

IX FÍSICA NAS FÉRIAS VII ESCOLA AVANÇADA DE FÍSICA

◻ QUE EXISTE ALÉM DE PRÓTONS, ELÉTRONS E
NÊUTRONS?
UMA INTRODUÇÃO ÀS PARTÍCULAS
ELEMENTARES

A Teoria da Relatividade

RAFAEL ALVES BATISTA

Assuntos desta aula

- Sobre a existência éter
- Os postulados da relatividade
- A questão da simultaneidade
- Dilatação do tempo
- Contração do espaço
- Transformações de Galileu
- Transformações de Lorentz
- Partículas elementares e relatividade
- Alguns paradoxos da relatividade
- Um pouco de relatividade geral

Holanda, segunda metade do séc. XVII...



Christiaan Huygens

Holanda, segunda metade do séc. XVII...

A luz é uma onda. Todas as ondas conhecidas precisam de um meio de propagação. Qual é o meio em que a luz se propaga?



Christiaan Huygens

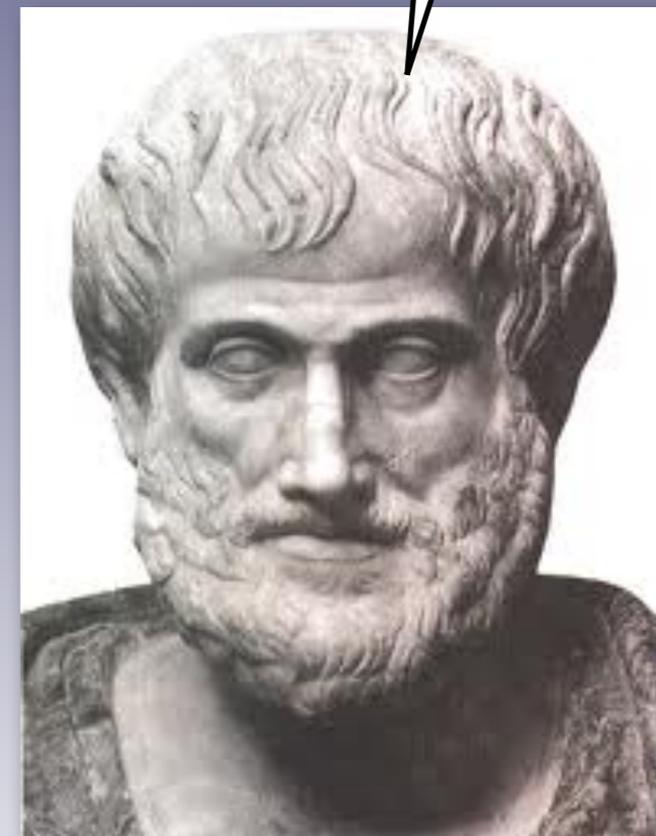
Holanda, segunda metade do séc. XVII...

A luz é uma onda. Todas as ondas conhecidas precisam de um meio de propagação. Qual é o meio em que a luz se propaga?



Christiaan Huygens

Existem cinco elementos na natureza: água, ar, terra, fogo e éter.



Aristóteles

Holanda, segunda metade do séc. XVII...

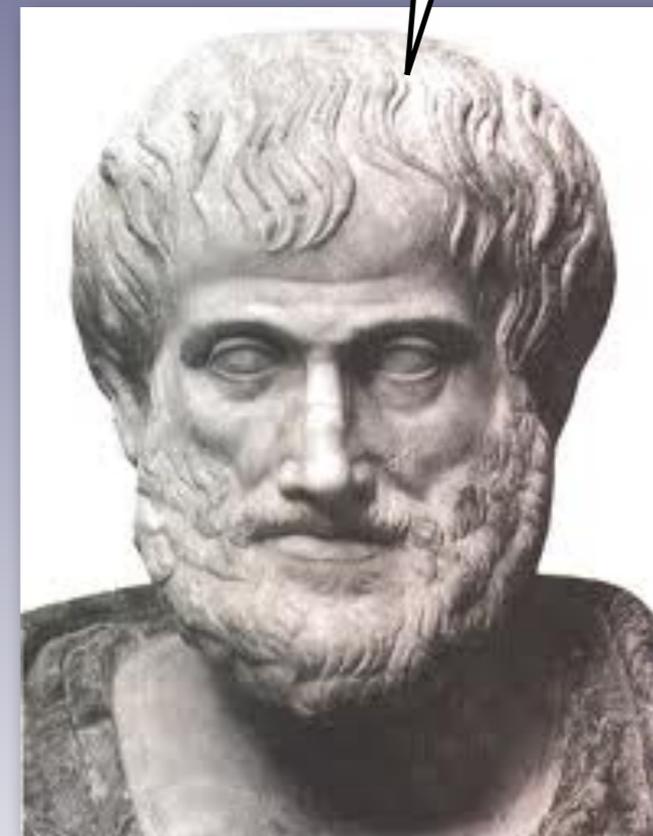
A luz é uma onda. Todas as ondas conhecidas precisam de um meio de propagação. Qual é o meio em que a luz se propaga?



Christiaan Huygens

Eu conheço ar, água, terra e fogo. Esse tal de éter eu nunca vi.

Existem cinco elementos na natureza: água, ar, terra, fogo e éter.



Aristóteles

Holanda, segunda metade do séc. XVII...

A luz é uma onda. Todas as ondas conhecidas precisam de um meio de propagação. Qual é o meio em que a luz se propaga?

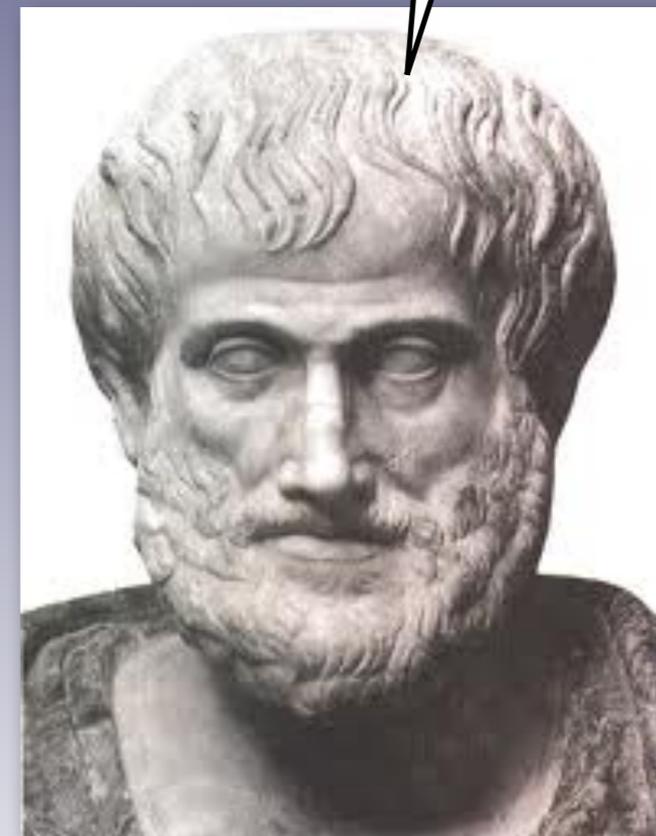


Christiaan Huygens

Eu conheço ar, água, terra e fogo. Esse tal de éter eu nunca vi.

