

Física Moderna
Teoría de la Relatividad Especial

Velocidad de la luz y Principio de Relatividad

La primera mención de lo que hoy conocemos como **Principio de Relatividad** se debe a Galileo, quien en su obra *Diálogo sobre los dos sistemas del mundo* (1632) señala la **imposibilidad de distinguir entre sistemas en reposo o con movimiento rectilíneo y uniforme**:

"Encerraos con un amigo en la cabina principal bajo la cubierta de un barco grande, y llevad con vosotros moscas, mariposas, y otros pequeños animales voladores ... colgad una botella que se vacíe gota a gota en un amplio recipiente colocado por debajo de la misma ... haced que el barco vaya con la velocidad que queráis, siempre que el movimiento sea uniforme y no haya fluctuaciones en un sentido u otro. ... Las gotas caerán ... en el recipiente inferior sin desviarse a la popa, aunque el barco haya avanzado mientras las gotas están en el aire... las mariposas y las moscas seguirán su vuelo por igual hacia cada lado, y no sucederá que se concentren en la popa..."

Galileo Galilei

Una consecuencia de lo expuesto es que **el movimiento es siempre relativo. Sólo podemos afirmar que un cuerpo se mueve o permanece en reposo respecto del sistema de referencia tomado**. La forma en que se mueve también dependerá del sistema elegido.

La mecánica de Newton cumple con el principio de relatividad, ya que según la Primera Ley o Principio de Inercia:

Si sobre un cuerpo no actúa ninguna fuerza, o todas las que actúan se compensan dando una resultante nula, **el cuerpo no variará su velocidad**. Esto es: si está en reposo, permanece en reposo; si se mueve, lo hará con movimiento rectilíneo y uniforme ($v = \text{cte}$)

Una consecuencia de la primera ley de Newton es que **reposo y movimiento rectilíneo y uniforme son estados de equilibrio del cuerpo (sobre el cuerpo no actúa fuerza neta alguna) y son físicamente equivalentes (sistemas de referencia inerciales)**.

Como todos los sistemas de referencia inerciales (SRI) son mecánicamente equivalentes, las leyes de Newton tienen la misma forma en todos ellos. Por tanto podemos reformular el Principio de Relatividad en la forma:

Es imposible determinar, mediante un experimento de tipo mecánico, si un sistema está en reposo o moviéndose con movimiento rectilíneo y uniforme.

Los descubrimientos realizados sobre electromagnetismo en la segunda mitad del s. XIX parecía que ponían en peligro la extensión de este principio más allá de los dominios de la mecánica.

Según las ecuaciones obtenidas por Maxwell la luz era una onda electromagnética que se propagaba con una velocidad que dependía de las características del medio (permitividad y permeabilidad). Lo realmente extraño de las nuevas ondas era que, aparentemente, no necesitaban medio alguno para propagarse, cosa que en la época era difícilmente asimilable. Todas las ondas conocidas hasta entonces necesitaban de un medio que propagara la perturbación (ondas mecánicas). La luz, en consecuencia, se propagaría también en un medio que llenaba el universo entero y al que se le dio el nombre de **éter lumínico**. La velocidad de propagación respecto del éter sería:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{\cancel{C^2}}{N \cdot m^2} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N \cdot s^2}{\cancel{C^2}}}} = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

El elevado valor de la velocidad de la luz hacía del misterioso éter una sustancia con propiedades poco comunes:

- Debería de tener una rigidez superior a la del acero.

- Debería de ser extremadamente tenue, ya que los planetas, por ejemplo, se mueven a través de él sin modificar su velocidad apreciablemente.

Lo esencial era que la luz tenía una velocidad determinada (300 000 km/s) respecto del éter, lo que llevaba a plantear cuestiones básicas para la Física.

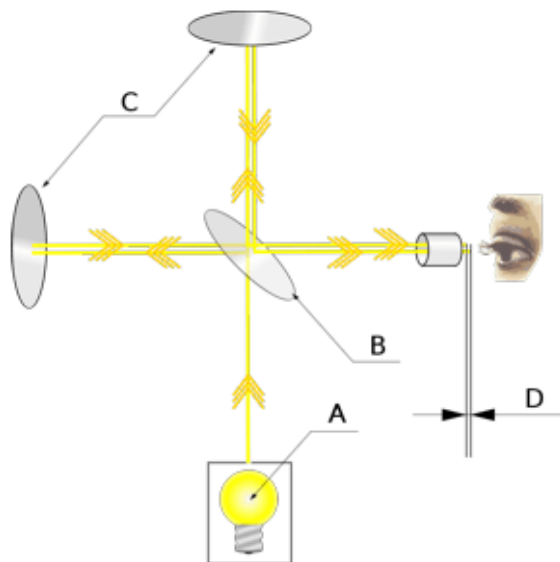
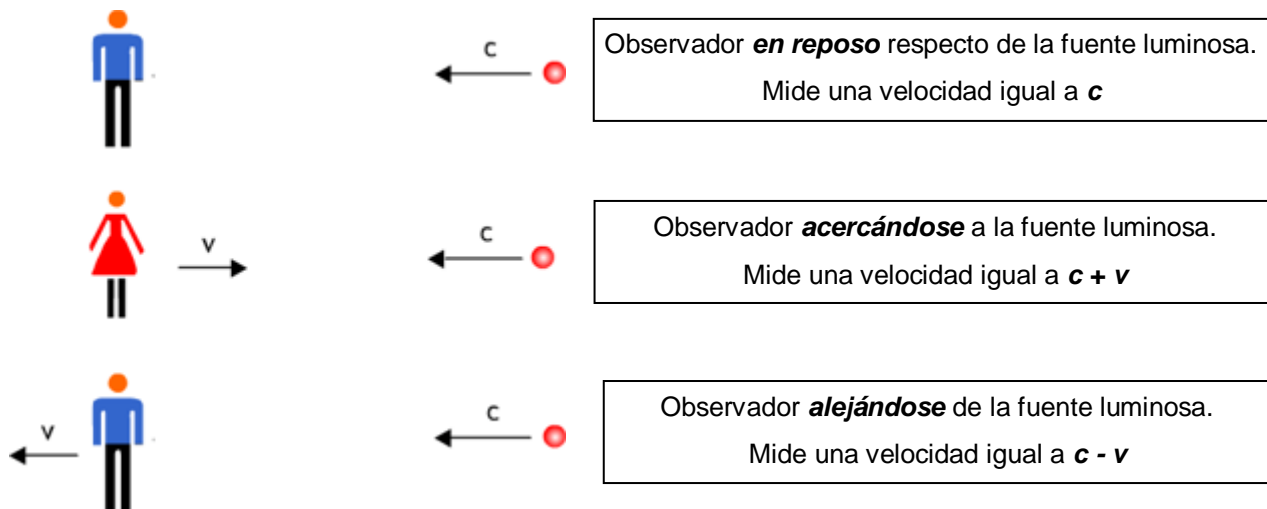
1. El Principio de Relatividad dejaba de ser válido.

Si suponemos un sistema de referencia situado en el éter, podríamos detectar si un sistema se mueve o no respecto de él. Había, por tanto, un sistema de referencia privilegiado y, mediante un experimento (de tipo óptico), podría detectarse el reposo o movimiento (absoluto), violándose de esta manera el principio de relatividad. **El éter jugaba el papel de un sistema de referencia absoluto.**

2. La velocidad de la luz dependía del movimiento relativo fuente-observador

Si la luz viaja con una velocidad c respecto del éter en el que se propaga, y un observador se acerca o se aleja de la fuente, debería obtener valores distintos para la velocidad de propagación de la luz.

