endeble y daba la sensación de que se trataba de un artificio matemático destinado a salvar los principios en los que se creía. Ese era el panorama que mostraba la física a finales del siglo XIX: una acumulación de hipótesis que pretendían salvar unos principios que parecían derrumbarse.

En 1904, **Jules H. Poincaré** apuntaba una posible solución, al señalar en su conferencia *Los principios de la física matemática* que “quizá debemos construir toda una nueva mecánica que hasta ahora solo hemos logrado entrever y en la que, al aumentar la inercia con la velocidad, la velocidad de la luz se convertiría en un límite infranqueable”. Einstein daría forma, al año siguiente, a esa nueva mecánica.

3.3.-POSTULADOS DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL DE EINSTEIN

Albert Einstein (1879-1955) abordó el problema del incumplimiento de la relatividad galileana en la electrodinámica desde un punto de vista absolutamente revolucionario, como vamos a ver. En esencia, podemos decir que su teoría se estructura a partir de dos criterios:

- Dado que todos los intentos por encontrar sistemas de referencia privilegiados (en reposo absoluto) han fracasado, se considerará que ese sistema sencillamente no existe. Esto obliga a asumir un cambio conceptual en la idea tradicional de sistema de referencia inercial. Se considerará a partir de ese momento que:

Son sistemas inerciales aquellos que se mueven unos con respecto a otros con velocidad relativa constante.

- Puesto que la velocidad de la luz no parece sufrir modificaciones, aunque las fuentes emisoras estén en movimiento (como demuestra el experimento de Michelson y Morley), se asumirá que la velocidad de la luz es constante, aunque las fuentes emisoras estén en movimiento.

La teoría de Einstein se estructura, pues, a partir de estos dos postulados:

Primer postulado: Todas las leyes físicas se cumplen por igual en todos los sistemas de referencia inerciales.

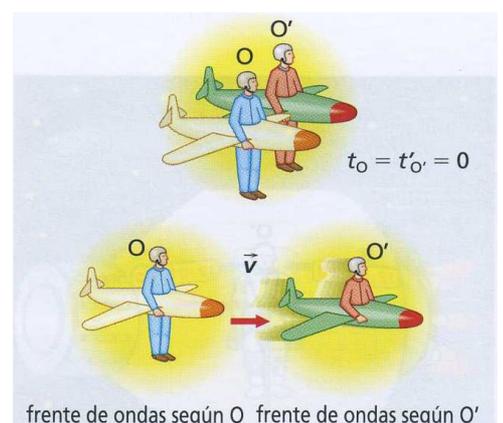
Este es el llamado postulado de relatividad, que implica que las leyes de la electrodinámica, la óptica y la mecánica se cumplen por igual en todos los sistemas inerciales.

Segundo postulado: La velocidad de la luz en el vacío es la misma en todos los sistemas de referencia inerciales y es, además, independiente del movimiento de la fuente emisora y del observador.

Aparentemente, estos dos postulados parecen fáciles de aceptar, pero, como vamos a ver, su aplicación conjunta conduce a consecuencias que alteran por completo nuestras concepciones absolutas del espacio y el tiempo.

Para comprender mejor esto, analizamos un ejemplo que parece conducir a una paradoja. Imagínate dos observadores O y O', el último de los cuales se desplaza con una velocidad constante, v, con respecto al primero.

En el preciso instante en que O y O' coinciden, sincronizan sus relojes a cero ($t_0 = t'_{0'} = 0$), a la vez que se emite una señal luminosa. Si admitimos el primer postulado, cada uno de los observadores verá cómo se propaga la luz en



forma de un frente de onda esférico (el comportamiento de la luz es el mismo en ambos sistemas). Ahora bien, al cabo de cierto tiempo, O y O' se encuentran a cierta distancia uno del otro y, sin embargo, cada uno de ellos se verá en el centro del frente de ondas esférico. ¿Cómo es posible si la esfera solo tiene un centro? Es más, ¿cómo es posible que esto sea así si la velocidad de la luz, según el segundo postulado, es la misma para O y O'?

La paradoja no parece tener solución... ¿o sí? Vamos a ver que la clave para resolver esta paradoja está encerrada en una frase del párrafo anterior, en apariencia inocente y que hemos subrayado: "al cabo de cierto tiempo". ¿Es realmente igual para ambos observadores ese intervalo de tiempo?

La relatividad del tiempo y del concepto de simultaneidad

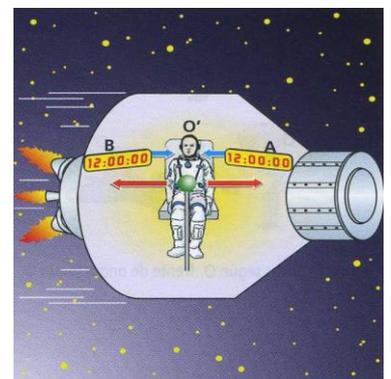
Imaginemos, en primer lugar, una situación fácil de comprender. Supongamos que dos corredores de atletismo se disponen a competir en una carrera de 100 m lisos en dos pistas diferentes. El juez da el pistoletazo de salida justamente a las 12:00:00 horas. Al oír el disparo, los jueces auxiliares, situados junto a cada corredor, ponen sus cronómetros en marcha a partir de la hora mencionada. La pista del corredor A se encuentra junto al juez que da el pistoletazo de salida, mientras que la pista del corredor B está situada a 340 m de distancia del mismo. El juez ve llegar antes a la línea de meta al corredor A y le proclama vencedor con una marca de 9 segundos y 48 centésimas. Sin embargo, el corredor B presenta airado una reclamación, pues su tiempo, como corrobora su juez auxiliar ha sido de 9 segundos y 39 centésimas, es decir, inferior al del corredor A. Una filmación demuestra, no obstante, que el corredor A ha atravesado la línea de llegada antes que B, de modo que aquel acaba alzándose con la victoria. El corredor B, no obstante, sigue considerando que se ha cometido una injusticia.

