

# Os Antecedentes Conceituais da Relatividade

{ Relatividade - Prof. Ivã Gurgel

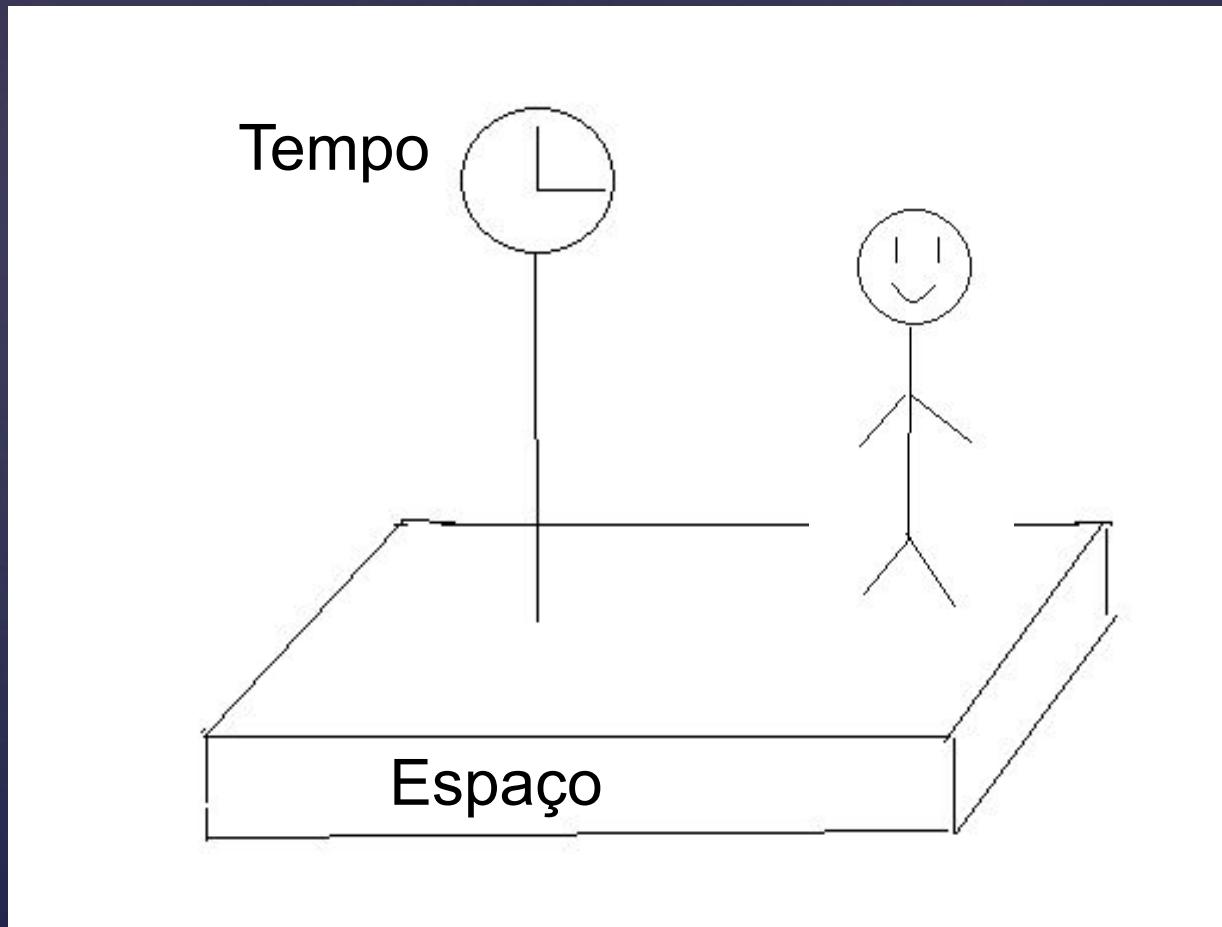
O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e por sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com nada externo, e isso se chama duração. O tempo relativo, aparente e comum é uma medida sensível e externa (seja precisa, seja desigual) da duração por meio do movimento, o qual é comumente utilizado em lugar do tempo verdadeiro, assim como uma hora, um dia, um mês, um ano [Isaac Newton, Principia Mathematica (1687)]

