

*Si quiero por las estrellas
saber, tiempo, dónde estás,
miro que con ellas vas,
pero no vuelves con ellas.
¿Adónde imprimes tus huellas
que con tu curso no doy?*

*Mas, ay, qué engañado estoy,
que vuelas, corres y ruedas;
tú eres, tiempo, el que te quedas,
y yo soy el que me voy.*

Luis de Góngora

CONTENIDOS

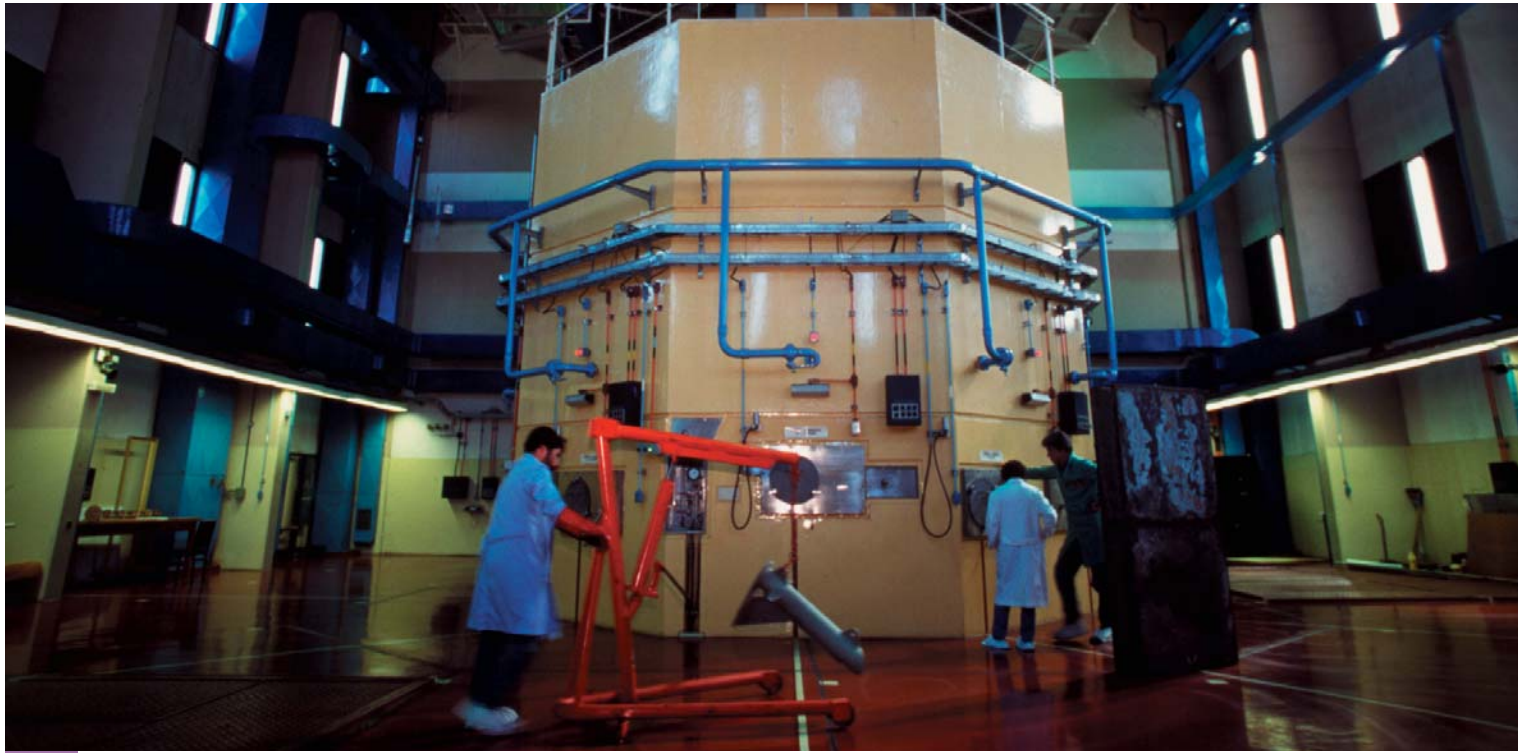
- El surgimiento de la Física moderna
- Transformaciones de Galileo y de Lorentz
- Relatividad especial
- Relatividad general
- Física cuántica
- La Física en la Argentina

15 LA FÍSICA DEL SIGLO XX

Hacia finales del siglo XIX, la mayoría de los físicos sostenían que esta disciplina científica había llegado a su desarrollo completo. Se consideraba que la mecánica de Newton sumada a la teoría electromagnética de Maxwell podían explicar la totalidad de los fenómenos de la naturaleza. Sobre estos dos pilares, el edificio de la Física parecía suficientemente sólido. Suelen citarse los comentarios de Lord Kelvin, quien por esos tiempos afirmaba que todo lo que restaba por hacer eran mediciones más precisas, que agregaran otros decimales a las constantes universales ya medidas, y disipar solo dos temas, que traían cierta oscuridad al conjunto armonioso de los conocimientos físicos. Se refería, en primer lugar, al resultado negativo del experimento de Michelson-Morley, diseñado para determinar la velocidad absoluta de la Tierra, es decir, su velocidad respecto de un hipotético éter en reposo. Y en segundo término, a la profunda discrepancia entre las leyes sobre la radiación de energía a medida que se calienta un cuerpo y los datos empíricos correspondientes.

Los desarrollos teóricos surgidos de los intentos por disipar estas dos cuestiones, obligaron a la formulación de teorías más generales que pusieron en tela de juicio los fundamentos mismos de la física clásica. Ellas fueron la teoría especial de la relatividad y la teoría cuántica.

Las explicaciones de Aristóteles dominaron el pensamiento por más de dieciocho siglos, como se vio en el capítulo 1. Uno de los motivos de esta aceptación tan prolongada se encuentra en el hecho de que resultan coincidentes con las interpretaciones espontáneas que alguien de cualquier época podría elaborar al interactuar con su medio ambiente. Por eso se las incluye en lo que se llama a menudo Física del sentido común. Sin embargo, son necesarios grandes esfuerzos intelectuales para comprender los enunciados de Galileo o Newton a partir de estas lógicas interpretativas.

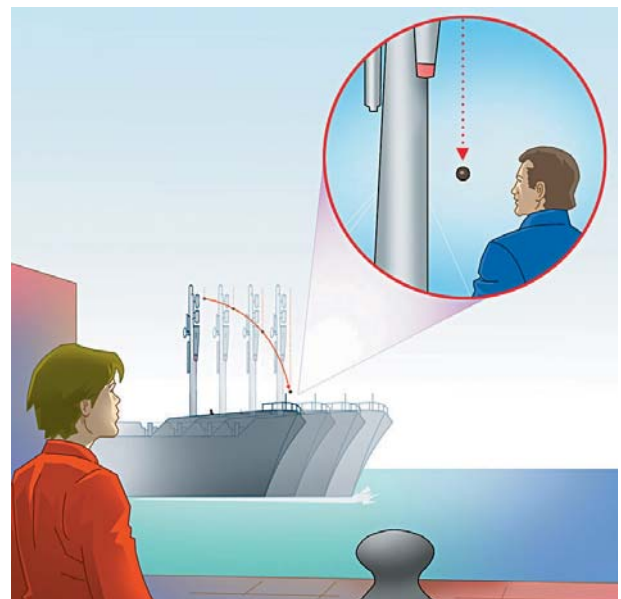


Instituto Balseiro. Bariloche, provincia de Río Negro

La diferencia principal entre los modelos se basa en que la física de Aristóteles postulaba una Tierra en reposo absoluto y que, con referencia a ella, puede definirse ese estado para cualquier objeto sobre el cual no actúe ninguna fuerza. Por su parte, para Galileo y los físicos posteriores, la Tierra y los planetas están en movimiento, girando alrededor del Sol.

De hecho, Galileo debió recurrir a diversos argumentos para convencer a los defensores de la inmovilidad de la Tierra. Planteó, entre otros, los siguientes problemas: ¿cómo se vería desde la playa la trayectoria seguida por unas gotas de agua que caen constantemente desde un recipiente ubicado en la cubierta de una nave, si ésta pasa navegando con velocidad constante y paralela a la costa? ¿Cómo se vería desde la cubierta de la nave? Es claro que en el primer caso la trayectoria observada sería curva y en el segundo, recta. Pero, ¿cómo se mueve efectivamente? Resulta muy difícil aceptar que no existe una respuesta absoluta sino solo relativa, es decir que depende desde dónde se observe. Lo cierto es que si el movimiento absoluto existe, la respuesta parece no tenerla la mecánica.

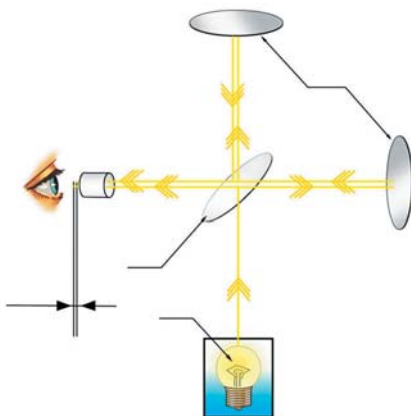
En este capítulo se verá cómo fallaron los intentos de probar el movimiento absoluto con la teoría electromagnética y cómo estos resultados obligaron a una reformulación teórica de la Física clásica.



