

Eletromagnetismo Clássico: um histórico

Paulo Freitas Gomes

Física 3
Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas
Universidade Federal de Goiás

paulofisicajatai@gmail.com

11 de Novembro de 2015

Conteúdo

1 Marcos históricos

2 Velocidade da luz

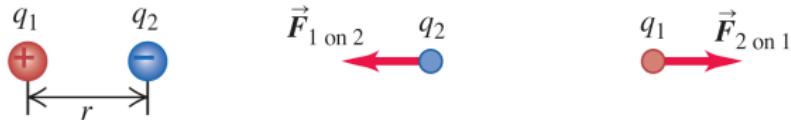
3 Relatividade Restrita

4 Relatividade Geral

1785 - Charles Augustin de Coulomb

Coulomb observa experimentalmente que a força elétrica entre duas cargas elétricas é proporcional ao produto de ambas e inversamente proporcional ao quadrado da distância.

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r}$$

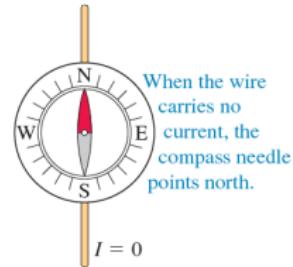


1820 - Hans Christian Ørsted

Ørsted observa pela primeira vez que uma corrente elétrica deflete uma bússola.

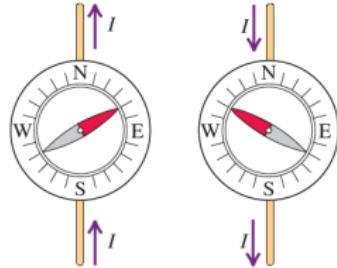


(a)



(b)

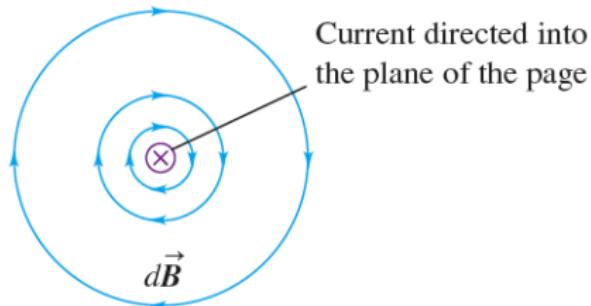
When the wire carries a current, the compass needle deflects. The direction of deflection depends on the direction of the current.



1820 - Biot e Savart

Jean Baptiste Biot e **Felix Savart** fazem vários experimentos e verificam que o campo magnético é sempre perpendicular a direção da corrente:

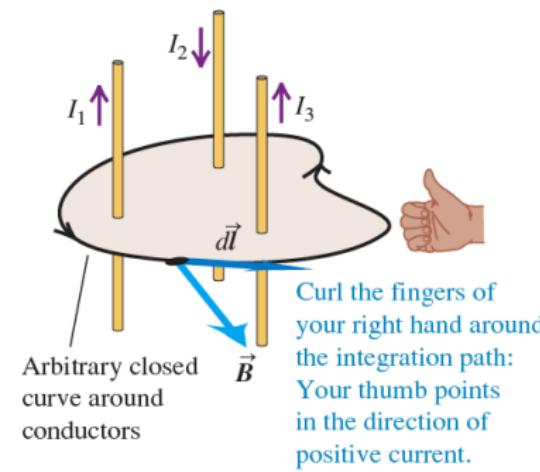
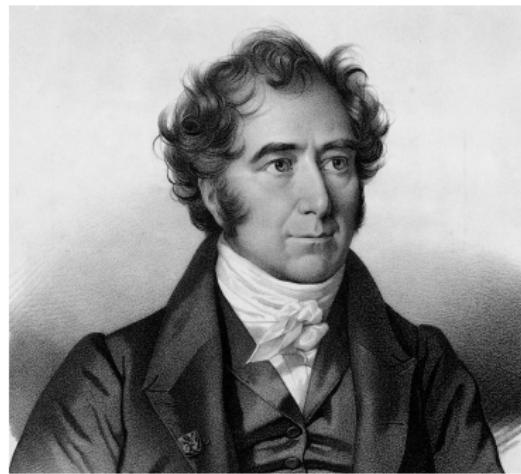
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_C \frac{d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$$



1826 - Andre Marie Ampere

Ampere também faz vários experimentos e encontra outra relação entre campo magnético e corrente elétrica:

