

PREGUNTAS TEÓRICAS

VIBRACIONES Y ONDAS

Energía del movimiento armónico simple

Clases de ondas

Amplitud, longitud de onda, frecuencia y período de una onda

Principio de Huygens

Leyes de la reflexión y la refracción

INTERACCIÓN GRAVITATORIA

Leyes de Kepler

Ley de la Gravitación Universal

Momento angular de una partícula

Energía potencial gravitatoria

INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Carga eléctrica. Ley de Coulomb

Energía potencial y potencial eléctricos

Fuerza de Lorentz

Inducción electromagnética

ÓPTICA

Naturaleza de la luz

Leyes de la reflexión y la refracción

Potencia y distancias focales de una lente

FÍSICA MODERNA

Relatividad especial. Postulados

Concepto de fotón. Dualidad onda-corpúsculo

Principio de indeterminación

Tipos de radiaciones nucleares

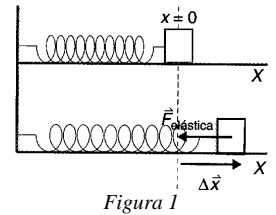
Interacciones fundamentales

Bloque: VIBRACIONES Y ONDAS.

ENERGÍA DEL MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE.

La energía total o mecánica de un cuerpo que describe un movimiento armónico simple (MAS) es el resultado de dos contribuciones: la energía potencial E_p , asociada al desplazamiento del cuerpo de la posición de equilibrio, y la energía cinética E_c , asociada a la velocidad del cuerpo.

Para demostrarlo consideramos un oscilador armónico constituido por un cuerpo unido a un muelle horizontal. Si despreciamos los rozamientos, la fuerza resultante causante del MAS es la fuerza elástica del muelle (figura 1), una fuerza recuperadora, central (siempre dirigida hacia la posición de equilibrio) y variable, pues cumple la ley de Hooke: $\vec{F}_{\text{resultante}} = \vec{F}_{\text{elástica restauradora}} = -k \cdot \vec{x}$.



El trabajo realizado por dicha fuerza restauradora para desplazar el cuerpo desde una posición x hasta la posición de equilibrio es: $W_{\text{Frestauradora}} = \int_x^0 \vec{F}_x \cdot d\vec{x} = \int_x^0 (-kx)dx = - \int_x^0 kxdx = -k \left[\frac{x^2}{2} \right]_x^0 = \frac{1}{2} kx^2 - 0$, de donde se deduce que

dicho trabajo depende solamente de la posición relativa del cuerpo oscilante y no del camino recorrido; por tanto, la fuerza elástica recuperadora es, además de central y variable, conservativa, luego el trabajo que realiza se relaciona con la variación de una magnitud escalar llamada **energía potencial elástica** de forma tal que se cumpla la ley de

la energía potencial: $W_{F \text{ restauradora}} = - \Delta E_p$. En nuestro caso: $W_{F \text{ restauradora}} = - \Delta E_p = E_p(x) - E_p(0) = \frac{1}{2} kx^2 - 0$. Se deduce que la energía potencial elástica de un oscilador armónico en cualquier punto viene dada por la expresión:

$E_p(x) = \frac{1}{2} kx^2 = \frac{1}{2} k A^2 \text{sen}^2 (\omega t + \varphi_0)$. Observa que la energía potencial elástica varía periódicamente con la posición (valor máximo en los extremos, $E_{p \text{ max}} = \frac{1}{2} kA^2 \text{ J}$, y mínimo en el centro de la trayectoria, $E_p=0 \text{ J}$), siendo directamente proporcional al cuadrado de la amplitud.

Ahora bien, como en la situación planteada la fuerza recuperadora es a la vez la fuerza resultante, aplicando la ley de la energía cinética: $W_{F \text{ restauradora}} = \frac{1}{2} kx^2 - 0 = W_{F \text{ resultante}} = \Delta E_c = E_c(0) - E_c(x)$. Se deduce que la energía cinética en la posición de equilibrio es máxima, haciéndose nula en los extremos, luego puede expresarse así:

$E_c(x) = \frac{1}{2} k(A^2 - x^2) = \frac{1}{2} k A^2 \text{cos}^2 (\omega t + \varphi_0) = \frac{1}{2} mA^2 \omega^2 \text{cos}^2 (\omega t + \varphi_0) = \frac{1}{2} mv^2$. Observa que la energía cinética también varía periódicamente con la posición (valor máximo en el centro, $E_{c \text{ max}} = \frac{1}{2} kA^2 \text{ J}$, y mínimo en los extremos de la trayectoria, $E_c=0 \text{ J}$), siendo directamente proporcional al cuadrado de la amplitud.

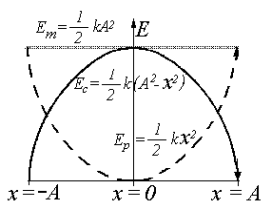


Figura 2

Por tanto, la energía mecánica total de un cuerpo describe un MAS resulta:

$$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} k(A^2 - x^2) + \frac{1}{2} kx^2 = \frac{1}{2} kA^2 = \frac{1}{2} m A^2 \omega^2 = 2\pi^2 mv^2 A^2 \text{ J}$$

Se concluye:

La energía mecánica del MAS permanece constante, siempre y cuando no existan fuerzas disipativas (rozamientos o resistencias). La energía mecánica es igual al valor máximo de la energía potencial, e igual al valor máximo de la energía cinética, siendo directamente proporcional al cuadrado de la amplitud y de la frecuencia del MAS. Durante el MAS, hay una transformación continua de energía potencial en cinética, y viceversa (figura 2).

La conservación de la energía mecánica se cumple para cualquier oscilador armónico. Así, en el caso del péndulo, si no se tiene en cuenta la fricción con el aire, tiene lugar una constante conversión de energía cinética en potencial gravitatoria, y viceversa, pero la suma de ambas, la energía mecánica, siempre tiene un valor constante.

CLASES DE ONDAS.

¿Cómo clasificar la diversidad de movimientos ondulatorios? Podemos utilizar diversos criterios:

A) Según necesiten un medio material para su propagación o según el tipo de energía que transporta la onda.

- Las **ondas mecánicas o materiales** precisan de un medio material (sólido, líquido o gaseoso) para transmitir la energía mecánica que transportan. La elasticidad y la rigidez del medio determinan la velocidad de propagación de la onda por el medio, pudiendo expresar su influencia así: $v = \sqrt{\frac{\text{elasticidad}}{\text{rigidez}}}$. Son ondas mecánicas el sonido, las

ondas sísmicas, las olas en la superficie de un líquido, las ondas en una cuerda o en un muelle,...

- Las **ondas electromagnéticas (y las gravitacionales, según la Física moderna)** no precisan de medio material para propagarse, es decir, transmiten la energía (electromagnética o gravitacional) que transportan hasta en el vacío. Ejemplos de ondas electromagnéticas son la luz visible, las ondas de radio y TV, las microondas, los rayos X,...; en el vacío todas se propagan a la velocidad límite de 300.000 km/s, pero en cualquier medio material su velocidad de propagación es menor y depende de las características eléctricas y magnéticas del medio.

B) Según la relación existente entre la dirección de vibración de la propiedad perturbada y la dirección de propagación de la onda.

- Si ambas direcciones coinciden, las **ondas** son **longitudinales**. El sonido, las ondas sísmicas *P* o las ondas producidas al comprimir y dilatar un muelle son de este tipo. Se propagan por cualquier medio material (sólido, líquido o gaseoso). Cuando se propagan en el seno de un fluido se denominan ondas de presión; es lo que ocurre con el sonido en el aire.

- Si ambas direcciones son perpendiculares, las **ondas** son **transversales**. Las ondas que viajan por una cuerda, las ondas sísmicas *S* o las ondas electromagnéticas son de este tipo.

Las ondas mecánicas transversales requieren para su propagación de medios materiales cuyas partículas ejerzan entre sí fuerzas intermoleculares, medios con cierta rigidez, como en el interior de los sólidos o en las superficies de los líquidos (no en su interior).

C) Según la forma en que se propaga la onda.

Si en un medio provocamos una perturbación en un punto, al cabo de cierto tiempo la perturbación alcanzará simultáneamente una serie de puntos. Si unimos con una línea imaginaria dichos puntos se obtiene una figura denominada frente de ondas. A menudo resulta conveniente, sobre todo en el caso de las ondas electromagnéticas, hablar de rayo en lugar de frente de ondas: el rayo es una línea perpendicular al frente de ondas en todo punto e indica la dirección de propagación del movimiento ondulatorio (*figura 1*).

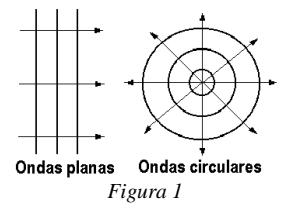


Figura 1

En medios homogéneos e isótropos (medios en los que no varían las propiedades sea cual sea la dirección en que nos movamos) los frentes de ondas responderán a figuras regulares, así: las **ondas unidimensionales**, las que se propagan a lo largo de una línea (como en una cuerda), dan frentes de onda puntuales; las **ondas bidimensionales**, las que se propagan en un plano (como las olas en la superficie de un líquido o las vibraciones de una membrana), dan frentes de onda circulares; y las **ondas tridimensionales**, ondas que se propagan por todo el espacio (como la luz y el sonido), dan frentes de onda esféricos.