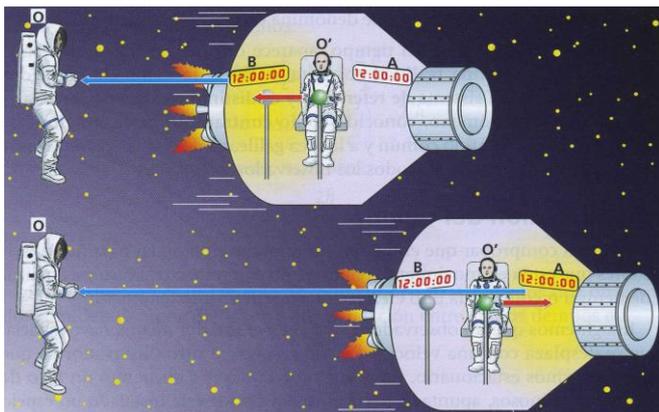
Es posible que hayas encontrado la clave del dilema: el sonido del pistoletazo tarda más en llegar al corredor B que al A, debido a que el sonido se propaga a una velocidad finita. En consecuencia, los relojes de ambos jueces no estaban bien sincronizados.

Pues bien, algo parecido puede derivarse del hecho de que la velocidad de la luz tenga un valor finito. Es habitual, por ejemplo, que todos sincronicemos nuestros relojes con las señales horarias de la radio; pero ¿llegan las señales realmente a la vez a todas las poblaciones? Lo cierto es que no, si bien la diferencia es despreciable debido a las cortas distancias. No obstante, si las distancias fuesen de decenas o centenares de miles de kilómetros, los relojes ya no estarían sincronizados.

Sin embargo, podríamos llegar a sincronizar todos los relojes si conociéramos las distancias que ha de recorrer la señal hasta los distintos observadores e introducimos la necesaria corrección del tiempo. Pero vamos a comprobar que, aun así, la sincronización de relojes es relativa, es decir, los que están perfectamente sincronizados en un sistema de referencia pueden no estarlo en otro. Y de este hecho se deriva otro de implicaciones más profundas: **dos sucesos que ocurren simultáneamente para un observador, pueden no ser simultáneos para otro distinto.**

Analicemos esto mediante un segundo ejemplo. Supongamos que un observador, O', viaja en el interior de una nave interestelar que se aleja con una velocidad v de otro observador, O, que se encuentra en estado estacionario. El observador O' se encuentra en el centro de su nave, en cuyos extremos anterior y posterior existen sendos relojes digitales, A y B, equidistantes de O'. Con objeto de saber si los dos relojes están sincronizados, el observador O' dirige un destello de luz hacia los relojes. La luz llega a ambos relojes simultáneamente, y O' observa que marcan la misma hora. Por consiguiente, para este observador, los relojes están sincronizados. Ahora bien, esto es así solo en el sistema de referencia asociado a la nave donde viaja el observador O'.





Muy distinto es lo que ocurre para el observador O. Cuando se emite el destello, el reloj A se aleja del punto donde aquél se produce, mientras que el reloj B se aproxima a dicho punto. En consecuencia, para O, la señal luminosa llega antes al reloj B que al A, por lo que observa primero la hora marcada por el reloj B y, poco después, la misma hora marcada por el A. Concluirá, así, que los relojes no están sincronizados y que el A está retrasado con respecto al B. Así pues, lo que es simultáneo para O' no lo es para O.

O.

El ejemplo expuesto es una adaptación de otro que fue desarrollado por el propio Einstein. El científico alemán extraía, además, la siguiente conclusión: si los rayos llegaran a los relojes separados por un tiempo $\Delta t'$ según el observador O', el intervalo de tiempo cronometrado por O sería también distinto (Δt).

Todo esto significa que:

El tiempo es relativo, y el intervalo de tiempo entre dos sucesos depende del sistema de referencia, de modo que:

- Será igual para dos observadores estacionarios, uno con respecto al otro, si los sucesos ocurren en un mismo punto.
- Será distinto para dos observadores en movimiento relativo, uno con respecto al otro.

Esta es, pues, una de las claves de la invalidez de las transformaciones galileanas cuando se aplican a la electrodinámica. En dichas transformaciones se partía de la base de que $t=t'$ para todos los observadores. Ahora vemos que eso no es realmente así. Observamos, por una parte, que **la relatividad del tiempo es consecuencia de la existencia de una velocidad límite en las transmisión de las señales.**

3.4.-CONSECUENCIAS DE LOS POSTULADOS DE EINSTEIN

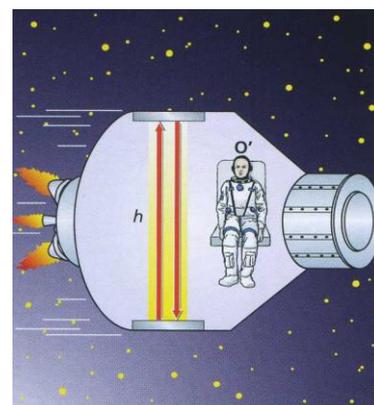
La primera gran consecuencia de los postulados de Einstein es que el tiempo no es algo absoluto que transcurra por igual en todos los sistemas de referencia. Este resultado tiene una trascendencia espectacular que rompe nuestras concepciones intuitivas sobre el tiempo y que se plasma en la **paradoja de los gemelos**, consecuencia de lo que se denomina **dilatación del tiempo**.

Ligado a la relatividad del tiempo, aparece otro hecho trascendental: el espacio deja de ser una realidad absoluta; es decir, **la distancia entre dos puntos depende del sistema de referencia y es distinta en sistemas inerciales diferentes**. Este fenómeno, conocido como **contracción de la longitud**, se opone también al sentido común y a la idea galileana de que la distancia entre dos puntos es la misma para todos los observadores inerciales.

3.4.1.-Dilatación del tiempo

Vamos a comprobar que el tiempo no transcurre por igual para dos observadores que estén en movimiento relativo uno con respecto al otro y analizar qué tiempo mediría cada uno en relación con un mismo fenómeno.

