

T1. CONSTANCIA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ

1. Naturaleza y velocidad de la luz
2. El éter luminífero
3. Primeros experimentos
 - 3.1 Aberración estelar
 - 3.2 Arrastre del éter: experimento de Fizeau
 - 3.3 Preludio del experimento de Michelson-Morley
4. El experimento de Michelson-Morley
5. La hipótesis de contracción de Lorentz-Fitzgerald
6. El experimento de Kennedy-Thorndike
7. Otros experimentos
8. El segundo postulado de Einstein

1. Naturaleza y velocidad de la luz

1. Naturaleza y velocidad de la luz

Corpúsculo

Onda

1. Naturaleza y velocidad de la luz

Corpúsculo

- s.VI a.C.: Pitágoras (chorro de partículas)
1642-1726: I. Newton (**modelo corpuscular**)
s.XVII: R. Descartes ('ley' refracción)

Onda

- 1667: R. Hooke (onda similar al sonido)
1629-1695: Ch. Huygens (**modelo ondulatorio**)
s.XIX: T. Young (interferencias)
A. Fresnel (difracción, polarización)

1. Naturaleza y velocidad de la luz

Corpúsculo

s.VI a.C.: Pitágoras (chorro de partículas)

1642-1726: I. Newton (**modelo corpuscular**)

s.XVII: R. Descartes ('ley' refracción)

Onda

1667: R. Hooke (onda similar al sonido)

1629-1695: Ch. Huygens (**modelo ondulatorio**)

s.XIX: T. Young (interferencias)

A. Fresnel (difracción, polarización)

Velocidad de la luz

1. Naturaleza y velocidad de la luz

Corpúsculo

s.VI a.C.: Pitágoras (chorro de partículas)

1642-1726: I. Newton (**modelo corpuscular**)

s.XVII: R. Descartes ('ley' refracción)

Onda

1667: R. Hooke (onda similar al sonido)

1629-1695: Ch. Huygens (**modelo ondulatorio**)

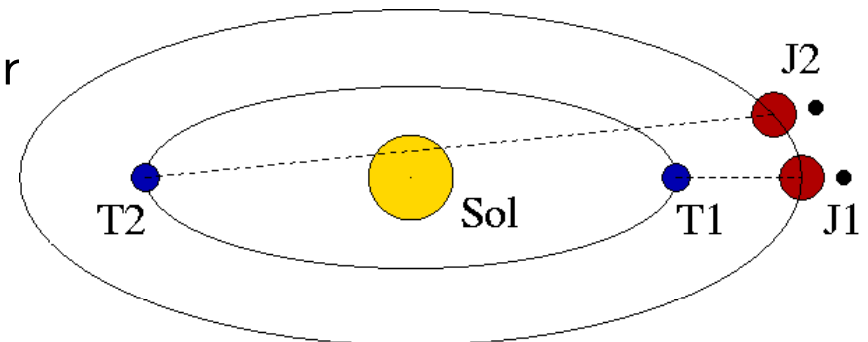
s.XIX: T. Young (interferencias)

A. Fresnel (difracción, polarización)

Velocidad de la luz

[exp.] O. Roemer (1675): ocultación lunas de Júpiter

[teo.] J.C. Maxwell (1846): $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$



1. Naturaleza y velocidad de la luz

Corpúsculo

s.VI a.C.: Pitágoras (chorro de partículas)

1642-1726: I. Newton (**modelo corpuscular**)

s.XVII: R. Descartes ('ley' refracción)

Onda

1667: R. Hooke (onda similar al sonido)

1629-1695: Ch. Huygens (**modelo ondulatorio**)

s.XIX: T. Young (interferencias)

A. Fresnel (difracción, polarización)

Velocidad de la luz

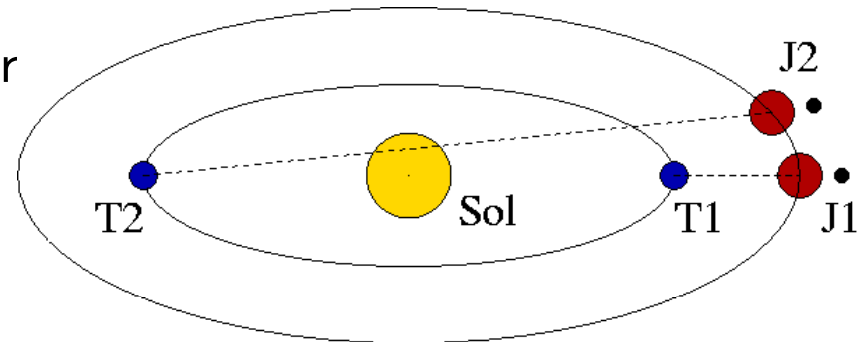
[exp.] O. Roemer (1675): ocultación lunas de Júpiter

[teo.] J.C. Maxwell (1846): $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$

Teoría cuántica: Onda-corpúsculo

M. Planck (1900: $E = h\nu$, espectro cuerpo negro), A. Einstein (1905: efecto fotoeléctrico),
N. Bohr (1912: átomo hidrógeno), A.H. Compton (1922), ...

L. de Broglie (1925: $\lambda = h/p$: **dualidad onda-corpúsculo**)



2. El éter luminífero

2. El éter luminífero

La luz tiene **comportamiento ondulatorio**: difracción, interferencia, polarización ...

¿Qué está vibrando?

2. El éter luminífero

La luz tiene **comportamiento ondulatorio**: difracción, interferencia, polarización ...

¿Qué está vibrando?

⇒ Se presupone un medio: **éter** rodeando y permeando todos los medios transparentes

2. El éter luminífero

La luz tiene **comportamiento ondulatorio**: difracción, interferencia, polarización ...

