

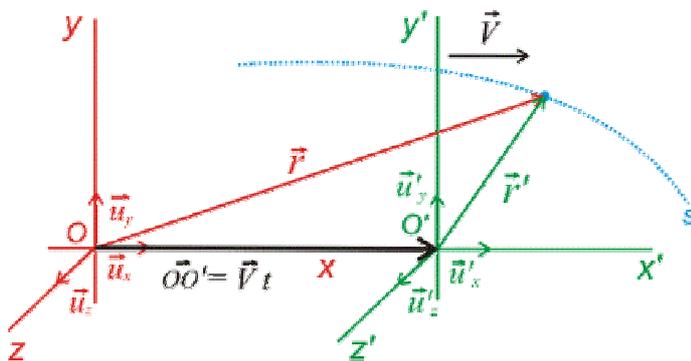
La mecánica de Newton explica el comportamiento de cuerpos que se mueven a pequeñas velocidades (respecto a la velocidad de la luz), pero falla cuando estos poseen velocidades cercanas a la luz. Para explicar este caso tenemos que recurrir a la mecánica relativista de Einstein. Hemos de hablar de la relatividad especial, que ocurre cuando los sistemas de referencia se mueven con velocidad relativa constante; y de la relatividad general, en sistemas acelerados gravitacionalmente.

La teoría de la relatividad especial está basada en la relatividad de Galileo y Newton (relatividad galileana) y en el experimento de Michelson y Morley.

## Relatividad de Galileo y Newton

Para estos científicos, las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales (reposo relativo o mru).

Supongamos dos observadores O y O', que se encuentran inicialmente en la misma posición y que se mueven relativamente el uno respecto al otro con movimiento uniforme.



$$OO' = v \cdot t$$

Si  $t = t'$ , las transformaciones galileanas de las coordenadas de posición son:

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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

En esta teoría el tiempo es independiente del observador, considerándose una realidad absoluta y universal.

Lo mismo ocurre con las distancias, que también resulta invariable en esta teoría.

Por el contrario, la velocidad es variable al pasar de un sistema de referencia inercial a otro:

$$v'_{x'} = v_x - v$$

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

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

Finalmente, la aceleración es también invariable en los sistemas de referencia inerciales.

Según todo esto, se llega a las siguientes conclusiones:

1. Las leyes básicas de la naturaleza son las mismas para observadores que se encuentran en sistemas de referencia inercial.
2. Es imposible conocer si un sistema de referencia está en reposo absoluto o se mueve con movimiento rectilíneo uniforme.

## Problema de la luz. Experimento de Michelson y Morley

Las transformaciones galileanas son respaldadas por experiencias cotidianas: un objeto cae de la misma forma en el interior de un avión, de un tren o dentro de casa.

Sin embargo estas no son válidas para explicar la electrodinámica de Maxwell: [Hendrik Lorentz](#) y un poco antes [Woldemar Voigt](#) habían comprobado que las [ecuaciones de Maxwell](#), que gobiernan el [electromagnetismo](#), no cumplían las transformaciones de Galileo cuando el sistema de referencia inercial varía (por ejemplo, cuando se considera el mismo problema físico desde el punto de vista de dos observadores que se mueven uno respecto del otro). En particular las

ecuaciones de Maxwell parecían requerir que la velocidad de la luz era constante (razón por la que se interpretó que esa velocidad se refería a la velocidad de la luz respecto al [éter](#)).

El [experimento de Michelson y Morley](#), realizado en 1887, pretendía medir la velocidad absoluta de la Tierra con respecto al éter. El montaje experimental conseguía dividir un rayo de luz en dos rayos en sentidos opuestos entre sí gracias a un juego de espejos. Un rayo se dirigía en el sentido del movimiento terrestre y otro en el opuesto. Se esperaba que existiera diferencia de velocidades entre ambos rayos. Era como intentar medir la diferencia de velocidades de los rayos de luz que emite los faros delanteros y las luces de posición traseras de un coche que se mueve a gran velocidad. Aparentemente la luz emitida en la dirección del movimiento debería moverse a mayor velocidad que la trasera. Pero no se detectaba tal diferencia en el experimento. EL resultado no logró explicarse hasta 1905. En realidad, la pregunta que hacían Michelson y Morley a la Naturaleza era: ¿si un móvil emite luz en el sentido de su movimiento y en el contrario, en qué sentido se mueve más rápido la luz? La física clásica diría que en el sentido del movimiento. La respuesta de la Naturaleza fue que la velocidad es la misma en ambos sentidos.