No obstante, los frentes de onda circulares o esféricos pueden llegar a considerarse planos en puntos muy alejados del foco perturbador.

D) Según el tiempo que dura la perturbación que origina la onda.

Si la perturbación es instantánea se produce un pulso: un pulso en una cuerda supone que las partículas están en reposo hasta que les llega el pulso y cuando éste pasa vuelven al reposo.

Si la perturbación es continua, se genera un tren de ondas u onda viajera: un tren de ondas en una cuerda supone que todas las partículas de la cuerda se van a poner en movimiento. Cuando nosotros hablamos de ondas y de los parámetros en virtud de los cuales es definida, en realidad nos estamos refiriendo a un tren de ondas.

AMPLITUD, LONGITUD DE ONDA, FRECUENCIA Y PERÍODO DE UNA ONDA.

Pasamos a definir y clarificar las magnitudes solicitadas:

- **Amplitud** (A). Es el valor máximo de la magnitud perturbada. Por ejemplo, en una onda sonora representa el máximo desplazamiento de las partículas del medio respecto a su posición de equilibrio; en una onda electromagnética representa el valor máximo del campo eléctrico o del campo magnético.
- **Longitud de onda** (λ). Es la distancia entre dos puntos consecutivos que se encuentran en idéntico estado de perturbación (suele decirse entre dos puntos consecutivos en idéntica fase) (unidad SI: metro). Nos da la periodicidad espacial de la onda (*figura 1*).

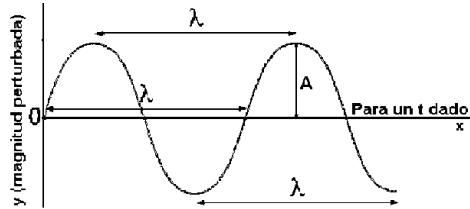


Figura 1

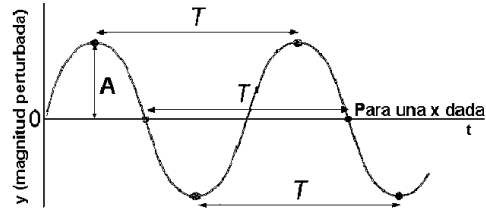


Figura 2

- **Período** (T). Es el tiempo que tarda un punto cualquiera en repetir un determinado estado de perturbación u oscilación (unidad SI: segundo). También es el tiempo que tarda una onda en volver a reproducirse, es decir, el tiempo que tarda la onda en recorrer la longitud de onda. Nos da la periodicidad temporal de la onda (*figura 2*).
- **Frecuencia** ($f = \nu$). Es el número de veces que un determinado punto repite cierto estado de perturbación por unidad de tiempo. O también, el número de veces que la onda se reproduce en la unidad de tiempo. Se trata pues de la inversa del período ($\nu = 1/T$).

También se maneja la **frecuencia angular** o **pulsación** ($\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$).

Período, frecuencia y pulsación son propiedades características del oscilador armónico que hace de foco emisor de ondas y es independiente de la amplitud del movimiento. Esto quiere decir que sus valores permanecen constantes cuando la perturbación se propaga por un medio o cambia de un medio de propagación a otro.

Teniendo en cuenta las magnitudes definidas, observamos que la onda recorre una distancia λ en un tiempo T , por lo que podemos relacionar ambos parámetros a través del concepto de velocidad de propagación de la onda:

$v = \frac{\lambda}{T}$ (unidad SI: m/s). Dicha velocidad depende de las características del medio (elasticidad y rigidez); al cambiar

de medio se modifica la velocidad de propagación de las ondas y, por consiguiente, se modifica su longitud de onda, ya que el período o la frecuencia de la onda no cambian.

PRINCIPIO DE HUYGENS.

La propagación de una onda depende del movimiento de su frente de onda (cada una de las superficies que pasan por los puntos donde una onda oscila con la misma fase). Conforme avanza el frente de onda el movimiento ondulatorio se propaga alcanzando a nuevos puntos del medio.

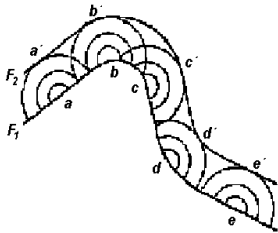


Figura 1. Las ondas secundarias que parten de los puntos *a, b, c, d, e* del frente F_1 habrán alcanzado simultáneamente, al cabo de cierto tiempo, los puntos a', b', c', d', e' que, al unirlos, determinarán el frente F_2 . Esta formación sucesiva de frentes de onda constituye el fenómeno de propagación de las ondas.

Christiaan Huygens ideó en 1690 un método geométrico para construir el frente de onda en un instante dado, conocido dicho frente en un instante anterior. El principio dice así:

Los puntos situados en un frente de ondas se convierten en fuentes de ondas secundarias, cuya envolvente constituye un nuevo frente de ondas primario.

La forma de aplicarlo es la siguiente: se trazan pequeños círculos de igual radio con centros en diferentes puntos de un frente de ondas, y luego se traza la envolvente de los círculos, la cual constituye el nuevo frente de ondas (figura 1).

La comprobación experimental del principio se puede realizar en la cubeta de ondas (figura 2), siendo válido para todo tipo de ondas, materiales o no.

Una consecuencia del principio de Huygens es que todos los rayos tardan el mismo tiempo entre dos frentes de onda consecutivos. Los rayos son líneas perpendiculares a los frentes de onda, y corresponden a la línea de propagación de la onda.

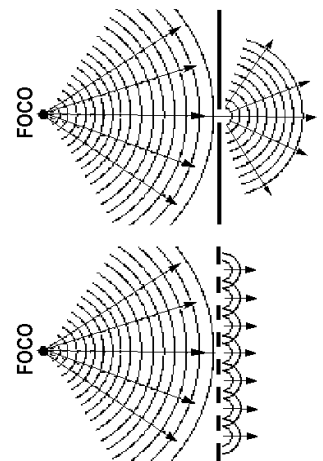


Figura 2

LEYES DE LA REFLEXIÓN Y LA REFRACCIÓN.

(Esta pregunta teórica puede encuadrarse en el bloque de Vibraciones y ondas o en el bloque de Óptica)

Cuando una onda que avanza a cierta velocidad por un medio homogéneo llega a una superficie que separa dicho medio de propagación de otro distinto, ocurren simultáneamente, en mayor o menor medida, dos fenómenos ondulatorios básicos, consistentes en la **desviación de la dirección de propagación de la onda**: la reflexión y la refracción.

- En la **reflexión** (figura 1), la onda continua propagándose en el mismo medio de donde proviene, pero con distinta dirección y sentido. Ejemplos: la reflexión de la luz en un espejo; el eco que se produce al reflejarse el sonido en un obstáculo; etc.
- En la **refracción** (figura 2), la onda cambia de medio de propagación, produciéndose un cambio de dirección al pasar oblicuamente al nuevo medio, al propagarse en él con diferente velocidad. Ejemplos: la refracción de la luz al pasar del agua al aire, que hace que un objeto recto (pajita, lápiz,...) parcialmente sumergido en el agua, se aprecie quebrado; la desviación que experimenta el sonido al pasar por distintas capas atmosféricas, que permite escuchar sonidos lejanos (como la sirena de un barco o de un tren muy lejano); etc.

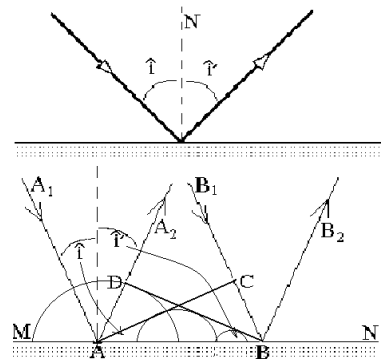


Figura 1

Desde el punto de vista energético, está claro que la energía de la onda incidente se reparte entre la onda reflejada y la refractada.

Experimentalmente se comprueban las siguientes leyes:

- 1ª. Las direcciones de incidencia, reflexión y refracción están en el mismo plano, que es perpendicular a la superficie de separación y contiene a la normal.
- 2ª. El ángulo que forma la dirección de incidencia con la normal, ángulo de incidencia (\hat{i}), es igual al ángulo que forma la dirección de reflexión con la normal, ángulo de reflexión (\hat{i}'): $\hat{i} = \hat{i}'$
- 3ª. El cociente entre el seno del ángulo de incidencia (\hat{i}) y el seno del ángulo de refracción (\hat{r}) es constante e igual al cociente entre los respectivos valores de la velocidad de propagación de la onda en ambos medios: $\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2}$ (ley de Snell)

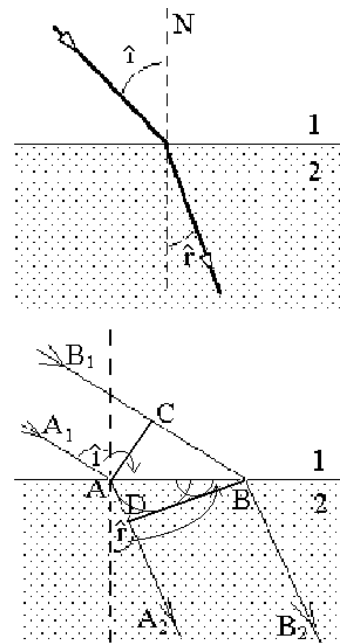


Figura 2

Para ondas luminosas es muy frecuente hablar de índice de refracción absoluto de un medio (n) como el cociente entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío (c) y la velocidad a través del medio en cuestión: $n = c/v$. De aquí se deduce: $v = c/n$, y por tanto: $v_1/v_2 = n_2/n_1$, con lo que la ley de Snell puede expresarse como: $\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$, donde la constante n_{21} es el índice de refracción

relativo de un medio respecto a otro.