El efecto es similar a cuando se corre a favor o en contra del viento. De ahí que el encontrar que la velocidad de la luz era distinta si se medía en reposo o en movimiento respecto de la fuente era equivalente a detectar el llamado "viento del éter".



Con el propósito de comprobar la dependencia de la velocidad de la luz con el movimiento fuente-observador, **Michelson y Morley** realizaron en **1887** un experimento de gran importancia en el desenvolvimiento posterior de la física

El experimento trataba de detectar la diferente velocidad de la luz cuando la fuente luminosa (o el observador) se acercan o alejan.

El aparato utilizado (interferómetro de Michelson) consta de un espejo semiplatedado B (que deja pasar la mitad de la luz y refleja la otra mitad) sobre el que incide un haz de luz procedente de A. La mitad de la luz atraviesa el espejo sin desviarse, llega al espejo superior, se refleja en él, y tras llegar nuevamente al espejo semiplatedado, llega al ojo del observador.

La otra mitad del rayo incidente se refleja en el espejo semiplatedado y alcanza el espejo de la izquierda, reflejándose en él. Tras atravesar el espejo central llega al ojo del observador produciéndose una interferencia entre ambos rayos. La figura e interferencia obtenida variará si lo hace el desfase de los rayos incidentes.

La Tierra gira alrededor del Sol a una velocidad de unos 30 km/s. Si consideramos que el haz horizontal del interferómetro está orientado en la dirección en que la Tierra se mueve, cabría esperar alguna diferencia de velocidad entre este rayo y el que se propaga verticalmente. Esto provocaría una diferencia en fase entre ambos que podría ser observada como franjas de interferencia. Si ahora rotamos el interferómetro la velocidad de la luz debería de variar debiendo de apreciarse un desplazamiento de las franjas de interferencia observadas.

El experimento fue repetido multitud de veces no obteniéndose el resultado esperado. La velocidad de la luz, por tanto, parecía independiente del movimiento de la fuente.

(Vídeo del experimento de Michelson y Morley: <http://www.youtube.com/watch?v=6-2HcBtlM-U>)

A principios del s. XX había que resolver, por tanto, algunos importantes problemas relacionados con la luz.

Teoría de la Relatividad Especial

Albert Einstein (1879-1955) (quien según sus propias palabras desconocía el experimento de Michelson y Morley) plantea una solución **orientada a salvar el Principio de Relatividad**. En el fondo estaba una clara apuesta por la **universalidad de las leyes de la física**. **El Principio de Relatividad debería de ser válido tanto para la mecánica como para el electromagnetismo y la óptica**.

Su planteamiento implicaba dos suposiciones básicas:

- **Prescindir del éter lumínico** y con él de la existencia de un sistema de referencia privilegiado respecto del cual podamos determinar si un cuerpo está en movimiento o reposo absoluto, lo que equivale a mantener la vigencia del Principio de Relatividad.
- **Mantener la afirmación de Maxwell** según la cual las ondas electromagnéticas (por consiguiente la luz) se propagan con una velocidad de 300 000 km/s , pero como ahora no existe el éter como medio de propagación, postula que esa velocidad es siempre la misma con independencia del movimiento de la fuente respecto del observador. Esta afirmación equivale a elevar la velocidad de la luz a rango de ley física.



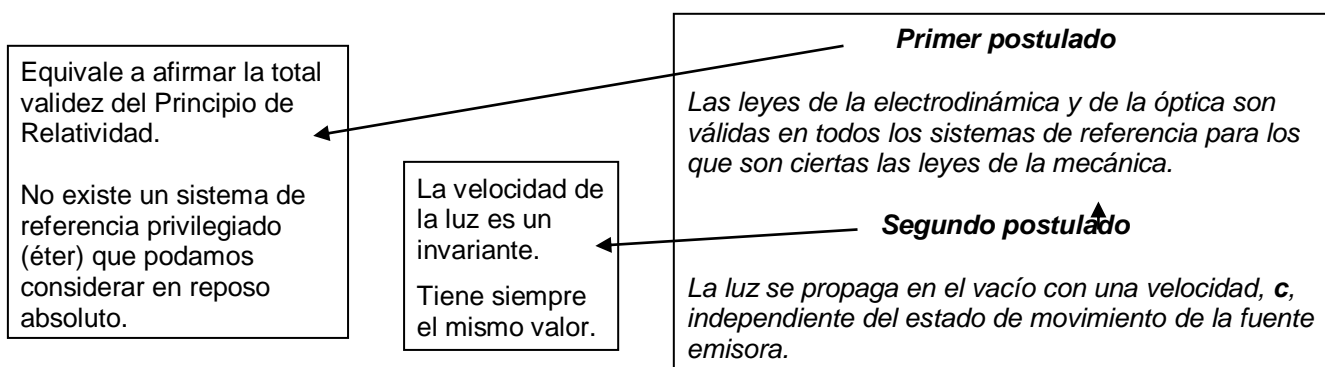
Albert Einstein en 1905

Einstein publicó en **1905** un total de cuatro artículos en la revista **Annalen der Physik**, de singular importancia en el desenvolvimiento de la física. Uno de ellos, **Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento**, contenía los postulados y el desarrollo básico de la que desde entonces se conocería como **Teoría de la Relatividad Especial (TER)**.

La teoría se sustentaba en dos postulados que recogen el razonamiento expuesto más arriba.

A pesar de la aparente simplicidad de los postulados, la TER daba solución a los problemas planteados, pero los conceptos de espacio y tiempo hasta entonces vigentes y fuertemente arraigados en la forma de pensar, deberían ser objeto de una completa revisión.

La Teoría de la Relatividad ha significado desde entonces una forma nueva de entender la realidad que a veces parece entrar en conflicto con el sentido común.