Por tanto, la [velocidad de la luz](#) permanecía constante para cualquier velocidad y movimiento relativo al supuesto éter omnipresente y, además, independientemente del sistema de referencia en el cual se medía (contrariamente a lo esperado de aplicar las transformaciones de Galileo).<sup>6</sup> Por tanto la hipótesis del éter quedaba descartada y se abría un problema teórico grave asociado a las transformaciones de Galileo. Hendrik Lorentz ya había encontrado que las transformaciones correctas que garantizaban la invariancia no eran las de transformaciones de Galileo, sino las que actualmente se conocen como [transformaciones de Lorentz](#).

Durante años las transformaciones de Lorentz y los trabajos de [Henri Poincaré](#) sobre el tema quedaron inexplicados hasta que [Albert Einstein](#), un físico desconocido hasta 1905, sería capaz de darles una interpretación considerando el carácter relativo del [tiempo](#) y el [espacio](#). Einstein también había sido influido por el físico y filósofo [Ernst Mach](#).<sup>7</sup> Einstein leyó a Ernst Mach cuando era estudiante y ya era seguidor suyo en 1902, cuando vivía en [Zúrich](#) y se reunía regularmente con sus amigos Conrad Habicht y Maurice Solovine (Véase [Academia Olimpia](#)).<sup>8</sup> Einstein insistió para que el grupo leyese los dos libros que Mach había publicado hasta esa fecha: [El desarrollo de la mecánica](#) (título original, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Leipzig, 1883) y [El análisis de las sensaciones](#) (*Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen*, Jena, 1886).<sup>7</sup> Einstein siempre creyó que Mach había estado en el camino correcto para descubrir la relatividad en parte de sus trabajos de juventud, y que la única razón por la que no lo había hecho fue porque la época no fue la propicia.<sup>9</sup> El artículo de 1905 de Einstein, titulado *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*,<sup>1</sup> cambió radicalmente la percepción del espacio y el tiempo que se tenía en ese entonces. En ese artículo Einstein introducía lo que ahora conocemos como **teoría de la relatividad especial**. Esta teoría se basaba en el [principio de relatividad](#) y en la constancia de la velocidad de la luz en cualquier sistema de referencia inercial. De ello Einstein dedujo las ecuaciones de Lorentz. También reescribió las relaciones del [momento](#) y de la [energía cinética](#) para que éstas también se mantuvieran invariantes.

La teoría permitió establecer la [equivalencia entre masa y energía](#) y una nueva definición del [espacio-tiempo](#). De ella se derivaron predicciones y surgieron curiosidades. Como ejemplos, un observador atribuye a un cuerpo en [movimiento](#) una longitud más corta que la que tiene el cuerpo en reposo y la duración de los eventos que afectan al cuerpo en movimiento son más largos con respecto al mismo evento medido por un observador en el sistema de referencia del cuerpo en reposo.

## Postulados de la Teoría Especial de la Relatividad

Como decíamos arriba, Albert Einstein en 1905, sentó las bases de la Teoría Especial de la Relatividad. Él no conocía el experimento de Michelson-Morley, pero su teoría proporcionó una elegante explicación de los resultados. Esta se basa en un par de postulados:

**Principio de relatividad.** Las leyes de la física son idénticas en todos los sistemas de referencia inerciales. Este fue establecido inicialmente por Galileo, y es conocido como relatividad galileana.

La conclusión final es decir que no existe experimento alguno capaz de determinar la velocidad absoluta de un sistema de referencia inercial. Einstein agregó a los experimentos mecánicos de Galileo, cualquier tipo de experimento, incluyendo los ópticos y electromagnéticos.

**La velocidad de la luz en el vacío es siempre constante**, independientemente de la velocidad de la fuente emisora.

Otros científicos habían pensado antes en la conveniencia de estos dos postulados, pero llegaban a la conclusión de que eran incompatibles. Para romper esta incompatibilidad, Einstein nos dice que debemos olvidarnos que el tiempo y la longitud son absolutos.

## Relatividad de la simultaneidad

Según el tiempo absoluto de Newton dos sucesos separados en el espacio y que ocurren al mismo tiempo, son observados al mismo tiempo por todos los observadores. Por ejemplo, si un extraterrestre observa que dos explosiones estelares (supernovas) ocurren al mismo tiempo, entonces cualquier observador del universo observara las explosiones al mismo tiempo, es decir son simultáneas.

