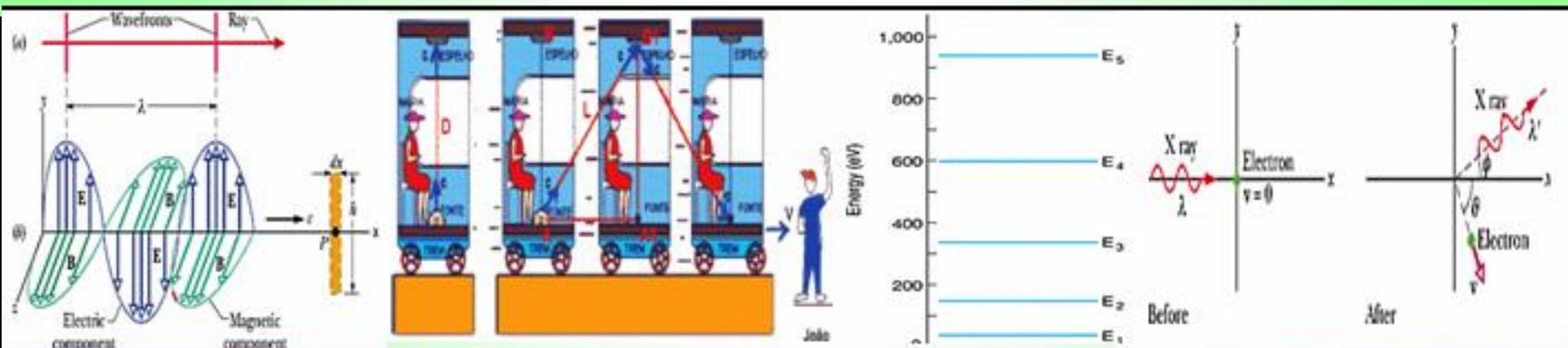


# Curso de F-589 - Turma A

## Estrutura da Matéria: Introdução a Física Moderna



Prof. Pascoal Pagliuso ([pagliuso@ifi.unicamp.br](mailto:pagliuso@ifi.unicamp.br))  
Departamento de Eletrônica Quântica A6 - Sala 215  
Laboratório do GPOMS – Prédio A3.  
IFGW - UNICAMP

Segundo semestre 2013



# Programa

O conteúdo a ser discutido durante o semestre segue a ementa proposta pelos livros textos, “*Introdução a Relatividade Especial*”, Resnick R. e “*Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*”, Eisberg e Resnick, 6ª Edição (Caps. 1 ao 7)

- **“Introdução à Relatividade Especial”, Resnick R**

Cap.1          A Base Experimental da Teoria da Relatividade

Cap.2          Cinética Relativística

Cap.3          Dinâmica Relativística

- **“Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas”, Eisberg e Resnick, 6ª Edição.**

Cap.1          Radiação Térmica e o Postulado de Planck

Cap.2          Fótons - Propriedades Corpusculares da radiação

Cap.3          O Postulado de de Broglie – Propriedades ondulatórias das partículas

Cap.4          O Modelo de Bohr para átomo

Cap.5          A Teoria de Schroedinger da Mecânica Quântica

Cap.6          Soluções para a equação de Schroedinger independente do tempo

Cap.7          Átomos de um elétron

# Critério de Avaliação

O aproveitamento dos alunos na disciplina será avaliado através de três provas e dois testes.

## Provas

As provas serão compostas de quatro questões abertas **baseadas** nos problemas da lista de exercícios sugerida. As mesmas serão aplicadas durante o semestre (sempre as quartas-feiras no horário das aulas).

## Testes

Irão acontecer dois testes durante o semestre. Eles serão compostos de quatro questões de múltipla escolha, com um conteúdo mais conceitual e soluções diretas.

A duração dos testes será de 45 minutos e eles serão realizados **no início** da aula.

## Critério de avaliação

A média das notas obtidas nos testes (MT) será utilizada para compor a nota de aproveitamento da disciplina, NA, em conjunto com as notas das três provas (P1, P2 e P3):

$$NA = (P1 + P2 + P3 + MT)/4$$

Se  $NA \geq 7,0$ , o(a) aluno(a) está dispensado(a) do exame final (Ex) e sua nota final  $NF = NA$ .