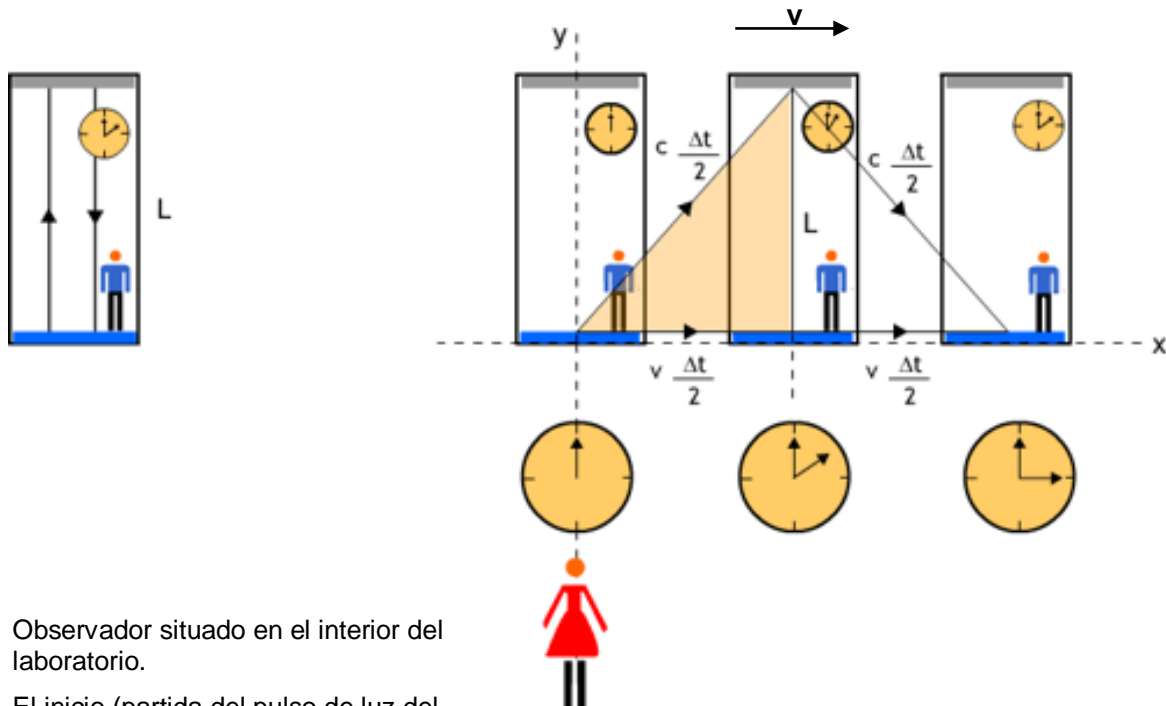
Se muestran a continuación algunas de las consecuencias derivadas de la aplicación de los postulados.

1. Dilatación del tiempo

Una de las conclusiones más sorprendentes de la TER es que **el tiempo deja de ser un absoluto que transcurre igual para todos los observadores (tal y como consideraba la mecánica de Newton) para convertirse en algo relativo que depende del movimiento de quien lo mide**.

En la figura se muestran dos observadores, uno (hombre) situado en el interior de un laboratorio que consideramos que se mueve, según el eje x , con una velocidad v respecto de otro (mujer) que suponemos en reposo y en el exterior del laboratorio.

Un pulso de luz parte de un emisor-receptor situado en el suelo del laboratorio, se refleja en un espejo situado en el techo y vuelve al suelo, donde es detectado.



Observador situado en el interior del laboratorio.

El inicio (partida del pulso de luz del emisor situado en el suelo) y final del suceso (llegada al receptor del suelo) **ocurren en el mismo lugar.**

Para determinar el inicio del suceso y su final usa un mismo reloj.

Observador situado en el exterior. **Se considera en reposo.** El laboratorio se mueve respecto de él.

El inicio del suceso y el final **ocurren en lugares diferentes.**

Para medir el inicio y el final del suceso usa relojes diferentes.

El observador situado en el interior del laboratorio (de altura L) ve que el pulso parte y llega al suelo invirtiendo para ello un tiempo:

$$c = \frac{2L}{\Delta t_{\text{Mov}}}; \quad \Delta t_{\text{Mov}} = \frac{2L}{c} \quad \Delta t_{\text{Mov}} = \text{Tiempo medido por el observador en movimiento}$$

El observador situado en el exterior ve al otro moviéndose con velocidad v hacia la derecha, por lo que observa que el rayo describe una trayectoria oblicua. Aplicando Pitágoras al triángulo señalado:

$$\left(\frac{c \Delta t_{\text{Rep}}}{2}\right)^2 = L^2 + \left(\frac{v \Delta t_{\text{Rep}}}{2}\right)^2; \quad \left(\frac{c \Delta t_{\text{Rep}}}{2}\right)^2 - \left(\frac{v \Delta t_{\text{Rep}}}{2}\right)^2 = L^2$$

$$\Delta t_{\text{Rep}}^2 \frac{(c^2 - v^2)}{4} = L^2; \quad \Delta t_{\text{Rep}} = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} \quad \Delta t_{\text{Rep}} = \text{Tiempo medido por el observador en reposo}$$

Comparando:

$$\left. \begin{aligned} \Delta t_{\text{Mov}} &= \frac{2L}{c} \\ \Delta t_{\text{Rep}} &= \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} \end{aligned} \right\} \Delta t_{\text{Rep}} = \frac{\frac{2L}{c}}{\frac{\sqrt{c^2 - v^2}}{c}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{2L}{c} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t_{\text{Mov}}$$

$$\Delta t_{\text{Rep}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t_0 = \gamma \Delta t_{\text{Mov}} \quad \text{Donde: } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \boxed{\gamma \geq 1}$$

Supongamos que el laboratorio se mueve respecto del observador situado fuera a una velocidad igual a $0,90c$ (90 % de la velocidad de la luz) y que el observador situado en el laboratorio obtiene que la luz tardó $1,000$

$$\Delta t_{\text{Rep}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t_{\text{Mov}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,90)^2 c^2}{c^2}}} 1,000 \text{ s} = 2,294,1,000 \text{ s} = 2,294 \text{ s}$$

s en hacer el recorrido indicado. El observador situado fuera (y que consideramos en reposo) medirá que la luz tarda en realizar ese recorrido:

Obtenemos que el mismo suceso requiere un tiempo mayor para el observador considerado en reposo. **El reloj del observador situado en el interior del laboratorio atrasa respecto del reloj del observador considerado en reposo.**

El tiempo transcurre más lentamente para el observador en movimiento. El tiempo se dilata cuando nos movemos a velocidades próximas a las de la luz.

Si estamos diciendo que es imposible determinar de manera absoluta si un observador está en reposo o moviéndose con movimiento rectilíneo y uniforme no parece muy apropiado hablar de observador en reposo y observador en movimiento (cualquiera de los dos puede considerarse en reposo). De ahí que en física relativista se empleen los conceptos de **tiempo propio y tiempo impropio**.

Tiempo propio (t_0) es el medido por el observador para el cual el instante en el que se inicia el suceso y el que marca su final se miden en el mismo lugar (o con un mismo reloj).

En nuestro ejemplo el observador situado en el interior del laboratorio mide el tiempo propio (t_0).

Cuando para el observador el inicio y final del suceso tienen lugar en diferentes lugares (tiene que emplear distintos relojes para medir), se dice que mide el tiempo impropio (t).

En nuestro ejemplo la mujer situada fuera del laboratorio mide el tiempo impropio (t)

Cualquier intervalo de tiempo impropio (Δt) es siempre mayor que el de tiempo propio (Δt_0)

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t_0 = \gamma \Delta t_0 \quad \boxed{\Delta t = \gamma \Delta t_0}$$

Para el ejemplo resuelto más arriba:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta t_0 = 1,000 \text{ s} \\ \gamma = 2,294 \end{array} \right\} \Delta t = \gamma \Delta t_0 = 2,294 \cdot 1,000 \text{ s} = 2,294 \text{ s}$$

2. Contracción de las longitudes

Como para ambos observadores la velocidad de la luz debe de ser exactamente la misma, y teniendo en cuenta que el tiempo medido por ambos observadores no es el mismo, hemos de concluir que el espacio medido tampoco ha de ser igual:

$$c = \frac{\Delta L_{\text{Mov}}}{\Delta t_{\text{Mov}}} ; \Delta L_{\text{Mov}} = c \Delta t_{\text{Mov}}$$

$$c = \frac{\Delta L_{\text{Rep}}}{\Delta t_{\text{Rep}}} ; \Delta L_{\text{Rep}} = c \Delta t_{\text{Rep}} = c \gamma \Delta t_{\text{Mov}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta L_{\text{Mov}} = c \Delta t_{\text{Mov}} \\ \Delta L_{\text{Rep}} = c \gamma \Delta t_{\text{Mov}} \end{array} \right\} \frac{\Delta L_{\text{Mov}}}{\Delta L_{\text{Rep}}} = \frac{\cancel{c} \Delta t_{\text{Mov}}}{\cancel{c} \gamma \Delta t_{\text{Mov}}} = \frac{1}{\gamma}$$

$$\Delta L_{\text{Rep}} = \gamma \Delta L_{\text{Mov}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta L_{\text{Mov}}$$

