

Relatividad especial

Física 1B

9/10/2020

¿Qué es *exactamente* la mecánica Newtoniana?

Fuerzas

(gravitatoria, elástica, eléctrica, magnética, etc.)

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Ecuaciones de movimiento

Obtengo la trayectoria aplicando matemática

Las fuerzas tienen que ser compatibles con esto.

¿Cuándo valen las leyes?

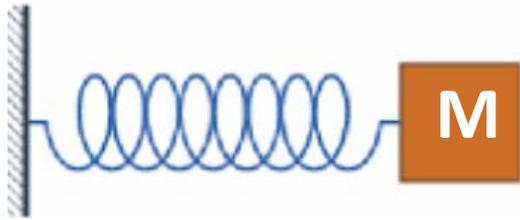
Si valen para O, entonces valen para O' si:

$$\vec{V}_{O'O} = cte$$

Y entonces,

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{V}_{O'O}t$$
$$t = t'$$





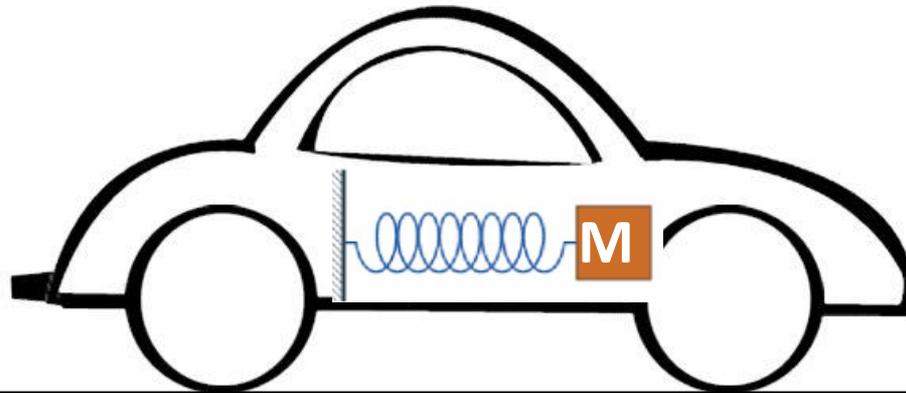
Este no es un resorte ordinario.

Su constante $k = k(v_{\text{obs}})$, donde v_{obs} es la velocidad relativa entre el observador y una estrella muy lejana (por ejemplo, Deneb)

No existen resortes así!



$\vec{V}_{O'O}$



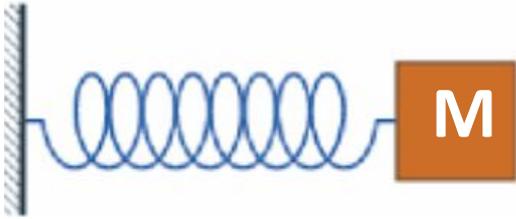
O

O'

Si alguien midió $\omega = \sqrt{k/M}$ en O, y ahora esta en O', sabe que se esta moviendo en relacion a O porque $\omega' = \sqrt{k'/M}$ porque k es distinto de k' (O y O' se mueven con distintas velocidades en relación a Deneb).

Peor aún: si O y O' miden el período del resorte simultáneamente llegan a distintos resultados.

Teoría especial de la relatividad (una analogía)



Este no es un “resorte” ordinario.

Su constante $k = k(v_{\text{obs}})$, donde v_{obs} es la velocidad relativa entre el observador y una estrella muy lejana (por ejemplo, Deneb)

Ese “resorte” SI existe!

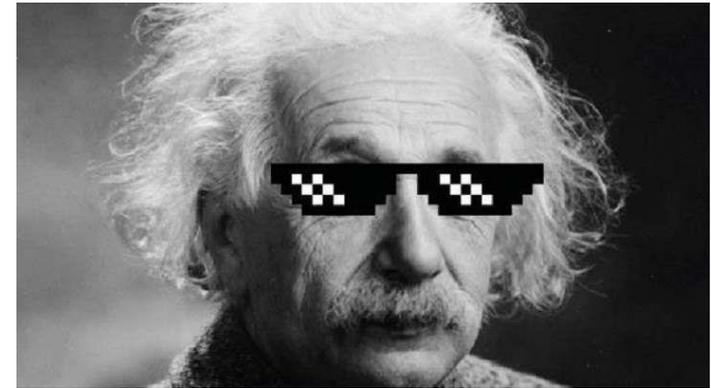


Newton

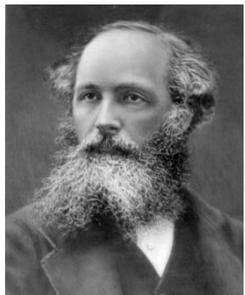


Lorentz

Ese “resorte” NO existe!



Einstein



Maxwell



Galileo



Poincaré

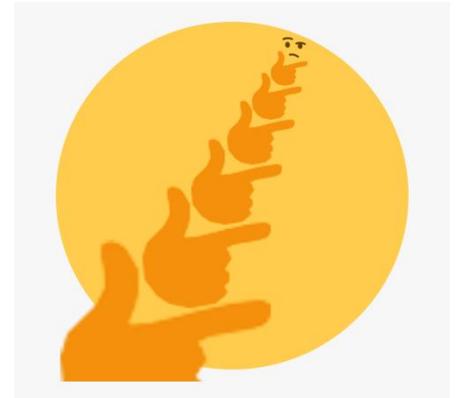
¿Cuál es ese “resorte”?



¿Qué significa que no exista?



¿Qué implica que no exista?



A man in a dark tuxedo and white shirt with a black bow tie is sitting at a dark wood desk on a beach. The desk has a typewriter and a vintage microphone on it. The background shows waves crashing on the shore. The scene is surreal, as an office setting is placed in a natural, outdoor environment.

LA

LUZ

**And Now For Something
Completely Different**

Empedocles (500 a.C.): *La luz son rayos que emanan de los ojos y permiten la visión*



Euclides (300 a.C.) y Herón (10 d.C.): *La luz no puede emanar de los ojos, porque sino ¿Por qué no hay un retraso entre que abro mis ojos y veo las estrellas?*

Lucrecio (50 a.C.): *La luz son pequeñas pelotitas muy rápidas que los cuerpos emiten e impactan en nuestros ojos, causando nuestra visión de ellos*

Pero la confusión sigue y sigue...

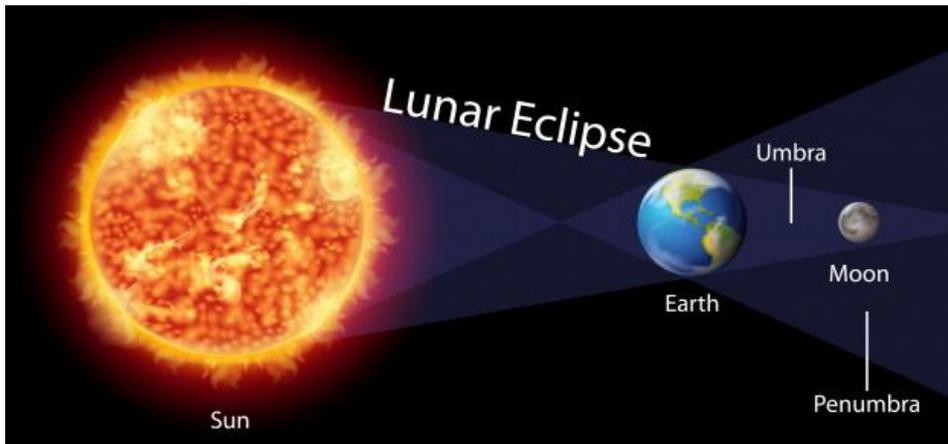


← *Eclipse lunar*



Descartes (ca. 1600)

Si la luz tardase tiempo en llegar, habria eclipses lunares sin alineamiento entre sol, Tierra y Luna.



Velocidad infinita o... muy muy (muy) rápida???

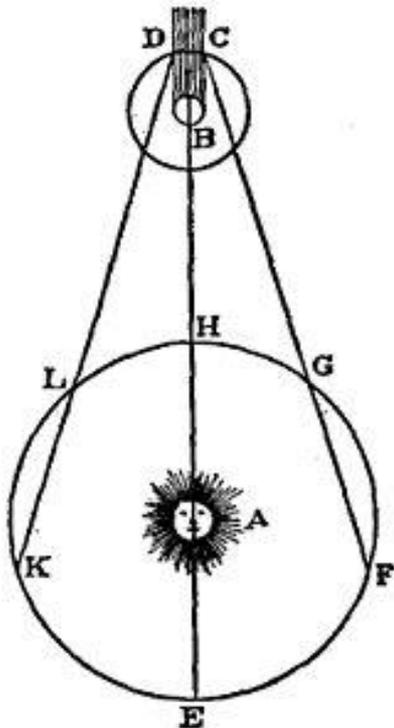


¿T?