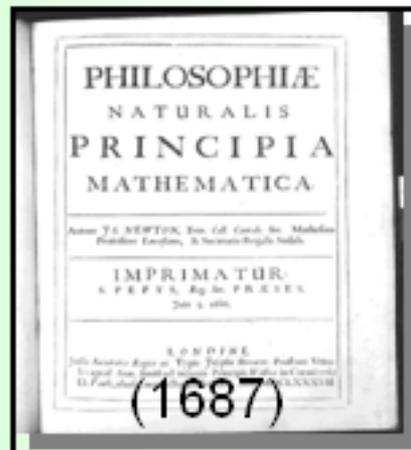
Se  $NA \leq 7,0$ , o(a) aluno(a) obrigatoriamente fará o exame final e sua nota final será igual a  $NF = (NA + Ex)/2$

O(a) Aluno(a) será aprovado(a) na disciplina somente se **NF  $\geq 5,0$  e a frequência às aulas for  $\geq 75\%$**

Não serão realizados provas e testes substitutivos. No caso de falta em dia de prova ou seminário, por motivo justificável de acordo com as normas da Unicamp, a nota do exame final servirá também como nota substitutiva.

# Cap.1 - A Base Experimental da Teoria da Relatividade

Na segunda metade do século XIX, uma boa parte dos fenômenos físicos observados poderia ser entendida pela Mecânica de Newton ou pelo Eletromagnetismo de Maxwell.

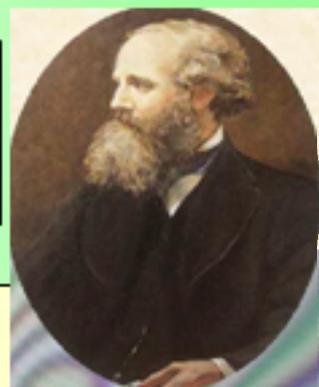


1) Lei da Inércia – Referenciais Inerciais

$$2) \sum \vec{F} = m\vec{a}_r$$

3) Lei da Ação e Reação:  $F_{AB} = -F_{BA}$

"A dynamical theory of  
Electrical Field"  
(1864)



$$\int \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

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

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

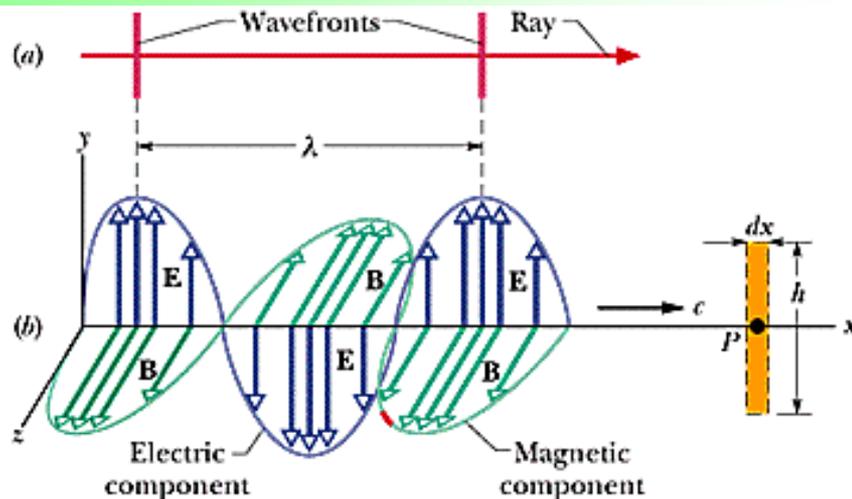
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

# A luz como onda: A proposta do éter

Confirmação da Natureza ondulatória da Luz: Young (1801), Fresnel (1819).