En el supuesto anterior ($v = 0,90c$) si el observador situado en el laboratorio (considerado en movimiento) mide una distancia de 10,00 m, el observador considerado en reposo medirá:

$$\Delta L_{\text{Rep}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta L_{\text{Mov}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,90)^2 c^2}{c^2}}} 10,00 \text{ m} = 2,294 \cdot 10,00 \text{ m} = 22,94 \text{ m}$$

Las distancias (medidas en la misma dirección del movimiento) se contraen para un observador en movimiento respecto de uno que consideramos en reposo.

De forma análoga a lo que hemos visto para el tiempo se definen la **longitud propia** y la **longitud impropia**

Longitud propia (L_0) es la medida por el observador para el cual los puntos que determinan los extremos de la longitud a medir están en reposo, así que puede medir la longitud como diferencia entre las coordenadas de los puntos inicial y final.

En nuestro ejemplo la mujer situada en el exterior del laboratorio mide una longitud propia (L_0), cuando mide, por ejemplo, la distancia recorrida por éste.

Cuando para el observador los puntos que determinan los extremos de la longitud a medir no están en reposo se dice que mide una longitud impropia (L)

En nuestro ejemplo el hombre situado en el interior del laboratorio mide una longitud impropia (L), cuando mide, por ejemplo, la distancia recorrida.

Cualquier longitud propia (L_0) es siempre mayor que la longitud impropia (L)

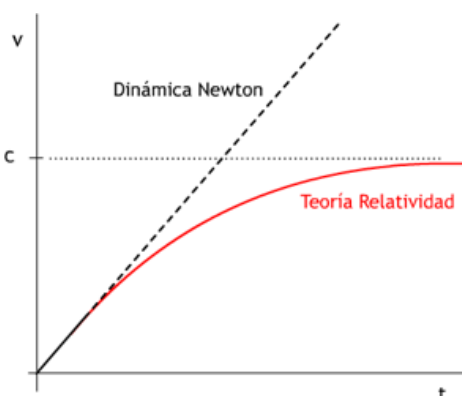
$$\Delta L_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta L = \gamma \Delta L \quad \Delta L_0 = \gamma \Delta L$$

El significado profundo de la dilatación del tiempo y la contracción de longitudes radica en que si aceptamos los postulados de la TER, el tiempo y el espacio dejan de ser magnitudes independientes para estar íntimamente relacionadas.

Los sucesos ya no tienen lugar en un espacio y en un tiempo independientes entre sí (tal y como se suponía en la mecánica newtoniana) para tener lugar en un **continuo espacio-tiempo** en el cual **ambas magnitudes están conectadas**.

3. La velocidad de la luz es un límite superior para cualquier entidad física

Si algo pudiera tener una velocidad igual o superior a la de la luz, ésta nunca podría propagarse respecto de ella con velocidad c , lo que viola uno de los postulados. Esta consideración es de suma importancia en la TER, pudiendo, incluso, tomarse como punto de partida de la misma. El propio Einstein declaró que *"la Teoría de la Relatividad es un nuevo tipo de mecánica caracterizada por el hecho de que ninguna velocidad puede superar a la de la luz"*.



La existencia de un límite superior de velocidades entra en contradicción con la segunda ley de Newton ($F = m a$), ya que según la dinámica newtoniana si aplicamos una fuerza a un objeto éste aumentaría su velocidad sin límite alguno.

En la gráfica se muestra la diferencia entre la dinámica de Newton y la TER. Ambas coinciden cuando $v \ll c$, pero en la TER la velocidad de la luz es un límite máximo infranqueable.

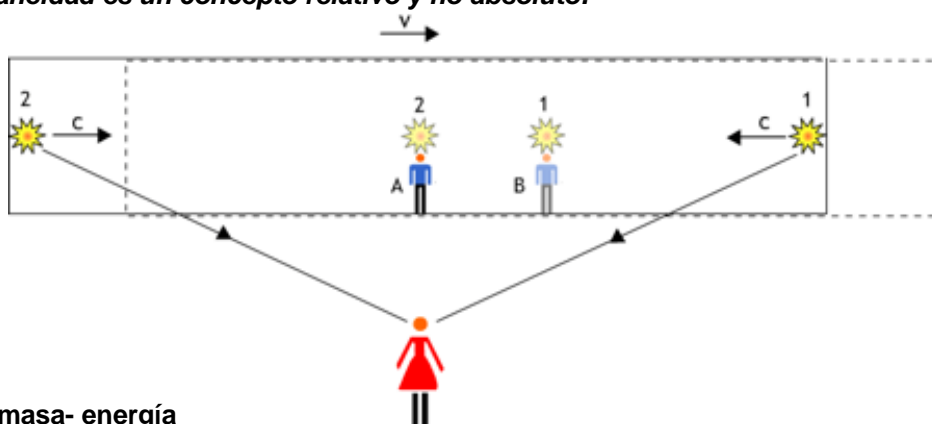
Los postulados de la TER obligan, por tanto, a rehacer completamente la dinámica de Newton. La dinámica de Newton y la TER coinciden para velocidades muy inferiores a la velocidad de la luz

4. La simultaneidad de dos sucesos depende del sistema de referencia

Supongamos (ver figura) que se generan sendos destellos luminosos (1 y 2) en la parte delantera y trasera del vagón en el momento en que ambos puntos están equidistantes del observador situado fuera. Ambos destellos recorren el mismo espacio y, por consiguiente, alcanzarán al observador externo al mismo tiempo. **Éste concluirá, por tanto, que ambos destellos han sido simultáneos.**

El observador situado en el interior tiene una velocidad v hacia la derecha respecto del observador exterior y se dirige al encuentro del destello originado en la parte delantera (1) a una velocidad v . Al cabo de un tiempo t el vagón, y con él su ocupante, se desplaza un espacio $v t$, pasando de estar en la posición A a estar en la B. Este observador será alcanzado antes por el destello delantero y después por el que procede de la parte trasera. **Para él los destellos no son simultáneos.**

La simultaneidad es un concepto relativo y no absoluto.



5. Relación masa-energía

Tal y como se ha dicho más arriba la segunda ley de la dinámica de Newton resulta incompatible con los postulados de la TER. Había que construir, por tanto, una nueva dinámica adaptada a la nueva concepción del espacio-tiempo que subyace en la teoría de Einstein (espacio y tiempo son magnitudes mutuamente dependientes).