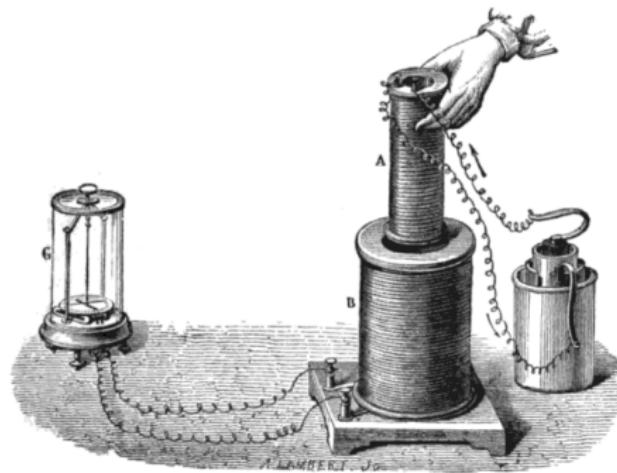
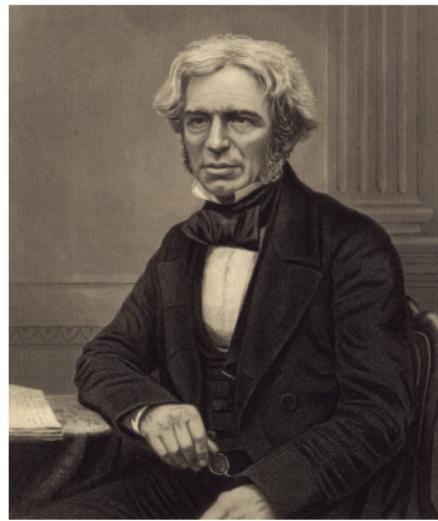
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$



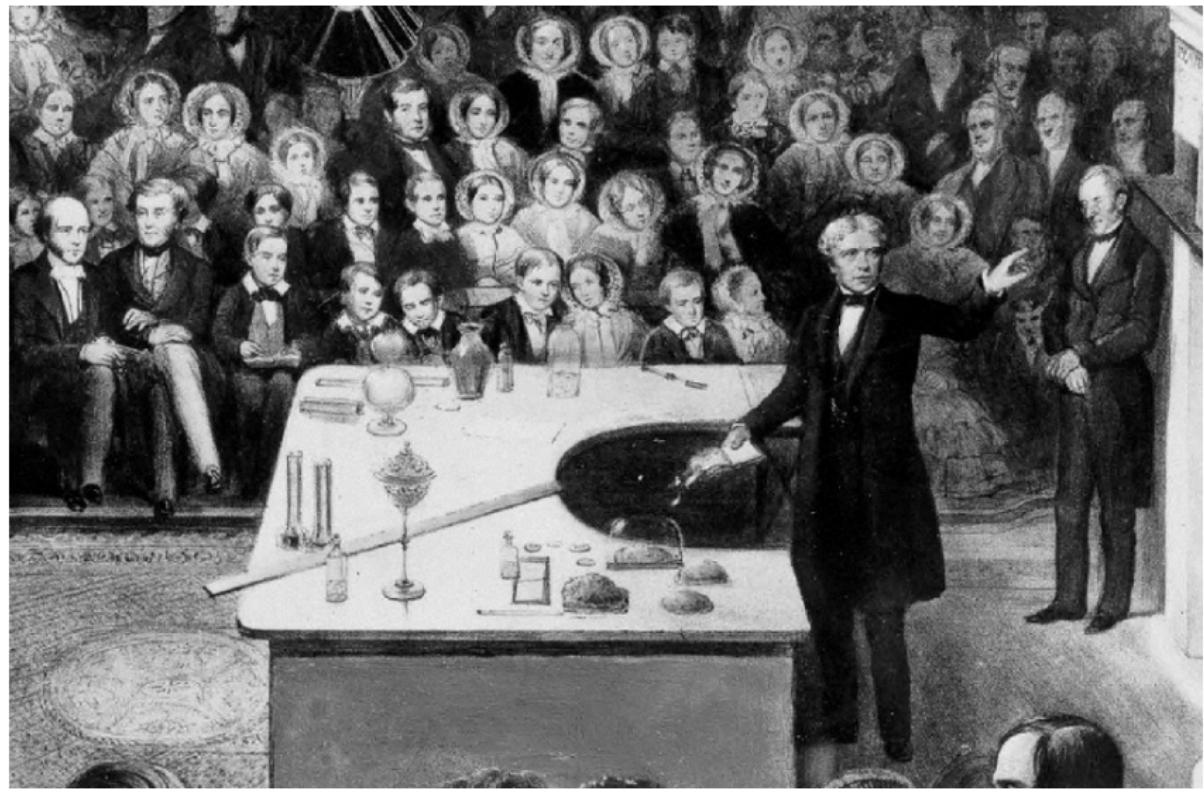
1831 - Michael Faraday

Faraday faz vários experimentos e observa que um magneto se movendo cria uma corrente elétrica em uma espira próxima.