Acho que vou dizer que a luz se propagam nele.

Existem cinco elementos na natureza: água, ar, terra, fogo e éter.



Aristóteles

França, primeira metade do século XIX...

Experimento de Arago

- Experiência com prisma.
- Observou a deflexão da luz das estrelas por um prisma quando a luz vinha no sentido do movimento da Terra e no sentido oposto.
- Resultado: não notou variações.
- Pediu auxílio a Fresnel

Teoria de Fresnel

- 1818, teoria ondulatória.
- Luz como onda eletromagnética transversal, o que implica na necessidade de um meio
- Éter em repouso (não é arrastado pela Terra).
- Em um meio transparente (como o vidro) a velocidade da luz é alterada devido ao arraste causado pelo éter.

François Arago



Augustin-Jean Fresnel



Europa, primeira metade do século XIX...

Jacques Babinet



Experimento de Babinet

- França, 1836.
- Experiência de interferência luminosa.
- Feixes no sentido horário e anti-horário, atravessando o vidro. Esperava-se perceber um atraso entre os feixes com e sem o vidro.
- O objetivo era verificar a teoria de Fresnel.
- Não foi observado o efeito esperado.
- Stokes explica o resultado nulo do experimento de Babinet.

George Gabriel Stokes



Teoria de Stokes

- Inglaterra, 1845-1846.
- O éter está em repouso em todo o espaço.
- O éter é viscoso e é quase totalmente arrastado pela Terra.
- A viscosidade do éter depende da velocidade do objeto que nele atravessa.

Teorias: Fresnel versus Stokes

Fresnel

- Armand Fizeau, 1851.
- Armand Fizeau, 1854.
- Lorenzo Respighi, 1861.
- Martinus Hoek, 1868.
- Martinus Hoek, 1869.
- Georges Airy, 1872.
- Éleuthère Mascart, 1874.
- Albert Michelson, 1881.
- Albert Michelson, 1886.

Stokes

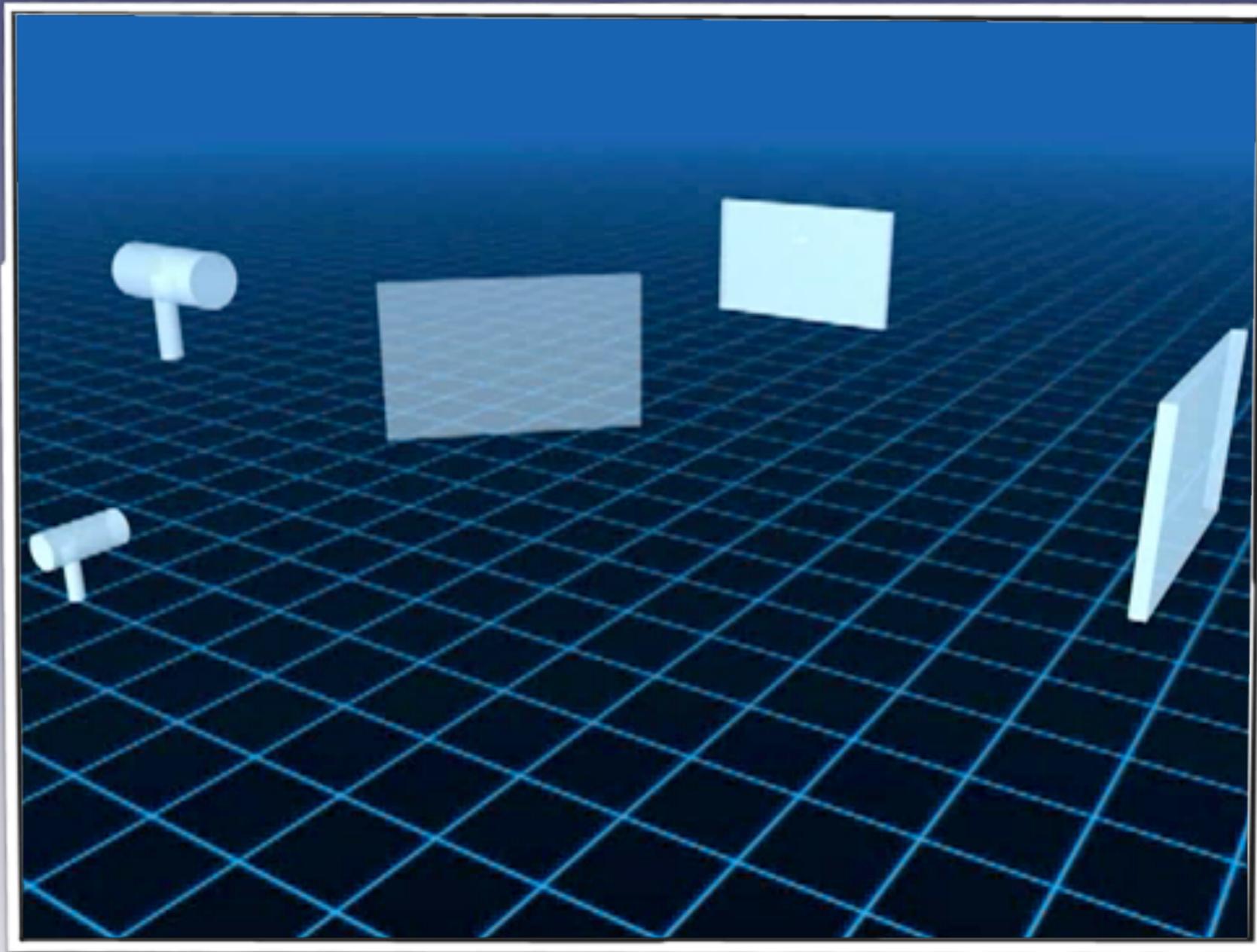
- Ernst Kleinknecht, 1867.
- Albert Michelson, 1881.

