

ABSTRACT

My research is about the famous, but at the same time unknown, theory of relativity. It's attractive, beautiful and curious. Many of the questions that you ask yourselves will have answer here.

This work is the result of the summary of many books, many magazines and some programs. But adapted to the majority of people. It isn't necessary a great physics knowledge neither mathematics to understand what this theory is. It is true that it is explained very superficially.

I speak of the evolution of the theory, of related themes and of the own theory. I explain their different parts: dilation of the clocks, contraction of the space, increment of mass... and of course, $E=mc^2$. Einstein's masterpiece allows to delight with it, as if it was a beautiful sculpture.

INTRODUCCIÓN DEL TRABAJO

Este trabajo es el resultado de una investigación duradera y una traducción al lenguaje de un "físico" que está en el instituto. Han existido dos razones fundamentales por las que he escogido este tema. La primera es la profunda admiración que siento hacia el genio de Einstein quien, aunque tuvo que afrontar grandes dificultades, salió adelante y formuló la teoría más importante de la física moderna. La segunda razón es la curiosidad que tenía por su obra, debido al desconocimiento que, en general se tiene de la teoría de la relatividad especial.

He estructurado mi trabajo en cuatro bloques bien diferenciados que son:

- El estudio de la física clásica y de la luz para tener una pequeña idea del punto de partida de Einstein.
- La evolución de la teoría de la relatividad especial.
- El bloque central donde explico la teoría de la relatividad especial de Einstein.
- Las repercusiones de la teoría y pequeñas anécdotas que he encontrado durante el trabajo.

LA CONCEPCIÓN CLÁSICA DE LA RELACIÓN ESPACIO-TIEMPO Y DE LA LUZ

Galileo Galilei

Físico italiano estudioso de las matemáticas, la astronomía, la física y la medicina. En física estudió el movimiento de los proyectiles, demostrando que un proyectil lanzado desde un móvil en movimiento describe una trayectoria diferente dependiendo del sistema de referencia tomado.

Si lanzamos un proyectil hacia arriba y observamos su movimiento desde el vehículo veremos que sube y baja verticalmente, pero si lo observamos desde el terreno veremos que los dos movimientos se superponen.

Estas ideas son la base de la transformación de Galileo o Relatividad Galileana, que relaciona los movimientos observados desde dos sistemas inerciales siempre que éstos se realicen a velocidades pequeñas. (en relación a la velocidad de la luz)

En el estudio realizado por Galileo el tiempo es idéntico en ambos sistemas de referencia. El funcionamiento de dos relojes, situados cada uno en un sistema, es aparentemente independiente de la velocidad con que se mueven dichos sistemas. Esta característica hace fiable la transformación de Galileo para experiencias ordinarias, pero muchos años después se demostraría que no es aplicable a experiencias donde la velocidad se aproxima a la de la luz en el vacío. (300.000 Km./s)

Por lo tanto, los tiempos de los diferentes sistemas inerciales (aquellos en los que la primera ley de Newton es válida; se cumple que: "un cuerpo en reposo permanece en reposo, y un cuerpo en movimiento permanece en movimiento con velocidad constante en línea recta, siempre que ninguna fuerza externa actúe sobre él o la resultante de todas las fuerzas sea cero") dependen de la velocidad.

Sir Isaac Newton

Físico inglés, también matemático y astrónomo. Sentó los fundamentos de la física (las tres leyes fundamentales del movimiento y la ley de la gravitación universal) y en particular de la mecánica.

Newton expuso que un sistema de coordenadas es aquél en el que las estrellas están fijas. Como se demostró posteriormente, éste es un sistema inercial. Un sistema de coordenadas fijo en la tierra no es inercial, debido a que la tierra gira sobre sí misma y alrededor del sol, por lo que ningún sistema en la Tierra es completamente fijo.

Para la mayoría de los fines prácticos, y debido a la precisión de los experimentos, el hecho de que un sistema físico en la Tierra no sea inercial no varía los resultados lo suficiente como para causar confusión.

Hasta 1851 no se demostró la rotación terrestre. (mediante el Péndulo de Foucault)

Hendrik A. Lorentz (1853–1928)

Físico holandés que consiguió salvar la existencia del éter relacionando las coordenadas espacio–tiempo de dos sistemas.