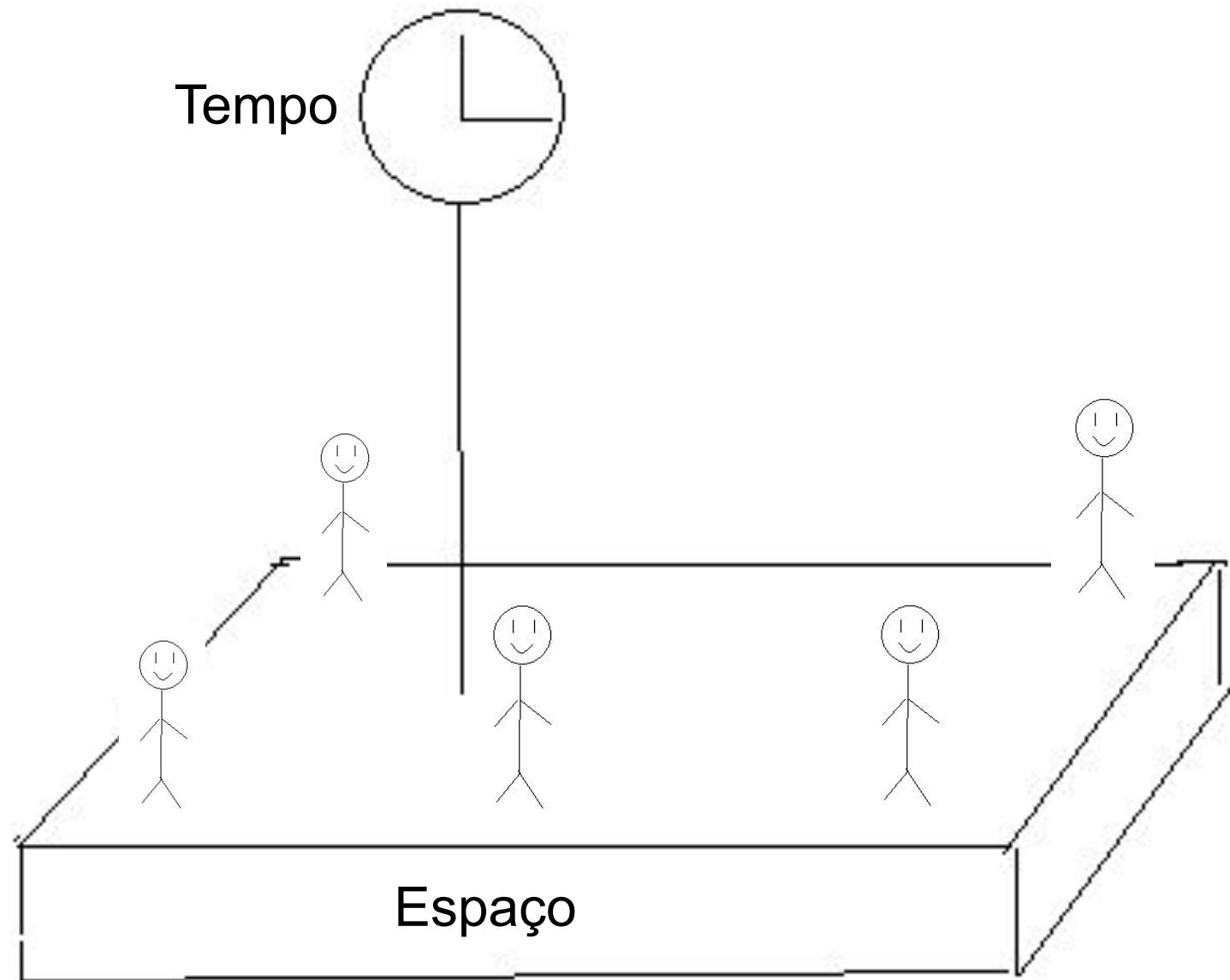
## A Visão de Mundo Newtoniana

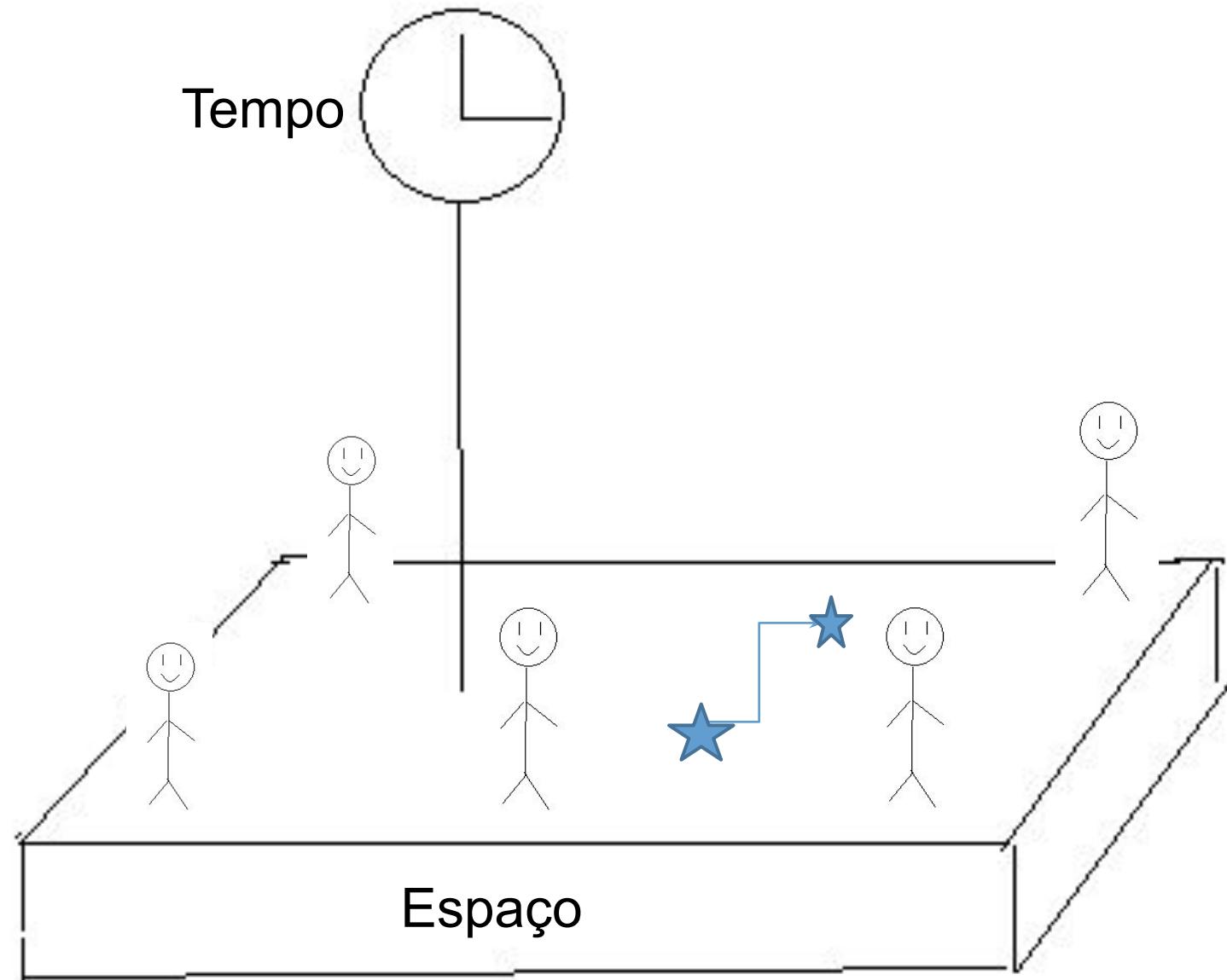
O **espaço absoluto**, em sua própria natureza, sem relação com nada externo, permanece sempre similar e imóvel. Os espaços absoluto e relativo são