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



1831 - Michael Faraday



1835 - Carl Friedrich Gauss



Carl Friedrich Gauss formula a lei que leva seu nome, relacionando campo elétrico e carga elétrica:

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

1862 - James Clark Maxwell



Maxwell publica seu trabalho relacionando as 4 equações básicas do electromagnetismo, que ficou conhecida como Equações de Maxwell.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

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

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

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Medidas da velocidade da luz

- **Leon Foucault** faz um dos primeiros experimentos para medir a velocidade da luz em 1862.
- **Henrich Hertz** também faz medidas da velocidade de ondas de rádio em 1888.

Medidas da velocidade da luz

- **Leon Foucault** faz um dos primeiros experimentos para medir a velocidade da luz em 1862.
- **Henrich Hertz** também faz medidas da velocidade de ondas de rádio em 1888.
- Ambos obtém exatamente o mesmo valor (dentro do erro experimental): $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} = (\mu_0 \varepsilon_0)^{-1/2}$.

Medidas da velocidade da luz

- **Leon Foucault** faz um dos primeiros experimentos para medir a velocidade da luz em 1862.
- **Henrich Hertz** também faz medidas da velocidade de ondas de rádio em 1888.
- Ambos obtém exatamente o mesmo valor (dentro do erro experimental): $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} = (\mu_0 \varepsilon_0)^{-1/2}$.
- Essas são as primeiras evidências de que luz e ondas de rádio são na verdade ondas eletromagnéticas.

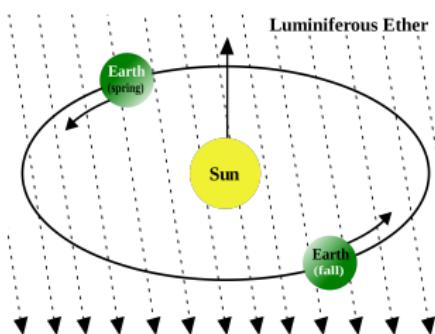
Mecânica vs. Eletromagnetismo



- Mas essa velocidade é em relação a que?
- Tem que haver um referencial, como na Mecânica Newtoniana (MN).
- Onde está o erro? Na MN ou no Eletromagnetismo de Maxwell?

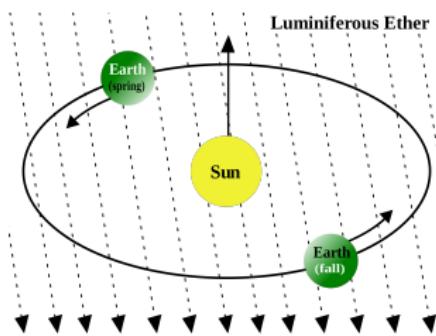
Mecânica vs. Eletromagnetismo

- Como a MN é intuitiva e a observamos no dia dia, o primeiro chute foi de que o erro estava no EM.
- Proposta: a velocidade da luz é c em relação ao éter, que é um fluido que permeia todo o universo.
- Como a Terra revoluciona em torno do sol a 30 km/s, o movimento em relação ao éter varia ao longo do ano.