Imaginemos que un observador O' viaja en el interior de una nave espacial que se desplaza con una velocidad v con respecto a otro

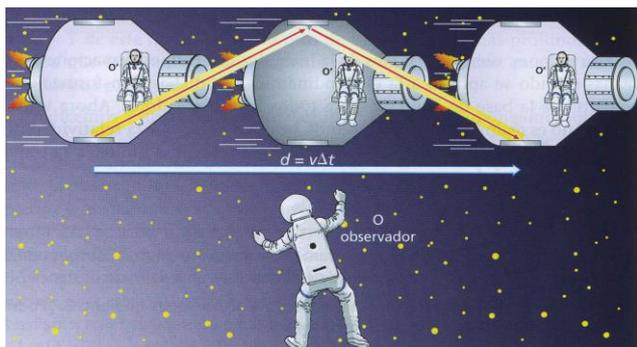


observador O, que consideramos estacionario. En el suelo de la nave se encuentra un foco de destellos luminosos, apuntando hacia el techo, donde está instalado un espejo que los refleja. Imaginemos también que las dimensiones de la nave son lo suficientemente grandes como para permitir medir el tiempo que tarda el destello en ir y volver reflejado. Analizaremos cuánto tiempo tarda el destello en ir y volver según las mediciones de O' y según las de O.

- **Medición del tiempo según O'.** Si h es la altura de la nave, y c, la velocidad de la luz, el observador O' verá que el viaje de ida y vuelta de la luz es vertical y el tiempo que medirá para dicho trayecto ($\Delta t'$) será:

$$\Delta t' = \frac{2h}{c}$$

- **Medición del tiempo según O.** El observador O ve que la nave se ha desplazado una distancia $d = v \Delta t$ en el tiempo que tarda el destello en volver reflejado al suelo. Así, la trayectoria que describe la luz, según él, es la que se observa en la figura.



La distancia total recorrida por el destello será $c \Delta t$. En consecuencia, el pulso recorre la distancia $c \Delta t/2$ hasta el espejo.

En el momento en que el pulso llega al espejo, la nave se ha desplazado una distancia $v \Delta t/2$, por lo que, aplicando el teorema de Pitágoras, se cumple que:

donde, reorganizando, obtenemos:

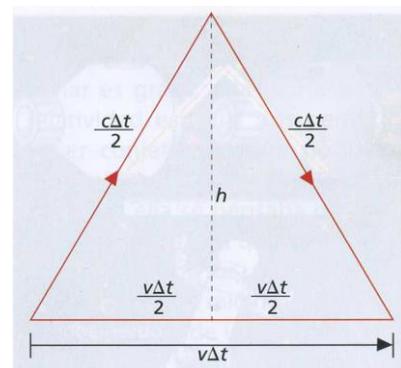
$$\left(\frac{c \Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v \Delta t}{2}\right)^2 + h^2 \Rightarrow c^2 \Delta t^2 = v^2 \Delta t^2 + 2^2 h^2$$

donde, reorganizando, obtenemos:

$$\Delta t^2 = \frac{v^2}{c^2} \Delta t^2 + \frac{2^2 h^2}{c^2} \Rightarrow \Delta t^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \frac{2^2 h^2}{c^2}$$

expresión en la que, despejando, se obtiene:

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



puesto que $2h/c$ es justamente $\Delta t'$, podemos constatar que **los dos observadores miden tiempos distintos** y que la relación entre ambos tiempos es:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Se suele designar al término:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \quad (\gamma \text{ es la letra griega gamma minúscula})$$

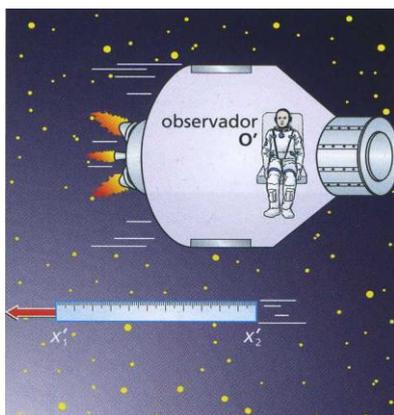
por lo que:

$$\Delta t = \gamma \Delta t'$$

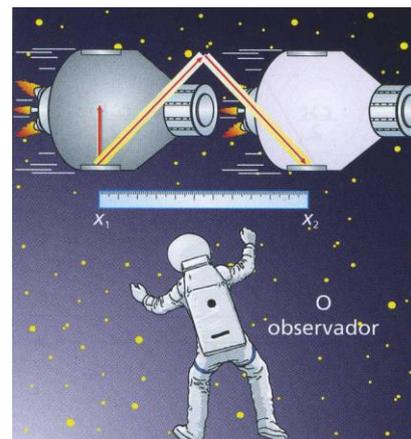
Esta igualdad es conocida como fórmula de la dilatación del tiempo.

Como $v < c$, entonces $\gamma > 1$. Este resultado significa que el observador O mide un tiempo mayor que el observador O' con respecto al mismo fenómeno. En consecuencia, podemos afirmar que **el tiempo transcurre más lentamente para el observador O' (que está moviéndose junto con la nave) que para O.**

3.4.2.-Contracción de la longitud



Un fenómeno relacionado con la dilatación del tiempo es el de la contracción de la longitud de un objeto, que resulta cuando dicha longitud se mide desde sistemas de referencia con respecto a los cuales el objeto se mueve.



recorre la nave, que se desplaza con una velocidad v , en el tiempo que tarda el destello en ir y volver (Δt); así **la longitud de la regla según O es:**

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

Veamos ahora qué longitud medirá O', que está situado dentro de la nave, para esa misma regla. Según este observador, la regla se desplaza a sus pies con una velocidad relativa de valor v (hacia atrás para este observador). Sin embargo, el tiempo transcurrido desde que pasa un extremo bajo sus pies hasta que lo hace el otro extremo es el mismo que el tiempo que él mide para el trayecto de ida y vuelta del destello, que es $\Delta t'$. En consecuencia, **la longitud que él medirá para la regla será:**

$$l' = v \Delta t'$$

Pero, como $\Delta t' = \Delta t / \gamma$, **podemos comprobar que las medidas de la longitud de un mismo objeto no coinciden en ambos sistemas de referencia:**

$$l' = \frac{v \Delta t}{\gamma} = \frac{l}{\gamma}$$

Puesto que $\gamma > 1$, entonces:

La longitud de un objeto, medida desde un sistema de referencia con respecto al cual el objeto se mueve, resulta contraída en un factor $1/\gamma$ en la dirección del movimiento con relación a su valor propio (el que resultaría de medirla en un sistema con respecto al cual la regla fuera estacionaria).

