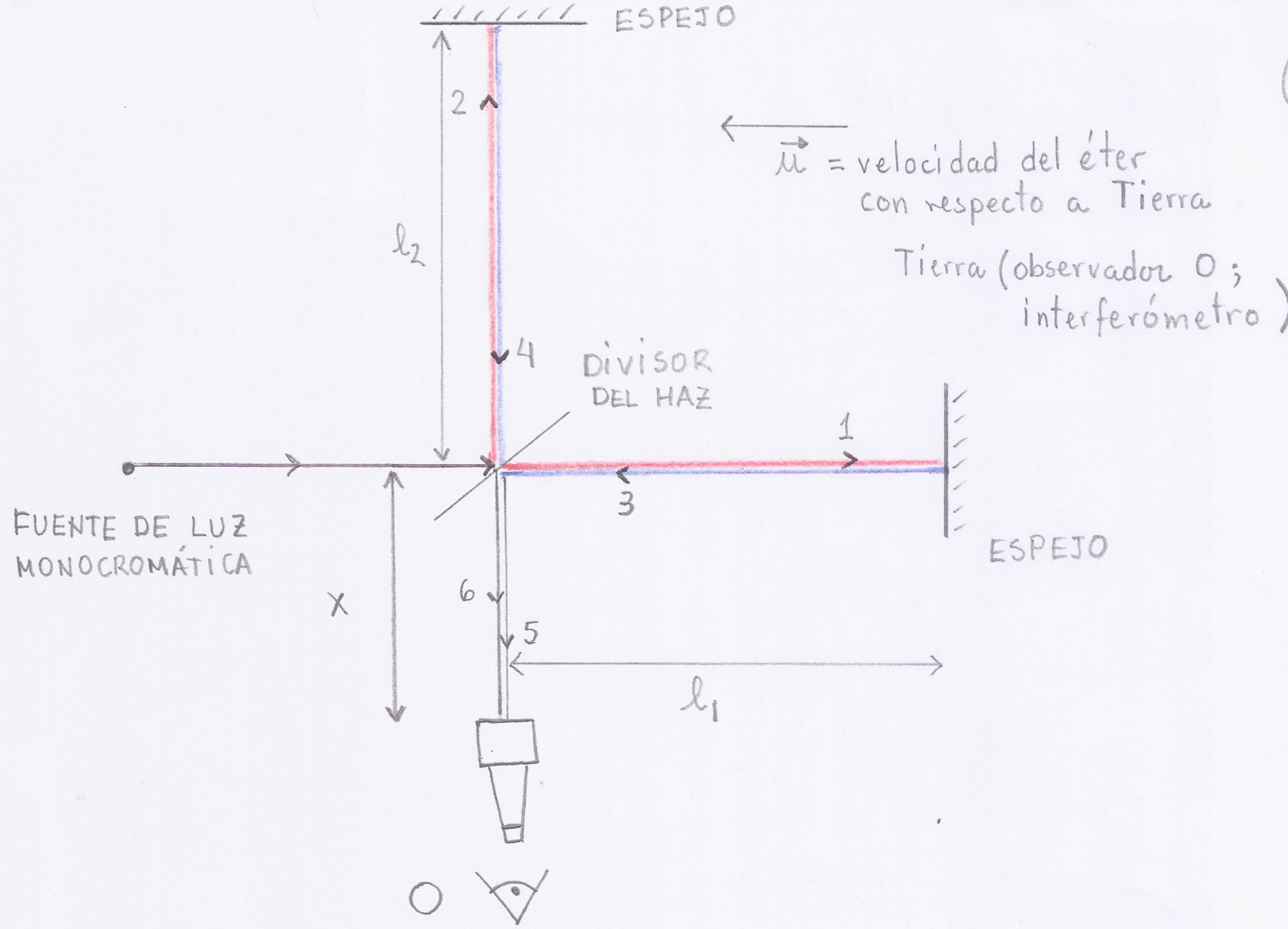
E


ESPEJO
$\vec{u}$ = velocidad del éter con respecto a Tierra
Tierra (observador O; interferómetro)
2
l_2
4
DIVISOR DEL HAZ
1
3
ESPEJO
FUENTE DE LUZ MONOCROMÁTICA
X
6
5
l_1
O

Ⓕ

✓ El primer experimento para "medir el éter" fue el de Albert Michelson y E. Morley en 1887.