Para explicar el resultado negativo del experimento de Michelson–Morley, afirmó que los cuerpos que se mueven a velocidades próximas a la velocidad de la luz sufren una contracción en la dirección del movimiento.

A partir de aquí, predijo que existía una contracción espacial y una dilatación temporal siempre que la velocidad relativa de los dos sistemas fuera próxima a la velocidad de la luz.

Los estudios realizados por Lorentz fueron importantísimos para revolucionar el concepto de la física clásica y fomentaron una de las creencias clave de la futura, pero próxima, física moderna. Mediante un conjunto de ecuaciones logró salvar la existencia del éter, principio de la relatividad.

Albert A. Michelson – Eduard W. Morley

Esta pareja de físicos de finales del siglo XIX realizaron uno de los experimentos más conocidos de la historia. Con él intentaron detectar el "viento del éter", dicho de otro modo, la existencia de un medio para el cual la luz se moviera y la velocidad de la luz que creían variable dependiendo de la posición dentro del éter.

Los experimentos, repetidos en numerosas ocasiones, dieron siempre resultados negativos y dejaron claro que la existencia del éter era falsa y que la velocidad de la luz era absoluta, es decir, invariable. Es igual formando un ángulo de 0° que de 90° con el "éter". (éste no existe) Pero los físicos de la época no aceptaron la no-existencia del éter, pues echaba por tierra todas las creencias existentes hasta entonces.

NATURALEZA Y VELOCIDAD DE LA LUZ

La velocidad de la luz está muy relacionada con la Teoría de la Relatividad, por esta razón estudiaré la evolución de los experimentos y teorías relacionadas con la luz: su naturaleza y su velocidad.

Respecto a su velocidad todos podríamos pensar, que la medición de la velocidad de la luz es igual que la del sonido, la de un cuerpo..., dicho de otra forma, basta con medir la distancia recorrida y el tiempo necesario para recorrerla.

Pero es mucho más difícil que eso, pues la velocidad de la luz es muy grande, de manera que tendremos que medir distancias muy grandes o intervalos de tiempo muy pequeños.

El primer intento de medir la velocidad de la luz fue a principios del siglo XVII y lo realizó Galileo.

Fue un método bastante sencillo e inválido, pues consistía en que dos observadores con linternas se situaban a 1.500 metros de distancia. Uno encendía su linterna y cuando el otro veía el destello encendía la suya, entonces tendrían la distancia (3 Km.) y el tiempo empleado, por lo tanto obtendrían la velocidad de la luz. (pero ésta es tan grande que no les daba tiempo a encender la linterna a tiempo y su error era enorme)

Varias décadas después, en 1675, Olaf Roemer observó que los satélites de Júpiter son eclipsados por el mismo Júpiter y que estos eclipses suceden más rápidamente cuando dicho planeta se acerca a la Tierra que cuando se aleja.

De estas observaciones concluyó que la velocidad de la luz era de $2,3 \cdot 10^5$ Km/seg. , dado que tardaba 22 minutos(en realidad tarda 16,5 minutos) en cruzar la órbita terrestre que mide $3 \cdot 10^8$ Km.

A mitad del siglo XIX Fizeau perfeccionó el experimento de Galileo e hizo pasar un haz de luz entre dos dientes de una rueda dentada, 8633m. detrás de la cual había situado un espejo que reflejaba este haz. Midiendo la velocidad de rotación de la rueda que era necesaria para que la luz no chocara contra el diente cuando volvía, se halló el valor aproximado de la velocidad de la luz, 310000km/s.

Hacia 1881 dos científicos estadounidenses, Michelson y Morley, intentaron demostrar que la velocidad de la luz variaba si ésta se movía a favor o en contra del movimiento de rotación de la Tierra. Este experimento dio un resultado negativo, lo que significaba que la velocidad de la luz es exactamente la misma en cualquier dirección. La velocidad de la luz en el vacío es siempre de 299792,458 km/s.(con un margen de 0.3 km.)

Hasta ahora he hablado de la velocidad de la luz y de los métodos utilizados para medirla. Ahora estudiaremos su naturaleza.

Hace ya varios siglos, Newton se había inclinado a favor de que la luz era una corriente de corpúsculos mientras que otros, entre ellos C. Huygens, defendían que la luz consiste en la propagación de una perturbación ondular del medio.

Las dos teorías explicaban lo que se sabía de la luz en el siglo XVIII, cada una explicaba ciertos fenómenos de la luz y dejaba sin explicación otros, pero la reputación de Newton decantó la balanza a su favor.

