

La constancia de la velocidad de la luz en el vacío en los sistemas inerciales.

Enrique Ordaz Romay¹

Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid (España)

Índice:

Resumen

Introducción

Antecedentes:

Las transformaciones de Galileo.

Las ecuaciones de Maxwell.

1ª Modificación de Lorentz (1897) a las transformaciones de Galileo.

2ª Modificación de Lorentz (1904) a las transformaciones de Galileo.

La constancia de la velocidad de la luz.

Cómo se interpreta la constancia de la velocidad de la luz.

Forma en que se desplazan las partículas.

Forma en la que se desplazan las ondas.

Forma en la que se desplaza la luz.

Bibliografía

Bibliografía histórica.

¹ eorgazro@cofis.es

Resumen

Hasta 1905 la física mecánica que se había desarrollado era clásica, es decir, se apoyaba en las transformaciones de Galileo y en las tres leyes de Newton, siendo estas ideas muy simples e intuitivas. Sin embargo, las transformaciones de Lorentz y muy especialmente su explicación: “la constancia de la velocidad de la luz en el vacío”, suponían un desafío para la intuición que incluso hoy en día, más de 100 años después, siguen sin ser entendidas por muchos estudiantes y profesionales de la docencia.

En muchas ocasiones nos plantean la pregunta: -¿Cómo es posible que la velocidad de la luz sea constante e independiente de la velocidad de la fuente y del observador?-. Es algo que parece atentar contra la lógica y la intuición. ¿Cómo se explica?.

En este artículo se analizan los sucesos históricos y los desarrollos teóricos que condujeron a Einstein a enunciar el principio de constancia de la velocidad de la luz, orientado a que, cualquier estudiante con un nivel físico y matemático preuniversitario, pueda entender su explicación.

Introducción:

En 1904 Lorentz publica una modificación a las transformaciones de Galileo para ajustarse al experimento de Michelson y Morley (1887) y a la teoría del electromagnetismo de Maxwell (1865). A esta modificación se le llamaría Transformaciones de Lorentz (completada por Poincaré en 1905). La explicación teórica de estas transformaciones la daría Einstein en 1905 a través del principio de constancia de la velocidad de la luz en el vacío para sistemas inerciales.

Esencialmente, todos los problemas provenían de la naturaleza de la luz. Esto es, de poder determinar de qué estaba compuesta la luz. Para ello, supuso un gran avance descubrir que la velocidad de la luz era finita.

El primero en plantearse esta posibilidad fue Galileo, quien fracasó en su intento medirla en 1638. Sin embargo, en 1678 el astrónomo danés Roemer observó que las órbitas

de los satélites de Júpiter parecían adelantarse cuando la Tierra estaba más cerca de Júpiter y retrasarse cuando estaba más lejos. Roemer supuso que estos retrasos y adelantos eran debidos a que la velocidad de la luz era finita, de forma que calculando la diferencia de distancias entre la Tierra y Júpiter estimó que la luz tardaba 22 minutos en recorrer el diámetro de la órbita de la Tierra (actualmente se considera que son 16 minutos y 40 segundos).

Poco después, el físico holandés Huygens, combinó el tiempo de Roemer con la estimación que se tenía en aquella época sobre el diámetro de la órbita de la Tierra (unos 140 millones de km) y calculó que la velocidad de la luz era de unos 220.000 km/s. Valor más bien bajo, pero todo un éxito para la época.

La primera medida fiable de la velocidad de la luz es debida a dos físicos franceses. Fizeau, en 1850, desarrolló un dispositivo que mediante ruedas dentadas y un espejo era capaz de medir la velocidad de la luz con gran precisión. El valor que obtuvo fue 313.000 km/s. Poco después, el también físico francés Foucault, refinó el método de Fizeau obteniendo un valor de 298.000 km/s. En 1926, el físico norteamericano Michelson, utilizando espejos rotatorios, calculó una velocidad de 299.796 km/s.

Siendo así, la velocidad de la luz finita, durante tres siglos los físicos se plantearon cual sería su naturaleza. Básicamente había dos posibilidades: la luz o era una onda o era un corpúsculo.

