

Introducción a la Física Moderna

José Luis García Luna
Oscar Robles Vásquez
Mario Flores Pérez
Luis Navarrete Navarrete



Introducción a la Física Moderna



Introducción a la Física Moderna

José Luis García Luna
Oscar Robles Vásquez
Mario Flores Pérez
Luis Navarrete Navarrete



Introducción a la Física Moderna. **Autores:** José Luis García Luna, Oscar Robles Vásquez, Mario Flores Pérez y Luis Navarrete Navarrete— Guadalajara, Jalisco. 2025.

Publicación electrónica digital: descarga y *online*; detalle de formato: EPUB.

ISBN: **978-607-8964-32-1**

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE20258610>



Primera edición

D. R. © copyright, 2025. José Luis García Luna, Oscar Robles Vásquez, Mario Flores Pérez y Luis Navarrete Navarrete

Edición y corrección: **Astra Ediciones**



Todos los contenidos de esta obra se comparten bajo la licencia Creative Commons Atribución/Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional ([CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)). Esto implica que no está autorizado el uso comercial de la obra original ni de las eventuales obras derivadas, las cuales deberán distribuirse bajo la misma licencia que rige la obra original. No obstante, se permite a terceros compartir el contenido siempre y cuando se reconozca debidamente la autoría y la publicación original en esta editorial.

HECHO EN MÉXICO | MADE IN MEXICO

Contenido

Capítulo 1. Propiedades de la luz	1
1.1 Introducción	1
1.2 Radiación del cuerpo negro	1
1.3. Cuantización de la energía	4
1.4 Efecto fotoeléctrico	6
Capítulo 2. Naturaleza de la materia	1
2.1 Introducción	1
2.2 Descripción de la onda de de Broglie	2
2.3 Experimento de la doble rendija con fotones	4
2.4 Principio de incertidumbre de Heisenberg	5
2.5 Transformadas de Fourier	6
2.6 Otras formas del principio de incertidumbre	7
Capítulo 3. Introducción a la mecánica cuántica	1
3.1 filosofía y mecánica cuántica	1
3.2 Postulados de la mecánica cuántica	2
3.3 Partícula en una caja	4
3.4 Pozo finito de potencial	6
3.5 Efecto túnel	7
3.6 Oscilador armónico	8
Capítulo 4. Teoría especial de la relatividad	1
4.1 Los postulados de la relatividad	3
4.2 La relatividad del tiempo	4
4.3 La relatividad de la longitud	4
4.4 La suma relativista de las velocidades	5
4.5 Las transformaciones de Lorentz	6
4.6 Medición de las coordenadas espacio-tiempo en un suceso	7
4.7 Consecuencias de la transformación de Lorentz	8
4.8 La relatividad de la simultaneidad	8
4.9 El corrimiento Doppler	9
4.10 La paradoja de los gemelos	10
4.11 La relatividad de la longitud	10
Capítulo 5. Partículas elementales	1
5.1 Fuerzas fundamentales	1
5.2 Breve historia de la física de partículas	2
5.3 Descubrimiento de neutrón	3

5.4 Descubrimiento del positrón	4
5.5 Aceleradores de partículas	6
5.6 Hadrones y leptones	6
5.7 Diagramas de Feynman.....	7
5.8 Neutrino y antineutrino	8
5.9 Algunos decaimientos importantes de baja energía	8
5.10 Números cuánticos.....	9
5.11 Quarks	10
5.12 El modelo estándar.....	11
 Capítulo 6. Apéndice leyes de Newton.....	1
6.1 Primera ley de Newton.....	1
6.2 Segunda ley de Newton	2
6.3 Tercera ley de Newton	3
6.4 Diagrama de cuerpo libre.....	7
 Bibliografía	13

A nuestros alumnos:

Deseamos que este manual de introducción a la Física Moderna que hemos escrito con gran aprecio, trabajo y dedicación contribuya a mejorar su aprendizaje para obtener una visión más amplia de la realidad en que viven.

Filosofía del trabajo.

En el diseño de este manual queremos transmitir el gusto por la enseñanza de la Física Moderna, y deseamos, profundamente, que nuestro esfuerzo se vea reflejado de una manera óptima en el aprendizaje del alumno. Para lograrlo debemos cumplir los siguientes objetivos:

1. Contar con un material de apoyo a los contenidos académicos y tecnológicos de la materia Introducción a la Física Moderna, que sea accesible para profesores y alumnos.
2. Incluir los contenidos y la forma de trabajarlos, a través de: el objetivo general, el contenido temático del programa, la evaluación y la bibliografía. De manera que el alumno conozca la manera de trabajar, cuáles son los criterios de evaluación y cuáles, los apoyos con que cuenta para tener un desempeño excelente.
3. Incluir en el manual las actividades y tareas que se efectuarán a lo largo del curso, con el fin de que el alumno cuente con el listado de actividades del curso. Esto le permitirá cumplir en tiempo y forma los objetivos específicos del programa, así como argumentar, reflexionar y justificar su trabajo.
4. Diseñar las actividades y tareas con la finalidad de:
 - Propiciar que el alumno se responsabilice de su aprendizaje, obtenga una cultura de calidad en el trabajo y, que sea capaz de anticipar el resultado según sus esfuerzos. Así como tener la posibilidad de llevar a cabo acciones concretas para su mejoramiento.
 - Propiciar una actitud participativa del alumno, promoviendo el intercambio de ideas, opiniones y experiencias durante la clase, en el trabajo colaborativo o en actividades extra clase.
 - Guiar al alumno en su proceso de reflexión, análisis, síntesis, evaluación y pensamiento crítico.
 - Por último, y como recomendación de algunos colegas que imparten la materia de física moderna, se anexa un Apéndice titulado: Leyes de Newton, como antecedente previo al curso para aquellos alumnos que toman por primera vez un curso de física moderna.

Sugerencias para el uso de este texto.

Las actividades se realizan en el salón de clase. Los ejercicios se entregarán antes del examen. Es recomendable que el alumno los conteste conforme se expongan los temas para que así, tenga la posibilidad de resolver cualquier duda oportunamente.

Los ejercicios se deberán resolver y entregar en la fecha acordada con su profesor(a). Y cada estudiante tendrá la libertad de hacer sus propias anotaciones de cada capítulo para reforzar ideas, conceptos y procedimientos.

Se recomienda elaborar una agenda, escribir las fechas de exámenes y revisarla frecuentemente para estar al tanto de los compromisos, planear las actividades, organizar el tiempo y administrar el trabajo de acuerdo a la meta que se pretenda obtener.

Capítulo 1

PROPIEDADES DE LA LUZ.

1.1 INTRODUCCIÓN

- 1864-J.C. MAXWELL-Cargas eléctricas generan campos eléctricos y magnéticos que alteran el espacio en forma indefinida
- Maxwell demostró que para el espectro electromagnético, las ondas electromagnéticas viajan a una velocidad que depende del medio. Para el aire o vacío la velocidad c de las ondas electromagnéticas es:

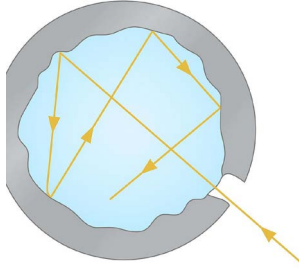
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}.$$

- Demostrado experimentalmente por Hertz en 1888.
- Estas ondas obedecen el principio de superposición.

1.2 RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO.

- Observamos la mayoría de los objetos gracias a la luz que reflejan. Pero a temperaturas muy altas, los cuerpos generan su propia luz y podemos ver que brillan en la oscuridad. La radiación emitida por un cuerpo a causa de su temperatura se llama: **Radiación térmica.** El Sol emite radiación muy cercana a la de un cuerpo negro.

- **Radiación del cuerpo negro.** (radiación de cavidad) = aquel objeto que absorbe toda la radiación que incide sobre él. A mayor temperatura mayor radiación térmica (de oscuro a blanco) y menor longitud de onda (del rojo al amarillo-naranja, al blanco brillante).



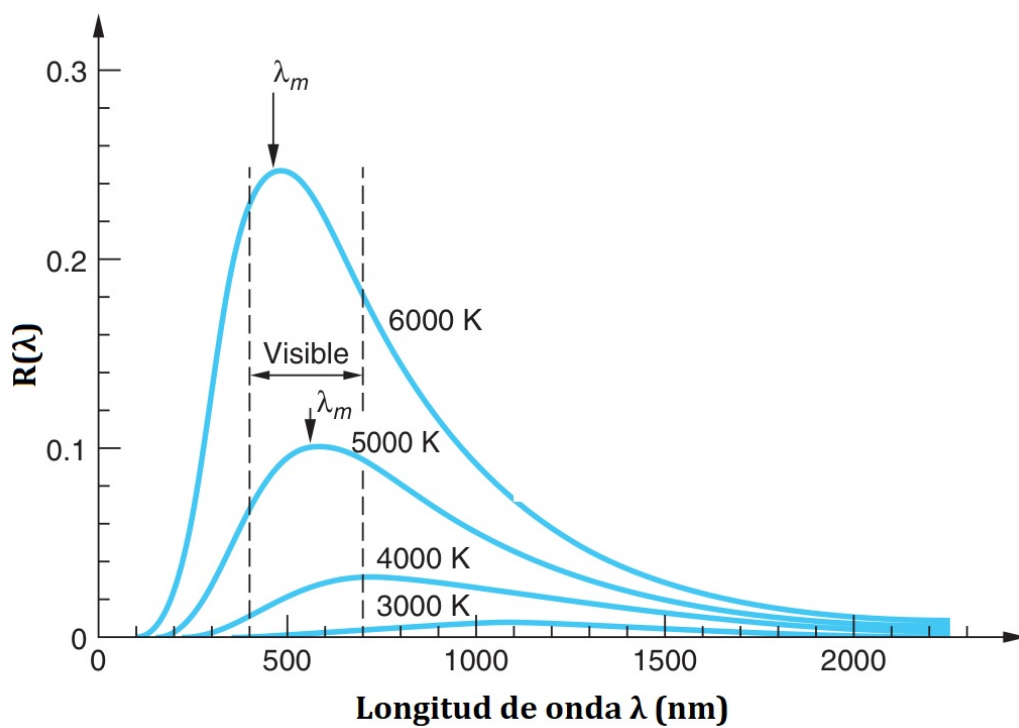
- La radiación no sólo depende de la temperatura sino del material de objeto y de su superficie. Un radiador ideal es aquel que sólo depende de su temperatura.
- Son tres las propiedades interrelacionadas con la radiación de cuerpo negro. 1. Ley de Stefan-Boltzmann, 2. La radiación espectral, 3. La ley del desplazamiento de Wien.
- **1. Ley de Stefan-Boltzmann.** El ritmo de energía total irradiado por unidad de área de la abertura de la cavidad, sumada para todas las longitudes de onda, se llama: intensidad radiante y es función de la temperatura $I(T)$ y se relaciona con la temperatura por:

$$I = \sigma T^4$$

donde $\sigma = 5.67010^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ y es una constante universal llamada constante de Stefan-Boltzmann.

- **2. La radiación espectral.** La radiancia espectral $R(\lambda)$ nos dice como varia la intensidad de la radiación de la cavidad con la longitud de onda para una determinada temperatura.
- El producto $R(\lambda)d\lambda$ da la potencia irradiada por unidad de área que se encuentra en la banda de longitudes de onda entre λ y $\lambda + d\lambda$. $R(\lambda)$ es una función de distribución estadística.

- La figura muestra la función de distribución espectral medida a diferentes temperaturas. Cuando la temperatura aumenta, la longitud de onda máxima se recorre hacia valores menores.

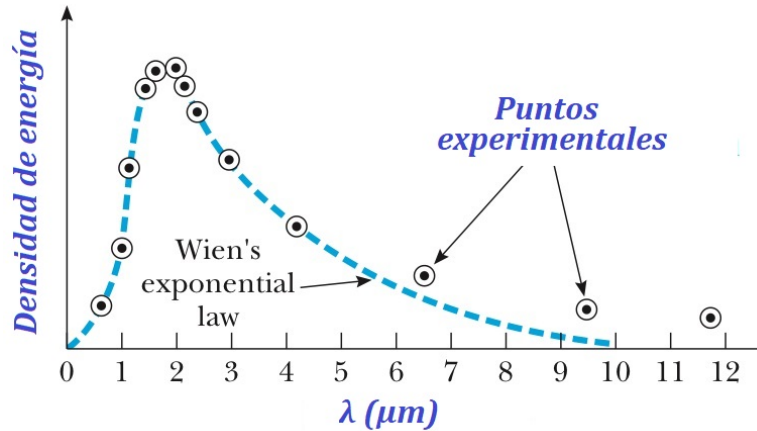


- La intensidad radiante $I(T)$ se obtiene integrando la región de longitudes de onda a una temperatura fija.

$$I(T) = \int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda$$

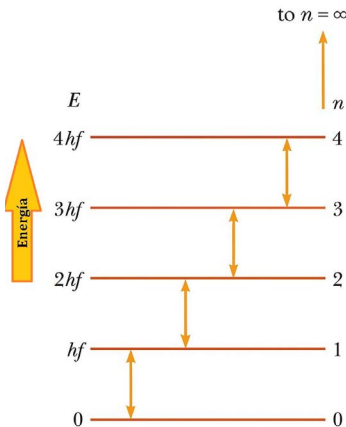
- **3. La ley del desplazamiento de Wien.** Wilhelm Wien (1864-1928) dedujo que la longitud de onda máxima en la radiancia espectral varía según $1/T$ y que el producto de la longitud de onda máxima por la temperatura es una constante universal:

$$\lambda_{max}T = 2898 \mu m \cdot K.$$



1.3 CUANTIZACIÓN DE LA ENERGÍA.

- En 1900 existían dos formulas: ley de Wien y ley de Rayleigh y Jeans. Ninguna de las dos se podía ajustar. *Catástrofe Ultra Violenta*.
- Planck supuso que los átomos se comportan como pequeños osciladores, cada uno con una frecuencia de oscilación característica: Los osciladores atómicos no deben emitir o absorber ninguna energía E sino sólo energías seleccionadas de un conjunto discreto, definidas por:



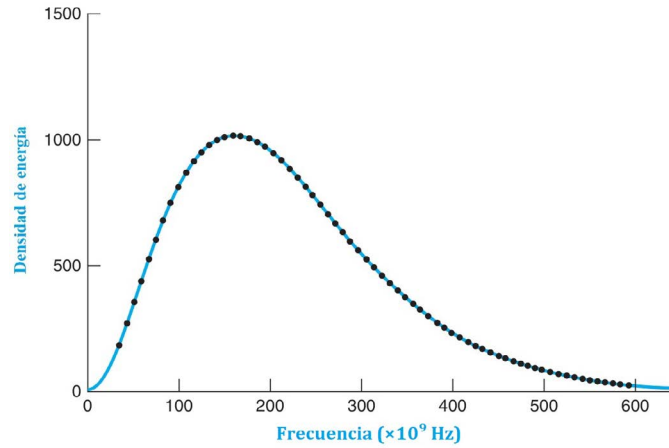
$$E = nh\nu$$

siendo ν la frecuencia de oscilación, y n un número entero llamado *número cuántico*.