Si el barco se mueve con velocidad constante, ¿cuál es la trayectoria de la piedra para un observador que mire el espectáculo desde el puerto, y para quien la arroja desde el mástil? ¿Cuál es la "verdadera" trayectoria?

Transformaciones de Galileo y de Lorentz

En la base de un edificio cercano al nivel del mar, **Michelson y Morley** construyeron lo que se conoce como el interferómetro de Michelson. Se compone de un espejo semiplateado, que divide la luz monocromática en dos haces que viajan en un determinado ángulo el uno con respecto al otro. Al abandonar la división, cada haz se refleja varias veces entre dos espejos (para que tengan más recorrido o camino óptico). Finalmente se vuelven a unir, creando un patrón de interferencia que depende de la velocidad de la luz en los dos brazos del interferómetro. Cualquier diferencia en esta velocidad (provocada por la diferente dirección de movimiento de la luz con respecto al movimiento del éter) sería detectada.



Interferómetro

Juan y Francisco, representados en el dibujo, intentan calcular la velocidad de Andrés, mientras éste circula con su bicicleta. Para ello, ambos deberán determinar los valores de otras dos magnitudes: los cambios en su posición, o sea, el desplazamiento, y el tiempo empleado. Si los dos observadores están en reposo relativo uno respecto del otro, no deberían existir diferencias en las mediciones, siempre que se realicen con el debido cuidado. Pero si Francisco se está moviendo respecto de Juan, también en bicicleta, a 20 km/h con relación al piso, por ejemplo, podría suceder que cada uno de ellos se tome a sí mismo como referencia para realizar las mediciones de la velocidad de Andrés. En este caso, sus resultados no coincidirían.



Para Juan, $\Delta x_A = v_A \cdot \Delta t$; si además se supone que $x_{0A} = t_0 = 0$ se obtiene:

$$x_A = v_A \cdot t$$

donde v_A es la velocidad de Andrés y x_A la distancia recorrida por él en el tiempo t .

También puede anticipar lo que mide Francisco (v'_A) mediante las siguientes correcciones:

$$v'_A = v_A - 20 \text{ km/h}$$

donde v'_A es la velocidad de Andrés medida por Francisco.

Por lo que, asumiendo que el tiempo medido por Juan y Francisco es el mismo para ambos observadores, es decir, $t = t'$,

$$v'_A \cdot t = v_A \cdot t - 20 \text{ km/h} \cdot t \quad \text{o bien:} \quad x'_A = x_A - 20 \text{ km/h} \cdot t$$

donde v_A y x_A son la velocidad y la distancia recorrida medidas por Juan, v'_A y x'_A son las medidas de Francisco y t es el tiempo empleado.

El conjunto de estas ecuaciones se conoce como **Transformaciones de Galileo**, y relaciona la medida de una misma magnitud desde dos sistemas de referencia. En general, pueden escribirse de la siguiente manera.

Las coordenadas de posición x' , medidas desde un referencial con velocidad constante V respecto de otro considerado en reposo, donde se determina x , son:

$$x' = x - V \cdot t$$

La velocidad de un objeto medida desde el referencial considerado en movimiento relativo es:

$$v' = v - V$$

No hay diferencia entre los tiempos medidos por los dos observadores en movimiento relativo.

$$t' = t$$

Francisco también podría conocer los registros de Juan utilizando las inversas de estas ecuaciones, igualmente válidas que las anteriores.

Las ecuaciones Maxwell para el electromagnetismo predicen que la velocidad para cualquier onda electromagnética, como la luz o las ondas de radio, es la misma y está determinada por las características eléctricas y magnéticas del medio por el que viaja. En el vacío dicha velocidad es $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Como se ha dicho, esta velocidad había sido ya medida por distintos métodos basados en razonamientos mecánicos, suponiendo un sistema de referencia absoluto: el espacio, al cual se lo concebía lleno de una hipotética sustancia llamada éter. De esta manera, diferentes observadores que se movieran con relación al éter verían acercarse o alejarse la luz con velocidades distintas de c , siempre que la velocidad de ésta con respecto al éter permaneciera fija. Los cuidadosos experimentos realizados en 1887 por A. Michelson y E. W. Morley para medir tal diferencia fracasaron sistemáticamente: la velocidad de la luz era la misma, aun cuando el observador se moviera con distintas velocidades respecto de ella.

El físico y matemático holandés Hendrik Lorentz (1853-1928) intentó a principios del siglo XX interpretar estos resultados experimentales realizando una modificación a las transformaciones de Galileo antes explicadas.

Es decir que, para determinar posiciones, velocidades y tiempos desde un sistema que se mueve con velocidad constante V con respecto a otro, hay que utilizar las siguientes ecuaciones que son llamadas las **Transformaciones de Lorentz**:

$$x' = \frac{x - V \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad v' = \frac{v - V}{1 - v \cdot \frac{V}{c^2}} \quad t' = \frac{t - \frac{V \cdot x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, t y t' son los tiempos dados en los dos sistemas, x y x' son las posiciones en ambos sistemas, y V es la velocidad constante con que se mueve un sistema respecto del otro.

En este caso, los tiempos medidos por dos observadores en movimiento relativo con velocidad V no son iguales.

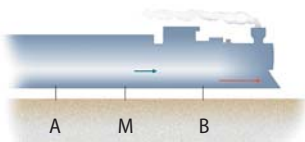
1. Escriban las inversas de las ecuaciones de Lorentz; tengan en cuenta que $V' = -V$.

2. ¿Por qué puede decirse que las ecuaciones de Lorentz son las mismas que las de Galileo para velocidades relativas bajas?





■ Einstein envió en 1905, como tesis doctoral, un artículo a la Universidad de Zurich, además de finalizar los otros tres que revolucionarían la ciencia. Su título era *Una nueva determinación de los tamaños de las moléculas*, problema que por entonces había sido abordado, con otros métodos, por varios investigadores. Este mismo trabajo había sido rechazado como tesis doctoral en 1901 por considerárselo demasiado breve, por lo que Einstein lo reenvió en 1905, después de agregarle solo una línea. Así fue aceptado y ese año obtuvo su doctorado. Las Naciones Unidas declararon a 2005 como "El año mundial de la Física" para celebrar el centenario de aquél en que Einstein produjera desarrollos tan importantes para esta ciencia.



Cuando dos puntos A y B en los extremos de un andén, encuentran que la simultaneidad es un fenómeno relativo, se destruye la idea del tiempo absoluto.

Relatividad especial

En el año 1905 Albert Einstein (1879-1955) era un joven físico que ocupaba un puesto técnico en la Oficina de Patentes de Berna, donde trabajaría hasta 1909. Desde ese modesto cargo, logró publicar tres artículos científicos que conmovieron el supuestamente sólido y completo edificio de la física. El primero trataba sobre el efecto fotoeléctrico, el segundo sobre una aplicación de la teoría cinético molecular al movimiento browniano, y el restante, sobre lo que un poco más tarde se llamaría la **teoría de la relatividad especial**.

En el último de esos artículos planteaba que:

(...) el fracaso de las experiencias destinadas a revelar el movimiento de la Tierra con respecto al medio en que se propaga la luz, hace sospechar que al concepto de reposo absoluto no corresponde ninguna propiedad de los fenómenos no solo en la Mecánica sino tampoco en la Electrodinámica. (...) Queremos llevar esta suposición, cuyo contenido llamaremos en adelante 'Principio de Relatividad' a la categoría de hipótesis; introduciendo además otra solo en apariencia inconciliable con ella, a saber: que la luz se propaga en el vacío siempre con una velocidad independiente de la velocidad de la fuente que la emite.

En los párrafos anteriores están contenidos los dos postulados de la teoría de la relatividad que, aplicados a las categorías fundamentales a partir de las cuales se explican los fenómenos cotidianos, tuvieron consecuencias impredecibles. Por ejemplo, implicaron cambios fundamentales en lo que debemos entender por la medida de la longitud de un cuerpo o la duración de un acontecimiento.

Estos postulados son:

- las leyes de la naturaleza tienen formulación matemática equivalente para todos los observadores que se muevan entre sí con velocidad constante;
- la velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores, independientemente de su movimiento.