Una de las mayores diferencias que había entre ambas naturalezas era la forma en la cual se debía propagar la luz. Si la luz era un corpúsculo, la velocidad de la fuente y del observador debía hacer variar directamente la medida de la velocidad de la luz. Por el contrario, si la luz era una onda, su velocidad debería ser constante respecto del medio y por tanto la variación en la medida de la velocidad de la luz no dependería de la velocidad de la fuente, pero sí de la velocidad del observador respecto del medio de propagación.

En estas condiciones, el experimento de Michelson y Morley (1887), las transformaciones de Lorentz (1905) y el principio de constancia de la velocidad de la luz en el vacío (Einstein 1905) rompieron esta forma de plantearse la luz. En principio la luz era una

onda (Maxwell 1865), pero sin embargo, parecía que no existía medio en el cual se transmitía (el éter luminífero parecía que no existía).

Por otro parte, aunque según el efecto fotoeléctrico (Einstein 1905) parecía que la luz eran corpúsculos, las transformaciones de Lorentz, y muy especialmente su explicación, que era la constancia de la velocidad de la luz, indicaban que no se producía la suma de velocidades típica de los objetos materiales. En consecuencia, parecía que la luz no era ni una onda ni un corpúsculo.

En este panorama, en 1905 Einstein propone que la luz es a la vez una onda y un corpúsculo. Para unos fenómenos era una onda y para otros era un corpúsculo. Sin embargo, esta explicación aunque servía para resolver las cuestiones planteadas, causaba muchos más problemas interpretativos, lógicos e intuitivos de lo que hasta entonces se conocía. Pero sobre todo planteaba una pregunta: -¿Cómo se explica que la velocidad de la luz sea constante e independiente de la velocidad de la fuente y del emisor si no existe medio para transmitirse?.

Antecedentes:

Las transformaciones de Galileo.

En 1638 el físico italiano Galileo, en su libro *Discurso* estableció cuales deberían ser las transformaciones para pasar las coordenadas de un sistema de referencia a otro que se moviera respecto del primero con una velocidad constante v en el eje de las x .²

Estas transformaciones se basaban en la idea de que era posible enviar una señal instantánea desde un punto hasta otro. De esta forma, si en un sistema de referencia S' se conociera cual es la posición de una partícula $\mathbf{r}' = (x', y', z')$, conociendo la velocidad v (paralela al eje x) de nuestro sistema respecto de otro sistema de referencia S y el tiempo t (recordemos que estamos en 1638 y el tiempo se consideraba universal) desde que se separaron ambos sistemas de referencia, podríamos calcular la posición $\mathbf{r} = (x, y, z)$ de esa partícula respecto del sistema de referencia S (figura 1).

² Se utiliza el convenio de escribir en negrita las magnitudes vectoriales.

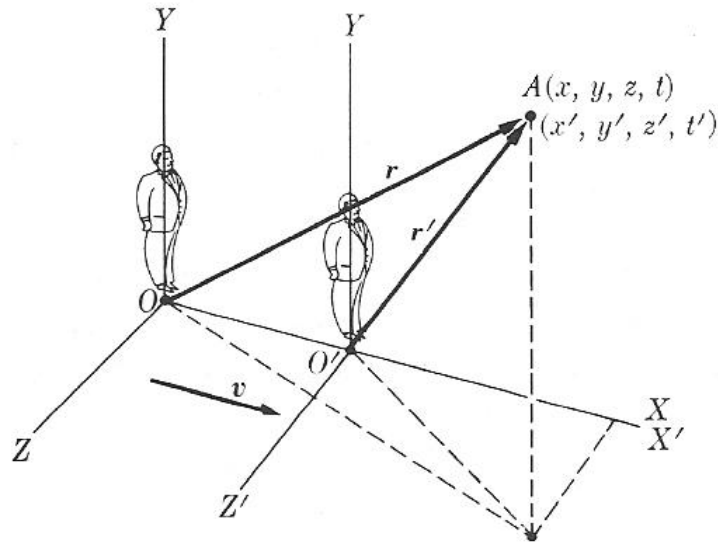


Figura 1 Sistemas de referencia inerciales desplazándose uno respecto del otro con velocidad v (Alonso, Finn 1970).