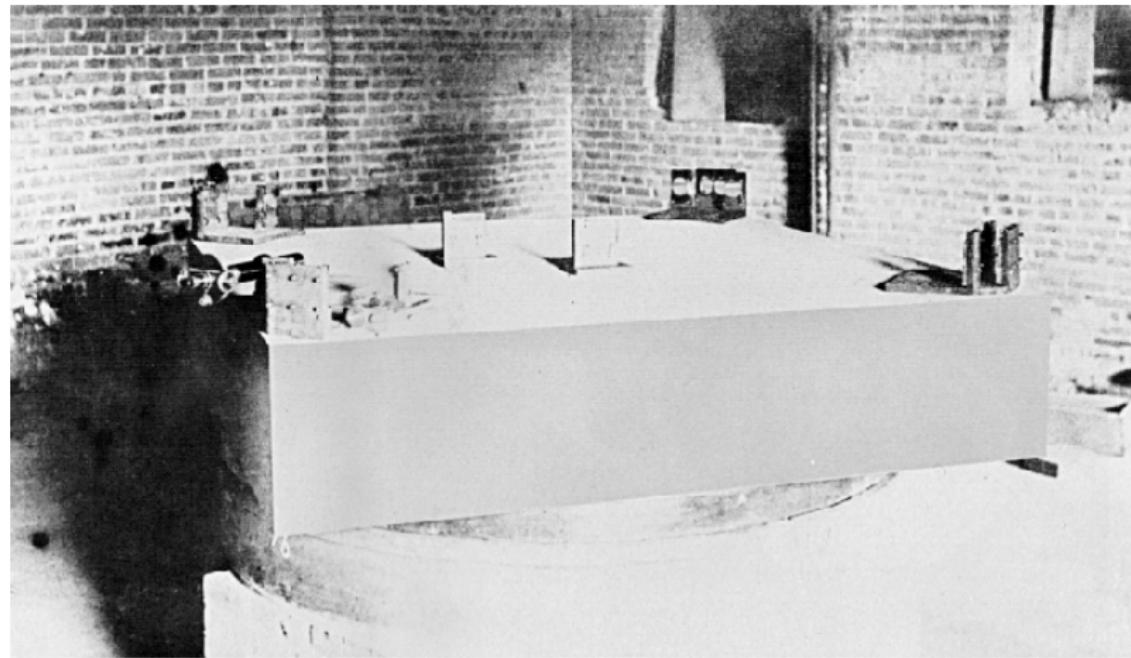


Mecânica vs. Eletromagnetismo

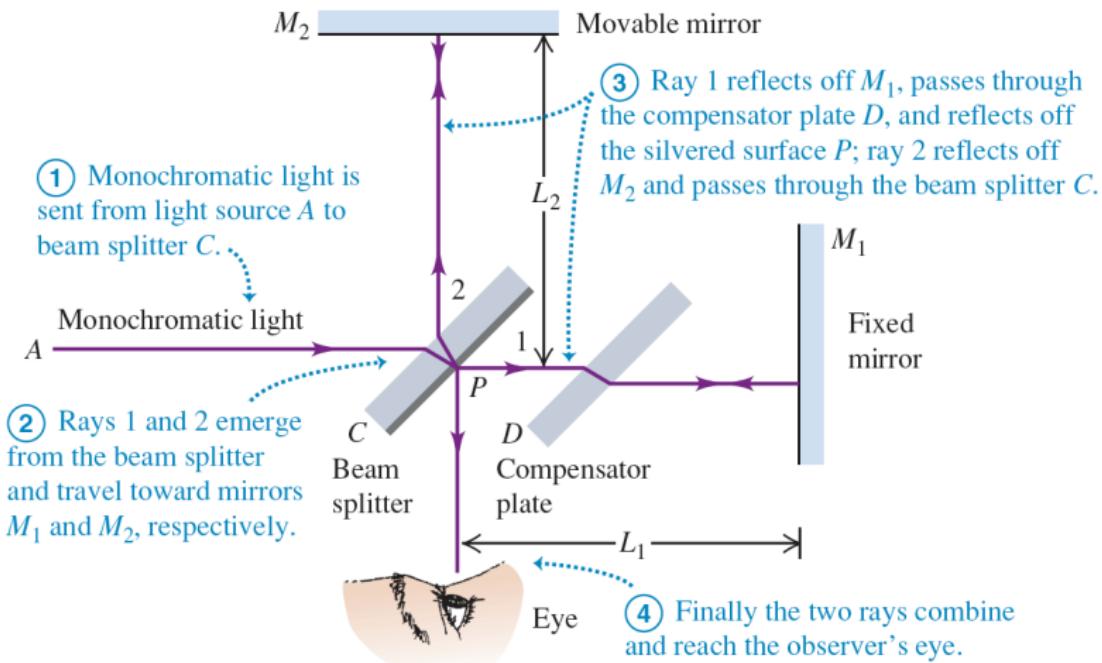
- Como a MN é intuitiva e a observamos no dia dia, o primeiro chute foi de que o erro estava no EM.
- Proposta: a velocidade da luz é c em relação ao éter, que é um fluido que permeia todo o universo.
- Como a Terra revoluciona em torno do sol a 30 km/s, o movimento em relação ao éter varia ao longo do ano.
- Se medir a velocidade da luz ao longo de um ano poderá ser observado variações.