Galileo

*Es o infinita,
o muy rápida*



A = Sol

K, L, H, G, F, E = posiciones de la Tierra

B = Jupiter

D, C = posiciones de Io (luna de Jupiter)

El momento en el que aparece lo depende de la posición de la Tierra



Ole Romer (1676)

$c = 220.000 \text{ km/s}$

(nada mal)



Leibniz



Newton vs. el mundo
(ca. 1700)



Hooke



Huyghens





La luz son partículas que viajan rápido en línea recta

Y... ¿cuál sería... ese medio?

... ¿Qué es el éter?

¿Y cómo es que el éter no frena la órbita de los planetas?



La luz es una onda. Las ondas no viajan, sino que se propagan en un medio.

EL ÉTER, POR SUPUESTO

Una sustancia que abarca todo el universo, muy muy tenue. La luz se propaga como ondas en el éter del mismo modo que el sonido se propaga como ondas en el aire.

¿Que quiere decir una *onda propagandose en un medio*?



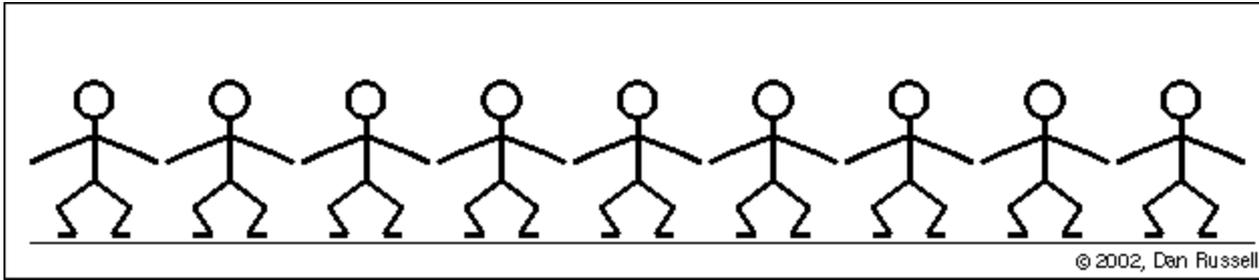
Desafío: enviar un mensaje de A a B usando una soga muy larga



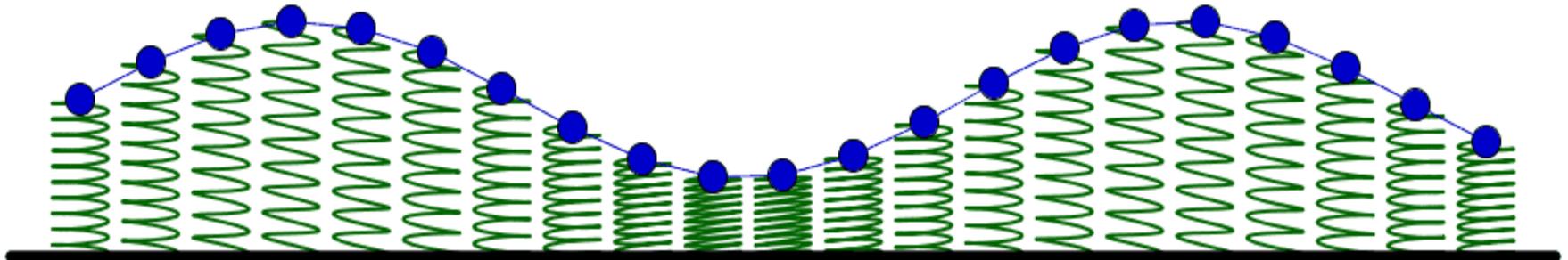
© L.Perera

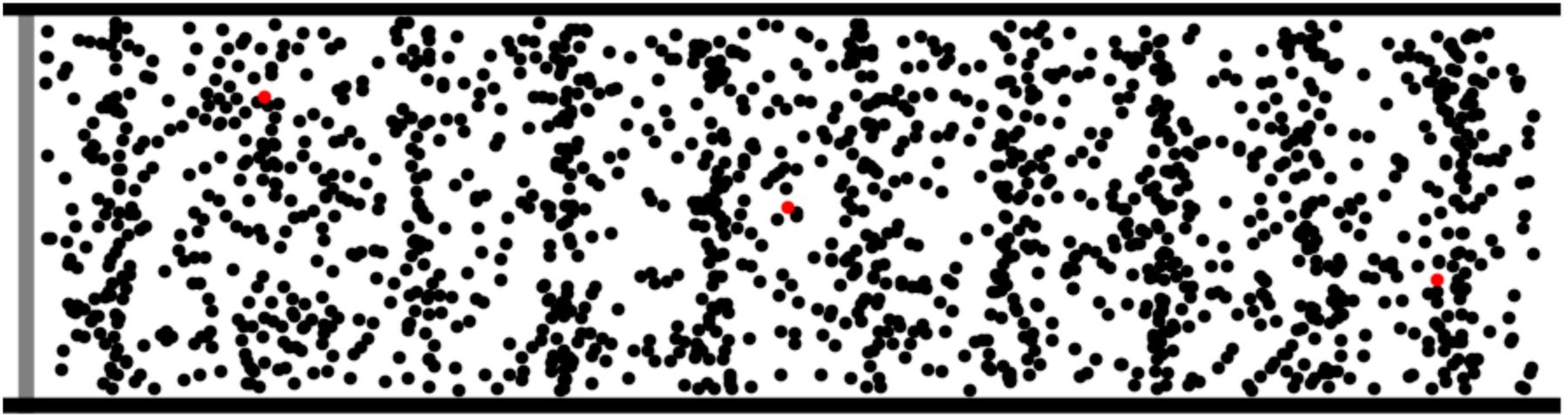
Solucion 1 (Newton): Corto la soga en pedacitos. Luego arrojó los pedacitos con gran velocidad desde A hacia B, y envío un mensaje en código Morse basado en la cantidad de pedacitos que voy tirando.

Solucion 2 (Huyghens): Ato la soga entre A y B. Para enviar mensajes tiro hacia arriba de la soga y transmito la tensión de la soga entre los dos puntos como **una onda**



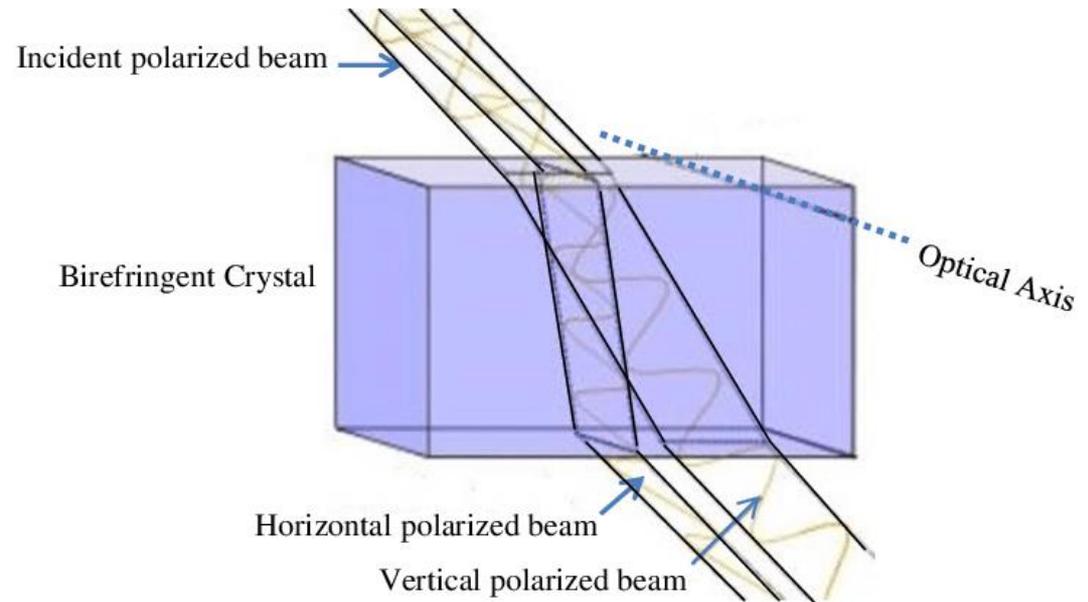
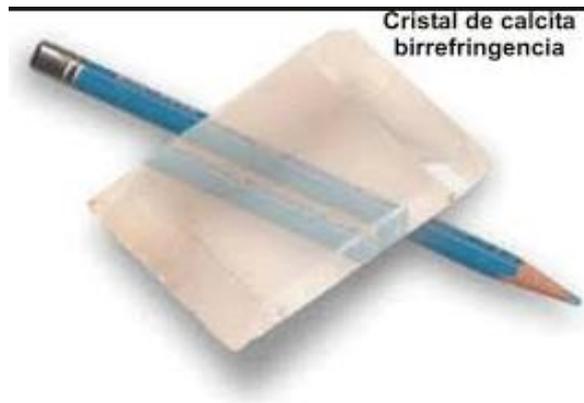
A mayor k , mayor frecuencia de la oscilacion, mayor rapidez de transimision en el medio





©2011. Dan Russell

Huyghens pensaba que la luz era una oscilacion longitudinal en el eter, como el sonido en un gas.