iguais em forma e magnitude, mas eles não se mantêm sempre numericamente iguais. [Isaac Newton, Principia Mathematica (1687)]

## A Visão de Mundo Newtoniana

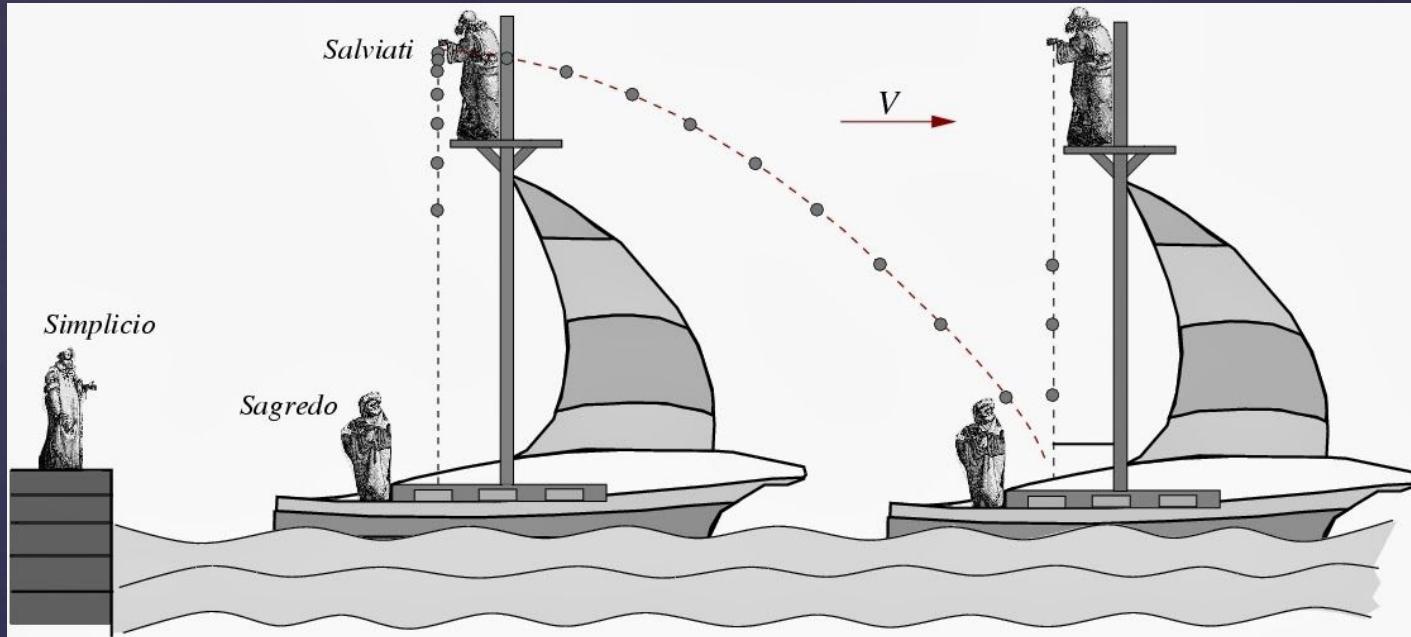
# Imagen de Mundo na Física Newtoniana (Versão Fofinha)