Simultaneidad

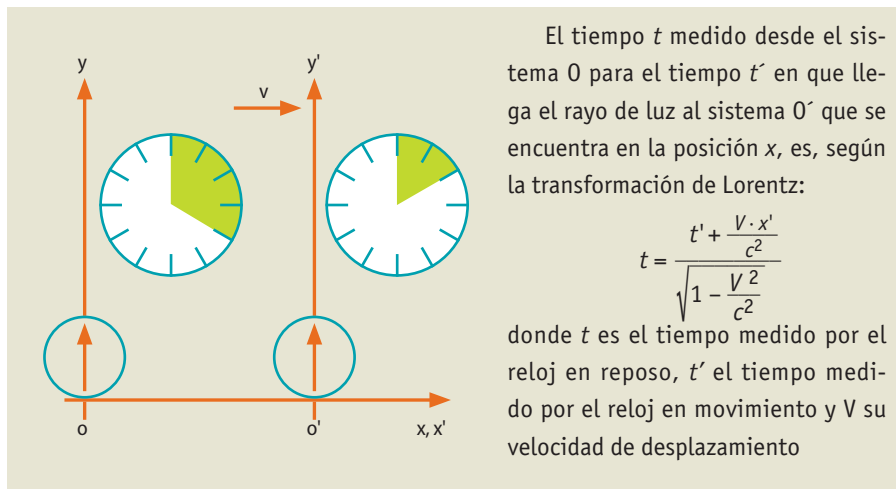
Es posible imaginar, a partir de un ejemplo propuesto por el mismo Einstein, que dos rayos caen simultáneamente en los lugares A y B, pero, ¿qué tipo de observaciones podrían hacerse para determinar, sin lugar a dudas, si en un caso concreto, dos sucesos, como la caída de rayos en dos puntos, son simultáneos o no? Para dar una respuesta experimental a esta pregunta podría pensarse en colocar un observador en M, a mitad de distancia entre A y B, dotado de dos espejos en ángulo con los que lograría juzgar la simultaneidad por los rayos reflejados, si es que llegan hasta él al mismo tiempo. La observación coincidente permite definir la simultaneidad de los sucesos.

Se supone ahora que los puntos A y B son los extremos de un andén (suficientemente largo) y que el suceso simultáneo es referido a un punto M' , inicialmente coincidente con M, y que se mueve con velocidad v ya que está sobre un tren. Si el observador en M registra, como en el caso anterior, la llegada de la luz a M' , verá que este punto avanza hacia uno de los rayos a medida que se aleja del otro. Por lo tanto, para un observador en M, el punto M' es alcanzado antes por la luz de un extremo que por la del otro. Sucesos simultáneos respecto del andén no lo son respecto del tren en movimiento. La simultaneidad es un suceso relativo. Este hecho es de fundamental importancia si se tiene en cuenta que éste y no otro es el concepto que utilizamos para medir el tiempo y las longitudes. Ni el intervalo temporal ni el espacial son independientes del movimiento del cuerpo de referencia.

Dilatación del tiempo y contracción de las longitudes

Para determinar lo que se dio en llamar **dilatación del tiempo**, es posible realizar el siguiente experimento: se toman dos relojes idénticos y sincronizados, o sea, en donde se ha controlado que las idénticas posiciones de las agujas de ambos sean siempre sucesos simultáneos. Uno de ellos se deja en tierra midiendo el tiempo t y el otro se sube a un móvil que tiene una velocidad V respecto del primero y que medirá tiempos t' . No hay por qué suponer a priori que estos tiempos serán distintos. Se envía una señal luminosa desde la posición del reloj en reposo hacia el reloj móvil que se encontrará a una distancia x en un tiempo t' .

Lo que se mide entonces es el tiempo que tarda el rayo de luz en recorrer la distancia x , como muestra la figura:



Como el reloj está ubicado en el origen de coordenadas, $x' = 0$. Esto significa que los tiempos medidos por relojes idénticos de un mismo suceso no son iguales; desde un referencial en reposo relativo, el intervalo de tiempo medido para un suceso en movimiento relativo respecto de él es más largo que el que sería medido desde ese referencial para el mismo evento. Los relojes en reposo marchan más rápido que los que están en movimiento.

La dilatación temporal se relaciona con otro fenómeno: **la contracción de las longitudes**. Si se desea medir una varilla, la medición de esta longitud se apoya en la idea de simultaneidad, ya que al mismo tiempo se determina la posición de ambos extremos. Esta longitud puede ser llamada **longitud propia** y es, entonces, aquella que se mide cuando el objeto está en reposo.

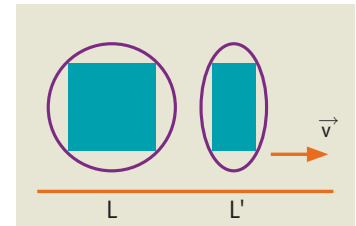
Ahora bien, la situación cambia cuando se considera la varilla en movimiento. La varilla de longitud L medida en la Tierra se sube a un móvil y se alinea con la dirección de la velocidad constante de éste, como se muestra en la figura.

Como se ha visto, dos sucesos simultáneos dejan de serlo cuando se los observa desde dos referenciales en movimiento relativo, por lo tanto, basándonos en la constancia de la velocidad de la luz se tiene: $c = \frac{L}{t}$ y $c = \frac{L'}{t'}$, como $t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$; la longitud medida en el sistema en movimiento es:

$$L' = L \cdot \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

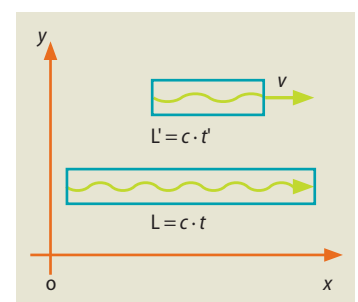
donde L y L' son dos longitudes en los referenciales en movimiento relativo.

Es decir, la longitud es menor si la mide quien ve moverse a la varilla.



La contracción sucede solo en el sentido del movimiento.

Gracias a la gran precisión que puede alcanzarse con los relojes atómicos (del orden de 10^{-14}) fue posible realizar en 1971 una primera comprobación experimental de la dilatación del tiempo con este instrumental, ubicando relojes de esta tecnología, uno en tierra, en el Observatorio Naval de los EE UU en Washington, y otro en un avión jet. Después de un vuelo prolongado alrededor de la Tierra, se comprobó el retraso en uno de los relojes.





● En el Sol, como en cualquier estrella de su tipo, el proceso que explica la enorme radiación de energía es la fusión de hidrógeno para formar helio. En este proceso, aproximadamente un 0,5 % de la masa de las partículas que intervienen en la fusión se transforma en energía. En 1920, de manera casi profética, **Arthur Eddington** (1882-1944), astrofísico inglés, escribía: (...) *la masa de un átomo de helio es menor que la masa de los cuatro átomos de hidrógeno que la forman (...)* Ahora bien, la masa no puede aniquilarse, y el déficit solo puede representar la energía liberada en la transmutación (...). Si, realmente, la energía subatómica es utilizada libremente en las estrellas para mantener sus grandes hogueras, se ve un poco más cercano el cumplimiento de nuestro sueño de controlar este poder latente para el beneficio de la raza humana, o para su suicidio.

Equivalencia masa-energía

En 1897, Joseph John Thompson descubrió el electrón, partícula negativa constituyente de los átomos. A partir de entonces, comenzaron los esfuerzos para medir el valor de su carga y de su masa. Las primeras mediciones realizadas solo podían aspirar a encontrar el valor de la relación entre ellas (e/m) y sorprendentemente, mostraron variaciones en la resistencia de las partículas a la acción de las fuerzas exteriores que las desviaban: a mayor velocidad, la relación e/m disminuía. O sea, mostraban una inercia mayor. Para interpretar este fenómeno se realizaron múltiples intentos, siempre dentro del marco de la teoría clásica. En forma independiente, los trabajos de Einstein obligaban a la reformulación radical de los conceptos descriptivos de la cinemática clásica y a relativizar algunos conceptos considerados absolutos, como el de la conservación de la energía. Sin embargo, esto no es necesario si se realizan algunas modificaciones, como aceptar que la masa de un cuerpo en reposo respecto de quien lo mide (m_0) no es igual a la masa (m) de este mismo cuerpo cuando se encuentra en movimiento respecto de él. La relación que expresa esta variación es:

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

donde v es la velocidad constante y c la velocidad de la luz.

En 1908, Bücherer produjo la primera confirmación experimental de esta ecuación al comprobar que se ajustaba a los resultados experimentales anteriormente mencionados en cuanto a la disminución de la relación e/m de electrones según aumentaba su velocidad.

La variación relativista de la masa, si bien no es evidente en eventos cotidianos, es un hecho que no pueden dejar de lado los físicos que trabajan con partículas de alta energía.

Einstein propuso, además, que este aumento en la masa consecuente al aumento de su energía cinética permitía entender a la masa de un cuerpo como una medida total de su energía. En sus propias palabras: *La teoría de la relatividad deduce de sus suposiciones fundamentales (...): toda forma de energía se resiste al cambio de movimiento; es decir, la energía se comporta como la materia.* Si E es la energía total de un cuerpo, es posible enunciar:

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

donde m es la masa del cuerpo y c la velocidad de la luz.

Esta fórmula postula la equivalencia entre la masa y la energía. Esta ecuación, expresada según la masa relativista, adquiere la forma:

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

Por lo tanto, existe energía aun para la masa en reposo ($v = 0$) y vale:

$$E_0 = m_0 \cdot c^2$$

Si se considera que la energía total del cuerpo es la suma entre su energía en reposo más su energía cinética, se obtiene:

$$E = m \cdot c^2 \Rightarrow m \cdot c^2 = E_0 + E_c \Rightarrow E_c = m \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2$$

o bien: $E_c = m_0 \cdot c^2 \left[1 + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right]$ y no la conocida expresión $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$.