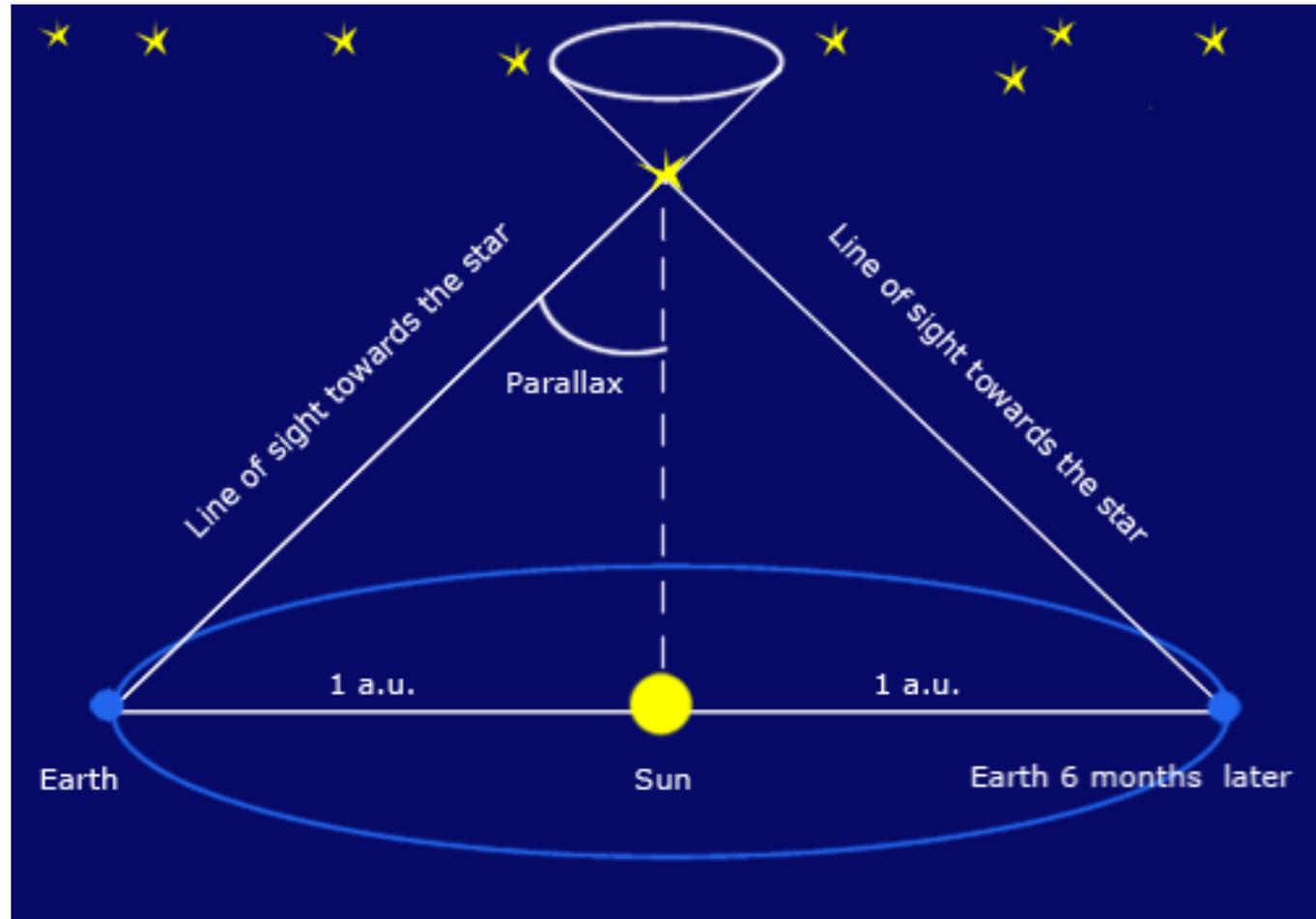


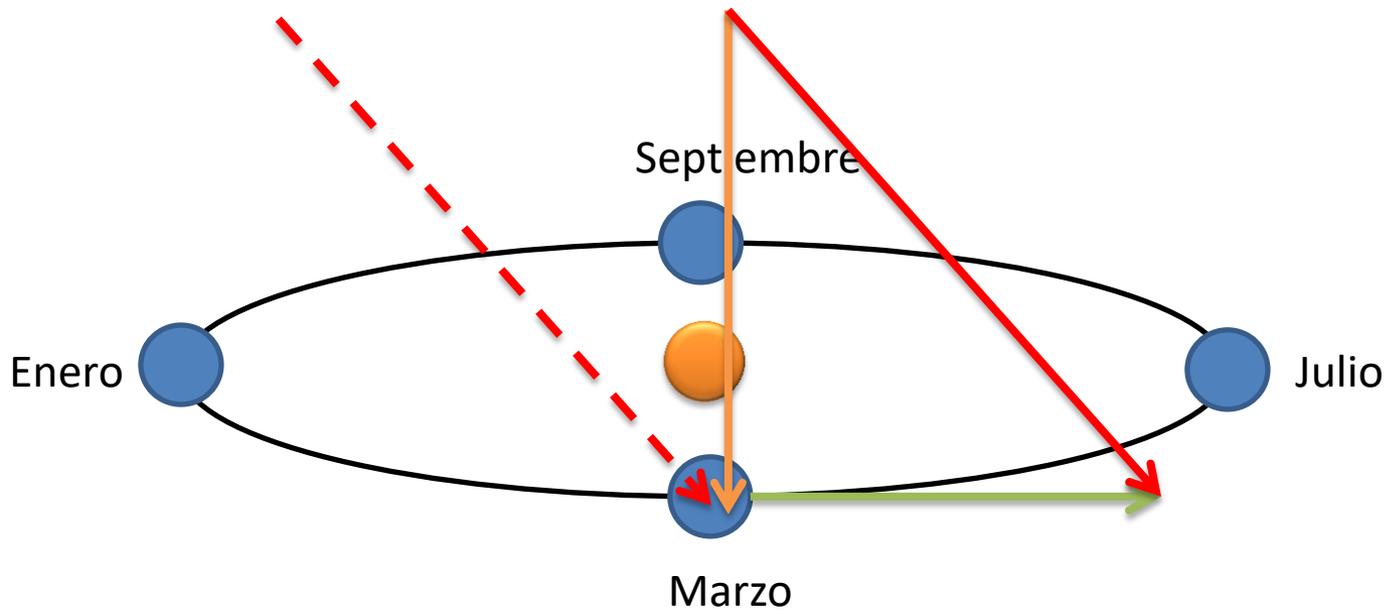
A medida que la Tierra gira alrededor del Sol, uno debería ver a una estrella lejana girar en el cielo. Si conozco la distancia entre el Sol y la Tierra, puedo medir el ángulo con el que la estrella gira y calcular la distancia entre el Sol y la Estrella.

CONCLUSION: LAS ESTRELLAS DEBEN ESTAR MUY LEJOS

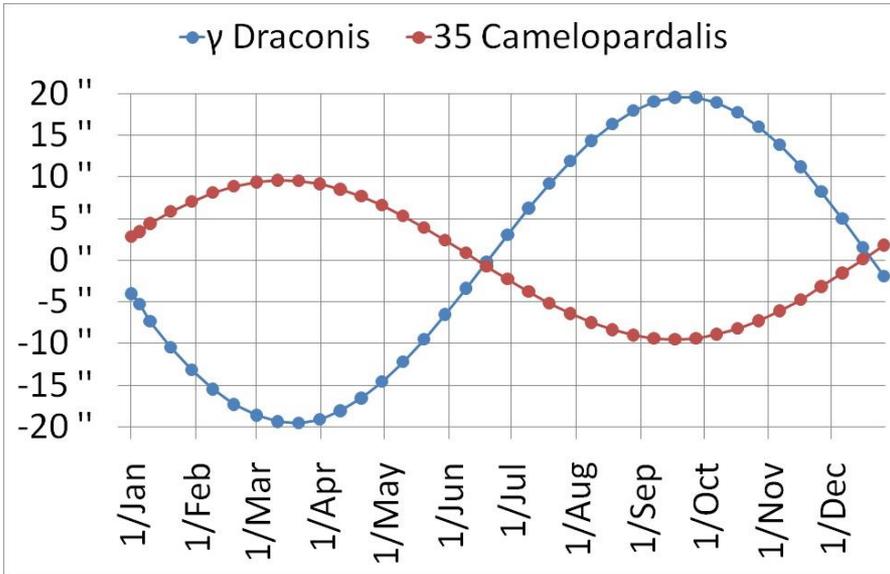


Bradley
(ca. 1700)

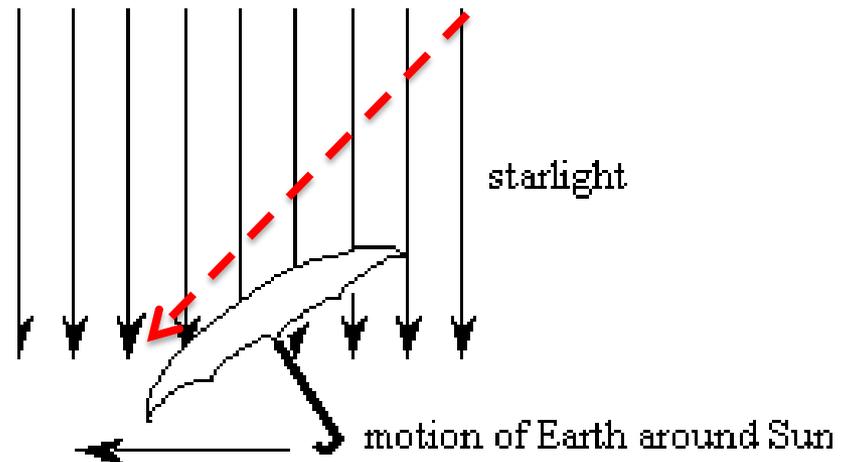




Aberracion estelar



La luz parece venir de otra posición por la composición de velocidades.