- h es la famosa constante de Planck y su valor es:

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

- Max Planck realizó una interpolación entre las curvas de Rayleigh y Wien que dio por resultado el ajuste de los datos para todas las longitudes de onda.



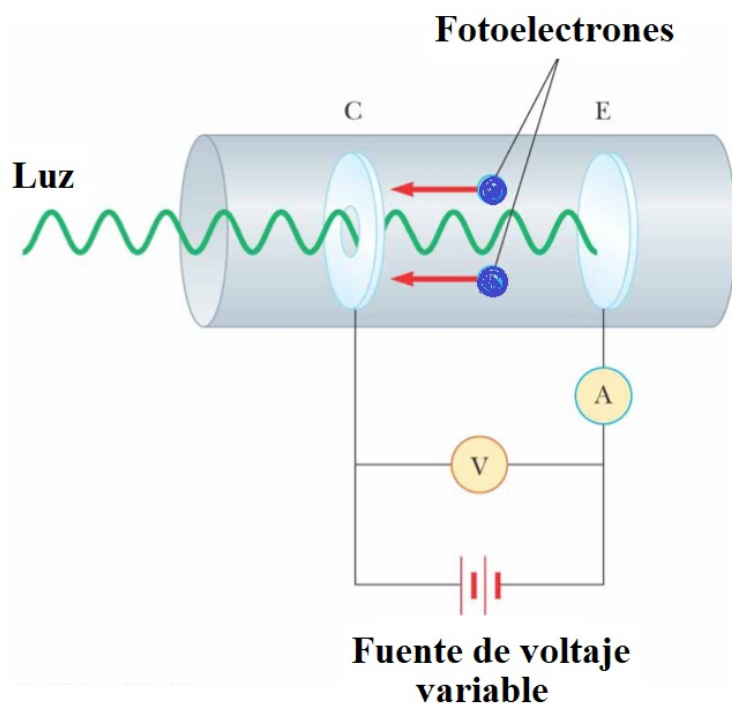
$$R(\lambda) = \frac{1\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Siendo $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ es la constante de Boltzmann y $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ es la constante de Planck.

- Segunda suposición: principio de correspondencia. La teoría cuántica debe concordar con la teoría clásica en el límite en el cual se sabe que la teoría clásica concuerda con el experimento. O bien: La teoría cuántica debe concordar con la teoría clásica en el límite de los números cuánticos grandes.
- La constante de Planck podría ser cero en lo que concierne a los sistemas clásicos y, ciertamente, una manera de reducir las fórmulas cuánticas es hacer que , $h \rightarrow 0$, en aquellas fórmulas. De manera similar, reducimos las fórmulas relativistas a sus contrapartes clásicas haciendo, $c \rightarrow \infty$.

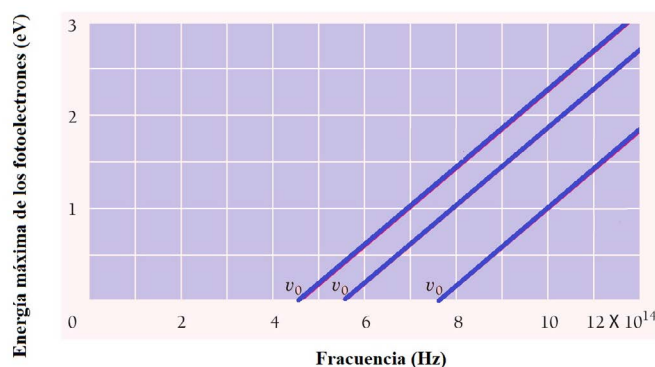
1.4 EFECTO FOTOELÉCTRICO

- Las energías de los electrones liberados por la luz dependen de la frecuencia de la luz.
- 1900-Lenard demuestra que la radiación ultravioleta arranca electrones de la superficie metálica del cátodo. A esta emisión se le conoce como *Efecto fotoeléctrico*.
- La corriente surge de los fotoelectrones emitidos por la placa negativa y recolectada en la placa positiva.



- Luz roja (o infrarroja): **700 nm** (baja frecuencia). NO ARRANCA electrones. Luz azul (o ultravioleta): **400 nm** (alta frecuencia). SI ARRANCA electrones. Una luz muy intensa también produce fotoelectrones.

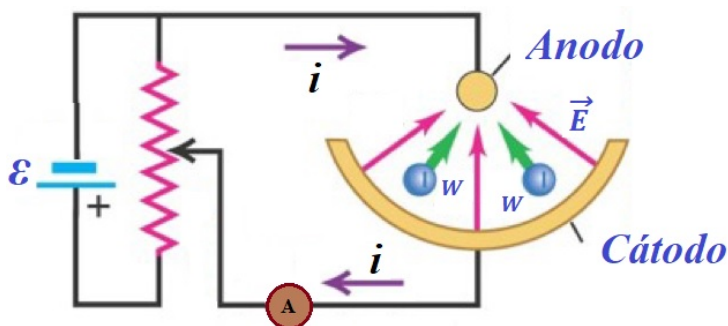
- En resumen: i) El número de fotoelectrones es proporcional a la intensidad de la luz. ii) La máxima energía cinética de los fotoelectrones depende de la frecuencia ν y no de la intensidad iii) Para cierta frecuencia $\nu \leq \nu_0$ no hay electrones arrancados. iv) La emisión de los fotoelectrones es instantánea.



- 1905-Einstein. Propone que la luz es absorbida como paquetes individuales. Cuanta = Fotones. Un paquete individual absorbido arranca un electrón (si este paquete tiene energía suficiente).
- $E = h\nu$ es mayor para el azul que para el rojo. Un fotoelectron absorbe un cuanto y pierde algo de su energía cinética máxima W al dejar el metal.

$$h\nu = \Phi + W$$

Donde Φ es la función de trabajo y es la energía suficiente para arrancar un electrón del metal. W viene a representar la energía máxima de los electrones.



- El efecto fotoeléctrico se utiliza en todo tipo de detectores de luz y cámaras digitales para convertir la luz en una señal eléctrica. Por ejemplo un amplificador (placa de micro canales) multiplica el número de electrones, que luego se utilizan para generar más fotones y una por lo tanto imagen más brillante.

EJERCICIOS

1. Cual es el máximo valor de la distribución espectral, λ_m , para la radiación de Cuerpo Negro a temperaturas: a) **8 K**, b) **110 K**, c) **30 °C**, d) **900 °C**?
2. Calcule la Potencia total emitida por un cuerpo negro de **1.6 mm²** de área a la temperatura de **1100 K**.
3. Del Sol se recibe en la Tierra con una intensidad de radiación normal de **1370 W/m²**. a) Calcule la potencia radiada por el sol. b) Calcule la temperatura de la superficie solar si la asimilamos a un cuerpo negro.
4. La temperatura humana es aproximadamente **33 °C**. ¿Cuál es la longitud de onda máxima en la radiación que esta emite si se comporta como un cuerpo negro ideal?
5. Un metal cuya función de trabajo es **1.7 eV**, se encuentra a **1.2 m** de un foco que radia **25 W**, calcule según la teoría ondulatoria el tiempo requerido para que un átomo de diámetro **1.2 angstroms**, absorba la energía necesaria para emitir un electrón.
6. Si la longitud de onda se aumenta en un experimento de efecto fotoeléctrico de **3100** a **3120** angstroms, ¿qué tanto cambio el potencial de corte?
7. La máxima energía de fotoelectrones para el **Al** es de **2.3 eV** para radiación de **200 nm** y es de **0.90 eV** para radiación de **261 nm**. Con estos datos calcule la constante de Planck y la función de trabajo del **Al**.

Capítulo 2

NATURALEZA DE LA MATERIA.

2.1 INTRODUCCIÓN

- 1924-De Broglie: Si las ondas de luz pueden actuar como partículas, entonces ¿las partículas (materia) puede comportarse como ondas? Longitud de onda de De Broglie.

La respuesta es SI y podemos emplear también las mismas ecuaciones. Un cuerpo en movimiento se comporta de cierta manera como si tuviera una naturaleza de onda.

- En general la longitud de onda de De Broglie es:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

- Para una partícula libre y clásica.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

- Una onda se caracteriza por su frecuencia angular $\omega = 2\pi f$ y su número de onda $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Por lo que la energía y el ímpetu están dados por:

$$E = \hbar\omega, \quad p = \hbar k.$$

Donde $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

- Por ejemplo: partículas con una energía cinética $K = 20\text{eV}$. Si la masa es muy grande 10^{-9} kg la longitud de onda es: $\lambda = 8.3 \times 10^{-21}\text{ m}$, muy difícil de observar sus efectos. Pero si la partícula es un electrón su longitud de onda, para esa energía, es 0.27 nm loas cuales son observables.

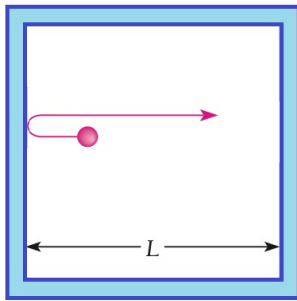
- Las propiedades de la materia como ondas Sólo las observamos cuando la masa es muy pequeña o la materia está confinada en espacios muy pequeños (electrones, átomos, ...) Estas ondas se pueden difractar o interferir tal como la luz al pasar por orificios (difracción de electrones)
- ¿ondas de qué? (Ondas de probabilidad) ψ = función de onda La probabilidad de encontrar experimentalmente el objeto descrito por ψ en el punto x , y , z y t es proporcional al valor de $|\psi|^2$ (densidad de probabilidad) en ese tiempo.
- Confirmación experimental. Un fenómeno que no tiene análogo con el comportamiento Newtoniano de las partículas es la difracción Thomas Young el cual presento un argumento fuerte para la naturaleza de las ondas de la luz visible cuando midió su longitud de onda, utilizando interferencia por una rendija doble separadas por una distancia del orden de la longitud de onda . Como aplicación se tiene el microscopio electrónico.
- La longitud de onda de un electrón, cuya energía es de **54 eV**, es de **167 pm**. Lo que sugiere que deberíamos poder usar un cristal como una rejilla de difracción para medir las longitudes de onda de Broglie de electrones con energías cinéticas de unos pocos cientos de electrón-Volts.
- En 1927 Davison y Germer confirmaron la hipótesis de De Broglie demostrando que los electrones se difractan cuando se dispersan sobre cristales de átomos ordenados.

La Figura muestra los resultados de cinco de estos experimentos. Se observa que hay un gran haz difractado para 50 grados y 54 V. Si se cambia el ángulo o el potencial de aceleración el ángulo o el PO acelerado la intensidad del haz difractado disminuye. Lo cual confirma la predicción de De Broglie.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LA ONDA DE DE BROGLIE.

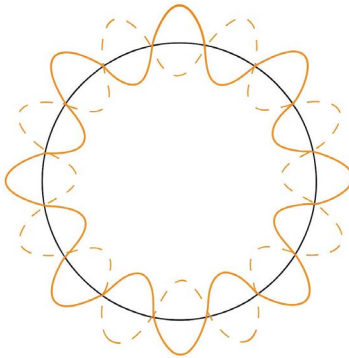
- ¿Qué tan rápido viajan las olas de Broglie? Dado que asociamos una Onda de Broglie con el movimiento de un cuerpo, esperamos que esta Onda tenga la misma velocidad que la del cuerpo.
- Si las velocidades de las ondas son las mismas, la velocidad con la que viaja el grupo de onda es la común velocidad de fase. Sin embargo, si la velocidad de fase varía las diferentes ondas individuales no proceden juntas. Esta situación se llama dispersión. Como resultado El grupo de onda tiene una velocidad diferente de las velocidades de fase de las ondas que la integran. Este es el caso con las ondas de De Broglie.

- Un grupo de ondas no necesita tener la misma velocidad que las ondas mismas. Objeto en movimiento = Paquete de ondas (grupo de ondas)
- PARTÍCULA EN UNA CAJA. Aquí la partícula se restringe sobre cierta región del espacio. El caso más simple es en una caja Paredes rígidas. Velocidad no relativa Desde el punto de vista ondulatorio la partícula atrapada en la caja es lo mismo que las ondas estacionarias.
- 1. La energía está cuantizada. 2. No existe velocidad cero ni energía cero, siempre hay movimiento. 3. Como h es tan pequeña, sólo se nota, cuando m y L son pequeños.



$$E_n = n^2 \frac{h^2}{8mL^2}$$

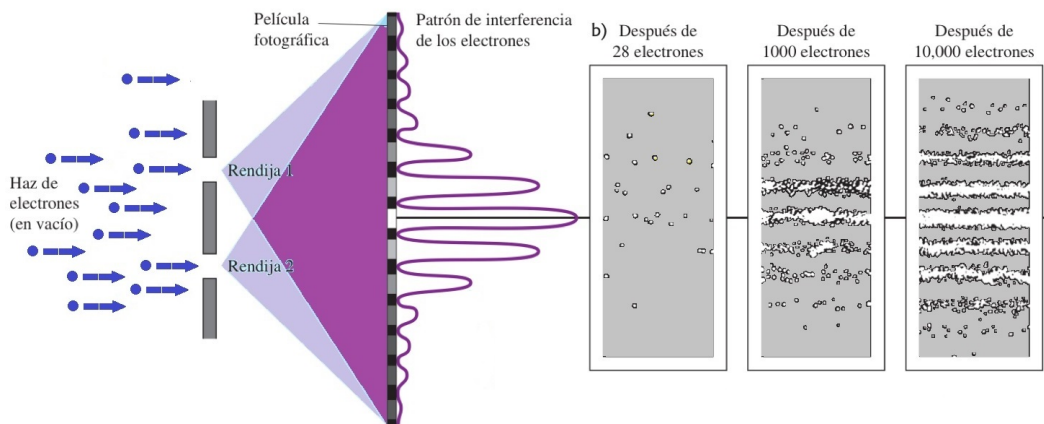
- MODELO DE BOHR. Aquí suponemos, que en el átomo de hidrógeno el electrón representa una onda estacionaria atrapada en una trayectoria circular de radio R , por lo que $2\pi R = n\lambda$. Aplicando la ecuación de De Broglie para la energía y el ímpetu, considerando la ley de Coulomb se obtiene el radio para cada nivel de energía:



con energías $E = \frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}$ y radio de las orbitas $R = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi e^2 m}$, donde $n = 1, 2, 3, \dots$

2.3 EXPERIMENTO DE LA DOBLE RENDIJA CON FOTONES.

- Experimento donde se tiene una rendija con dos orificios y se hacen pasar ondas o partículas como electrones. Obteniéndose patrones de interferencia de onda como los que se obtienen con la luz.
- INTERPRETACIÓN CLÁSICA . El patrón de interferencia se debe a la interferencia de las ondas a través de las dos rendijas sin embargo, experimentalmente se encuentra que, con una intensidad muy baja la placa fotográfica exhibe puntos microscópicos muy débiles para el ojo humano.
- La luz es absorbida en puntos bien definidos, es decir, fotones individuales. A muy bajas intensidades los fotones pasan por la rendija sin interferir. Así el patrón de interferencia es una propiedad estadística de los fotones individuales.
- INTERPRETACIÓN CUÁNTICA . El fotón se puede describir como una onda cuando pasa por las rendijas, pero se comporta como una partícula cuando actúa con la placa fotográfica. El fotón tiene un comportamiento dual (onda-partícula). *La luz actúa como onda o como partícula dependiendo como se le permita interactuar*
- CON ELECTRONES. Probabilidad (P) $P = N \text{ de } e \text{ en una caja} / N \text{ total de } e \text{ Cajas}$
Los electrones llegan al detector (como partícula). Nunca llegan dos al mis tiempo. O pasan por la rendija 1 o pasan por la 2 .



$$\textit{Probabilidad (P)} = \frac{N^{\circ} \textit{ de } e^{-} \textit{ en una caja}}{N^{\circ} \textit{ total de } e^{-}}$$

- Es imposible diseñar una aparato para determinar por cual orificio pasa el electrón sin perturbarlo lo suficiente para no destruir la interferencia.