A finales de siglo apareció Thomas Young, que llevó a cabo un experimento crucial: hizo pasar un rayo de luz a través de dos ranuras estrechas y descubrió que se producían interferencias (anteriormente ya se sabía que cualquier clase de ondas producen interferencias al pasar por ranuras), este experimento parecía dejar claro que la luz estaba formada por ondas. Más tarde, Augustin Fresnel revalidó la teoría ondular, y aseguró que la luz estaba constituida por ondas transversales.

En 1864 J.C. Maxwell dio el golpe definitivo y expuso la teoría electromagnética de la luz. Es decir, la luz no es una onda mecánica sino una forma de onda electromagnética de alta frecuencia, éstas no necesitan ningún soporte material para su propagación(en cambio el sonido, sí).

Cuando todos aceptaban la teoría electromagnética y parecía la solución definitiva, apareció Max Planck y

formuló una hipótesis cuántica. Einstein sacó una idea de esta hipótesis: la luz está formada por pequeños corpúsculos, llamados fotones.

Después de siglos de investigaciones parece que finalmente se ha llegado a una teoría común: la luz tiene una doble naturaleza, en unos casos se comporta de una forma corpuscular y en otros con un carácter ondular, aunque nunca se manifiestan al mismo tiempo (las dos teorías se excluyen mutuamente pero las dos son necesarias para explicar la luz). Esta teoría fue propuesta por De Broglie bien entrado el siglo XX.

BREVE INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

La Teoría de la relatividad constituye una crítica radical de los conceptos clásicos de espacio y tiempo absolutos ya que a finales del siglo XIX la interpretación de todos los fenómenos físicos de la naturaleza macroscópica se resumía en las leyes de Newton (para fenómenos mecánicos) y las ecuaciones de Maxwell (para las electromagnéticas y ópticas). Einstein intentó unificar todos los fenómenos en un único esquema: la Teoría de la Relatividad.

La Teoría de la Relatividad trata los fenómenos estudiados desde sistemas de referencia *inerciales*. Se basa en dos postulados derivados del análisis teórico y confirmados por experimentos:

- Primer postulado (postulado de covariancia de las leyes de la física): las leyes de la física deben tener el mismo valor en todos los sistemas inerciales.
- Segundo postulado (postulado de la constancia de la velocidad de la luz): afirma que la luz se propaga en el vacío con una velocidad finita ($c=298800$ km/s aproximadamente), la velocidad de la luz, por tanto, es la misma en cualquier sistema inercial, en cualquier dirección y no depende de la velocidad de la Tierra en el espacio o de su velocidad en relación con un éter indetectable.

La Teoría de la Relatividad ha transformado las concepciones de espacio y tiempo, que pasan a ser considerados relativos respecto a un sistema de referencia inercial. Por otra parte, la masa y la energía son consideradas intercambiables, es decir, son equivalentes. Estas magnitudes se relacionan con la ecuación de Einstein, $E=mc^2$

Otros sucesos relacionados con la Teoría de la Relatividad son: la simultaneidad temporal, la dilatación del tiempo, la contracción de las longitudes, el incremento de la masa con la velocidad, además de la diferente manera de sumar velocidades relativistas. Todos estos efectos son significativos a velocidades relativistas (próximas a la velocidad de la luz).

LOS ORÍGENES DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

La física es como todas las ciencias un "grupo de cadenas", pero nosotros intentaremos ver la evolución desde los orígenes más primarios de una sola cadena, la Teoría de la Relatividad.

Partiendo de la base de que la Teoría de la Relatividad es una larga cadena formada por multitud de eslabones que comenzaron a unirse hace mucho tiempo, se puede comprender que no es la creación de un único científico en un solo año. Es algo muy diferente, es el trabajo continuo y finalmente enlazado de muchos científicos a lo largo de muchos siglos de investigaciones.

