

1. Estructura del programa/página web/GeoGebra
2. La relatividad de los movimientos y referenciales inerciales
3. Experimento de Michelson-Morley

1. Estructura del Programa

1.- Relatividad Especial

Experimento de Michelson – Morley. Transformaciones de Lorentz, Diagrama de Minkowski, Contracción de longitudes, dilatación temporal. Transformación de velocidades. Efecto Doppler. Choques relativistas.

2.- Fenómenos cuánticos

Radicación del cuerpo negro. Dificultades de una explicación clásica. Teoría de Planck. Efecto fotoeléctrico, explicación de Einstein. Efecto Compton.

3.- Introducción a la estructura atómica.

Experiencia de Rutherford. El Átomo nuclear. Series espectrales. Modelo de Bohr del átomo de hidrógeno.

4.- Elementos de mecánica ondulatoria

Dualidad onda - partícula. Onda asociada de De Broglie. Paquete de ondas. Principio de incertidumbre. Difracción de electrones.

5.- Ecuación de Schrödinger. Interpretación física de la función de onda. Aplicación a casos unidimensionales. Barreras de potencial. Efecto túnel.

6 .- Átomo de Hidrógeno. Números cuánticos. Degeneración de Estados. Estructura atómica. Momento Angular Orbital.

2. La relatividad de los movimientos y referenciales inerciales

Los orígenes científicos de la Mecánica Clásica comenzaron con Galileo Galilei, al poner en práctica el método científico, la idealización de los conceptos y la proposición de modelos teóricos para explicar y predecir el comportamiento de los fenómenos naturales. Sus leyes básicas fueron establecidas hasta 1686 por Isaac Newton.

El objetivo fundamental de ésta parte de la Física, es la descripción y predicción del movimiento de los objetos materiales y las causas que lo producen.

Los principios con los que se consigue éste objetivo (al menos para los movimientos de baja velocidad que ocurren en el medio ambiente y que podemos percibir directamente con nuestros sentidos) fueron establecidos de manera teórico-experimental y los conocemos ahora como las tres leyes del movimiento de Newton.

El movimiento de objetos materiales grandes que se mueven con una velocidad relativamente pequeña comparada con la rapidez de propagación de la luz en el vacío, por ejemplo un satélite una pelota o una molécula, se describe con extraordinaria precisión usando las leyes de Newton; sin embargo, éstas predicciones se derrumban catastróficamente cuando se desea describir el movimiento de objetos muy pequeños (electrones, protones etc.) o que se mueven a una velocidad cercana a la de la luz .

Es importante señalar sin embargo, que no fué esta "deficiencia" el motivo principal que originó el desarrollo de la Teoría Especial de la Relatividad formulada por Albert Einstein en 1905, sino más bien una contradicción básica sobre la forma de las leyes de la Física en distintos sistemas de referencia, porque al parecer, algunas conservaban su forma matemática en todos los sistemas de referencia y otras no.

Frecuentemente casi todas las *afirmaciones* que hacemos carecen de sentido o se vuelven rotundos absurdos cuando tratamos de asignarles un significado absoluto, es decir cuando tratamos de que signifiquen lo mismo en cualquier lugar y en cualquier tiempo. Por ejemplo cuando decimos :

"Son las 6:15 de la mañana" Es una afirmación verdadera solo localmente en la vecindad inmediata del reloj que mide ese tiempo, Para otros relojes en otros lugares, la hora es diferente.

"Conducimos los autos por la orilla derecha del camino" Es una afirmación verdadera solo cuando se especifica una dirección (la del movimiento del auto por ejemplo) y vale sólo para las personas *dentro* del auto

"Arriba y abajo" Cuando la Tierra se consideraba plana como una moneda, la dirección vertical parecía ser un concepto absoluto (la misma en todos los puntos de la superficie terrestre) . Ahora que sabemos que nuestro planeta es esférico, el arriba y el abajo son solo conceptos relativos, verdaderos sólo localmente (en un punto de la superficie terrestre)



De éste modo, los habitantes de un punto *X* de la Tierra , "andan de cabeza" según opinan los habitantes de un punto *Y* de la superficie directamente opuesto al *X*. A su vez, los habitantes de *X* piensan que son los habitantes de *Y* los que andan "cabeza abajo".

Hay que destacar que empezamos a darnos cuenta del sentido relativo de la vertical únicamente cuando examinamos dos puntos de la superficie terrestre *muy separados* entre si , por ejemplo México y China ; pero si examinan dos lugares cercanos, por ejemplo dos casas vecinas de la ciudad de Morelia, prácticamente puede suponerse que las direcciones verticales son paralelas y que el arriba y el abajo son conceptos absolutos localmente.

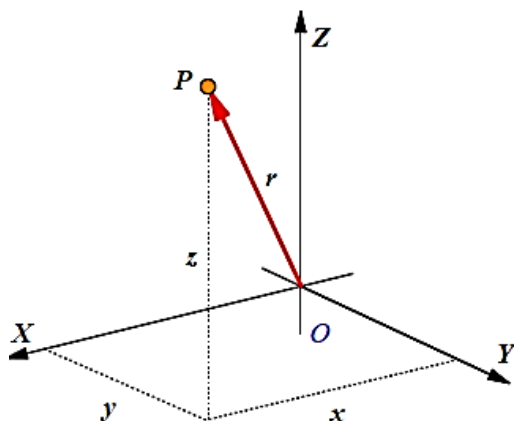
De esta manera, muchos conceptos que consideramos tienen un significado absoluto, resultan ser conceptos relativos cuando los examinamos más detenidamente y vemos que adquieren sentido solo si indicamos las condiciones bajo las cuales se definen. (y paradójicamente, lo relativo se ha convertido ahora en uno de los pocos conceptos absolutos) .

De la misma manera, " *la posición de un objeto en el espacio*" es un concepto que carece de significado a menos que se indiquen otros objetos respecto a los cuales se mide esa posición. Por ejemplo:

- ___ la localización de las estrellas en la bóveda celeste tiene sentido solamente porque se señala que la observación se efectúa desde la Tierra.
- ___ la ubicación de un edificio en la ciudad tiene sentido sólo si la posición del edificio se localiza respecto a otros objetos, por ejemplo las calles u otros edificios.
- ___ la dirección Norte-Sur tiene sentido sólo si se indica que tal dirección se mide respecto a la posición de la estrella polar.
- ___ si queremos decir donde se encuentra normalmente nuestro cepillo de dientes, tenemos que describir su posición respecto al espejo, el baño, otra habitación, una casa, una ciudad, un país, un planeta, una galaxia etc.

Así que cuando hablamos de la situación de los cuerpos en el espacio, siempre suponemos la situación de unos cuerpos respecto a otros. Es imposible responder la pregunta *¿donde se encuentra un objeto concreto?* sin mencionar otros objetos.

