



# Ótica e Relatividade

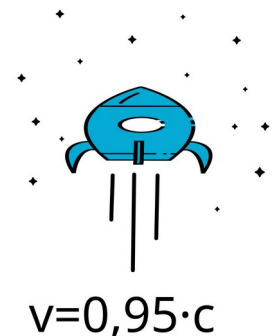
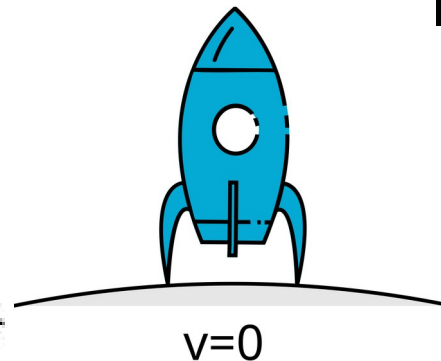
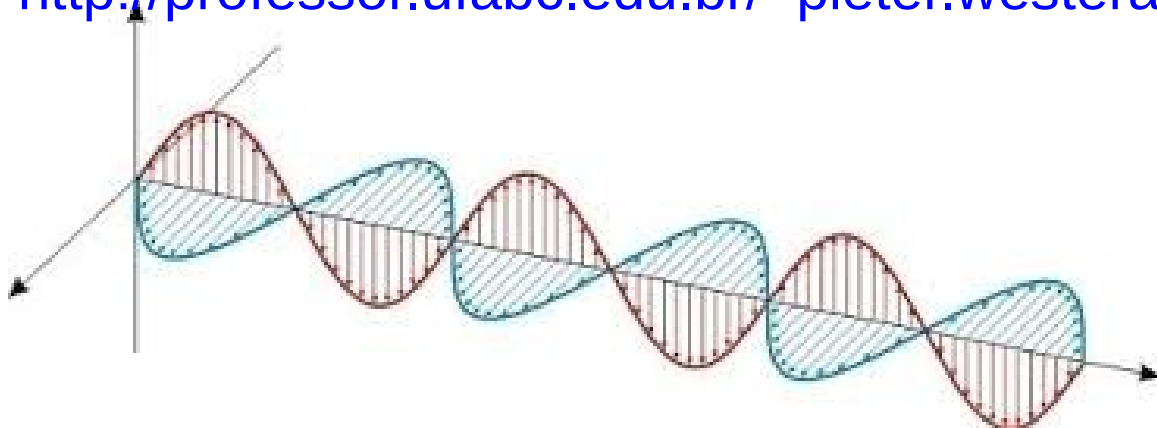
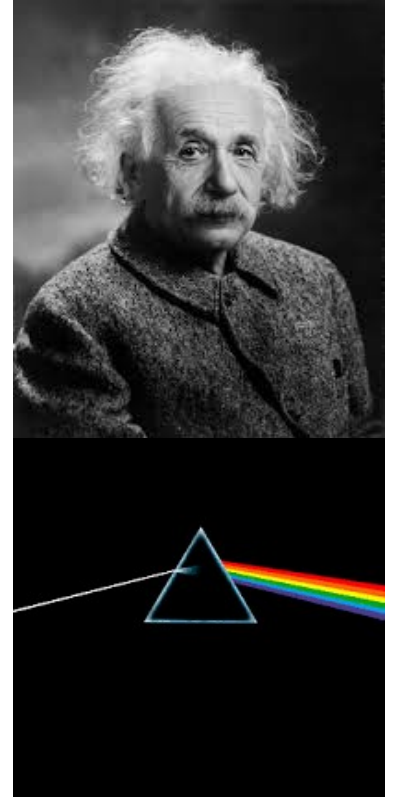
Universidade Federal do ABC

## 12. Primórdios da Relatividade: Relatividade Galileana, Experimentos de Detecção do Éter, Os Postulados de Einstein

Prof. Pieter Westera

[pieter.westera@ufabc.edu.br](mailto:pieter.westera@ufabc.edu.br)

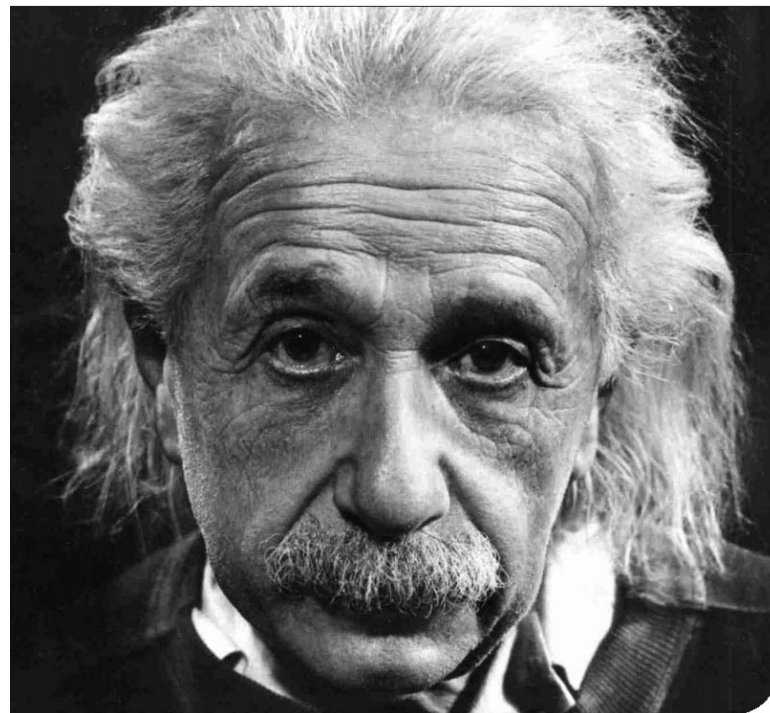
<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/OtRel.html>



# Relatividade

A **Teoria da Relatividade** foi desenvolvida por **Albert Einstein** de 1905 (Relatividade **Restrita**) a 1915 (Relatividade **Geral**), baseado nos trabalhos de **Lorentz** and **Poincaré**.

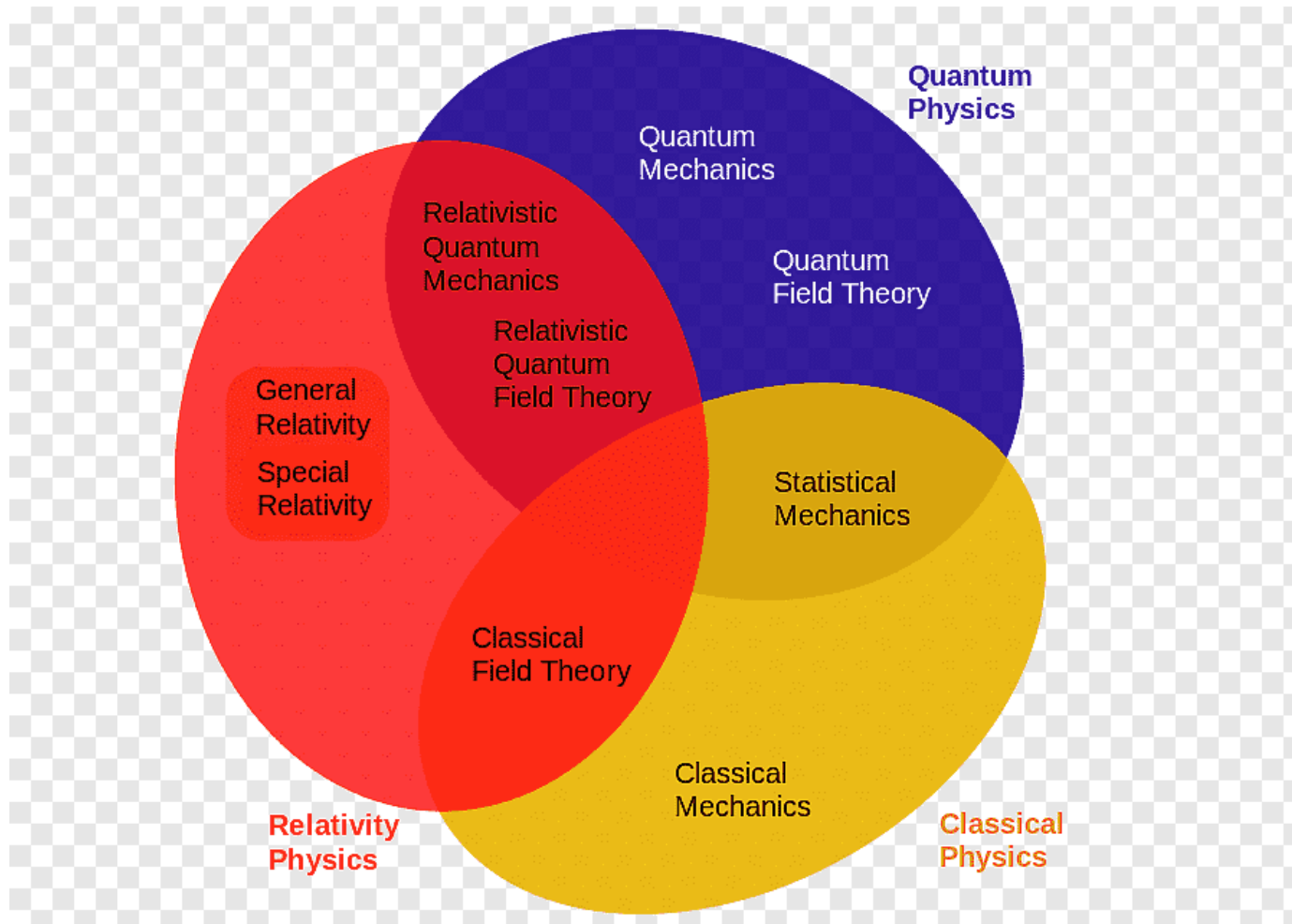
Ela afirma que as **propriedades** (geometria, eixo do tempo) de **espaço** e **tempo** dependem da situação do **observador**, do seu **estado** de **movimento** (velocidade, aceleração), e a sua **posição** em relação a **massas altas**.