¿Qué está vibrando?

⇒ Se presupone un medio: **éter** rodeando y permeando todos los medios transparentes

Material muy misterioso:

- **Muy ligero**: resistencia prácticamente nula al paso de los astros
- **Muy rígido**: muy difícil de comprimir (c es muy grande)

2. El éter luminífero

La luz tiene **comportamiento ondulatorio**: difracción, interferencia, polarización ...

¿Qué está vibrando?

⇒ Se presupone un medio: **éter** rodeando y permeando todos los medios transparentes

Material muy misterioso:

- **Muy ligero**: resistencia prácticamente nula al paso de los astros
- **Muy rígido**: muy difícil de comprimir (c es muy grande)

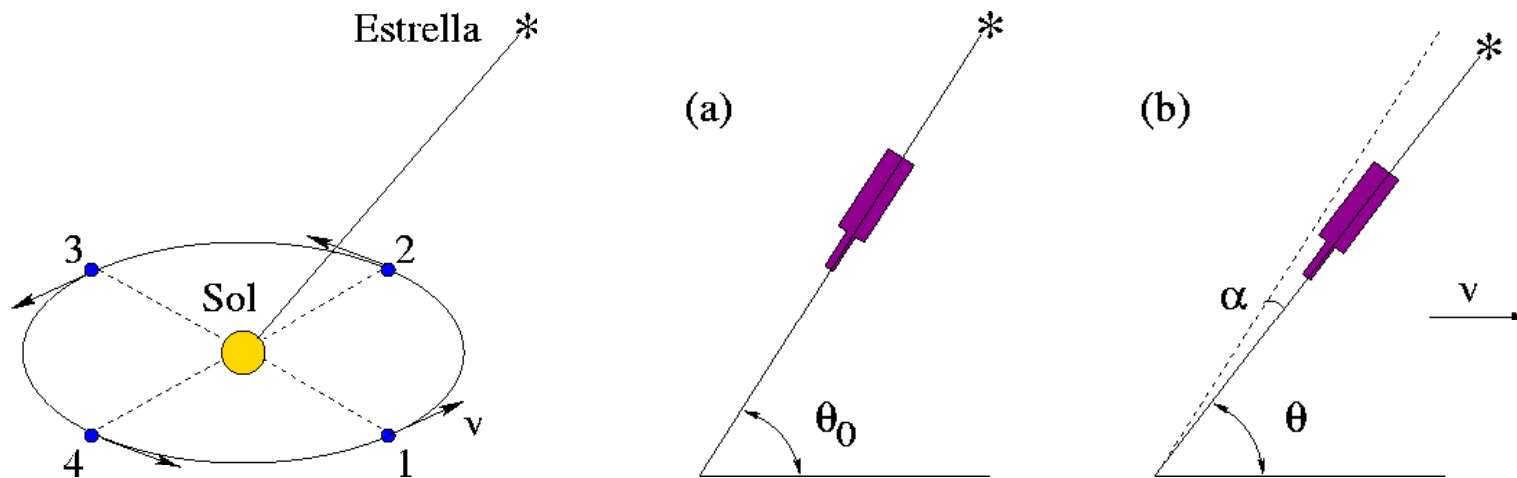
Segunda mitad del s.XIX y principios del s.XX ...

En busca del éter

3. Primeros experimentos

3. Primeros experimentos

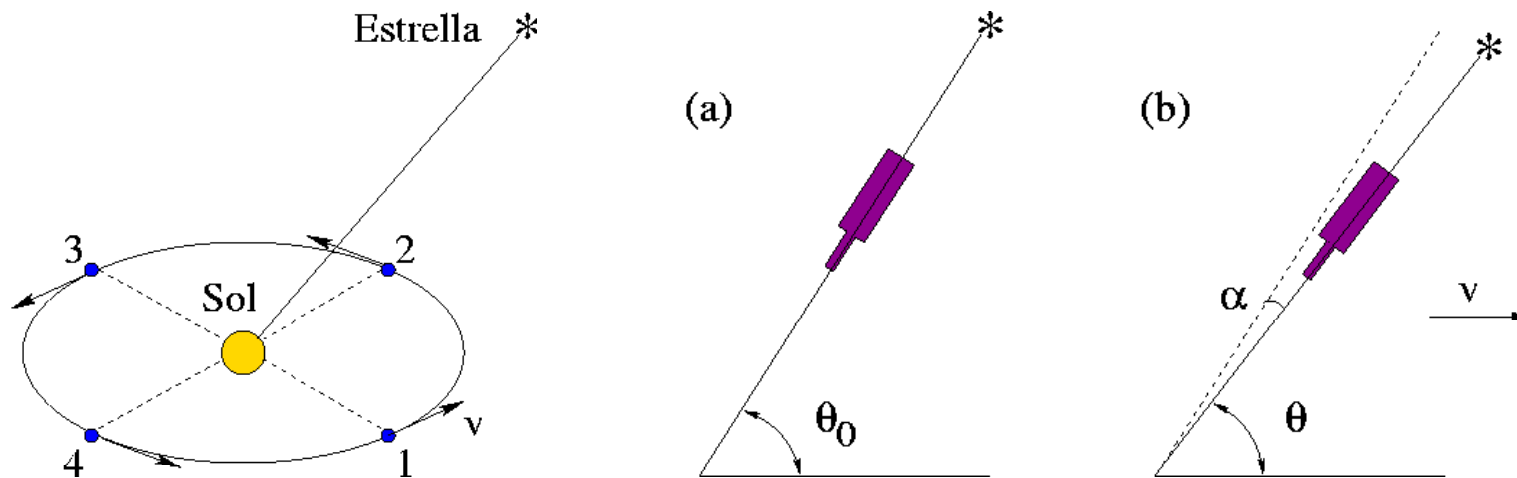
3.1 Aberración estelar



J. Bradley (1725): **aberración** $\alpha = \theta - \theta_0$ (\sim gotas de lluvia). Elipse (semieje vertical $\sim v/c$). Si el éter fuera arrastrado por la Tierra no habría aberración. **Apoya modelo corpuscular.**