Relatividad general

El principio de equivalencia

En el capítulo 3 se presentó el principio de inercia: *los cuerpos conservan constante su velocidad a menos que una fuerza actúe sobre ellos*.

Este principio es uno de los conceptos clave para la organización teórica de la Física, y es posible comprenderlo mejor con un sencillo ejemplo. Si un automóvil marcha con velocidad constante, el principio de inercia explica que dentro de la cabina, todo sucederá como si se estuviera en reposo con respecto al piso. De esta manera no resultaría demasiado difícil realizar una tarea como la de cebar mate, que requiere que un chorro de agua caiga en un lugar preciso de un recipiente. Este tipo de **sistemas** se llaman **inerciales**, y no existen argumentos para decidir en forma absoluta si están en movimiento o en reposo, ya que las leyes físicas se cumplen igualmente en ambos casos. Ahora bien, si suponemos que el auto acelera, se notará un cambio en el comportamiento de la caída del agua, que permite decidir que es el auto el que está acelerado respecto de la Tierra considerada en reposo, ya que el principio de inercia se cumple solo para sistemas inerciales, y un sistema como el auto, acelerado respecto a un sistema inercial, ya no lo es. Pero, en un análisis más detallado, como la Tierra en rotación está acelerada, tampoco podría considerarse inercial en un sentido estricto.

Einstein propuso que la raíz del problema reside en haber postulado que las leyes de la naturaleza solo tienen validez para un tipo especial de sistemas, los inerciales. Postuló que es posible formular las leyes físicas de manera que sean válidas para todos los sistemas, es decir, no solo para los que se mueven en forma uniforme unos respecto de los otros. Es lo que enuncia la llamada **teoría de la relatividad general**; el nombre de relatividad restringida se reserva para la especial, que se aplica solo a sistemas inerciales.

Uno de los principios básicos de esta teoría es el **Principio de equivalencia**:

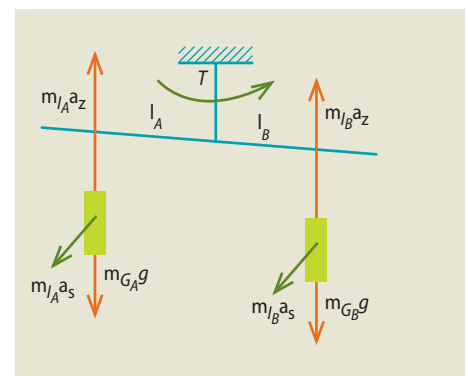
Los fenómenos físicos que tengan lugar en sistemas acelerados o en campos gravitatorios son equivalentes. No existe ningún experimento que permita distinguir entre un campo gravitatorio uniforme y un sistema de referencia acelerado.

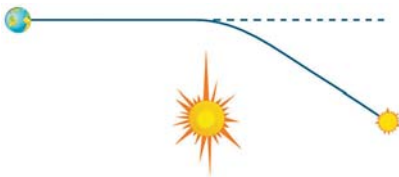
Por ejemplo, en una nave que orbita la Tierra, tanto ella como todos los objetos que están en su interior caen con la misma aceleración, hecho que explica la mecánica clásica. La fuerza gravitatoria, proporcional a la masa gravitatoria, encuentra la resistencia de la masa inercial, por lo que todos los cuerpos, incluida la nave, caen con igual aceleración. Es entonces imposible detectar la existencia de cualquier campo gravitatorio en su interior, donde prevalecen, por este motivo, condiciones llamadas de **ingravidez**. Todos los cuerpos dentro de ella cumplen con la ley de inercia, por lo que puede considerarse un sistema inercial local.

Si se enciende un cohete que aleje a la nave de la Tierra con aceleración constante, el campo gravitatorio terrestre se irá debilitando. Sin embargo, si se suelta un objeto en su interior, éste se dirigirá en sentido opuesto a la aceleración de la nave como si se desplazase debido a un campo gravitatorio propio de la nave.

El efecto es similar al que ocurriría en un micro en el que se ha colocado una pelota en el piso. Si la pelota comienza a rodar hacia la parte trasera del vehículo y no se mira hacia afuera sino que solo se presta atención a lo que le ocurre a la pelota, no se puede determinar si comenzó a moverse porque el micro aceleró, o porque comenzó a subir una barranca, provocando que la pelota fuese impulsada por el campo gravitatorio.

El barón **Von Eötvös** (1848-1919), físico húngaro, realizó un experimento con una balanza de torsión para verificar si había alguna diferencia entre la masa gravitatoria y la masa inercial. Su experimento constaba de una barra horizontal con dos bolas en sus extremos, de distintos materiales, suspendida de un hilo muy fino. Las bolas estaban sujetas a dos fuerzas: la gravitatoria, dirigida hacia el centro de la Tierra, y la centrífuga, consecuencia de la rotación terrestre, dirigida hacia afuera. La balanza que las soportaba estaba en equilibrio con respecto al observador y cualquier pequeña diferencia en la proporcionalidad entre las fuerzas gravitatoria e inercial se traduciría en una rotación de la balanza y un consiguiente retorcimiento del hilo que sostenía la barra horizontal. La bola de masa mayor experimentaba una fuerza gravitatoria también mayor, pero por su mayor inercia se debía acelerar menos. Solo si estos efectos se compensaban, el hilo no se retorcería; en caso contrario, la torsión podría ser un indicador de la diferencia entre la masa inercial y la gravitatoria. Eötvös había calculado que podía ser detectada una diferencia de 0,0000005 %, por lo que la equivalencia entre las masas quedó probada hasta ese límite, al no verificarse ninguna torsión.





Desviación de la dirección de la luz de una estrella al pasar por las inmediaciones del Sol.

En este texto Einstein hace referencia a la confirmación de su predicción de la deflexión de la luz:

Hemos de agradecer a la Astronomical Royal Society la contrastación de este importante resultado. Sin dejarse turbar por la guerra ni por las consiguientes dificultades de índole psicológica, envió a varios de sus astrónomos más destacados (Eddington, Crommelin, Davidson) y organizó dos expediciones con el fin de hacer las fotografías pertinentes durante el eclipse de Sol del 29 de mayo de 1919 en Sobral (Brasil) y en la isla Príncipe (África occidental). Las desviaciones relativas que eran de esperar entre las fotografías del eclipse y las de referencia ascendían tan solo a unas pocas centésimas de milímetro. Así pues, las demandas que se impusieron a la precisión de las fotografías y a su medición no eran pequeñas. El resultado de la medición confirmó la teoría de manera muy satisfactoria.

Albert Einstein, *Teoría de la relatividad especial y general*.

Confirmación experimental de la Teoría de la relatividad general

En las ciencias fácticas, la experiencia es el mejor juez para determinar la aceptación de una teoría. De cada nueva teoría, además, se espera que avale lo que otras explicaron con anterioridad, y aún más.

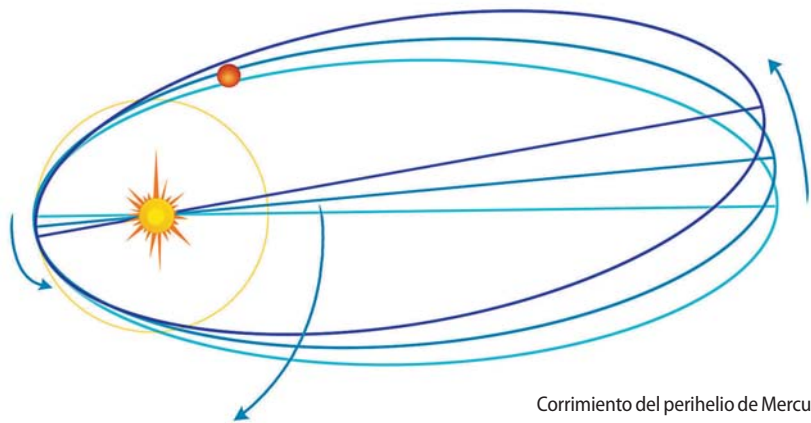
La Teoría de la relatividad muestra una profunda concordancia entre las predicciones de sus postulados y las de la Física clásica, a pesar de la gran diversidad en los supuestos básicos de una y otra. La prueba experimental que avala la mecánica clásica también es, de esta manera, garantía de la relatividad general. Sin embargo, esta última explicó algunos fenómenos que no podían ser comprendidos desde el modelo clásico, y predijo la observación de otros.

Por ejemplo, la mecánica newtoniana, cuya validez había quedado probada de forma sorprendente en su aplicación al movimiento planetario, no podía explicar el corrimiento del perihelio (posición de máxima aproximación al Sol) del planeta Mercurio.

La teoría gravitacional de Newton sostiene que un planeta alrededor del Sol se mueve describiendo una elipse. La distancia del planeta al Sol oscila entre una mínima, llamada perihelio, y otra máxima, que se conoce como afelio. Si la acción del Sol se perturba -por la presencia de otros planetas, por ejemplo-, la trayectoria no se ajusta exactamente a una elipse, y el perihelio se corre un poco, vuelta tras vuelta. Tal efecto es más fácil de observar en el planeta Mercurio, ya que su movimiento es rápido, su órbita es excéntrica y es más notable el perihelio.