De modo que, sustituyendo γ , la contracción de la longitud es:

$$l' = l \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Esta igualdad es conocida como **fórmula de la 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 inerciales. Así pues, **el propio concepto de espacio resulta ser diferente para dos observadores inerciales en movimiento relativo.**

Curiosamente, esta fórmula de la contracción de la longitud es la misma que habían deducido, de forma independiente, Lorentz y Fitzgerald para tratar de “arreglar” los resultados del experimento de Michelson y Morley. Sin embargo, en su caso, esta contracción venía a ser un simple artificio matemático, pues en ningún momento cuestionaban el marco absoluto de espacio y tiempo. Por el contrario, en la teoría de Einstein, este hecho es una consecuencia de la relatividad de ambos conceptos, relatividad que se deriva de sus dos postulados. No obstante, en reconocimiento a la paternidad de la expresión, suele conocerse como **fórmula de la contracción de Lorentz-Fitzgerald.**

3.4.3.-Paradoja de los gemelos

Los dos fenómenos relativistas explicados dan lugar a lo que se conoce como “paradoja de los gemelos”. Pensemos en dos hipotéticos gemelos e imaginemos que uno de ellos emprende un viaje a velocidades próximas a la de la luz; el tiempo pasaría para él más lentamente que para su hermano, por lo que, a su regreso (tras poco tiempo, según él), lo encontraría envejecido.

Supongamos que el gemelo A emprende un viaje interestelar desde la Tierra hasta un sistema planetario extrapolar situado a 15 años luz a una velocidad de $0,9 \cdot c$ (ambos valores están referidos al sistema de la Tierra, con respecto al cual supondremos que el sistema extrapolar es estacionario). Para simplificar, consideraremos que el tiempo que tarda la nave en acelerar hasta alcanzar dicha velocidad, así como el que emplea en frenar y en dar la vuelta, son despreciables en comparación con el tiempo total. Entonces la duración del viaje de ida y vuelta, medida por el gemelo B, que se ha quedado en la Tierra, es:

$$\Delta t = \frac{2d}{v} = \frac{2 \cdot 15 \cdot c}{0,9 \cdot c} = 33,3 \text{ años}$$

Por el contrario, el tiempo transcurrido para el gemelo A, que viaja a bordo de la nave, es, según consta en los relojes de a bordo:

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 33,3 \sqrt{1 - \frac{0,9^2 \cdot c^2}{c^2}} = 14,5 \text{ años}$$

A la vuelta, **¡el gemelo viajero es casi 19 años más joven que su hermano!**

Este sorprendente resultado es perfectamente consistente para el gemelo A, pues, según él, la distancia de la Tierra al sistema extrasolar sería:

$$l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 15 \sqrt{1 - \frac{0,9^2 \cdot c^2}{c^2}} = 6,54 \text{ años luz}$$

De este modo, el tiempo total empleado sería:

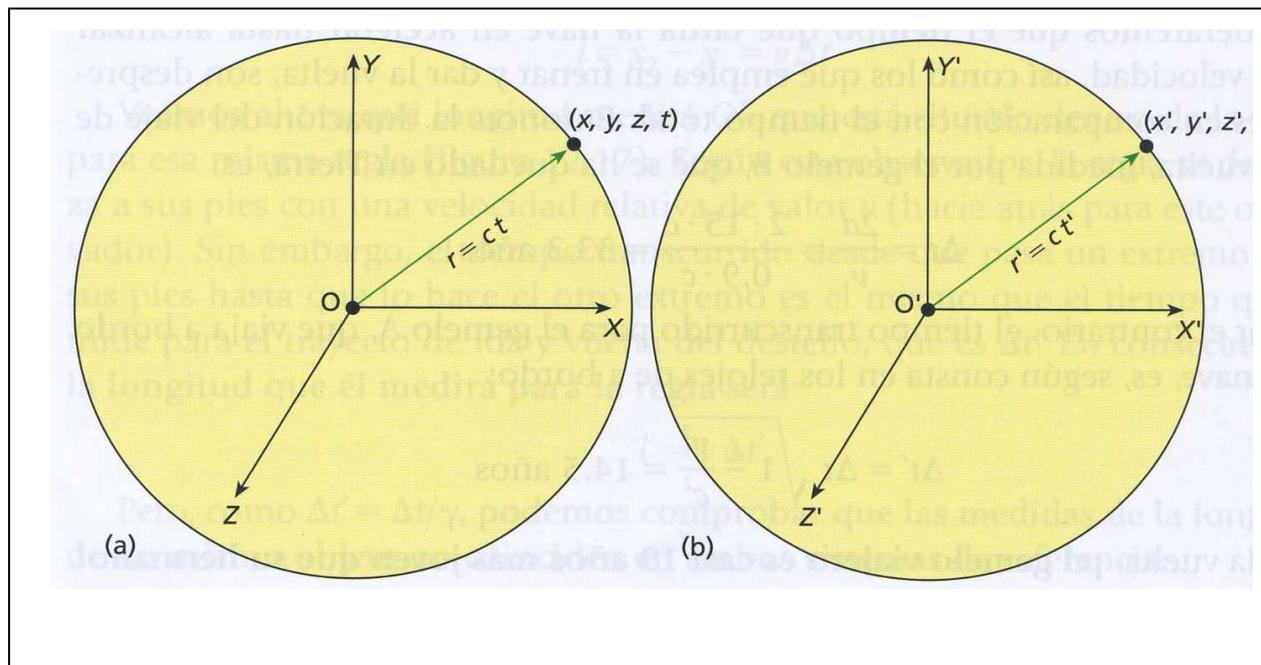
$$\Delta t' = \frac{2l'}{v} = \frac{2 \cdot 6,54 \cdot c}{0,9 \cdot c} = 14,5 \text{ años}$$

Podrías pensar que si fuera la Tierra la que se aleja del gemelo A, debería ser él el que envejeciera más deprisa. Puede demostrarse que en ambos casos es el gemelo que permanece en la Tierra el que envejece más rápidamente. La razón es algo compleja de exponer, pero tiene que ver con el hecho de que el marco de referencia del gemelo que se queda en la Tierra es siempre el mismo, mientras que el gemelo viajero participa de dos marcos de referencia con ámbitos temporales distintos. A esto habría que añadir la existencia momentánea de marcos no inerciales al acelerar, frenar o dar media vuelta.

3.5.-TRANSFORMACIÓN DE LORENTZ

Después de lo tratado hasta ahora, parece claro que las ecuaciones de transformación entre sistemas inerciales de Galileo no sirven cuando tratamos fenómenos que acontecen a velocidades comparables a la de la luz. ¿Qué transformaciones debemos usar entonces? De entrada, en esas transformaciones ya no se cumplirá que t y t' sean iguales.