Ya en el siglo XVII el científico Galileo Galilei formuló un conjunto de ecuaciones que se llama Transformación de Galileo o Relatividad Galileana (posiblemente este fue uno de los primeros eslabones), que es aplicable para velocidades muy pequeñas con relación a la velocidad de la luz, pero que no es válida para velocidades relativistas

Desde entonces, casi todo lo estudiado en la física moderna tiene algo que ver con la Teoría de la Relatividad. Primero fueron los experimentos sobre la velocidad de la luz, su constancia en el vacío..., más tarde fueron los experimentos sobre electrodinámica de Faraday, Maxwell, Hertz..., y finalmente el principio de la relatividad de Lorentz y Poincaré. Pasaré a ver en qué consistía dicha teoría:

Poincaré es considerado ante todo un gran matemático y Lorentz un enorme físico teórico, pero en su teoría cambiaron los papeles. Poincaré propuso el principio físico general de esta teoría, mientras que Lorentz la plasmó en ecuaciones, las transformaciones de Lorentz.

En esta teoría ya se pensó en el postulado de relatividad (de la teoría de Einstein) que decía: "las leyes de los fenómenos físicos tienen que ser las mismas para un observador *fijo* que para un observador en movimiento" y se entendía que la velocidad de la luz era la máxima velocidad que se podía alcanzar.

Los físicos, historiadores, filósofos... tienen dos tendencias a seguir sobre los orígenes de la teoría de la relatividad. Se puede creer al genio, A. Einstein, cuando decía que jamás había leído nada de Lorentz (demostrado, pues Einstein no tenía necesidad de esas ecuaciones ya que él iba por un camino diferente del que seguía Lorentz). La otra tendencia es creer que es un simple plagiador, cosa que algunos se creen con el derecho de hacer (lo veremos en *Anécdotas*, en la parte final del trabajo).

Se crea lo que se crea, hay que tener muy en cuenta lo que siempre mantuvo Einstein; él siempre insistió en que esta teoría tenía una continuidad, no se trataba en absoluto de un acto revolucionario sino del desarrollo natural de una línea de exploración que se remontaba a muchos años de investigaciones.

Al igual que Einstein se había apoyado en Galileo, Newton, Copérnico, Lorentz y un largo etcétera (para sacar errores y aciertos de cada uno) dejó bien claro que su teoría sería correcta mientras no se encontrara un sólo caso en que no fuera válida. Entonces, apoyándose en sus trabajos y de los demás científicos, alguien tendría que rehacer la teoría y, finalmente, formar el gran sueño de la ciencia moderna: la creación de una gran teoría unificada que reuniera todas las fuerzas de la naturaleza: electromagnetismo y gravitación.

ALBERT EINSTEIN. UN GENIO DEL SIGLO XX

Albert Einstein nació el 14 de marzo de 1879 en Ulm, Alemania. Provenía de familias judías arraigadas en Alemania. Su padre era ingeniero químico y los negocios obligaron a la familia a trasladarse varias veces. Cuando Albert tenía un año, la familia se trasladó a Munich (donde pasó toda su infancia). Desde pequeño su madre le enseñó a tocar el violín. Fue un niño cuya inteligencia se desarrolló con mucha lentitud, tardó en hablar y en relacionarse por lo que su familia llegó a pensar que era algo deficiente. Los duros y rígidos métodos pedagógicos alemanes fueron difíciles de asimilar para él. Se trasladó a Milán y más tarde a Suiza, entró en la Universidad de Zurich después de varios aplazamientos por tener malas notas en matemáticas. Acabó la carrera en 1901 y no le concedieron ninguna plaza como profesor, por lo que se conformó con una plaza en la Oficina de Patentes de Berna, donde tendría mucho tiempo para pensar y acabar su doctorado. En 1905 publicó cinco trabajos en una revista científica "Los anales de la física": el primero fue el "Efecto fotoeléctrico", después llegaron "La determinación de las dimensiones moleculares", la explicación del "Movimiento Browniano" y por último "La teoría especial de la relatividad" y la demostración del posible intercambio masa-energía.

Después de ese año Einstein pasó a ser profesor en la Universidad de Berna, más tarde catedrático de física en la de Zurich y luego en la de Praga.

En 1916 formula "La teoría general de la relatividad", que era una ampliación de la teoría especial para sistemas acelerados. En 1921 se le concedió el Premio Nobel por su teoría sobre el "efecto fotoeléctrico". Una década después viajó a EE.UU. y se estableció allí, fue profesor en Princeton y poco después recomendó a Roosevelt la fabricación de la bomba atómica contra Alemania, aún siendo un gran pacifista. Murió en 1955

en Princeton consagrado como uno de los más grandes y trascendentales científicos de la historia.