2.4 PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG.

- Usando luz. Supongamos que miramos un electrón. Cuando uno de estos fotones rebota con el electrón (que debe suceder si queremos "ver" el electrón), se cambiará el ímpetu original del electrón. Es decir, No se puede observar un electrón sin cambiar su ímpetu.
- No se puede observar lo que sucede ya que el acto de medir al electrón puede cambiar drásticamente su movimiento.
- Si la materia, tal como los electrones, deben ser descritos por ondas $\psi(\mathbf{x}, t)$ ¿Qué implica esto realmente? ¿Cómo se mide la posición y velocidad de un electrón?
- En 1927 Werner Heisenberg propuso su principio de incertidumbre el cual expresa un límite fundamental en la precisión de las medidas.

Es imposible medir, al mismo tiempo, la posición y el momento lineal de un objeto con una precisión arbitraria. Una precisión en la posición de un objeto, $\mathbf{x}$, nos llevará a una gran incertidumbre en el momento lineal $\Delta \mathbf{p}$ y viceversa, precisión en $\mathbf{p}$ incertidumbre, $\Delta \mathbf{x}$, en la posición.

$$\Delta \mathbf{x} \Delta \mathbf{p} \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Para conocer la posición $\mathbf{X}$ con precisión se emplean ondas cortas de luz. Pero ondas cortas implican alta energía = alto ímpetu que desvía al electrón cambiando su posición.
- Un grupo de onda de De Broglie estrecho. La posición de la partícula puede determinarse con precisión, pero la longitud de onda (y, por lo tanto, la momentum de la partícula) no se puede establecer porque no hay suficientes ondas para medir con precisión.

2.5 TRANSFORMADAS DE FOURIER.

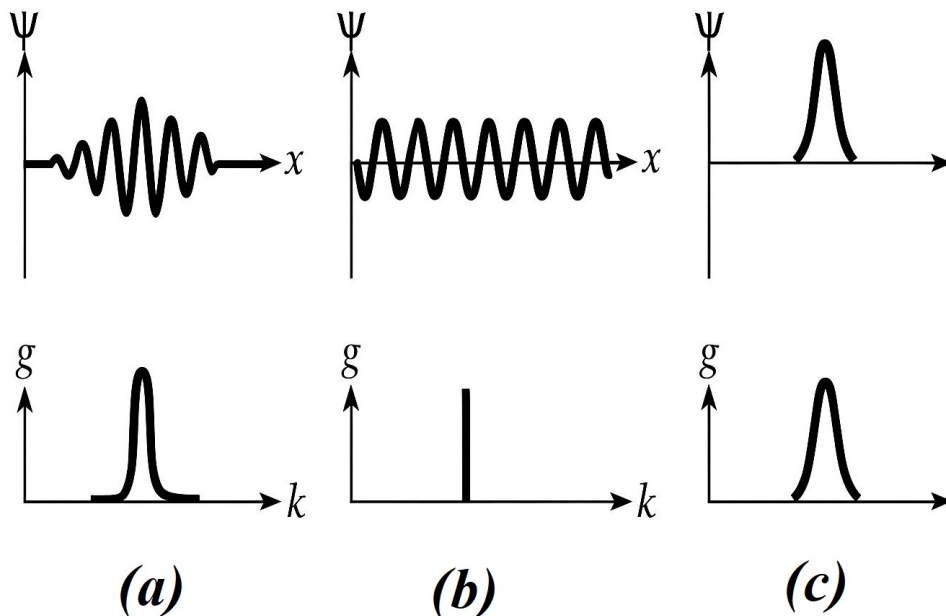
- Un objeto en movimiento corresponde a un grupo de una sola onda. También se puede pensar en un grupo de onda única en términos de la superposición de los trenes de las ondas armónicas. Sin embargo, se requiere un número infinito de trenes de ondas con diferentes frecuencias, números de ondas y amplitudes para un grupo aislado de forma arbitraria.

A un cierto tiempo t , el grupo de onda puede ser representado por la integral Fourier:

$$\psi(x) = \int_0^\infty g(k) \cos(kx) dk$$

donde la función $g(k)$ describe cómo las amplitudes de las ondas que contribuyen a $\psi(x)$ varían con el número de onda k . Esta función se llama la transformada de Fourier de $\psi(x)$, y representa al grupo de onda tal como lo representa $\psi(x)$.

La figura muestra las funciones de onda y transformaciones Fourier para (a) un grupo de onda, (b) un tren de onda, y (c) una distribución gaussiana. La transformada de Fourier de una función gaussiana también es una función gaussiana. Una breve perturbación necesita una gama más amplia de frecuencias para describirla como una perturbación de mayor duración.



2.6 OTRAS FORMAS DEL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE.

- El fotón empleado para medir al electrón también intercambia energía. Un resultado más preciso basado en la superposición de ondas nos da:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Una medición precisa de la energía (ΔE pequeña) requiere una Δt muy grande.

EJERCICIOS.

1. Encuentre la longitud de onda de Broglie asociada a un electrón cuya velocidad es 10^6 m/s .
2. Calcule la longitud de onda asociada a un protón de energía cinética 1.2 MeV .
3. En un microscopio electrónico el potencial de aceleración de los electrones es 30 kV . Encuentre el límite del poder de resolución.
4. Estime la velocidad mínima de una bola de plástico ($m = 100 \text{ g}$) confinada en una mesa de 2m de largo.
5. Cuanto tiempo se necesitará para medir la energía cinética a) de un protón de velocidad
6. Cual será la energía cinética mínima de un protón en un núcleo de $1.2 \times 10^{-14} \text{ m}$ de radio?

Capítulo 3

INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA CUÁNTICA.

La mecánica cuántica es una teoría probabilística. La mecánica cuántica no puede predecir con certeza los resultados de un experimento, pero puede predecir los promedios de los resultados de muchos experimentos idénticos.

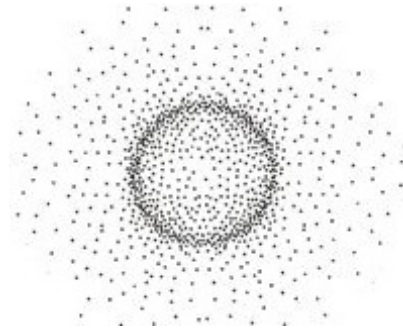
3.1 FILOSOFÍA Y MECÁNICA CUÁNTICA

- A diferencia de la mecánica clásica de Newton, la mecánica cuántica no es determinista. Esta teoría establece un conjunto de posibles eventos junto con sus probabilidades, y la naturaleza elige al azar cuál de ellos ocurre.
- La mecánica cuántica es una teoría probabilística.
- La Mecánica Cuántica no puede predecir con certeza los resultados de un experimento, pero puede predecir los promedios de los resultados de muchos experimentos idénticos.
- El principio de incertidumbre establece que no es posible conocer simultáneamente la posición ($\mathbf{X}$) y el momento lineal ($\mathbf{p_x}$) de un objeto con precisión ilimitada. Por lo tanto, no es posible predecir con exactitud su futuro, aunque sí se puede determinar la distribución estadística de sus posibles estados:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}.$$

- La teoría de Bohr no logra explicar por qué ciertas transiciones entre niveles de energía tienen mayor probabilidad de ocurrir que otras.

- Schrödinger y Heisenberg desarrollaron la mecánica cuántica moderna, la cual permitió explicar fenómenos que el modelo de Bohr no podía describir.
- En la mecánica clásica es posible medir con exactitud las magnitudes físicas. En la mecánica cuántica, el principio de incertidumbre limita la medición simultánea de ciertas magnitudes, de modo que sólo se pueden establecer probabilidades en lugar de valores exactos.
- Así la Mecánica Cuántica, no contiene el determinismo de las leyes de Newton de la mecánica clásica. La Mecánica Cuántica da el rango de posibles eventos y sus probabilidades. Pero la naturaleza decide cual de esos eventos escoger al azar.
- En el modelo de Bohr, el radio del átomo de hidrógeno, ($a = 5.3 \times 10^{-10} \text{ m}$) es un valor fijo. En la mecánica cuántica, ese valor corresponde al más probable, pero el experimento puede arrojar valores distintos dentro de una distribución estadística.



3.2 POSTULADOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

- Principio de incertidumbre: Es imposible medir simultáneamente la posición y el momento lineal de un objeto con precisión arbitraria.
- **Postulado:** La función de onda está asociada al movimiento del sistema; no posee una interpretación física directa y puede tomar valores complejos.
- **Postulado:** El cuadrado del valor absoluto de la función de onda es proporcional a la probabilidad de encontrar al objeto en un punto y tiempo determinados.

- **Postulado.** Propiedades de la función de onda:
 - a) Las derivadas parciales $d\psi/dx$, $d\psi/dy$ y $d\psi/dz$ deben ser continuas y estar bien definidas.
 - b) La función $\psi(\mathbf{x})$ debe ser continua y evaluable correctamente.
 - c) La función $\psi(\mathbf{x})$ debe ser normalizable.
- **Ecuación de Schrödinger:** Esta ecuación no se deriva de principios más fundamentales; se considera un principio básico. Es análoga a la segunda ley de Newton, pero la reemplaza en el dominio cuántico.

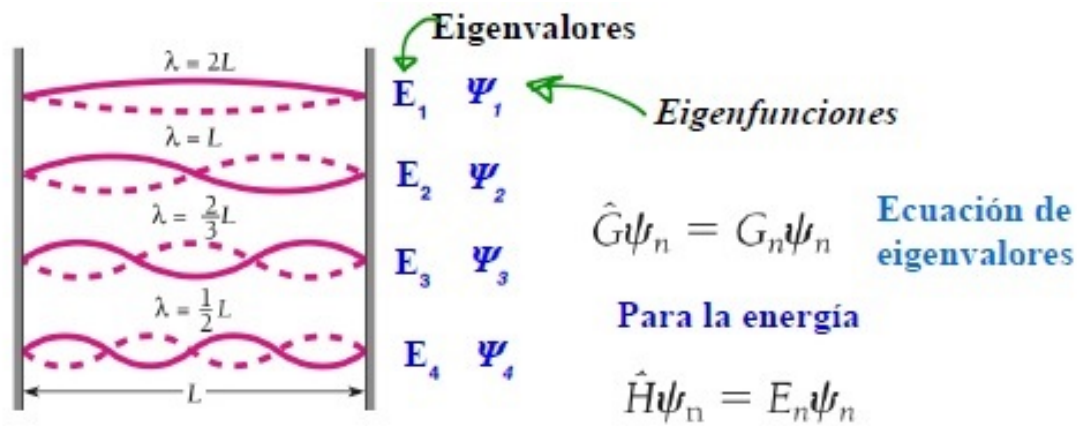
$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 z} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0$$

- Se debe plantear la ecuación de Schrödinger, en una dimensión, independiente del tiempo y en su forma no relativista.

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 x} + U\psi$$

- Una propiedad fundamental de la ecuación de Schrödinger es su carácter lineal. Esto implica que sus términos contienen a ψ y sus derivadas, sin incluir potencias ni términos independientes de ψ . Como resultado, cualquier combinación lineal de soluciones también es una solución del sistema. Superposición: Si ψ_1 y ψ_2 son soluciones, entonces $\psi = a\psi_1 + b\psi_2$ también lo es.

- **Valores de esperados:** La función de onda $\psi(x, y, z, t)$ contiene toda la información accesible sobre un sistema cuántico, de acuerdo con el principio de incertidumbre (excepto para cantidades cuantizadas). Los valores de las magnitudes físicas se obtienen en términos de probabilidades mediante los valores de expectación.



Los valores de la energía para la cual se puede resolver la ecuación de estado estacionario de Schrödinger se llaman Eigenvalores (valores propios) y las funciones de onda correspondientes se llaman eigenfunciones. Los valores discretos de los niveles de energía del átomo de hidrógeno son un ejemplo de Eigenvalores.

3.3 PARTÍCULA EN UNA CAJA

- (potencial con Paredes infinitas). Por ejemplo molécula en una caj o electrón ligado a un núcleo.

$$\psi = A \sin \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} x + B \cos \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} x$$

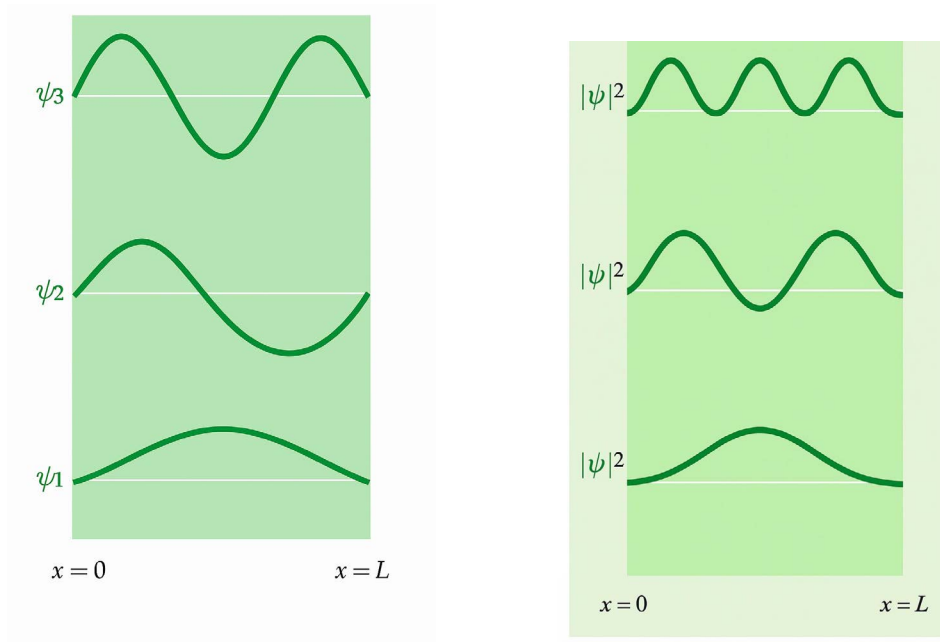
- Tomando en cuenta que la función de onda en cero fuera de las paredes. La solución de la Ecuación de Schrödinger nos da:

$$\psi_n = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi x}{L}$$

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$$

Siendo n un número que llamamos *número cuántico* y corre como $n = 1, 2, 3, \dots$. Se observa que la energía está cuantizada, lo cual es característica de la Ecuación de Schrödinger independiente del tiempo.