Se acostumbra usar un sistema de coordenadas rectangular XYZ cuyo origen O está fijo a un objeto (no necesariamente real), para medir la posición de los demás objetos físicos en el espacio, que además, por



cuestiones teóricas consideraremos, de ahora en adelante, como partículas muy pequeñas, es decir puntos matemáticos sin dimensiones. De ésta manera, la posición de una partícula P en el espacio queda determinada por las coordenadas (x, y, z) o el radio de posición r , esto es :

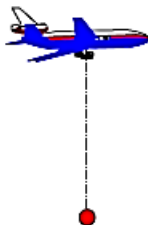
$$r = x \cdot i + y \cdot j + z \cdot k$$

donde i, j, k son los vectores unitarios a lo largo de las tres direcciones perpendiculares X, Y, Z respectivamente .

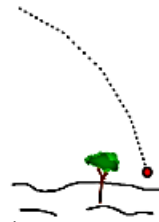
Un sistema de coordenadas nos dice *donde* se localiza un cuerpo y si añadimos además un reloj que nos diga *cundo* se localiza tal objeto en esa posición, tendremos lo que se llama un *sistema de referencia*.

En consecuencia, si la posición de un objeto en el espacio es un concepto relativo, se deduce que "*el desplazamiento de un cuerpo en el espacio*" es también un concepto relativo, porque cuando decimos que un cuerpo se movió, esto significa simplemente que cambió su posición con respecto a otros cuerpos.

Por lo tanto, si examinamos el movimiento de un objeto desde otros distintos objetos tomados como referencia y que se desplazan unos respecto a otros, este movimiento tendrá características muy diferentes según sea la referencia considerada. Por ejemplo . . .



Un avión está volando y desde éste se tira una piedra, la cual cae en línea recta respecto al avión (ignorando la fricción con el aire)



La misma piedra que se tiró del avión cae ahora siguiendo un camino parabólico respecto al suelo

¿Como se mueve la piedra en realidad ?

Esta pregunta tiene tan poco sentido como ¿donde es arriba y dónde es abajo en realidad? , ¿cual es la derecha y cual la izquierda en realidad ? .

La forma geométrica de la curva por la que se desplaza un cuerpo (su *trayectoria*) tiene un carácter totalmente relativo porque depende del objeto de referencia desde el cual se examine su movimiento. Al observar el movimiento de un cuerpo desde distintos sistemas de referencia obtendremos diferentes trayectorias, posiciones y velocidades para tal cuerpo.

Además, al estudiar el desplazamiento de los cuerpos, nos interesa no sólo conocer sus trayectorias, sino también predecir cual será la trayectoria por la que se moverá un cuerpo en ciertas condiciones concretas establecidas a propósito o en forma natural. Dicho de otro modo, queremos conocer las *leyes naturales* que gobiernan el movimiento de los objetos y que los obligan a desplazarse de cierta manera si se dan unas condiciones iniciales.

Es una ley natural que todo objeto del universo interacciona con todos los demás cuerpos del universo en diferentes formas, llamamos a esas interacciones *fuerzas* y son ellas las causas que generan el desplazamiento de los objetos unos respecto a otros.

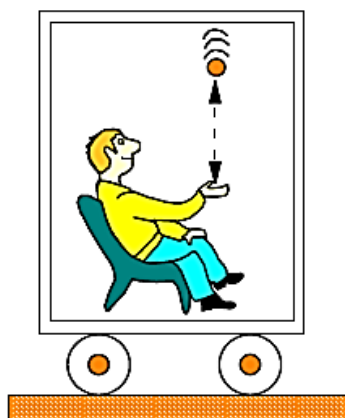
Podemos entonces decir que cuando un objeto está inmóvil es porque todas sus interacciones con el resto del universo se anulan unas a otras (según lo observamos desde nuestro sistema de referencia), ó bien porque se trata de un objeto ideal alejado infinitamente de todos los demás objetos del universo por lo que no tiene ningún tipo de interacción.

Decimos entonces que tal cuerpo está en *estado de reposo* .

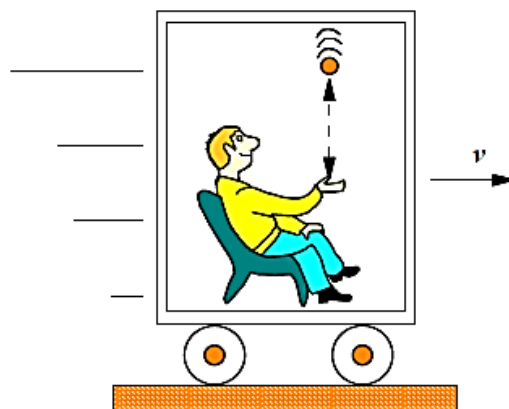
Si fijamos un sistema de referencia a un objeto en reposo, es natural que nos preguntemos si podemos distinguir este sistema de otro en el cual tal objeto parece moverse a velocidad constante.

Imaginemos por ejemplo que vamos sentados en un vagón de un tren que marcha con rapidez constante sobre una vía recta . Ignorando la vibración, las sacudidas del vagón y sin ver hacia el exterior, sería imposible para nosotros decidir si el vagón se mueve o no respecto al suelo, puesto que cualquier experimento mecánico que realicemos dentro de él se comportará exactamente igual que en un vagón inmóvil sobre el suelo.

Por ejemplo si lanzamos una pelota hacia arriba verticalmente, observaremos que la pelota se mueve igual que cuando la lanzamos en un vagón en reposo. No habría ninguna diferencia en ambos casos.



Lanzamos la pelota dentro del vagón en reposo respecto al suelo. La pelota sube y baja en una trayectoria vertical



Lanzamos la pelota dentro del vagón en movimiento uniforme y rectilíneo respecto al suelo. Observamos que la pelota también sube y baja en una trayectoria vertical

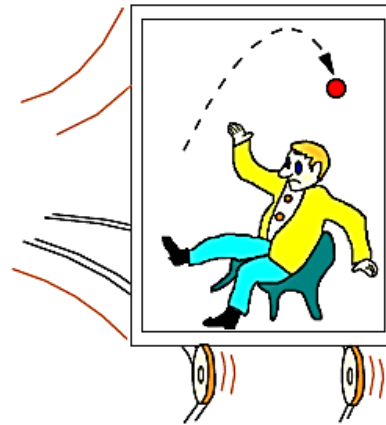
Nos damos cuenta entonces que es imposible distinguir un sistema de referencia en reposo de otro que se mueva respecto a éste a velocidad constante. Llamaremos a tales sistemas de referencia *inerciales* .

Un estado de reposo o uno de movimiento rectilíneo uniforme no difieren en nada uno del otro en cuanto al desplazamiento de los cuerpos y por lo tanto no existe un sistema inercial preferido a otro. Es imposible determinar por medio de experimentos mecánicos el movimiento relativo rectilíneo uniforme de un sistema de referencia respecto a los demás.