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL O RESTRINGIDA

La teoría de la relatividad especial fue publicada en 1905 y modificó fuertemente los conceptos sobre el tiempo y el espacio.

La teoría de la relatividad especial relaciona la manera en la que un número de observadores que se encuentran en movimiento con respecto a un evento pueden medir éste. Debo definir evento como un acontecimiento físico que sucede en un lugar en un instante determinado. Con el fin de registrar un evento, cada observador utiliza un marco de referencia que consta de tres ejes (x, y, z) denominados sistemas de coordenadas y un reloj. El sistema de coordenadas se utiliza para establecer el sitio donde se inicia y donde acaba el evento y el reloj nos especifica el momento en el que sucede. Cada observador está en reposo con respecto a su propio marco de referencia.

La teoría de la relatividad espacial trata con un tipo especial de marco de referencia denominado marco de referencia inercial .

Einstein basó su teoría de la relatividad especial en dos postulados fundamentales acerca del comportamiento de la naturaleza. Dichos postulados son:

- 1.– Postulado de relatividad: Las leyes de la física son las mismas en cualquier marco de referencia inercial.
- 2.– Postulado de la velocidad de la luz: La velocidad de la luz en el vacío, al medirla en cualquier marco de referencia inercial, siempre tiene el mismo valor de c , sin importar la rapidez con que se mueven entre sí la fuente de luz y el observador.

Si se intenta poner a prueba dichas hipótesis, se ve lo siguiente: el primer postulado no es difícil de aceptar ya que, si dos observadores situados en diferentes marcos de referencia inerciales estudian un mismo evento verán que ambos encuentran que sus datos son verdaderos con relación a las leyes de Newton. Por lo tanto, con respecto a los marcos de referencia inerciales, la naturaleza no tiene favoritos.

Según Einstein, sólo se puede medir y tener sentido físico la velocidad relativa entre objetos, no se puede establecer una velocidad absoluta.

En cambio, el postulado de la velocidad de la luz desafía el sentido común ya que la dirección de una fuente luminosa hacia un punto o no, no afecta en absoluto la velocidad de la luz que se aproxima a dicho punto.

Este postulado se basaba, entre otros, en el experimento de los científicos estadounidenses A. Michelson y E.W. Morley que dejaban por los suelos las teorías del éter luminífero e indicaban que la velocidad de la luz es la misma en todos los marcos de referencia inerciales y que no depende del movimiento del observador con respecto a la fuente de luz.

La teoría formulada por Einstein tiene consecuencias directas tales como: La dilatación del tiempo, la contracción del espacio (o longitud), el incremento de masas, la equivalencia de ésta y la energía y la suma relativista de velocidad, así como la simultaneidad temporal.

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.

Para demostrar este evento me ayudaré de un 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 luz⁸.

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.

$$c\Delta t = 2\sqrt{D^2 + \frac{v^2 \Delta t^2}{4}}$$

$$s = \sqrt{D^2 + L^2}$$

$$2s = c\Delta t$$

La demostración física⁹ es la siguiente:

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

Despejando se obtiene que:

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

Si se sustituye se obtiene:

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.

No obstante, han habido casos en los que se confirma dicha dilatación.

Los muones son partículas que se forman en las capas superiores de la atmósfera, a altitudes aproximadas de 10000m pero su tiempo de vida es de $2,2 \cdot 10^{-6}$ s. antes de desintegrarse. Aunque su velocidad es próxima a la velocidad de la luz no podrían llegar a la superficie con tan poca duración pero en cambio un gran número

de ellas lo consigue. Gracias a las altas velocidades se produce una dilatación del tiempo propio enorme y una contracción de la longitud (como se ve en el dibujo) y gracias a las dos circunstancias pueden llegar a la tierra¹⁰.

CONTRACCIÓN DE LA LONGITUD

Como en dilatación del tiempo, aquí también voy a tomar un ejemplo práctico:

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 desde la tierra serán, respectivamente:

$$L = v\Delta t_0$$

$$L_0 = v\Delta t$$

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.

Para el ejemplo del dibujo, la velocidad del observador en la Tierra se mide de diferente forma (diferente ecuación) que la velocidad para el astronauta.