La expresión fundamental en dinámica relativista para una partícula relaciona su masa, energía y momento lineal en la forma:

$$E^2 = (m c^2)^2 + (p c)^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

Partiendo de esta expresión podemos llegar a algunas importantes conclusiones:

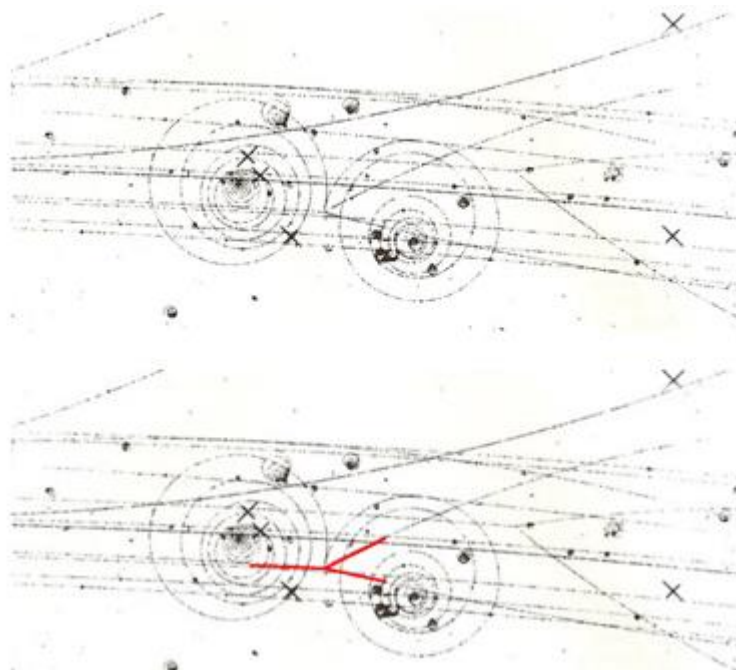
Si suponemos un sistema de referencia en el cual la partícula está en reposo, su momento lineal será nulo, obteniendo entonces:

$$E_0 = m c^2$$

E_0 es la llamada **energía propia** o **energía en reposo** de la partícula.

La ecuación plantea la equivalencia entre masa y energía. En palabras del propio Einstein: "masa y energía son esencialmente análogas, pues sólo son expresiones del mismo ente"

La TER apunta por tanto a la posibilidad de crear partículas con masa a partir de pura energía o la obtención de enormes cantidades de energía a partir de la aniquilación de pequeñas cantidades de materia. Esta última posibilidad condujo a la construcción de la primera bomba atómica.



Fotografía (superior) de trazas dejadas por partículas cargadas en un detector.

Un chorro de mesones K^- entra desde la izquierda. Su trayectoria se curva muy ligeramente (debido al campo magnético) en el sentido de las agujas del reloj ya que tienen una masa considerable.

En el centro de la imagen uno de los mesones se desintegra dando lugar a dos nuevas partículas cargadas (ver traza roja en la fotografía inferior) y un rayo gamma de alta energía. Este no deja traza alguna al carecer de carga, pero da lugar a un par electrón-positrón (creación de partículas a partir de energía) cuya traza en espiral puede apreciarse claramente.

La espiral de la derecha (curvada en el sentido de las agujas del reloj) pertenece al electrón y la de la izquierda (curvada en sentido contrario a las agujas del reloj) un positrón.

La ecuación que define la energía propia de una partícula permite expresar la masa en unidades de energía (lo que es muy útil cuando se trabaja con

partículas).

En física de partículas se toma como unidad de energía la adquirida por un electrón ($1,60 \cdot 10^{-19}$ C) cuando es sometido a una diferencia de potencial de 1 V. Esta unidad se denomina **electrón-voltio** y se abrevia como eV.

$$E = e V = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,67 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

La energía correspondiente a la masa en reposo de un electrón ($9,11 \cdot 10^{-31}$ kg) será:

$$E = m c^2 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} (3 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 8,20 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

$$8,20 \cdot 10^{-14} \text{ J} \cdot \frac{1 \text{ eV}}{1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 5,13 \cdot 10^5 \text{ eV} = 0,513 \text{ MeV} = 0,000513 \text{ GeV}$$

Se dice que la masa de un electrón son 0,000513 GeV. También se puede expresar de la forma siguiente: la masa de un electrón son $0,000513 \text{ GeV}/c^2$ (ya que $m = E/c^2$)

Siguiendo el mismo procedimiento podemos calcular la masa de un protón ($1,67 \cdot 10^{-27}$ kg):

$$E = m c^2 = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} (3 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 1,50 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

$$1,50 \cdot 10^{-10} \text{ J} \cdot \frac{1 \text{ eV}}{1,67 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 8,98 \cdot 10^8 \text{ eV} = 898 \text{ MeV} = 0,898 \text{ GeV}$$

NOTA: las masas admitidas para el electrón y el protón son de $0,000511 \text{ GeV}/c^2$ y $0,938 \text{ GeV}/c^2$, respectivamente

$$E_c = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ J} \cdot \frac{1 \text{ eV}}{1,67 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 7,2 \cdot 10^6 \text{ eV} = 7,2 \text{ MeV}$$

Resumen RELATIVIDAD GENERAL (Einstein, 1905)

Postulados de la relatividad:

- Las leyes de la física son idénticas para cualquier sistema inercial de referencia.**
- La velocidad de la luz tiene el mismo valor para cualquier sistema inercial.**

Consecuencias:

- 1.- El reposo o el movimiento uniforme de un sistema son indetectables desde el propio sistema de referencia.**
- 2.- En todo sistema de referencia en movimiento el tiempo transcurre más lentamente.**
- 3.- En todo sistema de referencia en movimiento los cuerpos se contraen en la dirección del movimiento.**
- 4.- En todo cuerpo en movimiento la masa aumenta.**

Además se observa que si superamos la velocidad de la luz las longitudes de los cuerpos, el tiempo transcurrido y la masa de los cuerpos tendrían valores imaginarios. También vemos que al aumentar la masa del cuerpo aumenta la energía necesaria para acelerarlo siendo infinita para $v=c$. Todo ello nos lleva a darnos cuenta de que

- 5.- No se puede superar la velocidad de la luz.**

Fórmulas:

Supongamos que, en un cierto sistema de referencia, dos sucesos ocurren en el mismo lugar y con un intervalo de tiempo t . En otro sistema de referencia que se mueve con velocidad V con respecto al primero, los dos sucesos ocurren con un intervalo de tiempo t' dado por la fórmula.

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

Si la longitud de un cuerpo *en reposo* es L , entonces su tamaño en movimiento, digamos L' , será menor, de acuerdo con la fórmula:

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

Existe una equivalencia entre la masa y la energía expresada por la fórmula:

$$E = mc^2$$

Un cuerpo de masa m que se mueve con velocidad V posee, en virtud de su movimiento, una energía igual a $\frac{1}{2} mV^2$. En la teoría de la relatividad, la energía de movimiento del cuerpo resulta ser

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Un cuerpo que se mueve aumenta su masa, adquiriendo una nueva masa m' dada por la fórmula:

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

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

se llama el factor de Lorentz

Teoría de la relatividad especial

Se entiende por sistema inercial aquel en el que es válida la primera ley de Newton `un cuerpo en reposo permanece en reposo, y un cuerpo en movimiento permanece en movimiento con velocidad constante y rectilínea, siempre que ninguna fuerza externa actúe sobre él o la resultante de todas ellas sea cero'

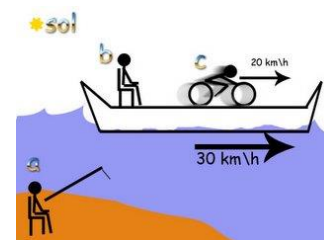
Teoría de la relatividad para tontos

La teoría de la relatividad de Einstein se divide en dos grandes teorías:

- Teoría especial de la relatividad. Formulada en 1905, es de la que voy a hablar en este post, y describe como se percibe el espacio y el tiempo en función del observador.
- Teoría general de la relatividad: Formulada en 1915, trata de explicar la gravedad, la fuerza más incomprensible de todas las fuerzas presentes en la naturaleza. Hablaré en otro post de ella.