Otra cosa sucede si el tren cambia su velocidad, acelerando, frenando o dando vuelta, porque entonces si podremos decidir si el vagón se mueve o no debido a las fuerzas que sentimos y notaremos claramente la diferencia respecto al reposo. Veríamos que al lanzar la pelota, ésta ya no sigue una trayectoria vertical y NO estaría moviéndose en un sistema de referencia inercial.



*Si el tren frena, somos empujados hacia adelante
La pelota tiende a conservar su velocidad inicial y
también continúa hacia adelante*



*En una curva, somos empujados hacia la parte exterior de la
curva. la pelota conserva su velocidad y cuando está en el
aire no sigue la trayectoria que describe el vagón*

Entonces debido a que el reposo es un concepto relativo, debemos indicar siempre respecto a cual de los innumerables sistemas inerciales que se desplazan rectilínea y uniformemente unos con respecto a otros se describe un movimiento. Así que el movimiento de un cuerpo resulta ser un concepto completamente relativo.

Se establece de esta manera una de las leyes más importantes de la naturaleza, formulada por Galileo Galilei y que se llama :

El Principio de la Relatividad del Movimiento

"El movimiento de los objetos físicos en todos los sistemas inerciales se describe con las mismas leyes"

Vemos entonces que el cuerpo sobre el que no actúa una fuerza neta puede encontrarse tanto en estado de reposo como en estado de movimiento rectilíneo y uniforme.

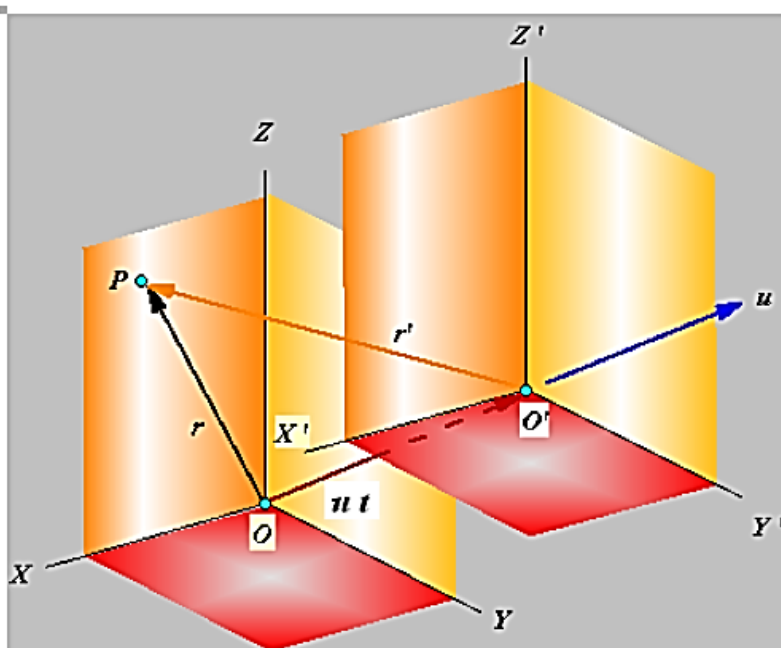
Este enunciado se conoce en Física como la *ley de la Inercia* o 1ª ley de Newton . Sin embargo, ésta ley parece contradecir nuestra experiencia diaria, ya que observamos que los cuerpos a los que no se aplican fuerzas se paran.

La explicación consiste en que sobre todo cuerpo físico siempre actúan fuerzas externas de rozamiento ejercidas por otros cuerpos y que detienen su movimiento; sin embargo, si éstas fuerzas de rozamiento se pudieran idealmente disminuir cada vez más hasta hacerlas nulas, el movimiento rectilíneo uniforme de un cuerpo sobre el que no actuaran ningunas otras fuerzas externas continuaría eternamente.

Si deseamos encontrar como se relacionan la posición, velocidad y aceleración de una partícula P , medidas en dos sistemas de referencia, uno en reposo (que llamaremos sistema O) y otro en movimiento (sistema O') , nuestro sentido común nos conduce irresistiblemente a hacer las siguientes *suposiciones "evidentes"* . . .

- a) Dos relojes idénticos, uno en reposo en el sistema O y el otro fijo al sistema móvil O' , que se habían sincronizado inicialmente, seguirán sincronizados y tendrán las mismas lecturas de tiempo siempre independientemente de su movimiento relativo.
Esperamos que el movimiento uniforme y rectilíneo de un reloj no cambie su medida del tiempo, o en otras palabras, que las escalas de tiempo sean idénticas en todos los sistemas de referencia inerciales.
- b) Dos longitudes idénticas, una en reposo en el sistema O y la otra fija al sistema móvil O' , continuarán siendo de la misma longitud independientemente de su movimiento relativo.
Esperamos que una distancia no cambie con su movimiento uniforme y rectilíneo, es decir, que las escalas de longitud sean idénticas en todos los sistemas de referencia inerciales.
- c) Dos masas idénticas, una en reposo en el sistema O y la otra fija al sistema móvil O' , continuarán siendo de la misma magnitud independientemente de su movimiento relativo.
Esperamos que la masa de un cuerpo no cambie debido a su movimiento relativo y que por lo tanto las escalas de masa sean idénticas en todos los sistemas de referencia inerciales.

Consideremos entonces dos sistemas inerciales con ejes paralelos y por sencillez, con sus orígenes o ceros O y O' coincidiendo en el instante de tiempo $t = 0$. Recordemos que el sistema O está en reposo y el sistema O' se mueve respecto al O con una velocidad constante u . Es claro entonces que . . .



- 1° La posición de un cuerpo P medida respecto a ambos sistemas O y O' queda determinada por los vectores de posición r y r' respectivamente.
- 2° Transcurrido un cierto tiempo t , ambos orígenes estarán separados por una distancia $u \cdot t$.
- 3° Geométricamente es evidente que:

$$r = u \cdot t + r' \quad (1.1)$$

o expresando ésta ecuación vectorial en sus componentes :

$$\begin{cases} x = x' + (u_x) \cdot t \\ y = y' + (u_y) \cdot t \\ z = z' + (u_z) \cdot t \end{cases}$$

Esta ecuación solo confirma lo que ya habíamos dicho anteriormente: la posición de un objeto es un concepto relativo y tiene diferente valor en cada sistema de referencia, a saber: (x, y, z) en el sistema O y (x', y', z') en el sistema O' .

Junto con la suposición de la igualdad de las escalas de tiempo $t = t'$, la ecuación (1.1) se conoce como la *Transformación de Coordenadas de Galileo* y es la respuesta de la Mecánica Clásica a la comparación de escalas de espacio y tiempo en dos sistemas inerciales.

A partir de la definición de velocidad como la rapidez de cambio de la posición en el tiempo, tenemos :

$$v = \frac{d}{dt}(r) \quad ; \quad v' = \frac{d}{dt'}(r')$$

donde v y v' representan la velocidad del cuerpo medida respecto a los sistemas O y O' respectivamente, así que

$$\frac{d}{dt}(r) = \frac{d}{dt}(r' + u \cdot t) \quad \text{de la Transformación de Galileo}$$

y de la suposición $t = t'$ y las reglas de derivación se deduce que. . .