Albert Einstein (1875-1955)

# Relatividade

## A Teoria da Relatividade nas Grandes Áreas da Física



# Espaço e Tempo na Mecânica Newtoniana

Para entender melhor a necessidade desta nova teoria, é bom olhar pros conceitos de **tempo** e **espaço** da **mecânica newtoniana**:

- **Tempo**: **absoluto**, **homogêneo** e **isotrópico**,  
i. e. igual em todos os lugares e em todas as direções  
- flui **uniformemente**, independente da posição e do estado de movimento do observador  
no **sentido passado** -> **futuro**
- **Espaço**: **absoluto**, **homogêneo**, **isotrópico** e **euclidiano**,  
tb. igual em todos os lugares e em todas as direções,  
a distância mais curta entre dois pontos é a reta.

# Sistema de Referência ou Referencial

**Sistema**, naquele as **Leis** de **Newton** são **válidas** (exemplo: o Referencial Universal, ligado às galáxias).

Se um sistema A é um **referencial**, então B é um **referencial**, caso A e B se movimentam com **velocidade constante** um em **relação** ao outro.

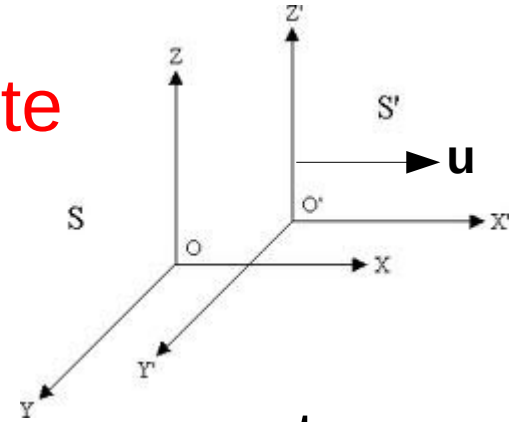
=> Um laboratório na Terra não é um referencial, já que a Terra gira em torno do seu eixo e do Sol, que gira em torno do centro Galáctico, ...

=> Aceleração em relação ao Referencial Universal  
~0.01 m/s<sup>2</sup>.

Para aplicações com acelerações  $\gg 0.01 \text{ m/s}^2$ , um laboratório na Terra pode ser usado como referencial.

# A Transformação de Galileu

Considerando um sistema de inércia  $S'$  se movimentando com velocidade constante  $\mathbf{u} = (u, 0, 0)$  em relação a um sistema  $S$ , as origens dos dois sistemas coincidindo em  $t = 0$ .



=> pode-se transformar as coordenadas de um ponto  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  e o tempo usando a seguinte transformação:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{u}t$$

$$\Rightarrow x' = x - ut$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t \quad (\text{simultaneidade e tempo absolutos}),$$

que é a transformação de Galileu.

# A Transformação de Galileu

**Velocidades** se transformam assim:

$$\begin{aligned}\mathbf{v}' &= d\mathbf{r}'/dt' = d(\mathbf{r}-\mathbf{u}t)/dt = d\mathbf{r}/dt - d(\mathbf{u}t)/dt \\ &= d\mathbf{r}/dt - t \cdot d\mathbf{u}/dt - \mathbf{u} \cdot dt/dt = \mathbf{v}-\mathbf{u}\end{aligned}$$

$$\Rightarrow v_x' = v_x - u$$

$$v_y' = v_y$$

$$v_z' = v_z$$

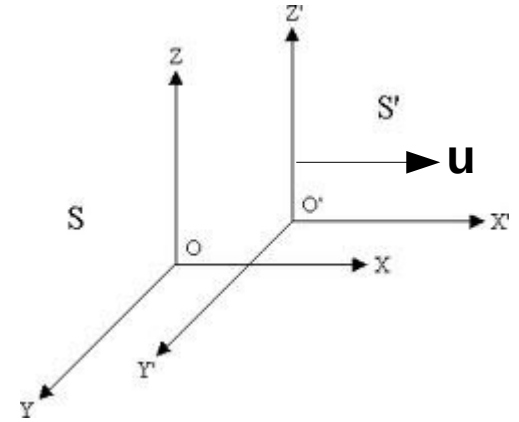
e acelerações:  $\mathbf{a}' = d\mathbf{v}'/dt' = d(\mathbf{v}-\mathbf{u})/dt = d\mathbf{v}/dt = \mathbf{a}$

$\Rightarrow$  **Acelerações** e, com isto, as **Leis de Newton** são **invariantes** na **Transformação de Galileu**.

$\Rightarrow$  **Princípio de invariância de Galileu**:

As **leis fundamentais da Física** são as **mesmas** em **todos** os **sistemas de referência inerciais**.

**Todos** os **sistemas de referência inerciais** são **equivalentes**.  
**Não** há um **sistema de referência absoluto**.



# A Transformação de Galileu

Porém (final do século XIX):

Para as Leis do **Eletromagnetismo**, o **princípio** de **invariância** de **Galileu** parece falhar.

Exemplo: A força magnética  $\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$  aplicada em uma carga muda numa Transformação de Galileu.

=> As Leis do **Eletromagnetismo** parecem funcionar só em **um** determinado **sistema** de **referência**, que chamaram de **éter**.

Em particular, **ondas eletromagnéticas** devem se **propagar** pelo **éter** com a **velocidade**

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 299\,792\,458 \text{ m/s,}$$

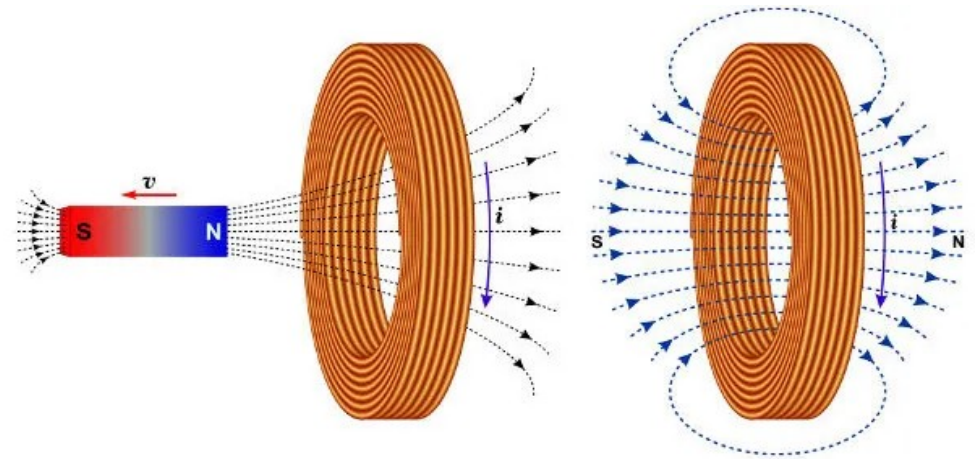
que pode ser **derivada** das **Leis** de **Maxwell** (=> aula 8).

=> **Conflito** com o **Princípio** de **invariância** de **Galileu**.