Si tomamos la paradoja expuesta en el epígrafe 3, las nuevas transformaciones han de permitir que ambos observadores, O y O' , tengan razón cuando afirman estar cada uno en el centro del frente de ondas esférico luminoso:



Si las coordenadas espacio-temporales de un punto del frente de ondas son (x, y, z, t) para el observador O y (x', y', z', t') para el observador O' , entonces recordando la ecuación matemática de una esfera, podremos escribir que:

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2$$

$$(x')^2 + (y')^2 + (z')^2 = (r')^2$$

Teniendo en cuenta la constancia de la velocidad de la luz para ambos observadores, se cumplirá que $r=ct$ a la vez que $r'=ct'$. En consecuencia, **las nuevas transformaciones entre sistemas inerciales deben permitir que se cumplan simultáneamente las siguientes igualdades:**

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$$

$$(x')^2 + (y')^2 + (z')^2 = c^2 (t')^2$$

Si consideramos que el movimiento tiene lugar en la dirección del eje X , se cumplirá que $y = y'$ y que $z = z'$. Al restar ambas ecuaciones, obtenemos:

$$x^2 - c^2 t^2 = (x')^2 - c^2 (t')^2$$

Un complejo desarrollo matemático conduce a las nuevas ecuaciones de transformación entre ambos sistemas de referencia inerciales que se mueven con una velocidad relativa v en la dirección del eje X . Dichas ecuaciones, que son soluciones de la expresión anterior, son las siguientes:

$$x' = \gamma (x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right)$$

Estas ecuaciones, conocidas como transformaciones de Lorentz, permiten transformar las coordenadas de O en las de O'.

Transformaciones de Galileo como un caso particular de las de Lorentz

La veracidad de las transformaciones de Lorentz quedaría comprobada si, al aplicarlas a velocidades que fueran mucho menores que las de la luz, condujesen a las transformaciones galileanas, que explicaban perfectamente lo que acontecía en dicho marco de velocidades. Es posible verificar, en efecto, que, si hacemos $v \ll c$, las transformaciones expuestas tienden a convertirse en :

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

que son, justamente, las transformaciones de Galileo.

3.5.1.-Transformación de Lorentz de la velocidad

Consideremos un cuerpo que se mueve en la dirección del eje X con una velocidad v_x con respecto al sistema de referencia del observador O. ¿Cuál será la velocidad de ese objeto con respecto a O' si su velocidad es v en relación con O? Para el observador O' el cuerpo se ha desplazado una distancia $\Delta x'$ en un tiempo $\Delta t'$. Por tanto:

$$v'_x = \frac{\Delta x'}{\Delta t'}$$

Teniendo en cuenta las transformaciones de Lorentz que hemos expuesto, obtenemos:

$$\Delta x' = \gamma (\Delta x - v \Delta t)$$

$$\Delta t' = \gamma \left(\Delta t - \frac{v}{c^2} \Delta x \right)$$

Por lo que:

$$v'_x = \frac{\Delta x - v \Delta t}{\Delta t - \frac{v}{c^2} \Delta x}$$

Dividiendo los términos del numerador y del denominador entre Δt :

$$v'_x = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v}{c^2} v_x}$$

Puede observarse también que si $v \ll c$, la transformación de Lorentz de la velocidad (en el caso de esta componente) conduce directamente a la transformación de Galileo, en la que:

$$v'_x = v_x - v$$

$$v'_{y'} = v_y$$

$$v'_{z'} = v_z$$

3.5.2.-La velocidad de la luz: una constante en cualquier sistema y un límite infranqueable

La conclusión del experimento de Michelson y Morley parecía demostrar que la velocidad de la luz era constante e independiente del movimiento del foco emisor. Este hecho fue asumido por Albert Einstein como segundo postulado. Veamos cómo las transformaciones de Lorentz de la velocidad confirman este segundo postulado. Supongamos que un cuerpo se desplaza con respecto a O a la velocidad de la luz, es decir, que $v_x=c$. ¿Con qué velocidad se moverá en relación a O' si la velocidad de O' es v con respecto a O?

Hasta que Einstein enunció el principio de relatividad, la respuesta a esta pregunta era unánime: dicha velocidad sería c-v. Sin embargo, aplicando la transformación de Lorentz, es posible comprobar que esto no es así. La velocidad del cuerpo con respecto a O' es, en este caso:

$$v'_x = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v}{c^2} v_x} = \frac{c - v}{1 - \frac{v}{c}} = \frac{c \left(1 - \frac{v}{c}\right)}{1 - \frac{v}{c}} = c$$

¡Sorprendente!, ¿no? En contra de la creencia imperante hasta los postulados de Einstein, y en contra también de lo que parece dictar el sentido común, el cuerpo se moverá igualmente con una velocidad c con respecto a O'. A pesar de lo increíble que pueda parecer, este resultado viene avalado por el experimento de Michelson y las muchas reproducciones que se han hecho de él.

Pero más sorprendente aún resulta la paradoja que se deriva de esta constancia de c y que vamos a analizar a continuación.

La paradoja de c+c=c

Podemos plantearnos ahora la siguiente pregunta: si un cuerpo se desplaza con una velocidad c con respecto a O', ¿cuál será su velocidad en relación con O si O' se mueve también con una velocidad c con respecto a O? De nuevo va a traicionarnos el sentido común: la respuesta evidente parece ser que el cuerpo se desplazará con una velocidad c+c=2c. En este caso, el problema reside en calcular la velocidad en el sistema de O, conocida dicha velocidad en el sistema de O'. Debemos hacer, por consiguiente, una transformación inversa de la velocidad.

Si partimos de las transformaciones inversas de la posición y elegimos la componente x de la velocidad como dirección del movimiento, y si hacemos $v'_x=c$ y $v=c$, la transformación de Lorentz inversa nos conduce a:

$$v_x = \frac{v'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} v'_x} = \frac{c + c}{1 + \frac{c}{c^2} c} = \frac{2c}{2} = c$$

De estas demostraciones se derivan dos conclusiones de trascendental importancia y que determinan la peculiaridad de los fenómenos que acontecen a velocidades próximas a las de la luz:

- La velocidad de la luz en el vacío, c, es la misma para todos los sistemas de referencia inerciales, con independencia de su movimiento relativo (lo que confirma el segundo postulado).
- La velocidad de la luz en el vacío constituye un límite insalvable. No existe ningún cuerpo que pueda desplazarse a velocidades mayores que la de la luz en el vacío, con independencia del sistema de referencia que elijamos.