3. Primeros experimentos

3.1 Aberración estelar



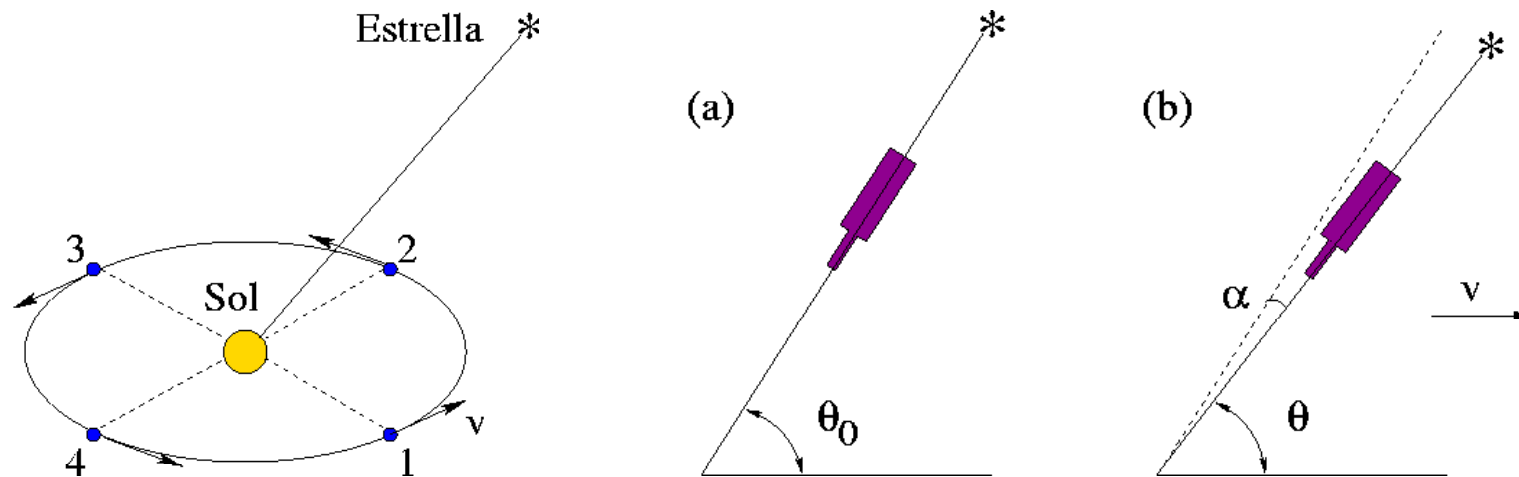
J. Bradley (1725): **aberración** $\alpha = \theta - \theta_0$ (\sim gotas de lluvia). Elipse (semieje vertical $\sim v/c$). Si el éter fuera arrastrado por la Tierra no habría aberración. **Apoya modelo corpuscular.**

3.2 Arrastre del éter experimento de Fizeau

A. Fizeau (1851): Luz por tuberías de agua en distintas direcciones. **Existe arrastre!**

3. Primeros experimentos

3.1 Aberración estelar



J. Bradley (1725): **aberración** $\alpha = \theta - \theta_0$ (\sim gotas de lluvia). Elipse (semieje vertical $\sim v/c$). Si el éter fuera arrastrado por la Tierra no habría aberración. **Apoya modelo corpuscular.**

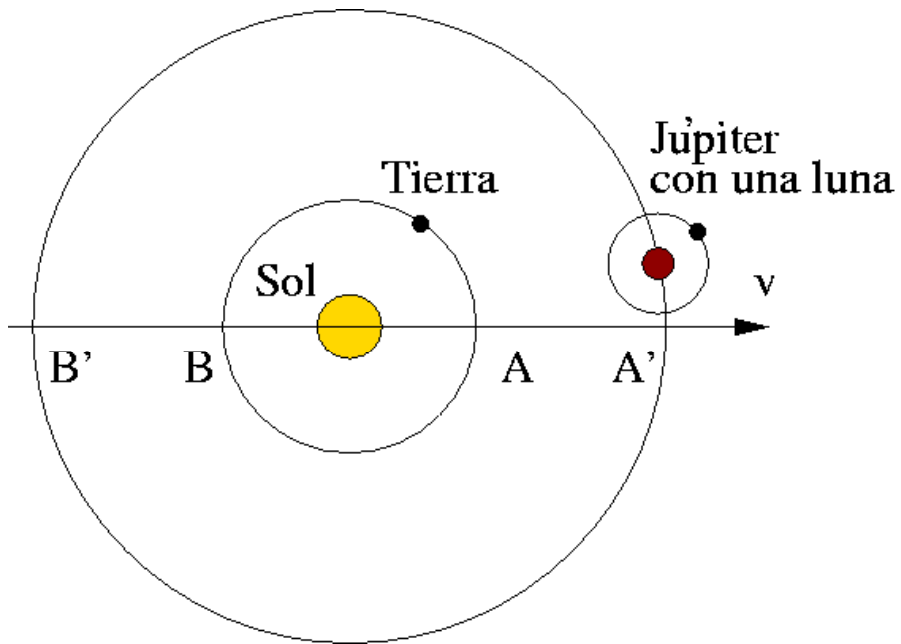
3.2 Arrastre del éter experimento de Fizeau