# A Transformação de Galileu

## Outro Exemplo: Aproximando um Ímã e uma Bobina

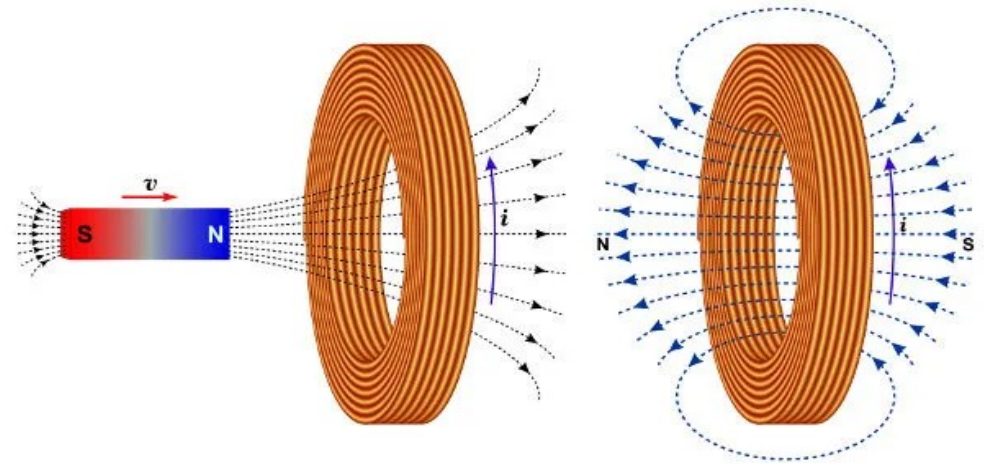
Do **ponto de vista do ímã**:  
O **anel** está em **movimento**  
com velocidade  **$v$** , então  
o **campo magnético** causa  
uma **força  $F = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$**  nas  
**cargas livres** na bobina, o que gera a **corrente  $i$** .



# A Transformação de Galileu

## Outro Exemplo: Aproximando um Ímã e uma Bobina

Do ponto de vista da **bobina**:  
o **ímã** que está em  
**movimento**, o que produz  
uma **variação** do **fluxo**  
**magnético**, o que pela  
**Lei de Faraday** deve **induzir** uma **fem** ao longo da bobina  
e **gerar** uma **corrente elétrica**.



Assim, pelos dois pontos de vistas, se entende o que acontece, mas isso é **contrário** a ideia do **éter** que deveria ser o **referencial preferencial** para **todo** o fenômeno de **Eletromagnetismo**.

# O Éter Luminífero

Graças aos **experimentos** sobre a **velocidade** da **luz** na **água**, **interferência** e **difração** de **Fizeau**, **Foucault**, **Young**, **Fresnel** e outros (aula sobre a história do conceito de luz na primeira parte desta disciplina), pelo final do século XIX, o **modelo ondulatório** de **Huygens** da **luz** estava **estabelecido**.

Mas as demais **ondas** que se conheciam (como as que conhecemos nas aulas 6 e 7) precisavam de um **meio** para se **propagar**.

Por isto, cientistas nos séculos XVIII e XIX propuseram um **meio hipotético** chamado **éter luminífero** que **preencheria** todo o **Universo** e por aquele a **luz** se **propagaria**.

# O Éter Luminífero

## Características deste Éter

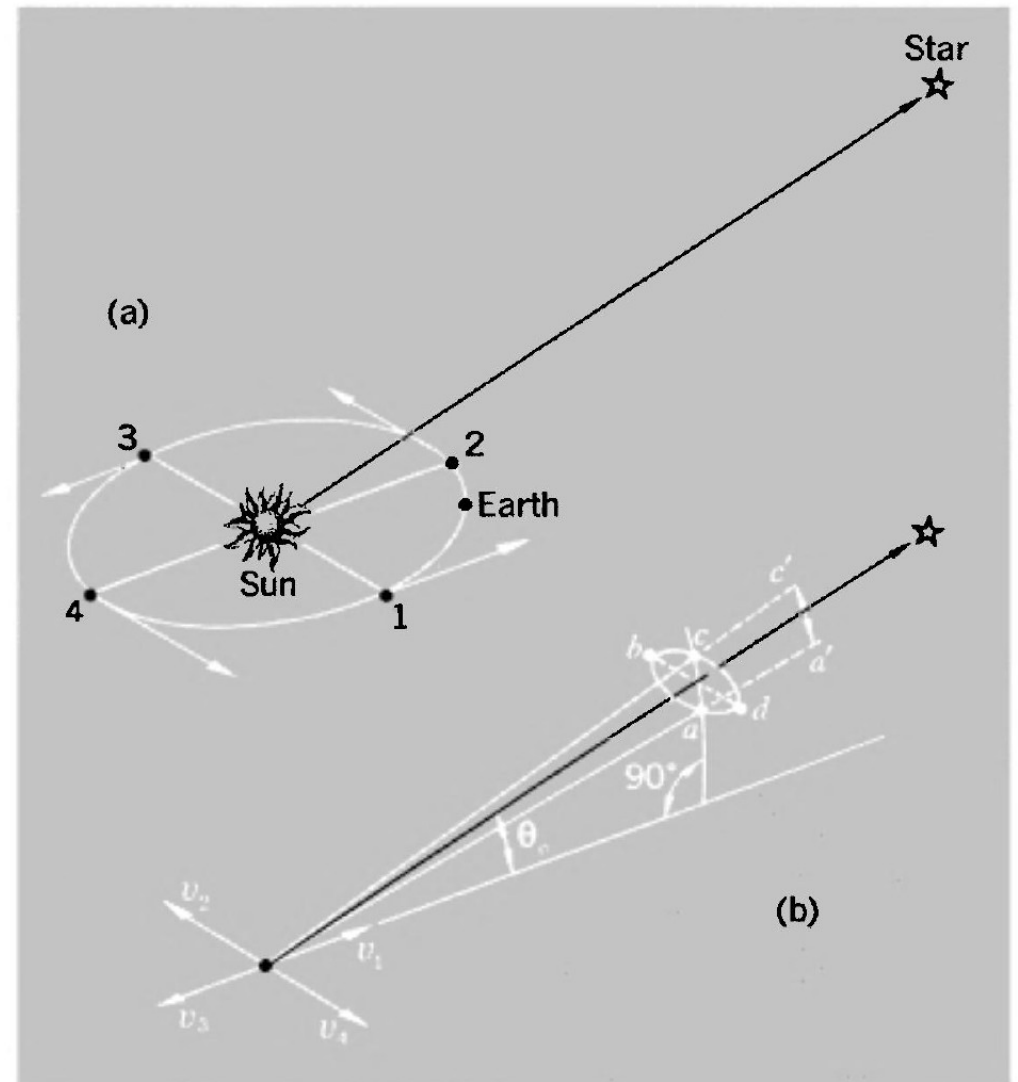
- **Preencher** todo o **espaço**: Para que a **luz** pudesse se **propagar** por toda parte, incluindo o **vácuo aparente**.
- Ser **invisível** e **indetectável** diretamente: Para explicar por que não o percebíamos.
- Ter **densidade** muito **baixa**: Para **não** oferecer **resistência** ao **movimento** dos **planetas** e outros **corpos celestes**.
- Ser extremamente **rígido** e **incompressível**: Para permitir a propagação de ondas de luz a **velocidades** tão **altas** (Lembram que o velocidade do som é dada por  $c_s = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)_0}$ ?).

# Aberração Estelar

A aberração estelar é um fenômeno astronômico que causa um desvio aparente na posição observada de uma estrela no céu.

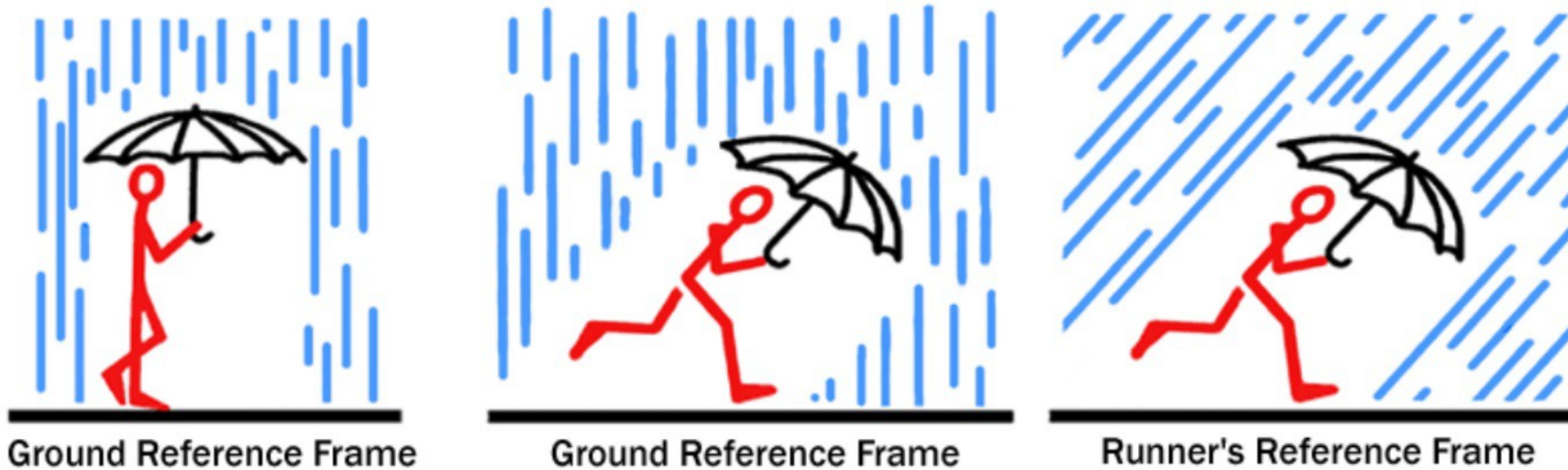
Esse desvio ocorre porque a Terra está em movimento (girando em torno do Sol e em torno do seu próprio eixo) e a velocidade da luz é finita.