Las dos ecuaciones se relacionan de la siguiente manera:

$$L\Delta t = L_0\Delta t_0$$

$$v = \frac{L}{\Delta t_0}$$

$$v = \frac{L_0}{\Delta t}$$

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

Desarrollo esta ecuación y obtengo que:

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

Y me queda la ecuación de la longitud¹¹:

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 viene dada por la ecuación:

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

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

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

Cuando un objeto está en reposo, esta ecuación es más simple:

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).

SUMA DE VELOCIDADES RELATIVISTAS

La velocidad de un objeto con respecto a un observador tiene un papel importante en la relatividad especial, ya que los efectos sobre el tiempo, la longitud y la masa dependen de la velocidad del movimiento relativo en

comparación con la velocidad de la luz.

A veces es necesario sumar velocidades y no es tan sencillo como sumar $a+b$. Si, por ejemplo, una persona va sobre una moto y tira una piedra hacia delante, podemos pensar que para un observador en frente suyo, la velocidad de la piedra es la velocidad de la moto más la velocidad de la piedra en relación con la moto. Pero esto es falso, porque si la moto fuese a casi la velocidad de la luz, ese cálculo le daría a la piedra una velocidad superior a la de la luz y eso es imposible. La ecuación correcta sería¹²:

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 demostrando¹³ y los físicos lo han ido aceptando.

Esta teoría no deja de ser un hecho curioso, a medida que aumenta el razonamiento, la capacidad de que nuestras teorías se prueben con hechos disminuye.

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.

CONCLUSIÓN

La verdad es que sacar una conclusión puramente física del estudio de la teoría de la relatividad especial es bastante difícil porque no tengo el nivel, los conocimientos ni los medios para poner en duda dicha teoría.

Partiendo de este hecho, he de apuntar que ha sido muy gratificante para mi persona haber podido entender, de una forma superficial, la teoría de Einstein. Las personas no nos planteamos las dificultades que un científico puede tener para formular una teoría, pero seguro que todas las teorías han tenido días, meses e incluso años de estudio hasta conseguir llegar a ellas.

Por otra parte es interesante mostrar que esta teoría supuso el final de una concepción del mundo¹⁴ y el inicio

de otra, la que se basa en la relatividad. Es decir, el mundo (por así llamar a todo aquello que conocemos) no es absoluto. Éste depende del sistema de referencia que cada uno tome como válido. Ésta es posiblemente la conclusión más importante a la que puede llegar cualquiera que estudie la teoría de la relatividad especial. Sin embargo hay muchas otras que fascinaron al mundo en su día, y a mí ahora.

Algún día llegará alguien, al que llamaremos loco, y formulará una teoría espeluznante que nadie aceptará al principio por ser demasiado revolucionaria. Esta teoría será incomprensible como en su día fue las leyes de Newton o la propia teoría de la relatividad de Einstein, pero que acabará imponiéndose como la teoría "total", aquella que abarcará todos los puntos de vista de la física. Einstein lo intentó y no lo consiguió, esperemos que alguien la encuentre pronto... así nosotros también disfrutaremos con ella.

ANÉCDOTAS

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.

¡QUE SE HAGA NEWTON!

J.C. Squire reflejó la imagen de genio incomprensible que la gente tenía de Einstein respondiendo al epitafio que escribió Pope para Isaac Newton:

« La naturaleza y sus leyes estaban ocultas por la noche. Y Dios dijo": ¡Que se haga Newton! Y todo se hizo luz. Pero no duró; cuando el diablo rugió: ¡Nada, que se haga Einstein!, se restauró el status quo».

LA FALSA GENIALIDAD DE EINSTEIN

Me sorprendió mucho encontrar una publicación del profesor Justo Ruíz que afirmaba que Einstein no tenía nada de genio. Lo acusó de ser un físico vulgar, lo tachó de ambicioso, de plagiador, etc.

Lo critica por plagiar y entrometerse en ideas ajenas para llevarse el mérito. Cita numerosos errores, algunos de ellos son:

- La teoría de la relatividad especial no es de Einstein sino de muchos otros.
- El éter cósmico del que Einstein niega su presencia verdaderamente existe y es el motor de la evolución. (según dicho profesor)
- Einstein cambió de opinión en muchas ocasiones.
- El incremento de masa y la contracción de la longitud son plagios a Lorentz.

- Para finalizar, afirma que nada es relativo; todo es absoluto. Lo que es relativo es el entendimiento humano, incluido el de Einstein.