De la ley de Snell se deduce que $v_2 < v_1$ implica $\hat{r} < \hat{i}$, o sea, la dirección de propagación de los frentes de onda refractados se acercan a la normal. En caso contrario, $v_2 > v_1$ implica $\hat{r} > \hat{i}$, con lo que la dirección de propagación de los frentes de onda refractados se alejan de la normal. En este último caso puede manifestarse a partir de cierto ángulo de incidencia (conocido como ángulo límite o crítico) el fenómeno de **reflexión total** (los frentes de onda refractados se propagan en la línea de separación de los dos medios, con lo que podemos decir que no hay refracción, de aquí el nombre dado al fenómeno) (figura 3).

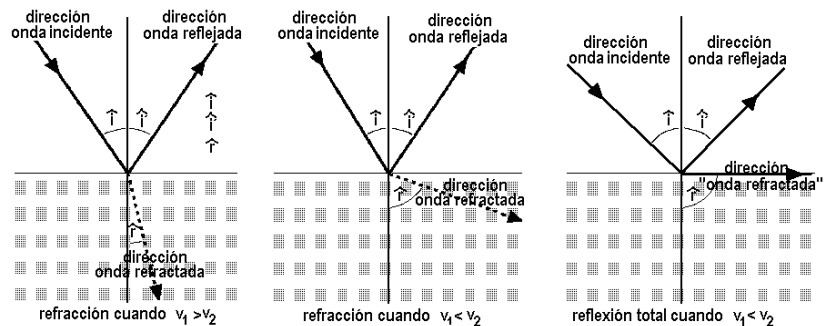


Figura 3

Bloque: INTERACCIÓN GRAVITATORIA.

LEYES DE KEPLER.

El astrónomo alemán Johannes Kepler, seguidor del modelo heliocéntrico copernicano, utilizó los precisos datos astronómicos de Tycho Brahe sobre las posiciones del planeta Marte, para deducir a principios del siglo XVII tres leyes empíricas que constituyen la primera descripción cinemática del movimiento planetario. Estas leyes son:

- Primera ley o ley de las órbitas:

Los planetas se mueven en órbitas elípticas, con el Sol situado en un foco.

Esta ley rompe con la ciencia antigua, que consideraba al movimiento circular uniforme como perfecto. No obstante, en la mayoría de los casos, las órbitas de los planetas tienen excentricidades muy pequeñas, por lo que pueden considerarse círculos descentrados (figura 1).

- Segunda ley o ley de las áreas:

La línea recta imaginaria que une cada planeta con el Sol (radio vector) barre áreas iguales en tiempos iguales.

Es decir, la velocidad areolar (área barrida en la unidad de tiempo por el radio vector) es constante. Esto implica que el movimiento de los planetas no es uniforme: van más rápidos en las proximidades del perihelio (punto más próximo al Sol) y más lentos en las proximidades del afelio (punto más alejado del Sol) (figura 2).

Esta ley es equivalente a la constancia de la cantidad de movimiento angular o momento angular del planeta con respecto al Sol.

- Tercera ley o ley de los períodos:

Los cuadrados de los períodos orbitales (T) de los planetas son proporcionales a los cubos de sus distancias medias al Sol (r): $\frac{T_{planeta}^2}{r_{Sol-planeta}^3} = k_S$, siendo k_S una constante que depende del Sol, o sea, $T_p^2 = k_S \cdot r_{S-p}^3$

Esta ley, deducida por Kepler para el sistema solar, es válida para cualquier conjunto de satélites con su astro central. Lógicamente, cada sistema tiene valores distintos de la constante, pues esta depende del astro central.

Esta ley permite conocer la distancia relativa entre los planetas, ya que el tiempo que tarda un planeta en recorrer su órbita se conoce desde la antigüedad. También justifica el que los planetas más alejados del Sol tardan más tiempo en recorrer su órbita que los que están más cerca del mismo.

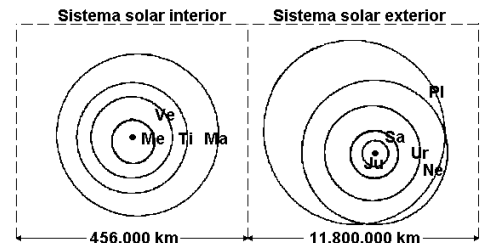


Figura 1. Escala del sistema solar. El sistema solar exterior es unas 26 veces mayor que el interior. Sólo se aprecia cierta excentricidad en la órbita para Mercurio y para Plutón.

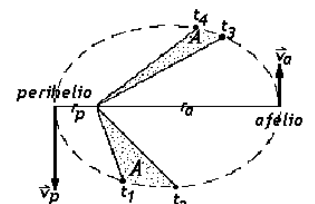


Figura 2

LEY DE LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL.

La Ley de la Gravitación Universal fue enunciada por Isaac Newton en la segunda mitad del siglo XVII, extendiendo a la mecánica celeste las leyes que regían la mecánica terrestre, algo que chocaba de lleno con la enseñanza aristotélica, de absoluta separación entre lo celeste y lo terrestre.

La ley permitió explicar todos los efectos gravitatorios conocidos en su época: los movimientos de los astros en el sistema solar, las mareas oceánicas, la caída de los cuerpos hacia la Tierra, etc.

La ley dice así:

La interacción gravitatoria entre dos masas cualesquiera es atractiva y puede expresarse mediante una fuerza central directamente proporcional al valor de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa sus centros de masas.

Matemáticamente, expresada en forma vectorial: $\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{u}_r$, donde: \vec{F} es la fuerza gravitatoria entre las dos masas m_1 y m_2 ; r es la distancia que separa los centros de dichas masas; $\vec{u}_r = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$ es un vector unitario que va de la masa que ejerce la fuerza a la que la experimenta; y G es la constante de gravitación universal.

Observa (figura 1) que la fuerza gravitatoria actúa a distancia, sin influencia ni necesidad de medio material, a lo largo de la línea de acción que une los centros de las masas (dirección del vector unitario), y es siempre atractiva (el vector fuerza y el vector unitario tienen sentidos contrarios).

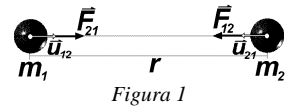


Figura 1

La fuerza entre dos masas siempre se manifiesta por parejas, de acuerdo con el principio de acción y reacción; ambas fuerzas tienen el mismo módulo y dirección, pero sentidos contrarios y puntos de aplicación en cuerpos diferentes (esto hace que sus efectos puedan ser muy distintos).

El valor de la constante de gravitación G es universal (independiente de la composición, forma o de cualquier otra característica de las masas) y muy pequeño: $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$. G representa la fuerza con que se atraerían dos masas de 1 kg cuyos centros de masa estén situados a 1 m de distancia, lo que indica que la fuerza gravitatoria es muy débil (la más débil de las cuatro fuerzas fundamentales conocidas), sólo apreciable si alguna de las masas es gigantesca.

Cuando están presentes más de dos masas, la fuerza entre cualquier par de masas se calcula mediante la ley de la gravitación universal. La fuerza resultante sobre una de ellas es igual al vector suma de las fuerzas debidas a las diversas masas por separado (principio de

superposición): $\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_{i0} = \sum_{i=1}^n G \cdot \frac{M \cdot m_i}{r_{i0}^2} \cdot \vec{u}_{ri0}$ (figura 2).

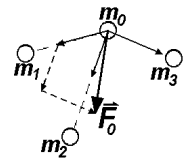


Figura 2

MOMENTO ANGULAR DE UNA PARTÍCULA.

El momento angular o cinético, \vec{L} , es una magnitud vectorial que nos mide la cantidad de movimiento de giro. Es muy útil en el estudio del movimiento de los astros, pues se mantiene constante con el paso del tiempo.

Se define así:

Momento angular \vec{L} de una partícula de masa m respecto de un punto O es igual al producto vectorial: $\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p} = \vec{r} \wedge m\vec{v}$, donde \vec{r} es el vector de posición de la partícula respecto a O , \vec{p} es la cantidad de movimiento lineal de la partícula, m la masa de la partícula y \vec{v} su velocidad.