Birrefringencia + aberracion estelar



Newton vs. el mundo
(ca. 1700)



Leibniz



Hooke



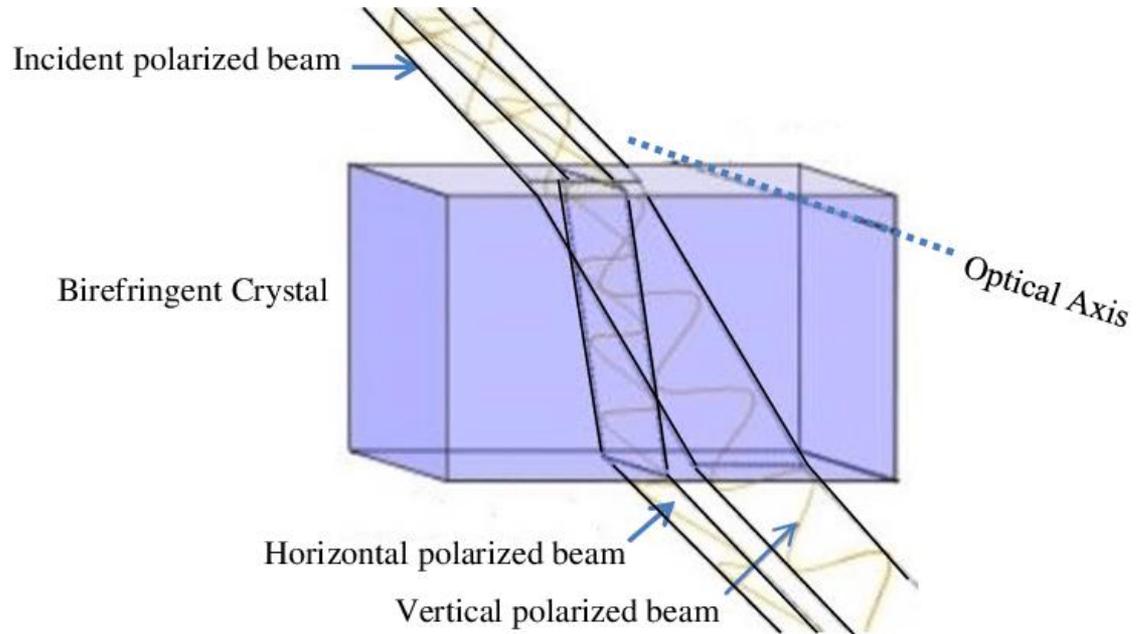
Huyghens



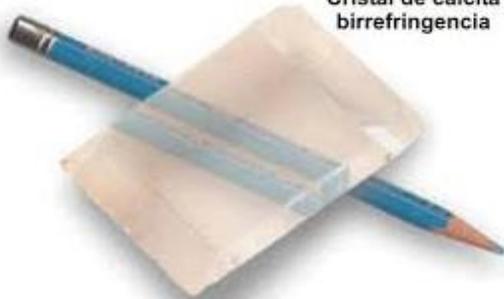


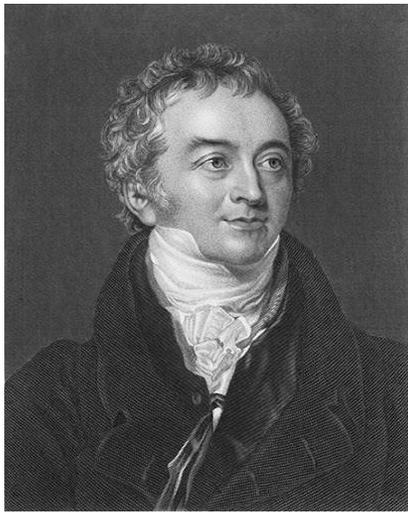
La birrefringencia se explica si la luz es una onda transversal, no longitudinal

Fresnel
Ca. 1800



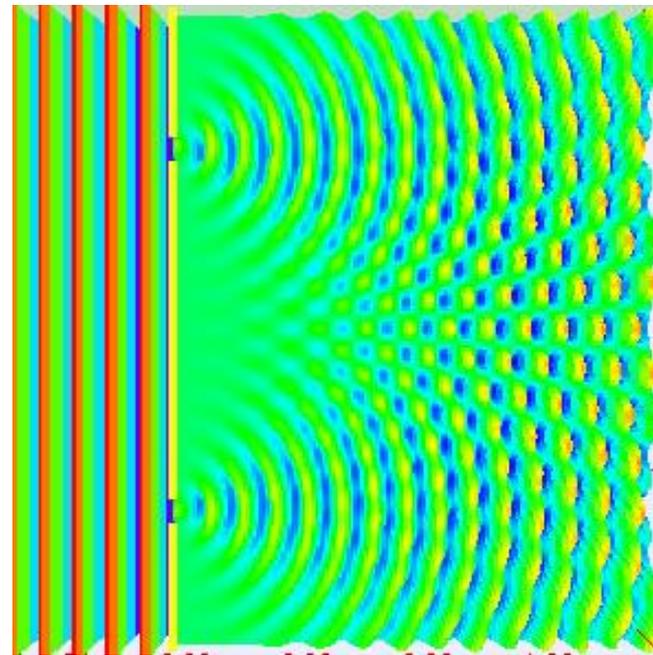
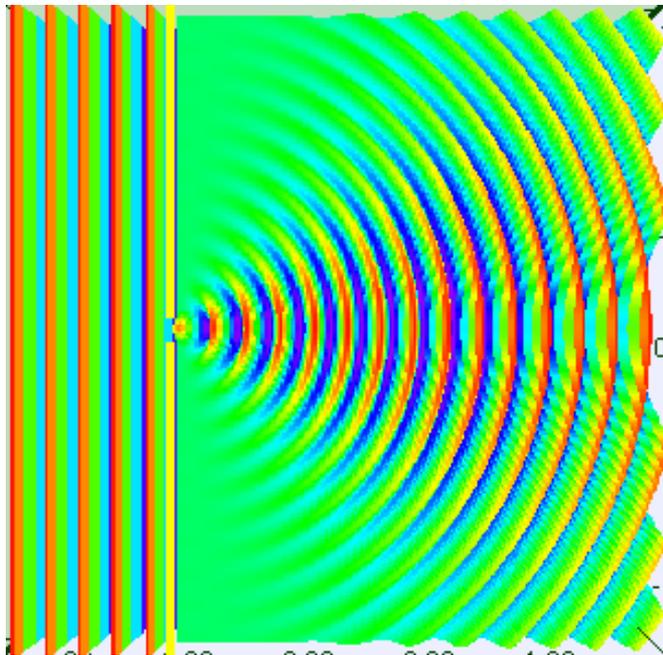
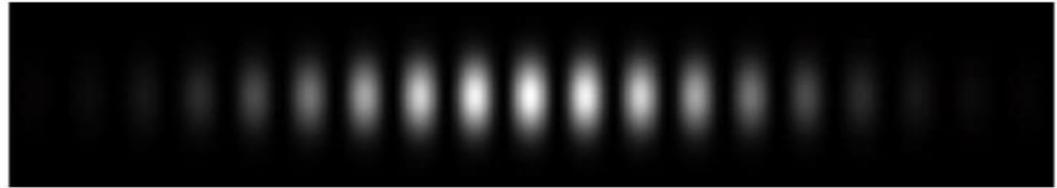
Cristal de calcita
birrefringencia