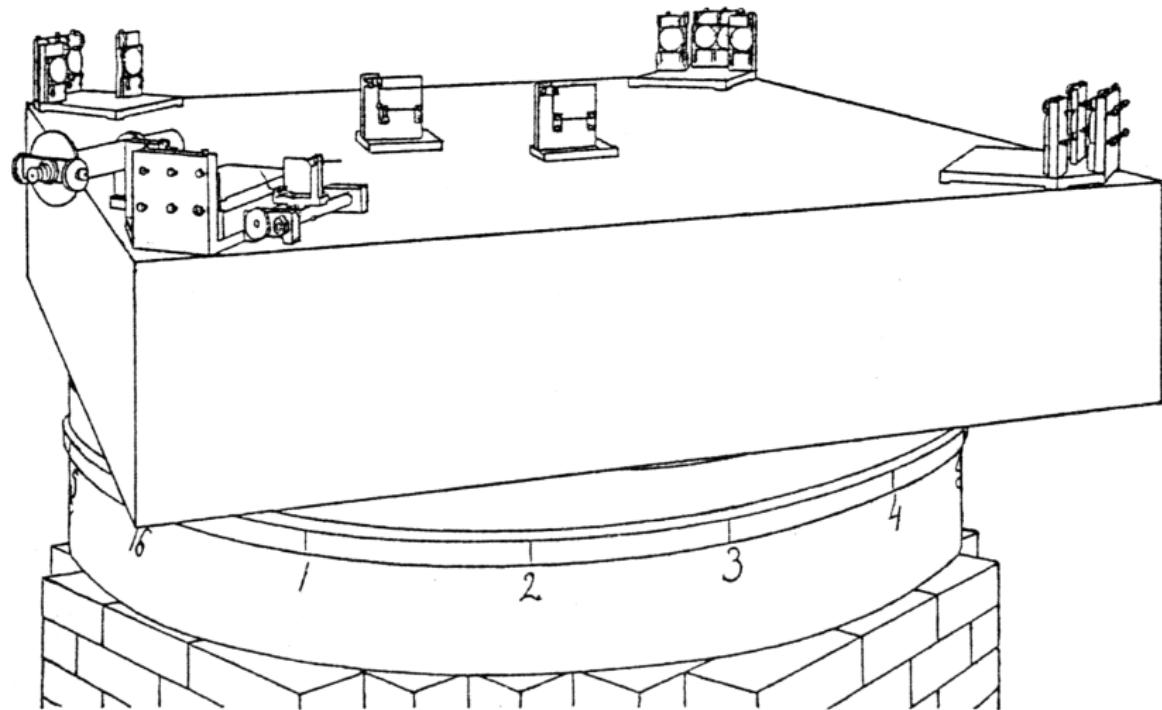
Experimento de Michelson e Morley



Experimento de Michelson e Morley



1887: Experimento de Michelson e Morley



1887: Experimento de Michelson e Morley

- Albert Michelson e Edward Morley fizeram medidas da velocidade usando um interferômetro durante vários anos, usando uma luz com $\lambda = 600 \text{ nm}$.
- Eles esperavam ver deslocamento da franja de máxima interferência devido a variações na velocidade medida.
- Em 1881, eles esperavam ver um deslocamento 0.4λ .

1887: Experimento de Michelson e Morley

- Albert Michelson e Edward Morley fizeram medidas da velocidade usando um interferômetro durante vários anos, usando uma luz com $\lambda = 600 \text{ nm}$.
- Eles esperavam ver deslocamento da franja de máxima interferência devido a variações na velocidade medida.
- Em 1881, eles esperavam ver um deslocamento 0.4λ .
- Porém, não observaram rigorosamente nenhuma variação.

1887: Experimento de Michelson e Morley

- Albert Michelson e Edward Morley fizeram medidas da velocidade usando um interferômetro durante vários anos, usando uma luz com $\lambda = 600 \text{ nm}$.
- Eles esperavam ver deslocamento da franja de máxima interferência devido a variações na velocidade medida.
- Em 1881, eles esperavam ver um deslocamento 0.4λ .
- Porém, não observaram rigorosamente nenhuma variação.
- Em 1887, eles repetiram o experimento com uma precisão maior, esperando um deslocamento de 0.4λ .

1887: Experimento de Michelson e Morley

- Albert Michelson e Edward Morley fizeram medidas da velocidade usando um interferômetro durante vários anos, usando uma luz com $\lambda = 600 \text{ nm}$.
- Eles esperavam ver deslocamento da franja de máxima interferência devido a variações na velocidade medida.
- Em 1881, eles esperavam ver um deslocamento 0.4λ .
- Porém, não observaram rigorosamente nenhuma variação.
- Em 1887, eles repetiram o experimento com uma precisão maior, esperando um deslocamento de 0.4λ .
- Porém, não observaram rigorosamente nenhuma variação, de novo!

1887: Experimento de Michelson e Morley

- O que estava acontecendo? EM estava certo? MN estava errado?
- Na época, todos acreditavam que algo errado havia sido feito no experimento, e que a variação desejada deveria ser observada.
- Por cerca de 50 anos, este experimento foi exaustivamente repetido, e sempre nenhum deslocamento das franjas foi observado.
- Este foi o experimento que não deu certo mais bem sucedido da história da física.