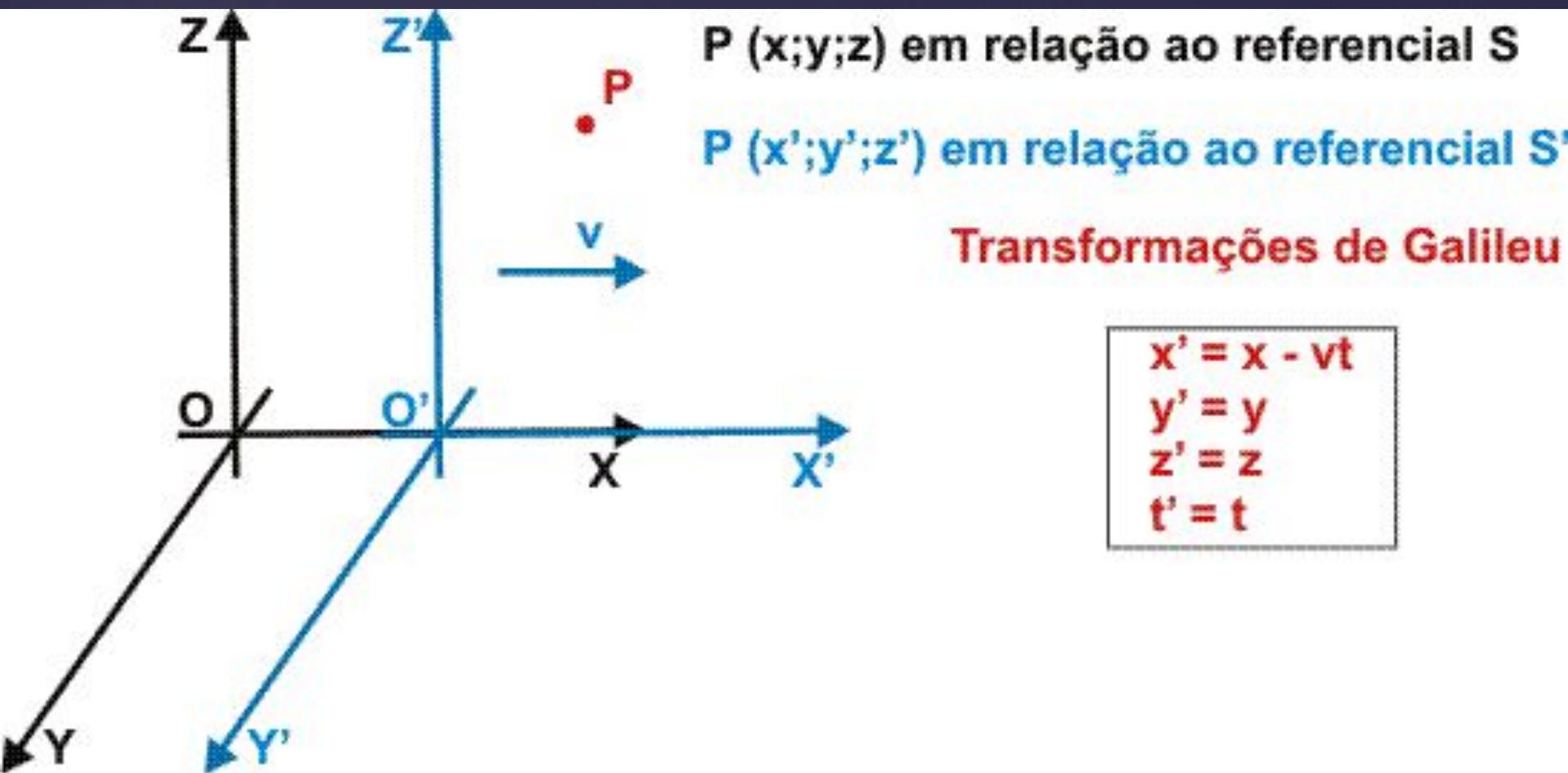




- As leis da mecânica são as mesmas para os mesmos referenciais inerciais



Princípio de Relatividade de Galileu



# Transformações de Galileu

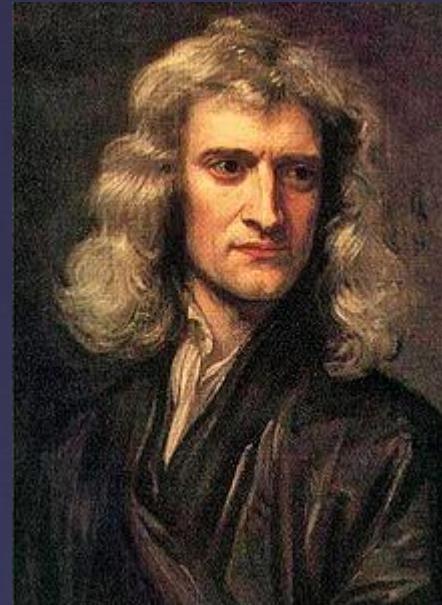
# Além do Espaço e do Tempo....