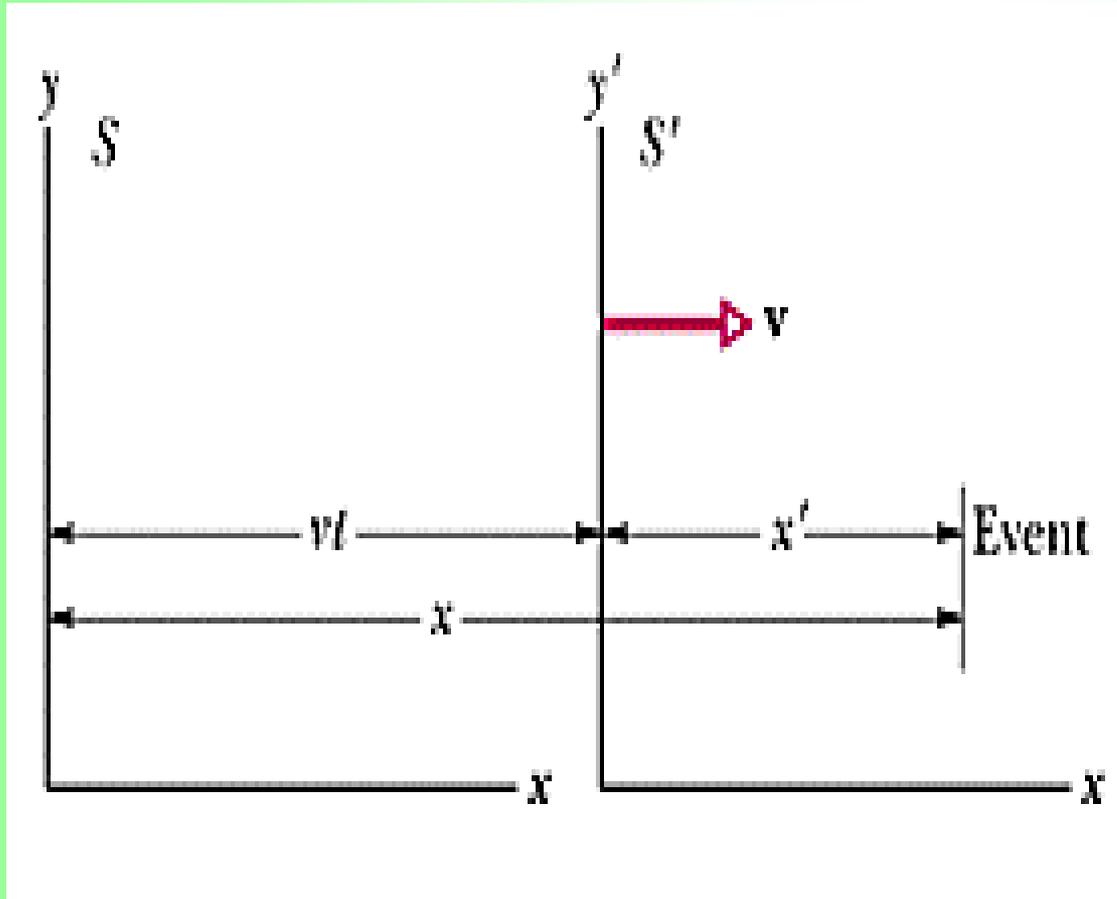
Produção de ondas eletromagnéticas “artificiais” e a confirmação do Eletromagnetismo de Maxwell: experimentos de Hertz (1886-1887) Qual o meio de propagação das ondas eletromagnéticas?

**A proposta do Éter:** Um meio sem massa, mas com propriedades elásticas que dariam origem às ondas eletromagnéticas. A velocidade  $c = 3,0 \times 10^8$  m/s seria a velocidade da onda eletromagnética em relação ao Éter.



E como descrever as equações de Maxwell e as ondas eletromagnéticas em relação a um referencial inercial que se move com velocidade  $v$  em relação ao Éter?

# As transformações de Galileu



$$S(x, y, z, t) \rightarrow S'(x', y', z', t')$$

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Vamos ao quadro mostrar a invariância das Leis de Newton perante as transformações de Galileu! E as equações da Maxwell?