Teoria da Relatividade Restrita

Albert Einstein propõe sua Teoria da Relatividade Restrita que se baseia em dois postulados:

Teoria da Relatividade Restrita

Albert Einstein propõe sua Teoria da Relatividade Restrita que se baseia em dois postulados:

Postulado 1

A física é a mesma em qualquer referencial inercial.

Teoria da Relatividade Restrita

Albert Einstein propõe sua Teoria da Relatividade Restrita que se baseia em dois postulados:

Postulado 1

A física é a mesma em qualquer referencial inercial.

Postulado 2

A velocidade da luz é igual a $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ em todos os referenciais inerciais.

Teoria da Relatividade Restrita

- Veja que o segundo postulado concorda com o EM e está em conflito com a MN.
- Por exemplo, as transformações de velocidade de Lorentz substituem as transformações de Galileu.
- Isso é uma decorrência direta do segundo postulado.

Teoria da Relatividade Restrita

Previsão 1

Matéria e energia podem ser uma convertida na outra: $E = mc^2$.

Teoria da Relatividade Restrita

Previsão 1

Matéria e energia podem ser uma convertida na outra: $E = mc^2$.

Previsão 2

O tempo passa mais devagar para um corpo quando este está em movimento (Dilatação do Tempo).

Teoria da Relatividade Restrita

Previsão 1

Matéria e energia podem ser uma convertida na outra: $E = mc^2$.

Previsão 2

O tempo passa mais devagar para um corpo quando este está em movimento (Dilatação do Tempo).

Previsão 3

O espaço de um corpo se contrai na direção de movimento desse corpo (Contração Espacial).

Teoria da Relatividade Restrita

Previsão 1

Matéria e energia podem ser uma convertida na outra: $E = mc^2$.

Previsão 2

O tempo passa mais devagar para um corpo quando este está em movimento (Dilatação do Tempo).

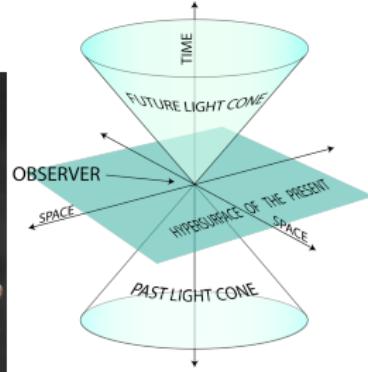
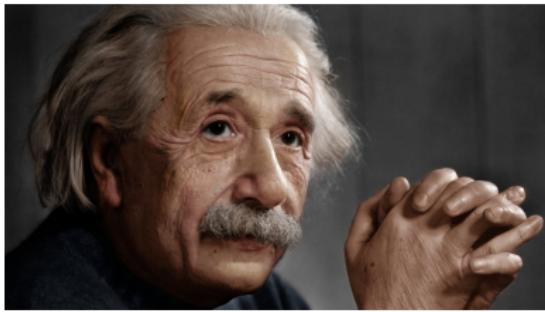
Previsão 3

O espaço de um corpo se contrai na direção de movimento desse corpo (Contração Espacial).

Todas essas previsões foram observadas experimentalmente!!!

Teoria da Relatividade Restrita

- A previsão 1: reações nucleares liberam muito mais energia que reações químicas em geral.
- Impacto: usinas nucleares e bombas atômicas.
- A previsão 2 permite a viagem no tempo para o passado.
- A Relatividade Restrita (1905) está em perfeito acordo com o Eletromagnetismo de Maxwell (1862).



Teoria da Relatividade Geral

- Depois de 1905, Einstein ainda ficou com algumas dúvidas.
- Suponha que o sol desapareça subitamente ao meio dia. Lembre-se que a luz demora chega de 8 minutos para chegar na Terra.

- Depois de 1905, Einstein ainda ficou com algumas dúvidas.
- Suponha que o sol desapareça subitamente ao meio dia. Lembre-se que a luz demora chega de 8 minutos para chegar na Terra.

Pergunta:

Quanto tempo vai levar para a Terra deixar de sentir a força gravitacional do sol?

Teoria da Relatividade Geral

- Querendo responder essa pergunta, Einstein criou a Teoria da Relatividade Geral.
- Newton acreditava que a força da gravidade se transmite com velocidade infinita, ou instantaneamente.
- Einstein criou então o conceito de espaço tempo de 4 dimensões.
- O campo gravitacional consiste em distorções nesse espaço-tempo.