✓ El aparato utilizado es un interferómetro: un rayo de luz monocromática se divide en dos (rayos 1 y 2 de la figura); el rayo 1 recorre una distancia (horizontal) l_1 y luego es reflejado por un espejo plano. El rayo reflejado (rayo 3) recorre la misma distancia l_1 pero en sentido contrario y "regresa" al DIVISOR DEL HAZ.

✓ El tiempo que tarda el rayo 1 en ir del DIVISOR DEL HAZ al espejo plano es $T_1 = l_1/(c-u)$ y el tiempo que tarda el rayo 3 en ir del espejo al DIVISOR DEL HAZ es $T_3 = l_1/c+u$.

✓ c es la magnitud de la velocidad de la luz con respecto al éter y u es la magnitud de la velocidad del planeta Tierra con respecto al éter (ó del etér con respecto al planeta Tierra)

✓ El tiempo que tarda el rayo 2 en ir del DIVISOR DEL HAZ al espejo plano superior es $T_2 = \frac{l_2}{c}\frac{1}{\sqrt{1-(u/c)^2}}$. El tiempo que tarda el rayo 4 reflejado en recorrer la misma distancia l_2 pero en sentido contrario (hacia abajo) del espejo superior al DIVISOR DEL HAZ es el mismo, esto es, $T_4 = \frac{l_2}{c}\frac{1}{\sqrt{1-(u/c)^2}}$.

✓ La diferencia de fase φ entre los dos rayos que se recombinan (rayos 5 y 6) produce un patrón de interferencia que consiste en franjas claras y oscuras debidas a interferencia constructiva y destructiva respectivamente.

✓ La diferencia de fase φ entre los rayos 5 y 6 se debe a:

1. Si $\ell_1 \neq \ell_2 \Rightarrow$ los rayos 1 y 3 recorren una distancia (ℓ_1) distinta a la que recorren los rayos 2 y 4 (ℓ_2),

2. aunque ℓ_1 fuese igual a ℓ_2, el tiempo $T_1 + T_3$ igual a $T_1 + T_3 = \dfrac{\ell_1}{c-u} + \dfrac{\ell_1}{c+u} = \dfrac{2\ell}{c}\left(\dfrac{1}{1-(u/c)^2}\right)$ es distinto al tiempo $T_2 + T_4 = \dfrac{2\ell}{c}\left(\dfrac{1}{\sqrt{1-(u/c)^2}}\right)$.

✓ La inteferencia entre las ondas electromagnéticas asociadas a los rayos 5 y 6 se interpreta utilizando los campos eléctricos E_5 y E_6 asociados al rayo 5 y 6 respectivamente.

✓ Michelsow y Morley giraron el interferómetro en 90° para observar el desplazamiento de las franjas del patrón de interferencia que ellos esperaban.

✓ Al girar el interferómetro la diferencia de fase φ entre los rayos 5 y 6 debería cambiar y ese cambio implicaría un desplazamiento de las franjas de interferencia.

✓ Para la posición del interferómetro mostrada en la figura, el desfasaje entre los rayos 5 y 6 se simboliza por $\varphi_{0°}$. En este caso, los rayos 1 y 3, de los que se "origina" o "proviene" el rayo 5 recorren la distancia ℓ_1 (en uno y otro sentido respectivamente) mientras que los rayos 2 y 4, de los que "proviene" el rayo 6 recorren la distancia ℓ_2 (en uno y otro sentido respectivamente).

✓ Cuando el interferómetro se rota un ángulo de 90° (supongamos en sentido horario), el desfasaje entre los rayos 5 y 6 se simboliza por $\varphi_{90°}$. En este caso, los rayos 1 y 3 (que "originan" el rayo 5) recorren la distancia l_2 y los rayos 2 y 4 (que "originan" el rayo 6) recorren la distancia l_1. (H)

✓ Este "intercambio" de distancias recorridas por los rayos 1 y 3 y las recorridas por los rayos 1 y 2, es equivalente a pensar que los rayos 5 y 6 recorren la misma distancia neta cuando el interferómetro está en 0° ó en 90°.

✓ Esto quiere decir que la cantidad $\varphi_{90°} - \varphi_{0°}$ no es "afectada" por la contribución ①.