James Bradley explicou a mudança da posição aparente das estrelas pelo movimento relativo entre a Terra e as estrelas.



# Aberração Estelar

---



^Analogia com uma pessoa correndo na chuva.

Mas, então, deveríamos ser capazes de medir a velocidade relativa da Terra em relação ao Éter.

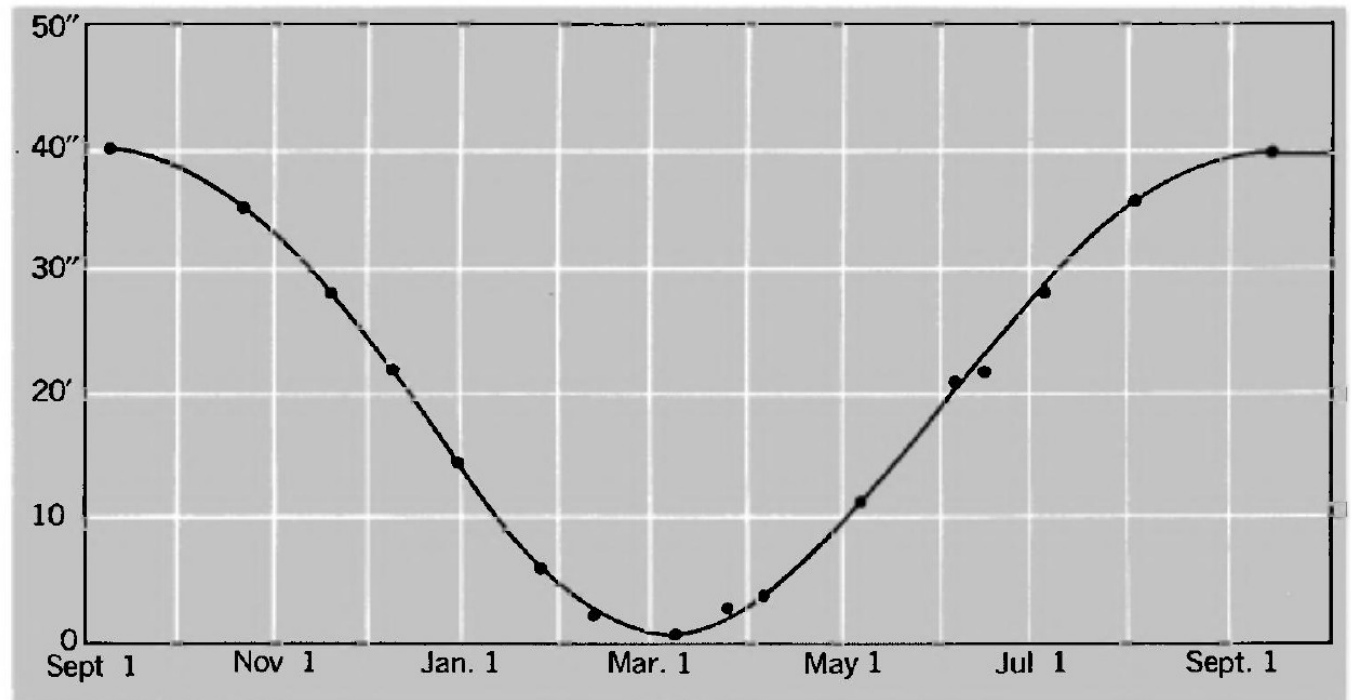
# Aberração Estelar

Os dados do Bradley (1729) pareciam mostrar que a Terra atravessava o éter sem afetá-lo ...



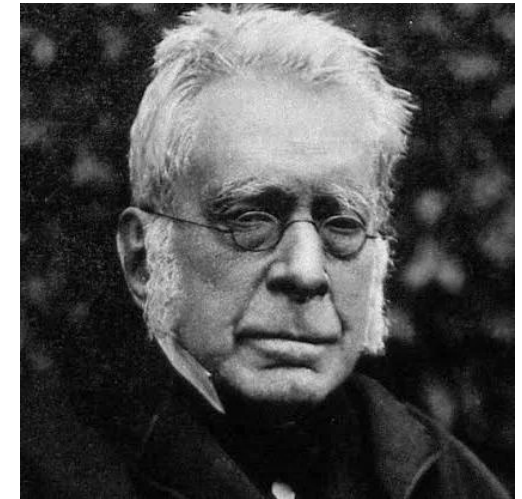
James Bradley  
(1693-1762)

*Fig. 2-3 Bradley's data on the north-south component of the aberration of  $\gamma$ -Draconis (1727-1728).*



# Como medir o movimento relativo?

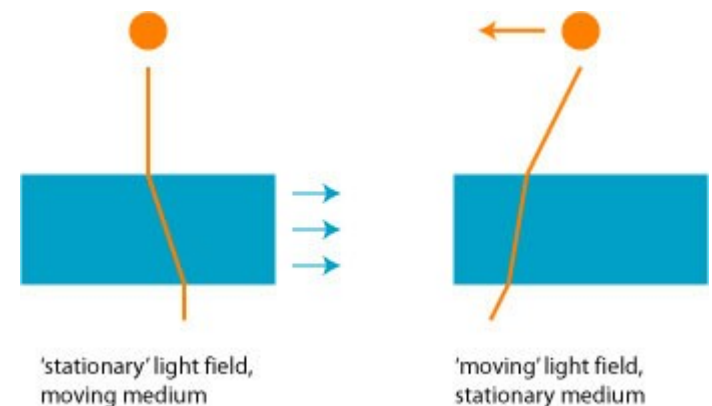
... enquanto um **experimento** de **George Biddell Airy** (1870, envolvendo um telescópio preenchido de água) parecia mostrar que a **Terra** estava em **repouso** em **relação** ao **éter**.



George Airy  
(1801-1892)

**Fresnel** propôs uma solução intermediária: **materiais transparentes** "arrastariam parcialmente" o **éter**.

A **velocidade** da **luz** um **meio** com **índice refratário**  $n$  movimentando-se com **velocidade**  $v$  seria  $c/n + fv$ , onde  $f = 1 - 1/n^2 =$  coeficiente de arrasto de Fresnel



# Como medir o movimento relativo?

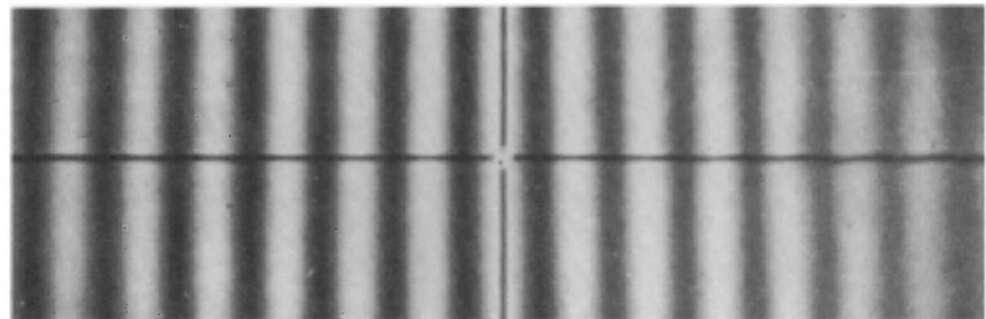
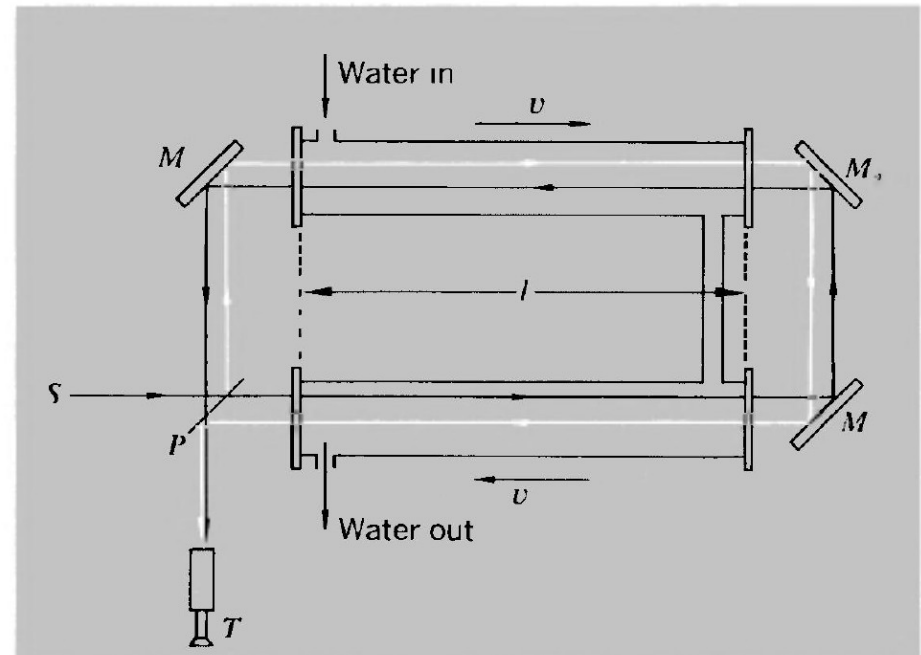
Anos depois, um **experimento** com um **interferômetro** de **Fizeau** "comprovou" a **hipótese** de **Fresnel**, só que o coeficiente  $f$  assumia o **valor exato** que fazia **experimentos** que tentassem medir a **velocidade relativa** da **Terra** em relação ao **éter** darem **resultados nulos**.