A. Fizeau (1851): Luz por tuberías de agua en distintas direcciones. **Existe arrastre!**

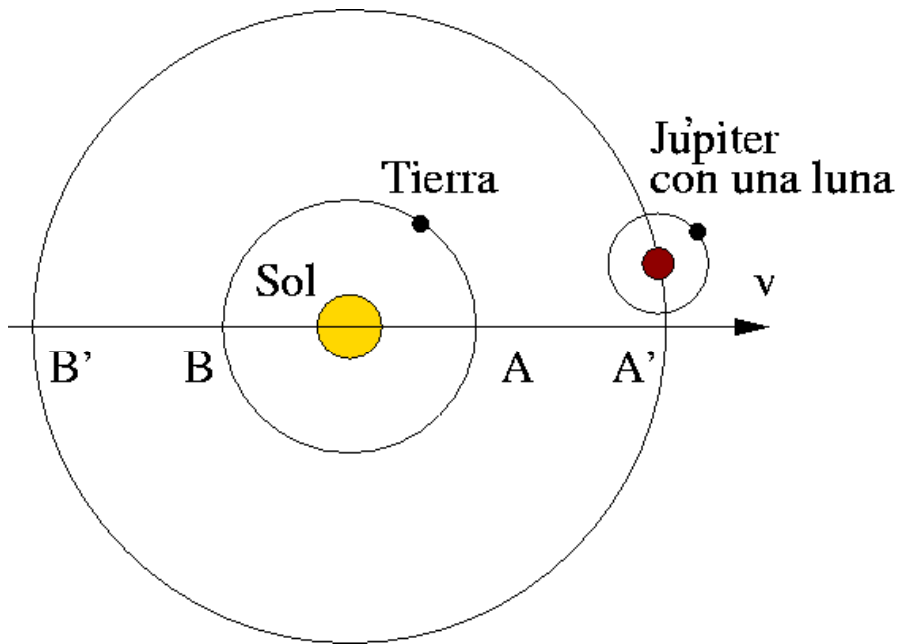
\Rightarrow **Contradicción:** seguir buscando

3.3 Preludio del experimento de Michelson-Morley

3.3 Preludio del experimento de Michelson-Morley



3.3 Preludio del experimento de Michelson-Morley



Propuesta de Maxwell (1879)

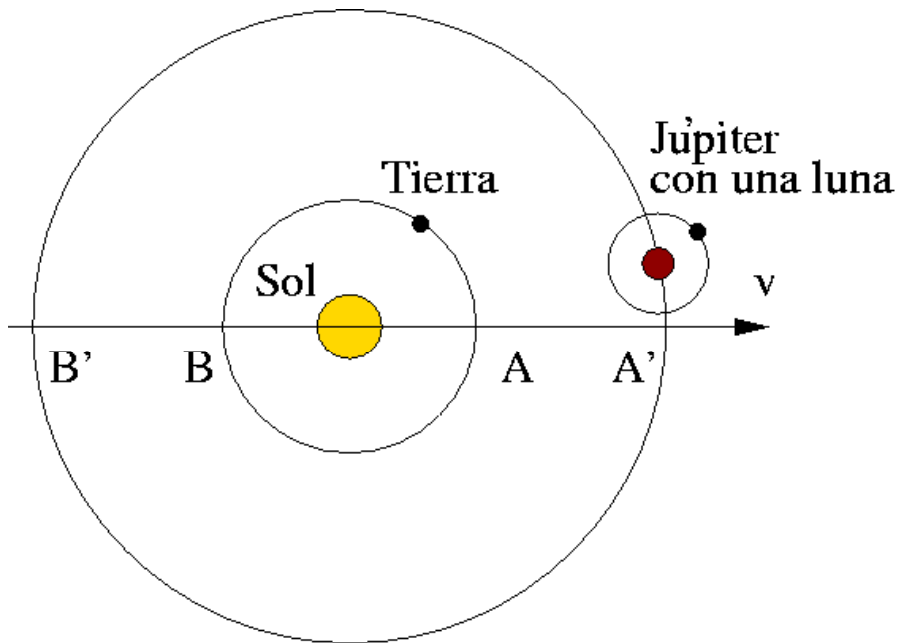
A: Tierra, A': Júpiter, $t_0 = l/c = 16$ min

B, B': sus posiciones 6 años más tarde

En configuraciones A' y B' repetir expt Roemer

$$t_A = \frac{l}{c+v} \approx t_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$
$$t_B = \frac{l}{c-v} \approx t_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

3.3 Preludio del experimento de Michelson-Morley



Propuesta de Maxwell (1879)