- Os conceitos de espaço e tempo newtonianos se tornam a base da Física nos séculos XVIII e XIX;
- Contudo, outras temas continuam em grande debate, em especial a natureza da luz...

□ Newton

X

□ Huygens

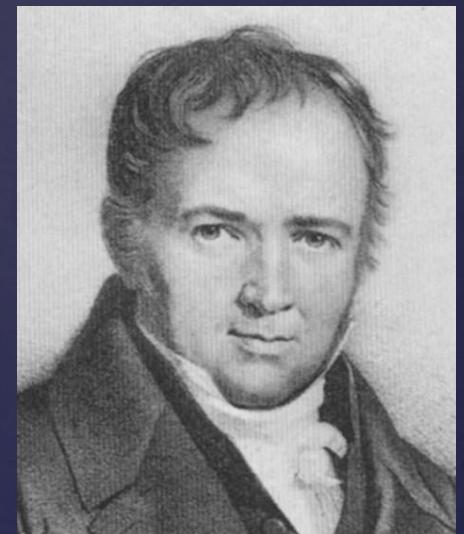
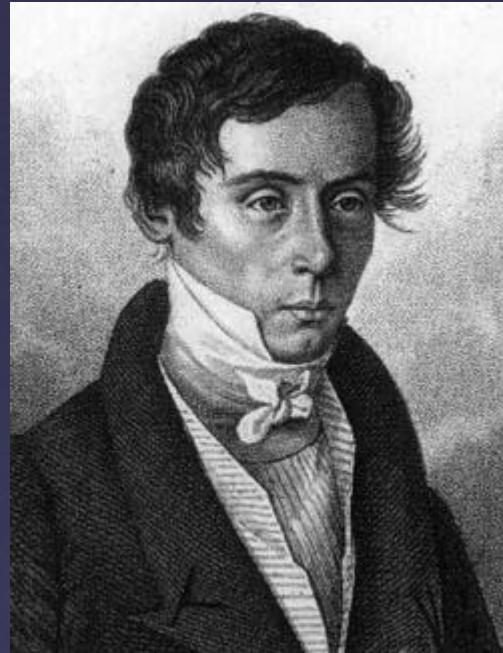