De la definición de producto vectorial se deducen las características del vector \vec{L} (figura 1):

- es perpendicular al plano que determinan \vec{r} y \vec{p} (o \vec{v}),
- su sentido viene dado por la regla de la mano derecha o regla de Maxwell; coincide con el del avance de un tornillo al volutar el \vec{r} sobre \vec{p} (o \vec{v}) por el camino más corto,
- su módulo es: $L = |\vec{L}| = r \cdot m \cdot v \cdot |\text{sen}\varphi|$ (unidad SI: $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), donde φ es el ángulo formado por \vec{r} y \vec{p} (o \vec{v}); el producto $v \cdot |\text{sen}\varphi|$ es la componente de la velocidad orientada en la dirección perpendicular a la línea que une la partícula con el punto de giro, o sea, la componente de la velocidad \vec{v} que contribuye a la cantidad de movimiento de giro (\vec{v}_p) (la componente radial \vec{v}_r no contribuye al momento angular).

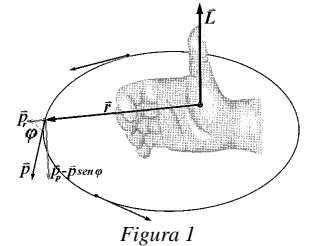


Figura 1

La variación del momento angular con el paso del tiempo está relacionada con otra magnitud vectorial conocida como momento de una fuerza, momento de giro o momento de torsión, \vec{M} : $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$. Observa como se

llega a esta relación: $\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d(\vec{r} \wedge \vec{p})}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dt} \wedge \vec{p} + \vec{r} \wedge \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{v} \wedge \vec{p} + \vec{r} \wedge \vec{F} = \vec{r} \wedge \vec{F} = \vec{M}$, donde hemos hecho uso de las igualdades: $\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}$; $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$; $\vec{r} \wedge \vec{F} = \vec{M}$, y hemos tenido en cuenta que \vec{v} y \vec{p} son vectores paralelos.

El significado físico de esta relación es: la cantidad de movimiento de giro de una partícula con respecto a un punto varía, en el transcurso del tiempo, cuando actúa sobre ella un momento de fuerza resultante, respecto del mismo punto.

Por consiguiente, la constancia en el momento angular de una partícula implica la ausencia de momento de fuerza resultante actuando sobre la misma. Ello sucede si sobre la partícula no actúa ninguna fuerza o están compensadas las fuerzas que actúan. Pero también cuando la fuerza resultante que actúa sobre la partícula se dirige en todo instante hacia el punto que hace de centro de fuerzas, es decir, cuando se trata de una fuerza central (figura 2); entonces, el vector de posición \vec{r} es paralelo a la fuerza central \vec{F} , de manera que el momento de giro es nulo y el momento angular se mantiene constante. Esta situación es la que acontece en el movimiento de traslación y de rotación de los astros, pues la fuerza que interviene, la fuerza gravitatoria, es una fuerza central.

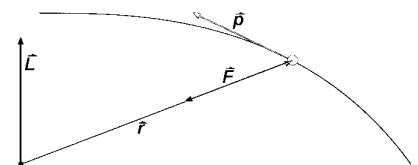


Figura 2

La conservación del momento angular en el movimiento de los astros implica tres consecuencias, al tratarse de una magnitud vectorial: 1ª, el astro siempre debe orbitar en el mismo plano y debe rotar con la misma orientación (dado que debe conservarse la dirección de \vec{L}); 2ª, el astro siempre debe girar en la misma dirección (dado que debe conservarse el sentido de \vec{L}); y 3ª, el astro conserva su período orbital y de revolución ((dado que debe conservarse el módulo de \vec{L})).

ENERGÍA POTENCIAL GRAVITATORIA.

La fuerza gravitatoria es una fuerza central conservativa. Ello implica que para el campo gravitatorio puede definirse una magnitud escalar que sólo depende de la posición, llamada **energía potencial gravitatoria**, tal que el trabajo realizado por la fuerza gravitatoria para trasladar una masa m de un punto A a otro B del campo creado por otra masa M (figura 1) es igual a la diferencia de valores que toma dicha función escalar entre dichos puntos (**ley de la energía potencial**): $W_{A \rightarrow B} = -\Delta E_p = -(E_{pB} - E_{pA}) = -E_{pB} + E_{pA}$

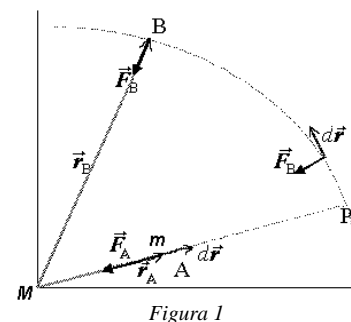


Figura 1

Como el trabajo realizado por la fuerza gravitatoria es independiente del camino seguido; consideramos, por comodidad, la trayectoria A-P-B, con lo que:

$$W_{A \rightarrow B} = W_{A \rightarrow P} + W_{P \rightarrow B} = W_{A \rightarrow P} = \int_A^P \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_A^P -G \frac{Mm}{r^2} \cdot dr = \left[G \frac{Mm}{r} \right]_A^P = G \frac{Mm}{r_B} - G \frac{Mm}{r_A}$$

entre los vectores fuerza y desplazamiento en cada tramo (180° en el tramo A \rightarrow P y 90° en el tramo P \rightarrow B) y que r_P es igual a r_B . Se deduce que: $G \frac{Mm}{r_B} - G \frac{Mm}{r_A} = -E_{pB} + E_{pA}$, luego:

La energía potencial gravitatoria de una masa m colocada a una distancia r de la masa M creadora del campo gravitatorio es igual a: $E_p = -G \frac{Mm}{r}$ (unidad SI: Julios (J)).

Observa que la energía potencial gravitatoria en el infinito es igual a cero. Esto significa que las masas infinitamente alejadas no interaccionan entre sí, están desligadas, constituyen un sistema libre; en cualquier otra situación, las masas constituyen un sistema ligado y la energía potencial asociada a ellas es negativa (figura 2).

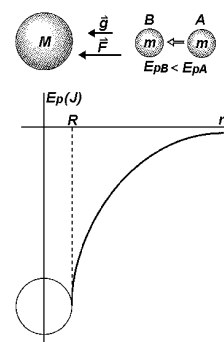


Figura 2

Durante una transformación espontánea, por ejemplo, acercar dos masas, la fuerza gravitatoria realiza un trabajo de signo positivo y disminuye la energía potencial asociada al sistema de masas: $W_{A \rightarrow B} > 0 J \Rightarrow r_B < r_A \Rightarrow E_{pB} < E_{pA} \Rightarrow \Delta E_p < 0 J$. Por el contrario, en un proceso no espontáneo, como al separar dos masas, la fuerza gravitatoria realiza un trabajo de signo negativo y aumenta la energía potencial asociada al sistema de masas: $W_{A \rightarrow B} < 0 J \Rightarrow r_B > r_A \Rightarrow E_{pB} > E_{pA} \Rightarrow \Delta E_p > 0 J$.

Para un sistema de más de dos masas, la energía potencial gravitatoria del sistema es la suma de las energías potenciales de todos los pares distintos de masas que se pueden formar. Así, para un sistema de tres masas: $E_p = E_{p12} + E_{p13} + E_{p23}$.

En las proximidades de la superficie terrestre la fuerza gravitatoria que actúa sobre un cuerpo de masa m es su peso, $\vec{F} = m \cdot \vec{g} = -m \cdot g \cdot \vec{j}$ N, donde hemos considerado la intensidad de campo gravitatorio (la conocida gravedad) como constante. Por tanto, el trabajo realizado por la fuerza peso cuando el cuerpo de masa m se desplaza verticalmente desde un punto A a otro punto B, separados una distancia h , resulta:

$$W_{A \rightarrow B} = \int_A^B m \cdot g \cdot dr = [m \cdot g \cdot r]_A^B = m \cdot g \cdot y_B - m \cdot g \cdot y_A = m \cdot g \cdot h$$

Luego podemos definir la energía potencial gravitatoria en las proximidades de la superficie terrestre como: $E_p = m \cdot g \cdot h$, donde consideramos el origen de energías en la superficie terrestre.

Bloque: INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

CARGA ELÉCTRICA. LEY DE COULOMB.

La **carga eléctrica** es, junto a la masa, una propiedad fundamental de la materia, que tiene su origen en la estructura atómica, descubierta a finales del siglo XIX y principios del XX. Es la propiedad responsable de la interacción electromagnética. Tiene las siguientes propiedades:

- Puede ser positiva o negativa, como se observa en los fenómenos de electrización.
- La carga total de un conjunto de partículas es la suma algebraica con el signo de sus cargas individuales.
- La carga eléctrica total de un sistema aislado se conserva (las cargas eléctricas no pueden ser creadas ni destruidas, principio de conservación de la carga).
- La carga está cuantizada, hecho confirmado por Robert Millikan en 1909. Siempre se presenta en cantidades discretas que son múltiplos enteros del valor absoluto de la carga del electrón ($q = \pm n \cdot |e|$), conocida por ello como unidad fundamental de carga (equivale a $1,60 \cdot 10^{-19}$ C, donde C representa al culombio, la unidad de carga en el Sistema internacional de unidades). La carga del electrón es $-|e|$ y la del protón $+|e|$.

La **ley de Coulomb**, enunciada en 1785, describe la interacción entre cargas eléctricas en reposo. Dice así:

La interacción electrostática entre dos partículas consideradas puntuales cargadas eléctricamente (q_1 y q_2) es directamente proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa (r), y depende de la naturaleza del medio que las rodea.