O Experimento de Michelson-Morley

<http://youtu.be/8QUhgYaxWao>

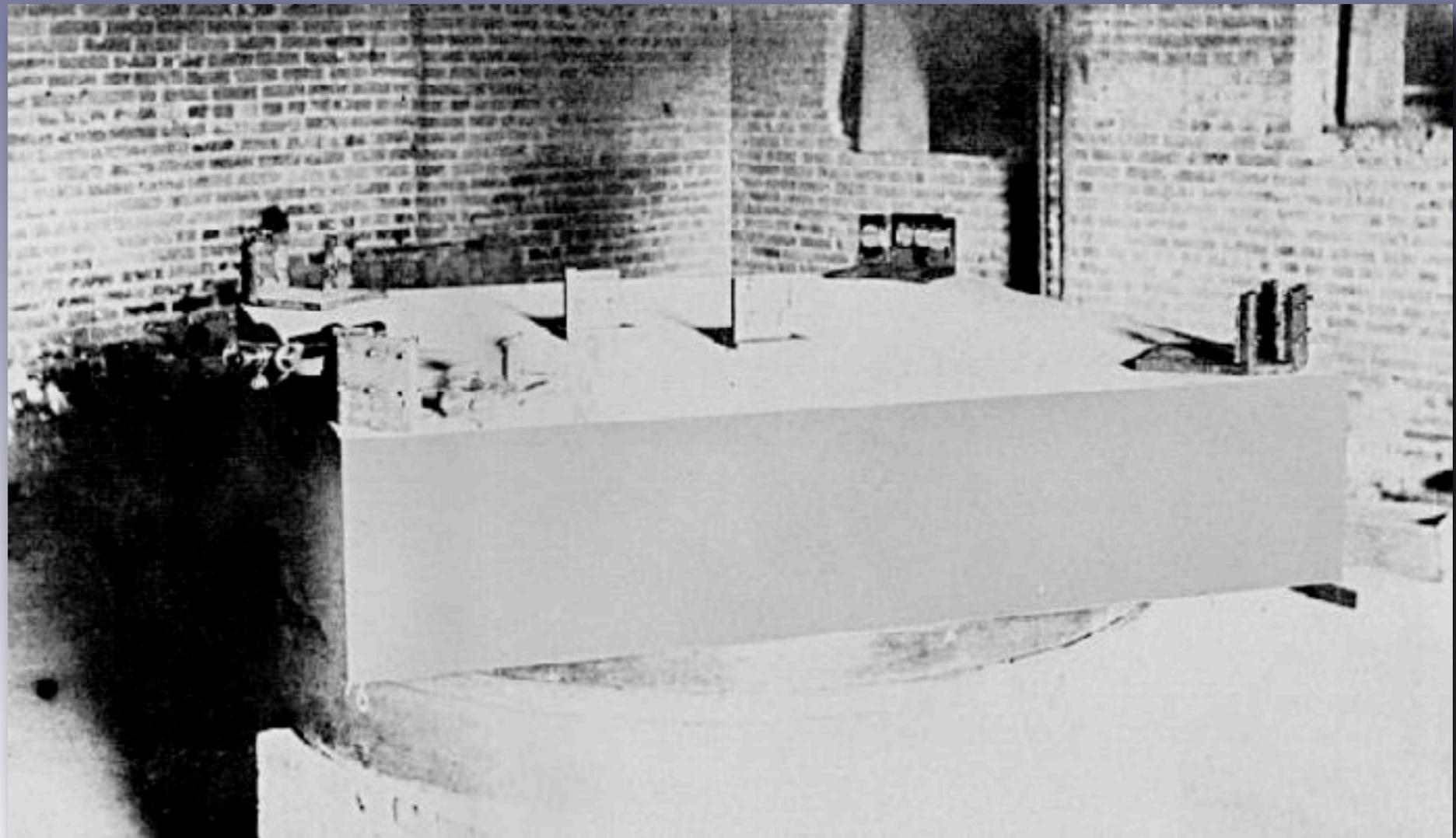
O Experimento de Michelson-Morley

<http://youtu.be/8QUhgYaxWao>



O Experimento de Michelson-Morley

"[...] a velocidade relativa da Terra e do éter é provavelmente menos do que 1/6 da velocidade orbital da Terra e certamente menos do que 1/4 [...]"
(Michelson & Morley 1887)



<http://ghtc.ifc.unicamp.br/hf3.htm>



O Experimento de Michelson-Morley

Conclusões do experimento

O Experimento de Michelson-Morley

Conclusões do experimento

Não foi verificada a existência do éter

O Experimento de Michelson-Morley

Conclusões do experimento

Não foi verificada a existência do éter

- 1892: George Fitzgerald e Hendrik Lorentz explicam o resultado negativo do experimento de Michelson e Morley.
- Eles propõem que corpos em movimento tendem a sofrer uma contração na direção do seu movimento.
- Desta forma, eles reconciliam o experimento de Michelson e Morley com a teoria do éter de Fresnel.

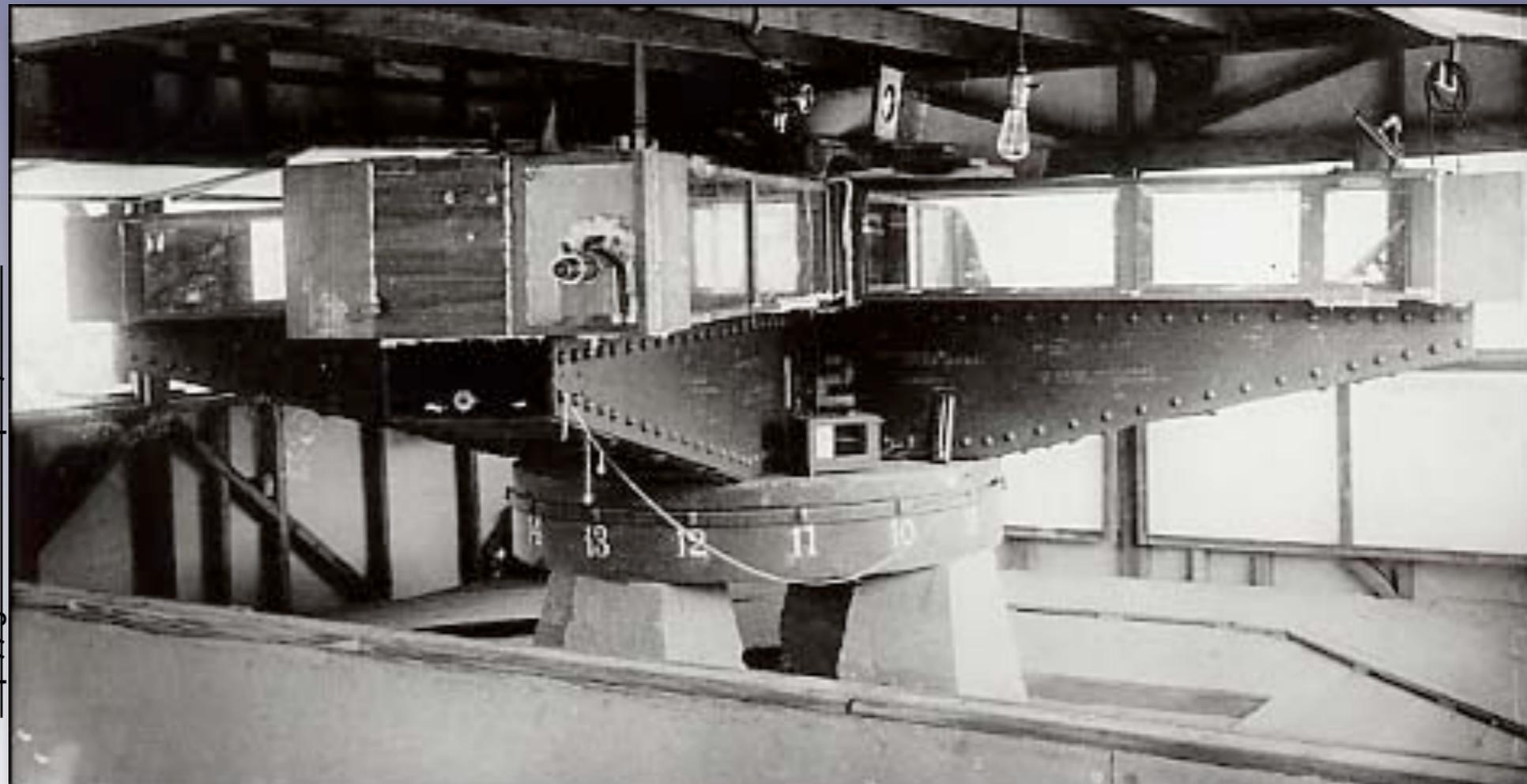
E o éter continua incomodando...