# Breve História da Luz

□ Fresnel

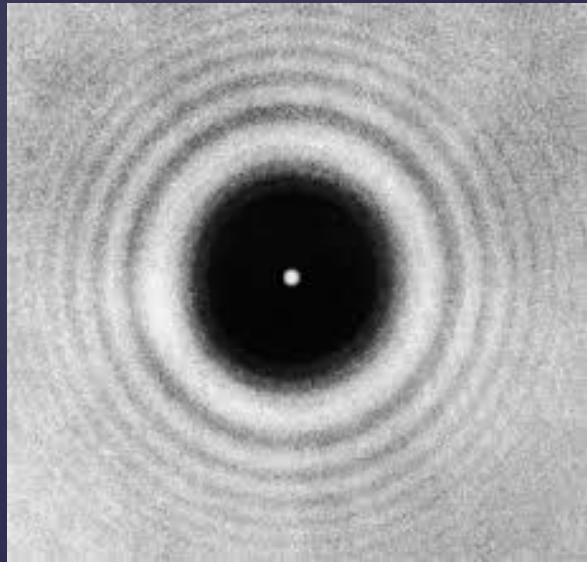
X

□ Poisson



# Breve História da Luz

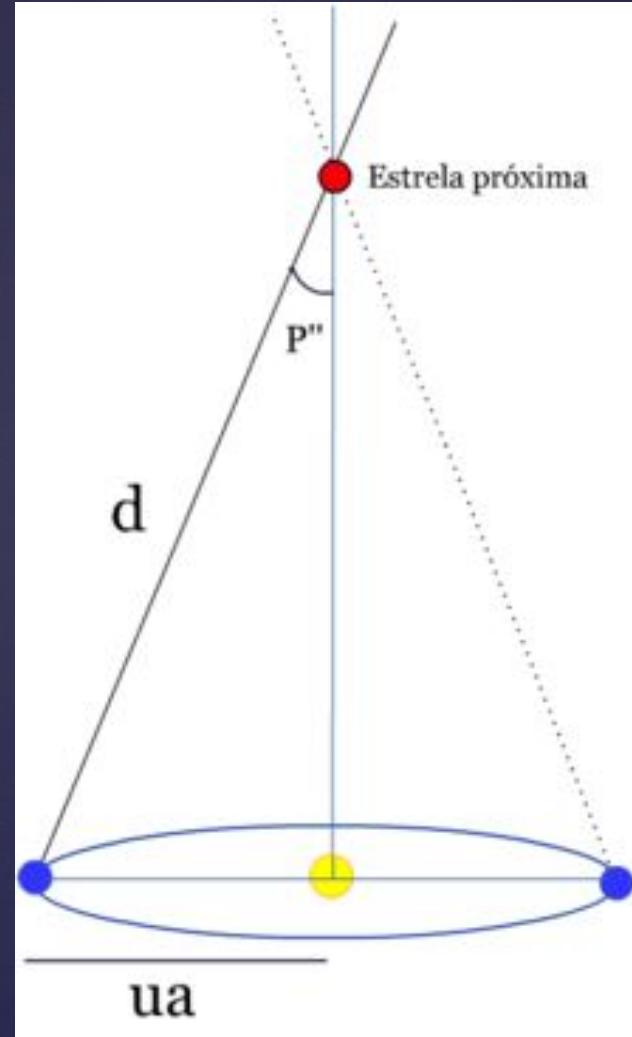
- Da dá!!!
- Mas este resultado envolve aceitar o éter luminífero!



- Contudo, outros fenômenos que envolvem a luz continuam em debate...
- ... gerando problemas astronômicos...

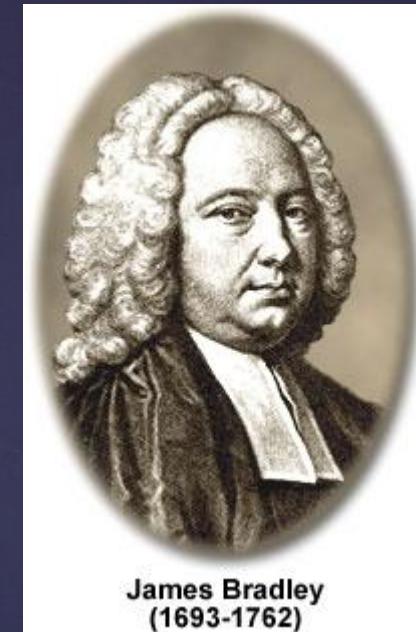
# Problemas Astronômicos

## □ Paralaxe



# Problemas Astronômicos

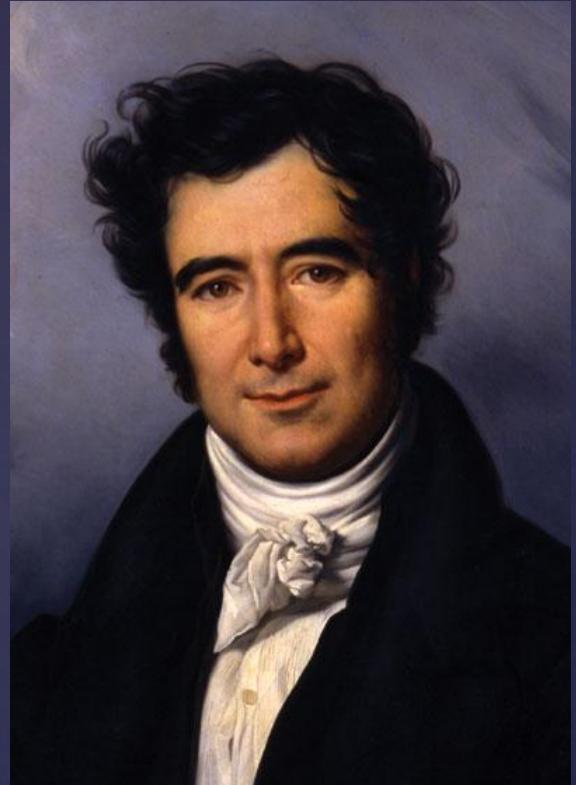
- Aberração, medida por James Bradley (1728)



- Young afirma em 1804:
- “Considerando-se o fenômeno da aberração das estrelas, eu estou pronto a acreditar que o éter luminoso penetra a substância de todo corpo material com pouca ou nenhuma resistência, talvez tão livre quanto o vento passe através de um bosque de árvores”.

# Problemas Astronômicos

- Em 1810 Arago realiza experimentos para verificar a relação do ângulo de refração com a velocidade da luz, mas obtém resultado nulo.