A: Tierra, A': Júpiter, $t_0 = l/c = 16$ min

B, B': sus posiciones 6 años más tarde

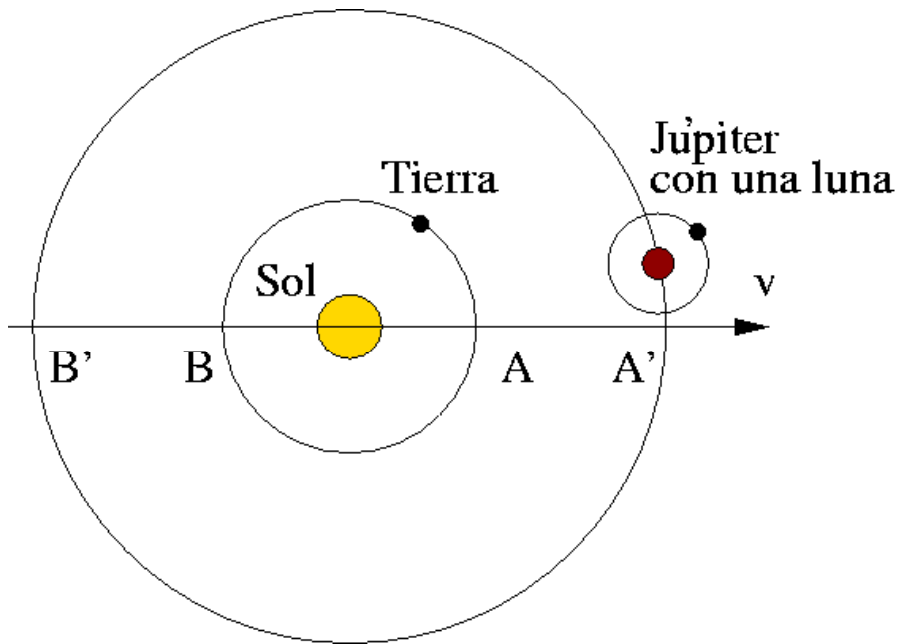
En configuraciones A' y B' repetir expt Roemer

$$t_A = \frac{l}{c+v} \approx t_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

$$t_B = \frac{l}{c-v} \approx t_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

$$\Rightarrow \Delta t = t_B - t_A \approx \frac{2lv}{c^2} = \frac{2v}{c} t_0 \quad (v \ll c) \quad \text{efecto } \mathcal{O}(v/c)$$

3.3 Preludio del experimento de Michelson-Morley



Propuesta de Maxwell (1879)

A: Tierra, A': Júpiter, $t_0 = l/c = 16$ min

B, B': sus posiciones 6 años más tarde

En configuraciones A' y B' repetir expt Roemer

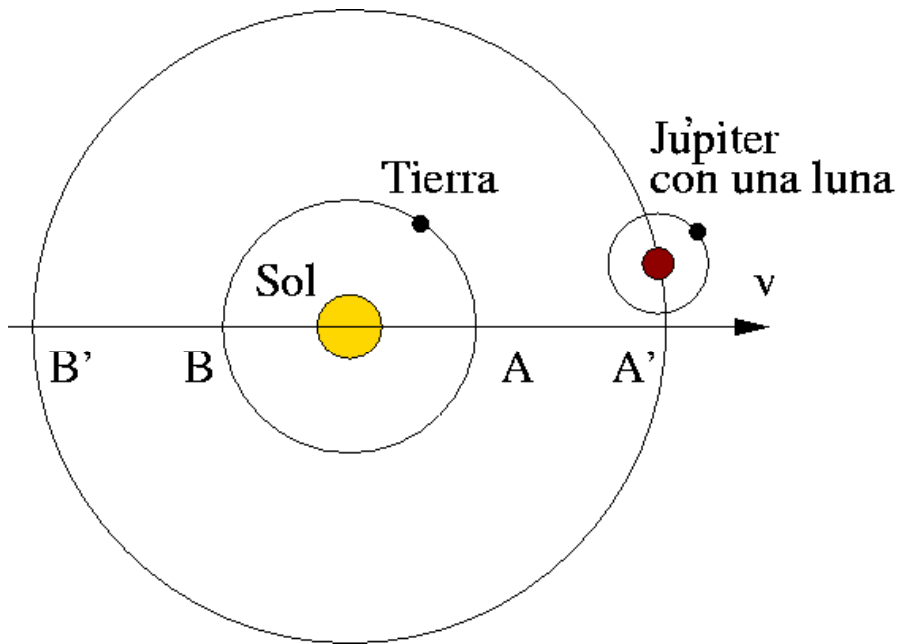
$$t_A = \frac{l}{c+v} \approx t_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

$$t_B = \frac{l}{c-v} \approx t_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

$$\Rightarrow \Delta t = t_B - t_A \approx \frac{2lv}{c^2} = \frac{2v}{c} t_0 \quad (v \ll c) \quad \text{efecto } \mathcal{O}(v/c)$$

Si se pudieran medir $\Delta t = 0.1$ s se detectarían $v = 15$ km/s o superiores

3.3 Preludio del experimento de Michelson-Morley



Propuesta de Maxwell (1879)

A: Tierra, A': Júpiter, $t_0 = l/c = 16$ min

B, B': sus posiciones 6 años más tarde

En configuraciones A' y B' repetir expt Roemer

$$t_A = \frac{l}{c+v} \approx t_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

$$t_B = \frac{l}{c-v} \approx t_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

$$\Rightarrow \Delta t = t_B - t_A \approx \frac{2lv}{c^2} = \frac{2v}{c} t_0 \quad (v \ll c) \quad \text{efecto } \mathcal{O}(v/c)$$

Si se pudieran medir $\Delta t = 0.1$ s se detectarían $v = 15$ km/s o superiores