- Albert Michelson, 1897: realiza outro experimento que está de acordo com a explicação dada por Fitzgerald e Lorentz.
- Oliver Lodge realizou uma série de experimentos entre 1892-1897 e não verificou a existência do éter.
- Edward Morley e Dayton Miller, 1904-1905: na tentativa de verificar se uma eventual contração de Fitzgerald-Lorentz dependia do materia, eles realizaram um experimento que verificava a teoria do éter de Fresnel.
- Edward Morley e Dayton Miller, 1906: encontram resultados favoráveis à teoria de Stokes.

Um resultado mal-explicado



- Dayton Miller, 1920.
- Constrói um interferômetro gigantesco no Monte Wilson.
- Detecta efeitos positivos do movimento da Terra em relação ao éter.
- Realizou 200 mil observações, tomou medidas por 12 mil voltas do interferômetro (M & M observaram apenas 36 voltas).
- Resultados favoráveis à teoria de Stokes.



<http://ghtc.ifi.unicamp.br/hf3.htm>

(Voltando)...Escócia, década de 1860

- James Clerk Maxwell publica a teoria do eletromagnetismo compilando em uma só obra as equações que regem o comportamento de campos eletromagnéticos.
- Para Maxwell, ondas eletromagnéticas necessitavam de um meio para se propagarem \Rightarrow éter.
- Lorentz admitia que o éter estava em repouso e não era transportado por corpos.
- Em princípio, seria possível medir a velocidade de um corpo em relação ao éter.
- Lorentz desejava estabelecer transformações de coordenadas que deixassem as equações de Maxwell invariantes em quaisquer referenciais inerciais.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

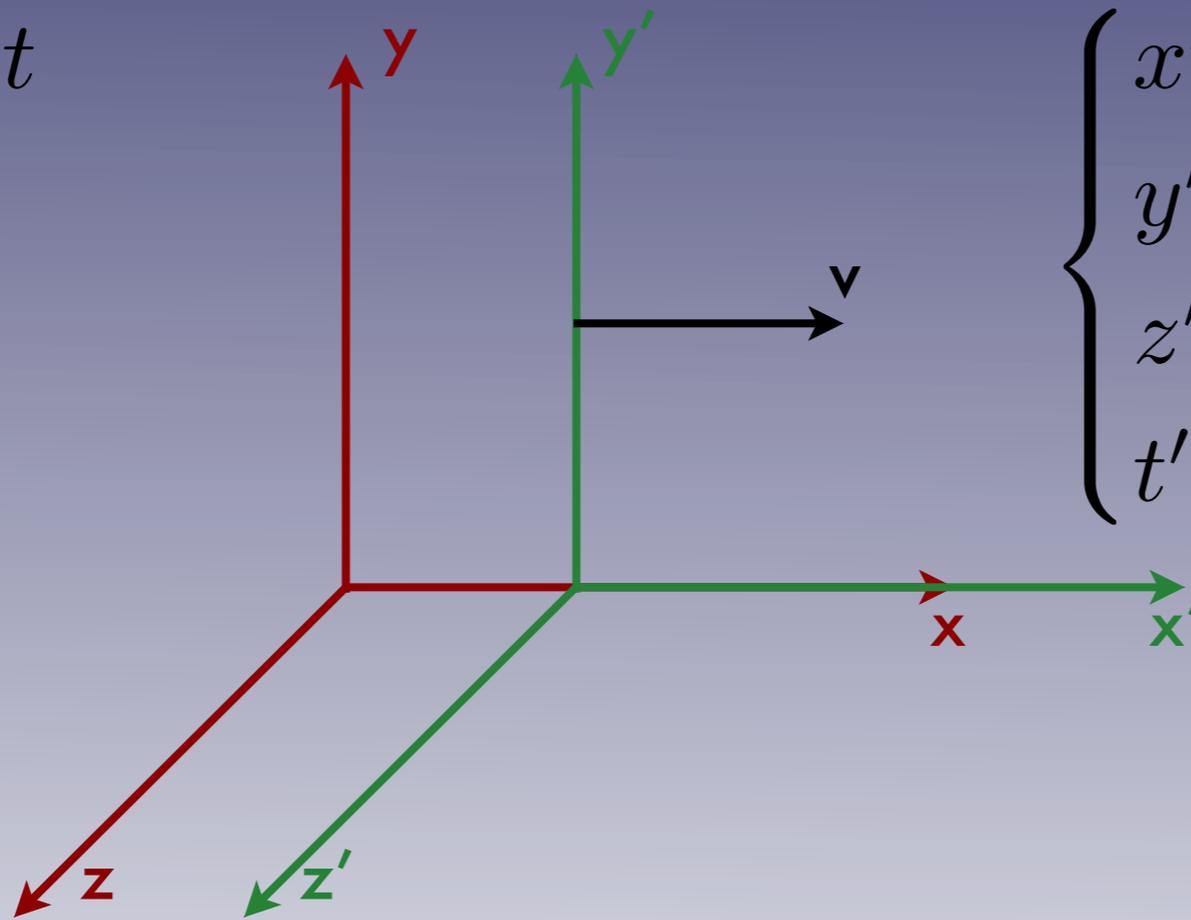
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Equações de Maxwell

Transformações de Lorentz

Transformações de Galileu

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$



Transformações de Lorentz

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right) \end{cases}$$

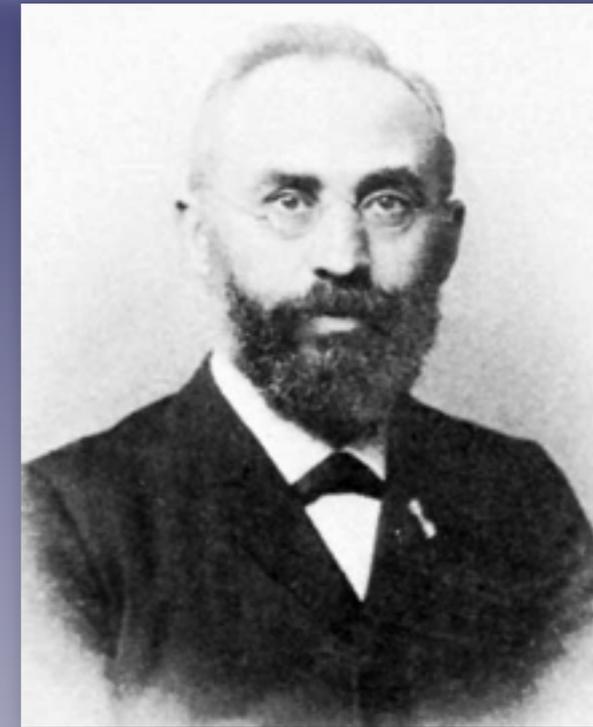
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Lorentz também calculou as transformações dos campos elétrico e magnético.
- Joseph Larmor obteve as mesmas transformações independentemente em 1893, porém com as transformações dos campos calculadas erroneamente.