Teoria da Relatividade Geral

- Einstein então chegou em um valor para a transmissão da força gravitacional ao longo desse espaço tempo.

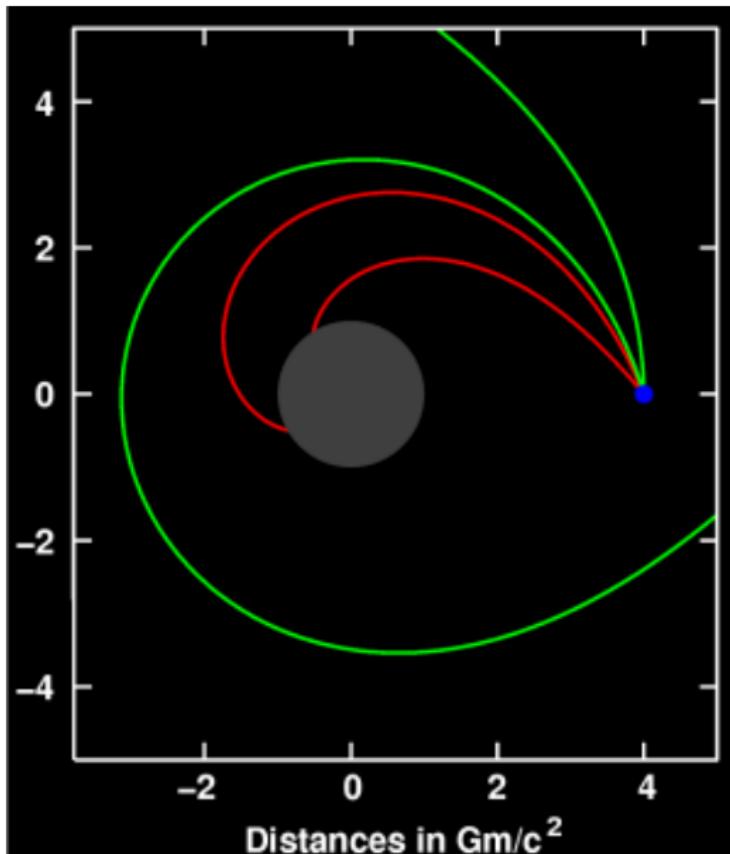
Teoria da Relatividade Geral

- Einstein então chegou em um valor para a transmissão da força gravitacional ao longo desse espaço tempo.
- Valor obtido: $v = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$.

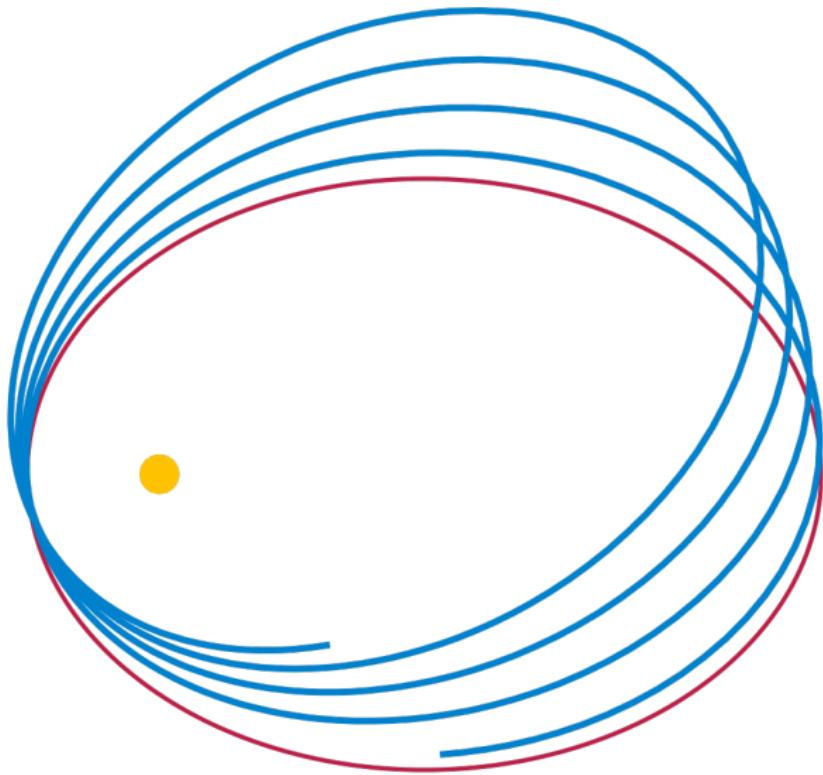
Teoria da Relatividade Geral

- Einstein então chegou em um valor para a transmissão da força gravitacional ao longo desse espaço tempo.
- Valor obtido: $v = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$.
- Exatamente a velocidade da luz obtida por Maxwell.
- Isso mostra o impacto do Eletromagnetismo.