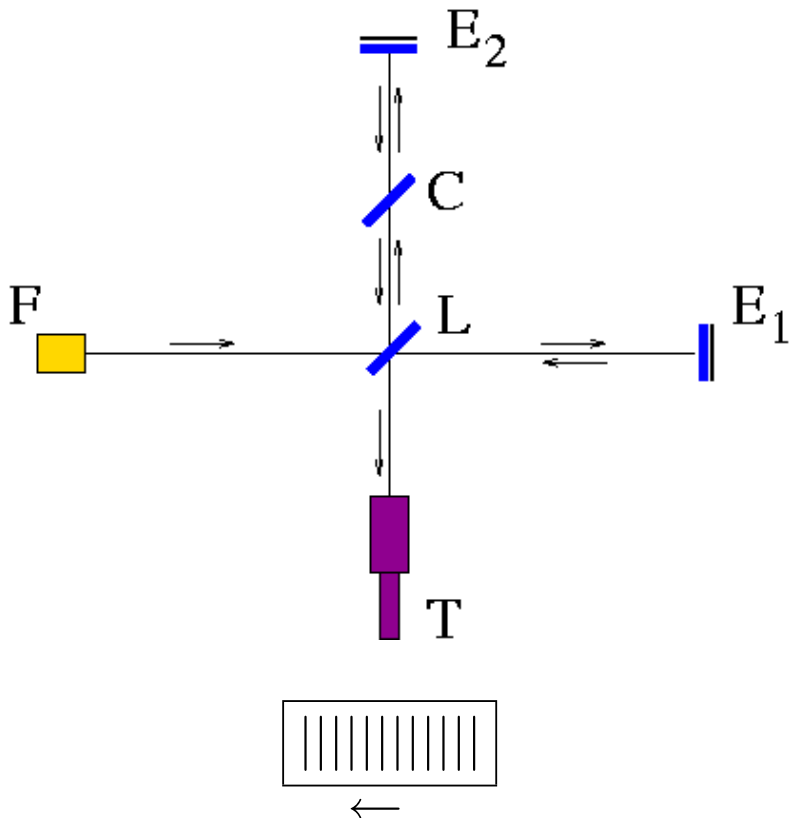
no fiable: no se conocen posiciones con tanta exactitud en un intervalo tan grande

4. Experimento de Michelson-Morley

A.A. Michelson (1887)

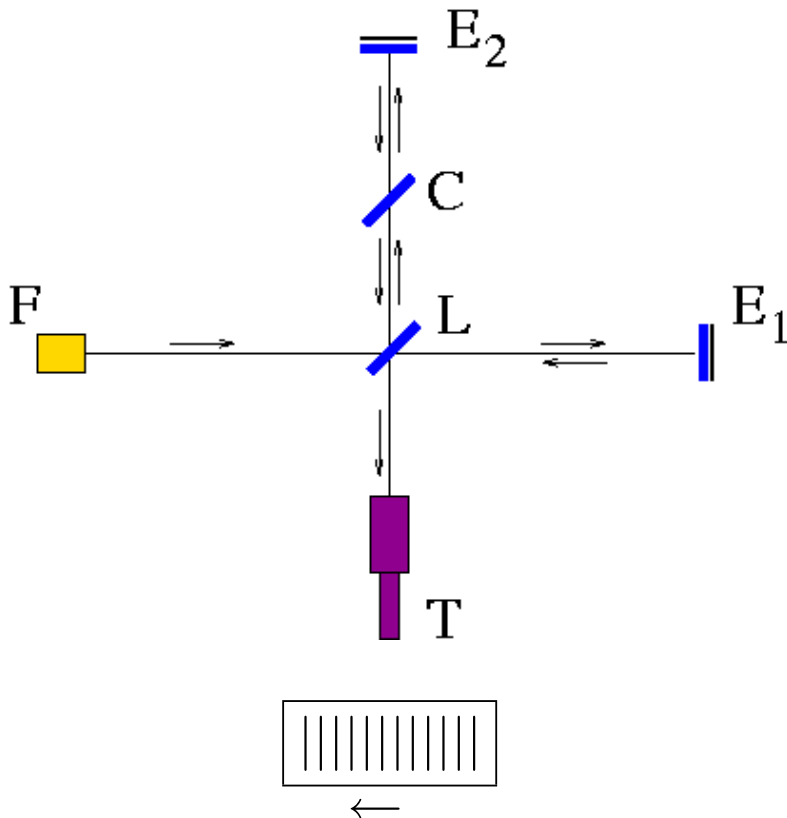
4. Experimento de Michelson-Morley

A.A. Michelson (1887)



4. Experimento de Michelson-Morley

A.A. Michelson (1887)



$$t_1^0 = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l_1}{c+v} = \frac{2l_1 c}{c^2 - v^2} = \frac{2l_1}{c} \frac{1}{1 - v^2/c^2}$$

$$t_2^0 = \frac{2l_2}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (\text{'cruzando el río'})$$

$$\Rightarrow \Delta t^0 = t_1^0 - t_2^0 \approx \frac{2(l_1 - l_2)}{c} + \frac{(2l_1 - l_2)v^2}{c^3} \quad \leftarrow v$$

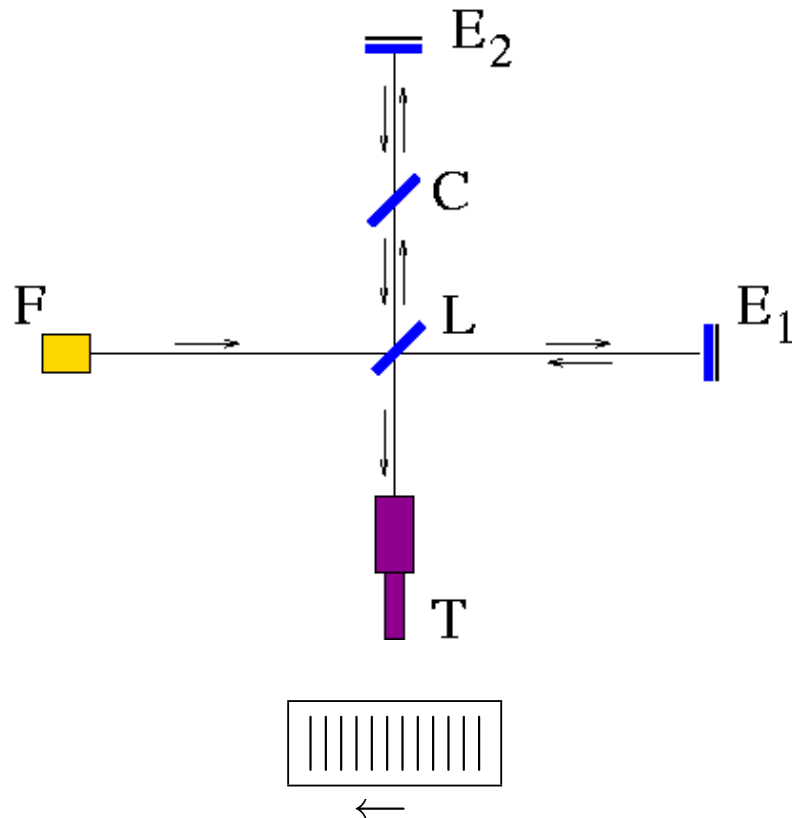
$$t_1^{90} = \frac{2l_1}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (\text{'cruzando el río'})$$