$$\Delta t = \frac{2l}{(c/n) - fv} - \frac{2l}{(c/n) + fv}$$

Fig. 2-5 Schematic diagram of Fizeau's "ether-drag" apparatus.

$$\Delta t \approx \frac{4n^2 fvl}{c^2} \quad \delta = \frac{4n^2 fvl}{\lambda c}$$

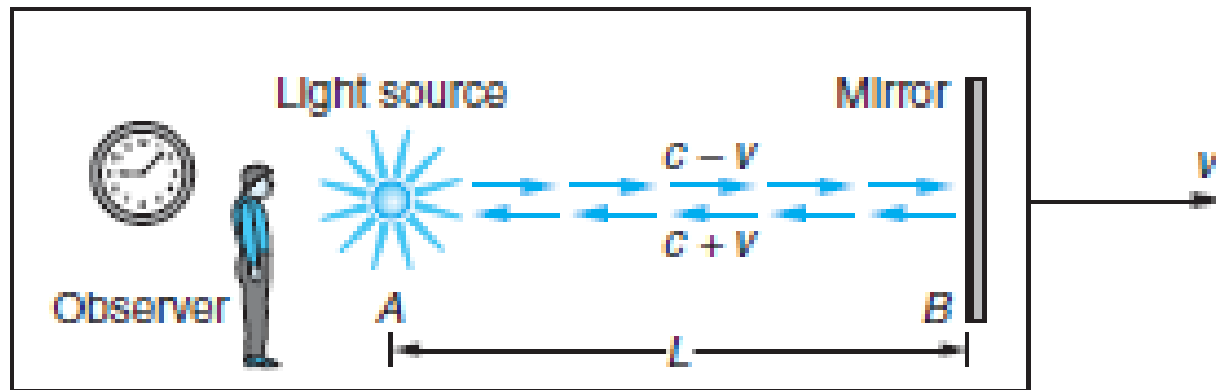
Fig. 2-6 Interference fringes in apparatus of the Fizeau type. (Photo courtesy of G. C. Babcock, Michelson Laboratory China Lake, Calif.)



# Como medir o movimento relativo?

Um **problema** com **experimentos** na **Terra** de **luz** indo **ida-e-volta**, apontado por **Maxwell**, é, que eles só conseguem **medir** efeitos de **2ª ordem** na **razão  $v$**  (vel. da Terra em relação ao éter) :  **$c$**  (da luz):

$$t_{\rightleftarrows} = L/(c+v) + L/(c-v) = 2Lc/(c^2-v^2) \approx 2L/c \cdot (1+v^2/c^2)$$



**Figure 1-5** Light source, mirror, and observer are moving with speed  $v$  relative to the ether. According to classical theory, the speed of light  $c$ , relative to the ether, would be  $c - v$  relative to the observer for light moving from the source toward the mirror and  $c + v$  for light reflecting from the mirror back toward the source.

# O Experimento de Michelson-Morley

Porém, **Michelson** e **Morley** acreditavam que, usando um **interferômetro** sofisticado, conseguiriam **precisão suficiente** para **detectar** este efeito de 2ª ordem, e, em 1887, tentaram medir a **velocidade** da **Terra** em **relação** ao **éter**, comparando a **velocidade** da **luz** em **direções** perpendiculares da rosa de vento.



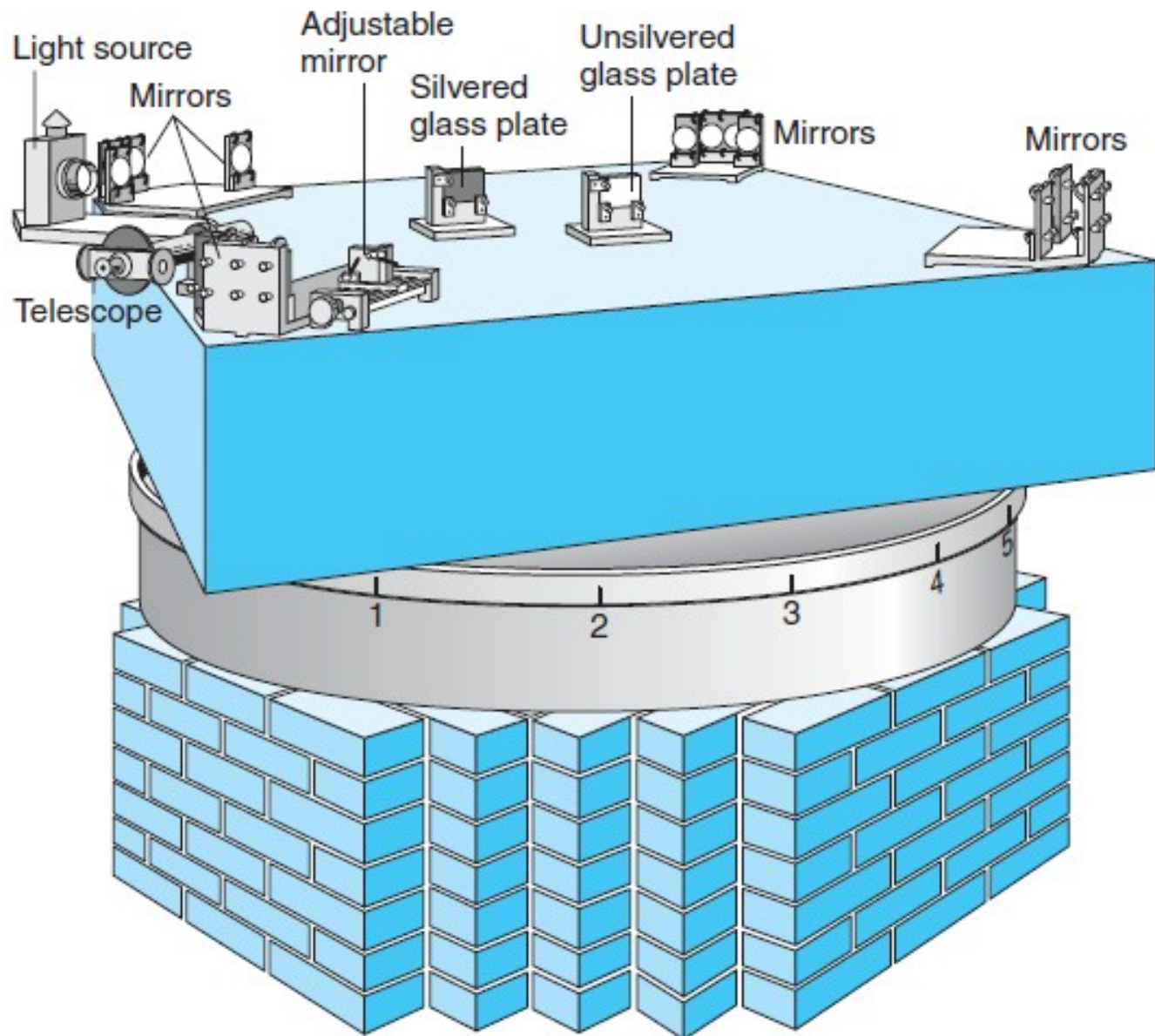
Albert Abraham  
Michelson  
(1852 - 1931)