Una simple suma vectorial demuestra que las ecuaciones correspondientes a las transformaciones de Galileo serían:

$$\begin{aligned}x &= x' + vt \\y &= y' \\z &= z'\end{aligned}$$

En esa época el tiempo se consideraba absoluto y que no dependía del sistema de referencia. Por ello, aunque actualmente se completan estas tres ecuaciones con $t = t'$, lo cierto es que Galileo no escribió nunca esta cuarta ecuación por ser para él una obviedad.

Galileo estableció un principio de relatividad que decía “las leyes de la física tienen igual expresión matemática en todos los sistemas de referencia inerciales”. Es decir, toda ley física debe ser igual sustituir x , y y z por x' , y' y z' que hacer una transformación de Galileo.

Este hecho se basaba en que las leyes de la física son leyes sobre fuerzas. Siendo para Galileo y Newton la masa independiente de la velocidad, las fuerzas son directamente proporcionales a la aceleración (2ª ley de Newton). Si en la expresión de la aceleración hacemos una transformación de Galileo tenemos:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2(x' + vt)}{dt^2} = \frac{d^2x'}{dt^2} + v \underbrace{\frac{d^2t}{dt^2}}_{=0} = \frac{d^2x'}{dt^2},$$

que nos demuestra que es igual cambiar x por x' que hacer una transformación de Galileo.

Las ecuaciones de Maxwell.

En 1865 Maxwell desarrolló un conjunto de cuatro ecuaciones que resumían todos los trabajos anteriores que se habían hecho en electricidad y magnetismo: Ley de Gauss, ausencia de monopolos magnéticos (del propio Maxwell), Ley de Faraday y ley de Ampere (generalizada por Maxwell). Estas ecuaciones combinadas, conducían a la expresión de las ondas electromagnéticas.

Tales ondas electromagnéticas, en el vacío, y para la solución plana monocromática toman la expresión (siendo E el campo eléctrico y B el magnético):

$$E = E_0 \sin k(x - ct) \text{ y } B = B_0 \sin k(x - ct).$$

Aplicamos a estas ecuaciones una transformación de Galileo. Es decir, hagamos $x = x' + vt$. Sustituyendo, por ejemplo, en el campo eléctrico, queda: $E = E_0 \sin k(x' - (c - v)t)$ que es claramente distinto del resultado esperado, es decir, el de sustituir x por x' obteniendo: $E = E_0 \sin k(x' - ct)$.

En consecuencia: las ondas electromagnéticas en la teoría de Maxwell no son invariantes ante transformaciones de Galileo. Es decir, en ellas no es lo mismo hacer una transformación de Galileo que sustituir x por x' .

1ª Modificación de Lorentz (1897) a las transformaciones de Galileo.

En 1897 el físico holandés Lorentz se planteó la modificación de las transformaciones de Galileo de cara a que las ondas electromagnéticas de la teoría de Maxwell resultaran invariantes. La solución que adoptó tenía dos pasos:

1. Modificar la solución plana monocromática sin afectar a la proporción entre x y t .
2. Añadir una ecuación más para el tiempo a las transformaciones de Galileo.

El primer paso consistía en añadir una constante multiplicativa a la solución de la onda de forma tal que la ecuación de ondas y las ecuaciones de Maxwell no se vieran afectadas. Esta constante la podemos llamar R y se introducía de la forma: $E = E_0 \sin k(Rx - Rct)$.

El segundo paso suponía una auténtica revolución, porque cambiaba un concepto básico de la mecánica newtoniana: En las transformaciones de Galileo el tiempo es absoluto para todos los sistemas inerciales. Por ello, en muchas ocasiones se completan las tres ecuaciones de Galileo con una cuarta de la forma $t = t'$.

La idea de Lorentz era sencilla: supongamos que el tiempo en el sistema S no es igual al tiempo en el sistema S' . Esta suposición provenía de la forma en la que, desde un sistema se veía el reloj del otro sistema. Supongamos que desde S veo el reloj de S' , como el sistema se mueve, el tiempo t dependerá, no solo de t' sino también de la distancia, es decir:

$$t = a \cdot t' + b \cdot x'$$

donde a y b son dos parámetros que dependerán de la velocidad.