Pero desde el punto de vista de Einstein el tiempo es relativo, según la [dilatación temporal](#) vista anteriormente. En este caso los relojes situados en cada punto del sistema de coordenadas marcarán horas distintas según el observador. ¿Qué significa esto? Para entenderlo supongamos 2 observadores Jan e Ivette. Sucesos que ocurren al mismo tiempo en dos lugares separados vistos por Jan, no ocurren al mismo tiempo al ser observador por Ivette. Si Jan observa que la explosión de las supernovas son simultáneas, para Ivette no son simultáneas, primero explota una y después la otra. A esto se le llama relatividad de la simultaneidad.

Supongamos que Jan se encuentra dentro de un vagón de tren. El tren se mueve muy rápido pero siempre a velocidad constante. Jan se sitúa en el centro del vagón y lanza una señal luminosa. Puesto que se encuentra en el centro del vagón la luz de la señal luminosa llega a las paredes del vagón en el mismo tiempo. Para Jan son sucesos simultáneos, ocurren en lugares distintos (cada señal en una pared distinta) pero al mismo tiempo.

Supongamos ahora que Ivette se encuentra sentada en la estación cuando tiene lugar el lanzamiento de la señal luminosa. Ivette observa dos movimientos, el de la luz y el del tren. Hay que recordar una de las hipótesis más sorprendentes de la relatividad, la velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas de referencia. Por esto, para Ivette el rayo de luz que viaja en el mismo sentido que el tren tiene la misma velocidad que el rayo de luz que viaja en sentido contrario. Podemos decir que la velocidad de la luz es absoluta para todos los observadores.

Que observa Ivette, el rayo de luz que se dirige en sentido contrario al movimiento alcanza la pared del vagón antes que el rayo que se mueve en el sentido de la marcha.

Los sucesos que son simultáneos para Jan no lo son para Ivette. Con esto podemos decir que la observación depende del sistema de referencia y puesto que todo suceso físico depende de la observación nos encontramos que la relatividad revoluciona a toda la física. La realidad de lo observado depende del observador. Hay una realidad distinta para cada observador, esto quiere decir que la realidad no existe, puesto que no es absoluta.

Cuidado, las leyes de la física son las mismas para todos los observadores, son los resultados de estas leyes las que se diferencian entre un observador y otro.

## Transformaciones de Lorentz

Parece claro que las ecuaciones de transformación entre sistemas inerciales ([sistema de referencia](#) en el que las leyes del movimiento cumplen las [leyes de Newton](#) y, por tanto, la variación del [momento lineal](#) del sistema es igual a las fuerzas reales sobre el sistema) de Galileo no sirven cuando tratamos fenómenos que acontecen a velocidades próximas a la de la luz.

No vamos a hacer los cálculos, pero un complejo desarrollo matemático conduce a las nuevas ecuaciones de transformación entre ambos sistemas de referencia inerciales que se mueven con una velocidad relativa  $v$  en la dirección del eje X  $\left(\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right)$ :

$x' = \gamma \cdot (x - v \cdot t)$ $y' = y$ $z' = z$ $t' = \gamma \cdot \left(t - \frac{v}{c^2} \cdot x\right)$	$x = \gamma \cdot (x' + v \cdot t')$ $y = y'$ $z = z'$ $t = \gamma \cdot \left(t' + \frac{v}{c^2} \cdot x'\right)$
Transformaciones de Lorentz, permiten transformar las coordenadas de O en las de O'.	Transformaciones de Lorentz inversas, permiten transformar las coordenadas de O' en las de O.

Si la velocidad de la luz ( $c$ ) es mucho mayor a  $v$ , las transformaciones de Lorentz se convierten en las transformaciones de Galileo.

Pero, ¿cómo que quedan las velocidades?

Supongamos un cuerpo que se mueve en el eje X con velocidad  $v_x$  respecto al observador O. ¿Cuál será su velocidad respecto a O', si su velocidad relativa es  $v$  respecto a O?

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

Si la velocidad del cuerpo tuviese también componentes en y y en z:

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

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

## Dilatación temporal

Veamos como afecta las transformaciones de Lorentz a dos sistemas de referencias inerciales, uno fijo (O) y otro (O') que se mueve a velocidad  $v$  respecto a O (por ejemplo, en una nave espacial).

La teoría Especial de la Relatividad nos dice que el cronómetro situado en O' retrasa, por lo que visto desde nuestro sistema de referencia, todo parece transcurrir más lento en la nave espacial.