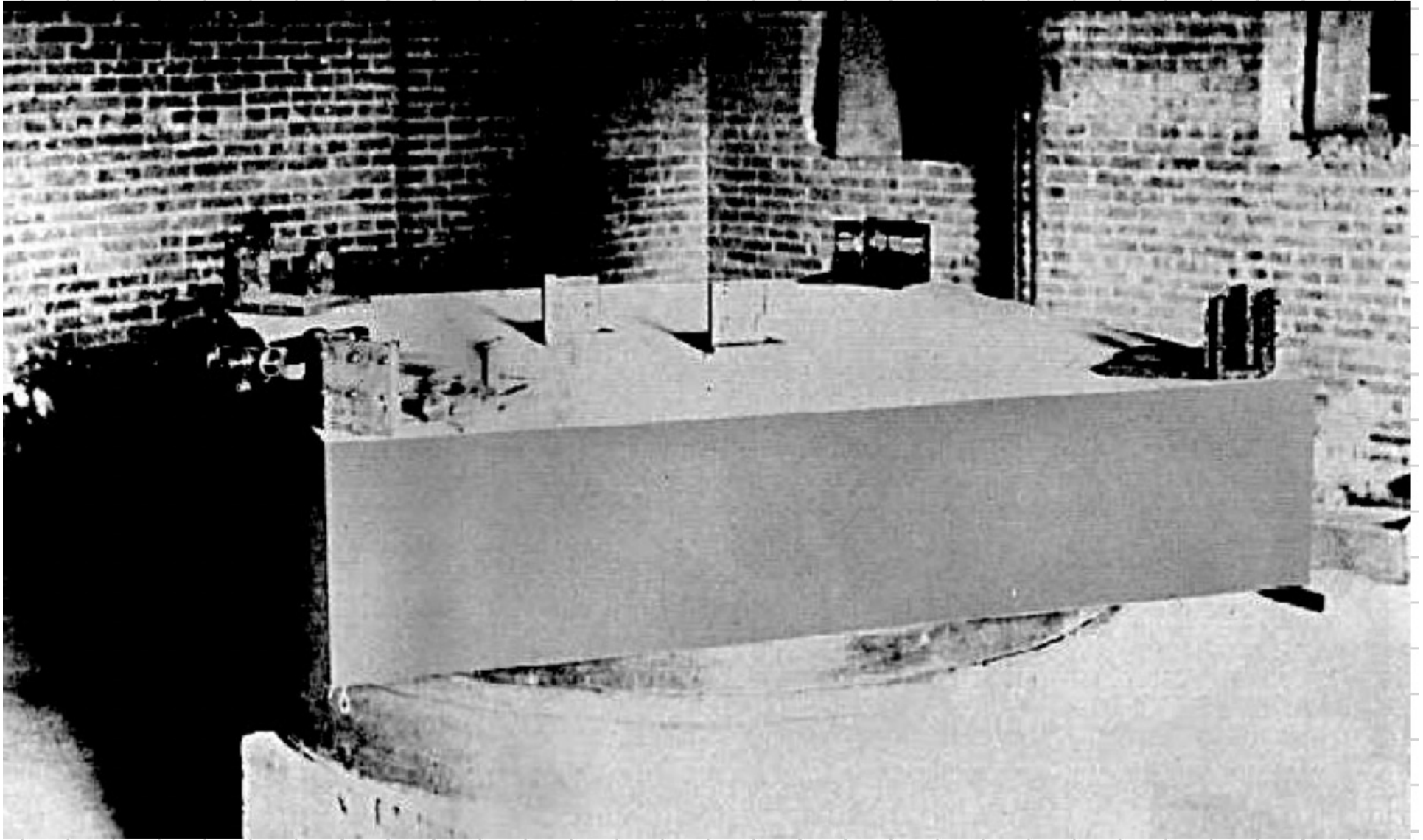
Edward Williams  
Morley  
(1838 - 1923)

# O Experimento de Michelson-Morley

Um  
aparelho  
que  
dava  
para  
girar  
como  
um todo!



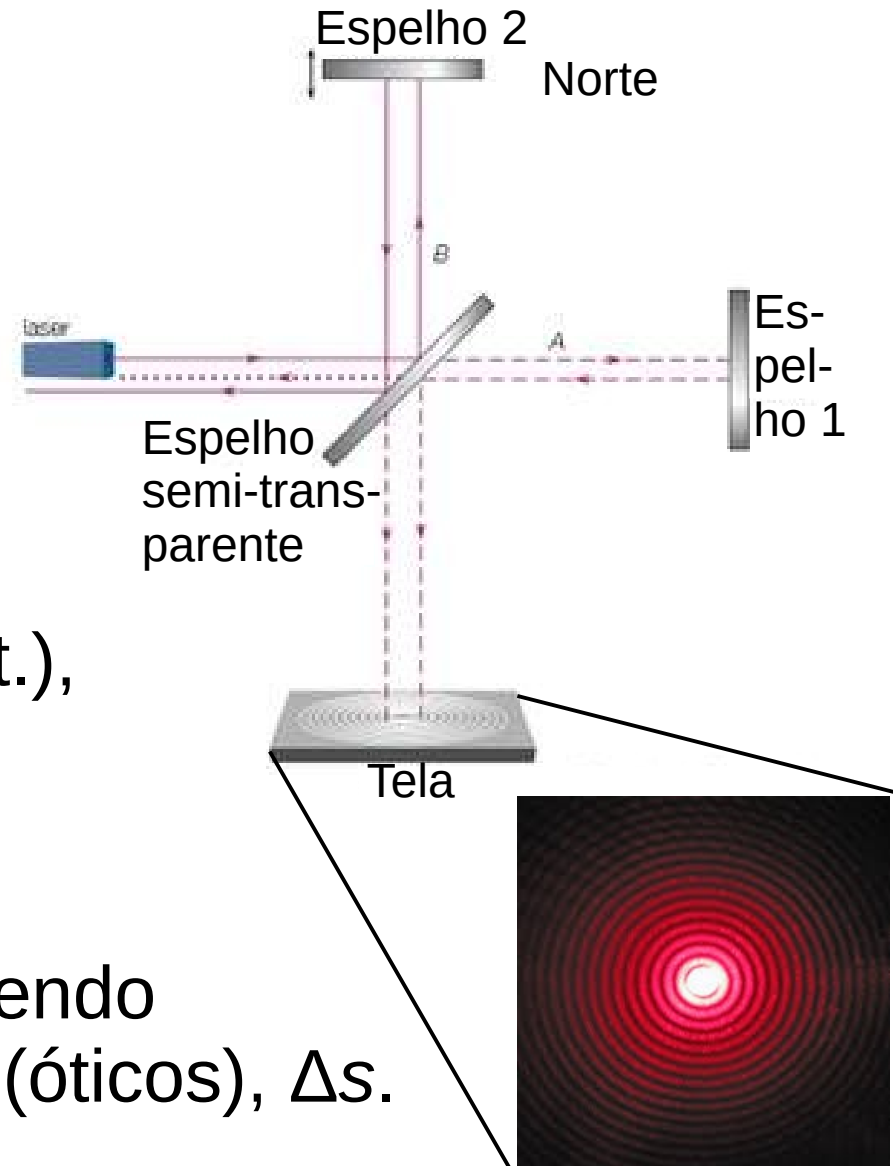
# O Experimento de Michelson-Morley



# O Experimento de Michelson-Morley

Eles usaram um **interferômetro**, cujo um **braço** viaja **junto** com a superfície da **Terra** (na direção leste-oeste), e o outro, com comprimento ajustável, **perpendicular** a este (norte-sul).

Luz **coerente dividido** no espelho semi-transparente (e.s.t.), fazendo **caminhos A e B**, e se **re-juntando** depois, deveria produzir um padrão de **interferência** na tela, dependendo da **diferença** entre os **caminhos** (óticos),  $\Delta s$ .



# O Experimento de Michelson-Morley

Calculamos os **tempos de percurso**, onde  $v$  é a **velocidade do interferômetro** (da rotação da Terra na latitude do experimento). Só precisamos calcular as partes e.s.t. - espelho 1 ou 2 - e.s.t., já que os raios fazem o resto do caminho juntos:

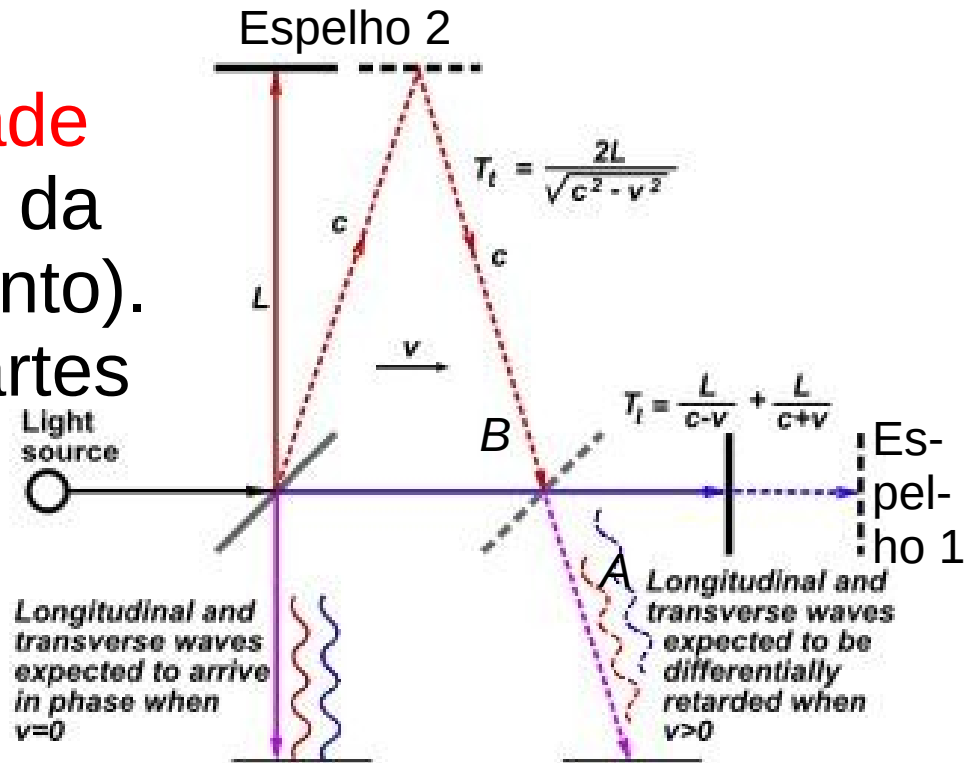
$$t_A = L/(c-v) + L/(c+v)$$

$$t_B \text{ (calculado a partir do componente na direção N-S)} \\ = 2 \cdot L/(c^2-v^2)^{1/2}$$