✓ Esto también implica que los campos eléctricos E_5 y E_6 en el sitio de observación del patrón de interferencia pueden escribirse como

$$E_5 = E_0 \,\mathrm{Sen}(\omega t_5 - kx) \quad y \quad E_6 = E_0 (\omega t_6 - kx) \quad (*),$$

cuando el interferómetro está a 0°,

y

$$E_5' = E_0 \,\mathrm{Sen}(\omega t_5' - kx) \quad y \quad E_6' = E_0 (\omega t_6' - kx) \quad (**),$$

cuando el interferómetro está a 90°

(I)

a partir de las expresiones $(*)$ y $(**)$ se tiene

$$\varphi_{0^\circ} = (\omega t_6 - kx) - (\omega t_5 - kx) = \omega(t_6 - t_5)$$

$$\varphi_{90^\circ} = (\omega t_6' - kx) - (\omega t_5' - kx) = \omega(t_6' - t_5')$$

donde
$$t_5 = T_1 + T_3$$
$$t_6 = T_2 + T_4$$
$$t_5' = T_1' + T_3'$$
$$t_6' = T_2' + T_4'$$

siendo T_1 = tiempo que tarda el rayo 1 en recorrer la distancia l_1 con el interferómetro en $0°$

T_3 = tiempo que tarda el rayo 3 en recorrer la distancia l_1 con el interferómetro en $0°$

T_2 = tiempo que tarda el rayo 2 en recorrer la distancia l_2 con el interferómetro en $0°$

T_4 = tiempo que tarda el rayo 4 en recorrer la distancia l_2 con el interferómetro en $0°$

T_1' = tiempo que tarda el rayo 1 en recorrer la distancia l_1 con el interferómetro en $90°$

T_3' = tiempo que tarda el rayo 3 en recorrer la distancia l_1 con el interferómetro en $90°$

T_2' = tiempo que tarda el rayo 2 en recorrer la distancia l_2 con el interferómetro en $90°$

T_4' = tiempo que tarda el rayo 4 en recorrer la distancia l_2 con el interferómetro en $90°$.

J

✓ Cuando $\Delta\varphi = \varphi_{90^\circ} - \varphi_{0^\circ} = N(2\pi)$ donde $N = 1, 2, 3, \ldots$ ocurre un desplazamiento de N franjas en el patrón de difracción de modo que el patrón nuevo (a 90°) luce igual al patrón a 0°.

✓ Cuando $\Delta\varphi = \varphi_{90^\circ} - \varphi_{0^\circ} = (2N-1)\pi$ donde $N = 1, 2, 3, \ldots$ ocurre un desplazamiento de $\left(N - \frac{1}{2}\right)$ franjas de modo que las franjas claras del patrón a 0° son reemplazadas por franjas oscuras en el patrón a 90° y viceversa.

✓ En general cuando el interferómetro rota un ángulo pequeño $\Delta\theta$ entonces en el patrón de interferencia se debería producir un desplazamiento de franjas pequeño que podría ser tan pequeño como una fracción ΔN de una franja.

✓ Por otro lado $\Delta\varphi = \omega(t_6' - t_5') - \omega(t_6 - t_5)$

$$\Delta\varphi = \omega\left[T_2' + T_4' - (T_1' + T_3') - (T_2 + T_4) + (T_1 + T_3)\right]$$

Si $\ell_1 \neq \ell_2$

$$T_1 + T_3 = \frac{2\ell_1}{c}\left(\frac{1}{1-(u/c)^2}\right)$$

$$T_2 + T_4 = \frac{2\ell_2}{c}\left(\frac{1}{\sqrt{1-(u/c)^2}}\right)$$

$$T_1' + T_3' = \frac{2\ell_1}{c}\left(\frac{1}{\sqrt{1-(u/c)^2}}\right)$$

$$T_2' + T_4' = \frac{2\ell_2}{c}\left(\frac{1}{1-(u/c)^2}\right)$$

K

✓ $$\Delta\varphi = \omega\left[\frac{2(l_1+l_2)}{c}\left(\frac{1}{1-(u/c^2)} - \frac{1}{\sqrt{1-(u/c)^2}}\right)\right]$$