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(r) &= \frac{d}{dt'}(r' + u \cdot t') = \left[\frac{d}{dt'}(r') + \frac{d}{dt'}(u \cdot t') \right] \\ &= \frac{d}{dt'}(r') + u \cdot \left[\frac{d}{dt'}(t') \right] \quad \text{por ser } u, \text{ la velocidad relativa entre los sistemas} \\ &\quad \text{de referencia una constante.} \end{aligned}$$

y finalmente :

$$\frac{d}{dt}(r) = \frac{d}{dt'}(r') + u \cdot (1)$$

es decir :

$$v = v' + u \quad (1.2)$$

Ahora nos podemos dar cuenta fácilmente que la rapidez de un cuerpo también es un concepto relativo cuyo valor queda terminado según sea el sistema inercial desde el cual se mida. Al determinar la velocidad de un objeto con respecto a diferentes sistemas inerciales, obtendremos resultados diferentes.

Debemos a la genialidad de Isaac Newton la relación que existe entre la fuerza neta F que actúa sobre un cuerpo y la aceleración a que tal fuerza le produce (*la rapidez con que cambia su velocidad*) :

$$\begin{aligned} F &= M \cdot a \\ &= M \cdot \frac{d}{dt}(v) \quad ; \text{ usando la definición de aceleración} \\ &= M \cdot \frac{d}{dt}(v' + u) \quad \text{usando (1.2)} \\ &= M' \cdot \left[\frac{d}{dt'}(v') + 0 \right] \quad \text{usando } t = t' \text{ y } M = M' \text{ de acuerdo con 1.4 a) y 1.4 c)} \\ &\quad \text{junto con el hecho de que la velocidad relativa entre los} \\ &\quad \text{sistemas de referencia } u \text{ es constante.} \end{aligned}$$

Se concluye de este modo que :

- 1° $M \cdot a = M' \cdot a'$ La segunda ley de Newton tiene la misma forma en los dos (y por lo tanto en todos) los sistemas inerciales. Es un concepto absoluto.
- 2° $F = F'$
 $a = a'$ La aceleración de un cuerpo y la fuerza neta que actúa sobre él conservan el mismo valor en todos los sistemas de referencia inerciales .

Estos resultados confirman lo que ya habíamos dicho anteriormente: (recordemos el experimento de lanzar una pelota dentro del vagón de un tren)

"Es imposible determinar por medio de un experimento mecánico el movimiento relativo de un sistema de referencia inercial respecto a los demás sistemas inerciales porque el movimiento de los objetos físicos en todos los sistemas inerciales se describe con las mismas leyes "

De la 2ª ley de Newton se derivan importantes Principios de Conservación (de la Energía, del Momentum Lineal, del Momentum Angular), y como acabamos de demostrar, esa ley natural es invariante (tiene la misma forma en todos los sistemas inerciales), se deduce entonces que también los Principios de Conservación son invariantes, es decir se aplican igual en todo sistema de referencia inercial.

Por lo tanto, para la Mecánica Clásica todos los sistemas inerciales son equivalentes entre si, puesto que en todos ellos las leyes Mecánicas tienen la misma forma.

Es natural que ahora nos preguntemos. . .

- 1° : ¿ Tienen todas las leyes de la Física, al igual que la 2ª ley de Newton, la misma forma matemática en todos los sistemas inerciales ?
- 2° : ¿ Como se comparan las descripciones de cualquier fenómeno natural observado desde dos sistemas inerciales distintos ?.

Antes de intentar responder a éstas preguntas consideremos primero algunas fallas importantes de la Mecánica Clásica, sin la intención de restarle importancia a ésta gran teoría, que describe con gran belleza y precisión aunque en un campo limitado, una gran cantidad de fenómenos naturales.

Imaginemos que a un cuerpo inicialmente en reposo en cierto sistema de referencia inercial se le aplica una fuerza constante durante un cierto periodo de tiempo t . ¿Qué tan rápido se moverá ese cuerpo al final? , ¿Existe un límite para su rapidez final v_f ? . Hallemos la respuesta que nos dá la 2ª ley de Newton :

$$F = M \cdot a$$

o bien :

$$F = M \cdot \left(\frac{d \cdot v}{dt} \right)$$

separando los diferenciales e integrando ambos miembros de ésta ecuación obtenemos:

$$\int_0^t F dt = \int_0^{v_f} M dv$$

y considerando que M y F son constantea, se obtiene :

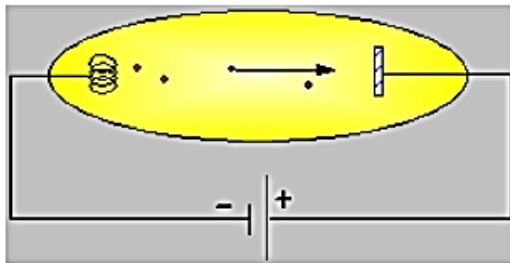
$$v_f = \left(\frac{F}{M} \right) \cdot t$$

En conclusión, en principio no existe, para la Mecánica Clásica, algún límite físico de la rapidez final de un objeto, dado que si el tiempo t es suficientemente grande, se puede obtener cualquier valor de v_f por grande que éste sea.

Sin embargo, en la naturaleza *no se ha detectado todavía algún objeto físico real que supere o al menos iguale la rapidez de la luz** en el vacío (unos 300 000 kilómetros cada segundo) .

La Mecánica Clásica predice entonces un resultado que no se observa en la la naturaleza.

Una manera práctica de ilustrar el experimento anterior se realiza acelerando los electrones ("desprendidos" de un filamento metálico por medio de calor) dentro de un tubo al vacío con dos electrodos sometidos a una gran diferencia de potencial eléctrico variable V_o



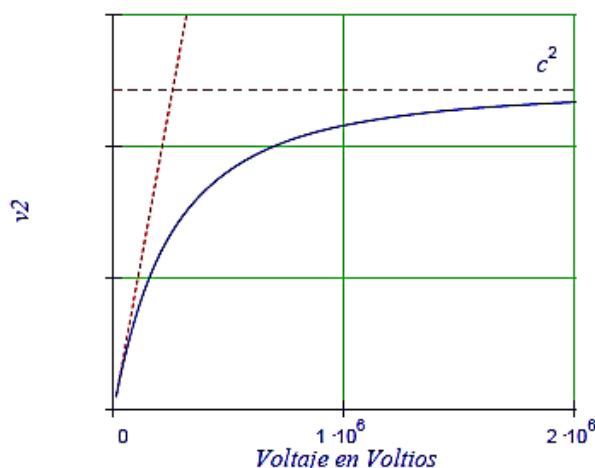
Midiendo la rapidez final de los electrones al llegar al electrodo positivo, se puede calcular su energía cinética.