3.6.-PRINCIPIOS DE LA DINÁMICA A LA LUZ DE LA RELATIVIDAD

La última conclusión señalada y demostrada a partir de las transformaciones de Lorentz acerca del valor infranqueable de la velocidad de la luz obliga a replantear los principios en los que se sustenta la dinámica de Newton. Recordemos que la dinámica newtoniana se estructura sobre dos conceptos: **masa y momento lineal**. En relación con ellos, se supone que la masa es

invariable y no depende del estado de movimiento del cuerpo, mientras que el momento lineal permanece constante en sistemas o cuerpos aislados.

Ahora bien, la segunda ley de Newton establece que podemos acelerar un cuerpo haciendo que actúe sobre él una fuerza durante un tiempo determinado. Cabe pensar, a la luz de la segunda ley, que si una fuerza muy intensa actúa sobre una partícula, durante un tiempo indefinido, la velocidad de ésta aumentará ilimitadamente. Ninguna ley de la mecánica clásica impide que esto sea así.

Sin embargo, acabamos de ver que existe un valor límite de velocidad que no puede superarse. ¿Cómo compatibilizar este hecho sin negar la validez de las leyes de Newton en marcos de referencia con velocidades bajas?

3.6.1.-Masa y momento relativista

Recordemos la formulación original de la segunda ley de Newton. Según ella:

$$\vec{F} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t}$$

Si imponemos a esta expresión la condición de que la velocidad no puede crecer infinitamente, sino que tiene un valor insuperable igual a c , tendremos que admitir que, al aproximarnos a dicha velocidad, la actuación continuada de la fuerza ya no produce aceleración, lo cual solo puede explicarse si suponemos que **la masa se incrementa con la velocidad**, de modo que la inercia del cuerpo aumenta con dicha velocidad. ¿De qué manera puede depender la masa de la velocidad? No vamos a hacer aquí una deducción matemática formal; expondremos únicamente qué condiciones límite debe cumplir la masa (que denominaremos relativista) e indicaremos la expresión que se ajusta a dichas condiciones. Estas son las siguientes:

- La masa relativista debe alcanzar un valor infinito cuando $v=c$, de ese modo, sería imposible producir aceleración a partir de dicha velocidad.
- La masa relativista debe coincidir con la del cuerpo medida en reposo relativo (cuando $v=0$). Dicha masa se denomina masa en reposo (m_0).

Pues bien, la expresión que se ajusta a estas condiciones es:

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

Observa que si $v \rightarrow c$, entonces $m \rightarrow \infty$, mientras que si $v=0$, entonces $m = m_0$, que son justamente las condiciones que habíamos establecido.

Dicha expresión obliga a modificar consecuentemente los conceptos en los que interviene: el momento lineal y la energía. Así, el **momento lineal relativista** responde a la siguiente ecuación:

$$\vec{p}_{relativista} = \gamma m_0 \vec{v}$$

3.6.2.-Masa y energía relativistas

Teniendo en cuenta que $\vec{F} = \frac{d\vec{p}_{relativista}}{dt}$, puede evaluarse el trabajo necesario para producir cierta variación de la energía cinética de un cuerpo.

Si suponemos que la velocidad inicial de una partícula determinada es cero con respecto a un sistema de referencia dado, puede demostrarse (tras un tratamiento matemático algo complejo) que **la energía cinética de un cuerpo** que se mueve con una velocidad relativa v viene dada por:

$$E_c = \gamma m_0 c^2 - m_0 c^2$$

El primer factor depende de la velocidad del cuerpo. El segundo no presenta tal dependencia y es, además, constante. Este segundo factor se denomina **energía en reposo** de la partícula.

Teniendo en cuenta que $\gamma m_0 = m$ (masa relativista), podemos escribir

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

Puesto que esta energía cinética es, en realidad, una variación de energía (desde el estado de reposo relativo hasta una velocidad v), podemos extender el resultado anterior a cualquier variación de energía y escribirlo así:

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

expresión que podríamos catalogar, sin temor a exagerar, como la “ecuación del siglo XX” y que significa que **cualquier variación de energía se traduce en una variación de masa, y viceversa, cualquier variación de masa supone la correspondiente variación de energía.**

Podemos concluir entonces que:

Masa y energía son dos manifestaciones de la misma propiedad.

Por otra parte, si retomamos la expresión $E_c = (m - m_0)c^2$ y consideramos que la **energía total relativista** es la suma de la energía cinética y la energía en reposo ($E_0 = m_0 c^2$), puede deducirse que:

$$E_{total} = \gamma m_0 c^2$$

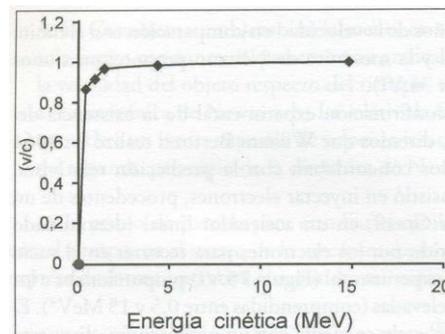
3.7.-EVIDENCIAS EXPERIMENTALES DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

No cabe duda de que la teoría de la relatividad (aquí hemos comentado solo la restringida o especial) resulta verdaderamente apasionante por las sorprendentes consecuencias que plantea. Si hay alguna teoría física que sea conocida por un gran número de personas, esa es la teoría de la relatividad, y si hay alguna teoría física que sea ampliamente desconocida en lo que a sus contenidos se refiere esa es también la teoría de la relatividad. Sin embargo, no hay película de ciencia-ficción que se precie que no recurra a ella.