Las fuerzas electrostáticas que actúan sobre cada una de las partículas cargadas, \vec{F}_{12} y \vec{F}_{21} , forman un par de fuerzas de acción y reacción, por lo que su dirección es la de la recta que une sus centros y su sentido es de atracción si las cargas tienen distinto signo y de repulsión si las cargas tienen el mismo signo.

Escalarmente: $F = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$. Vectorialmente: $\vec{F} = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \vec{u}_r$, donde:

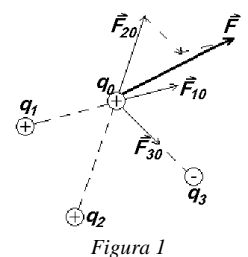
- $\vec{u}_r = \vec{r}/|\vec{r}|$ es un vector unitario dirigido según la recta que une las cargas y de sentido de la carga que ejerce la fuerza hacia la carga que experimenta dicha fuerza.
- K es la constante eléctrica (determinada por Coulomb utilizando la balanza de torsión), una constante dependiente del medio en el que se sitúan las cargas. Con frecuencia, la constante K se define en función de otra constante ϵ , denominada permitividad o constante dieléctrica del medio ($K = \frac{1}{4\pi\epsilon}$). El valor más elevado de K corresponde al vacío, $K_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$; su menor valor en cualquier otro medio indica que el medio material disminuye la interacción eléctrica entre cargas.

La fuerza electrostática o eléctrica, al igual que la gravitatoria, es una fuerza a distancia central y, como veremos, conservativa. En ambas, el módulo de la fuerza es directamente proporcional al producto de las propiedades que las crean, masa o carga eléctrica, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Sin embargo, existen diferencias fundamentales entre ambas interacciones:

- la fuerza gravitatoria es siempre atractiva mientras que la electrostática puede ser atractiva o repulsiva, según el signo de las cargas que interactúan;
- la fuerza gravitatoria no depende del medio (el valor de G es universal), mientras que la eléctrica sí (el valor de K depende del medio en que se sitúen las cargas);
- para valores equivalentes de la propiedad que crea la fuerza (masa o carga), la intensidad de la fuerza gravitatoria es mucho menor que la intensidad de la fuerza electrostática (basta comparar los valores de G y K en unidades SI).

En una distribución de cargas eléctricas también se cumple el principio de superposición, por lo que la fuerza resultante que actúa sobre cada carga es igual a la suma

vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre ella: $\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_{i0} = \sum_{i=1}^n K \cdot \frac{q_0 \cdot q_i}{r_{i0}^2} \cdot \vec{u}_{r_{i0}}$ (figura 1).



ENERGÍA POTENCIAL Y POTENCIAL ELÉCTRICOS.

La fuerza electrostática es una fuerza central conservativa. Ello implica que para el campo eléctrico puede definirse una magnitud escalar que sólo depende de la posición, llamada **energía potencial eléctrica**, tal que el trabajo realizado por la fuerza electrostática para trasladar una carga eléctrica q de un punto A a otro B del campo creado por otra carga Q (figura 1) es igual a la diferencia de valores que toma dicha función escalar entre dichos puntos (**ley de la energía potencial**): $W_{A \rightarrow B} = -\Delta E_p = -(E_{pB} - E_{pA}) = -E_{pB} + E_{pA}$

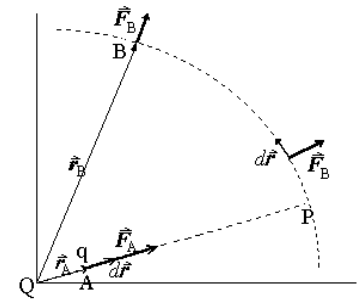


Figura 1

Como el trabajo realizado por la fuerza electrostática es independiente del camino seguido; consideramos, por comodidad, la trayectoria A-P-B, con lo que:

$W_{A \rightarrow B} = W_{A \rightarrow P} + W_{P \rightarrow B} = W_{A \rightarrow P} = \int_A^P \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_A^P -K \frac{Qq}{r^2} \cdot dr = \left[-K \frac{Qq}{r} \right]_A^P = -K \frac{Qq}{r_B} + K \frac{Qq}{r_A}$, donde se tiene en cuenta los ángulos entre los vectores fuerza y desplazamiento en cada tramo (180° en el tramo A \rightarrow P y 90° en el tramo P \rightarrow B) y que r_p es igual a r_B . Se deduce que: $-K \frac{Qq}{r_B} + K \frac{Qq}{r_A} = -E_{pB} + E_{pA}$, luego:

La energía potencial eléctrica de una carga q colocada a una distancia r de la carga Q creadora del campo eléctrico es igual a: $E_p = K \frac{Qq}{r}$ (unidad SI: Julios (J)).

Observa que la energía potencial eléctrica en el infinito es igual a cero. Esto significa que las cargas infinitamente alejadas no interaccionan entre sí, están desligadas, constituyen un sistema libre; en cualquier otra situación, las cargas constituyen un sistema ligado y la energía potencial asociada a ellas puede ser positiva (si las cargas son del mismo signo) o negativa (si las cargas son de signo contrario) (figura 2).

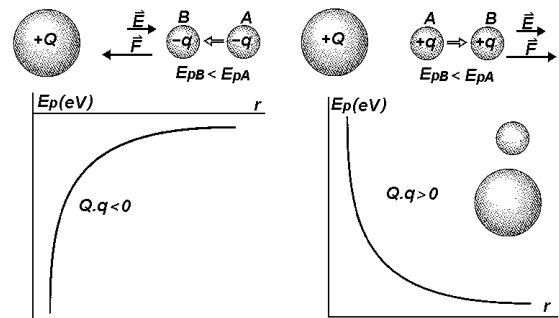


Figura 2

Durante una transformación espontánea, por ejemplo, acercar cargas de signo opuesto o separar cargas del mismo signo, la fuerza electrostática realiza un trabajo de signo positivo y disminuye la energía potencial asociada al sistema de cargas:

$W_{A \rightarrow B} > 0 J \Rightarrow r_B < r_A \Rightarrow E_{pB} < E_{pA} \Rightarrow \Delta E_p < 0 J$. Por el contrario, en un proceso no espontáneo, como al separar dos cargas de signo opuesto o acercar cargas del mismo signo, la fuerza electrostática realiza un trabajo de signo negativo y aumenta la energía potencial asociada al sistema de cargas: $W_{A \rightarrow B} < 0 J \Rightarrow r_B > r_A \Rightarrow E_{pB} > E_{pA} \Rightarrow \Delta E_p > 0 J$.

Para un sistema de más de dos partículas cargadas, la energía potencial eléctrica del sistema es la suma de las energías potenciales de todos los pares distintos de cargas que se pueden formar. Así, por ejemplo, para un sistema de tres cargas eléctricas: $E_p = E_{p12} + E_{p13} + E_{p23}$.

La energía potencial no sirve para caracterizar el campo, pues su valor en un punto depende de la carga q colocada en el mismo, por lo que se define el **potencial eléctrico**:

El potencial eléctrico a una distancia r de la carga Q creadora del campo es igual a la energía potencial eléctrica de la unidad de carga positiva colocada a dicha distancia: $V = \frac{E_p}{q} = K \cdot \frac{Q}{r}$ (unidad SI: voltio ($V = J/C$)).

Como $E_p = q \cdot V$ y $W_{A \rightarrow B} = -\Delta E_p = q \cdot (-\Delta V) = -q \cdot (V_B - V_A) = q \cdot (V_A - V_B)$, el potencial eléctrico en un punto del campo representa el trabajo que realiza la fuerza electrostática para trasladar la unidad de carga positiva desde ese punto hasta el infinito. El potencial es positivo o negativo según sea positiva o negativa la carga que crea el campo.

En muchos ámbitos cotidianos (circuitos de corriente eléctrica continua y alterna, condensadores, etc.) se realizan medidas de diferencias de potencial eléctrico (ddp) o voltajes entre dos puntos, ΔV , mediante dispositivos llamados voltímetros. En estas medidas se asigna el valor cero al potencial eléctrico de la Tierra; se dice que un conductor unido a tierra presenta un potencial eléctrico nulo.

Si en una región del espacio hay un sistema de varias cargas eléctricas, el potencial eléctrico en un punto es igual a la suma algebraica de los potenciales creados por cada una de las cargas en ese punto: $V = \sum_{i=1}^n V_i$.

FUERZA DE LORENTZ.

Una partícula con carga eléctrica q que se mueve con una velocidad \vec{v} en una región del espacio donde existe un campo magnético \vec{B} , experimenta una fuerza magnética \vec{F} que viene dada por la expresión vectorial: $\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \wedge \vec{B})$ (unidades SI: \vec{F} en N -newton; q en C -culombio; \vec{v} en m/s y \vec{B} en T -tesla). Esta fuerza es conocida como **fuerza de Lorentz**, en honor al físico holandés Hendrik Lorentz, investigador incansable en el campo del electromagnetismo.