Este artículo es, al menos, curioso. Pone a Einstein como un mediocre científico, pero me gustaría ver como demuestra él todos los errores que dijo que tenía Albert Einstein. Creo que para criticar el trabajo de alguien has de demostrar tú lo contrario, sino eres tú el equivocado.

BIBLIOGRAFÍA

a) Consultas bibliográficas

Isaac ASIMOV: *Asimov s'explica*. Ed. L'Esparver Ciència.

Bertrand RUSSELL: ABC de la relatividad. Ed. Ariel.

Robert KATZ: Introducción a la teoría de la relatividad especial. Ed. Reverté Mejicana. Ciudad de Méjico. 1968.

A. d'ABRO: La evolución del pensamiento científico desde Newton a Einstein.

Nueva York. 1950.

Diversos autores: Tiempo y relojes. Fundació La Caixa. Barcelona. 1998.

Max BORN. El universo y el Dr. Einstein. Nueva York. 1955.

Tomás GARCÍA POZO: Física II. Edebé. Barcelona. 1998.

Hans REICHENBACH: Desde Copérnico a Einstein. Nueva York. 1942.

b) Direcciones de Internet

[http://www. Paisvirtual.com/ciencia/comercial/cosmos/einste1.htm](http://www.Paisvirtual.com/ciencia/comercial/cosmos/einste1.htm)

c) Consultas en CD-ROM

Enciclopedia Planeta Agostini. Barcelona. 1997

Enciclopedia Interactiva de consulta de El Periódico. Barcelona. 1998

Encarta 98. Madrid. 1998.

H. A. Lorentz trabajó conjuntamente con Poincaré.

Hay diversas opiniones sobre el conocimiento de la existencia de la Contracción de Lorentz por parte de Einstein. Hay quien cree que vio el trabajo de Lorentz y lo mejoró y hay quien cree que lo escribió Einstein sin el conocimiento de dicho escrito.

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'.

En uno de los últimos apartados daré datos sobre estas creencias, almenos sorprendentes.

Es aquel en el que es válida la ley de la inercia de Newton (1ª ley de Newton)

6 *Cualquier marco de referencia inercial funciona tan bien como cualquier otro en cuanto a las leyes de la física, ya que éstos son los mismos en todos los marcos de referencia inerciales.*

Este experimento está explicado en el apartado: "Concepción clásica de la relación espacio–tiempo.

8 $c =$ Velocidad de la luz.

$D =$ Distancia desde la fuente de luz al espejo

$\Delta t_0 =$ Intervalo de tiempo entre la salida y la llegada del pulso luminoso, medido por el astronauta (en reposo) que observa como ambos eventos (salida y llegada) tienen lugar en el mismo sitio (intervalo de tiempo propio).

9 $v =$ velocidad relativa de los observadores.

$s =$ distancia recorrida por el haz de luz para el observador que se encuentra en la Tierra

$\Delta t =$ intervalo de tiempo medido por un observador que está en movimiento con respecto a los eventos, o lo que es lo mismo, un observador que está fuera del marco de referencia donde suceden los eventos.

10 Debido a la contracción de la distancia desde el punto de formación de muones a la superficie (10.000 a 600 m. Aproximadamente) y la dilatación del tiempo debida a la gran velocidad de estas partículas, es posible que un gran número de muones lleguen a la superficie terrestre.

11 $L' =$ longitud medida por un observador que está en reposo con respecto al objeto (longitud propia).

$L =$ Longitud medida por un observador que está en movimiento con respecto al evento.

12 V_p : Velocidad de la piedra para el observador que va subido en la moto.

V_m : Velocidad de la moto respecto al observador que está en tierra.

V : Velocidad de la piedra para el observador que está en tierra.

13 *Mediante aceleradores de partículas, viajes espaciales...*

14 Todo es absoluto y nada es relativo.

1

$$s = \sqrt{D^2 + L^2}$$

$$2s = c\Delta t$$

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

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

$$\Delta t > \Delta t_0$$

$$L = v\Delta t_0$$

$$L_0 = v\Delta t$$

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

$$L\Delta t = L_0\Delta t_0$$

$$v = \frac{L}{\Delta t_0}$$

$$v = \frac{L_0}{\Delta t}$$

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

$$L > L_0$$

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

$$E_0 = m_0 c^2$$

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

$$EC = E - E_0 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

$$V = \frac{V_p + V_m}{1 + \frac{V_p V_m}{c^2}}$$