Pero ¿qué evidencias tenemos de que lo estudiado en esta unidad es cierto? Pues, al cabo de casi un siglo de pruebas, podemos afirmar que la teoría de la relatividad ha sido reforzada con los resultados experimentales. Uno de los más comentados, en referencia a la comprobación experimental de la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud, es el de la detección de los muones procedentes de los piones de la radiación cósmica. Los muones se generan en las capas altas de nuestra atmósfera, pero su vida media en reposo es de tan solo 2 μ s. Con esa vida media, y moviéndose a una velocidad de 0,998 c , recorrerían 600 m, por lo que nunca llegarían a la superficie terrestre. Sin embargo, su detección en la superficie es muy habitual. Esto se explica porque su vida media (tiempo) medida en el sistema de referencia de la Tierra queda multiplicada por el factor γ , que, para esa velocidad, es de 15,8. En consecuencia, su vida media es “dilatada” hasta 31,6 μ s. Así, la distancia que en realidad pueden recorrer es de casi 9500 m, lo que aclara su detección en la superficie. Esta es la explicación desde el sistema de referencia terrestre. Desde el del muon, su vida es de tan solo 2 μ s, pero la atmósfera terrestre se le cruza a la velocidad de 0.998 c , por lo que los 9500 m de altura se contraen, en su sistema, a 600 m.

Por lo que se refiere a la confirmación experimental de la existencia del límite superior de velocidades, c , diremos que William Bertozzi realizó en 1964 un experimento, cuyos resultados concordaban con la predicción relativista. Básicamente, el experimento consistió en inyectar

electrones, procedentes de un generador electrostático Van der Graff, en un acelerador lineal (denominado Linac), y medir el tiempo requerido por los electrones para recorrer en el vacío una distancia dada. El dispositivo experimental proporcionaba a los electrones unas energías cinéticas elevadas (comprendida entre 0,5 y 15 MeV). El tiempo que dura su trayectoria de vuelo se medía con un osciloscopio, dispuesto para recoger los impulsos producidos por los electrones al inicio y al final de su recorrido. Independientemente se determinó, utilizando técnicas de calorimetría, la energía cinética de los electrones. Si fueran correctas las leyes de la mecánica de Newton, al representar la velocidad de los electrones en función de la energía cinética que se les proporciona en este experimento, se debería obtener una línea de crecimiento indefinido. La gráfica adjunta resume los resultados del experimento. La conclusión inequívoca fue que no es posible proporcionar a los electrones una velocidad arbitrariamente grande, aunque se les suministre toda la energía que se desee. Bertozzi concluyó: “Los resultados indican claramente que mientras la energía de los electrones se incrementa, la velocidad se aproxima a un valor límite igual a $3 \cdot 10^8$ m/s”.



La gráfica muestra resultados de la experiencia de Bertozzi. La velocidad de la luz es un límite inalcanzable, a la velocidad que pueden adquirir los electrones.

En experimentos recientes, partículas subatómicas conocidas como piones neutros fueron acelerados hasta la tremenda velocidad del 99,98% de c , a partir de la cual se desintegraron naturalmente, emitiendo radiación electromagnética. A pesar de esta velocidad extraordinaria de las fuentes, las emisiones subsiguientes viajaban a c , exactamente como si los piones estuvieran en reposo al emitir la radiación.

En octubre de 1971 se llevó a cabo un singular experimento por personal del Observatorio Naval de los EE.UU., realizaron un experimento para probar la dilatación del tiempo. Realizaron vuelos en líneas aéreas alrededor del mundo en ambas direcciones, donde cada circuito duraba unos tres días. Llevaron consigo cuatro relojes atómicos de haces de cesio. Cuando regresaron y compararon sus relojes con el reloj del observatorio en Washington, D.C., habían ganado unos 0,15 microsegundos comparados con el reloj establecido en la tierra, con lo que se vio confirmada la predicción relativista.

Los sistemas de posicionamiento global (GPS) son un importante avance de la técnica aeroespacial y de la electrónica. Con la ayuda de un sistema de satélites en órbita alrededor de la Tierra que analizan una señal emitida por un emisor móvil, son capaces de posicionar en tiempo real el objeto emisor, siguiendo su trayectoria con una precisión de algunos metros. La teoría general de la relatividad predice que dos relojes que se encuentren a distinta distancia de la Tierra, y que, por tanto experimentan aceleraciones \vec{g} diferentes, marcan intervalos de tiempo diferentes: el reloj más cercano a la Tierra adelanta respecto al otro. En concreto, entre un reloj situado sobre la superficie terrestre y un reloj situado en un satélite a 400 km de altura sobre la misma, al cabo de un día (86400 s) se produce un desfase de $38699 \cdot 10^{-9}$ s. Este tiempo parece despreciable, pero hay que tener en cuenta que la luz recorre en ese tiempo 11609 m. Si el satélite envía una señal al receptor terrestre, éste la recibe en un tiempo menor que el registrado por el satélite, debido al desfase relativista. Así, para el receptor terrestre, la señal debe recorrer 11609 m menos que la distancia registrada por el satélite. Por tanto, el receptor en Tierra recibirá una información errada sobre su posición. Para evitar este problema, se construyen relojes para los satélites de forma que se retrasen en Tierra el mismo tiempo que se adelantan en órbita. De esta forma, los relojes del receptor y del satélite estarán continuamente sincronizados y la determinación de las posiciones de los objetos en la Tierra será correcta.

Hoy en día, los aceleradores de partículas tienen su fundamento en esta impresionante teoría de aquel empleado de la oficina de patentes de Berna.