Entre los cálculos de los astrónomos de la segunda mitad del siglo XIX que midieron este corrimiento usando la mecánica newtoniana, y las observaciones efectuadas al planeta Mercurio, se encontró una diferencia de 43 segundos de arco por siglo. Se argumentó entonces que un planeta aún desconocido era el responsable de tal diferencia.

La explicación según la teoría de la relatividad de Einstein es la curvatura de la trayectoria del planeta en las proximidades del Sol debido a la curvatura del espacio por la acción gravitatoria de la estrella, que daría la diferencia señalada.



Corrimiento del perihelio de Mercurio.

Otra prueba, que resultó fundamental para la aceptación de esta teoría, fue su predicción de la desviación de un rayo luminoso al atravesar un campo gravitatorio, es decir que hasta la luz sufre la atracción gravitatoria. Einstein sugirió que era posible observar la desviación de la luz de una estrella lejana que pasara cerca del Sol. Durante un eclipse, se podrían fotografiar las estrellas situadas en sus inmediaciones; las imágenes de las estrellas así obtenidas debían estar desplazadas respecto de sus posiciones determinadas en otro momento, cuando el Sol no se encuentra en el camino de la luz que emiten. Este efecto fue comprobado durante el eclipse de Sol de 1919, cuando se midió un desplazamiento compatible con las predicciones de la Teoría de la relatividad.

Física cuántica

Ya se ha visto cómo, durante los primeros años del siglo XX, se produjo una crisis y reorganización en la Física, que se centró en la articulación entre los modelos de la mecánica y el electromagnetismo clásicos. Esta última teoría también resultó reformulada a partir de los intentos por solucionar algunos puntos oscuros, como la explicación del efecto fotoeléctrico, y de los espectros de emisión de los gases y el análisis espectral de la radiación emitida por los cuerpos a medida que aumentan su temperatura. Las explicaciones a estos fenómenos obligaron, como en el caso de la mecánica, a la reformulación de los conceptos fundamentales de la teoría electromagnética, y dieron origen a una teoría más general conocida como **Teoría cuántica**.

Los enunciados de la teoría cuántica se han constituido en pilares fundamentales para la Física actual. En ella se conjugan las nuevas y revolucionarias ideas desarrolladas durante la primera mitad del siglo XX. Su aplicación resulta indispensable en la investigación de los fenómenos que suceden a nivel atómico. También es aplicable a numerosas tecnologías que se han desarrollado a partir de su modelo teórico.

Su nombre alude a una discontinuidad fundamental en la naturaleza: tanto la materia, compuesta por partículas fundamentales, como la energía irradiada, son discontinuas. Las distintas variables físicas, en apariencia continuas, revelan su discontinuidad en observaciones más minuciosas.

Estas porciones indivisibles, **quantum** o **cuantos**, se hicieron indispensables para la elaboración del modelo teórico general capaz de explicar las evidencias experimentales. Por ejemplo, la “cuantización” del supuesto fluido eléctrico debió aceptarse al descubrir el electrón, portador de la menor cantidad de carga eléctrica presente en la naturaleza.

Hacia fines del siglo XIX, dos leyes intentaban explicar la forma en que la materia absorbe o emite energía: la Ley de Wien y la Ley de Rayleigh-Jeans. Ambas eran incompletas para describir el proceso para uno de los extremos del espectro electromagnético: la primera fallaba para las frecuencias bajas y la segunda, para las altas, ya que pronosticaba que toda la energía de un cuerpo que se calienta se manifestaría bajo la forma de rayos ultravioletas, luego X, y más tarde gamma.

El físico alemán Max Planck, en el año 1900, postuló la hipótesis de los cuantos, lo que impuso una corrección a las leyes anteriores para ajustarlas a las observaciones en todo el espectro de frecuencias. Planteaba que la materia solo puede emitir energía en cantidades discretas cuyo valor esta dado por la expresión:

$$\Delta E = h \cdot \nu$$

donde h es una constante de proporcionalidad propuesta por Planck (que lleva su nombre) cuyo valor es $6,64 \cdot 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{s}$, y ν es la frecuencia de la radiación.

De esta manera se acepta que la energía se irradia en cantidades discretas o cuantos de energía, que toman valores distintos según la frecuencia de radiación.

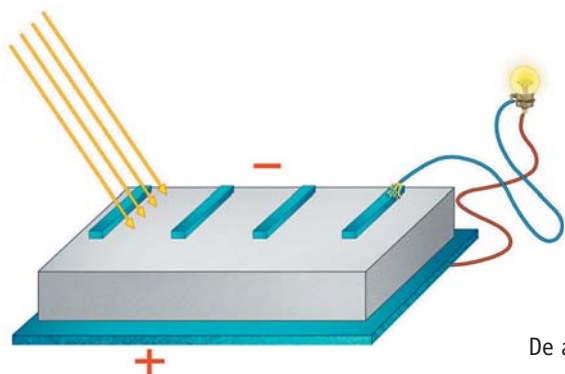
Esta suposición de discontinuidad en la energía parecía difícil de aceptar por el sentido común y aun el propio Planck luchó por modificar su propia teoría antes de aceptar su validez.

El físico austriaco **Paul Ehrenfest**, a través de una lectura de sentido común a la Ley de Rayleigh, captó su imposibilidad y la ridiculez de sus predicciones para las altas frecuencias. Esto puede comprobarse fácilmente sentándose frente a una estufa en un día frío; si esta teoría fuese cierta, esta acción se convertiría en una verdadera catástrofe. Por eso Ehrenfest llamó a estos pronósticos “la catástrofe ultravioleta”. Este nombre resultaba tan descriptivo del hipotético fenómeno como de lo grave del error en que la teoría electromagnética había sido hallada.



Al propio **Planck** le costó asumir la realidad de sus hipótesis tan radicales acerca de la forma en que la materia interactúa con la radiación. Sus palabras dicen lo difícil que fue incluso para él aceptar la cuantización de la energía: *Mis vanos intentos de ajustar el quantum elemental de acción (h) en alguna forma a la teoría clásica siguieron durante varios años y me costaron un gran esfuerzo.*

Efecto fotoeléctrico



Fotoceldas.

Un dispositivo capaz de aprovechar el efecto fotoeléctrico para producir electricidad a partir de luz se denomina **célula o celda fotovoltaica**. Hoy se utiliza comúnmente para distintos fines prácticos: alarmas, aperturas electrónicas de puertas, fotómetros y, dentro y fuera de la atmósfera, para convertir en energía eléctrica la energía proveniente del Sol. Las celdas solares fotovoltaicas se fabrican principalmente con materiales semiconductores, como el silicio. Hoy en día, la búsqueda de estrategias de solución a la crisis energética mundial ha potenciado la investigación de estas celdas solares, y se trata de mejorar los diseños para volverlos más sustentables en términos económicos.

Existen numerosos procedimientos para extraer algunos electrones de los átomos. Uno de ellos, llamado **efecto fotoeléctrico**, consiste en hacer llegar luz monocromática hasta una placa metálica que en algunos casos pone inmediatamente en libertad electrones, los cuales pueden ser detectados en forma de una corriente eléctrica cuando son sometidos a una diferencia de potencial adecuada.

La aplicación del principio de conservación de la energía permite enunciar que la energía de la luz incidente es transformada en energía cinética de los electrones extraídos del metal.

De acuerdo con la teoría electromagnética, si se varía la intensidad de la luz incidente pero no su frecuencia, se debería registrar un aumento en la energía cinética de los electrones. La experiencia contradice esta deducción surgida de la aplicación de la teoría ondulatoria. Los resultados experimentales podrían resumirse en los siguientes puntos.

- El efecto fotoeléctrico solo se manifiesta cuando se supera un cierto umbral de frecuencia ν_0 , que depende del metal iluminado. Es decir, si se ilumina el metal con luz de menor frecuencia, no emite electrones.

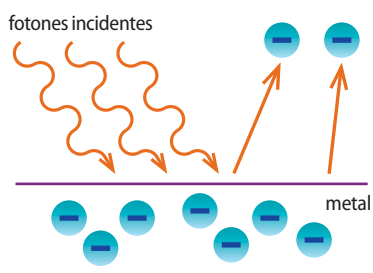
- Para una misma frecuencia, el número de electrones emitidos crece con el aumento de la intensidad luminosa, pero su energía cinética permanece constante.

- A partir de la frecuencia umbral, la energía cinética de los electrones aumenta en forma proporcional a la frecuencia de la luz incidente.

Si bien la fotoelectricidad fue descubierta por Heinrich Hertz en 1887, la explicación del efecto fotoeléctrico recién fue efectuada por Albert Einstein en 1905. Einstein explicó el efecto fotoeléctrico suponiendo que la cuantificación de energía, propuesta por Planck para la emisión de radiación, también era válida para describir su propagación a través del espacio. Podía suponerse que la luz estaba formada por haces de cuantos de energía llamados **fotones**. Cada fotón tiene una cantidad de energía dada por la expresión: $E = h \cdot \nu$. Al incidir sobre el metal, esta energía es comunicada a un solo electrón, el cual invierte una cierta cantidad de energía (E_u) en desprenderse del metal, quedando el resto en forma de energía cinética del electrón (E_c).