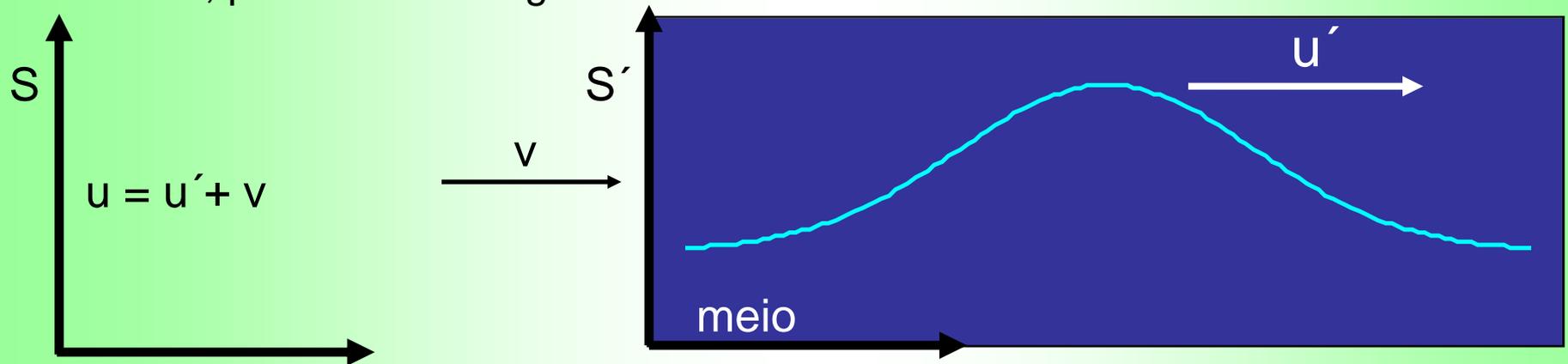
# As transformações de Galileu e o Eletromagnetismo

A solução das equações de Maxwell no vácuo levam a uma perturbação eletromagnética, onde os campos **E** ou **B** satisfazem a equação:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0$$

sendo  $\phi$  uma componente qualquer de **E** ou **B**.

Mas, assim como para ondas mecânicas, quando o meio de propagação está em movimento, poderíamos imaginar:



A não invariância da equação de onda para onda **E** ou **B** segundo as transformações de Galileu indicava a existência de um referencial privilegiado, onde somente em relação a ele a luz se moveria com velocidade  $c$ . Faremos a demonstração matemática da não invariância da equação de onda no quadro. Ex. 8 do livro texto.

# A Motivação para os experimentos de Michelson and Morley

Maxwell e Fresnel eram defensores da proposta do Éter.

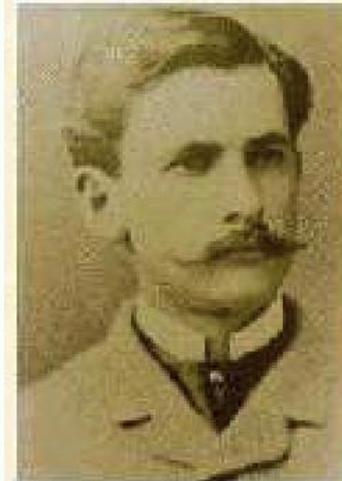
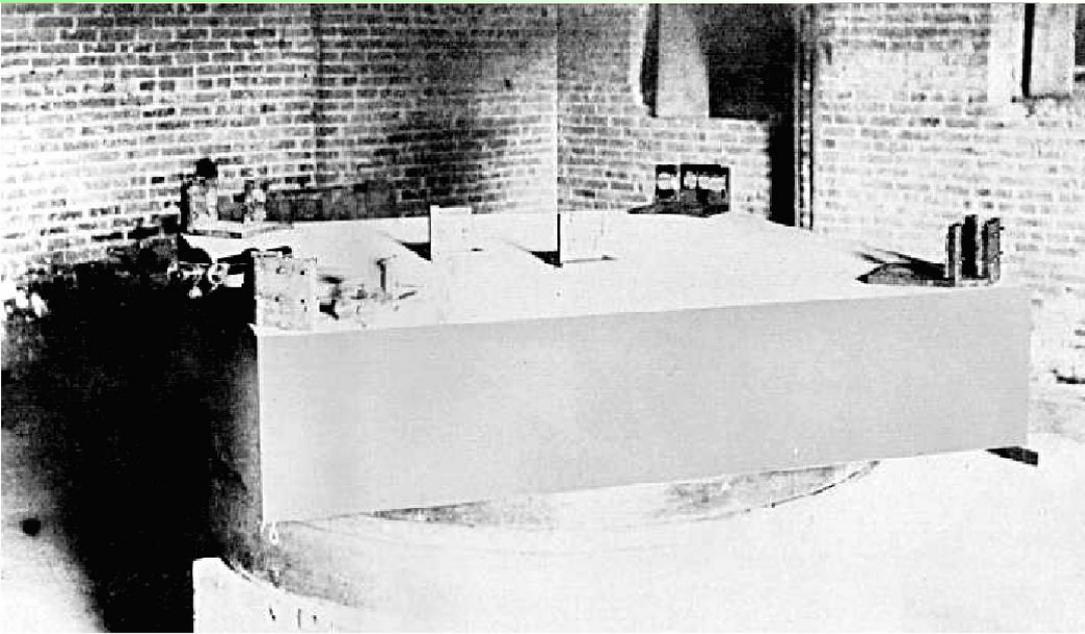
Maxwell propôs experimentos para se medir a velocidade da Terra em relação ao Éter