Para calcular a y b sustituimos esta expresión y la transformación del eje x en la ecuación de la onda plana monocromática obteniendo:

$$E = E_0 \sin k(x - ct) = E_0 \sin k((x' + vt') - c(a \cdot t' + b \cdot x')) = E_0 \sin k((1 - cb)x' - c(a - v/c)t')$$

El primer paso decía que lo que multiplique a x' y a ct' debe ser lo mismo, por tanto:

$$1 - cb = a - v/c$$

Para $v = 0$ debemos tener que $t = t'$, es decir $a = 1$ y con esta restricción $b = v/c^2$. Sustituyendo en la expresión paramétrica de t se obtiene:

$$t = t' + (v/c^2) \cdot x'$$

Esta sería la ecuación que necesitaríamos añadir a las transformaciones de Galileo para que las ondas electromagnéticas fueran invariantes ante estas transformaciones. Es decir, para cada sistema de referencia existe un tiempo que le es propio al cual se llamó “tiempo local de Lorentz”. De esta forma, las ecuaciones de Galileo, modificadas por Lorentz en 1897 serían:

$$\begin{aligned}x &= x' + vt' \\y &= y' \\z &= z' \\t &= t' + \frac{v}{c^2} x'\end{aligned}$$

A quien más gustó la idea de “tiempo local de Lorentz” fue al matemático francés Poincaré que desde hacía dos años estaba trabajando sobre el problema de sincronización de relojes mediante señales luminosas. En 1900 Poincaré encontró que el tiempo local de Lorentz correspondía a la sincronización de relojes mediante señales luminosas, suponiendo que la luz fueran partículas. La cuestión era la siguiente (recordemos que aun estamos en mecánica prerrelativista): Si un reloj mide un tiempo t , un observador que se encuentre en reposo respecto del reloj, pero a una distancia x' verá el reloj retrasado en x'/c (que es el tiempo que tarda la señal luminosa en llegar hasta el observador).

Sin embargo, si el observador se mueve alejándose del reloj a una velocidad v , el retraso será debido, no sólo a la distancia, sino también a la “disminución” de la velocidad de la luz por efecto de la velocidad v (suponiendo que la luz fueran partículas). Es decir, si en el sistema en reposo la velocidad de la luz es c , en el sistema en movimiento debería viajar a una velocidad de $c + v$.

Puesto de la distancia recorrida por la luz debía ser la misma en ambos sistemas: $x = x'$, (estamos en 1900 y la física era prerrelativista) esta diferencia de velocidad será a costa de una diferencia entre t y t' ($c = x/t$; $c + v = x'/t'$) de la forma $t \cdot c = t' \cdot (c + v)$. Desarrollando (Poincaré 1900; recordemos que este desarrollo no tiene en cuenta la contracción de Lorentz):

$$\begin{aligned}t \cdot c &= t' \cdot (c + v) \rightarrow t = t' \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right) \rightarrow t \left(1 - \frac{v}{c}\right) = t' \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right) \left(1 - \frac{v}{c}\right) \rightarrow t - \frac{v}{c} t = t' \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \rightarrow \\t - \frac{v}{c^2} x &= t' - \frac{v^2}{c^2} t' \rightarrow t = t' - \frac{v^2}{c^2} t' + \frac{v}{c^2} x \rightarrow t = t' + \frac{v}{c^2} (x - vt') \rightarrow t = t' + \frac{v}{c^2} x'\end{aligned}$$

que era precisamente la modificación que hizo Lorentz a las transformaciones de Galileo en 1897.

2ª Modificación de Lorentz (1904) a las transformaciones de Galileo.