Construindo uma teoria

Contribuições de Lorentz

- Transformações de Lorentz (já haviam sido obtidas anteriormente por Larmor).
- Transformações dos campos elétrico e magnético.
- Comportamento de partículas carregadas próximas à velocidade da luz.



Contribuições de Poincaré

- Sincronização de relógios (questão da simultaneidade).
- Dilatação do tempo.
- Velocidade limite.
- Necessidade de uma nova dinâmica.
- Adição de relativística de velocidade.
- Correção de alguns detalhes da teoria de Lorentz.

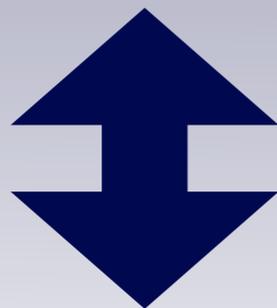
E o Einstein?

Quando Einstein realizou seus trabalhos a teoria da relatividade já estava em grande parte desenvolvida.

Contribuições de Einstein

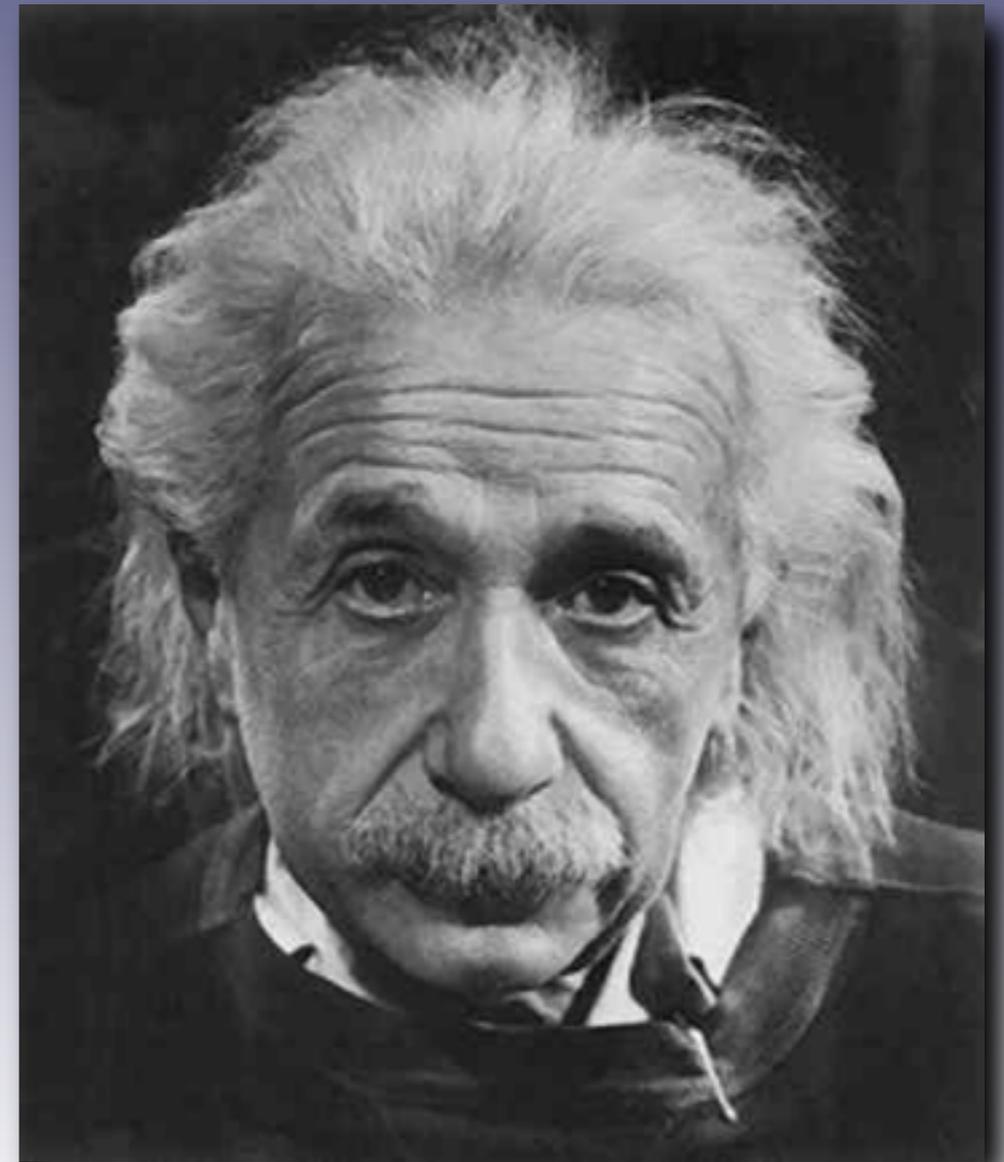
- Simplificação das deduções matemáticas.
- Combateu a existência do éter.
- Relatividade geral (alguns anos depois).