De la expresión anterior se deduce (figura 1):

- La magnitud de la fuerza magnética viene dada por la expresión: $F = |q| \cdot v \cdot B \cdot \text{sen} \theta$, siendo θ el ángulo formado por las direcciones de \vec{v} y \vec{B} . Por tanto, la fuerza magnética es nula cuando la partícula no tiene carga, o cuando no se mueve dentro del campo o cuando se mueve en línea con el campo (cuando coinciden las direcciones de \vec{v} y \vec{B}). Por contra, la fuerza magnética es máxima cuando la partícula cargada se mueve en dirección perpendicular al campo ($\vec{v} \perp \vec{B}$).

- La fuerza magnética \vec{F} es perpendicular al plano determinado por la dirección de la velocidad \vec{v} y del campo \vec{B} . Esto supone que, a diferencia de lo que ocurría en los campos gravitatorio o electrostático, las líneas de campo magnético no son paralelas a las líneas de fuerza. Además, al ser la fuerza magnética perpendicular a la trayectoria de la partícula (por ser perpendicular a la velocidad \vec{v}) esta fuerza sólo modifica la dirección de la velocidad, pero no su módulo; la fuerza magnética no realiza trabajo sobre la partícula y la energía cinética de ésta no se ve afectada.

- El sentido de la fuerza magnética \vec{F} , si la carga es positiva, viene dado por la regla de Maxwell o regla de la mano derecha, que coincide con el avance de un tornillo al girar \vec{v} hacia \vec{B} por el camino más corto. Si la carga es negativa, su sentido se invierte.

Un caso particular de interés es cuando el campo magnético \vec{B} es uniforme y la partícula cargada penetra perpendicularmente al campo. La fuerza magnética actúa como fuerza centrípeta y hace que la partícula cargada describa un movimiento circular uniforme, que se puede aprovechar para separar partículas cargadas (figura 2). En este caso: $F_m = F_c$;

$$q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{r}; \text{ de donde: } r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}. \text{ Se observa que la rapidez angular } (\omega = \frac{v}{r} = B \cdot \frac{q}{m}), \text{ la}$$

$$\text{frecuencia } (v = f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{B}{2\pi} \cdot \frac{q}{m}) \text{ y el período } (T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{B} \cdot \frac{m}{q}) \text{ son independientes del radio}$$

de la trayectoria y de la velocidad de la partícula cargada; sólo dependen de la relación carga/masa de la partícula y del módulo del campo magnético.

Si una partícula cargada se mueve en una región en la que actúan un campo eléctrico \vec{E} y otro magnético \vec{B} , estará sometida a dos fuerzas que, en virtud del principio de superposición, podemos suponer que actúan independientemente. De ese modo, actuará sobre ella una fuerza total: $\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$, fuerza conocida como **fuerza de Lorentz generalizada**.

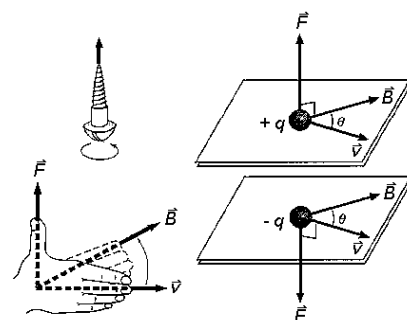


Figura 1

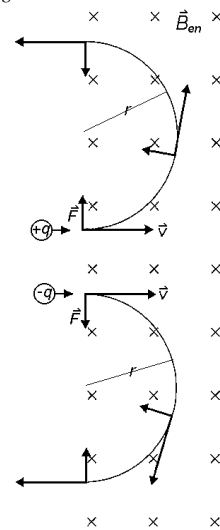


Figura 2

INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

La **inducción electromagnética** consiste en la generación de corriente eléctrica inducida por un campo magnético variable. Faraday y Henry observaron a través de numerosas experiencias las condiciones que deben darse para que en un circuito eléctrico se induzca corriente eléctrica:

- Cuando existe movimiento relativo entre el imán o electroimán y la espira o bobina, la aguja del galvanómetro se mueve en una dirección o en la dirección opuesta, señalando una corriente en el circuito tanto mayor cuanto mayor velocidad se imprima al movimiento. Si no hay movimiento relativo no se observa desviación en la aguja.
- Sin haber desplazamientos, también se observan corrientes inducidas si se modifica el campo magnético que atraviesa el circuito, bien por variar la intensidad de la corriente que lo genera (instantáneamente, al conectar o desconectar el circuito que genera el campo, o en intervalos más duraderos, utilizando un reóstato -resistencia- para obtener una corriente de intensidad variable) o por variar la superficie del circuito inducido expuesta al campo (al modificar su forma o al hacerlo girar).

El hecho común a todas las experiencias anteriores es que existe una variación del número de líneas de campo magnético que atraviesan el circuito (espira, bobina,...). Para cuantificar estas líneas de campo utilizamos el concepto de flujo magnético: $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \alpha$ (unidad SI: *weber* (1 Wb = 1 T·m²)).

En todas las experiencias se observa que la intensidad (I_{ind} ; unidad SI: *amperio* (A)) o la diferencia de potencial de la corriente inducida (conocida como fuerza electromotriz, fem, ε_{ind} ; unidad SI: *voltio* (V)) es tanto mayor cuanto más acusada es la variación del flujo magnético en el transcurso del tiempo. La ley que recoge estos hechos se conoce como **ley de Faraday o de Faraday-Henry**:

El valor de la fuerza electromotriz inducida en un circuito es igual y de signo opuesto a la rapidez con que varía el flujo magnético a través de la superficie limitada por el mismo, independientemente de las causas que provoquen la variación del flujo.

Matemáticamente: $\varepsilon_{ind} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$. Si el circuito es una bobina constituida por N espiras, la fem se multiplica de modo que: $\varepsilon_{ind} = -N \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t}$.

La intensidad de la corriente inducida, en base a la ley de Ohm, vendrá determinada por: $I_{ind} = \frac{\varepsilon_{ind}}{R}$, siendo R la resistencia eléctrica que ofrece el circuito al paso de la corriente.

El signo negativo de la ley de Faraday lo explica la **ley de Lenz**:

La dirección y sentido de la corriente inducida es tal que el campo magnético creado por ella se opone a la variación del flujo magnético que la produce.

Es como un mecanismo de inercia de la naturaleza con el que los sistemas tienden a mantener su estado de equilibrio original. La ley de Lenz es una forma más de enunciar el principio de conservación de la energía: para mantener la corriente inducida (o la fem inducida) se debe realizar un trabajo externo. *¡Está claro que la energía no surge de la nada, sino que se transfiere de un cuerpo a otro y/o se transforma de una forma a otra!*

De lo comentado hasta ahora, deben quedar claros dos principios básicos de la inducción electromagnética:

- Toda variación del flujo de un campo magnético externo que atraviesa un circuito cerrado produce en éste una fem inducida y, por tanto, una corriente eléctrica inducida que se opone a esa variación.**
- La corriente inducida es una corriente instantánea, pues sólo dura mientras dura la variación del flujo.**

En el fenómeno de la inducción electromagnética se fundamentan los generadores eléctricos de corriente alterna (aparatos que transforman energía mecánica en energía eléctrica) y los motores eléctricos (encargados de transformar de nuevo la energía eléctrica en distintas formas de energía mecánica). Para solucionar los problemas relativos al transporte de esta energía eléctrica a largas distancias se construyeron transformadores, aparatos también basados en el fenómeno de la inducción electromagnética.

Además, la inducción electromagnética fue el punto de partida del desarrollo de una concepción unitaria de la electricidad, el magnetismo y la óptica (la llamada síntesis electromagnética de Maxwell), que llevaría a cambiar radicalmente nuestra concepción de la naturaleza.

Bloque: ÓPTICA.**NATURALEZA DE LA LUZ.**

La cuestión sobre cuál es la naturaleza de la luz ha supuesto un problema desde la antigüedad hasta las primeras décadas del siglo XX.

Ya entre los griegos se pueden encontrar dos ideas contrapuestas acerca de la naturaleza de la luz, las teorías corpuscular y ondulatoria, aunque fue a mediados del siglo XVII cuando estas teorías se establecieron de forma más elaborada y sus partidarios intentaron fundamentarlas en los hechos experimentales conocidos.

La **hipótesis corpuscular**, desarrollada por el influyente Isaac Newton, establece que la luz está constituida por diminutas partículas, “corpúsculos”, de distintos tamaños según su color, que salen de la fuente de luz en todas direcciones y se propagan según las leyes de la mecánica con enorme rapidez. Este modelo se apoyaba en el hecho de que no se conocían fenómenos de interferencia o difracción luminosa, fenómenos típicamente ondulatorios. Explica los fenómenos de reflexión y refracción de la luz; al explicar la refracción se concluye que la velocidad de la luz es mayor en medios más densos que el aire. Una dificultad teórica del modelo es que precisa suponer la existencia de infinitos tipos de partículas distintas (hay infinitos colores diferentes).

La **hipótesis ondulatoria**, desarrollada por Christian Huygens, establece que la luz es una onda mecánica longitudinal de alta frecuencia que se propaga por el “eter”, un medio que todo lo llena, incluyendo el vacío, puesto que la luz también se propaga en él. La no existencia de evidencia experimental alguna sobre el “eter” o sobre los fenómenos de difracción o interferencia luminosa son sus principales dificultades (no obstante, se aduce que la difracción y la interferencia de la luz no se observan debido a la pequeñez de la longitud de onda de la luz). También explica los fenómenos de reflexión y refracción de la luz, pero al explicar la refracción se concluye que la velocidad de la luz es menor en medios más densos que el aire, lo que contradice la predicción de la hipótesis corpuscular.