Por lo tanto:

$$h \cdot \nu = E_u + E_c$$



La energía E_u explica por qué existe una frecuencia umbral ν_u que comunica solo la energía suficiente para liberar al electrón del material, pero sin que disponga de energía cinética extra. Esta cantidad E_u se llama **función de trabajo** y depende de cada material.

Espectros de emisión y absorción. Modelo de Bohr

El físico escocés Thomas Melvill observó en 1752 que el espectro de luz emitido por gases incandescentes era distinto de los espectros continuos emitidos por sólidos y líquidos. Al hacer pasar la luz que emitían por un orificio y luego por un prisma, no obtuvo una sucesión continua de colores sino manchas, cada una de un color, separadas por espacios oscuros. Si se hace pasar esta luz por delgadas rendijas, se obtienen los llamados **espectros de líneas de emisión**, distintos para cada tipo de gas.

En el siglo XIX, el físico alemán Gustav Kirchhoff observó que, haciendo pasar la luz blanca emitida por un sólido a alta temperatura, por una masa de gas a menor temperatura, podían observarse líneas negras en el espectro. Parecía que los distintos gases podían absorber luz de determinadas longitudes de onda, por lo que a estos espectros se los llamó **espectros de absorción**.

La técnica desarrollada para identificar distintos gases mediante su espectro se denominó **espectroscopia**, la cual, a pesar de experimentar un desarrollo muy importante, permanecía como un fenómeno sin explicación. Algunos científicos comenzaron a buscar relaciones numéricas entre las longitudes de onda de las líneas espectrales, como el científico suizo Johann Balmer (1825-1898), quien planteó la fórmula sencilla para expresar los valores correspondientes a las líneas espectrales del hidrógeno en la zona visible:

$$\lambda = b \cdot \left[\frac{n^2}{n^2 - 2^2} \right]$$

donde $b = 364,46$ nm, es una constante determinada empíricamente por Balmer, y n es un número entero mayor que 2 y distinto para cada línea.

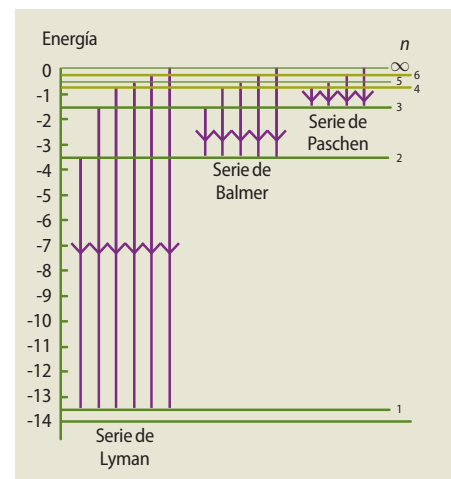
Así, por ejemplo, para $n = 3$ el hidrógeno emite una línea en $\lambda = 656,2$ nm. Esta fórmula empírica predecía bien la ubicación de las líneas, pero no las explicaba.

Desde el descubrimiento del electrón como partícula fundamental y del núcleo por parte de Ernest Rutherford en 1911, el modelo atómico había llegado a una contradicción con la teoría clásica del electromagnetismo: un electrón que girara alrededor del núcleo debía emitir energía en forma de ondas electromagnéticas, lo cual lo haría caer rápidamente sobre el núcleo, es decir, el modelo atómico era inestable.

En 1913, Niels Bohr realizó una interpretación teórica de las líneas del espectro del hidrógeno, fundada en las ideas cuánticas, además de corregir el modelo atómico anterior volviéndolo estable. Supuso que en el átomo de hidrógeno existen ciertos estados estacionarios. Mientras el electrón se mantiene en uno de ellos, no irradia energía. La emisión de energía se produce cuando el electrón pasa de un estado de energía E_i hasta otro estado de energía menor E_f . Es decir, la emisión correspondiente es:

$$h \cdot \nu = E_i - E_f$$

La cantidad $h \cdot \nu$ es el cuanto de energía que lleva el fotón emitido durante la transición entre los dos estados. Estas frecuencias posibles dependen de los estados estacionarios en los que puede existir el átomo de hidrógeno.



Cuando un electrón pasa de un nivel superior a uno inferior, se emite un fotón cuya energía es igual a la diferencia entre las energías de esos dos niveles. Como la frecuencia es proporcional a esa diferencia de energías, a cada posible salto le corresponde una frecuencia. Esta gama de frecuencias da el espectro característico del hidrógeno.



Louis Victor Pierre Raymond duque de

Broglie, nació el 15 de agosto de 1892 en Dieppe, Francia. En su tesis doctoral de 1924, propuso su teoría sobre la dualidad onda-partícula, por la que obtuvo el premio Nobel en 1929. Escribió muchos trabajos ampliamente reconocidos, incluyendo aquellos que demuestran su interés en las implicaciones filosóficas de la Física moderna: *La nueva Physics* (1939); *La revolución en Physics* (1953); *Physics y la Microphysics* (1960); y *Nuevas perspectivas en Physics* (1962). De Broglie murió en París, el 19 de mayo de 1987. Se había definido a sí mismo como una persona de mente más proclive a la teoría pura que a la experimentación o a la ingeniería, con una mayor tendencia a asumir visiones especialmente generales y filosóficas.

En forma esquemática, los postulados de Bohr para el átomo de hidrógeno son los siguientes.

- El electrón orbita al núcleo.
- El electrón solo se mueve en órbitas permitidas sin irradiar energía electromagnética. De esta forma su energía total permanece constante.
- La emisión o absorción de energía radiante se realiza cuando el electrón pasa de una órbita a otra.

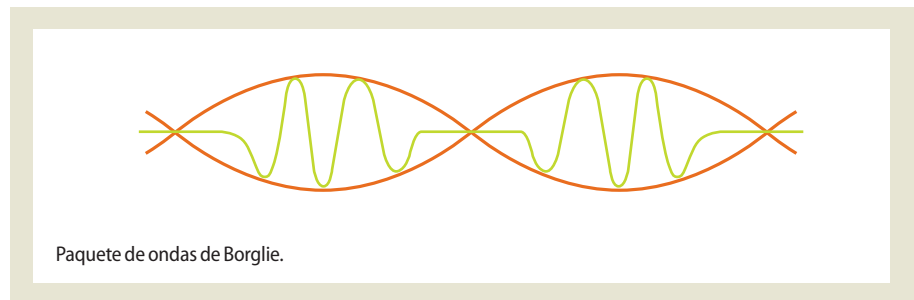
Este modelo, que aplicó por primera vez la idea de cuantificación de la energía, pudo explicar los espectros de emisión del hidrógeno y justificar la estabilidad del átomo. Fue un paso muy importante en la construcción de los modelos atómicos desarrollados posteriormente.

Las ondas de materia

Como Albert Einstein y Leopold Infeld reconocen en su libro *La evolución de la Física: (...) ha sucedido a menudo que el desarrollo de una analogía entre fenómenos aparentemente sin relación, ha dado origen a un verdadero progreso de la misma. (...) Es fácil, sin embargo, encontrar analogías superficiales, que en realidad no expresan nada; pero descubrir ciertas propiedades comunes escondidas bajo superficies exteriores de aspectos diferentes y formular, sobre esta base, una teoría nueva, constituye un trabajo de creación de un gran valor. El desarrollo de lo que se llama mecánica ondulatoria, que fue iniciado por De Broglie y Schrödinger (...) es un ejemplo típico del alcance de una analogía feliz y profunda que da origen a una importantísima teoría física.*

Louis Victor de Broglie (1892-1987) presentó en 1924 su tesis *Investigación de la teoría de los cuantos*, donde sugería que así como los fotones pueden ser considerados corpúsculos, la recíproca podía ser válida. O sea, la materia también debía poseer propiedades ondulatorias y comportarse como ondas. De esta manera proponía asociar a todo cuerpo una onda de longitud $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$, donde h es la constante de Planck y $m \cdot v$ la llamada cantidad de movimiento, que es el producto de la masa por la velocidad de un cuerpo.

Sin embargo, es necesario hacer la siguiente aclaración: un cuerpo puede ser descrito como una onda, siempre que ésta no sea una onda monocromática única sino un conjunto de ondas. Una onda única se extiende de manera ilimitada en el espacio, por lo tanto no resulta aplicable a la descripción de un objeto que tiene una determinada ubicación en cada instante. Es necesario entonces asignarle un paquete de ondas superpuestas que se desplazan a velocidades ligeramente diferentes. Las compensaciones entre sus crestas y valles determinan el paquete que, en el modelo presente, se desplaza a la velocidad del corpúsculo y puede asociarse a él.



Paquete de ondas de Broglie.

Las ideas de De Broglie fueron presentadas por Einstein en el célebre congreso de Solvay, en 1924.

Certidumbre e incertidumbre

En el congreso de Solvay de 1924, Erwin Schrödinger había escuchado atentamente a Einstein mientras presentaba las ideas del francés De Broglie. El organizador del congreso le pidió, en el viaje de regreso, que preparara un seminario sobre las ondas de materia. Al profundizar en el tema, aplicó las nuevas ideas al estudio del átomo y enunció, en 1926, la ecuación de onda que permite describir el comportamiento del electrón y reconstruir su espectro de emisión según frecuencias muy precisas.