Teoria da relatividade
de Einstein



Teoria da relatividade
de Lorentz-Poincaré

**vantagens
epistemológicas**



Os Postulados da Relatividade Especial

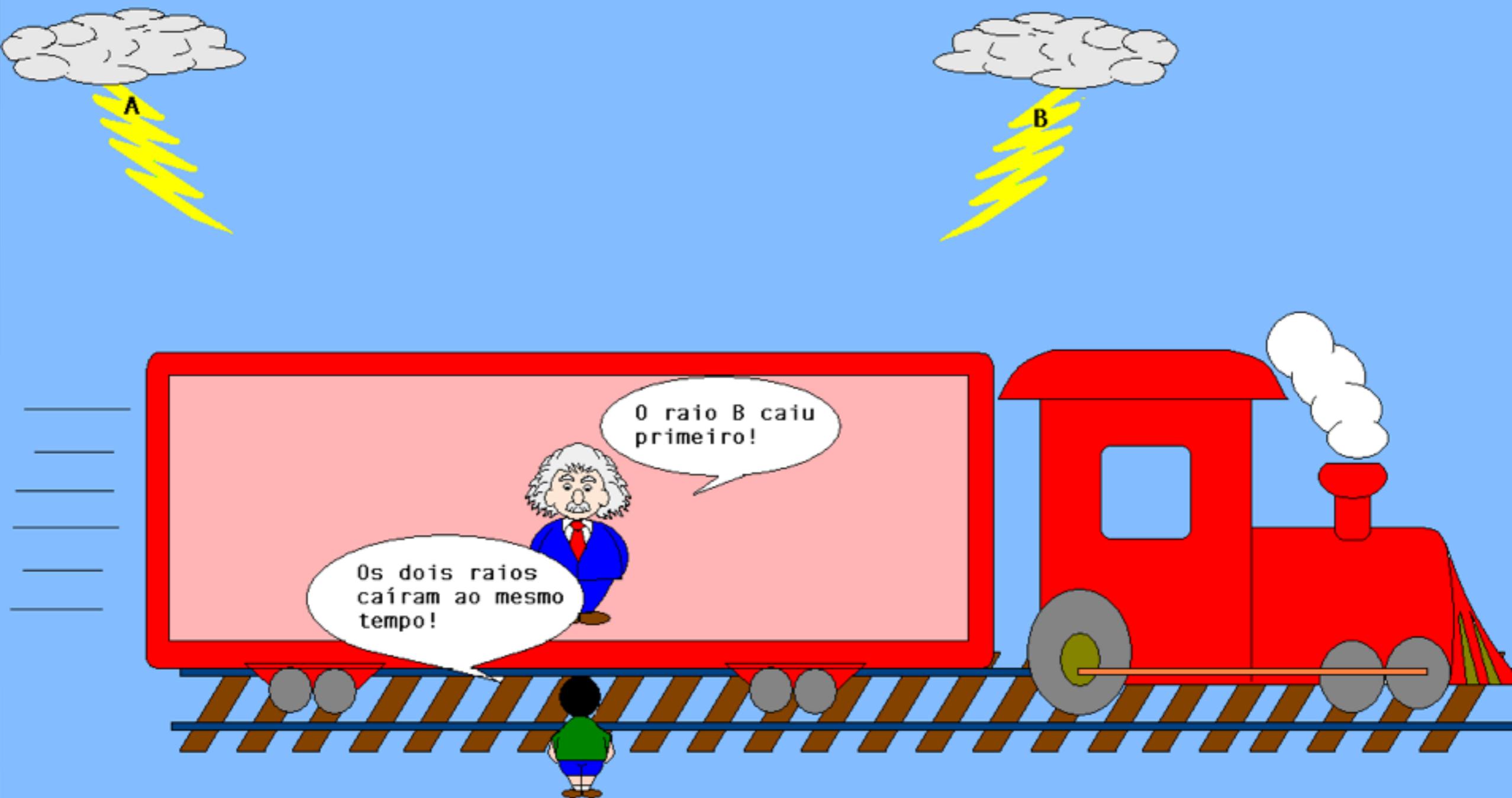
Princípio da Relatividade

Todos os referenciais inerciais são equivalentes.

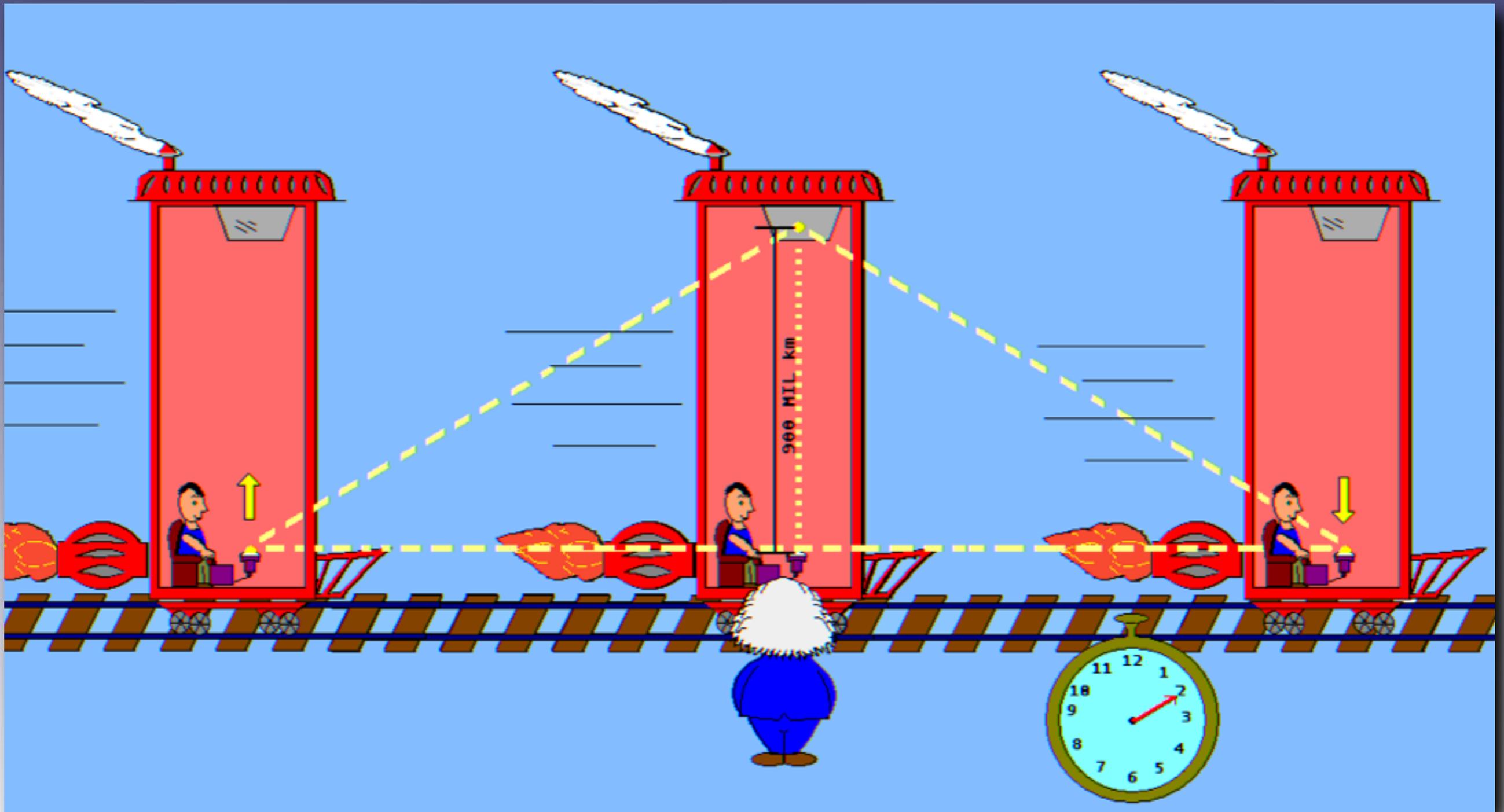
Princípio da invariância da velocidade da luz

A velocidade da luz no vácuo é uma constante da natureza, c . Independentemente da velocidade que a fonte emissora se mova, a velocidade da luz será sempre esta.