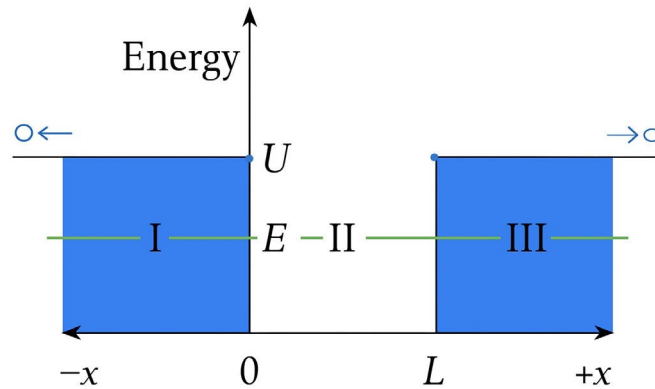
La siguiente figura muestra las primeras funciones de onda de una partícula en una caja, correspondientes a $n = 1, 2$ y 3 .



La figura de la izquierda muestra las funciones de onda y la derecha la probabilidad.

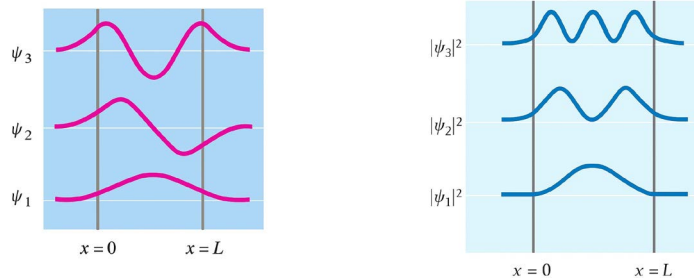
3.4 POZO FINITO DE POTENCIAL

- El pozo finito de potencial también es una caja pero con paredes finitas Esta configuración es más real ya que los potenciales infinitos no existen.
- La función de onda penetra las paredes, lo que reduce los niveles de energía.
- Las energías son más bajas que en una caja.
- La función de onda fuera del pozo tiene poca probabilidad pero ya no es cero como la caja.



- Dentro del pozo la función de onda es:

$$\psi_{II} = A \sin \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} x + B \cos \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} x$$



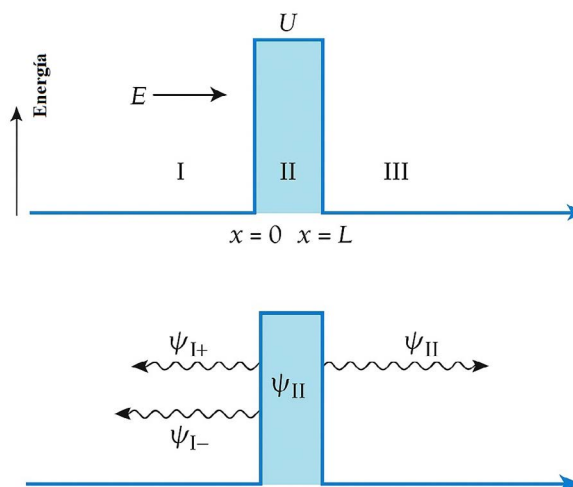
La figura muestra que existe probabilidad fuera del pozo.

3.5 EFECTO TÚNEL

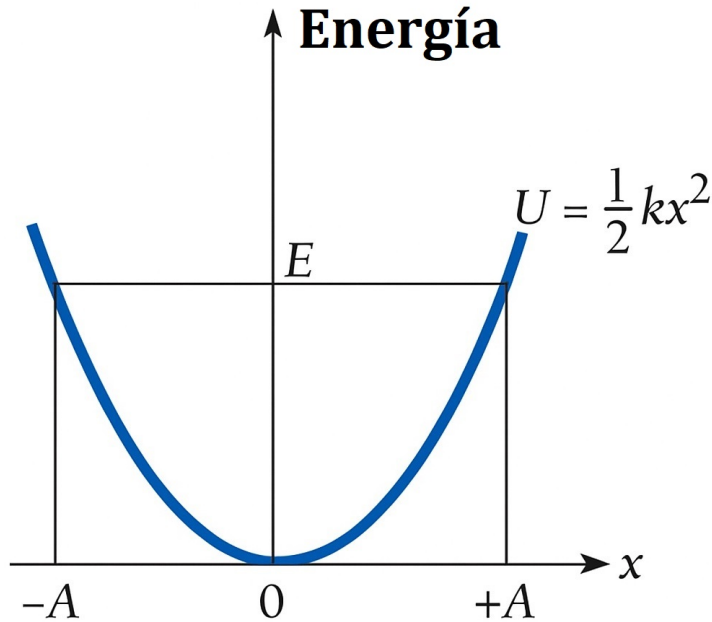
- Una partícula sin la energía para pasar una barrera potencial aún puede túnel a través de él.
- Clásicamente la partícula rebota. Cuánticamente la partícula (onda de De Broglie) se refleja pero también tiene probabilidad de atravesar la barrera de potencial.
- Ejemplos:
 1. partículas α Emitidas por desintegración de un núcleo. La partícula α tiene unos cuantos MeV . El núcleo tiene una barrera de potencial de $\approx 25 MeV$,. Tarde o temprano escapan 1 de 10^{38} .
 2. Diodos semi conductores (los e Pasan la barrerade potencial). Diodo de túnel.
 3. Microscopio de barrido (efecto túnel).
 4. Núcleos de Sol. Fusión termonuclear (los núcleosdeben superar la barrera de Coulomb).
Los protones pueden atravesar la barrera causado por su repulsión electrostática mutua.
- tem La probabilidad de transmisión es:

$$T = e^{-2kL}$$

donde $k = \frac{\sqrt{2m(U-E)}}{\hbar}$.

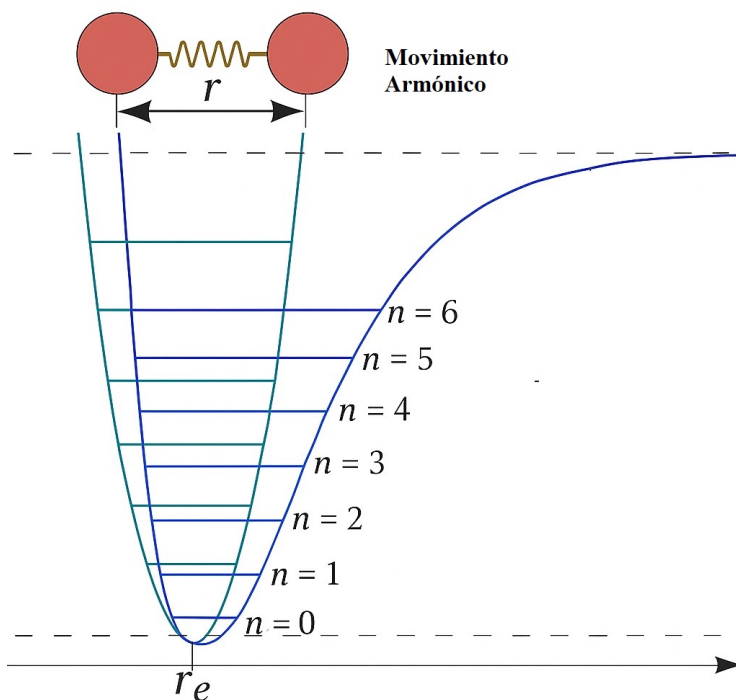


3.6 OSCILADOR ARMÓNICO



- Sus niveles de energía están uniformemente espaciados.
- Tiene lugar cuando el sistema vibra alrededor de un punto de equilibrio.
- Dado que $x = 0$ es la posición de equilibrio, $F = 0$. Para valores de x cercanos a cero x^2 , $x^3 \dots$ son muy pequeños en comparación con x , por lo que los términos terceros y más altos de la serie de Maclaurin se pueden despreciar. El único término significativo cuando x es pequeño, por lo tanto, es el segundo y si la derivada es negativa se obtiene la Ley de Hook:
- Al aplicar la mecánica cuántica se tienen las siguientes modificaciones: 1. Las energías permitidas no forman un continuo sino un espectro discreto de ciertos valores. 2. La energía más baja no es $E = 0$ sino un valor definido. 3. Hay cierta probabilidad de penetrar en el pozo de potencial.
- La energía está cuantizada y viene dada por

$$E_n = (n + 1/2)h\nu$$



EJERCICIOS.

1. Si las funciones de onda $\psi_1(x, t)$, $\psi_2(x, t)$, y $\psi_3(x, t)$, son soluciones de la ecuación de Schrödinger para un potencial $U(x, t)$, muestre que también cualquier combinación de ellas es solución.
2. Sea la función de onda para una partícula en una caja de ancho L . Calcule la probabilidad para que la partícula asociada esté dentro de una distancia $L/3$ del borde derecho de la caja. Compare este resultado con el resultado clásico.
3. Encuentre la energía más baja para una partícula alfa en una caja de $1.1 \times 10^{-14} \text{ m}$.
4. Calcule la indeterminación sobre la energía de la partícula confinada en una caja unidimensional y compárela a la energía del estado de base.
5. Cual es la energía en eV , del punto cero para un péndulo simple cuyo período es 1.1 s ?

Capítulo 4

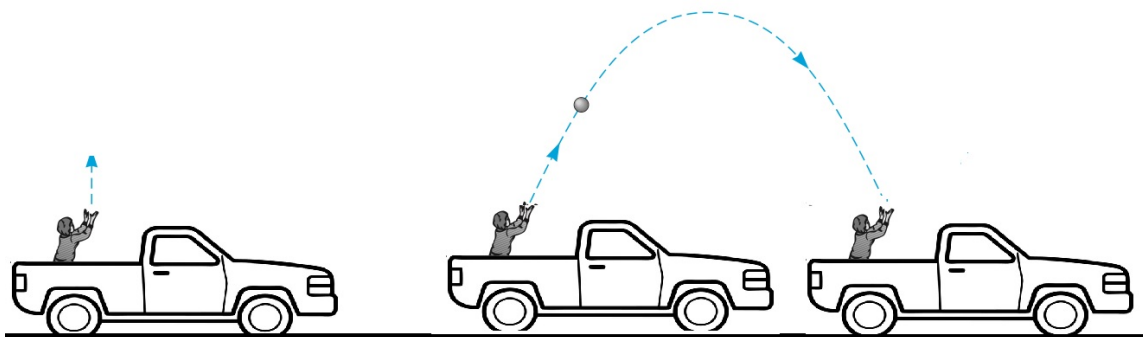
TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD.

La relatividad establece la conexión fundamental entre el espacio y el tiempo, la materia y la energía, así como entre la electricidad y el magnetismo. Estos vínculos son esenciales para comprender la estructura y el comportamiento del universo físico.

- **Sistema de referencia inercial.** Un sistema de referencia inercial es aquel en el cual se cumple la primera ley del movimiento de Newton:

“Un objeto en reposo permanece en reposo y un objeto en movimiento continúa con velocidad constante (magnitud y dirección constantes) si no actúa ninguna fuerza externa sobre él.”

Por lo tanto, cualquier sistema que se mueva a velocidad constante con respecto a un marco inercial también se considera inercial.



- **Dificultades relacionadas con el tiempo.**

Un reloj en movimiento registra el paso del tiempo más lentamente que un reloj en reposo. Un ejemplo claro es el del pión, una partícula subatómica inestable. Se observa que, cuando está en reposo, se desintegra en un tiempo promedio de **26.0 ns**. Sin embargo, un pión que se mueve con una velocidad de $v = 0.913c$ recorre en el laboratorio una distancia promedio de **17.4 metros** antes de desintegrarse. Esto implica que su tiempo de vida observado es:

$$\text{Tiempo medido} = \frac{17.4 \text{ m}}{0.913c} = 63.7 \text{ ns}$$

Este valor es mucho mayor que su vida media en reposo. Este fenómeno se conoce como dilatación del tiempo y muestra que el tiempo depende del estado de movimiento del observador.

- **Dificultades relacionadas con la velocidad.** La física clásica (newtoniana) permite suponer que un objeto puede acelerarse indefinidamente hasta alcanzar velocidades arbitrariamente grandes, lo que puede generar inconsistencias respecto a la causalidad y la velocidad de la luz.
- **Dificultades relacionadas con la longitud.** Al continuar con el ejemplo del pión:

1. Para un observador en el laboratorio, el pión recorre **17.4 metros** antes de desintegrarse.
2. Para un observador que viaja junto con el pión (y lo percibe en reposo), el tiempo de vida es el propio: **26.0 ns**. Entonces, la distancia recorrida se calcula como:

$$d = v \cdot t = 0.913c \cdot 26.0 \times 10^{-9} = 7.1 \text{ m}$$

Esto demuestra que diferentes observadores, en movimiento relativo, miden intervalos de espacio distintos, lo que contradice el concepto clásico de espacio absoluto.

- **Dificultades relacionadas con la luz.** La teoría del electromagnetismo de Maxwell describe la luz como una onda electromagnética. De forma análoga a las ondas mecánicas que requieren un medio, se pensó que la luz también necesitaba un medio de propagación llamado “éter”. Los científicos intentaron detectar este medio y medir el movimiento de la Tierra a través de él, sin éxito.
- A. Michelson y E. Morley en 1887 descubrieron que la velocidad de la luz es constante, independientemente del movimiento de su fuente o del observador. Este resultado negativo, que no detectó el hipotético "viento del éter", fue crucial para la física moderna.

- **Paradoja de Einstein.** Einstein planteó una paradoja: si un observador pudiera viajar a la misma velocidad que un rayo de luz, vería un campo electromagnético estático, lo cual contradice las ecuaciones de Maxwell, que establecen que las ondas electromagnéticas son siempre dinámicas. Einstein concluyó que no era la teoría de Maxwell la que debía corregirse, sino la forma clásica de entender el movimiento y el tiempo.