De acuerdo al principio clásico de la Conservación de la Energía, si una partícula de carga q y masa M parte inicialmente del reposo del filamento negativo (en éste caso, los electrones), toda su energía potencial eléctrica inicial qV_o se transforma en la energía cinética que tiene justo antes de chocar con la placa positiva, es decir . . .

$$q \cdot V_o = \frac{1}{2} M \cdot v^2$$

De donde se obtiene : $v^2 = \left(\frac{2 \cdot q}{M} \right) \cdot V_o$

Si pensamos que la carga eléctrica q de un electrón y sobre todo su masa M se mantienen constantes, entonces su rapidez final v^2 es directamente proporcional al voltaje V_o aplicado. Esto significa que la gráfica de v^2 contra V_o es simplemente una línea recta. (la línea segmentada en la siguiente gráfica)



Cuando V_o es del orden de algunos miles de voltios, la relación clásica anterior coincide muy bien con los resultados experimentales reales; sin embargo, si la aceleración de los electrones se lleva a cabo en millones de voltios , se puede observar una tremenda discrepancia con los valores obtenidos para la rapidez de éstas partículas en este experimento.

Se nota también que c^2 es una asíntota de la curva experimental. Esto significa que la rapidez final de los electrones no puede sobrepasar (ni siquiera igualar) la velocidad c de la luz en el vacío

* Entenderemos por "luz" no solo la luz visible a nuestros ojos sino todo el espectro electromagnético completo, desde las ondas de radio de bajas frecuencias de (0 a 100 Hz) hasta la radiación gamma de frecuencia muy elevada ($\sim 10^{24}$ Hz)

Otro fenómeno natural que la Mecánica Clásica simplemente no puede explicar, ocurre en el campo de las partículas elementales. La llamada *radiación cósmica* de alta energía que consiste en protones de varios Millones de electrón-voltios* (MeV) de energía incide en las capas superiores de la atmósfera terrestre generando unas partículas llamadas mesones μ , cuando choca con los núcleos de los elementos que forman las moléculas del aire. Estas partículas también se pueden generar en el laboratorio bajo condiciones controladas y moviéndose a "baja velocidad" tienen una vida media T_0 de unos $2 \times 10^{-6} \text{ seg}$.

No obstante, se encuentra que los mesones μ que se producen en las altas capas atmosféricas se detectan incluso a nivel del mar, lo cual quiere decir que ¡pueden atravesar toda la atmósfera terrestre ! . De acuerdo con la Mecánica Clásica , la mayor distancia media que tal partícula podría recorrer moviéndose aún con la máxima rapidez constante posible (la velocidad de la luz) sería de tan solo . . .

$$d \cong c T_0$$

$$\cong \left(3 \cdot 10^8 \cdot \frac{m}{seg} \right) \cdot (2 \cdot 10^{-6} \cdot seg) = 600 \text{ m}$$

De manera que asumiendo que los mesones μ no puedan moverse igual o más rápido que la luz, sería imposible según la Mecánica Clásica que pudiesen recorrer una distancia mucho mayor que unos 600 metros. Para que una de éstas partículas pueda recorrer unos 12 km (más o menos el espesor de la atmósfera terrestre) , moviéndose incluso a la velocidad de la luz, necesitaría tener (clásicamente) un tiempo de vida media de . . .

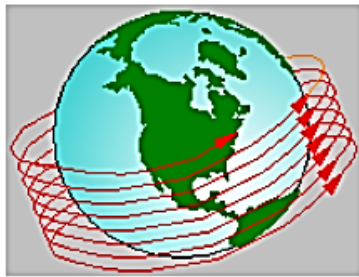
$$T \cong \frac{12000 \cdot m}{300,000 \cdot \frac{km}{seg}} = 4 \times 10^{-5} \cdot seg$$

que es unas 20 veces mayor que el tiempo de vida media registrado para éstas partículas en el laboratorio. Es como si al moverse muy rápidamente con una rapidez comparable a la velocidad de la luz en el vacío, éstas partículas aumentarían enormemente su vida media.

Encontraremos que el tiempo de vida media de una partícula depende del sistema de referencia en el que se mida. Este hecho experimental está en abierta contradicción con la suposición clásica de que las escalas de tiempo sean idénticas en todos los sistemas de referencia inerciales, es decir que la duración de un fenómeno natural es la misma en cualquier sistema de referencia inercial y no depende del movimiento relativo.

Es dudoso que el propósito fundamental que Albert Einstein perseguía al formular la Teoría Especial de la Relatividad en 1905 fuese corregir éstas y otras fallas de la Mecánica Clásica. Mas bien, el deseo principal fué remediar una inconsistencia entre la forma como cambian las leyes mecánicas y las leyes electromagnéticas al pasar de un sistema de referencia a otro, que dejaba con un amargo sabor de boca a todos los físicos de esa época.

La velocidad de la luz en el vacío es enorme. Para tener una idea de que tan velozmente se propaga, imaginemos que un rayo luminoso pudiese girar dando vueltas alrededor de nuestro planeta la Tierra.



En un tiempo de solo un segundo, ese rayo de luz podría girar unas 7.5 vueltas alrededor de la superficie terrestre

$$n = \frac{c \cdot t}{2 \cdot \pi \cdot R}$$

$$\approx \frac{\left(300,000 \cdot \frac{km}{seg}\right) \cdot (1 \cdot seg)}{2 \cdot \pi \cdot (6400 \cdot km)} = 7.46$$

O recorrer en tan sólo unos 8 minutos la distancia que hay desde la Tierra al Sol . . .

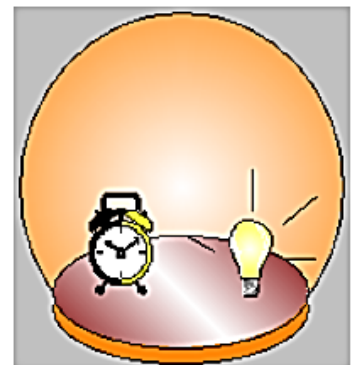
$$t = \frac{d}{c}$$

$$\approx \frac{\left(1.496 \cdot 10^{11} \cdot m\right)}{\left(300,000 \cdot \frac{km}{seg}\right)} \approx 498.7 \text{ seg} = 8.311 \text{ min}$$

Y desde siempre ha sido un fenómeno fascinante, ya que a diferencia del sonido o de cualquier otro tipo de onda, no necesita de ningún medio para propagarse.

Si colocamos dentro de la campana de una bomba de aire una bombilla eléctrica y un reloj con timbre y comenzamos a extraer el aire, observaremos que el sonido del timbre poco a poco se debilitará hasta dejar de oírse por completo pero la bombilla seguirá iluminando como antes.

Esto demuestra que el sonido se propaga solamente en un ambiente material (como el aire) ; mientras que la luz puede propagarse incluso en el vacío .