$$t_2^{90} = \frac{2l_2}{c} \frac{1}{1 - v^2/c^2}$$

$$\Rightarrow \Delta t^{90} = t_1^{90} - t_2^{90} \approx \frac{2(l_1 - l_2)}{c} + \frac{(l_1 - 2l_2)v^2}{c^3} \quad \uparrow v$$

4. Experimento de Michelson-Morley

A.A. Michelson (1887)



$$t_1^0 = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l_1}{c+v} = \frac{2l_1 c}{c^2 - v^2} = \frac{2l_1}{c} \frac{1}{1 - v^2/c^2}$$

$$t_2^0 = \frac{2l_2}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (\text{'cruzando el río'})$$

$$\Rightarrow \Delta t^0 = t_1^0 - t_2^0 \approx \frac{2(l_1 - l_2)}{c} + \frac{(2l_1 - l_2)v^2}{c^3} \quad \leftarrow v$$

$$t_1^{90} = \frac{2l_1}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (\text{'cruzando el río'})$$

$$t_2^{90} = \frac{2l_2}{c} \frac{1}{1 - v^2/c^2}$$

$$\Rightarrow \Delta t^{90} = t_1^{90} - t_2^{90} \approx \frac{2(l_1 - l_2)}{c} + \frac{(l_1 - 2l_2)v^2}{c^3} \quad \uparrow v$$

Desplazamiento de las franjas: $\Delta d = c(\Delta t^0 - \Delta t^{90}) \Rightarrow \delta = \frac{\Delta d}{\lambda} = \frac{l_1 + l_2}{\lambda} \frac{v^2}{c^2}$ de $\mathcal{O}(v^2/c^2)$

Resultados de Michelson-Morley y sucesores

Resultados de Michelson-Morley y sucesores

δ_{\min} : sensibilidad del experimento

δ : se esperaba como mínimo el efecto de la traslación de la Tierra alrededor del Sol
($v = 30 \text{ km/s}$)

Resultados de Michelson-Morley y sucesores

δ_{\min} : sensibilidad del experimento

δ : se esperaba como mínimo el efecto de la traslación de la Tierra alrededor del Sol
($v = 30 \text{ km/s}$)

Año	Experimento	$l_1 = l_2$ [m]	δ	δ_{\min}	δ/δ_{\min}
1881	Michelson	1.2	0.04	0.02	2
1887	Michelson-Morley	11.0	0.40	0.005	40
1902-04	Morley-Miller	32.2	1.13	0.015	80
1927	Illingworth	20.0	0.07	0.0004	175
1930	Joos	21.0	0.75	0.002	375

Resultados de Michelson-Morley y sucesores

δ_{\min} : sensibilidad del experimento

δ : se esperaba como mínimo el efecto de la traslación de la Tierra alrededor del Sol
($v = 30 \text{ km/s}$)

Año	Experimento	$l_1 = l_2$ [m]	δ	δ_{\min}	δ/δ_{\min}
1881	Michelson	1.2	0.04	0.02	2
1887	Michelson-Morley	11.0	0.40	0.005	40
1902-04	Morley-Miller	32.2	1.13	0.015	80
1927	Illingworth	20.0	0.07	0.0004	175
1930	Joos	21.0	0.75	0.002	375

no se observó ningún desplazamiento apreciable

... y ahora qué?

5. Hipótesis de contracción de Lorentz-Fitzgerald

H.A. Lorentz, G.F. Fitzgerald (1892):

5. Hipótesis de contracción de Lorentz-Fitzgerald

H.A. Lorentz, G.F. Fitzgerald (1892):

suponer **contracción** del brazo del interferómetro en dirección del viento de éter un factor

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

5. Hipótesis de contracción de Lorentz-Fitzgerald

H.A. Lorentz, G.F. Fitzgerald (1892):

suponer **contracción** del brazo del interferómetro en dirección del viento de éter un factor

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\begin{cases} 0^\circ \\ 90^\circ \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} l'_1 = l_1/\gamma \Rightarrow t_1^0 = \frac{2l'_1}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2l_1}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ l'_2 = l_2 \Rightarrow t_2^0 = \frac{2l'_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2l_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ l'_1 = l_1 \Rightarrow t_1^{90} = \frac{2l'_1}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2l_1}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ l'_2 = l_2/\gamma \Rightarrow t_2^{90} = \frac{2l'_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2l_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{array} \right.$$

5. Hipótesis de contracción de Lorentz-Fitzgerald

H.A. Lorentz, G.F. Fitzgerald (1892):

suponer **contracción** del brazo del interferómetro en dirección del viento de éter un factor