4.1 LOS POSTULADOS DE LA RELATIVIDAD.

- **Principio de relatividad.** Las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia inerciales. Esto significa que no existe un marco de referencia “privilegiado” o universal. Todos los observadores que se mueven a velocidad constante entre sí deben describir los fenómenos físicos mediante las mismas leyes fundamentales.

Este principio implica que ningún experimento físico realizado en un marco inercial puede detectar el movimiento absoluto; solo se pueden medir movimientos relativos.

- **Principio de la constancia de la velocidad de la luz.** La velocidad de la luz en el vacío tiene el mismo valor para todos los observadores inerciales, independientemente de su estado de movimiento o del movimiento de la fuente emisora. Su valor universal es:

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Este postulado contradice la intuición clásica, donde las velocidades se suman o restan según el movimiento del observador. En relatividad, la velocidad de la luz es siempre constante.

- **Consecuencia fundamental de los postulados.** A partir de estos dos principios, se concluye que es imposible acelerar una partícula con masa hasta alcanzar o superar la velocidad de la luz, sin importar cuánta energía cinética se le suministre. A medida que la velocidad de un objeto aumenta y se aproxima a c , su energía requerida tiende a infinito, lo que hace imposible superar este límite.

4.2 LA RELATIVIDAD DEL TIEMPO

- **Dilatación del tiempo.** Consideremos dos observadores: S : se encuentra en reposo sobre la superficie terrestre. S' : se encuentra dentro de un tren que se desplaza con velocidad constante u respecto al observador S . Ambos observadores llevan relojes idénticos para medir el tiempo.

El intervalo de tiempo medido por un observador que ve el reloj en movimiento es mayor que el intervalo registrado por un observador que está en reposo respecto al reloj:

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

Donde:

1. Δt_0 es el tiempo propio, es decir, el intervalo de tiempo medido por el observador para quien el evento ocurre en un único lugar (reloj en reposo).
 2. Δt es el intervalo de tiempo medido por un observador que ve el reloj moverse.
- **Conclusión:** El tiempo no es absoluto. Un reloj en movimiento “avanza más lentamente” desde la perspectiva de un observador en reposo. Por lo tanto, el tiempo depende del estado de movimiento.

4.3 LA RELATIVIDAD DE LA LONGITUD

- **Contracción de la longitud.** La longitud de un objeto medida por un observador en reposo con respecto a ese objeto se denomina longitud propia o longitud en reposo. Cuando un observador mide la longitud de un objeto que se mueve con rapidez relativa, la dimensión del objeto a lo largo de la dirección del movimiento se observa más corta.

$$L = L_0 \sqrt{1 - u^2/c^2}$$

- En otras palabras: Cuanto mayor es la velocidad del objeto, más corta es su longitud medida en la dirección del movimiento. Las dimensiones transversales (perpendiculares al movimiento) no se ven afectadas.

4.4 LA SUMA RELATIVISTA DE LAS VELOCIDADES.

- **En la física clásica (newtoniana).** Las velocidades se suman de manera lineal. Sin embargo, en el marco de la relatividad especial, esta forma de sumar velocidades ya no es válida cuando las velocidades involucradas son comparables con la velocidad de la luz.
- Ejemplo del aparato de medición del tiempo. Consideremos un aparato donde un punto P emite una partícula con velocidad $\mathbf{v}_0$. Cuando la partícula llega al punto F , se emite un destello de luz que viaja hasta el detector D .

Si el sistema estuviera en reposo, la velocidad observada sería simplemente $\mathbf{v}_0$. Sin embargo, si el aparato completo se mueve con una velocidad $\mathbf{u}$ respecto a otro observador, la velocidad resultante no puede obtenerse sumando directamente $\mathbf{u} + \mathbf{v}_0$, ya que esto violaría el límite de la velocidad de la luz.

La fórmula correcta para sumar velocidades en relatividad especial es:

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{v}_0 + \mathbf{u}}{1 + \frac{\mathbf{v}_0 \mathbf{u}}{c^2}}$$

Donde: $\mathbf{v}$ es la velocidad observada por un observador externo, $\mathbf{v}_0$ es la velocidad de la partícula según el sistema en movimiento, $\mathbf{u}$ es la velocidad del sistema respecto al observador, c es la velocidad de la luz.

Esta fórmula garantiza que, sin importar los valores de $\mathbf{v}_0$ y $\mathbf{u}$, la velocidad resultante nunca supera la velocidad de la luz.

4.5 LAS TRANSFORMACIONES DE LORENTZ

- **Necesidad de nuevas transformaciones.** Para relacionar las mediciones realizadas por dos observadores en movimiento relativo, se requieren ecuaciones que conecten sus coordenadas de espacio y tiempo. Estas ecuaciones reciben el nombre de Transformaciones de Lorentz y deben cumplir con los siguientes requisitos:
 1. Un observador S , en reposo en un marco de referencia inercial.
 2. Un observador S' , en otro marco inercial que se mueve con velocidad constante u respecto a S .
 3. Un mismo suceso observado por ambos. Cada uno registra el evento en coordenadas espaciales (x, y, z, t) para S , y (x', y', z', t') para S' .
- El objetivo es encontrar las relaciones matemáticas que permitan transformar las coordenadas de un sistema al otro, manteniendo la constancia de la velocidad de la luz.
- **Transformaciones de Galileo (clásicas).** Antes de Einstein, se utilizaban las transformaciones de Galileo, basadas en la cinemática clásica:
 - a) Son lineales.
 - b) Simples.
 - c) Son correctas a bajas velocidades.

Sin embargo, no respetan la constancia de la velocidad de la luz, por lo que dejan de ser válidas en escenarios relativistas.

- Las Transformaciones de Lorentz reemplazan a las de Galileo para describir correctamente el espacio-tiempo.
- Dado lo anterior suponemos una transformación para x' de la forma:

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

- aplicando el primer principio de relatividad, la transformación para x debe tener la forma:

$$x = \gamma(x' + ut')$$

- El segundo principio nos dice que la velocidad de la luz es la misma para ambos observadores, por lo que:

$$x = ct \text{ y } x' = ct'$$

Combinando 4 últimas expresiones y haciendo un poco de álgebra se obtiene que:

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

Donde γ se le llama factor de Lorentz.

- Por lo tanto se obtienen las ecuaciones de transformación, llamadas Transformaciones de Lorentz mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Ecuaciones de Transformación de Lorentz.

Transformación de Lorentz	Transformación inversa de Lorentz
$x' = \gamma(x - ut)$	$x = \gamma(x' + ut')$
$y' = y$	$y = y'$
$z' = z$	$z = z'$
$t' = \gamma(t - ux/c^2)$	$t = \gamma(t' + ux'/c^2)$

4.6 MEDICIÓN DE LAS COORDENADAS ESPACIO-TIEMPO EN UN SUCESO

- **Espacio y tiempo como una única entidad.** En relatividad especial, el espacio y el tiempo no son magnitudes independientes. Para describir correctamente un suceso, se deben especificar tanto sus coordenadas espaciales (x , y , z) como su coordenada temporal (t). Esto implica que no es posible usar un único reloj ubicado en una posición para medir el paso de una partícula en otra posición diferente, como se hacía en la física clásica.

Por esta razón, la relatividad especial se formula mediante el concepto de espacio-tiempo, donde el espacio y el tiempo se tratan como dimensiones equivalentes que forman una estructura unificada.

- **Transformación de velocidades.** Las Transformaciones de Lorentz permiten relacionar la velocidad de una partícula medida por un observador en un sistema de referencia S con la velocidad medida por otro observador en un sistema S' que se mueve con velocidad u respecto a S .

4.7 CONSECUENCIAS DE LA TRANSFORMACIÓN DE LORENTZ

- **Relatividad del tiempo.** Imaginemos un reloj C' fijo en la posición x'_0 en el marco S' . Para un observador S (que ve a S' en movimiento con velocidad u), este reloj se observa en movimiento.

Cuando el observador S compara las lecturas del reloj C' con dos relojes estacionarios sincronizados en su marco (relojes **1** y **2**), observa que el intervalo de tiempo medido por él ($t_2 - t_1$) es mayor que el intervalo propio medido por el reloj en reposo en S' ($t'_2 - t'_1$).

- **Conclusión:** El tiempo medido en un marco en movimiento transcurre más lentamente.

4.8 LA RELATIVIDAD DE LA SIMULTANEIDAD

- **Evento simultáneo en distintos marcos.** Supongamos que, en el marco S' , un destello de luz se emite desde un punto equidistante entre dos relojes. Dado que la luz recorre la misma distancia hacia ambos relojes, llega a ellos simultáneamente.

Sin embargo, desde el marco S (que ve a S' en movimiento), el reloj hacia el cual se mueve la fuente recibe el destello primero, y el otro después.

- Esto demuestra que dos sucesos que son simultáneos en un marco de referencia no necesariamente lo son en otro que está en movimiento relativo.
- **Conclusión general.** Si dos observadores se mueven uno con respecto al otro, no estarán de acuerdo en la simultaneidad de eventos que ocurren en lugares diferentes. La única excepción es cuando los eventos ocurren en el mismo lugar del espacio; en ese caso, todos los observadores coinciden en su simultaneidad.

4.9 EL CORRIMIENTO DOPPLER

- **Efecto Doppler clásico (sonido).** En ondas sonoras, el movimiento relativo entre la fuente y el observador genera un cambio en la frecuencia percibida:
 1. Si el observador se acerca a la fuente, la frecuencia aumenta.
 2. Si se aleja, la frecuencia disminuye.

La fórmula clásica utiliza la velocidad del sonido c_s , la velocidad de la fuente V y la velocidad del observador u .

- **Efecto Doppler relativista (luz).**

Para las ondas electromagnéticas (como la luz), no existe un medio material de propagación, por lo que el efecto Doppler depende únicamente de la velocidad relativa entre la fuente y el observador.

La frecuencia observada ν es menor que la frecuencia emitida ν_0 si la fuente se aleja:

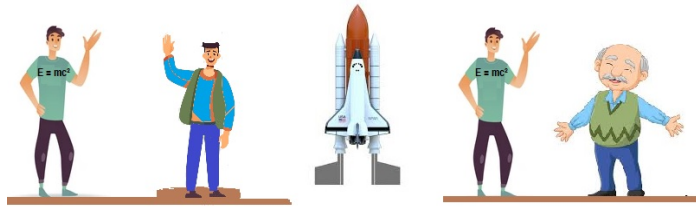
$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{u}{c}}{1 + \frac{u}{c}}}$$

- **Efecto Doppler transversal.** Este es un fenómeno puramente relativista. Ocurre cuando el movimiento de la fuente es perpendicular a la línea que la une con el observador. En este caso:
 1. No hay acercamiento ni alejamiento directo,
 2. Pero se observa un corrimiento debido a la dilatación del tiempo.
- **Interpretación mediante tics de un reloj.** Podemos considerar la fuente de luz como un reloj que emite un pulso en cada tic. Si el reloj está en movimiento, desde la perspectiva del observador los intervalos entre tics parecen más largos, por la dilatación del tiempo, lo que reduce la frecuencia medida. Este efecto representa una de las pruebas experimentales más precisas de la relatividad especial.
- **Aplicaciones tecnológicas.** Las ondas electromagnéticas utilizadas en radar y comunicaciones por radio también presentan corrimiento Doppler. La policía utiliza este efecto para medir la velocidad de vehículos, y los satélites de navegación lo utilizan para determinar posiciones en la Tierra.

- **Expansión del universo.** Las galaxias lejanas muestran sus líneas espectrales desplazadas hacia el rojo (redshift), lo que indica que se están alejando de nosotros. Este corrimiento Doppler a bajas frecuencias demuestra que el universo está en expansión.

4.10 LA PARADOJA DE LOS GEMELOS

- **Planteamiento.** Se consideran dos relojes idénticos o dos gemelos: uno permanece en la Tierra (Jane), mientras que el otro viaja al espacio a alta velocidad (Dick) y luego regresa.
- **¿Dónde está la paradoja?** Desde el punto de vista del gemelo viajero, es la Tierra la que se mueve. Sin embargo, la situación no es simétrica, ya que el gemelo viajero cambia de marco de referencia al acelerar, detenerse y regresar. Por lo tanto, cuando regresa, el gemelo viajero es más joven que el gemelo que permaneció en la Tierra.



- **Conclusión.** Este experimento mental muestra que el tiempo no transcurre al mismo ritmo para todos los observadores. A velocidades cercanas a la de la luz, la dilatación temporal se hace significativa.

4.11 LA RELATIVIDAD DE LA LONGITUD

- **Contracción relativista.** A partir de las transformaciones de Lorentz, se deduce que los objetos en movimiento se contraen en la dirección del movimiento. Para medir la longitud correctamente, se deben determinar simultáneamente las posiciones de los extremos del objeto en el sistema donde se está midiendo.
- **Ejemplo.** Si una barra tiene longitud propia L_0 en su marco de reposo S' , y un observador en S (que ve a la barra moverse con velocidad u) mide su longitud L , se cumple:

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

Esto muestra que la longitud disminuye con la velocidad.

EJERCICIOS.

1. Dos aviones se acercan uno al otro: **a)** Si la velocidad de cada uno de ellos es $0.67c$ con relación a la Tierra, ¿cuál es la velocidad de uno respecto al otro? **b)** Si la velocidad de cada uno de ellos es 44000 m/s con relación a la tierra, ¿cuál es la velocidad de uno con respecto al otro? **c)** Tomando en cuenta el inciso b ¿qué error relativo existe al emplear mecánica clásica?
2. Algunos aviones alcanzan velocidades de $3 \times 10^{-6} c$. **a)** Calcule la contracción de su longitud por metro que Ud. Desde la tierra observará en su longitud. **b)** Cuando en su reloj haya transcurrido un 5 meses ¿cuánto habrá transcurrido en el reloj del piloto?
3. Dos astronautas mellizos vuelan con destino a dos planetas distintos distantes de la Tierra de L_1 y L_2 . Ellos deben escoger sus velocidades de vuelo para que al volver a la Tierra no presenten diferencia de edad. Encuentre la relación entre v_1 y v_2 que se debe cumplir.
4. Una varilla delgada se encuentra en reposo en un sistema S y tiene longitud S_0 y está inclinada un ángulo α con respecto al eje x . Encuentre su longitud S' y el ángulo de inclinación θ' con respecto al eje x' según los mediría un observador en un sistema S' que se moviese a una velocidad v , paralela a x , con respecto a S .
5. **Teresa** desde la Tierra manda una señal cada **6 minutos** a **Pedro** que está en un planeta. **Nancy** esta montada en una nave que viaja de la tierra al planeta a una velocidad de $0.7c$ con respecto a la tierra. **a)** ¿A qué intervalo recibe **Pedro** las señales de **Teresa** ? **b)** ¿A qué intervalo recibe **Nancy** las señales de **Teresa** ?