Teoría especial de la relatividad.

Hasta la formulación de las teorías de Einstein se aceptaban como correctas la física de Newton sobre la inercia, la gravedad y el movimiento. Tenemos a dos tipos (B y C) que han decidido dar un paseo en barco. Es tan grande que tienen espacio suficiente para que uno de ellos, (C), se ponga a andar en bici por la cubierta mientras B lee el periódico. El lector observa como C se aleja de él a 20 km/h. Para el ciclista el lector permanece quieto con respecto al barco. Por otro lado tenemos a un pescador sentado en la orilla de la playa que observa a los dos, sin embargo para éste el ciclista no se mueve a 20 km/h, sino a 50 km/h, ya que tiene que sumar la velocidad del propio barco. Además, el lector no está quieto, sino que se mueve a 30 km/h, exactamente la velocidad del barco. Arriba del todo, en el sol, está colocado el malo de Superman IV, y observa la escena y concluye que el pescador se mueve a una gran velocidad (la velocidad que supone la rotación de la tierra alrededor del sol) y que el lector va un poco más rápido y el ciclista más rápido aún. La conclusión es que la velocidad de los cuerpos depende del observador.



Hasta aquí nada extraño, es algo que percibimos en cualquier experiencia cotidiana. Sin embargo, la física newtoniana percibe el tiempo como absoluto e independiente del observador, es decir, que si a la hora de salir el barco todos ponen a cero su cronómetro, a la llegada del barco pueden comprobar que siguen sincronizados y dan lecturas idénticas. Nuestra experiencia diaria nos dice que el tiempo es el mismo, independientemente de si vas en coche, andando, estás durmiendo o vas en avión. Pues no. Aquí es donde entra Einstein y dice que no, que el tiempo también depende del observador. Esta sorprendente conclusión es mucho más complicada de asimilar de lo que parece.

Según la teoría de la relatividad, el tiempo depende de la velocidad del observador, es decir que los cronómetros del lector, del pescador, de Superman y del ciclista darían diferentes resultados a la llegada del barco a tierra. El cronómetro del ciclista marcará menos tiempo que el del lector, éste menos que el pescador y éste menos que el de superman. Con la velocidad se produce una especie de compresión en el tiempo, transcurre de manera distinta. ¿pero de qué estamos hablando? este fenómeno de la variación del tiempo dependiendo de la velocidad ocurre así, efectivamente, pero sólo es perceptible a altísimas velocidades (cercanas a las de la luz). A escala humana la diferencia de tiempos es tan pequeña que es despreciable y sigue funcionando perfectamente la física de Newton, que considera al tiempo absoluto. De

todas formas, vamos a calcular la diferencia de tiempo que obtendría el ciclista con respecto al pescador.

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

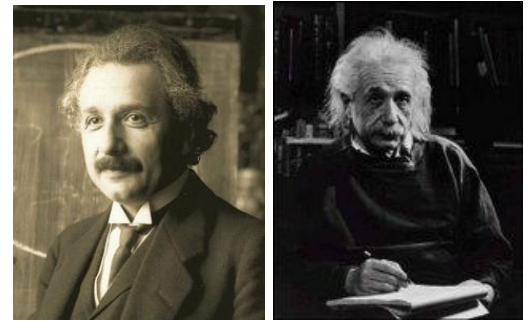
La fórmula para el cálculo es la del cuadro de la derecha. El tiempo t' se calcula en base al tiempo t (el tiempo medido desde el objeto móvil). Depende de la velocidad V (del objeto móvil) y la velocidad de la luz. Como vemos, la diferencia entre t' y t sólo es apreciable con velocidades cercanas a la de la luz.

Teoría de la relatividad especial-Resumen

(Jorge Gamboa Ríos: Dr. en Física, Universidad de Sao Paulo (Brasil), director del Departamento de Física, Facultad de Ciencia, Universidad de Santiago de Chile)

Después de algunos años de viaje, el gemelo astronauta regresa. ¿Han envejecido en la misma medida? La respuesta es no y la razón precisa de ello la dio Albert Einstein en 1905 cuando describió su teoría especial de la relatividad.

Para la persona que viajó en la nave espacial, el tiempo pasó más lentamente, es “más joven” que su gemelo en la Tierra. Este fenómeno se llama dilatación del tiempo y se explica con el segundo postulado de la teoría de la relatividad especial, que señala que la velocidad de la luz es la máxima velocidad que puede alcanzar un cuerpo en movimiento en el universo.



El tiempo transcurrido depende de donde hagamos nuestras mediciones, en este caso la Tierra y la nave espacial, que son los dos sistemas de referencia que utilizamos. Por otra parte, para ser consecuente con las definiciones de Einstein, debemos decir que esta dilatación del tiempo se acompaña -para el observador en movimiento, en este caso el gemelo viajero- por una contracción de las distancias.

Estos efectos ocurren a muy altas velocidades y son prácticamente imperceptibles a velocidades de la vida diaria.

La teoría de la relatividad especial ofrece además otros resultados. Uno de ellos es la famosa ecuación $E=mc^2$, que predice que la masa se transforma en energía y viceversa y que además explica por qué se produce la energía nuclear.

Otra de sus consecuencias es la antimateria. Cada partícula tiene asociada una antipartícula, es decir, otro corpúsculo con las mismas propiedades pero con carga eléctrica de signo contrario. Así, a un electrón le corresponde un positrón. Este conocimiento ha permitido producir nueva tecnología médica, como el tomógrafo de positrones (PET).

El papel que desempeñó Einstein en 1905 -y aquí reside el secreto de su genio- fue construir su teoría de la relatividad usando conceptos y resultados que estaban dispersos, pero que eran conocidos por todos los científicos de su tiempo.

Uno de ellos es el concepto de universalidad de los fenómenos físicos. Es decir, cuando se hace un experimento en un laboratorio (digamos en nuestra casa), una pregunta natural es:

¿Qué pasa si repetimos el mismo experimento, en las mismas condiciones, en otro lugar y en otro instante?

Obviamente, el resultado del experimento debería ser el mismo. En el lenguaje de la física de hoy, diríamos que los resultados del experimento son invariantes bajo traslaciones rígidas en el espacio y en el tiempo.

Ahora, modifiquemos un poco las condiciones previas. Por ejemplo, supongamos que un físico realiza un experimento arriba de un bus que se mueve a velocidad constante, ¿puede otra persona, que ve pasar el bus, obtener alguna información confiable del experimento?

La respuesta es sí, y se conoce desde la época de Galileo en el siglo XV. Él fue el primer científico que dio los argumentos necesarios para que tanto la persona que va en el bus como la que observa desde tierra obtengan la misma información. Este procedimiento es lo que se llama el principio de relatividad galileano.

Sin embargo, aunque este principio parece evidente en sí, no lo es si hacemos un experimento con ondas electromagnéticas.