Como $(1+x)^n \simeq 1 + nx$ cuando $x < 1$ entonces

$$\frac{1}{1-(u/c)^2} = \left(1 - u^2/c^2\right)^{-1} \simeq 1 + \frac{u^2}{c^2}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-(u/c)^2}} = \left(1-(u/c)^2\right)^{-1/2} \simeq 1 + \frac{1}{2}\frac{u^2}{c^2}$$

$$\Rightarrow \quad \Delta\varphi = \omega\,\frac{2(l_1+l_2)}{c}\left(1 + \frac{u^2}{c^2} - 1 - \frac{1}{2}\frac{u^2}{c^2}\right)$$

$$\Delta\varphi = \frac{\omega(l_1+l_2)}{c}\left(\frac{u}{c}\right)^2 \qquad (***)$$

Cuando $\Delta\varphi = 2\pi$, el patrón de interferencia se mueve una franja completa, es decir, una franja clara se mueve a la posición donde estaba una franja clara adyacente (y lo mismo pasa para cualquier franja oscura), entonces cuando el patrón se mueve una fracción de franja ΔN, la $\Delta\varphi$ es igual a $2\pi\Delta N$. Sustituyendo en $(***)$

$$\Rightarrow 2\pi\Delta N = \frac{\omega(l_1+l_2)}{c}\left(\frac{u}{c}\right)^2 \Rightarrow \Delta N = \frac{2\pi\nu(l_1+l_2)}{2\pi c}\left(\frac{u}{c}\right)^2$$

$$\Rightarrow \quad \Delta N = \frac{\nu}{c}(l_1+l_2)\left(\frac{u}{c}\right)^2 \Rightarrow \Delta N = \frac{l_1+l_2}{\lambda}\left(\frac{u}{c}\right)^2 \qquad (+)$$

(L)

$$\Delta N = \frac{l_1 + l_2}{\lambda}\left(\frac{u}{c}\right)^2$$

En el experimento de M-M : $l_1 + l_2 = 22\,m$, $l_1 = l_2$

$\lambda = 5.5 \times 10^{-7}\,m$

$u/c = 30\,km/s \,/\, 300000\,km/s$

$u/c = 10^{-4}$

$\Rightarrow \Delta N = 0.4 = \frac{4}{10} = \frac{2}{5} \Rightarrow$ Dos quintos de franja !!!

En este experimento era posible detectar $\Delta N = 0.01$!!

Pero no se observó ningún corrimiento !!!

$\Delta N = 0$!!!

Esto implica que $u = 0$, es decir
la velocidad del éter con respecto a
nuestro planeta Tierra es cero !!! ,

es decir,
la velocidad de la Tierra con respecto al
éter (fijo al Sol) es cero !!! ,

es decir,
la velocidad del planeta Tierra con
respecto al Sol es cero !!!

OOOOPSSSSS !!!!!

M

Entra Einstein en la escena y propone dos postulados.

Uno de los postulados implica que la velocidad de la luz es la misma en todas las direcciones y con respecto a todos los marcos de referencia inerciales.

Bajo esta suposición, la velocidad de la luz es la misma a lo largo de cualquiera de "los brazos (l_1 y l_2)" del interferómetro de M-M bajo cualquier condición.

Esto significa que la velocidad de la luz es siempre $\vec{c}$ y no $\vec{c}+\vec{u}$.

Esto es equivalente a decir que no existe el éter de los físicos del siglo XIX.

Esto quiere decir que todo el análisis de velocidades (basado en las TG's) hecho en el experimento M-M no aplica, no es correcto.

N

Esto implica que cuando el interferómetro está a 0°

$$\varphi_{0°} = \omega(t_6 - t_5)$$

y $t_5 = T_1 + T_3 = \frac{2 l_1}{c}$

$t_6 = T_2 + T_4 = \frac{2 l_2}{c}$

$$\Rightarrow \quad \varphi_{0°} = \frac{2w}{c}(l_2 - l_1)$$

Y cuando el interferómetro está a 90°

$$\varphi_{90°} = \omega(t_6' - t_5')$$

con $t_5' = T_1' + T_3' = 2\frac{l_1}{c}$

$t_6' = T_2' + T_4' = 2\frac{l_2}{c}$

$$\Rightarrow \quad \varphi_{90°} = \frac{2w}{c}(l_2 - l_1)$$

$$\Rightarrow \quad \varphi_{90°} - \varphi_{0°} = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta N = 0$$