Capítulo 5

PARTÍCULAS ELEMENTALES.

Cientos de partículas componen la materia subatómica. Una gran cantidad de ellas ya han sido descubiertas, muchas de ellas decaen rápidamente después de ser creadas (al colisionar dos partículas de alta energía). Algunas partículas son elementales como los leptones y otras están formadas por partículas elementales como los hadrones, los cuales están formados por quarks.

Familias de Partículas.

Familia	Interacción	Espín	Estructura	Ejemplo
Leptones	Débil-Electromagnética	Semi-entero	Fundamental	e, μ, ν_e
Quarks	Débil-Electromagnética-Fuerte	Semi-entero	Fundamental	u, d, s
Bariones	Débil-Electromagnética-Fuerte	Semi-entero	Compuesta	$p \quad n$
Mesones	Débil-Electromagnética-Fuerte	entero	Compuesta	$\pi^- \quad K^0$

5.1 FUERZAS FUNDAMENTALES.

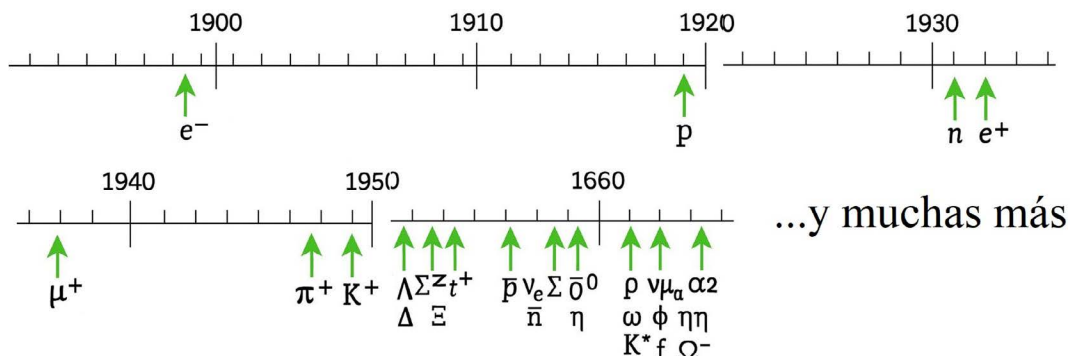
- Las cuatro interacciones fundamentales que conocemos son suficientes para describir todos los procesos y estructuras del Universo, abarcando desde átomos y núcleos hasta galaxias.

Fuerzas fundamentales.

Fuerza	Rango	Magnitud Relativa	Partículas intermediarias	Partículas afectadas
Fuerte	$\approx 10^{-15} \text{ m}$	1	Gluones	Quarks
Electromagnética	∞	$\approx 10^{-2}$	Fotones	Átomos
Débil	$\approx 10^{-18} \text{ m}$	$\approx 10^{-18}$	Bosones	Núcleos
Gravitacional	∞	$\approx 10^{-39}$	gravitones	Masa

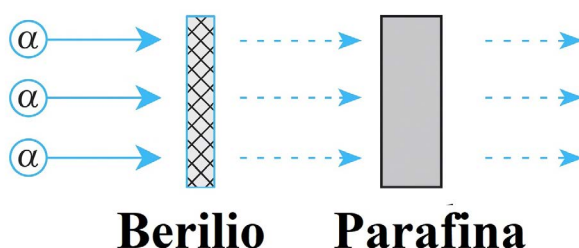
5.2 BREVE HISTORIA DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS.

- Antigua Grecia: Se propone la idea de los átomos, ¡sin evidencia experimental!
- 1804: Dalton explica aspectos de la química utilizando la idea de los átomos.
- 1869: Mendeléyev desarrolla la forma actual de la tabla periódica.
- 1895: Röntgen descubre los rayos X.
- 1896: Becquerel "descubre" la radiactividad.
- 1897: J.J. Thomson descubre el electrón β .
- 1905: Einstein demuestra que el movimiento browniano resulta de las colisiones atómicas y cuantifica la luz.
- 1907: Rutherford y Royds descubren que los átomos α son iones de $4He$.
- 1910: Rutherford, Geiger y Marsden descubren los núcleos.
- 1919: Rutherford encuentra protones en los núcleos y propone los neutrones.
- 1928: Dirac encuentra estados de energía negativos en la mecánica cuántica relativista. Significado incierto. Los estados de energía negativos deben estar llenos o los electrones caerían en ellos.
- 1932: Anderson descubre el positrón, la antipartícula del electrón.
- 1949: Feynman demuestra que el electrón se mueve hacia atrás en el tiempo = positrón. Antipartículas idénticas a partículas, excepto que los números cuánticos aditivos están invertidos. ¿Cuál descripción es correcta? Todas lo son: la misma física, descrita de forma diferente.

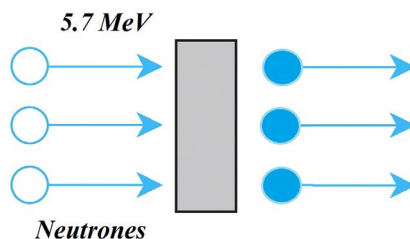


5.3 DESCUBRIMIENTO DEL NEUTRÓN.

- Chadwick utilizó la dispersión de partículas alfa para demostrar que el número atómico de un elemento corresponde a su carga nuclear. Rutherford y Chadwick propusieron la existencia de una partícula neutra como constituyente del núcleo, pero inicialmente no pudieron detectarla experimentalmente.
- En 1932, Irène Curie y Frédéric Joliot descubrieron que una misteriosa radiación podía expulsar protones con energías de hasta 5.7 MeV de una placa de parafina. Supusieron que la radiación estaba compuesta por rayos gamma, y calcularon que su energía debía ser al menos de 55 MeV, lo cual resultaba demasiado elevado para ser producida por los procesos observados.



- Chadwick propuso que dicha radiación consistía en partículas neutras con masa aproximadamente igual a la del protón. En ese caso, solo se requerían 5.7 MeV, ya que una colisión frontal entre partículas de masa similar permite la transferencia completa de energía cinética. Experimentos posteriores confirmaron su hipótesis, y Chadwick recibió el Premio Nobel en 1935 por el descubrimiento del neutrón. (Inicialmente, Chadwick no consideró al neutrón como una partícula elemental, sino como un dipolo o un protón incrustado en un electrón. La idea de que el neutrón es una partícula elemental fue propuesta por Dimitri Iwanenko.)

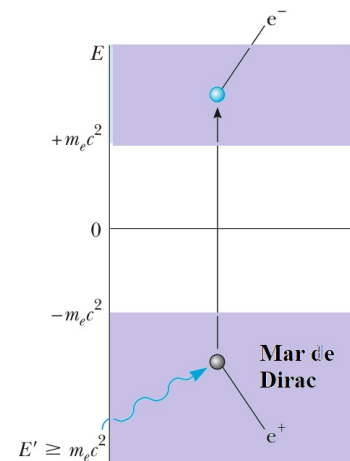


5.4 DESCUBRIMIENTO DEL POSITRÓN.

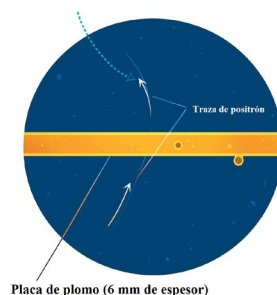
- En la década de 1920, el físico Paul Dirac desarrolló una versión relativista de la mecánica cuántica. Esta teoría explicaba el origen del espín del electrón y su momento magnético.
- La ecuación de Dirac requería soluciones de energía positiva y negativa para electrones libres, lo cual se evidencia en la expresión relativista de la energía total del electrón, que presenta raíces positivas y negativas. Se puede ver esto fácilmente en la expresión de la energía relativista total de un electrón que tiene raíces tanto positivas como negativas.

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

- Dirac propuso la existencia de positrones (antielectrones). Según su modelo, los estados con energía inferior a mc^2 están llenos de electrones (mar de Dirac). Si uno de estos electrones recibe una energía igual o mayor a $2mc^2$, puede salir de su estado, dejando un hueco que se comporta como una partícula idéntica al electrón, pero con carga positiva.



- Carl Anderson observó experimentalmente el positrón en 1932 y recibió el Premio Nobel en 1936. Detectó positrones al analizar las trayectorias de partículas cargadas positivamente en una cámara de niebla colocada en un campo magnético. Algunas trayectorias similares a las de electrones se curvaban en sentido opuesto, indicando una carga positiva.



Desde entonces, los positrones se han observado en numerosos experimentos. Una fuente habitual es la producción de pares, y el proceso inverso es la aniquilación electrón-positrón, que produce dos fotones de rayos gamma con energía total mínima de 1.02 MeV.

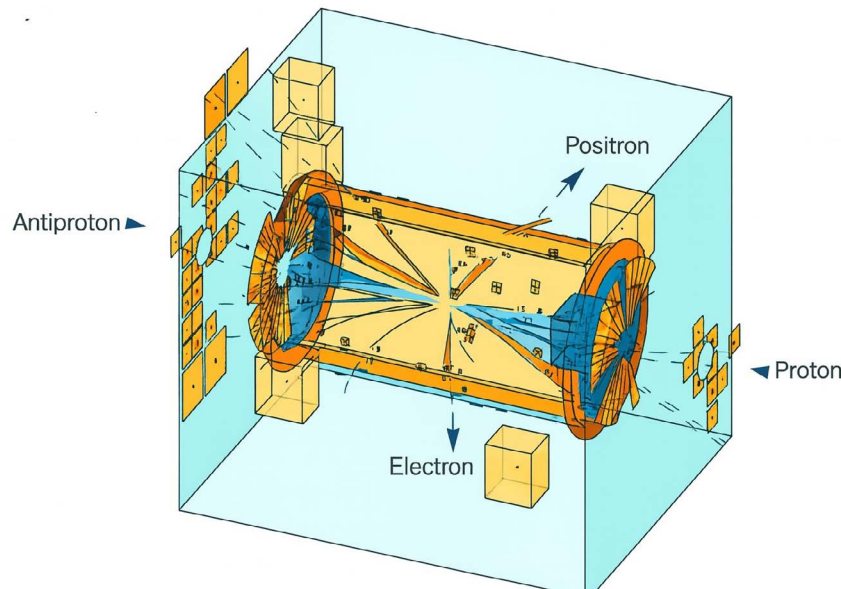
- También puede ocurrir el proceso inverso. En las condiciones adecuadas, un electrón y un positrón pueden aniquilarse entre sí para producir dos fotones de rayos gamma con una energía combinada de al menos 1.02 MeV:

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow 2\gamma$$

- Una aplicación importante de este fenómeno es la tomografía por emisión de positrones (PET), técnica médica en la que se inyecta glucosa con un radioisótopo emisor de positrones que se distribuye por el cuerpo a través de la sangre.

5.5 ACELERADORES DE PARTÍCULAS.

- La investigación en física de partículas se realiza principalmente en aceleradores donde haces de partículas inciden sobre blancos, o bien se hacen chocar dos haces de alta energía en direcciones opuestas. Estos aceleradores producen cientos de partículas.



- También es posible estudiar partículas provenientes del Universo mediante telescopios y detectores especializados.

5.6 HADRONES Y LEPTONES.

- Las partículas elementales se clasifican en leptones y hadrones, según responden (hadrones) o no (leptones) a la interacción fuerte.
- Los hadrones tienen estructura interna (1 fm) y están compuestos por quarks. Los hadrones formados por tres quarks son bariones, y los compuestos por dos quarks son mesones.
- El electrón fue la primera partícula para la cual se desarrolló una teoría cuántica satisfactoria (Dirac, 1928). Su espín es $1/2\hbar$ y su momento magnético es $eh/2m$. Esta teoría también predijo la existencia del positrón, su antipartícula.

- El barión más ligero es el protón. Se considera estable ($\tau \approx 10^{32}$ años)
- Neutrón-sólo es estable en el núcleo pero libremente es inestable ($\approx 14\text{min} - 49\text{s}$)
- Todos los bariones libres (fuera del núcleo) decaen con un tiempo de vida $\approx 10^{-19}\text{ s}$ resultando en protones y neutrones

5.7 DIAGRAMAS DE FEYNMAN.

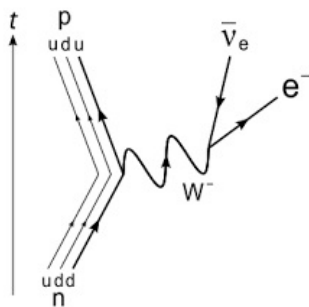
- Representan visualmente las interacciones entre partículas. Los diagramas de Feynman sirven como una herramienta gráfica y de cálculo fundamental en la física teórica y de partículas para representar y simplificar las interacciones entre partículas subatómicas.
- Un diagrama de Feynman está compuesto por elementos gráficos que representan distintos aspectos de la interacción:

Líneas rectas: Representan fermiones, como electrones o quarks. Las flechas indican el flujo del tiempo y distinguen entre partículas (hacia adelante) y antipartículas (hacia atrás).

Líneas onduladas o en espiral: Representan bosones portadores de fuerza, como los fotones (onduladas) o los gluones (espirales).

Vértices: Son los puntos donde se encuentran las líneas e ilustran las interacciones entre las partículas. En cada vértice se deben conservar las leyes de la física, como la conservación de la energía y la carga.

- Ejemplo: Se muestra en la figura el decaimiento beta del neutrón:

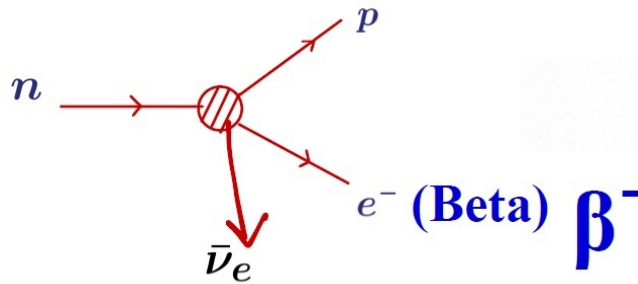


5.8 NEUTRINO Y ANTINEUTRINO (sin carga ni masa),

- En 1930, Pauli propuso la existencia del neutrino, una partícula sin carga y de masa extremadamente pequeña, para explicar ciertas leyes de conservación en los decaimientos nucleares.
- Los neutrinos: • No interaccionan electromagnéticamente, • No interaccionan por la fuerza fuerte, • No interaccionan gravitacionalmente, • Interaccionan débilmente.

5.9 ALGUNOS DECAIMIENTOS IMPORTANTES DE BAJA ENERGÍA.

- Decaimiento beta: ($n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$)



- Emisión de positrón: ($p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$)

Es un decaimiento beta positivo. Así, la desintegración beta negativa disminuye la proporción de neutrones y la desintegración beta positiva la aumenta.