Los resultados negativos del experimento de Michelson y Morley hicieron pensar a Lorentz en 1902 que se producía una contracción en la dirección del movimiento. A esta contracción se le llamó “contracción de Lorentz” o de Lorentz – Fitzgerald. Esta contracción venía a decir que para un objeto de longitud l en reposo, si el objeto se movía en la dirección de su longitud, tal longitud en movimiento debía ser:

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

Tras intentar, durante 1902 y 3, enfocar esta contracción desde en punto de vista de los enlaces moleculares en los sólidos, en 1904 Lorentz se dio cuenta que debía hacer una nueva modificaciones, a sus propias modificaciones de 1897, a las transformaciones de Galileo, para añadirles este factor de contracción. En un principio, para que se verificara la contracción de Lorentz era necesario que el factor se incluyera en la transformación de la coordenada x :

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

que fue la propuesta de modificación de Lorentz de 1904. Sin embargo, Poincaré se percató en 1905 que esta modificación implica que, en su propio desarrollo sobre el tiempo local de Lorentz había que partir, en vez de $x = x'$ de una expresión con el factor de Lorentz acorde con la contracción, obteniendo:

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

Esta transformación del tiempo estaba de acuerdo con las observaciones hechas por Larmor en 1897 que indicaban que el movimiento circular de un electrón en un campo magnético exterior, según las ecuaciones de Maxwell, suponía una dilatación del tiempo

propio del electrón en un factor igual al factor de Lorentz. En consecuencia las transformaciones de Lorentz en 1904, completadas por Poincaré en 1905 quedaban establecidas de la siguiente forma:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$y = y'$$
$$z = z'$$
$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Y su interpretación era la siguiente: “cuando se hace un cambio de sistema de referencia entre dos sistemas inerciales que se separan a una velocidad v , si la posición y tiempo de un suceso se realiza mediante señales luminosas, las transformaciones de Lorentz (o de Lorentz – Poincaré) nos indican las coordenadas y tiempo en el nuevo sistema”.

Como podemos comprobar, aunque las transformaciones son relativistas, la interpretación es claramente prerrelativista.

La constancia de la velocidad de la luz.

Como habremos observado, la deducción de las transformaciones de Lorentz fue básicamente fenomenológica. Esto es, mediante unas observaciones se modificaron las transformaciones de Galileo.

Einstein, en su artículo de 1905 *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* se preguntaba cuál era la razón esencial de las transformaciones de Lorentz – Poincaré. La forma de abordarlo fue desde el resultado básico y esencial del experimento de Michelson y Morley. Esto es, en dos sistemas inerciales S y S' se verifica que $c/c' = 1$, en consecuencia $c = c'$. Es decir, la velocidad de la luz debe ser constante e independiente del sistema de referencia inercial en el cual se mida.

La constancia de la velocidad de la luz en el vacío en los sistemas inerciales. (Enero 2007)

La constancia de la velocidad de la luz se puede expresar de la siguiente forma: Si (x, y, z) son las coordenadas de un punto que la luz tarda un tiempo t en alcanzar desde el origen, entonces: $c^2 \cdot t^2 = x^2 + y^2 + z^2$; ecuación de una esfera de centro el origen y de radio $c \cdot t$.

La constancia de la velocidad de la luz viene a decir que, en otro sistema de coordenadas, el mismo haz de luz que produce una esfera en el primero también debe producir una esfera en el segundo, es decir: $c^2 \cdot t'^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2$.

Por tanto, las transformaciones entre sistemas de referencia son aquellas que transforman unas “esferas de haces de luz” en otras “esferas de haces de luz”.

Busquemos estas transformaciones. Trabajemos en dos dimensiones, con transformaciones lineales. Entonces:

$$\begin{aligned}x &= a \cdot x' + b \cdot t' \rightarrow x^2 = a^2 x'^2 + b^2 t'^2 + 2abx't' \\t &= g \cdot x' + d \cdot t' \rightarrow t^2 = g^2 x'^2 + d^2 t'^2 + 2gd x't'\end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación de la primera esfera queda:

$$c^2 \cdot t^2 = x^2 \rightarrow c^2 \cdot (g^2 x'^2 + d^2 t'^2 + 2gd x't') = a^2 x'^2 + b^2 t'^2 + 2abx't'$$

A partir de este resultado se tiene que obtener la ecuación de la segunda esfera. De esta forma, los parámetros a , b , g y d nos quedan:

$$\begin{cases} ab - c^2 \cdot gd = 0 \\ c^2 \cdot d^2 - b^2 = 1 \\ a^2 - c^2 \cdot g^2 = 1 \end{cases}$$

Como cuarta relación establecemos que el segundo sistema de referencia se mueve respecto del primero con una velocidad $x'/t' = -v$. Esto conduce a la relación:

$$\text{Como } x = a \cdot x' + b \cdot t' \text{ para } x = 0 \text{ se obtiene } a \cdot x' = -b \cdot t' \rightarrow a \cdot v = b$$

Resolviendo el sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas se obtiene:

$$a = d = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad b = \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad g = \frac{\frac{v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

que sustituido en el sistema lineal conduce a las transformaciones de Lorentz.