A questão da simultaneidade



A dilatação do tempo



A dilatação do tempo



No referencial do garoto dentro do trem

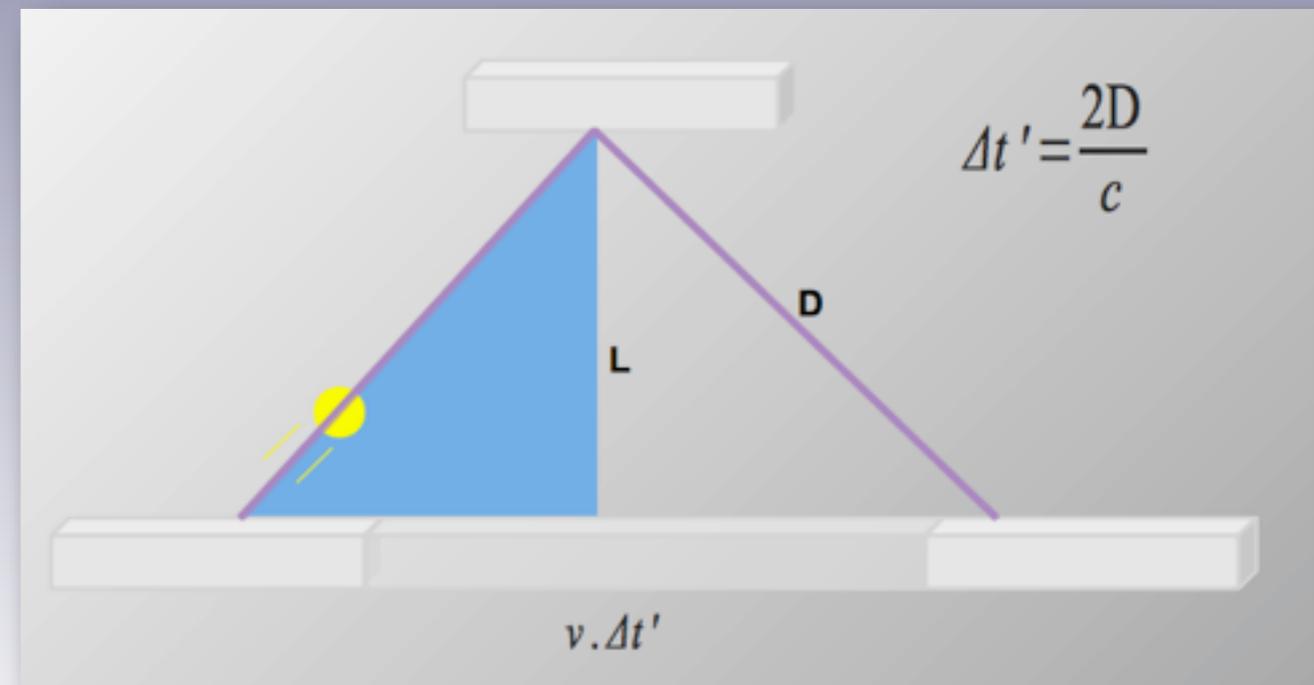
O tempo para a luz sair do espelho de baixo, atingir o espelho de cima, ser refletida e retornar ao espelho de baixo é:

$$\Delta t = \frac{2L}{c}$$

No referencial de um observador fora do trem

O tempo para a luz sair do espelho de baixo, atingir o espelho de cima, ser refletida e retornar ao espelho de baixo é:

$$\Delta t' = \frac{2D}{c}$$



A dilatação do tempo e a contração do espaço

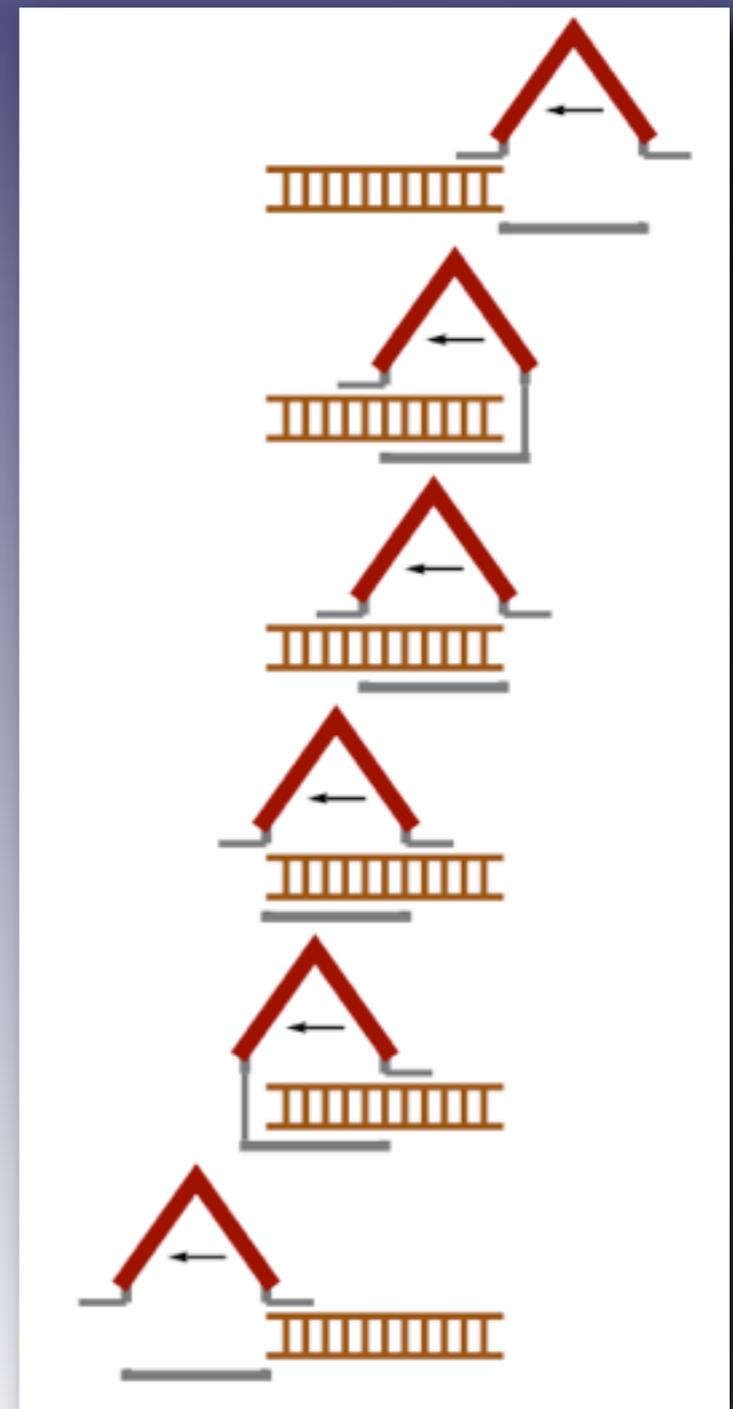
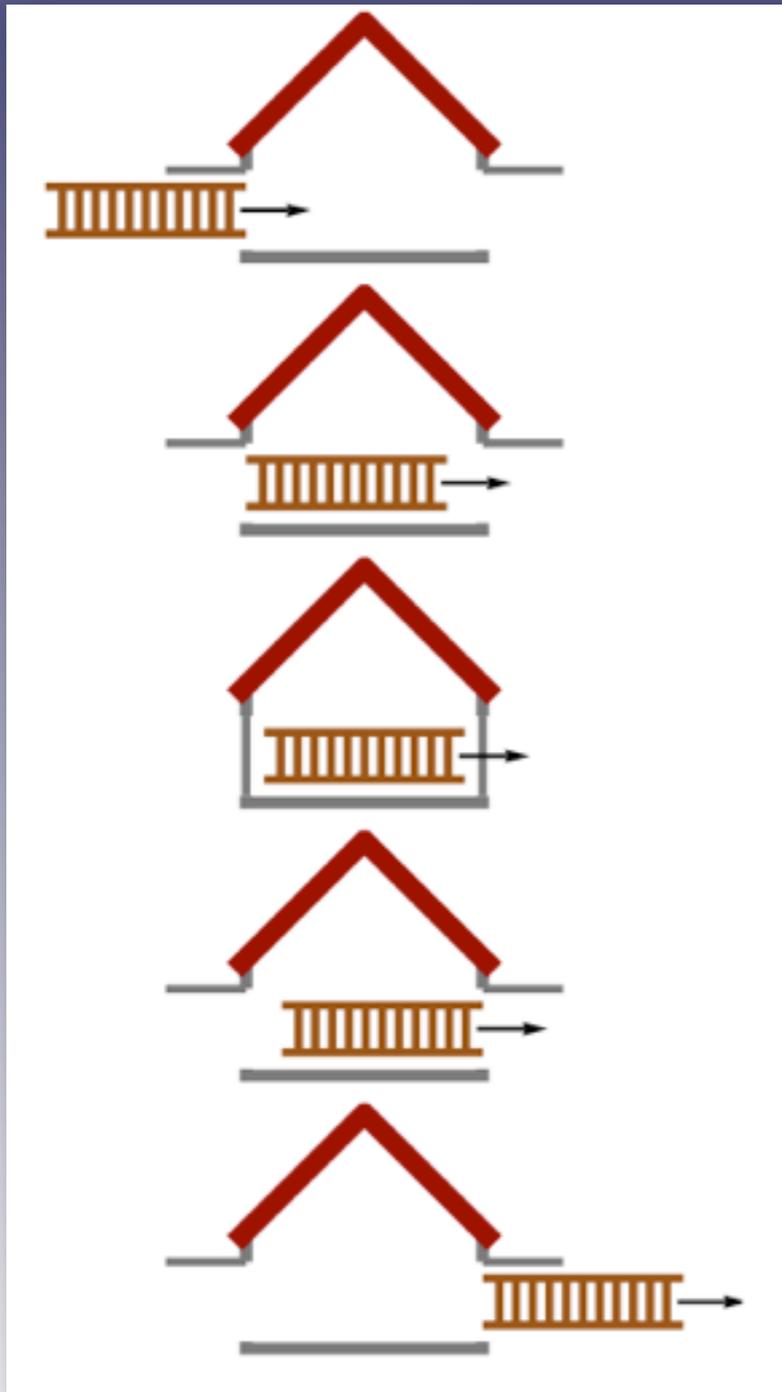
Abrindo as contas obtem-se a expressão para a dilatação do tempo:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