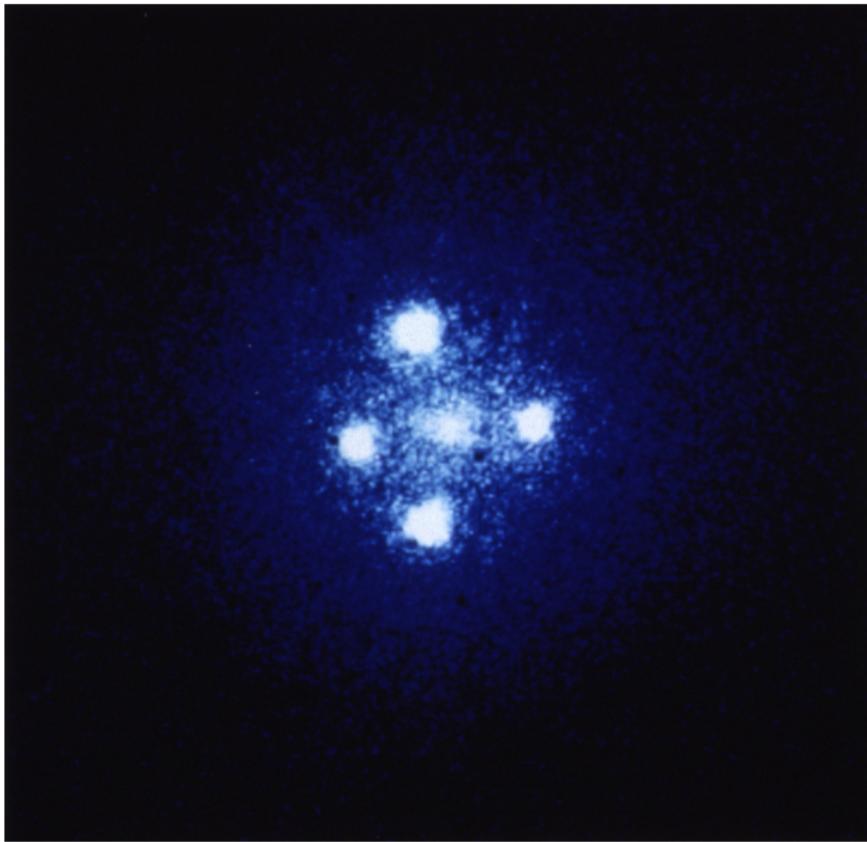
Teoria da Relatividade Geral



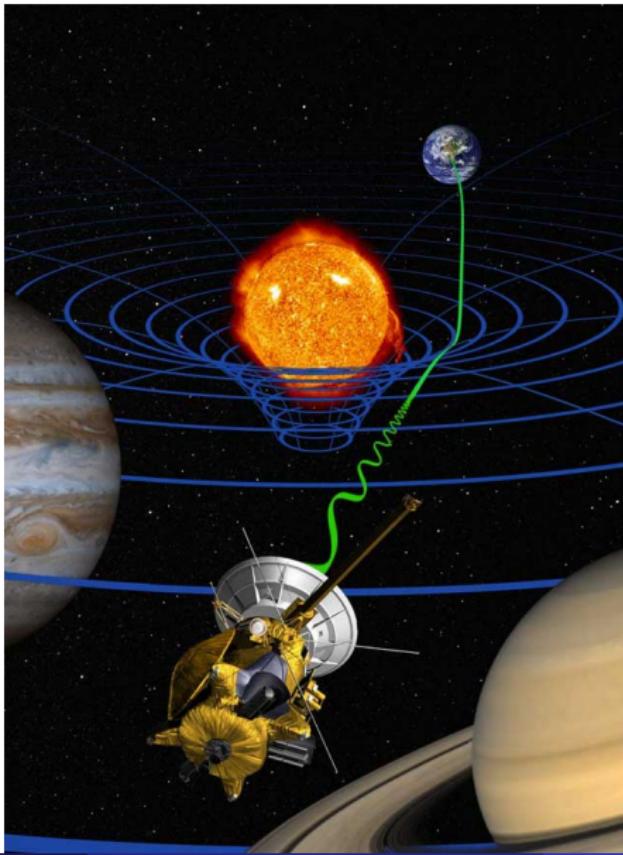
Teoria da Relatividade Geral



Teoria da Relatividade Geral



Teoria da Relatividade Geral



Chega por hoje né?