**diferença:**  $\Delta t = t_A - t_B = L/(c-v) + L/(c+v) - 2 \cdot L/(c^2-v^2)^{1/2}$

$$= 2 \cdot L/(c^2-v^2) \cdot ((c+v)/2 + (c-v)/2 - (c^2-v^2)^{1/2}) = 2 \cdot L/(c^2-v^2) \cdot (c - (c^2-v^2)^{1/2})$$

$$\approx 2 \cdot L/c^2 \cdot (c - [c - \frac{1}{2}v^2/c]) = Lv^2/c^3$$



# O Experimento de Michelson-Morley

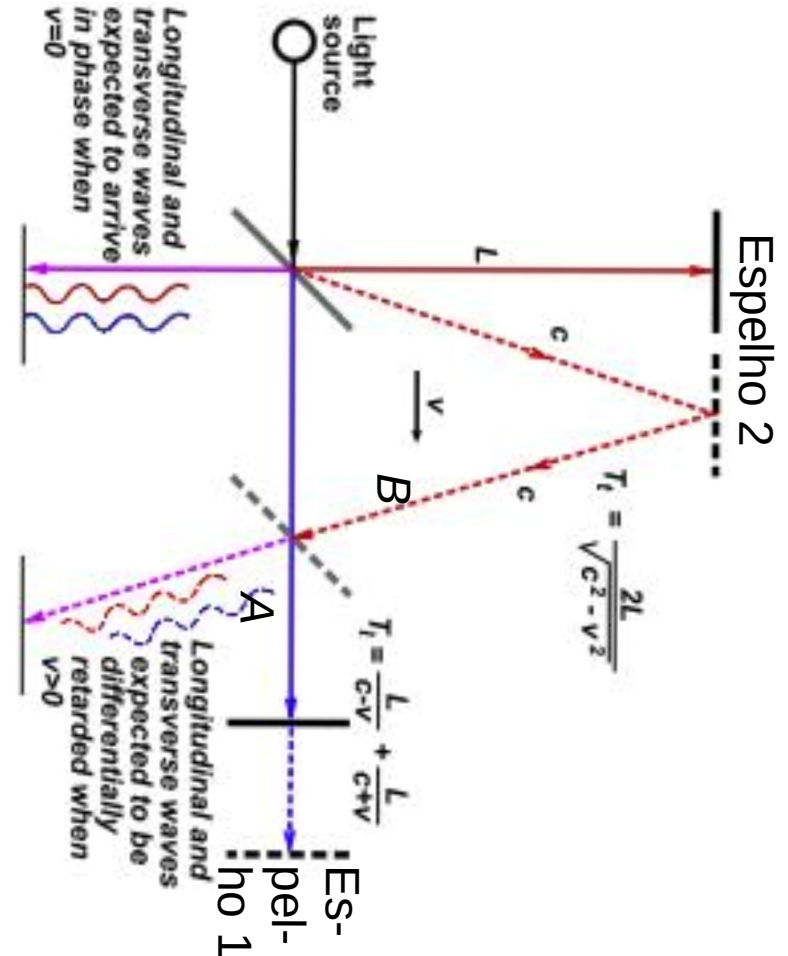
diferença:  $\Delta t = Lv^2/c^3$

Ajustando o espelho 2 até não ter padrão de interferência e **girando** o interferômetro por  $90^\circ$ , deveria surgir um **padrão** que corresponde a uma **diferença de percurso** do **dobro** deste valor.

Para braços de 1 m, um laser com c.d.o.  $\lambda \sim 500 \text{ nm}$ , ou  $\nu \sim 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  e  $v \sim 3 \cdot 10^4 \text{ m/s}$ :

$\Delta t = 0.04 \nu^{-1}$ , ou  $\Delta s = 0.04 \lambda$ , ou  $\Delta N = 0.04$ .

Diferença pequena, mas deve gerar um padrão de interferência **detectável**.



# O Experimento de Michelson-Morley

Porém, **Michelson** e **Morley** **não** acharam **diferença** de padrão nenhuma!

Fizeram o experimento aumentando o tamanho dos braços, em vários horários e épocas do ano, mas nada!

A luz se propaga com a **mesma velocidade** para sul, norte, oeste e leste!

**Não** se detecta **movimento** da **Terra** em relação ao **éter**!



Albert Abraham  
Michelson  
(1852 - 1931)



Edward Williams  
Morley  
(1838 - 1923)

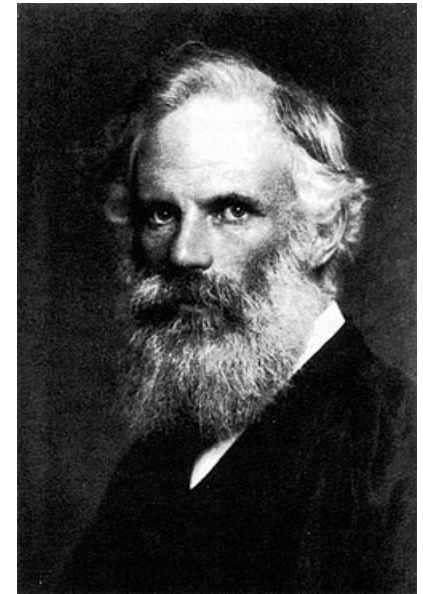
# Precursores da Relatividade Restrita

Como **interpretar** este resultado?

**Fitzgerald** fez a sugestão *ad hoc*, de que a **matéria** em **deslocamento** em **relação** ao **éter** sofreria um "**encurtamento**" na **direção** do **movimento** de

$$L' = L/\gamma, \text{ onde } \gamma = \sqrt{1/(1-(v/c)^2)},$$

que **anularia** exatamente a **diferença** de **caminho ótico** no experimento de Michelson e Morley e explicaria o resultado nulo deste.



George FitzGerald  
(1851-1901)

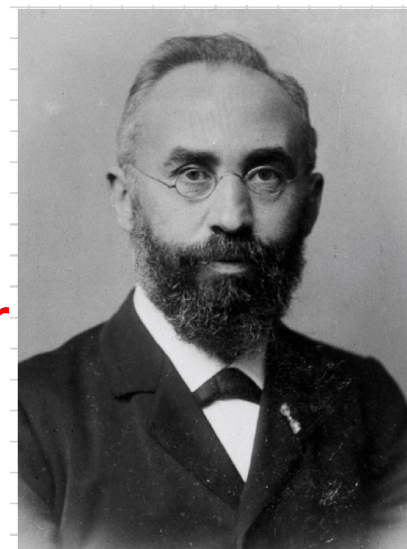
# Precursores da Relatividade Restrita

**Lorentz** concordou com esta hipótese e atribuiu o **encurtamento** a **mudanças** no **campo eletromagnético** entre as moléculas da **matéria** quando vistos por um **observador** em **movimento** em **relação** ao **éter**.

Nas **deduções**, Lorentz precisou introduzir o conceito de um "**tempo local**" para esta matéria, de

$$t' = \gamma \cdot (t - vx/c^2),$$

que ele interpretou como um **artifício matemático**, sem realidade física.



Hendrik Lorentz  
(1853-1928)

# Precursores da Relatividade Restrita

Poincaré levou estas transformações de Lorentz a sério, e formulou várias ideias que se tornariam cruciais na Relatividade:

- O "tempo local" não é apenas um artefato matemático, mas de fato o tempo do referencial em movimento. O tempo deve ser definido de forma operacional.
- Questionou o conceito abstrato de "simultaneidade".
- Destacou o princípio de relatividade, basicamente a invariância de Galileu estendido para toda a física.

Entraremos em detalhes sobre estes pontos no resto desta - e na próxima aula.