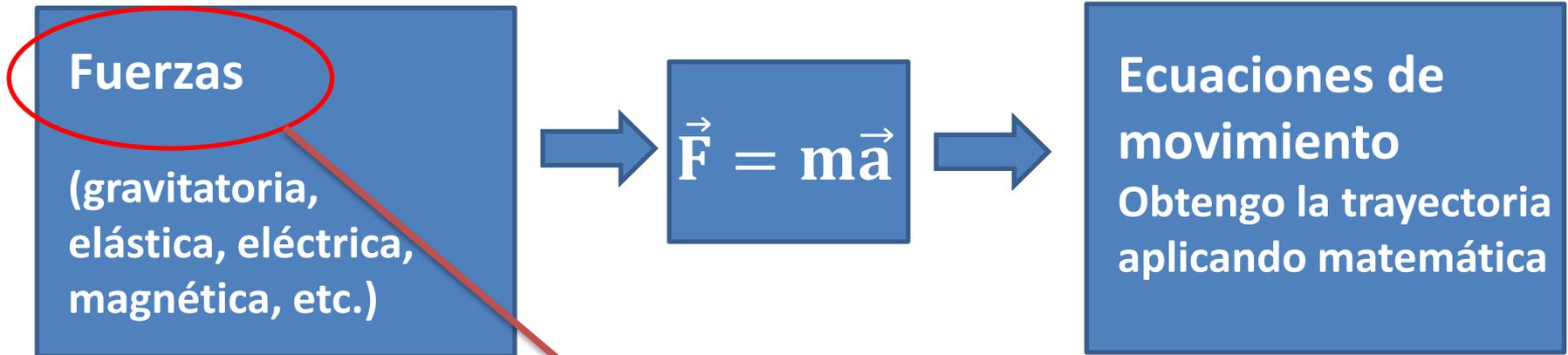
Young
Ca. 1800

Interferencia: cuando una onda transversal hacia arriba se choca con una hacia abajo, se suman, y se cancelan





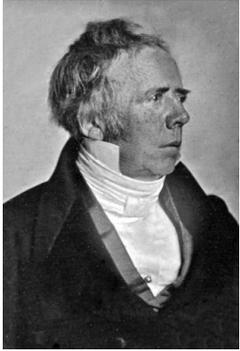
¿Qué es *exactamente* la mecánica Newtoniana?



Ejemplos de fuerzas:

- Gravitación
- ...

Siglo XIX: una teoría de la fuerza electromagnética



Oersted



Ampere



Coulomb



Gauss



Faraday

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$$

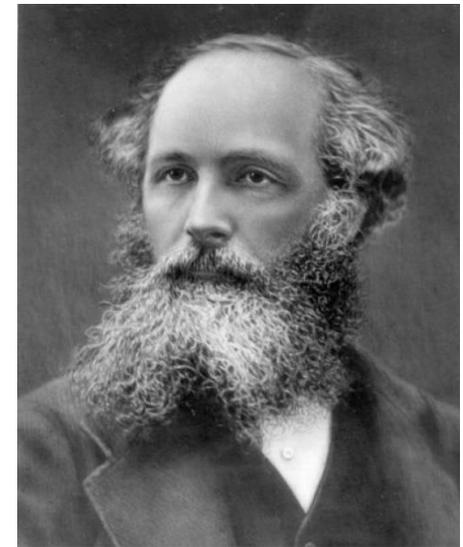
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 i_{enc}$$

Fuerza entre dos cargas
(Coulomb)

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0 K} \cdot \frac{q_1 q_2}{d^2}$$



Maxwell

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

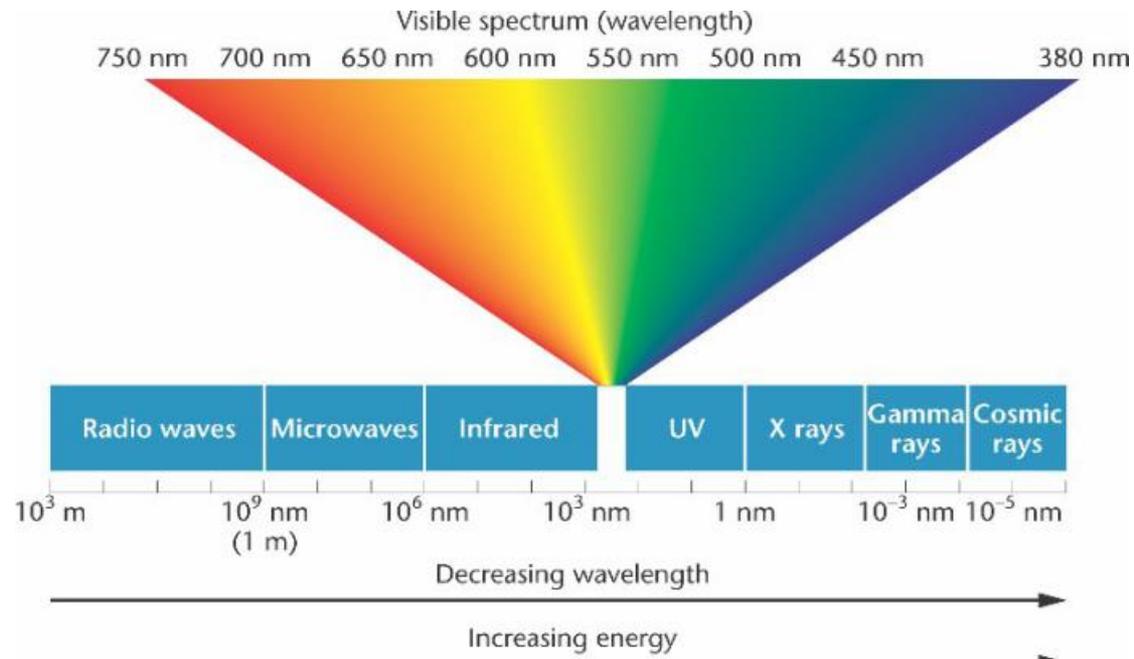
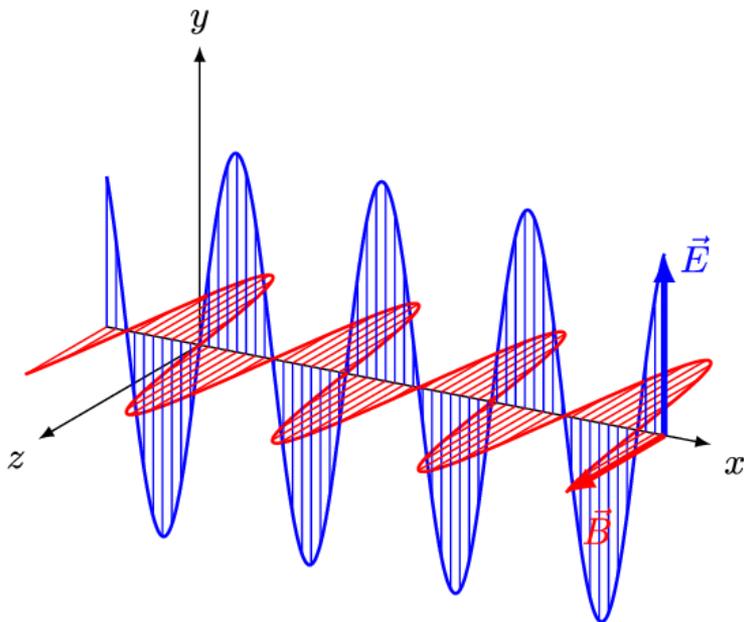
$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 i_{enc}$$

Las ecuaciones predicen ondas que se desplazan con velocidad:

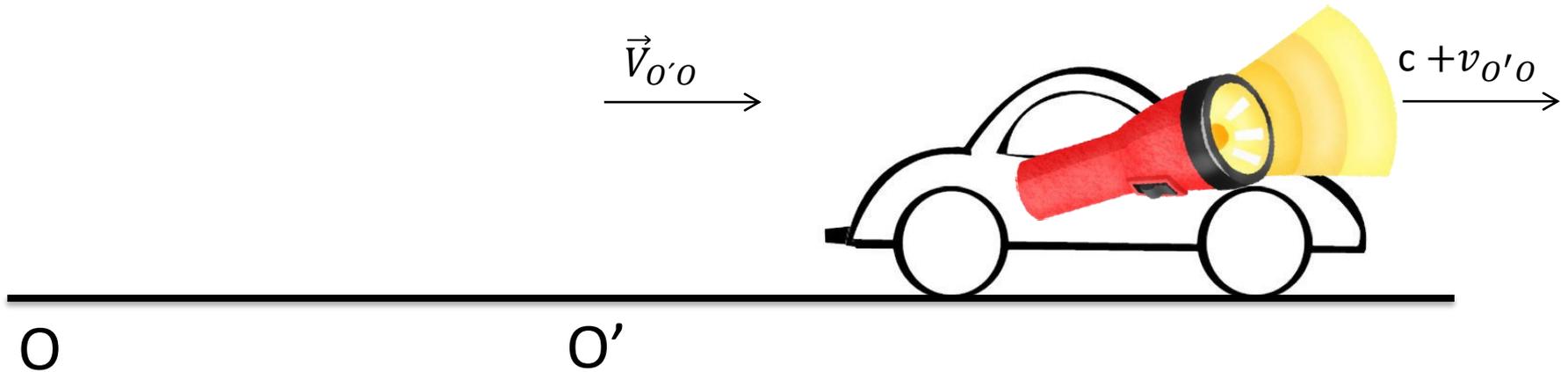
$$1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

$$1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \approx 300.000 \text{ km/s}$$



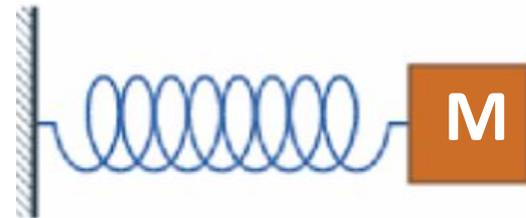
ϵ_0, μ_0 son características propias de la fuerza electromagnética.