Nosotros mediremos:

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

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

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

## Contracción de longitudes

También las longitudes sufren contracciones en la dirección del movimiento:

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

## Equivalencia entre masa y energía

Otra de las consecuencias de la Relatividad Especial es que la energía total relativista de un partícula libre es:  $E = m \cdot c^2$

Esta ecuación muestra la equivalencia entre masa y energía, y ayudó al estudio de la energía nuclear, siendo la responsable teórica de las bombas atómicas y las centrales nucleares.

El valor de la masa relativista es:

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

$v$  es la velocidad de la partícula libre desde nuestro sistema de referencia inercial.

$m_0$  es la masa en reposo de la partícula, o masa inercial. Su valor es invariante para una partícula

$m$  es la masa relativista. Depende de  $v$ , y por tanto del sistema de referencia de medida.

De igual modo, la energía relativista de una partícula en reposo será invariante, pero la energía relativista total dependerá del sistema de referencia. Si  $m_0$  es distinta de cero, la partícula no podrá poseer una velocidad superior a  $c$ , pues por la fórmula se obtendría un número imaginario.

Según la Teoría de la Relatividad Especial, pues, ningún cuerpo podrá superar la velocidad de la luz en el vacío.

Al aumentar  $v$ , aumenta la masa relativista. Si aceleramos un cuerpo al aumentar su velocidad su masa aumenta. Y para seguir acelerando debemos incrementar el aporte de energía. En el límite, cuando la velocidad tiende a  $c$ , tendremos que la masa relativista sería infinita.

Los fotones poseen velocidad igual a  $c$ , siendo esto posible sólo si su masa en reposo es nula.

Por otra parte, podemos definir el momento lineal de una partícula:

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

Siendo la energía cinética de un cuerpo que se mueve con una velocidad relativa:

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

$m = \gamma \cdot m_0$  es la masa relativista de la partícula

$m_0 \cdot c^2$  es la masa en reposo de la partícula

Si tomamos la anterior energía cinética como un incremento de energía:

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

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

Fórmula que indica que una variación de energía se traduce en una variación de masa, y viceversa. Masa y energía son dos manifestaciones de la misma cosa, o bien, la masa es una forma de energía.

## Teoría General de la Relatividad

Hermann Minkowski propuso una fusión entre el espacio y el tiempo, el espacio-tiempo cuatridimensional, como magnitud invariante en la Relatividad.

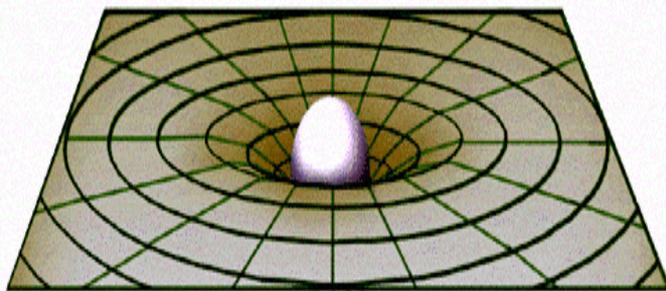
Si la distancia euclídea es un invariante frente a distintos sistemas de referencia que están rotados, en el espacio-tiempo, el invariante es el intervalo entre dos sucesos. Para la Relatividad, nuestras medidas de espacio y tiempo son como proyecciones independientes desde un determinado ángulo. Así, distintos observadores en distintos sistemas de referencia podrán medir diferentes valores para tiempos y distancias, pero alcanzando total acuerdo en el intervalo espacio-temporal de medida.

Einstein, en 1916, extendió los conceptos de Relatividad Especial para explicar la atracción gravitatoria entre masas (Teoría General de la Relatividad): supongamos 2 masas ejerciendo una fuerza gravitatoria entre sí; ¿cuánto tiempo tardan ambos cuerpos en sentir la nueva fuerza de atracción. Según la mecánica clásica el tiempo es nulo, pero la Relatividad Especial dice que nada viaja más rápido que la luz.

¿Cómo aclara la Teoría General de la Relatividad esta discrepancia? Es cuestión de geometría. Así matemáticos como Gauss, Bolya o Lobachevsky (siglo XIX) pusieron en duda la geometría de Euclides, desarrollando un conjunto de nuevas geometrías.

La Relatividad General nos dice que la atracción gravitatoria es una consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo: una masa curva el espacio-tiempo.

La figura muestra el espacio-tiempo, deformado por una masa.



La atracción que siente un astro es consecuencia de la deformación del espacio.

La Teoría General ha sido contrastada experimentalmente: predice que la luz es desviada por la presencia de masa, por campos gravitatorios, y este hecho fue observado (lente gravitatoria).