Al igual que el sonido, la luz puede cambiar su velocidad de propagación al pasar de un medio a otro, así por ejemplo, se propaga más lentamente en el agua que en el aire; pero es en el vacío donde adquiere su rapidez máxima.

Lo que llamamos sonido, es simplemente el movimiento ondulatorio del medio material en el cual se propaga, por esto su velocidad está determinada por las propiedades físicas de ese medio y no por las del cuerpo sonoro que lo genera.

Algo similar ocurre con la luz, solo que no se trata de la vibración de un medio material sino de campos eléctricos y magnéticos, por eso su velocidad cambia de un medio material a otro; pero el propio medio material no es un requisito indispensable para que esas ondulaciones electromagnéticas se propaguen.

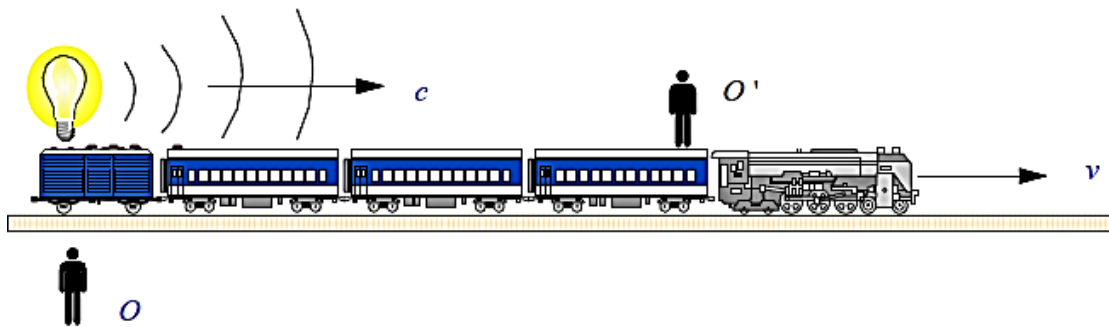
Al igual que el sonido, una vez emitida la luz de una fuente luminosa, su velocidad de propagación no depende de las propiedades o el movimiento de la fuente.

La idea de un movimiento ondulatorio que no necesitara de ningún medio material para propagarse resultaba intolerable para los físicos de comienzos del siglo XX. Por eso propusieron que aún en el vacío (luego de sacar todo el aire de la campana en el experimento anterior) todavía quedaba un medio no material, el éter luminífero (sin masa, transparente, sin fricción y elástico) que serviría de "soporte" para que la luz se pudiera propagar

Solo quedaba por comprobar la existencia de tal medio y fué en 1881 cuando Michelson y Morley realizaron un experimento con el que se demostró que el éter luminífero era tan real como las vacas verdes en la Luna, es decir, no hay evidencia de su existencia, no es real.

El "éter" sería el sistema de referencia en el cual la luz se propagaría en cualquier dirección a la misma velocidad c (300,000 *km/seg*). Así que en otro sistema de referencia que se mueva respecto al éter, tal velocidad debería ser diferente.

Tomemos por ejemplo un tren que se mueve con rapidez constante v sobre una vía recta y supongamos que el "éter" está en reposo respecto a la vía.



Si en la parte trasera del tren se enciende una fuente de luz, las ondas horizontales viajarán a la velocidad c hacia la derecha para un observador O de pie junto a la vía, en reposo respecto al supuesto "éter". Pero, para un observador O' sobre el tren, tales ondas viajan al alcance de la parte delantera del tren y por lo tanto se mueven con la rapidez $(c - v)$.

Una situación similar se presentará cuando la luz se encienda en la parte delantera del tren y el observador O' se localice en la parte de atrás. Las ondas de luz viajarán ahora al encuentro de O' a la velocidad $(c + v)$.

En resumen, *para el observador móvil O'* , la rapidez de la luz que viaja a lo largo del tren no sería la misma si viaja de delante hacia atrás que si lo hace de atrás hacia adelante del tren, en cambio *para el observador O en reposo* respecto al "éter", ¡ esa rapidez sería la misma en cualquier dirección !.

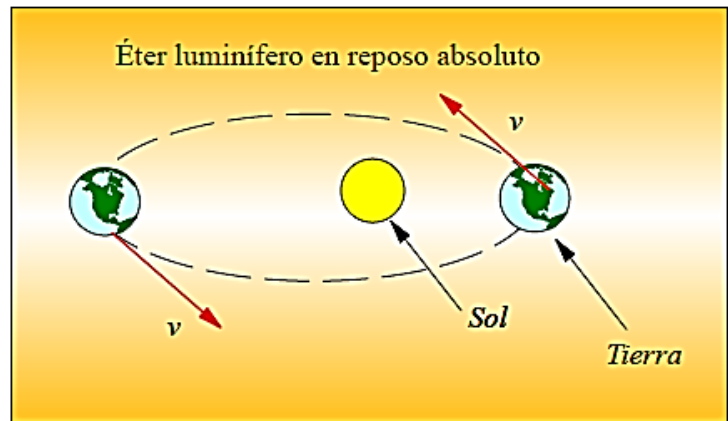
Parece pues que si admitimos la existencia del éter luminífero, nos encontramos ante una violación del principio de la relatividad del movimiento, ya que bastaría con medir la velocidad de la luz para darnos cuenta si un sistema de referencia se mueve o no respecto al sistema en reposo absoluto (el "éter").

¿Acaso es falso entonces el principio de la relatividad del movimiento ?

En una situación tan contradictoria como ésta, solamente el juez supremo de la experimentación puede decidir cual es la verdadera realidad.

El experimento de Michelson y Morley referido anteriormente, es similar a nuestro ejemplo del tren que se mueve con rapidez constante v sobre una vía recta. El tren que ellos consideraron fué nuestro propio planeta que se mueve en torno al Sol a la rapidez $v = 30$ *km/seg* ; pero a pesar de que su trayectoria no es recta, podemos considerar que en la ínfima parte de segundo requerida por la luz para pasar a través de todos los instrumentos del laboratorio, la Tierra se mueve rectilínea y uniformemente. El error que se comete con ésta consideración es tan insignificante que no puede detectarse.

Además, suponiendo que la Tierra se mueve a través del éter en reposo absoluto y puesto que ésta cambia su dirección de movimiento respecto al Sol en 180 grados cada seis meses, el realizar el experimento cada medio año equivaldría a recibir las ondas de luz de la parte delantera o de la parte trasera del tren, puesto que en un caso la luz usada en el experimento se mueve a favor y en otro en contra de la supuesta "corriente de éter" a través de la Tierra.



Pues bien, aunque la precisión del experimento de Michelson es tan elevada que se puede detectar incluso un cambio mucho menor al esperado, el resultado fué algo sorprendente . . .

"La rapidez de propagación de la luz es siempre la misma, en cualquier época del año y en cualquier lugar de la superficie terrestre".