ϵ_0, μ_0 dependientes de la velocidad implica que la validez del electromagnetismo depende del sistema de referencia



Para el observador en O, la velocidad de la luz tendría que ser más rápida, y por lo tanto ϵ_0, μ_0 tendrían que ser menores. Pero ϵ_0, μ_0 igual que la constante de un resorte **son lo que son**. No dependen del sistema de ref.

Si fuesen distintas, todos los fenómenos electromagnéticos vistos por O y por O' lo serían.



k es una característica propia del resorte

k no puede depender de la velocidad del observador en relación a un punto de referencia

Solucion:

La luz se propaga en un medio llamado eter.

Huyghens



El eter se extiende por todo el Universo.

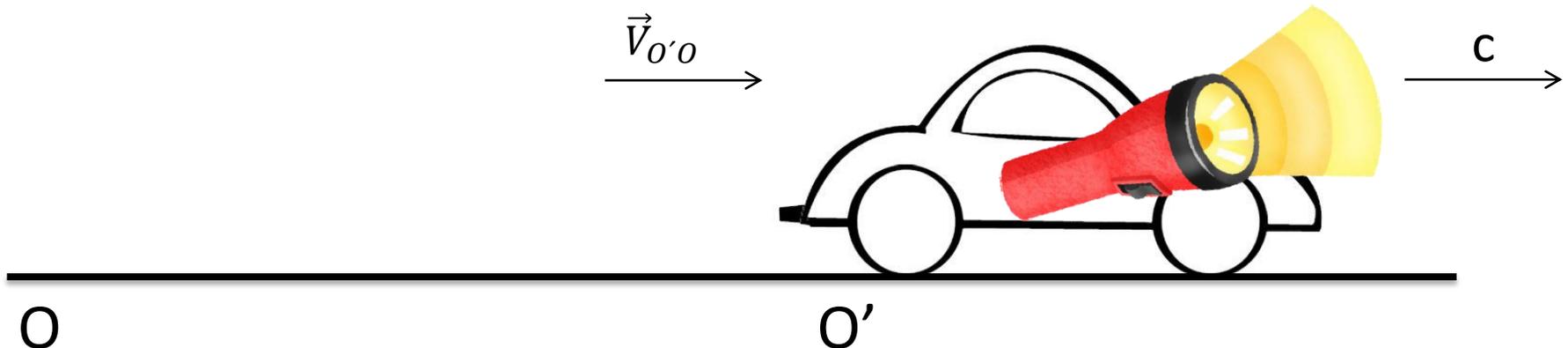
El eter es un sistema de referencia privilegiado.

Las leyes de la electrodinamica solo valen en ese sistema de ref.

Si O esta en reposo en relacion al eter, entonces mide que la velocidad de la luz es siempre C.

En cambio, O' mide otra velocidad: $C - V_{O'O}$

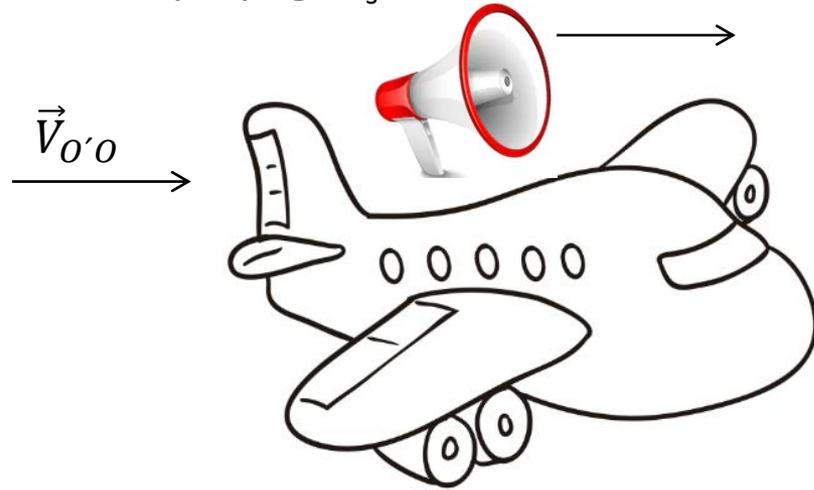
Pero esta bien, porque en O' no valen las leyes de la electrodinamica.



- O mide la velocidad real del sonido, v_s
- O esta en un sistema de referencia privilegiado para medir v_s
- O esta en reposo en relacion al medio donde se propaga v_s

O' mide $v_s - v_{O'o}$

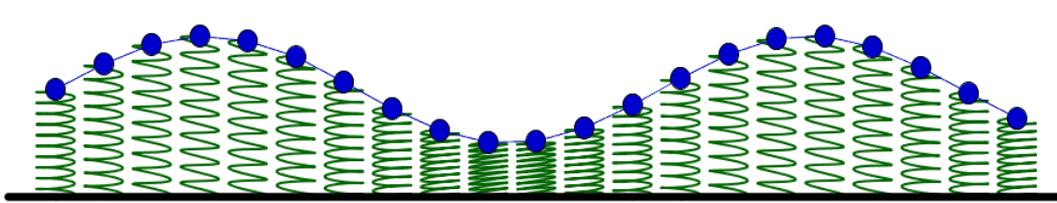
Si $v_s > v_{O'o}$, O' ve al sonido alejarse hacia la izquierda.



El eter es como una "atmosfera" donde se propaga la luz.

Propiedades del eter:

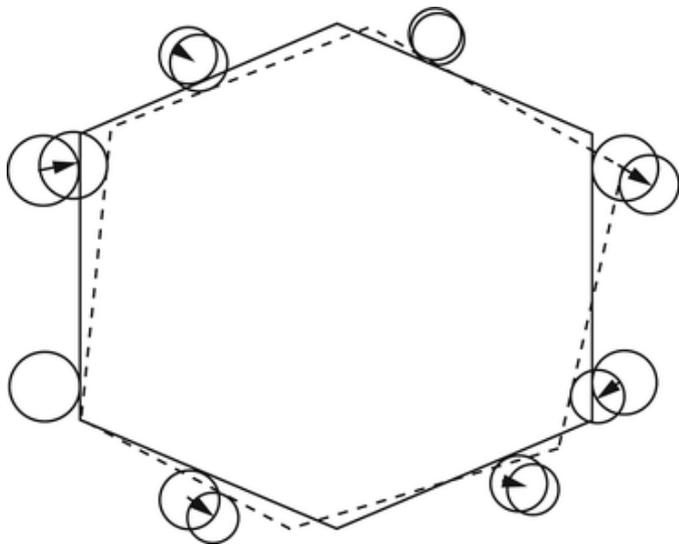
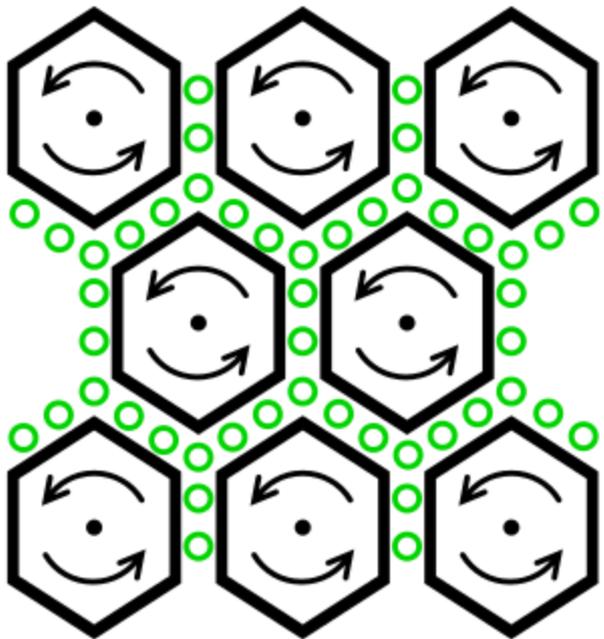
1. Es un fluido, porque llena todo el espacio (como el aire)
2. ... pero como la frecuencia de la oscilacion de la luz es comparativamente muy grande, el eter es muchisimo menos elastico que el aire (seria millones de veces mas rigido que el acero)