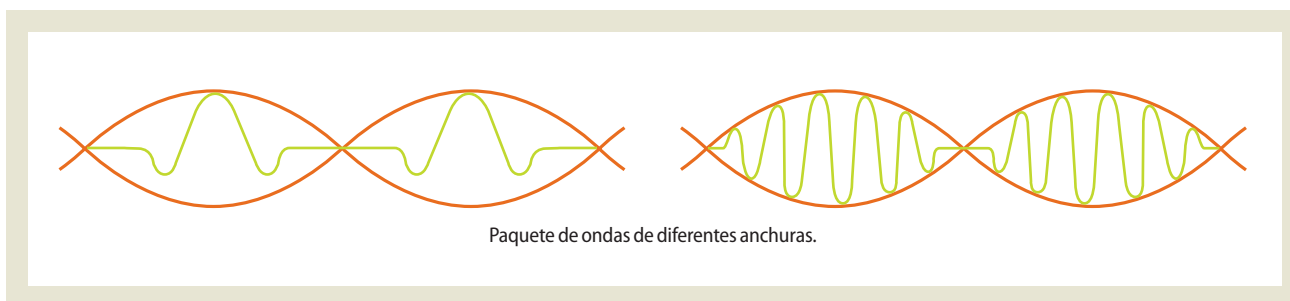
Los electrones pueden ser considerados como vibraciones eléctricas distribuidas alrededor del núcleo. La combinación de esas vibraciones, y la función de onda planteada para el electrón, pudo explicar lo que Bohr buscó con sus desarrollos teóricos. Poseer una ecuación que permitiera predecir la observación con tanto ajuste parecía tranquilizador para los físicos y un logro indudable de la teoría ondulatoria.

Una ecuación de esta clase respeta el pensamiento determinista clásico: si se conoce el estado inicial de un sistema y las leyes de las fuerzas aplicadas, es posible predecir con exactitud el resultado de cualquier medición sobre dicho sistema.

Pero muy pronto arribarían a escena los trabajos de Werner Heisenberg y Max Born, quienes interpretarían la función de onda de Schrödinger en términos probabilísticos. Es decir, que la ecuación refleja solamente la probabilidad de la presencia de una partícula en una región del espacio.

Por ejemplo, si un cuerpo en movimiento puede considerarse como un grupo de ondas del tipo de De Broglie, entonces existe un límite fundamental para la medición: si el grupo de ondas es muy apretado, la posición de las partículas se mide con mucha precisión, pero no su longitud de onda. En cambio, si el paquete de ondas es ancho, entonces es posible alcanzar precisión en la determinación de la longitud de onda, pero no en la localización de la partícula.

Se llama **escuela de Copenhague** al grupo de físicos dirigido por Niels Bohr que se formó a fines de la década de 1920 en Copenhague, Dinamarca. Bohr creó el Instituto para la Física Teórica que junto con las universidades alemanas de Munich y Göttingen, fue líder en la investigación atómica. Bohr fue galardonado, en 1922, con el Premio Nobel de Física por sus trabajos sobre la estructura atómica y la radiación. En 1943 huyó a los EE.UU escapando del nazismo; allí trabajó en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton (Nueva Jersey) donde se desempeñó como asesor científico para el proyecto Manhattan, en el laboratorio de Los Álamos, en Nuevo México. En 1945 volvió a Dinamarca para reasumir la dirección del Instituto de Física Teórica. En 1958 publicó otra obra famosa: *Física atómica y el conocimiento humano*. Murió en Copenhague, el 18 de noviembre de 1962.



Paquete de ondas de diferentes anchuras.

El **principio de incertidumbre** expresa que el límite de precisión en estas determinaciones viene dado por la expresión:

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

donde Δx es la **indeterminación** o imprecisión que corresponde a la posición, y Δp la que corresponde a la cantidad de movimiento $p = m \cdot v$, o sea el producto de su masa por su velocidad.

Cabe aclarar que este principio no establece la imposibilidad de calcular con mucha precisión la posición del electrón, pero no puede determinar con la misma precisión su estado de movimiento en el mismo experimento.



¿Clásica o cuántica?

En el siguiente ejemplo se indica cómo se puede determinar si el modelo clásico resulta apropiado para analizar los fenómenos que abarca un determinado problema, o es necesario utilizar el enfoque cuántico. Es suficiente hacer los análisis solo en orden de magnitud. A) Sistema formado por un electrón orbitando un núcleo, en el nivel fundamental. Masa: 10^{-31} kg; velocidad: 10^6 m/s; la longitud característica corresponde al radio: 10^{-10} m.

B) Sistema formado por Júpiter orbitando al Sol. Masa: 10^{26} kg; velocidad: 10^4 m/s; distancia orbital media: 10^{11} m. La acción, producto de la masa por la velocidad y por la longitud característica para el átomo, 10^{-35} J·s, del mismo orden que la constante de Planck: 10^{-34} J·s, necesita tratamiento cuántico.

La acción para el planeta Júpiter es 10^{41} J·s, que guarda una diferencia de 75 órdenes con la constante de Planck y justifica que las manifestaciones cuánticas no se hagan evidentes y admita un tratamiento clásico.

Como puede observarse, el valor tan pequeño de la constante de Planck justifica que los aspectos cuánticos de la realidad hayan sido difíciles de evidenciar y esquivos a la experimentación hasta el siglo XX.

Correspondencia y complementariedad

A lo largo del presente capítulo, se mostró cómo algunas teorías físicas importantes evidenciaron sus limitaciones y fueron cambiando. Así, como la Física relativista puede reducirse, en ciertas condiciones, a la Física clásica, es posible esperar que la Física cuántica pueda vincularse en igual sentido con la clásica.

El hecho de que la Física cuántica permita arribar a los mismos resultados que la Física clásica al tratar con números cuánticos elevados fue llamado por Bohr **Principio de correspondencia**. Este principio ha jugado un papel muy importante en el desarrollo de la teoría cuántica de la materia.

Podría preguntarse por qué falla la teoría clásica en la explicación de los fenómenos del microcosmos, ya que se trataría solo de una reducción de escalas. Sin embargo, analizando el proceso en detalle, se entiende que esta reducción tiene un límite. Por ejemplo, el comportamiento de una única molécula de oxígeno no está descrito por las leyes de los fluidos.

Una primera idea sería que la Física clásica no resulta aplicable cuando se ha reducido demasiado la escala de la realidad para la que fue planteada. Pero, ¿cuánto es demasiado?

Existe una magnitud que permite evaluar si es necesario un enfoque cuántico o el enfoque clásico resulta satisfactorio. Esta magnitud recibe el nombre de **acción de un sistema** y se define como el producto entre la cantidad de movimiento ($p = m \cdot v$) por la longitud característica, es decir, aquella que mejor permita representar el tamaño del objeto, por ejemplo, la altura en el caso de un edificio.

Si el valor de la acción del sistema es del orden de la constante de Planck, es posible utilizar la teoría cuántica para su tratamiento. Si por el contrario, es mucho mayor, es posible estudiar el fenómeno por medio de la Física clásica.

Otro aporte de Bohr es el enunciado del **Principio de complementariedad** que se refiere a la necesidad de asumir el comportamiento ondulatorio y corpuscular como dos descripciones igualmente válidas de los objetos. Que un objeto se comporte o no como onda depende solamente de la elección del aparato usado para observarlo. Para el enfoque cuántico, toda observación supone una interacción con lo que se desea observar y, por lo tanto, se altera en mayor o menor medida la realidad observada. En la teoría cuántica no tiene validez la idea clásica de que un objeto existe independientemente de que se lo observe. En palabras de Bohr:

La descripción de un sistema atómico antes de una medida está indefinida, teniendo solo la potencialidad de tomar ciertos valores con cierta probabilidad.

Es equivocado pensar que la tarea de la física es averiguar cómo es la naturaleza. La física se refiere a lo que nosotros podemos decir de ella.

Esta limitación que impone la mecánica cuántica al conocimiento de la naturaleza nunca fue aceptada por algunos físicos; en particular por Einstein, quien escribió sobre el tema, en una carta dirigida a M. Born, en 1944:

La mecánica cuántica es, ciertamente, impresionante. Pero una voz interior me dice que no es aún la última palabra. Ud. cree en un Dios que juega a los dados y yo en un mundo de existencia objetiva y leyes ordenadas y completas a las que, de un modo salvajemente especulativo, trato de capturar (...) Ni siquiera el enorme éxito de la teoría cuántica me hace creer en el fundamental juego de dados, aunque nuestros colegas más jóvenes interpreten esto como un signo de senilidad. No tengo dudas de que llegará el momento en el que veremos cuál de nuestras actitudes instintivas es la correcta.

Física en la Argentina

LA REPÚBLICA ARGENTINA TIENE UNA LARGA HISTORIA EN FÍSICA QUE COMENZÓ EN EL AÑO 1909 EN LA UNIVERSIDAD DE LA PLATA. POSTERIORMENTE, LAS UNIVERSIDADES DE BUENOS AIRES Y DE CÓRDOBA FUNDARON DEPARTAMENTOS DE FÍSICA, Y SE CREARON LOS CENTROS DE INVESTIGACIÓN DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA EN BARILOCHE Y BUENOS AIRES.