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$0^\circ \left\{ \begin{array}{l} l'_1 = l_1/\gamma \Rightarrow t_1^0 = \frac{2l'_1}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2l_1}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ l'_2 = l_2 \Rightarrow t_2^0 = \frac{2l'_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2l_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{array} \right.$$
$$90^\circ \left\{ \begin{array}{l} l'_1 = l_1 \Rightarrow t_1^{90} = \frac{2l'_1}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2l_1}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ l'_2 = l_2/\gamma \Rightarrow t_2^{90} = \frac{2l'_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2l_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \Delta t^0 = \Delta t^{90} = \frac{2(l_1 - l_2)}{c\sqrt{1 - v^2/c^2}} \Rightarrow \Delta d = 0$$

no hay desplazamiento de franjas

6. Experimento de Kennedy-Thorndike

E.J. Kennedy, E.M. Thorndike (1932):

6. Experimento de Kennedy-Thorndike

E.J. Kennedy, E.M. Thorndike (1932):

interferómetro **fijo** de **brazos desiguales**, esperar cambios día-noche o estacionales

6. Experimento de Kennedy-Thorndike

E.J. Kennedy, E.M. Thorndike (1932):

interferómetro **fijo** de **brazos desiguales**, esperar cambios día-noche o estacionales

Si la contracción de Lorentz-Fitzgerald fuera cierta entonces,
para dos orientaciones de la Tierra A y B:

$$\Delta t_A = \frac{2(l_1 - l_2)}{c\sqrt{1 - v_A^2/c^2}}, \quad \Delta t_B = \frac{2(l_1 - l_2)}{c\sqrt{1 - v_B^2/c^2}} \Rightarrow \Delta t_A \neq \Delta t_B?$$

6. Experimento de Kennedy-Thorndike

E.J. Kennedy, E.M. Thorndike (1932):

interferómetro **fijo** de **brazos desiguales**, esperar cambios día-noche o estacionales

Si la contracción de Lorentz-Fitzgerald fuera cierta entonces,
para dos orientaciones de la Tierra A y B:

$$\Delta t_A = \frac{2(l_1 - l_2)}{c\sqrt{1 - v_A^2/c^2}}, \quad \Delta t_B = \frac{2(l_1 - l_2)}{c\sqrt{1 - v_B^2/c^2}} \Rightarrow \Delta t_A \neq \Delta t_B?$$

no se observó ninguna diferencia apreciable

la hipótesis de Lorentz-Fitzgerald debe ser desechada

... pero ya antes de eso Einstein tenía su propia solución ...

7. Otros experimentos

7. Otros experimentos

A. Brillet, J.L. Hall (1979): $\Delta c/c = 3 \times 10^{-15}$ (tipo MM)

D. Hils, J.L. Hall (1990): $\Delta c/c = 2 \times 10^{-13}$ (tipo KT)

7. Otros experimentos

A. Brillet, J.L. Hall (1979): $\Delta c/c = 3 \times 10^{-15}$ (tipo MM)

D. Hils, J.L. Hall (1990): $\Delta c/c = 2 \times 10^{-13}$ (tipo KT)

● CERN (1964): $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (primer experimento con fuente móvil, $v_\pi = 0.99975c$)

$$v_\gamma = (2.9977 \pm 0.0004) \times 10^8 \text{ m/s, compatible con } c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

7. Otros experimentos

A. Brillet, J.L. Hall (1979): $\Delta c/c = 3 \times 10^{-15}$ (tipo MM)

D. Hils, J.L. Hall (1990): $\Delta c/c = 2 \times 10^{-13}$ (tipo KT)

• CERN (1964): $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (primer experimento con fuente móvil, $v_\pi = 0.99975c$)

$v_\gamma = (2.9977 \pm 0.0004) \times 10^8$ m/s, compatible con $c = 299\,792\,458$ m/s

8. El segundo postulado de Einstein

7. Otros experimentos

A. Brillet, J.L. Hall (1979): $\Delta c/c = 3 \times 10^{-15}$ (tipo MM)

D. Hils, J.L. Hall (1990): $\Delta c/c = 2 \times 10^{-13}$ (tipo KT)

● CERN (1964): $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (primer experimento con fuente móvil, $v_\pi = 0.99975c$)

$v_\gamma = (2.9977 \pm 0.0004) \times 10^8$ m/s, compatible con $c = 299\,792\,458$ m/s

8. El segundo postulado de Einstein

si no hay viento de éter es porque el éter no existe

7. Otros experimentos

A. Brillet, J.L. Hall (1979): $\Delta c/c = 3 \times 10^{-15}$ (tipo MM)

D. Hils, J.L. Hall (1990): $\Delta c/c = 2 \times 10^{-13}$ (tipo KT)

• CERN (1964): $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (primer experimento con fuente móvil, $v_\pi = 0.99975c$)

$v_\gamma = (2.9977 \pm 0.0004) \times 10^8$ m/s, compatible con $c = 299\,792\,458$ m/s

8. El segundo postulado de Einstein

si no hay viento de éter es porque el éter no existe

A. Einstein (1905):

la velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores, independientemente de su localización, época, orientación o velocidad relativa respecto a la fuente

7. Otros experimentos

A. Brillet, J.L. Hall (1979): $\Delta c/c = 3 \times 10^{-15}$ (tipo MM)

D. Hils, J.L. Hall (1990): $\Delta c/c = 2 \times 10^{-13}$ (tipo KT)

• CERN (1964): $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (primer experimento con fuente móvil, $v_\pi = 0.99975c$)

$v_\gamma = (2.9977 \pm 0.0004) \times 10^8$ m/s, compatible con $c = 299\,792\,458$ m/s

8. El segundo postulado de Einstein

si no hay viento de éter es porque el éter no existe

A. Einstein (1905):

la velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores, independientemente de su localización, época, orientación o velocidad relativa respecto a la fuente

Revisar totalmente nuestra noción de espacio, tiempo, energía, ...