De maneira semelhante, pode-se obter a expressão para a contração das distâncias:

$$D = L\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Alguns paradoxos: O paradoxo da escada



Alguns paradoxos: O paradoxo dos gêmeos

Einstein's twins, 33 years old

Einstein was staying on earth while his twin was moving in space. After 39 years Einstein became 72 years old and then his twin returned suddenly. He could not recognize him.

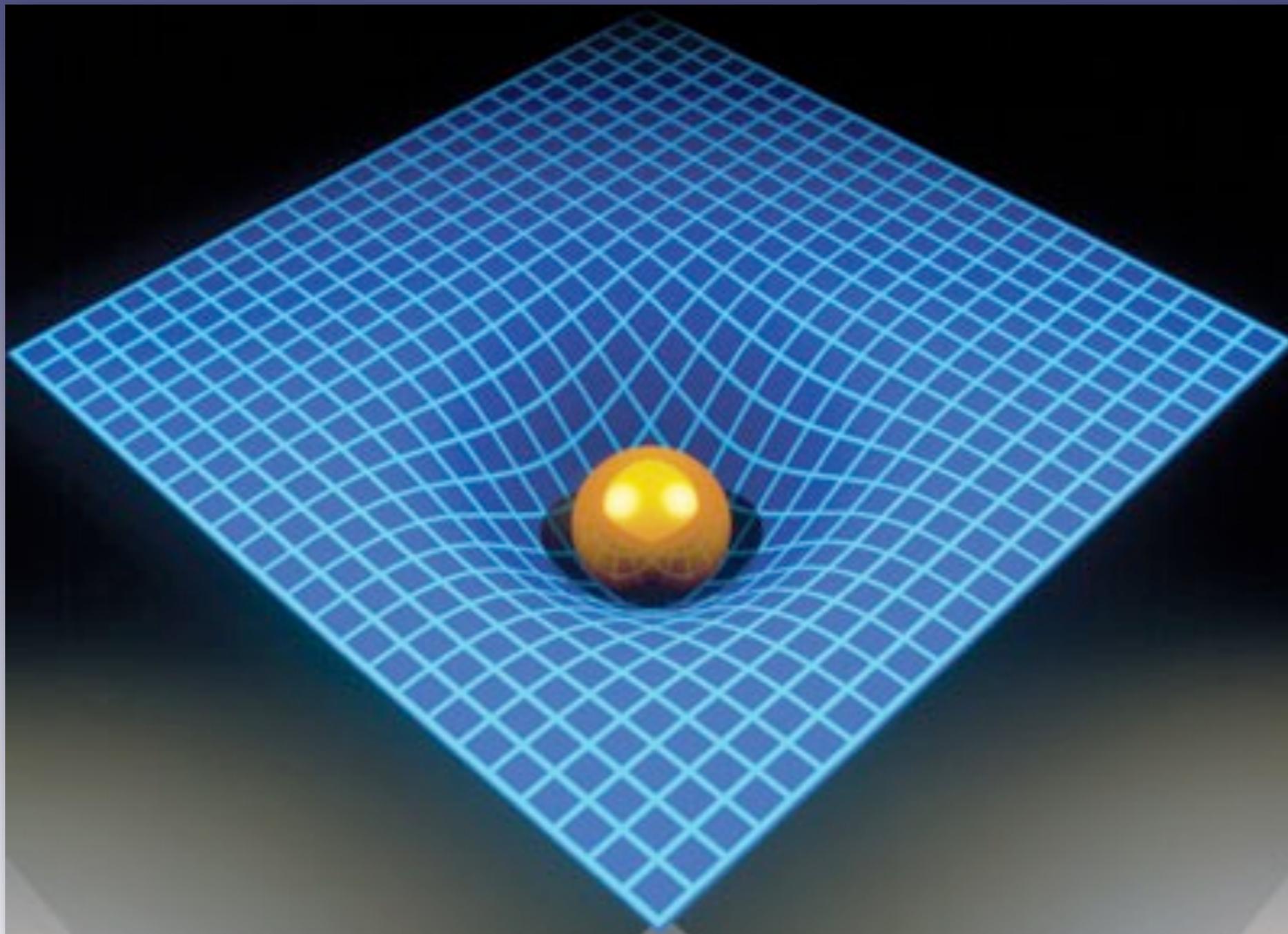
Einstein was moving in space at almost speed of light. When he came back to earth after 39 years, he remained almost the same, while his twin became old so he could not recognize him.

72 years old

33 years old

<http://www.travelingthroughspaceandtime.com/Twinparadox.html>

Teoria da Relatividade Geral



<http://topnews.net.nz/content/22691-study-confirms-galactic-level-applicability-einstein-s-theory>

Teoria da Relatividade Geral



<http://www.sciencedaily.com/releases/2009/02/090220172053.htm>