As idéias Maxwell ajudaram a motivar os experimentos de Michelson and Morley.



**James Clerk Maxwell**

# Os experimentos de Michelson and Morley - 1887

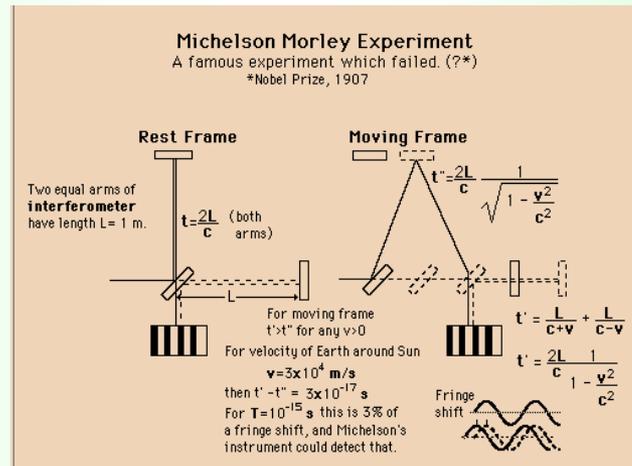
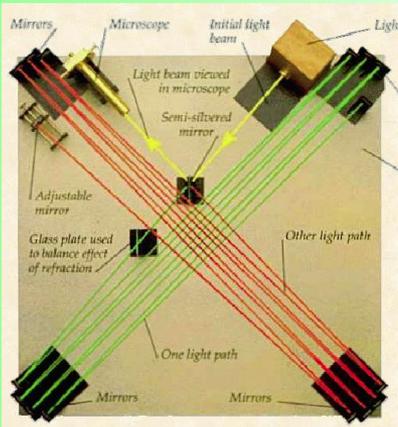


A.A. Michelson  
1852 - 1931



E.W. Morley  
1838 - 1923

Interferômetro montado sobre bloco de granito flutuando sobre mercúrio.



Nenhum deslocamento de franja foi observado em todas as condições testadas.

Este experimento nulo foi um golpe mortal para a hipótese do Éter.

Vamos discutir este experimento em detalhe no quadro.

Várias reflexões para aumentar a sensibilidade

# Tentativas de preservar o Sistema preferencial do Éter



Hendrik A. Lorentz

## A Hipótese de contração de Lorentz- Fitzgerald

Todos os corpos são contraídos na direção do movimento em relação ao Éter estacionário por um fator  $\sqrt{1 - v^2 / c^2}$ .

Na experiência da Michelson-Morley:

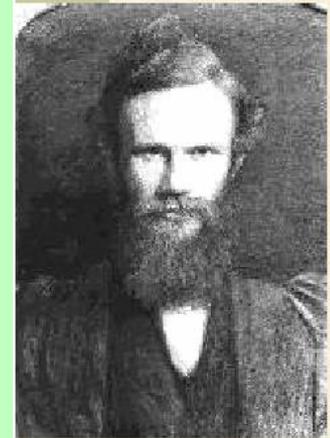
$$l_1 = l_1^0 \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

$$l_2 = l_2^0$$

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

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

$$\Delta N = 0, \text{ pois } \Delta t - \Delta t' = 0$$



George F. Fitzgerald

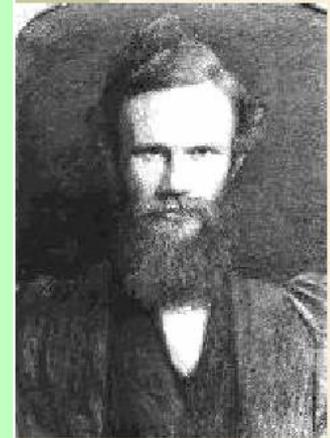
# Tentativas de preservar o Sistema preferencial do Éter



Hendrik A. Lorentz

## A Hipótese de contração de Lorentz- Fitzgerald

Todos os corpos são contraídos na direção do movimento em relação ao Éter estacionário por um fator  $\sqrt{1 - v^2 / c^2}$ .