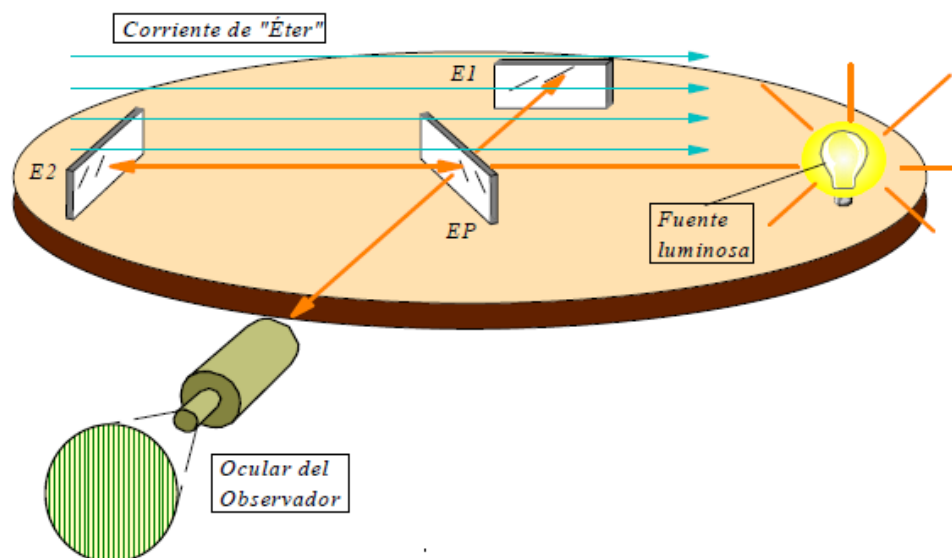
Regresando a nuestro ejemplo del tren en movimiento, éste resultado nos dice que ambos observadores O y O' van a medir exactamente el mismo valor para la velocidad de la luz, sin importar que uno esté en reposo y otro en movimiento relativo. De manera que el principio de la relatividad del movimiento permanece.

De ésto se infiere ahora fácilmente que *la rapidez de la luz en el vacío es la misma en cualquier lugar del universo, que es independiente del movimiento de la fuente o del observador y que no necesita de ningún medio de propagación*

3. El Experimento de Michelson-Morley

El propio movimiento de nuestro planeta la Tierra, impide que ésta pueda ser considerada un sistema de referencia inercial; sin embargo, las aceleraciones centrípetas debido a la rotación respecto al Sol o a la propia rotación respecto al centro de la Tierra son tan débiles que en un sentido práctico y durante tiempos de observación muy pequeños (de unos cuantos segundos), podemos suponer que la Tierra se mueve en línea recta a velocidad constante (respecto a las estrellas "fijas") y que es aproximadamente un sistema inercial.

El aparato empleado en el experimento de Michelson y Morley básicamente es un interferómetro óptico flotando en mercurio líquido (para amortiguar las vibraciones mecánicas que pudiese transmitirle el medio ambiente), y se ilustra de manera simplificada en la siguiente figura:

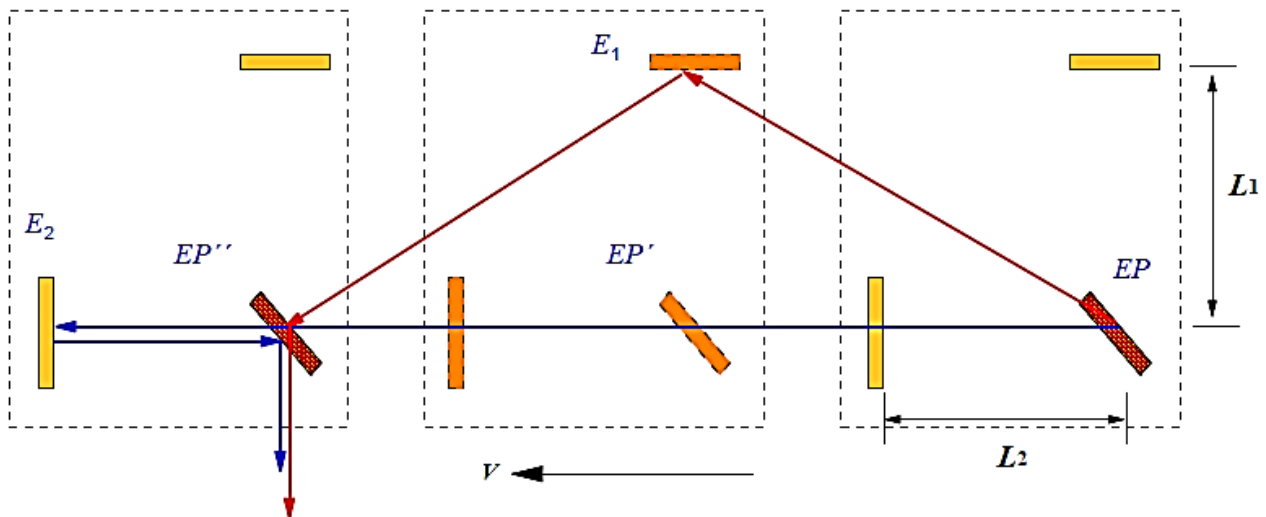


Un haz de luz de una fuente luminosa es parcialmente reflejado y parcialmente transmitido por un espejo semitransparente EP , hacia los espejos E_1 y E_2 perpendiculares entre sí. La luz se refleja en éstos espejos de nuevo hacia el espejo EP , donde nuevamente es parcialmente reflejada y parcialmente transmitida.

La luz que se reflejó en E_1 y atravesó EP , se combina con la luz que se reflejó en E_2 y en EP . El haz de luz resultante se recibe en el ocular del microscopio del observador, donde se podrá apreciar un patrón de franjas brillantes y oscuras, producto de la interferencia de ambos haces de luz, la cual se genera debido a que la luz emplea tiempos de recorrido distintos en ambos haces y por lo tanto pierden la "sincronía" que tenían al salir de la fuente luminosa por así decirlo, quedan *fuera de fase*.

Ya que supusimos que la Tierra se moverá a través del hipotético "éter luminífero", se puede orientar el aparato de modo que la dirección E_2-EP sea paralela al movimiento de la Tierra. De esa manera, se percibiría una "corriente de éter" en esa dirección y como el aparato está sobre la superficie terrestre, la rapidez de esa corriente sería de unos 30 km/seg que es más o menos la rapidez de translación de la Tierra respecto al Sol.

Entonces, desde el sistema del "éter", veríamos que el interferómetro de Michelson-Morley se mueve en la dirección E_2-EP hacia la izquierda a 30 km/seg . Representemos tres de sus posiciones (vistas desde arriba) como se indica en la figura siguiente por A , B y C :



Cuando el aparato está en la posición (A), el espejo EP , divide la luz de la fuente en dos haces, uno reflejado hacia el espejo E_1 y otro transmitido hacia el espejo E_2 .