RELATIVIDAD ESPECIAL: PROBLEMAS Y CUESTIONES

1. Una nave interestelar parte hacia la estrella Siria (α del Can Mayor), situada a 8,7 años luz, viajando a $0,85 c$. Halla el tiempo que tarda en el viaje de ida y vuelta según:
 - a) Los relojes terrestres.
 - b) Los relojes de a bordo.
2. Un astronauta de 35 años de edad emprende una misión interestelar a bordo de una nave que tiene previsto viajar a una velocidad de $0,9 c$. En la Tierra deja un hijo de 5 años. ¿Cuánto tiempo habrá de durar la misión para que el astronauta tenga, a su regreso, la misma edad que su hijo? Calcula dicho tiempo en los dos sistemas de referencia.
3. La vida media de un pion que se mueve a gran velocidad resulta ser de 60 ns, mientras que su vida media en reposo es de 26 ns. Calcula:
 - a) La velocidad a la que se mueve el pion.
 - b) La distancia que recorre el pion en el sistema de referencia terrestre y en su propio sistema.
4. Un protón tiene una energía en reposo de 938 MeV. Calcula la velocidad y el momento lineal cuando su energía resulte ser de 1450 MeV. (Nota: expresar el momento lineal de MeV/c).
5. María y Ana son dos gemelas que tienen 30 años de edad. María emprende un viaje de ida y vuelta a la estrella Sirio, situada a 8,7 años luz de la Tierra, a una velocidad de $0,95 c$. ¿Qué edades tendrán las dos hermanas cuando María regrese a la Tierra?
6. Un neutrón se mueve con una velocidad de $0,9 c$. Sabiendo que la masa en reposo del neutrón es $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg, calcula:
 - a) La masa relativista.
 - b) El momento lineal.
7. Un haz de protones se acelera hasta alcanzar una energía de 900 MeV. Calcular la velocidad de dichas partículas (nota: la energía dada corresponde con la energía cinética). $(m_p)_0 = 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg
8. Un mesón π^0 tiene una energía en reposo de 135 MeV y se mueve con una velocidad de $0,85 c$. Determina:
 - a) Su energía total.
 - b) Su energía cinética.
 - c) Su momento lineal.
9. Quizás en un futuro podamos hablar de “una nave fabricada en la Tierra, de 50 m de longitud, de la que los habitantes de una colonia del planeta Marte dijeron que medía 49,9 m cuando pasó por delante de ellos”.

Suponiendo que el movimiento relativo de la nave respecto de los habitantes de la colonia era de traslación uniforme en la dirección y sentido del movimiento de éstos, ¿a qué velocidad viajaba la nave respecto de los habitantes de la colonia?

10. ¿A qué velocidad debe moverse una partícula relativista para que su energía total sea un 10% mayor que su energía en reposo? Expresa el resultado en función de la velocidad de la luz en el vacío.

11. Un móvil A se desplaza con una velocidad de $0,9 c$ en la dirección positiva del eje X con respecto a un observador O. Otro móvil B se desplaza con una velocidad de $0,8 c$ con respecto a A, también en la dirección positiva del eje X. ¿Cuál es la velocidad de B con respecto a O?
12. Una nave espacial avanza en la dirección negativa del eje X con una velocidad de $0,9 c$ con respecto a la Tierra, mientras otra lo hace en la dirección positiva el eje X con la misma velocidad en relación con nuestro planeta. Determina:
 - a) La velocidad de una nave con respecto a la otra.
 - b) Esa velocidad, pero aplicando las transformaciones galileanas.

SOLUCIONES DE LOS EJERCICIOS DE RELATIVIDAD ESPECIAL

1. a) 20,47 años b) 10,78 años
2. $\Delta t' = 23,18$ años; $\Delta t = 53,18$ años
3. a) $v = 0,9 c$ b) $d = 16,2$ m ; $d' = 7,02$ m
4. $v = 0,76 c$ $p_{\text{relativista}} = 1102,1$ MeV/c
5. Ana 48,32 años; María 35,72 años
6. a) $3,84 \cdot 10^{-27}$ kg b) $1,04 \cdot 10^{-18}$ kg m/s
7. $2,58 \cdot 10^8$ m/s
8. a) 256,27 MeV b) 121,27 MeV c) 217,80 MeV/c
9. $1,89 \cdot 10^7$ m/s
10. 0,42 c
11. $v_x = 0,988 c$
12. a) $v'_x = -0,994 c$ b) $v'_x = -1,8 c$

FORMULARIO DE RELATIVIDAD ESPECIAL

LEY / CONCEPTO	FÓRMULA	SIGNIFICADO DE LOS SÍMBOLOS	UTILIDAD/ OBSERVACIONES
1	$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$	γ : Factor gamma o factor de Lorentz v : Velocidad constante con la que un observador se desplaza respecto al otro. (m s ⁻¹) c : Velocidad de la luz en el vacío (3 · 10 ⁸ m s ⁻¹)	Permite calcular el factor que introduce Einstein para que las ecuaciones de la física sean válidas sea cual sea la velocidad de un cuerpo.
2	$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'$	Δt : Tiempo transcurrido para el observador estacionario, O. (s) $\Delta t'$: Tiempo transcurrido para el observador O'. (s)	El tiempo medido en dos sistemas inerciales diferentes es distinto. El tiempo transcurre más lentamente para el que observador que se desplaza respecto al estacionario.
3	$l = \gamma \cdot l'$	l : Longitud medida por el observador estacionario, O. (m) l' : Longitud medida por el observador O'. (m)	Las longitudes medidas en dos sistemas inerciales diferentes son distintas. Las longitudes son más cortas para el que observador que se desplaza respecto al estacionario.
4	$v_x' = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v}{c^2} \cdot v_x}$	v_x' : Velocidad de un objeto respecto a O'. (m s ⁻¹) v_x : Velocidad de un objeto respecto a O. (m s ⁻¹) v : Velocidad del observador O' respecto a O. (m s ⁻¹)	Esta expresión justifica que la velocidad de la luz es una constante en cualquier sistema de referencia y un límite infranqueable.
5	$m = \gamma \cdot m_o$	m : Masa relativista. (kg) m_o : Masa en reposo. (kg)	Un cuerpo aumenta su masa según aumenta su velocidad.
6	$\vec{p}_{relativista} = m \cdot \vec{v} = \gamma \cdot m_o \cdot \vec{v}$	$\vec{p}_{relativista}$: Cantidad de movimiento relativista. (kg m s ⁻¹) \vec{v} : Velocidad del cuerpo respecto al observador. (m s ⁻¹)	La cantidad de movimiento aumenta con la velocidad del cuerpo.
7	$E_o = m_o \cdot c^2$	E_o : Energía en reposo. (J)	La energía en reposo de un cuerpo depende de su masa en reposo.
8	$E_{total} = \gamma \cdot m_o \cdot c^2$	E_{total} : Energía total. (J)	La energía que tiene un cuerpo, E _{total} , depende la masa relativista del cuerpo.
9	$E_c = E_{total} - E_o$ $\Delta E = E_{total} - E_o$ $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$	E_c : Energía cinética. (J) ΔE : Variación de la energía de un cuerpo si está en movimiento respecto a si está en reposo. (J) Δm : Variación másica relativista, debida a la velocidad del cuerpo. (kg)	La energía cinética relativista no se calcula con la expresión $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$