George F. Fitzgerald

Mas para um interferômetro com  $l_1 \neq l_2$ , quando a velocidade do interferômetro muda em relação ao éter de  $v$  para  $v'$ .

$$\Delta N = \frac{(l_1^0 - l_2^0)}{\lambda} \left( \frac{v^2}{c^2} - \frac{v'^2}{c^2} \right)$$

Nenhum deslocamento de franja foi observado experimentalmente por Kennedy e Thorndike que usaram um interferômetro com braços desiguais em cerca de 16 cm.

# Tentativas de preservar o Sistema preferencial do Éter

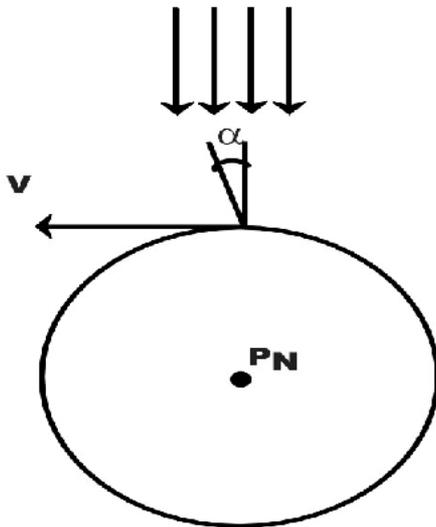


Fresnel (1818)

## A Hipótese de arrastamento do Éter

Esta hipótese admitia que o sistema éter estava ligado a todos os corpos de massa finita, isto é, pode ser localmente arrastado com todos os corpos.

No entanto, dois efeitos bem estabelecidos traziam problemas à hipótese do arrastamento do éter: a aberração da luz das estrelas e o experimento de Fizeau.