La teoría corpuscular de la luz dominó hasta principios del siglo XIX, cuando el descubrimiento de fenómenos de interferencia y difracción luminosa y de polarización de la luz, revalorizó a la teoría ondulatoria: la luz presentaba naturaleza ondulatoria pero se trataba de ondas transversales (y no longitudinales, como pensaba Huygens). La comprobación en 1850 de que la velocidad de propagación de la luz en medios más densos que el aire (como el agua o el vidrio) era menor, dio el respaldo definitivo a la teoría ondulatoria y acabó con los pocos seguidores que todavía le quedaban a la teoría corpuscular.

En la segunda mitad del siglo XIX, James Clerk Maxwell predijo la existencia de ondas electromagnéticas y dedujo su velocidad de propagación en función de las características eléctricas y magnéticas del medio. La coincidencia entre el valor de la velocidad para la luz y para la onda electromagnética le llevó a afirmar que la luz era un tipo más de onda electromagnética de alta frecuencia, integrando la Óptica como una parte del Electromagnetismo (hecho conocido como síntesis electromagnética de Maxwell).

A principios del siglo XX, cuando estaba clara la naturaleza ondulatoria electromagnética de la luz, nuevos experimentos en que la luz interactuaba con la materia (cuando era emitida o absorbida por los cuerpos), llevaron a reconsiderar la teoría corpuscular. Por ejemplo, para explicar el efecto fotoeléctrico (emisión de electrones por una superficie metálica expuesta a la luz), Albert Einstein volvió a considerar la luz como un chorro de diminutos corpúsculos llamados ahora fotones, de energía cuantizada, directamente proporcional a la frecuencia ν de la onda luminosa: $E = h \cdot \nu$, donde h es la constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s).

A la vista de estos hechos, debe considerarse que la luz tiene una naturaleza dual.

La naturaleza de la luz es dual. Su naturaleza ondulatoria (onda electromagnética transversal de alta frecuencia) se pone de manifiesto al propagarse y en fenómenos de difracción, interferencia,... Su naturaleza corpuscular (flujo de fotones de energía cuantizada) se evidencia al interactuar con la materia, en los fenómenos de emisión y absorción de luz (efecto fotoeléctrico, espectros atómicos discontinuos,...).

La naturaleza dual de la luz, ondulatoria en unos fenómenos y corpuscular en otros, en principio insólita, se comprendió por completo en la segunda década del siglo XX, cuando algunos experimentos demostraron que, a escala atómica, la contraposición excluyente onda-partícula carece de sentido. A esa escala, ambas realidades parecen manifestarse indistintamente, suponiendo que toda partícula en movimiento lleva asociada una onda (esto quedó plenamente confirmado en 1927, cuando se llevaron a cabo experimentos de difracción de electrones).

LEYES DE LA REFLEXIÓN Y LA REFRACCIÓN.

POTENCIA Y DISTANCIAS FOCALES DE UNALENTE.

Una lente es un sistema óptico centrado formado por la asociación de dos superficies transparentes, de las que al menos una es esférica, que limitan un medio transparente y en donde se produce refracción de la luz. Si, además, su grosor es despreciable en comparación a los radios de curvatura de las superficies, la lente es delgada (*figura 1*; esto implica que podemos tomar los puntos A y B del dibujo como un solo punto O, el centro óptico o vértice de la lente).

Las lentes pueden ser convergentes o convexas, si tienen la propiedad de hacer converger los rayos luminosos (son más gruesas en el centro que en la periferia, siempre que el índice de refracción de la lente sea mayor que el del medio que la rodea), o divergentes o cóncavas, en caso contrario.

Las lentes delgadas tienen múltiples usos en la vida cotidiana, solas o asociadas a otros sistemas ópticos: en lupas, gafas graduadas, telescopios refractores, objetivos de cámara, prismáticos, etc.

En una lente delgada se distingue:

- El **foco imagen** (F'). Es el punto del eje principal de la lente donde se forma la imagen de un punto objeto situado en el infinito. Si el rayo incidente es paralelo al eje principal, el rayo refractado en la lente (o su prolongación) pasa por el foco imagen.
- El **foco objeto** (F). Es el punto del eje principal de la lente cuya imagen se forma en el infinito. Si el rayo incidente (o su prolongación) pasa por el foco objeto, el rayo refractado sale de la lente paralelo al eje principal.

Se llama distancia focal imagen (f') a la distancia a la que se encuentra del vértice de la lente (O) el foco imagen (F'). Se observa que f' es positiva para lentes convergentes y negativa para lentes divergentes.

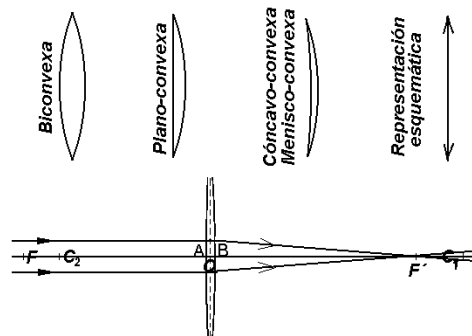
Se llama distancia focal objeto (f) a la distancia a la que se encuentra del vértice de la lente (O) el foco objeto (F). Haciendo uso de la ecuación fundamental de las lentes delgadas: $\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}$; se demuestra que: $f = -f'$.

Se define la potencia o convergencia (P) de una lente como la inversa de la distancia focal imagen y se mide en el SI en dioptrías ($1 D = 1 m^{-1}$). Haciendo uso de la fórmula del fabricante de lentes delgadas para su uso en el aire: $P = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$, donde n es el índice de refracción de la lente y r_1 y r_2 son los radios de curvatura de la primera y segunda cara de la lente. Dado el signo de f' , la potencia de una lente convergente es positiva, y la de una lente divergente es negativa.

En el caso particular de lente simétrica (biconvexa o bicóncava) se cumple: $r = r_1 = -r_2$, con lo que:

$$P = \frac{1}{f'} = \frac{2 \cdot (n-1)}{r}$$

LENTE CONVERGENTES, CONVEXAS O POSITIVAS



LENTE DIVERGENTES, CÓNCAVAS O NEGATIVAS

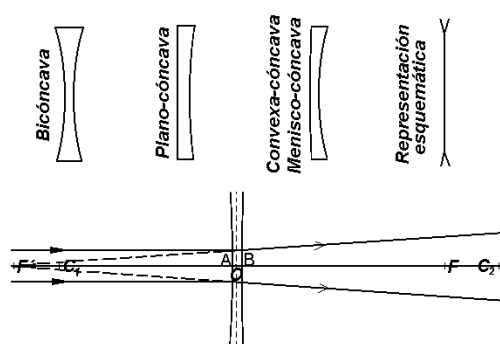


Figura 1

Bloque: INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA MODERNA.**RELATIVIDAD ESPECIAL. POSTULADOS.**

Un problema fundamental en Física a finales del siglo XIX era que las leyes del electromagnetismo variaban al cambiar de sistema de referencia, violándose el principio de relatividad de Galileo, que era la base de la mecánica de Newton. Así, observadores en movimiento relativo obtendrían diferentes resultados al estudiar los fenómenos electromagnéticos.

Para conciliar las leyes del electromagnetismo y las leyes de la mecánica newtoniana, Albert Einstein enuncia en 1905 su Teoría Especial (o Restringida) de la Relatividad, que se basa en los dos postulados siguientes:

1° Principio de relatividad: Todas las leyes de la Física deben ser las mismas en los sistemas de referencia inerciales, es decir, para observadores diferentes que se mueven con velocidad constante unos respecto de otros.

Este postulado implica que ninguna experiencia física puede distinguir un cuerpo en reposo de un cuerpo en movimiento rectilíneo uniforme. Pero además, dado que las leyes que describen los fenómenos físicos (mecánicos o electromagnéticos) no cambian al pasar de un observador inercial a otro, lleva a la necesidad de un segundo postulado probado experimentalmente.

2° Principio de constancia de la velocidad de la luz: La velocidad de la luz (y de cualquier otra onda electromagnética) presenta un valor absoluto en cualquier sistema inercial, independientemente del movimiento relativo entre la fuente emisora de radiación y el observador.

La velocidad de la luz en el vacío es una constante universal, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, y constituye una velocidad máxima que no se puede superar.

La aplicación conjunta de estos postulados conduce a algunas conclusiones (aparentemente absurdas, aunque en perfecta armonía con los datos experimentales de los que disponemos) que nos obligan a cambiar las concepciones clásicas de espacio, tiempo, masa y energía:

– El espacio y el tiempo no son magnitudes independientes, absolutas y universales, sino medidas relativas y ligadas entre sí que varían según la velocidad del observador respecto al fenómeno observado.

Cada observador mide sus propios espacios y tiempos, de forma que:

- El espacio medido por un observador en movimiento respecto al fenómeno observado es menor que el medido por un observador en reposo (contracción del espacio).