Como podemos ver, la hipótesis de la constancia de la velocidad de la luz en los sistemas inerciales explica los resultados del experimento de Michelson y Morley, la no existencia del éter y engloba desde un punto de vista teórico (y no fenomenológico) los resultados parciales de Larmor y Lorentz.

Cómo se interpreta la constancia de la velocidad de la luz.

Según estos desarrollos, la hipótesis de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío para sistemas inerciales del año 1905 explicaba desde un punto de vista unificado y teórico todos los fenómenos no clásicos de los anteriores 40 años: la no invarianza de las ecuaciones de Maxwell (1865), la dilatación del tiempo propio de los electrones (Larmor 1897), el tiempo local de Lorentz (1897), la contracción de Lorentz (1903) y las transformaciones de Lorentz – Poincaré (1905).

Sin embargo, la hipótesis de Einstein tenía un problema: no era intuitiva de una forma tradicional. Es decir, a diferencia de cómo había sido la física hasta entonces, la hipótesis de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío para sistemas inerciales no resultaba ser clara ni evidente en su significado e interpretación. Para entender que significa la hipótesis de Einstein en primer lugar hay que saber como se mueven las partículas y como se mueven las ondas.

Forma en que se desplazan las partículas.

Una partícula no-cuántica es un objeto material “pequeño” cuya posición la podemos determinar mediante las tres coordenadas espaciales en un instante temporal. Es decir, para determinar una partícula necesitamos decir una posición (x, y, z) y el instante t en el cual está en esa posición.

¿Cuál es la forma en la que se desplaza una partícula? Si no existiera límite para la velocidad, una partícula se desplaza con una velocidad respecto del objeto desde el cual ha sido puesta en movimiento. Desde la física clásica, si una partícula se mueve a una velocidad v respecto de su fuente emisora y tal fuente emisora se mueve con una velocidad V respecto de un observador en reposo, la partícula se mueve respecto del observador a una velocidad que es la suma de ambas: $v + V$ (figura 1).

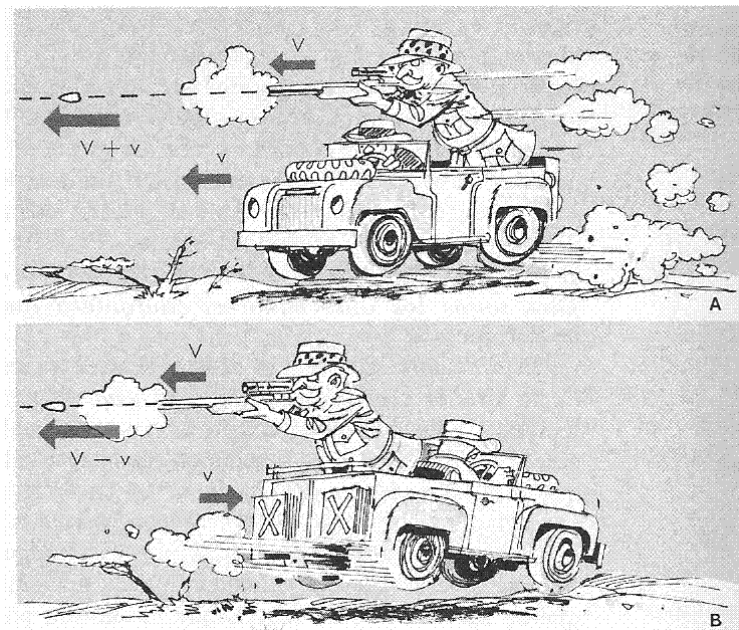


Figura 1. Representación artística de la suma de velocidades en el desplazamiento de una partícula (Gamow y Cleveland 1969)

Una característica importante del movimiento de las partículas es que si las emite una fuente en todas direcciones, solo si la fuente está en reposo respecto del observador las partículas se distribuirán en forma de esfera, pero si la fuente está en movimiento respecto del observador la distribución será en forma de elipsoide de revolución cuyo eje de simetría está en la dirección del movimiento del foco.