Un tiempo t después, el aparato está en la posición (B) y se ha movido la distancia vt . En ese momento llega la luz de EP al espejo E_1 y se refleja nuevamente hacia EP .

La distancia que recorre este haz de luz es la hipotenusa del triángulo recto $EP-E_1-EP'$, es decir...

$$(c \cdot t)^2 = (L_1)^2 + (v \cdot t)^2$$

donde c es la rapidez de la luz respecto al "éter" en reposo. Resolviendo para el tiempo t , obtenemos:

$$t = \frac{L_1}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

Por simetría, este es el mismo tiempo que tarda el haz reflejado que regresa al espejo en EP'' , así que el tiempo total para la luz que sigue esta trayectoria es

$$t_1 = 2 \cdot \left(\frac{L_1}{\sqrt{c^2 - v^2}} \right) = \left(\frac{2 \cdot L_1}{c} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \left(\frac{2 \cdot L_1}{c} \right) \cdot \gamma$$

Donde el símbolo γ representa la expresión $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

Consideremos ahora el haz de luz transmitida por el espejo EP en la posición inicial (A). En el instante t cuando la luz alcanza el espejo E_2 , éste se ha alejado la distancia vt , así que

$$c \cdot t = L_2 + v \cdot t$$

y si tarda un tiempo t' en reflejarse desde E_2 hasta EP'' , debemos tomar en cuenta que el espejo EP se está moviendo a su encuentro y recorre la distancia vt' , es decir. . .

$$c \cdot t' = L_2 - vt'$$

Por lo tanto, el tiempo total para la luz que sigue esta trayectoria es :

$$\begin{aligned} t_2 &= t + t' \\ &= \frac{L_2}{c-v} + \frac{L_2}{c+v} = \left(\frac{2 \cdot L_2 \cdot c}{c^2 - v^2} \right) . \\ &= \left(\frac{2 \cdot L_2}{c} \right) \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)} = \left(\frac{2 \cdot L_2}{c} \right) \cdot \gamma^2 . \end{aligned}$$

Entre los dos haces de luz, existirá así una diferencia de tiempos de recorrido de

$$\begin{aligned} \Delta t &= (t_1 - t_2) \\ &= \left(\frac{2 \cdot L_1}{c} \right) \cdot \gamma - \left(\frac{2 \cdot L_2}{c} \right) \cdot \gamma^2 . \\ &= \left(\frac{2 \cdot \gamma}{c} \right) \cdot (L_1 - \gamma \cdot L_2) . \end{aligned}$$

La parte crucial del experimento de Michelson-Morley tiene lugar cuando el aparato se gira 90° , de manera que la corriente de "eter" es ahora perpendicular (dirección $E_1 - EP$). Haciendo un análisis similar al anterior, encontraríamos ahora una diferencia de tiempos de recorrido de

$$\Delta t' = \left(\frac{2 \cdot \gamma}{c} \right) \cdot (-L_2 + \gamma \cdot L_1)$$

Por lo tanto, el cambio total esperado es . . .

$$\delta t = (\Delta t - \Delta t') = \left(-2 \cdot \frac{\gamma}{c} \right) \cdot (L_2 + L_1) \cdot (\gamma - 1)$$

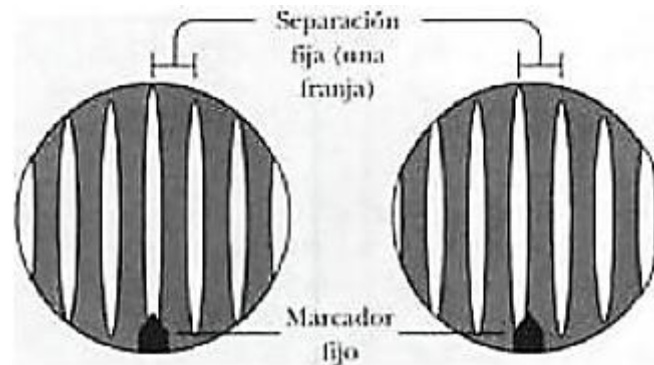
Los dos rayos de luz que se recombinan estarán fuera de fase por la cantidad:

$$\frac{\delta t}{\tau} = \frac{\left(-2 \cdot \frac{\gamma}{c} \right) \cdot (L_2 + L_1) \cdot (\gamma - 1)}{\left(\frac{\lambda}{c} \right)} \quad (2.1)$$

donde τ es el periodo de vibración de las ondas de luz de longitud de onda λ . Si en el experimento se usa luz monocromática de longitud de onda $\lambda = 4 \times 10^{-5} \text{ cm}$ y $L_1 = L_2 = 10 \text{ m}$, la ecuación anterior arroja el valor: 0.5

Se esperaba así que al girar el aparato en 90° , el patrón de interferencia observado de líneas oscuras y brillantes cambiara en media franja, el lugar de las franjas brillantes ocuparía el lugar de las oscuras y viceversa; pero aunque se hubiera podido detectar incluso un desplazamiento de 0.01 de franja, NO SE DETECTÓ CAMBIO ALGUNO en el patrón de interferencia.

No tenemos otra salida que aceptar el hecho experimental de que la rapidez de la luz *es la misma* en todos los sistemas de referencia, independientemente de su movimiento relativo, de la fuente o del observador. En éste sentido, la velocidad de la luz es una cantidad absoluta. Este resultado cambiará para siempre nuestros conceptos de tiempo y espacio.



Postulados de la Teoría especial de la Relatividad.

- I. *Todas las leyes de la Naturaleza conservan su forma matemática en todo sistema de referencia inercial.*
- II. *La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas (luz) en el vacío tiene el mismo valor en todos los sistemas de referencia inerciales y además es independiente del movimiento de la fuente o del observador*

El primer postulado retoma el principio de la relatividad del movimiento generalizando a todas las leyes naturales y en el segundo se tomó en cuenta el comportamiento natural de la luz verificado en el experimento de Michelson-Morley.

Con estos dos sencillos postulados, Albert Einstein pudo construir una acertada y elegante teoría que cambió para siempre el significado de muchos conceptos físicos, entre ellos el del tiempo como veremos enseguida.

El experimento de Michelson-Morley dejó como herencia una poderosa tecnología de análisis interferométrico. Una de sus aplicaciones más recientes fue la medición directa de Ondas Gravitatorias utilizando interferómetros (LIGO), descubrimiento que recibió el premio Nobel:

- <https://www.ligo.caltech.edu/WA>
- <https://es.wikipedia.org/wiki/LIGO>
- <http://rsefalicante.umh.es/TemasRelatGeneral/relatividad-general15.htm>

Bibliografía

- Serway, R. A., Moses, C. J., & Moyer, C. A. (2005). *Física moderna* (3a ed.). Thomson.
- Ferreira, P. (2013). *Fundamentos de la teoría de la Relatividad Especial*. Disponible en https://lc.fie.umich.mx/~pferrei/relativ_es/Relatividad%20Especial.pdf.