De acuerdo con Galileo, si el bus se mueve con velocidad v con respecto al observador en tierra y el físico que está arriba del bus enciende una linterna, nos podemos preguntar: ¿Cuál es la velocidad de los fotones que salen de la linterna, vistos por la persona que está en tierra?

Con certeza Galileo respondería: “La velocidad de los fotones es $v+c$ ”, si tanto los fotones como el autobús van en el mismo sentido y con la misma dirección, mientras que el experimento nos hará ver que -contra nuestra intuición- los fotones se mueven a la velocidad c , tanto para el físico que va en el autobús como para la persona que está en la tierra.

Esta contradicción dio lugar a la primera hipótesis de la teoría de Einstein: **La velocidad de la luz es una constante universal y es independiente del observador**

La segunda hipótesis es más técnica en cuanto nos obliga a modificar las expresiones matemáticas que dicen cómo se relacionan las cantidades que caracterizan un evento, visto por dos observadores.

De acuerdo con Galileo, la manera de comparar la observación de un suceso desde dos sistemas de referencia (que se mueven a velocidad constante) es mediante una transformación, que hoy llamamos “de Galileo”. Esta transformación -que es una fórmula matemática- da el resultado $c+v$ mencionado arriba y establece, además, que el tiempo es absoluto e independiente del sistema de referencia.

La condición de independencia del tiempo de los sistemas de referencia es una condición obligatoria para que la fórmula de adición de velocidades de Galileo sea correcta.

Sin embargo, si los experimentos son consistentes con la primera hipótesis de Einstein, entonces la independencia del tiempo debería tener sólo una validez restringida, es decir, debería ser válida solo para objetos que se mueven a velocidades mucho menores que la velocidad de la luz.

Así el problema fundamental es generalizar el principio de relatividad de Galileo y al mismo tiempo encontrar un conjunto de ecuaciones que generalicen las transformaciones de Galileo.

Notablemente, varios años antes, el físico holandés Hendrik Lorentz ya se había dado cuenta de que los fenómenos electromagnéticos eran inconsistentes con los postulados galileanos y, por ello, postuló un conjunto de transformaciones ad hoc. Los físicos las llaman transformaciones de Lorentz y -aparte de contener las transformaciones de Galileo como un caso particular- son el punto de partida que usó Einstein para formular su segunda hipótesis: **Las leyes de la física son invariantes ante las transformaciones de Lorentz**

Las implicaciones físicas de estos dos postulados son enormes. Por un lado, el tiempo deja de ser un concepto absoluto (y, por lo tanto, el concepto de simultaneidad de los eventos) y ahora depende del sistema de referencia; y, por otro, pone una cota a la velocidad máxima que se puede alcanzar, a saber: ningún objeto se puede mover más rápido que la velocidad de la luz.

La teoría de la relatividad especial tiene múltiples pruebas experimentales que demuestran que ella es correcta. Por ejemplo, la producción de partículas inestables que se crean en la alta atmósfera, o bien la existencia de materia y antimateria, que es quizás la comprobación más espectacular. Este hecho es tan interesante que merece una explicación. En efecto, dentro de las implicaciones de la teoría de la relatividad especial es posible demostrar que el cuadrado de la energía de una partícula libre es proporcional al cuadrado de su momento.

Este hecho implica que, por lo tanto, la energía puede tener dos signos.

A priori esto es inconcebible porque tal objeto sólo puede tener energía positiva. Esta dificultad fue parcialmente resuelta por el físico inglés Paul A. M. Dirac en 1927 cuando descubrió la ecuación que lleva su nombre.

Dirac argumentó en términos del “mar” de Fermi, es decir, sostuvo que el espacio está lleno de partículas de carga $-e$ y cuando uno quita una de ellas, el vacío que queda es equivalente a poner otra partícula idéntica a la que se quitó pero con carga $+e$. A este vacío o “agujero” que queda en el “mar”, Dirac lo llamó antipartícula. En otras palabras, una antipartícula tiene las mismas propiedades que su partícula asociada, la misma masa, el mismo espín, excepto la carga eléctrica, que tiene signo contrario.

Esto explica por qué cuando se encuentran un electrón y un positrón se aniquilan y se producen dos fotones.

La existencia de partículas y antipartículas fue una gran predicción y fue comprobada experimentalmente en 1931 por Carl Anderson.

Toda la física de altas energías que se desarrolló desde la época de Dirac en adelante contiene la materia y la antimateria como elementos básicos, pero la explicación correcta para entender las antipartículas se conoció veinticinco años más tarde con el descubrimiento de la electrodinámica cuántica por Feynman,

Schwinger, Tomonaga y otros. Aquí, se reformula la electrodinámica de manera tal que se respetan los principios de la mecánica cuántica y la relatividad especial.

Si uno acepta la teoría de la relatividad tal como está y las consecuencias que implica para la física cuántica, tenemos todavía muchos problemas que resolver. Por ejemplo, cuál es razón para que en el universo no existan tantas antipartículas como partículas. Más aún: las mediciones astrofísicas demuestran que la razón entre antibariones y bariones es del orden de 10^{-10} , es decir, livianamente hablando, por cada antipartícula hay diez mil millones de partículas y por eso no hemos sido aniquilados por las antipartículas ¿Que pudo haber pasado en la historia del universo para que esta asimetría materia-antimateria fuera tan grande?

Los físicos no tienen todavía ninguna explicación definitiva para esto. Algunos sostienen que ciertas simetrías se perdieron por razones termodinámicas en el inicio del universo, mientras otros sostienen que la simetría de Lorentz no tenía por qué haber sido exacta en los primeros instantes del universo.

Este último punto de vista está muy en boga desde hace unos años y lo llamamos física más allá de la teoría de la relatividad.

Hay una larga lista de experimentos posibles que podrían poner de manifiesto esta nueva física y que, entre otras cosas, incluyen anomalías en el espectro de rayos cósmicos a energías muy altas. Estas ideas han dado lugar a una nueva línea de investigación en física de altas energías conocida como fenomenología de gravedad cuántica.

Quizás en esta suerte de ciclicidad histórica, Einstein, como Goethe, lanzó su pañuelo y son ahora los jóvenes quizás sólo dos o tres entre miles- los que deberían tener el coraje de recogerlo y enfrentarse a la herencia e ir más allá de lo que dejó un gigante.

DILATACIÓN DEL TIEMPO

La experiencia común nos indica que el tiempo transcurre tan rápido para una persona parada como para una en movimiento. En contraste, la teoría de la relatividad especial revela que el observador que está parado ve como el tiempo transcurre más lentamente para el observador en movimiento que para él.

Ejemplo práctico.

En una nave espacial se instala una fuente de luz que emite un impulso luminoso y se refleja en un espejo por lo que vuelve al punto inicial. $\Delta t_0 = \frac{2D}{c}$

Para el observador astronauta el tiempo que tarda la luz en hacer dos veces la distancia entre la fuente luminosa y el espejo es $2D$ dividido entre la velocidad de la luz.