$$\omega = \sqrt{k/m}$$

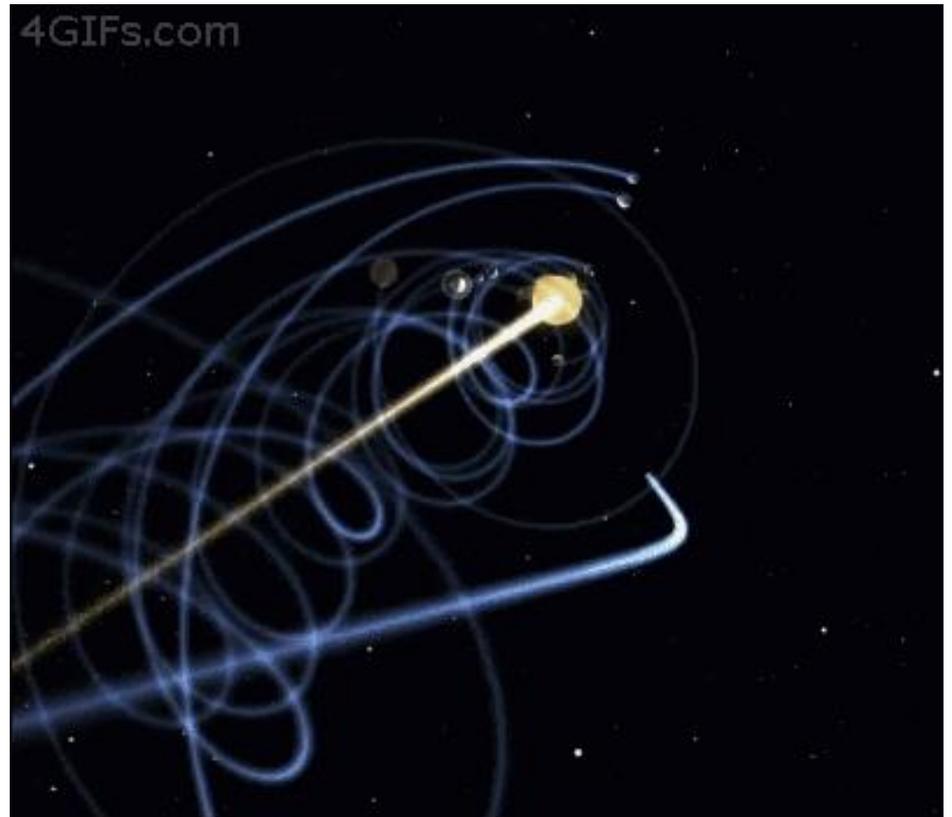
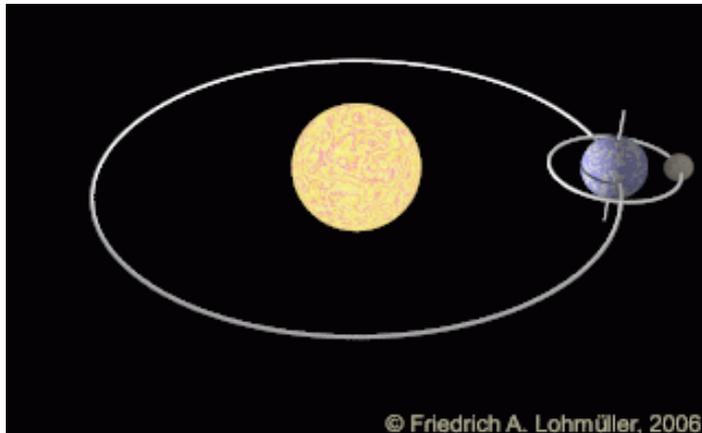
3. Su masa y su viscosidad son indetectables (sino, afectarían el curso de los planetas – objeción de Newton)
4. Transparente, incompresible, etc,





Un observador en la Tierra...

¿puede estar en reposo en relacion al eter?



Velocidad orbital del Sol alrededor de la galaxia es, aproximadamente, 200.000 m/s

Somos como O'
La velocidad de la luz en la Tierra
dependera de la velocidad de la
Tierra en relacion a O .

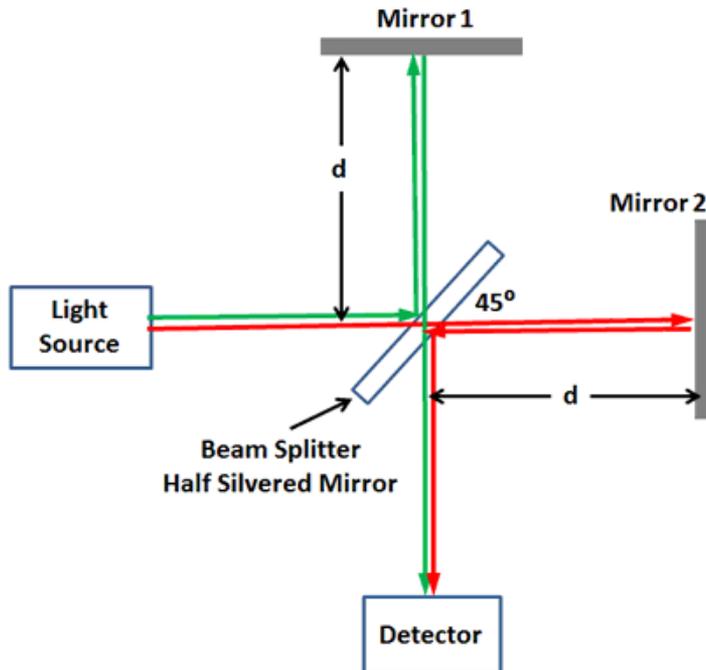
$\vec{V}_{O'O}$



O

O'

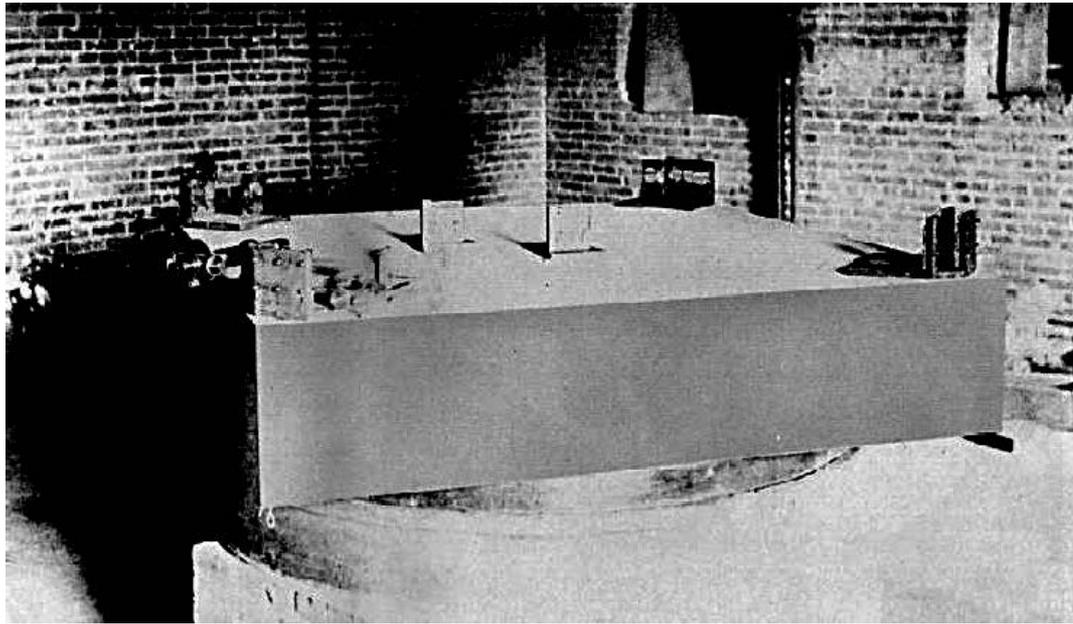
Experimento de Michelson y Morley (1887)



$\vec{V}_{O'O}$

El rayo de luz recorrió que fue al espejo 2 recorrió
menos distancia que el que fue al espejo 1.

Esa diferencia se puede medir con un detector.



La velocidad de la Tierra en relacion al eter resultó ser exactamente...

0 m/s

Final del siglo XIX.

Caos total en el mundo de la física.