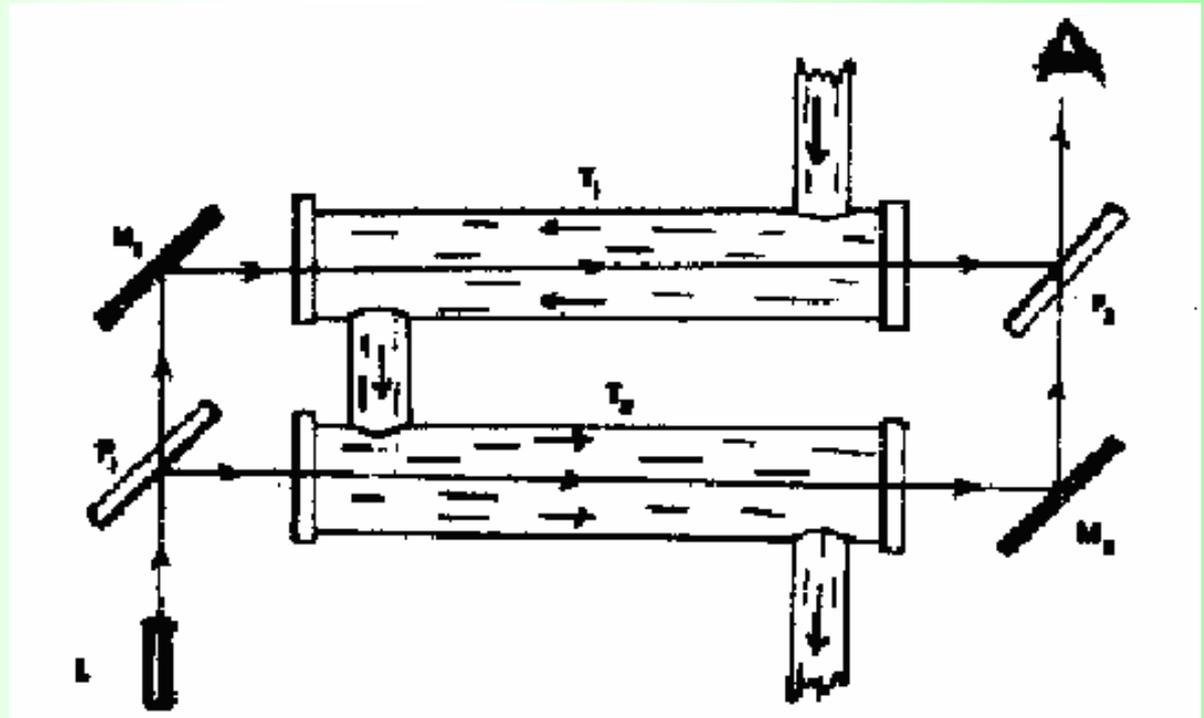


Se a Terra arrasta localmente o éter, como entender o efeito da aberração da luz observada experimentalmente?

# Tentativas de preservar o Sistema preferencial do Éter

## A Hipótese de arrastamento do Éter

Esta hipótese admitia que o sistema éter estava ligado a todos os corpos de massa finita, podendo ser localmente arrastado por eles.



Armand Fizeau (1819-1896)

$$v = \frac{c}{n} \pm v_w \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

Experimento confirma a existência do coeficiente de arrastamento de Fresnel, mas pode ser facilmente entendido pelo arrastamento da luz pela água e nenhum arrastamento do éter tanto pelo aparelho como pela água.

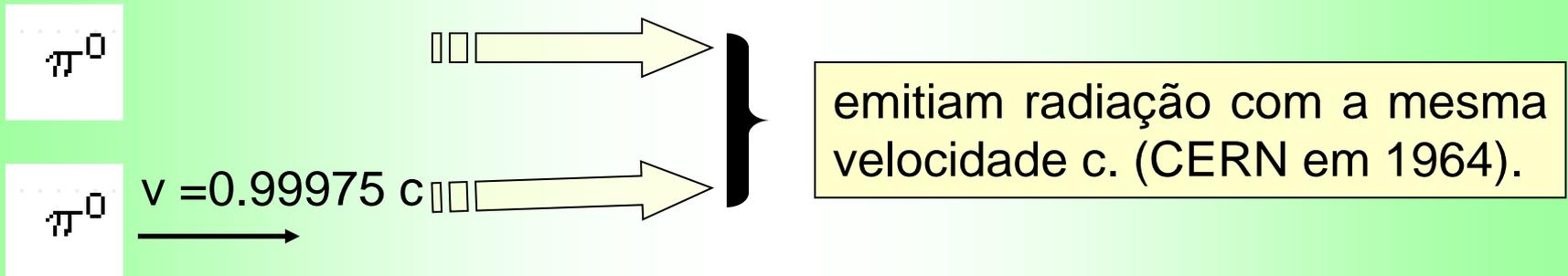
# Tentativas de modificar a Eletrodinâmica

“A velocidade da luz seria definida sempre em relação à Fonte”

Esta hipótese, conhecida como teoria da emissão, foi contrariada por várias evidências experimentais, como as observações das estrelas duplas e pelos experimentos de Michelson-Morley usando luz extra-terrestre.

E mais tarde:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma.$$



# Tentativas de Modificar a Eletrodinâmica

Woldemar Voigt, Joseph Larmor e Hendrik Lorentz (independentemente) procuraram as condições para que as leis de Maxwell fossem válidas em todos os referenciais

Mas, eis que surge:



que, seguindo (?) as evidências experimentais da época e as idéias de Poincaré, Lorentz e outros, propõe:

# Os Postulados da Relatividade Especial

**Figure 38-1** Einstein in the early 1900s, at his desk at the patent office in Bern, Switzerland, where he was employed when he published his special theory of relativity.



**1. Postulado da Relatividade:** As leis físicas são as mesmas em todos os referenciais inerciais. Não existe um referencial absoluto.

**2. Postulado da Velocidade da luz:** A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor  $c$  em todos os referenciais inerciais.



Até a  
próxima!!

A velocidade da luz  
é sempre a mesma,  
que baba?  
Até eu poderia ter  
pensado nisso!!!