Forma en la que se desplazan las ondas.

A diferencia, una onda es una vibración de un medio y por tanto su velocidad no depende directamente del foco emisor o del observador, sino del medio. Es decir, la velocidad de la onda respecto del medio es constante. Por ejemplo, el sonido viaja en el aire a 340 m/s. Esta velocidad es independiente de la velocidad de la fuente, puesto que cada vibración se propaga independientemente de las demás produciendo, en caso de desplazamiento de la fuente, efectos Doppler que varían la frecuencia, pero no la velocidad (figura 2).

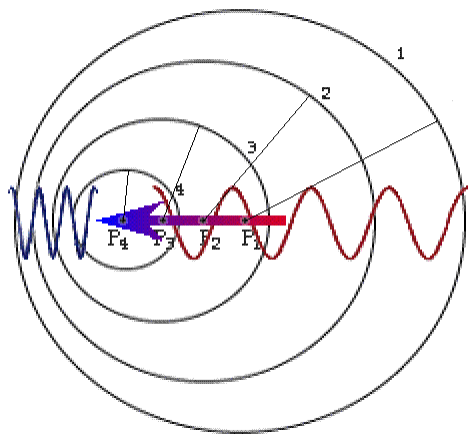


Figura 2 Efecto Doppler por desplazamiento de la fuente emisora de ondas. No varía la velocidad de la onda sino la frecuencia.

Por el contrario, la velocidad del observador respecto de la velocidad del medio sí afecta a la velocidad de la onda que medirá el observador. Si el observador se desplaza a una velocidad v respecto del medio y la onda se mueve con una velocidad V en el medio, la onda se mueve respecto del observador a una velocidad que es la suma de ambas: $v + V$.³

Es decir, el medio es un intermediario entre la onda y el observador que permite, en primer lugar que la onda llegue al observador (sin medio no ondula nada y el observador no percibe la onda) y en segundo lugar permite, al observador conocer su propia velocidad respecto del medio midiendo la velocidad de la onda y restándole la velocidad de la onda respecto el medio.

³ Independientemente, el desplazamiento del observador también producirá efecto Doppler, aunque en este caso no lo analizaremos puesto que nuestro interés se centra en la velocidad de la onda y no en su frecuencia.

Una diferencia importante del movimiento de las ondas respecto del de las partículas es que, en las ondas esféricas si el observador está en reposo respecto del medio, todos los frentes de onda son esféricos a pesar del movimiento del foco. Si el foco se mueve las esferas no serán concéntricas y se producirá efecto Doppler, pero su forma esférica no se deformará como en el caso de las partículas.

Forma en la que se desplaza la luz.

El experimento de Michelson y Morley indicaba que el éter luminífero no existía. Si esto es así, ¿en que medio se transmite la onda que es la luz?. La respuesta a esta pregunta la planteó Einstein mismo en su artículo anterior sobre el efecto fotoeléctrico, en el cual establece el cuanto de luz con la ecuación de Planck como el corpúsculo lumínico (que más adelante se llamaría fotón). En consecuencia, la luz sería una dualidad onda-corpúsculo.

Siendo así, la luz, aunque es una onda, se transmite en el vacío porque también es un corpúsculo. Este corpúsculo, al que se le llama fotón, carece de masa y esa cualidad es esencial para entender que su presencia no altera la homogeneidad del espacio y por tanto, aun siendo el medio físico en el que se transmite la luz, no se puede utilizar como intermediario para determinar la velocidad de la onda de luz respecto del observador. Es decir, como la luz es una onda y su corpúsculo no tiene masa, a efectos prácticos el medio de transmisión de la luz es el vacío.

Esta característica es importante para entender lo siguiente: si la luz se transmite en el vacío y en el vacío no podemos determinar cual es nuestra velocidad, si esta es constante. Entonces, la velocidad de la luz es constante para todos los observadores que se muevan con velocidad constante.