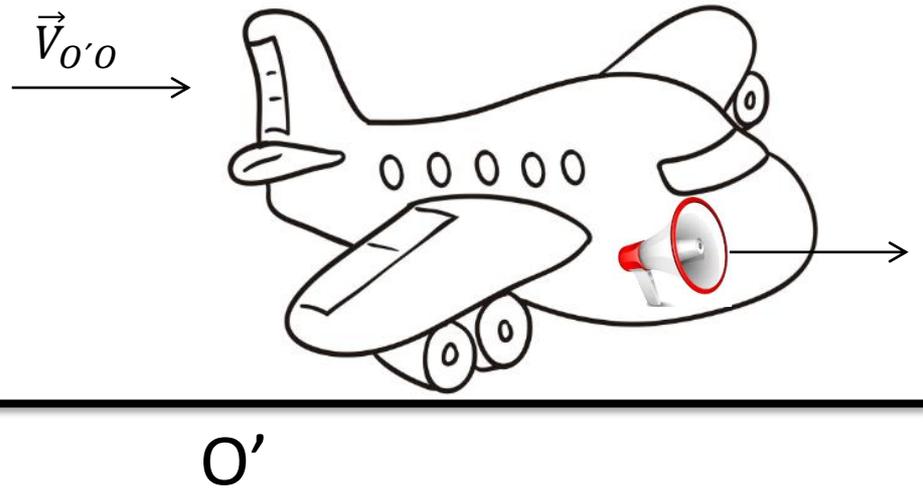
Distintas posibles alternativas, ordenadas en orden estimado de plausibilidad (para alguien en XIX)

Alternativa 1:

La Tierra arrastra eter en su movimiento

En el **interior** cabina presurizada del avion, si vale que para un observador en O' el sonido se propaga con velocidad v_s

Y en O , vale $v_s + v_{O'O}$



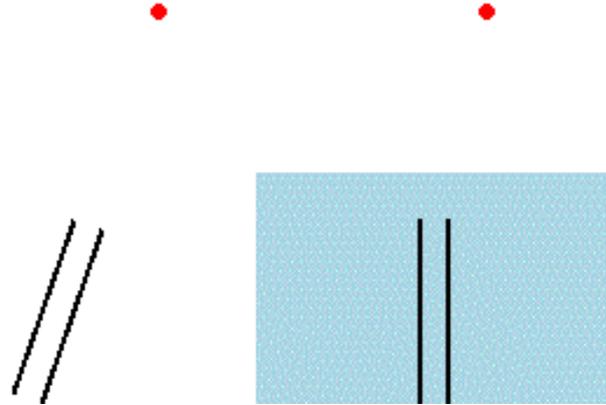
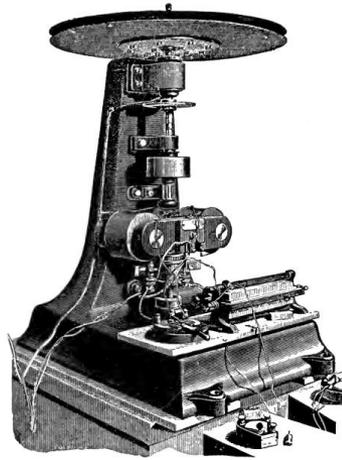
Del mismo modo, si la Tierra “arrastra” una porcion de eter a su alrededor en su movimiento, entonces para un observador en la Tierra vale que la velocidad de la luz es c independientemente del movimiento de la Tierra

(como mostraron Michelson y Morley)

**Pero... el eter... no carecia de viscosidad?
Como puede formarse una capa viscosa alrededor de la
Tierra?**



Stokes



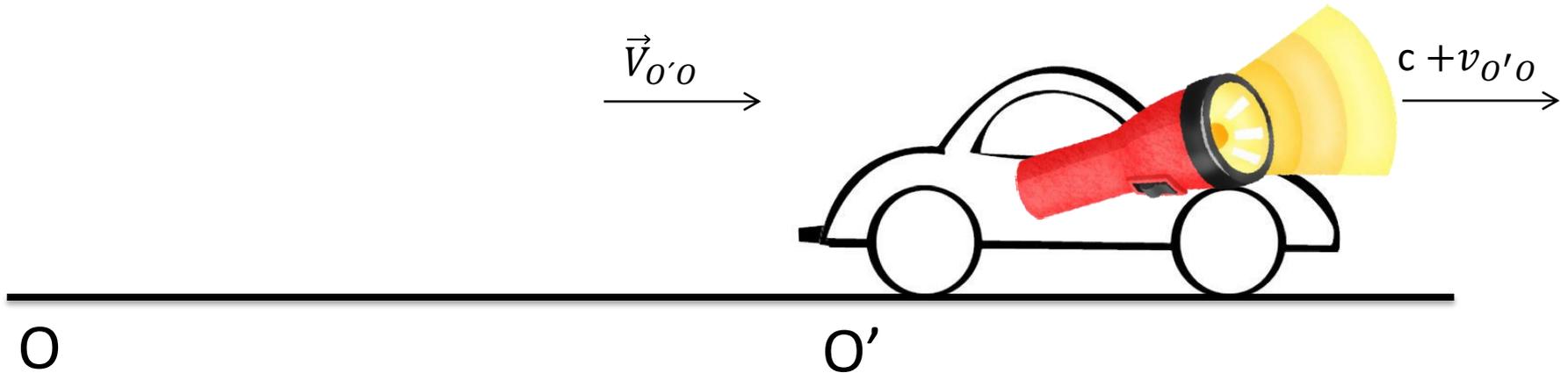
La hipotesis del arrastre es
inconsistente con la aberracion
estelar!

Alternativa 2:

La electrodinamica de Maxwell esta mal

~~ϵ_0, μ_0 son características propias de la fuerza electromagnética.~~

~~$$c = 1 / \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$~~

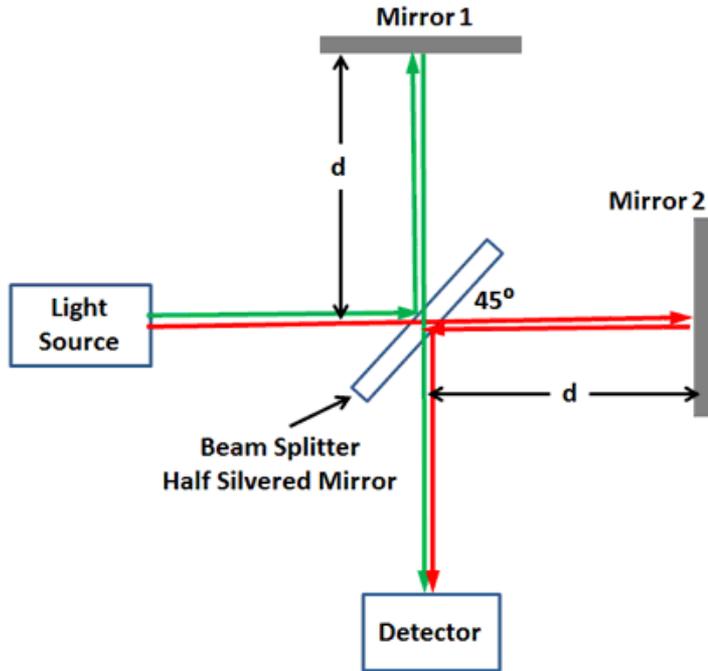


La teoria de Maxwell es una primera aproximacion a una teoria correcta del electromagnetismo.

Una teoria correcta del electromagnetismo debe predecir una velocidad de la luz que se transforme de acuerdo a la transformacion de Galileo, $c_O = c_{O'} + v_{O'O}$

Alternativa 3:

El movimiento relativo al eter tiene propiedades muy, muy extrañas.



$\vec{V}_{O'O}$

El rayo de luz no recorrió menos distancia porque todas las longitudes se acortaron en la dirección del movimiento dado por $\vec{V}_{O'O}$

... y se ajustaron exactamente lo necesario para justificar el resultado nulo de Michelson y Morley.



Fitzgerald



Lorentz



Poincaré

Alternativa 4:

Las transformaciones de Galileo están mal, y por lo tanto también la mecánica Newtoniana.

ϵ_0, μ_0 son características propias de la fuerza electromagnética.

$$c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$$

En O, la velocidad de la luz es c.

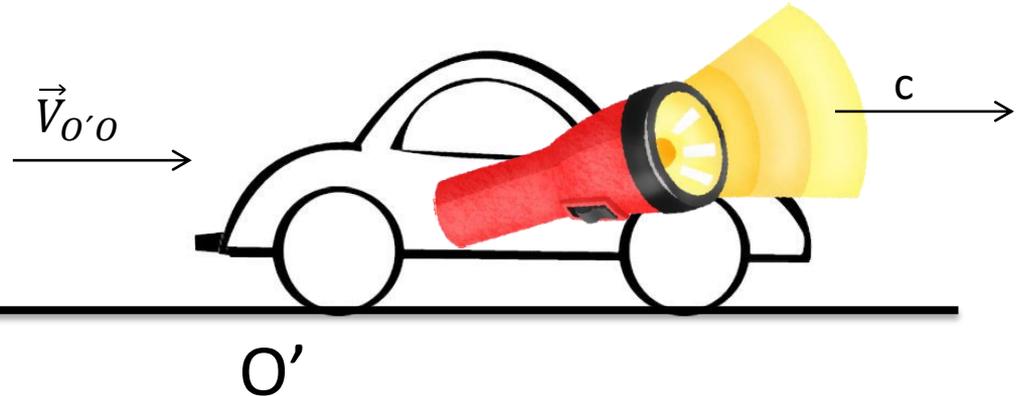
En O', la velocidad de la luz *también* es c.

La velocidad de la luz es c en cualquier otro sistema de coordenadas inercial.



Einstein (1905)

~~$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{V}_{O'o}t$$
$$t = t'$$~~



Los principios de la relatividad especial:

1. Las leyes de la naturaleza son las mismas en dos sistemas de referencia en movimiento relativo uniforme.
2. La velocidad de la luz es c (constante) en todos tales sistemas de referencia

¿Y el éter?

Ya no es necesario como sistema de referencia privilegiado para las leyes del electromagnetismo.

Las leyes valen en todo sistema de ref. inercial. En todos la velocidad de la luz es c .

¿Y en que se propaga la luz?

En el vacío!