Sin embargo, el observador parado en la Tierra, no mide la variación de tiempo como el intervalo de tiempo entre estos dos eventos. Este observador ve como la nave se mueve, por lo tanto el pulso de luz se desplaza en diagonal. Sin embargo, la velocidad de la luz sigue siendo la misma. Como la trayectoria de la luz es más grande y su velocidad es constante (según el postulado de la velocidad de la luz), se demuestra que el intervalo de tiempo para el observador en la tierra es mayor que el intervalo de tiempo para el astronauta que se mueve a gran velocidad.

$$c\Delta t = 2\sqrt{D^2 + \frac{v^2\Delta t^2}{4}} \quad s = \sqrt{D^2 + L^2} \quad 2s = c\Delta t \quad \Delta t = \frac{2D}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Como la velocidad del cuerpo nunca puede llegar a c , el resultado de la raíz cuadrada siempre será menor que 1, por lo tanto $\Delta t > \Delta t_0$

El problema de dicha fórmula es que la dilatación del tiempo es apreciable cuando la velocidad v es relativamente cercana a c . Las velocidades que podemos conseguir en la vida cotidiana son mucho menores que la velocidad de la luz.

CONTRACCIÓN DE LA LONGITUD

Debido a la dilatación del tiempo, aquellos observadores que se mueven a velocidad constante entre sí miden diferentes intervalos de tiempo entre los eventos. Por lógica, si el intervalo es diferente y la velocidad es constante, la longitud ha de ser diferente. Y la lógica en este caso nos da la razón.

Si la velocidad de una nave es $0,90c$, ambos observadores (el que está en la nave y el que está en la tierra) miden la misma velocidad. Por lo tanto, la distancia para el astronauta y la distancia para el observador

$$L = v\Delta t_0$$

$$L_0 = v\Delta t$$

desde la tierra serán, respectivamente:

Si los intervalos de tiempo son diferentes y la velocidad constante, me lleva a la conclusión de que la distancia es diferente. La distancia y el intervalo de tiempo son directamente proporcionales, por lo tanto, el astronauta que mide el menor tiempo, también mide la menor distancia. Las dos ecuaciones se relacionan de la siguiente manera:

$$L\Delta t = L_0\Delta t_0 \quad v = \frac{L_0}{\Delta t} \quad L = \frac{2D}{c} \quad \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = L_0 \frac{2D}{c} \quad L = L_0 \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

De esta fórmula deduzco que la distancia medida por un observador en movimiento respecto al evento es siempre mayor que la longitud medida por un observador en reposo respecto al evento: $L > L_0$

INCREMENTO DE LA MASA

La masa de un cuerpo depende, al igual que los intervalos de tiempo y las longitudes, del movimiento relativo respecto al observador. Cuando un objeto está en reposo con respecto al observador, la masa del objeto se denomina *masa en reposo*, m' . Cuando este objeto tiene una velocidad v con respecto a otro observador la masa se denomina *masa relativa*, m . La relación entre la masa en reposo y la masa relativa

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

viene dada por la ecuación:

Como el denominador es siempre menor que la unidad, la masa relativista es siempre mayor que la masa en reposo.

Este hecho sólo es apreciable a velocidades que tienden a la velocidad de la luz.

Con esta fórmula se demuestra que una masa en reposo finita nunca puede llegar a la velocidad de la luz. Ya que si v fuera igual a c , el denominador sería cero, y por lo tanto la masa relativista sería infinita, por lo que para acelerar este objeto sería necesaria energía infinita. Como esto no es posible, se demuestra que la velocidad de la luz es la máxima posible, por lo que ningún cuerpo con masa puede llegar a ella.

EQUIVALENCIA DE LA ENERGÍA Y LA MASA $E=mc^2$

Uno de los resultados más sorprendentes de la relatividad especial es que la masa es una forma de energía, por lo que la masa y la energía son equivalentes (la masa puede transformarse en energía y la

$$E = mc^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

energía en masa). De aquí la ecuación más famosa de Einstein:

Cuando un objeto acelera del reposo, adquiere una energía cinética. La energía total del cuerpo, E , es la forma de energía en reposo más la energía cinética. En relatividad la ecuación de la energía cinética es un poco más complicada que la usada normalmente:

De la equivalencia entre masa y energía obtengo que a partir de una pequeñísima fracción de masa se puede obtener una enorme cantidad de energía, como se ha demostrado en las reacciones de fisión de los núcleos pesados (en los que se basa la bomba atómica y las centrales nucleares) y en las reacciones de fusión de los núcleos ligeros (en los que se basan la bomba H y los mecanismos de producción de energía dentro de las estrellas, incluido el Sol).

De esta ecuación se deduce también que es necesaria una enorme cantidad de energía para obtener una mínima cantidad de materia (en los aceleradores de partículas se alcanzan energías muy elevadas que hacen posible crear nuevas partículas de materia).

SIMULTANEIDAD TEMPORAL

Para que dos eventos sean simultáneos, un observador ha de estar situado en el punto medio de la línea imaginaria que los une y "ver" en el mismo instante como suceden ambos eventos.

Por ejemplo, un observador A se encuentra quieto y recibe dos destellos luminosos en el mismo instante. Otro observador B, se encuentra unos metros más cerca de un foco que del otro. Como la velocidad de la luz es constante (según el segundo postulado de la teoría de la relatividad especial) y la distancia a un foco es menor que al otro, primero recibirá un destello y después otro. Entonces, dos sucesos pueden ser simultáneos para un observador y no serlo para otro.

REPERCUSIONES FILOSÓFICAS Y CIENTÍFICAS

Sería un error, o una mentira, decir que la teoría de la relatividad especial abrió los ojos del mundo entero. Todos sabemos que esta teoría, que suena tan bien nombrarla, es muy poco conocida por todo aquél que no sea físico o matemático. Pero esta situación también se vivió después de la revolución newtoniana y ahora todo el mundo conoce las leyes de Newton. No podemos remodelar nuestras vidas de acuerdo con la nueva física, hemos de dejar que la nueva física remodele nuestras vidas. Poco a poco se han ido imponiendo los conceptos que introdujo Einstein y dentro de no demasiado tiempo, cuando la teoría de la relatividad especial entre en el temario escolar, la teoría de Einstein llegará a mucha más gente.

La teoría de la relatividad especial supuso para la humanidad un toque de abstracción, no era lógica no se podía demostrar casi nunca, pero nunca se ha visto invalidada en ningún suceso. Esta teoría dejó una rara sensación científica pues no se podía demostrar. Pero a medida que pasa el tiempo, se ha ido demostrando y los físicos lo han ido aceptando.

La teoría de la relatividad especial dejó una rara conclusión a la sociedad que el pueblo llano no podía aceptar. Era algo ilógico e indemostrable. Para los físicos fue algo diferente, algunos la creyeron, otros no. Pero ahora casi todos están de acuerdo, la teoría de la relatividad especial se cumple siempre y por lo tanto es válida.

COMO COMPROBAR LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

Gracias a los relojes atómicos ahora se pueden efectuar mediciones de tiempo muy perfectas. Con estos relojes se pudo conseguir comprobar una de las premisas de Einstein, la dilatación del tiempo. Ante la imposibilidad de alcanzar velocidades relativistas necesarias para la clara comprobación se realizó una prueba. Se introdujeron 4 relojes atómicos en 4 aviones diferentes y los hicieron dar vueltas alrededor de la tierra. Otro reloj estaba en el Observatorio Naval de Washington. Cuando los aviones hubieron dado varias vueltas a la esfera terrestre (se les suministraba combustible sin aterrizar) se compararon los tiempos y se apreció una diferencia de $2,73 \cdot 10^{-7}$ segundos. Increíble pero cierto, la teoría de la relatividad especial de Einstein predecía $2,75 \cdot 10^{-7}$ segundos, por lo que quedó claramente demostrada, al menos por ahora.