Pero aun más, como la luz es una onda, su velocidad no depende de la velocidad de su fuente, sino de la velocidad del medio. Como el vacío se puede siempre considerar en reposo, si la fuente se mueve con velocidad constante, la velocidad de la luz será independiente de la velocidad de la fuente.

En resumen, la velocidad de la luz es constante y tiene siempre el mismo valor cuando la fuente y el observador se mueven con velocidad uniforme, a pesar de que tales velocidades sean diferentes entre sí. A esta afirmación se le llama principio de constancia de la velocidad de la luz.

En este contexto resulta evidente que la propagación de la luz debe cumplir la ecuación de una esfera en todos los sistemas inerciales. Es decir: la luz emitida por un foco en un sistema de referencia S tiene la forma de esfera: $c^2 \cdot t^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

E igualmente, en otro sistema S' de coordenadas, el mismo haz de luz produce también una esfera, es decir: $c^2 \cdot t'^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2$.

La constancia de la velocidad de la luz en el vacío queda justificada mediante las tres siguientes afirmaciones:

- Por ser la luz una onda su velocidad solo depende del medio.
- Por ser la luz un corpúsculo puede viajar en el vacío.
- En el vacío no se puede determinar una velocidad absoluta.

Bibliografía:

Alonso M, Finn EJ. (1970) *Física Vol I. Mecánica*. pp136-149 Addison-Wesley.

Gamow G, Cleveland JH. (1969) *Física*. pp 307-331. Prentice–Hall inc.

Goldman MV (2000). *Midiendo la Velocidad de la Luz*. University of Colorado.
http://www.maloka.org/f2000/waves_particles/lightspeed_evidence.html

Ordaz E. (2006). *Análisis básico del experimento de Michelson y Morley (1887)*.
<http://www.ilustrados.com/documentos/eb-EI%20experimento%20de%20Michelson%20y%20Morley.pdf> y en
<http://monografias.com/>

Interferómetro de Michelson. Wikimedia.
http://es.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%B3metro_de_Michelson

Lorentz transformation. Wikimedia.
http://en.wikipedia.org/wiki/Lorentz_transformation

Photon. Wikimedia.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Photon>

Velocidad de la luz. Wikimedia.

http://es.wikipedia.org/wiki/Velocidad_de_la_luz

Bibliografía Histórica:

Einstein A. (1905) *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, Annalen der Physik, 17:132-148

Einstein A. (1905) *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik. 17:891-921.

Galileo (1638). *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno á due nuoue scienze*. Lowys Elzevir (Louis Elsevier).

Larmor, J. (1897) "On a dynamical theory of the electric and luminiferous medium", Phil. Trans. Roy. Soc. 190, 205-300.

Lorentz, H. A. (1895) *Versuch Einer Theorie der Elektrischen und Optischen Erscheinungen in Bewegten Körpern*, Leiden (book).

Lorentz, H. A. (1899) "Simplified theory of electrical and optical phenomena in moving systems", Proc. Acad. Science Amsterdam, I, 427-43.

Lorentz, H. A. (1904) "Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light", Proc. Acad. Science Amsterdam, IV, 669-78.

Maxwell JC. *A Dynamical Theory Of The Electromagnetic Field*. London (1865):

[http://books.google.com/books?vid=ISBN0486495604&id=duyKrTNps_AC&pg=PA526&lp_g=PA526&dq="A+Dynamical+Theory+of+the+Electromagnetic+Field"&sig=twd-S431TkILmLLYbdZMKfI7H0g](http://books.google.com/books?vid=ISBN0486495604&id=duyKrTNps_AC&pg=PA526&lp_g=PA526&dq=)

Michelson AA, Morley EW, Philos. Mag. S.5, 24 (151), 449-463 (1887):

<http://www.aip.org/history/gap/PDF/michelson.pdf>

Poincaré, H. (1898) *La mesure du Temps*, reprinted in *La valeur de la science*, Ernest Flammarion, Paris.

Poincaré, H. (1900) *La Theorie de Lorentz et la Principe de Reaction*, Archives Neerlandaises, V, 252-78.