- Captura electrónica ($p^+ + e^- \rightarrow n$). Un proceso que compite con la emisión de positrones es la captura por parte de un núcleo de un electrón de su capa más interna. El electrón es absorbido por un protón nuclear que de este modo se transforma en un neutrón.

5.10 NÚMEROS CUÁNTICOS.

- Los decaimientos de partículas pueden clasificarse asignándoles números cuánticos, cuyos valores se conservan. Entre ellos se encuentran la carga y el espín.
- El número leptónico y el número bariónico se conservan.

Número bariónico y número leptónico

No. Bariónico (B)		B
Barión		+1
Anti-Barión		-1
No-Barión		0

No. Leptónico (L)		L
Leptón	e^-, ν_e	+1
	$e^+, \bar{\nu}_e$	-1
Otra partícula		0

Lo mismo para el μ y el τ
 L_e, L_μ, L_τ se conservan por separado

- Por conservación de B el protón no decae ya que no hay un barión más ligero.
- El número de extrañeza (S) se conserva si el proceso es mediado por la interacción fuerte o electromagnética.
- Si el proceso es mediado por la interacción débil, la extrañeza cambia por $\Delta S = \pm 1$ o también puede conservarse.
- Simetrías y principios de conservación.

Emmy Noether nos dice que: Para cada principio de conservación corresponde una simetría

Simetrías y leyes de conservación.

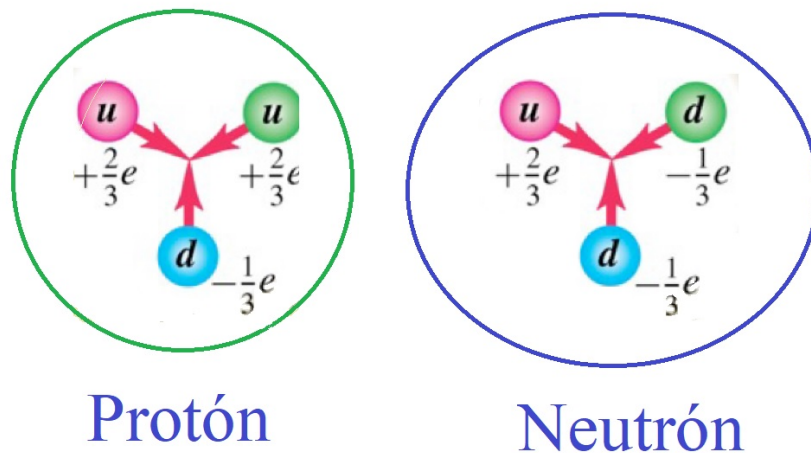
Simetría	Ley de conservación
Traslación en el espacio. No importa donde se tome el origen	Momento lineal
Traslación en el tiempo	Energía
Rotación en el espacio	Momento angular
Transformaciones de Gauge ($V, \vec{A}$)	Carga eléctrica
Intercambio de partículas idénticas (B, L, S)	Conservación de la estadística

5.11 QUARKS.

- Gell-Mann y Zweing propusieron (1963) que todos los bariones consisten de tres partículas más fundamentales llamadas quarks.
- Todos los quarks tienen espín $1/2$ y su número bariónico es $B = 1/3$. Los anticuarks tienen carga con signo contrario al mostrado y número bariónico $B = -1/3$. La extrañeza de los anti quarks es $S = 1$.

Quark	Símbolo	Extrañeza	Carga en e	Masa en reposo(GeV/c^2)
Up	u	0	$+ 2/3$	0.3
Down	d	0	$- 1/3$	0.3
Strange	s	-1	$-1/3$	0.5
Charmed	c	0	$+ 2/3$	1.5
Top	t	0	$+ 2/3$	174
Bottom	b	0	$-1/3$	4.3

- Sabor (carga débil) $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$. Sólo tres generaciones.
- Color. El protón esta compuesto por dos quarks u y uno d . El neutrón esta compuesto por un quark u y dos d como se muestra en la figura:



Pero de acuerdo al principio de exclusion de Pauli, dos fermiones no pueden ocupar el mismo estado, por lo tanto existe otra cantidad cuántica asociada, a la interacción fuerte, llamada *color*.

- Los quarks nunca se han observados libremente. Permanecen unidos formando los hadrones:

5.12 EL MODELO ESTÁNDAR.

- El Modelo Estándar de Física de Partículas es la teoría actual que describe las partículas elementales del universo y tres de las cuatro fuerzas fundamentales (electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil) que rigen sus interacciones. Este modelo incluye todas las partículas que componen la materia, como los quarks (que forman protones y neutrones) y los leptones (como los electrones), así como las partículas que transportan las fuerzas, como los fotones y los gluones.
- Fermiones.

FERMIONES

constituyentes de la materia
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptones spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Sabor	Masa GeV/c ²	Carga eléctrica	Sabor	Masa aproximada GeV/c ²	Carga eléctrica
ν_l Neutrino mas ligero	(0-0.13)×10 ⁻⁹	0	u up	0.002	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
μ Neutrino Medio	(0.009-0.13)×10 ⁻⁹	0	c charme	1.3	2/3
ν_μ muon	0.106	-1	s stange	0.1	-1/3
ν_τ Neutrino pesado	(0.04-0.14)×10 ⁻⁹	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b botom	4.2	-1/3

- Partículas intermediarias.

LAS PARTÍCULAS DEL CAMPO

<i>Partícula</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Interacción</i>	<i>Carga (e)</i>	<i>Espín ($\hbar/2\pi$)</i>	<i>Energía de reposo (GeV)</i>
Gravitón		Gravitación	0	2	0
Bosón débil	W^+, W^-	Débil	± 1	1	80.6
Bosón débil	Z^0	Débil	0	1	91.2
Fotón	γ	Electromagnética	0	1	0
Gluón	g	Fuerte (color)	0	1	0

- El bosón de Higgs. Para que el Modelo Estándar (MS) sea matemáticamente consistente P. Higgs demostró que un campo, campo de Higgs (H), debe existir en todo el espacio. Al interactuar con este campo las partículas adquieren masa. El bosón de Higgs media el campo de Higgs.

EJERCICIOS.

1. Estime la masa de la partícula mediadora π de la fuerza nuclear, sabiendo que esta debe vivir lo suficiente para viajar una distancia del orden del alcance de la fuerza nuclear.
2. Un protón de energía cinética K choca con otro protón en reposo y se produce un π^0 (pión neutro) más de los 2 protones iniciales. ¿Cuál es el valor mínimo de K del protón inicial en movimiento?
3. Verifique la conservación de los números leptónicos en la desintegraciones: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$.
4. En la siguiente reacción verifique la conservación del número de bariónico: $n + p \rightarrow n + p + \bar{p}$
5. Si las partículas Σ^+ y $\bar{\Lambda}^0$ sólo contienen quarks u d s y sus anti quarks y su extrañeza es $S = -1$. Encuentre su estructura.
6. ¿Qué ley de conservación se viola en la reacción? $n \rightarrow p + \pi^-$
7. Encuentre el número de bariones, la carga y la extrañeza de las distintas combinaciones de quarks y el hadrón correspondiente
 - a) $u\bar{d}$
 - b) $\bar{u}d$
 - c) $u\bar{s}$
 - d) $s\bar{s}$
 - e) $\bar{d}s$

Capítulo 6

APÉNDICE LEYES DE NEWTON.

• **Fuerza.** Magnitud vectorial. Se considera, en una primera aproximación, a todo aquello capaz de producir una aceleración. Por ejemplo: un empuje o jalón.

- **Tipos de Fuerzas** $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ De contacto (origen electromagnético)} \left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ Tensión} \\ \bullet \text{ Fricción} \\ \bullet \text{ Normal} \end{array} \right. \\ \bullet \text{ De acción a Distancia} \left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ Gravitacional} \\ \bullet \text{ Electromagnética} \\ \bullet \text{ Nuclear} \\ \bullet \text{ Débil} \end{array} \right. \end{array} \right.$
- **Leyes de la fuerzas** $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ Leyes de Newton. Velocidades pequeñas comparadas con la velocidad de la luz. Pilar de la física clásica.} \\ \bullet \text{ Teoría Especial de la relatividad. Altas velocidades. Contiene a las leyes de Newton por lo que es más general.} \end{array} \right.$

6.1 PRIMERA LEY DE NEWTON

Ley de la inercia. Si no actúan fuerzas en un objeto, entonces no cambia su velocidad (aceleración cero), es decir, un cuerpo en reposo permanece en reposo y un cuerpo en movimiento permanece en movimiento a velocidad constante a menos que una fuerza actúe sobre él. Si $\vec{F} = \mathbf{0}$ entonces $\vec{a} = \mathbf{0}$. La principal aplicación de esta ley es para definir los sistemas de referencia inerciales. Los sistemas de referencia inerciales son aquellos que cumplen la primera ley de Newton, es decir, permanecen en reposo o se mueven a velocidad constante.

Surgen algunas definiciones:

Inercia. Propiedad de la materia en la cual todo cuerpo tiende a conservar su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme.

Masa. (Magnitud escalar) Es la medida de la inercia. Es una constante universal. Sus unidades en el S.I. son los kilogramos.

6.2 SEGUNDA LEY DE NEWTON.

Ley de la fuerza. La fuerza resultante que actúa sobre un objeto es directamente proporcional a su aceleración, $\vec{F}_R \propto \vec{a}$. Tomando como constante de proporcionalidad a la masa se obtiene:

$$\vec{F}_R = m\vec{a}$$

Donde m es la masa y $\vec{a}$ la aceleración. La fuerza resultante $\vec{F}_R$ o fuerza neta es la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el objeto

$$\vec{F}_R = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

La unidad de fuerza es el Newton el cual se obtiene al acelerar una masa de 1 kg , en 1 m/s^2

$$1N \equiv 1kg \cdot m/s^2.$$

Unidades:

Sistema	Masa	Aceleración	Fuerza
S.I. (Sistema Internacional)	kg	m/s^2	N
BU (Unidades Británicas)	$slug$	ft/s^2	lb

Conversiones:

$1 \text{ slug} = 14.6 \text{ Kg}$	$1 \text{ lb} = 4.45 \text{ N}$	$1 \text{ kg} = 0.0686 \text{ slug}$	$1 \text{ N} = 0.225 \text{ lb}$
------------------------------------	---------------------------------	--------------------------------------	----------------------------------

La segunda ley de Newton se aplica separadamente en términos de componentes:

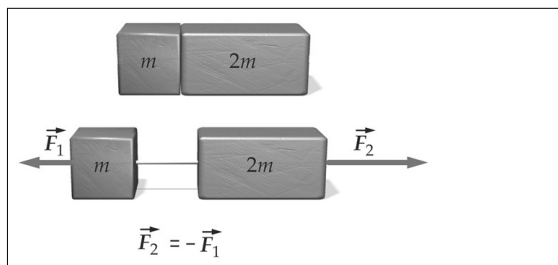
$$\vec{F}_R = m\vec{a} = \begin{cases} F_{Rx} = ma_x \\ F_{Ry} = ma_y \\ F_{Rz} = ma_z \end{cases}$$

6.3 TERCERA LEY DE NEWTON.

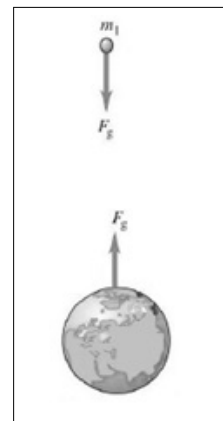
Ley de acción y reacción. Cuando interactúan dos objetos, porque están en contacto entre sí, ejercen fuerzas iguales en magnitud pero opuestas en dirección, uno sobre el otro.

Algunos ejemplos:

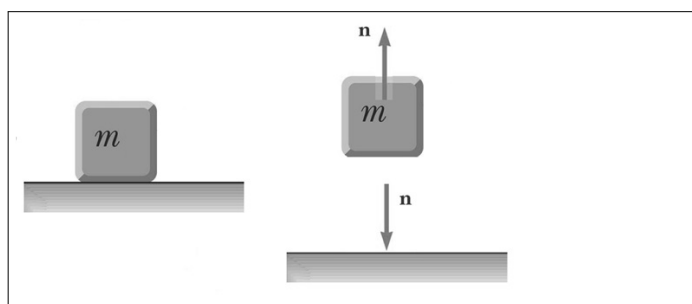
Contacto entre dos objetos.



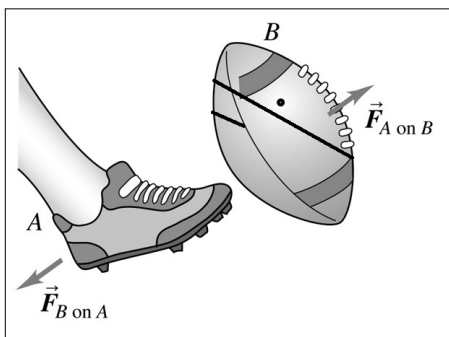
La Tierra atrae al objeto de masa m_1 . El objeto atrae a la Tierra en sentido contrario.



Masa sobre una superficie.



Patear un balón. El pie ejerce una fuerza sobre el balón y, a su vez, el balón ejerce la misma fuerza - en magnitud- sobre el pie pero en sentido contrario.

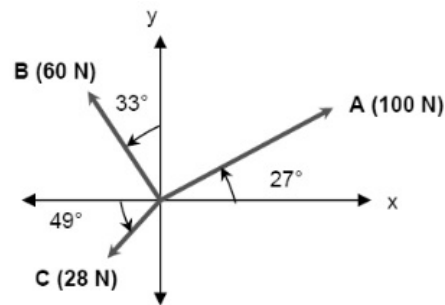


EJERCICIOS.

1. Imagina que conduces un Volvo en una pista recta a **150 km/h** y rebasas a un Smart sedan que viaja a **75 km/h**. ¿Sobre cuál auto es mayor la fuerza neta?
2. ¿Qué tipo de trayectoria seguirían los planetas si la fuerza gravitatoria del Sol cesara repentinamente?
3. ¿Cómo se compara la inercia de un racimo de plátanos de **2kg** con la inercia que tiene una bolsa de clavos de **1 kg**?
4. Si un halcón se mueve en círculos con rapidez y altura constantes, ¿la fuerza neta sobre el halcón es cero?
5. Supón que un avión a reacción vuela a gran altura y con una velocidad constante mientras los motores producen un empuje constante de **80,000 N**.
 - (a) ¿Cuál es la aceleración del avión?
 - (b) ¿Cuánto vale la fuerza de resistencia del aire que actúa sobre el avión?
6. ¿Qué masa tiene un objeto que se acelera a **3 m/s²** bajo el efecto de una fuerza neta de **5 N**?