La Universidad Nacional de La Plata tiene el orgullo de poseer el Departamento de Física más antiguo de nuestro país. Está integrado por grupos que trabajan en temas específicos, como la teoría de partículas y la resonancia magnética nuclear. En la Universidad de Buenos Aires, la Licenciatura en Ciencias Físicas se cursa en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, en la Ciudad Universitaria, donde a su vez existen diferentes grupos de investigación como, por ejemplo, en óptica. En este mismo predio se encuentra el Instituto Argentino de Física del Espacio (IAFE), dependiente del CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas).

El Centro Atómico Constituyentes se encuentra en Buenos Aires y pertenece a la Comisión Nacional de Energía Atómica. El trabajo allí se concentra en Física nuclear y Física de materia condensada. Entre sus principales actividades están el uso de rayos de partículas para el tratamiento del cáncer y el desarrollo de celdas solares con aplicaciones específicas. El Centro Atómico Bariloche, de amplio reconocimiento internacional, se ubica frente al lago Nahuel Huapi, en Río Negro. Allí se encuentra el Instituto Balseiro al que se incorporan, tras un exigente examen, estudiantes de todo el país que terminaron su segundo año de Física o carreras del área, para completar sus estudios de grado y luego realizar el doctorado. Entre los temas que se desarrollan en la Universidad Nacional de Córdoba se pueden mencionar la física atmosférica, la teoría de la relatividad, la teoría de materia condensada y aplicaciones en resonancia magnética.

Actualmente existen departamentos de Física en muchas otras universidades del país.

Si bien los físicos argentinos mantienen un destacado prestigio internacional, los inconvenientes económicos a los que se ve continuamente sometido nuestro país generan graves consecuencias, como por ejemplo:

- partida de científicos de primer nivel a países que les brindan mayores oportunidades profesionales;
 - cantidad mucho mayor de físicos teóricos que experimentales, debido a la falta de fondos para nuevos equipos;
 - insuficiente asociación de la Física con la industria.
- La Física es una ciencia muy importante para el desarrollo social y sostenido de cualquier nación, por lo cual es fundamental promover la actividad científica en esta área pero generando al mismo tiempo el espacio donde los profesionales egresados de nuestras instituciones puedan desarrollarse dentro de la Argentina.

Luego de la lectura del texto investiguen sobre los científicos de la Argentina.

- a. ¿Qué proporción de egresados de Física continúa sus trabajos en el exterior?
- b. ¿Cómo salen preparados estos egresados en comparación con el resto del mundo?



IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

- El valor de la **velocidad de la luz** en el vacío permanece constante aun cuando la fuente o el observador estén en movimiento relativo.
- Dos sucesos pueden ser simultáneos para un observador y no simultáneos para otro.
- El tiempo transcurre más lentamente en un sistema en movimiento, comparado con un sistema en reposo relativo.
- La longitud de un cuerpo medida en la dirección del movimiento por un observador externo se reduce en esa misma dirección.
- La energía en reposo de un sistema y su masa son magnitudes equivalentes. La energía está cuantizada.
- **Principio de equivalencia:** un observador no puede distinguir si se encuentra en un campo gravitatorio o en un sistema de referencia acelerado.
- La **materia** es discontinua y presenta propiedades ondulatorias.
- La **luz** presenta un comportamiento dual, ya sea como una onda o como un haz de partículas.
- **Principio de incertidumbre:** no es posible determinar simultáneamente y con precisión absoluta la posición y la velocidad de una partícula.
- **Principio de correspondencia:** una teoría nueva debe conducir a los mismos resultados que la anterior, en los aspectos en los que esta última está respaldada por los datos experimentales.

Fórmulas

$$E = h \cdot \nu$$

Energía radiante

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

Masa relativista

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

Principio de incertidumbre

$$E_0 = m \cdot c^2$$

Energía en reposo

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

Dilatación del tiempo

$$E_c = m \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2$$

Energía cinética

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

Contracción de la longitud

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

Longitud de onda asociada a una partícula

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. ¿El espacio es absoluto? ¿Y el tiempo?
2. Según la Teoría de la relatividad: ¿todo es relativo?
3. Cuando observamos las estrellas del cielo, ¿las vemos tal cual se encuentran en ese mismo instante? Justifiquen.
4. ¿La rapidez de la luz depende del movimiento de la fuente? ¿Y del observador?
5. ¿Qué es la dilatación del tiempo?
6. ¿Qué es la contracción de la longitud?
7. ¿En qué dirección se observa la contracción de la longitud?
8. Si un astronauta pudiera viajar a una rapidez próxima a la de la luz, ¿vería contraerse su propia mano? ¿Por qué?
9. ¿Qué significa la expresión $E_0 = m \cdot c^2$?
10. ¿Qué dice el principio de equivalencia?
11. ¿Qué afirma del principio de correspondencia? ¿Cómo se aplica a la mecánica de Newton?
12. ¿Qué sostiene el principio de incertidumbre?
13. ¿Qué significa que la luz presenta un comportamiento dual?
14. ¿Una pelota de tenis también presenta comportamiento dual?
15. ¿Qué quiere decir que la energía está cuantizada?
16. Una varilla de 1 metro de longitud se desplaza paralelamente a su longitud con una rapidez de $0,8c$ con respecto a un observador. Calculen la longitud medida por el observador.
17. Calculen la rapidez de una varilla para que su longitud sea la cuarta parte que su longitud en reposo.
18. Una nave espacial del futuro tiene 200 m de longitud y se desplaza con una rapidez de $0,7c$ respecto de la Tierra. ¿Cuál es la longitud medida desde nuestro planeta?
19. Un astronauta pretende viajar a Vega, una estrella ubicada a 26 años luz de la Tierra.
 - a. ¿Cuál debe ser la rapidez de su nave con respecto a nuestro planeta para que el tiempo medido desde su nave sea de 10 años?
 - b. ¿Qué tiempo indicará un reloj situado en la Tierra?
20. Un astronauta de 30 años de edad inicia un viaje espacial a una rapidez de $1,6 \cdot 10^8$ m/s. Si un reloj en la Tierra indica que han pasado 40 años, ¿cuál es la edad del viajero?
21. La rapidez de traslación de la Tierra es de 30 km/s. Si su masa es de unos $6 \cdot 10^{24}$ kg, ¿cuál es la masa que mide un observador fijo con respecto al Sistema Solar?
22. ¿Cuál es la cantidad de energía equivalente que posee un gramo de agua?
23. ¿Cuál es el valor de la energía de un fotón de luz roja de $6 \cdot 10^{-7}$ m de longitud de onda?
24. ¿Cuál es la energía de los fotones de una onda de radio de 7 MHz de frecuencia?
25. ¿Cuál es la frecuencia de onda de un fotón cuya energía es $9 \cdot 10^{-17}$ J?
26. La frecuencia mínima para emisión fotoeléctrica en el sodio es de $4,39 \cdot 10^{14}$ Hz. ¿Cuál es la mínima energía con la que se podrán arrancar electrones al sodio?
27. ¿Cuál es el valor de la incertidumbre en la rapidez de un electrón sabiendo que la incertidumbre en su posición es de $0,3 \cdot 10^{-10}$ m? ($m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg).
28. ¿Cuál es el valor de la velocidad de un electrón cuya longitud de onda asociada es de $0,129 \cdot 10^{-10}$ m?
29. ¿Cuál es la longitud de onda asociada a un electrón que se desplaza a una rapidez de $7,29 \cdot 10^6$ m/s?

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen en cada caso.

- 1 La rapidez de la luz en el vacío es constante.
- 2 La rapidez de la luz depende de la rapidez de la fuente que la emite.
- 3 La rapidez de la luz depende de la rapidez a la que se desplaza el observador.
- 4 Para una misma persona, el tiempo transcurre más lentamente si se encuentra en movimiento muy veloz que si se encuentra en reposo.
- 5 Según la teoría de la relatividad, todo es relativo.
- 6 La simultaneidad es un fenómeno relativo.
- 7 La incertidumbre es una consecuencia de la imperfección de los sistemas de medición.
- 8 A mayor incerteza en la medición de la posición, menor es la incerteza en la medición de la velocidad de una partícula.
- 9 La luz presenta un comportamiento dual.
- 10 Los electrones no presentan un comportamiento dual.
- 11 Según la teoría electromagnética, un electrón que gira alrededor del núcleo debería emitir energía radiante.
- 12 Una partícula tiene una onda asociada que depende de su rapidez.
- 13 El principio de inercia vale solo en sistemas de referencia inerciales.
- 14 La longitud de un objeto puede contraerse o expandirse según el signo de la velocidad de un objeto.
- 15 La física cuántica no es aplicable a fenómenos macroscópicos.
- 16 El tiempo es relativo; la duración de un evento, no.
- 17 Una luz de mayor frecuencia extrae más electrones que otra de menos frecuencia.
- 18 Las ecuaciones de Newton se aplican cuando la teoría de la relatividad no resulta válida.
- 19 El valor de la masa se puede expresar en unidades de energía.
- 20 Un astronauta vería que su nave se acorta si viaja a velocidades muy altas.