# Problemas Astronômicos

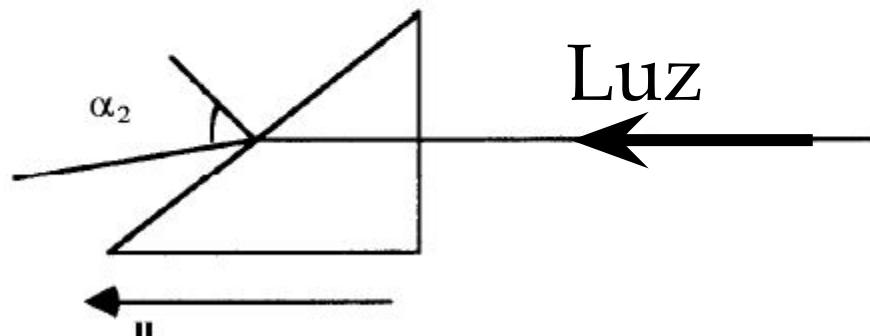
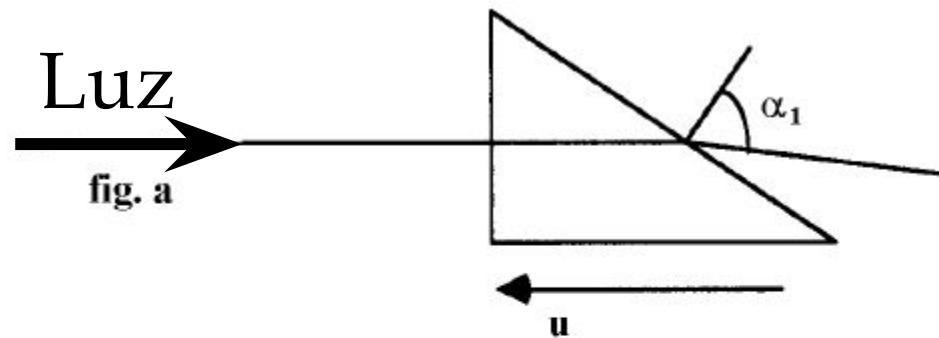
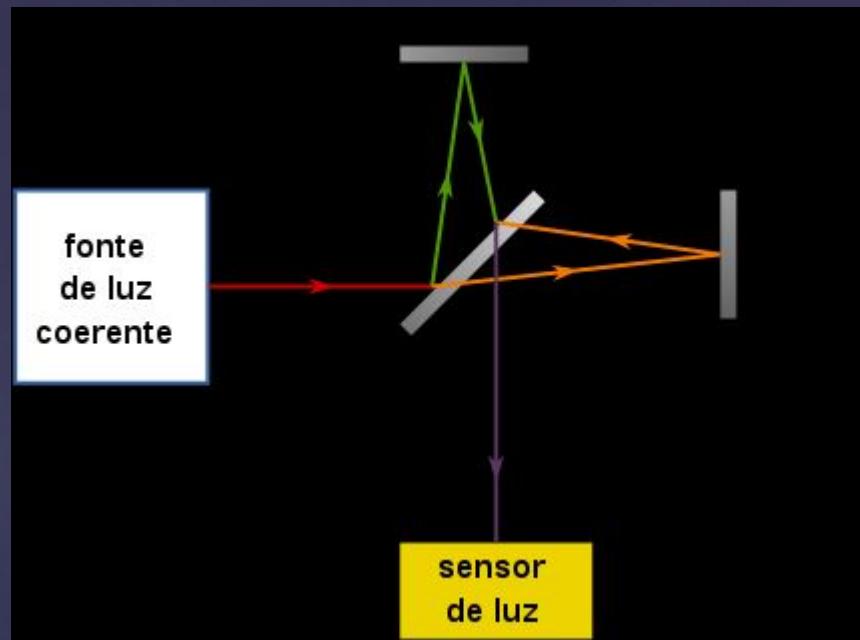