7. Un Boeing 747 tiene una masa de $2 \times 10^5 \text{ kg}$. ¿Qué fuerza neta se requiere para imprimirle una aceleración de 3.5 m/s^2 en la pista de despegue?
8. Una bola de boliche pesa 71.2 N en la Tierra. El jugador aplica una fuerza horizontal de 160 N a la bola. ¿Qué magnitud tiene la aceleración horizontal de la bola? La gravedad de la tierra es 9.81 m/s^2 .
9. ¿Cuál sería la masa y el peso de la misma bola de boliche si estuviera en la Luna? La aceleración de la gravedad de la Luna es de 1.64 m/s^2 .
10. Una persona tiene una masa de 125 lb . Calcula:
- (a) Su masa en kg .
 - (b) Su masa en slugs .
 - (c) Su peso en la Tierra en N (la aceleración de la gravedad terrestre es 9.81 m/s^2)
 - (d) Su peso en la Luna en N (la aceleración de la gravedad lunar es 1.64 m/s^2)
11. Una masa de 3 kg se somete a una aceleración de $\vec{a} = 2\hat{i} + 5\hat{j}$ en m/s^2 . Calcula la magnitud y dirección de la fuerza que se aplica sobre la masa.
12. Tres fuerzas actúan sobre un cuerpo como se muestra en la figura. En conjunto, las fuerzas comunican al cuerpo una aceleración de 3.75 m/s^2 . Resuelve lo siguiente.

- (a) Escribe cada uno de los vectores en forma analítica.
- (b) Encuentra el vector de la fuerza resultante.
- (c) Determina la dirección de la aceleración.
- (d) Calcula la masa del objeto.



13. Una fuerza $\vec{F}$ aplicada a un objeto de masa m_1 produce una aceleración de 4 m/s^2 . La misma fuerza aplicada a un objeto de masa m_2 produce una aceleración de 1 m/s^2 .
- (a) ¿Cuál es el valor de la relación m_1/m_2 ?
 - (b) Si $m_1 = 3 \text{ kg}$, ¿cuánto vale m_2 ?
14. Una fuerza horizontal de 10 N actúa sobre un objeto que se mueve sobre un plano horizontal, en una superficie libre de fricción en la Luna, donde el objeto tiene un peso de 80 N .
- (a) ¿Cuál es la magnitud de la aceleración del objeto?
 - (b) ¿Cuál sería la aceleración de un segundo objeto que tuviera el mismo peso en la Tierra?
15. Dos barras de hielo, que pesan 90 N y 25 N respectivamente, descansan lado a lado en contacto una con la otra en una superficie horizontal libre de fricción. Una de las barras es empujada contra la otra con una fuerza horizontal constante de 45 N .
- (a) ¿Cuál es la aceleración resultante?
 - (b) Si la fuerza es aplicada a la barra a un ángulo de 35° bajo la horizontal, ¿cuál sería la aceleración? ¿El movimiento de ambas barras seguiría siendo horizontal?
16. Una fuerza horizontal de 18 N actúa sobre un objeto que descansa sobre una superficie sin fricción en la Luna, donde el objeto pesa 196 N ¿Qué magnitud tiene la aceleración del objeto?
17. Una fuerza horizontal neta de 140 N actúa sobre una caja de 32.5 kg que inicialmente está en reposo en el piso de una bodega.
- (a) ¿Qué distancia recorre la caja en **10 segundos**?
 - (b) ¿Qué rapidez tiene al cabo de ese tiempo?

6.4 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE.

Los diagramas de cuerpo libre se utilizan para identificar las fuerzas que actúan sobre el cuerpo en cuestión. Su utilidad se puede apreciar en el diseño de estructuras como puentes, domos de estadios, el peralte de una carretera, etc.

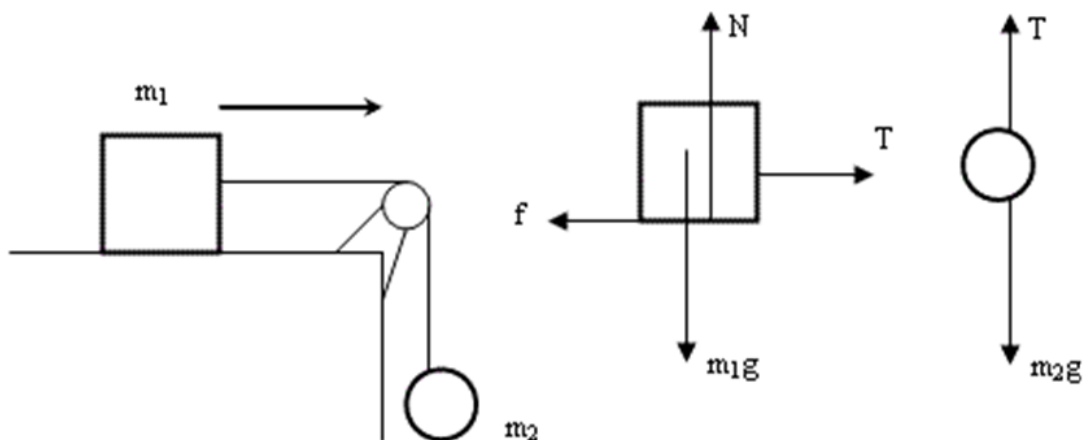
- Cuando un cuerpo está en equilibrio en un marco de referencia inercial, la resultante de las fuerzas que actúan sobre él debe ser cero

$$\sum \vec{F} = 0.$$

- La tercera Ley de Newton suele aplicarse en problemas de equilibrio, las dos fuerzas del par acción-reacción nunca actúan sobre el mismo cuerpo.
- Si la suma vectorial de las fuerzas sobre un cuerpo no es $\mathbf{0}$, el cuerpo tiene una aceleración determinada por la segunda ley de Newton

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}.$$

- La fuerza de contacto entre dos cuerpos siempre puede presentarse en términos de una fuerza normal $\vec{n}$ perpendicular a la superficie de interacción.
- Las fuerzas fundamentales de la naturaleza son las interacciones: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil.
- Ejemplo. En la figura se ilustran todas las fuerzas actuando sobre distintos objetos.



Dos masas conectadas por una cuerda.

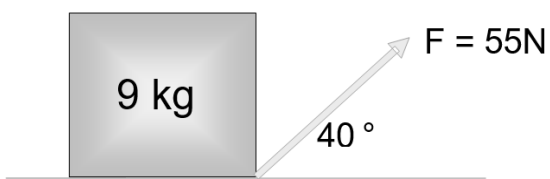
EJERCICIOS.

1. Dibuja los pares de fuerzas horizontales que intervienen en la acción mostrada en el dibujo, los pares: reno-nieve, reno-trineo y trineo-nieve.

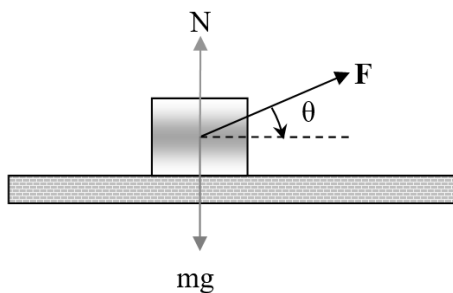


2. Dos patinadoras, **A** y **B**, con masas de **55 kg** y **75 kg** respectivamente, están paradas sobre la pista de hielo y separadas **8 m** una de otra. **B** tira de **A** con una cuerda, dándole una aceleración de **0.95 m/s²** ¿Cuál es la aceleración de **B**?

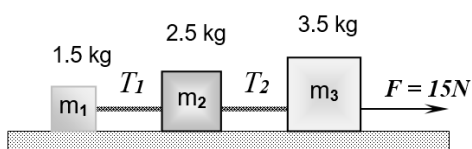
3. Se aplica una fuerza de **55 N** sobre la caja que se muestra. Suponiendo que la superficie es horizontal y libre de fricción, dibuja un diagrama de cuerpo libre de la caja y encuentra:
 - i. La aceleración con que se mueve
 - ii. La fuerza normal



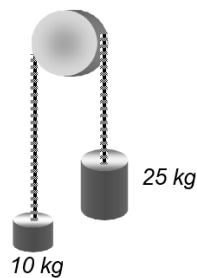
4. ¿Qué fuerza es necesaria aplicar al objeto para comunicarle una aceleración horizontal de 5 m/s^2 , si su masa es de 26 kg y $\theta = 22^\circ$? Dibuja el diagrama de cuerpo libre del objeto y despeja el valor de la fuerza normal



5. Un sistema de masas se encuentra acoplado como se muestra en la figura. Encuentra la aceleración del sistema y la fuerza de tensión en cada cuerda.

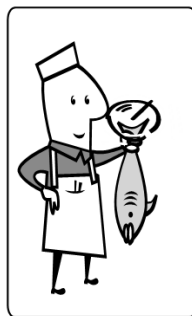


Polea sin fricción

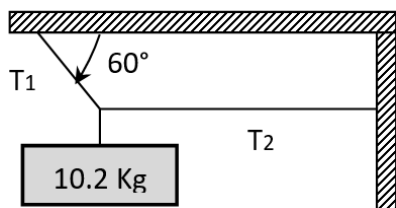


- (a) El siguiente dibujo ilustra el funcionamiento de una máquina de Atwood. ¿Cuál es la aceleración de las masas y cuál la tensión en la cuerda?

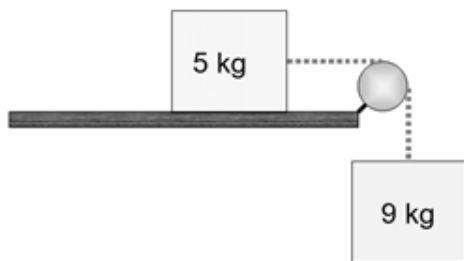
5. Una persona pesa un pescado de **5 kg** dentro de un elevador. El elevador experimenta los siguientes cambios:
- a) Acelera hacia arriba a **4 m/s²**.
 - b) Acelera hacia abajo a **4 m/s²**.
 - c) Se mueve a velocidad constante de **1.3 m/s**.
 - d) En cada caso ¿cuál será la lectura de la báscula?



6. Un cuerpo está colgado y pende de dos cuerdas como se muestra. ¿Cuál es la tensión en ambas cuerdas?

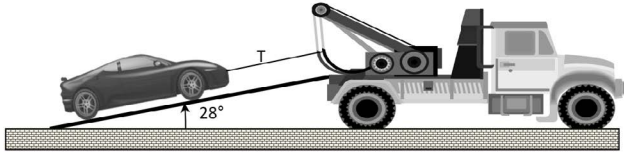


7. Traza el diagrama de cuerpo libre de las dos cajas. Encuentra la aceleración de las cajas y la tensión de la cuerda, suponiendo que no hay fricción entre la mesa y la caja de **5 kg**.



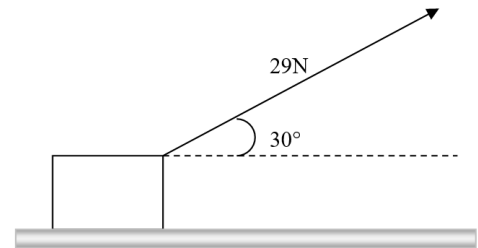
8. Un vehículo de **1200 kg** descansa sobre una rampa como se muestra. Si despreciamos la fricción, dibuja un diagrama de cuerpo libre para el análisis de fuerzas que actúan sobre el automóvil.

- ¿Cuál es la tensión en la cadena de la grúa?
- ¿Cuál es la fuerza normal?

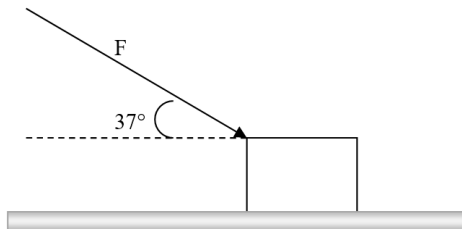


9. Una persona tira de una caja de **45 kg** con una fuerza de **29 N** con un ángulo de **30°** sobre la horizontal, como se muestra en la figura.

- Dibuja el diagrama de cuerpo libre de la caja.
- ¿Qué aceleración tiene la caja? Suponer que no hay fricción.
- ¿Qué fuerza normal ejerce el suelo sobre la caja?

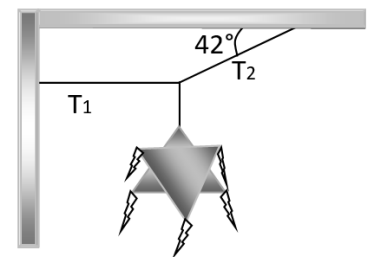


10. Un jardinero empuja una podadora de pasto de **56 kg** como se muestra en la figura. Si **$F = 40 \text{ N}$** y el ángulo es de **37°**.

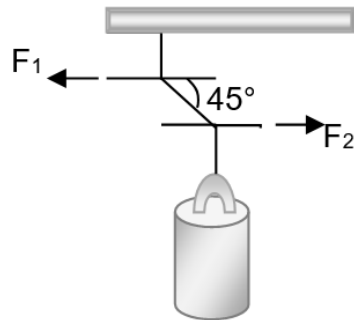


- Dibuja el diagrama de cuerpo libre de la podadora.
- ¿Qué aceleración tiene la podadora?
- ¿Qué fuerza normal ejerce el césped sobre la podadora? No tomes en cuenta la fricción.

11. Encuentra la tensión en cada cable que sostiene a la piñata que se muestra en la figura y cuyo peso es de **60 N**. El ángulo mostrado es de **42°**.



12. El cilindro pesa 50 N .



- a) Calcula la tensión en el hilo diagonal.
- b) Calcula la magnitud de las fuerzas horizontales F_1 y F_2 que deben aplicarse para mantener el sistema en la posición indicada.

Bibliografía.

- [1] *Modern Physics*. Paul A. Tipler y Ralph A. Llewellyn. 6th Ed. Nueva York: W. H. Freeman, 2012.
- [2] *Física Moderna*. Arthur Beiser. 6^o Ed. International Edition. Editorial Mc Graw Hill. 2003.
- [3] *Physics*. David Halliday, Robert Resnick, and Kenneth S. Krane. Physics, volume 2, 5th edition. John Wiley and Sons, New York. 2002.
- [4] *Física Moderna*. Raymond A. Serway, Clement J. Moses, Curt A. Moyer. 3rd Edition. Thomson. United States. 2005
- [5] *Física Universitaria*. Volumen II. Young Hugh D., Roger A. Freedman, A. Lewis Ford, and Francis, Weston Sears. University Physics: With Modern Physics., 12th edition. Pearson Addison Wesley, San Francisco, 2008.

Introducción a la Física Moderna
Se terminó de editar en noviembre de 2025
en los talleres de Astra Ediciones
Av. Acueducto No. 829
Colonia Santa Margarita, C. P. 45140
Zapopan, Jalisco, México.
33 38 34 82 36
E-mail: edicion@astraeditorial.com.mx
www.astraeditorialshop.com

ISBN: 978-607-8964-32-1



9 786078 964321



Consulta y descarga