Henri Poincaré  
(1854-1912)

# Precursores da Relatividade Restrita

Além disso apresentou a **estrutura matemática** do **grupo** de **Lorentz** que descreve as **simetrias** que encontraremos na **Relatividade Restrita**.

Mas ele ainda acreditava no **éter**, continuando **interpretando** os **resultados nulos** de **experimentos** como o de **Michelson-Morley** como uma combinação de **fatores** como arrasto de éter, contração de Fitzgerald, etc...

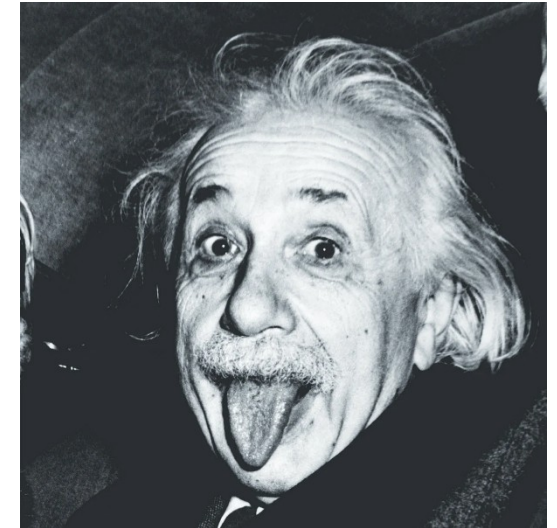


Henri Poincaré  
(1854-1912)

# As Ideias de Albert Einstein

Em 1905, **Einstein** publicou 4 **trabalhos** que **mudaram** nosso **entendimento** da **matéria**, do **espaço** e do **tempo**.

Por isto, o ano foi designado o ***annus mirabilis*** - em latim, ano miraculoso, maravilhoso, admirável - dele.



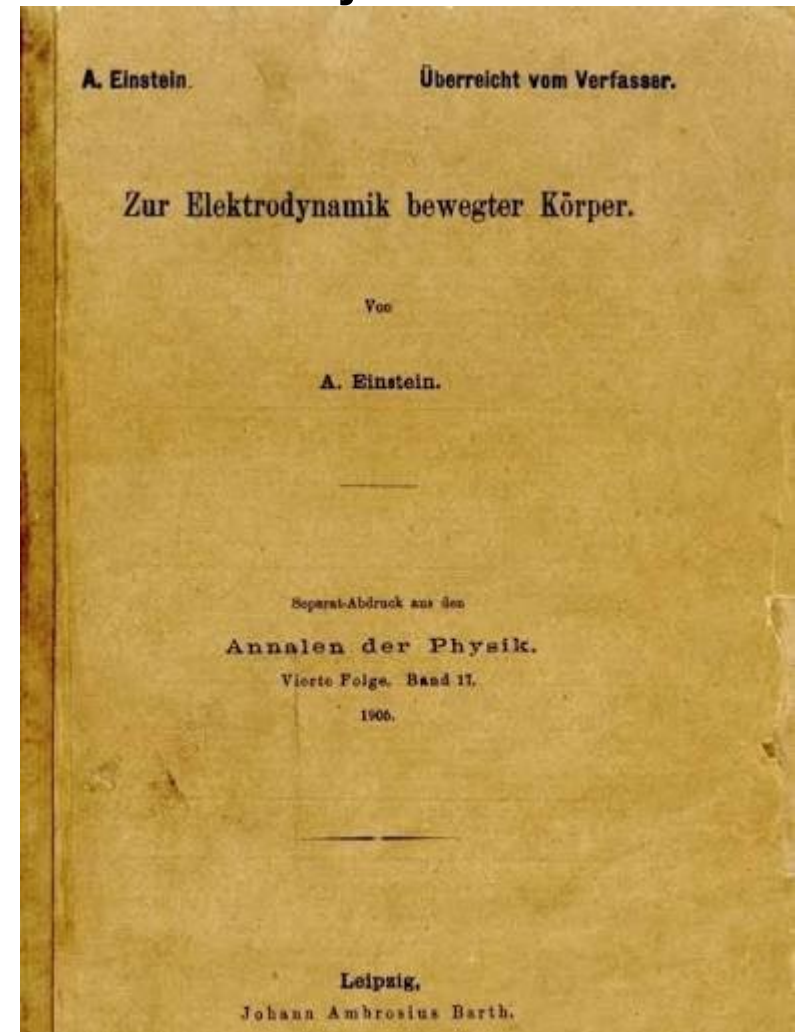
Dois deles mostrariam, com base em **teorias simples** e **elegantes**, como poderia ser demonstrada experimentalmente a **realidade** física de **átomos** e **moléculas**, assunto ainda controverso no início do século passado. Poucos anos depois, graças a essas idéias, a **teoria atômica** receberia sua **consagração** final, suplantando as dúvidas de seus mais ferrenhos opositores.

# As Ideias de Albert Einstein

O terceiro trata do **efeito fotoelétrico**, tratando a **radiação** como composta de "**quantas**", os **fótons**, e ajudou a desenvolver a **mecânica quântica** (=> disciplina Física Quântica e outras).

Por último, publicou o famoso artigo "Sobre a **eletrodinâmica** dos **corpos** em **movimento**", tradicionalmente reconhecido como o trabalho que deu **origem** à **Relatividade Restrita**.

(Neste paper usou justamente o exemplo do ímã e da bobina pra ilustração)



# As Ideias de Albert Einstein

## Algumas Citações sobre a Importância deste Trabalho

*In the autumn of [1905] . . . Einstein published a paper which set forth the relativity theory of Poincaré and Lorentz with some amplifications, and which attracted much attention.*

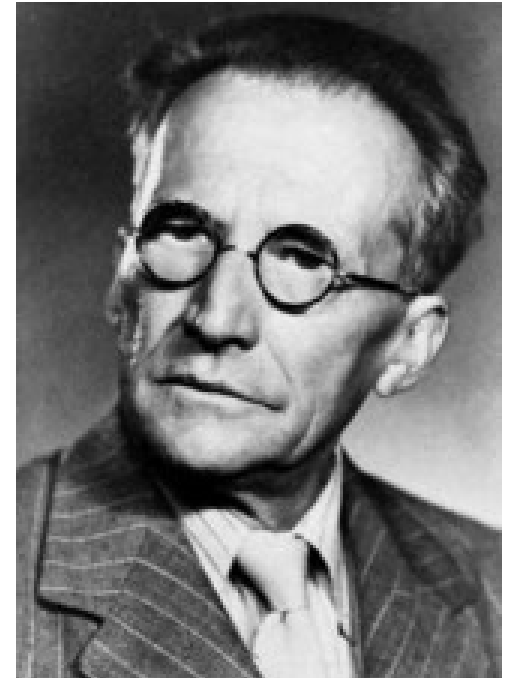
**E. T. WHITTAKER,**  
*History of the Theories  
of Aether and Electricity (1953)*

# As Ideias de Albert Einstein

## Algumas Citações sobre a Importância deste Trabalho

"A tarefa é não tanto para ver o que ninguém viu ainda, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre o que todo mundo vê."

Erwin Schrödinger



Erwin Schrodinger  
(1887-1961)

# As Ideias de Albert Einstein

Voltando às Aparentes Inconsistências do Eletromagnetismo com o Princípio da Relatividade, há três possibilidades:

- A **mecânica newtoniana** e as **equações de Maxwell** são **validas**, mas o **princípio de relatividade não** se aplica a **todas as leis físicas**: existe um **referencial absoluto** (éter), naquele a **velocidade da luz é  $c$** , mas **não** seria para **outros referencias inerciais em movimento em relação ao éter**,

# As Ideias de Albert Einstein

Há três possibilidades:

- O princípio da relatividade aplica-se a todas as leis da física e a mecânica newtoniana é correta. Neste caso, as equações de Maxwell teriam de ser modificadas e, deveria ser possível observar desvios das leis eletrodinâmicas clássicas.
- O princípio da relatividade aplica-se a todas as leis físicas, e as equações de Maxwell estão corretas. Neste caso, a mecânica newtoniana e a transformação de Galileu não podem estar corretas: deve ser possível de observar desvios das leis da mecânica clássica.

# Os Postulados de Einstein

Isto levou Einstein a fazer os seguintes dois **postulados** para a nova teoria:

- **O Princípio da Relatividade**: As **leis** da **física** são as **mesmas** em **todos** os **sistemas** de **referência inerciais**.
- **A Constância** (melhor: invariância) **da Velocidade da Luz**: A **luz** se movimenta pelo vácuo com uma **velocidade constante**  $c$ , que é **independente** do **movimento** da **fonte** da luz, ou do **observador**.

Outra **condição**:

- **Princípio de correspondência**: Para **velocidades baixas**,  $u \ll c$ , a nova teoria deve tender à **teoria newtoniana**.

=> Encontrar novas **Transformações** que garantem isto.



Universidade Federal do ABC

# Ótica e Relatividade

## FIM PRA HOJE