- El tiempo medido por un observador en movimiento respecto al fenómeno observado es mayor que el medido por un observador en reposo (dilatación del tiempo). Esto implica que dos sucesos simultáneos para un observador pueden no serlo para otro.

– La masa medida por un observador en movimiento respecto al fenómeno observado es mayor que la medida por un observador en reposo. Este hecho explica que nada material pueda alcanzar la velocidad de la luz; solamente entes sin masa, como los fotones, pueden moverse a esa velocidad límite.

– La masa y la energía son equivalentes, son manifestaciones de una misma cosa, lo que lleva a que el conjunto masa-energía de un sistema cerrado debe conservarse. Atendiendo al principio de equivalencia masa-energía, $E = m \cdot c^2$, una pequeña variación de masa (un defecto o disminución, como ocurre en la fisión y fusión nuclear) implica una inmensa variación de energía (una liberación, siguiendo el ejemplo).

Las conclusiones que se derivan de la Teoría Especial de la Relatividad son sorprendentes, pero no afectan a nuestra vida cotidiana, pues su ámbito de aplicación es el mundo de las velocidades próximas a la de la luz (incluso a las elevadas velocidades de las naves en órbita, los efectos relativistas son mínimos).

CONCEPTO DE FOTÓN. DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO.

Para explicar ciertos fenómenos de emisión y absorción de luz por la materia, entre ellos el efecto fotoeléctrico, Albert Einstein retomó en 1905 la teoría corpuscular de la naturaleza de la luz. Supuso que la energía de la radiación electromagnética no era continua sino discreta, de modo que una onda electromagnética de frecuencia ν , se podía considerar compuesta por cuantos o corpúsculos que viajan a la velocidad de la luz, cada uno de los cuales posee una energía $E = h \cdot \nu$ (donde h es la constante de Planck, de valor $6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s) y un momento lineal $p = E/c = h/\lambda$. A estos cuantos se les llamó fotones.

La teoría de Einstein no invalida la teoría electromagnética de la luz. La física moderna tuvo que introducir la dualidad onda-corpúsculo, admitiendo que la luz posee simultáneamente cualidades ondulatorias y corpusculares. Cuando la luz interactúa con la materia se comporta como un chorro de partículas (fotones) con energía y momento lineal; cuando se propaga o sufre fenómenos de difracción o interferencia, la luz se comporta como una onda caracterizada por su longitud de onda en el vacío o por su frecuencia.

Más tarde, Louis de Broglie propuso, por razones de simetría, que la materia también presenta la dualidad onda-corpúsculo, de forma que cualquier partícula tiene asociado un momento lineal (aspecto particular) y una longitud de onda (aspecto ondulatorio), relacionadas por la expresión: $\lambda = h/p$. La longitud de onda asociada es pequeñísima a escalas macroscópicas, de forma que el carácter ondulatorio de la materia sólo se manifiesta al nivel microscópico.

La propuesta de De Broglie fue confirmada experimentalmente por Davisson y Gemen en 1927, al observar la difracción e interferencia de electrones. El comportamiento ondulatorio del electrón se aprovecha en el microscopio electrónico para obtener imágenes de objetos inaccesibles.

PRINCIPIO DE INDETERMINACIÓN.

El principio de indeterminación o de incertidumbre, formulado por Heisenberg en 1927, afirma que no se puede conocer simultáneamente y con precisión arbitraria ciertos pares conjugados de magnitudes físicas de un objeto, como por ejemplo la posición y la velocidad, o la energía y el tiempo. Formalmente, las relaciones de indeterminación se enuncian así:

El producto de las indeterminaciones en la medida de la posición y del momento lineal de una partícula es, como mínimo, igual a la constante de Planck dividida por 2π .	$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$
El producto de las indeterminaciones en la medida de la energía y del tiempo de una partícula es, como mínimo, igual a la constante de Planck dividida por 2π .	$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$

Implica que cuanto mayor es la precisión con que se mide una magnitud del par, menor es la precisión con la que se puede medir la otra. El principio no prohíbe la medida exacta de alguna de las variables por separado, sino de ambas simultáneamente.

El principio de indeterminación establece un límite fundamental que no tiene que ver con limitaciones técnicas del instrumento de medida ni con errores experimentales, sino que es inherente a la propia naturaleza y no puede evitarse de ninguna manera. Es una consecuencia de la dualidad onda-corpúsculo y de la interacción inevitable entre el observador y el fenómeno observado.

El valor de la constante de Planck, h , es tan pequeño que el principio de indeterminación sólo tiene importancia a escala atómica y subatómica. Para las medidas a escala macroscópica las desigualdades anteriores no suponen en la práctica ninguna restricción, con lo que funciona a la perfección la mecánica clásica.

Tampoco se debe pensar que el principio de incertidumbre hace de la mecánica cuántica una teoría imprecisa. Por el contrario, su consideración en el micromundo permite cálculos precisos de las energías de los estados electrónicos de los átomos, los tiempos de vida media de los isótopos radiactivos,...

TIPOS DE RADIACIONES NUCLEARES.

Existen tres tipos de radiaciones nucleares, cuyas características diferenciadoras se muestran en el cuadro adjunto:

<i>Características de las radiaciones alfa, beta y gamma</i>			
Tipo de radiación	Partículas α	Partículas β	Fotones γ
Naturaleza	iones He^{+2} ($2p + 2n$)	electrones rápidos	electromagnética
Carga	+ 2 e	-1 e	(sin carga)
Velocidad (habitual)	0,1c	Hasta 0,9c	c
Energía (habitual)	10 MeV	De 0,03 a 3 MeV	1 MeV
Efecto ionizante	$\approx 10^5$ pares iónicos/mm en aire	$\approx 10^3$ pares iónicos/mm en aire	≈ 1 pares iónicos/mm en aire
Poder de penetración y detención <i>(valores orientativos; dependen de la velocidad (en las α y β) o de la frecuencia (en las γ)).</i>	1	100	10.000
Efecto del campo eléctrico			
Efecto del campo magnético			

Radiación alfa (α) Está constituida por partículas alfa, que son núcleos de helio formados por dos protones y dos neutrones, ${}^4_2He^{+2}$. Se producen al desintegrarse un núcleo padre en un núcleo hijo que posee dos neutrones y dos protones menos. Las partículas alfa tienen carga eléctrica positiva y penetran muy poco en la materia.

Radiación beta (β). También está formada por partículas, en este caso electrones rápidos. Estos electrones no proceden de la corteza sino de la desintegración de neutrones del núcleo: un neutrón de un núcleo padre origina un electrón, un protón y otra partícula sin carga llamada antineutrino. El núcleo hijo posee, por tanto, un protón más y un neutrón menos. La radiación beta posee carga negativa y su poder de penetración es mayor que el de las partículas alfa.

Radiación gamma (γ). Es de naturaleza electromagnética; está formada por fotones. Se produce porque los núcleos pueden estar en diferentes estados energéticos. Cuando un núcleo pasa de un estado excitado a otro de menor energía, se emite un fotón de alta frecuencia. Como los fotones no tienen carga, la radiación gamma no sufre desviación al atravesar un campo eléctrico o magnético. La radiación gamma es la que mayor poder de penetración tiene.

INTERACCIONES FUNDAMENTALES.

Todas las fuerzas de la naturaleza se reducen a cuatro interacciones fundamentales. De mayor a menor intensidad:

- **Interacción nuclear fuerte:** Es de muy corto alcance (no se aprecia fuera del núcleo). Es fundamental para la estabilidad de la materia, dado que es la responsable de que los quarks, componentes básicos de los protones y neutrones, estén fuertemente unidos en el núcleo, venciendo la repulsión electrostática. También es responsable de la energía producida en el interior del Sol y de las demás estrellas.

<i>Interacciones fundamentales</i>		
<i>Interacción</i>	<i>Intensidad relativa</i>	<i>Alcance (m)</i>
Fuerte	1	10^{-15}
Electromagnética	10^{-3}	∞
Débil	10^{-16}	10^{-17}
Gravitatoria	10^{-41}	∞

- **Interacción electromagnética:** Es de largo alcance. Actúa sobre partículas cargadas eléctricamente y puede ser atractiva o repulsiva. Responsable de las fuerzas entre el núcleo atómico y la nube electrónica, mantiene unidos a los átomos en las moléculas y da lugar también a las interacciones entre moléculas. Las fuerzas de van der Waals y demás no son sino el resultado de complejas interacciones electromagnéticas. En definitiva, la interacción electromagnética es la responsable de la enorme variedad existente de reacciones químicas y en última instancia de todos los procesos biológicos.

- **Interacción nuclear débil:** Como la nuclear fuerte, es de muy corto alcance (no se aprecia fuera del núcleo). Entre otras cosas, es la causante de la desintegración beta de algunos núcleos atómicos y del propio neutrón, que es inestable cuando se encuentra aislado (en esta reacción nuclear, un neutrón origina un electrón, un protón y otra partícula sin carga llamada antineutrino).

- **Interacción gravitatoria:** Se produce entre todos los cuerpos. Es siempre atractiva y de largo alcance. Es la que determina la evolución del universo a gran escala, la condensación de la materia en galaxias y estrellas, el movimiento de los astros, y, a nivel del planeta Tierra, la caída de los cuerpos hacia la superficie, las mareas, etc.