fig. b

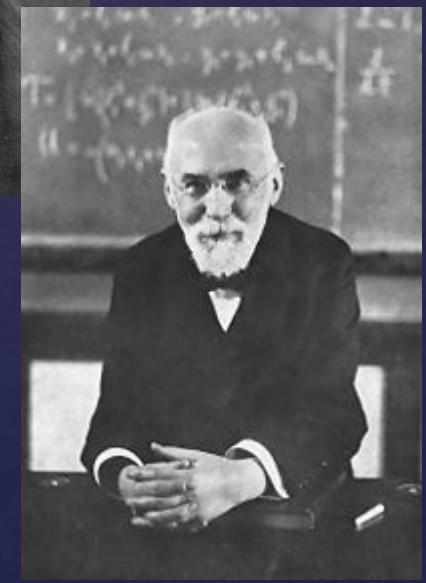
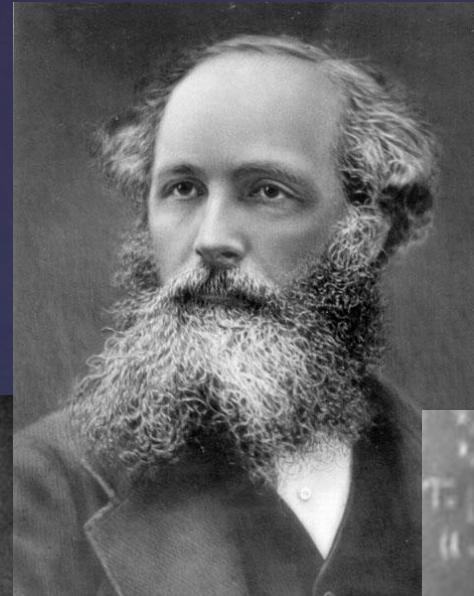
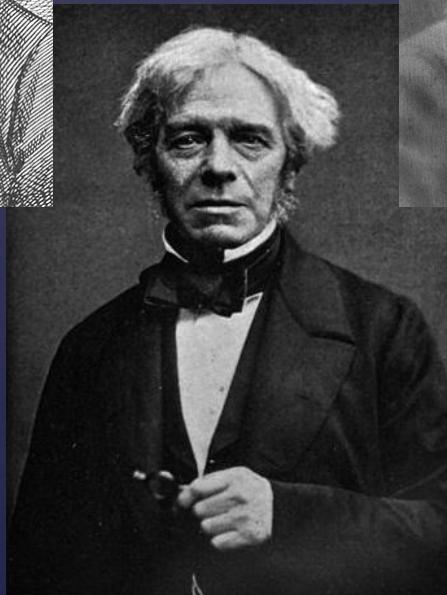
# Outras experiências de resultado nulo...

- Fizeau (1851)
- Michelson (1881)
- Michelson e Morley (1887)

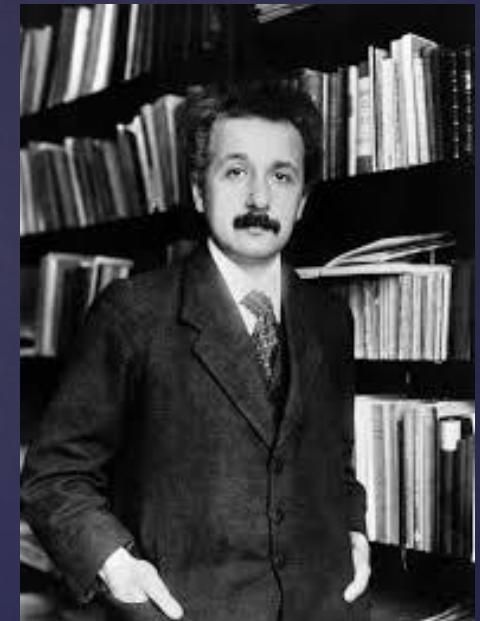


# Michelson e Morley (1887)

# Os Antecedentes de Einstein: O Eletromagnetismo.

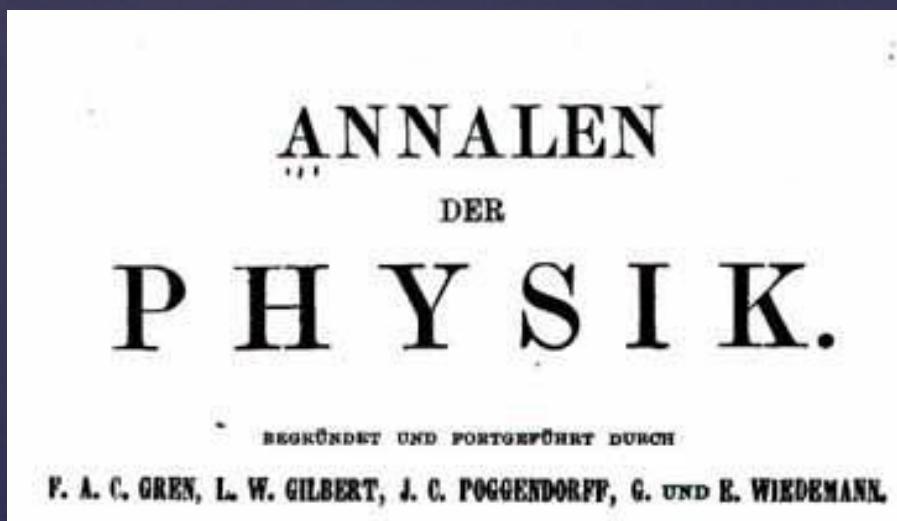


- E o que Einstein achava disso tudo?
- A resposta disto está em seus trabalhos de 1905.



# A Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento

# *Annalen der Physik*, 1905, 17



*Zur Elektrodynamik bewegter Körper,  
von A. Einstein.*

Die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe g aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänom enzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle oder der andere dieser Körper der bewegte sei, s ichtbar zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein magnetisches Feld von gewissem Energiewerte, welchen, wo sich Teile des Leiters befinden, einen S

Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld gegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welche keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Körpern gesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Richtung und derselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Es spielt ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Vers

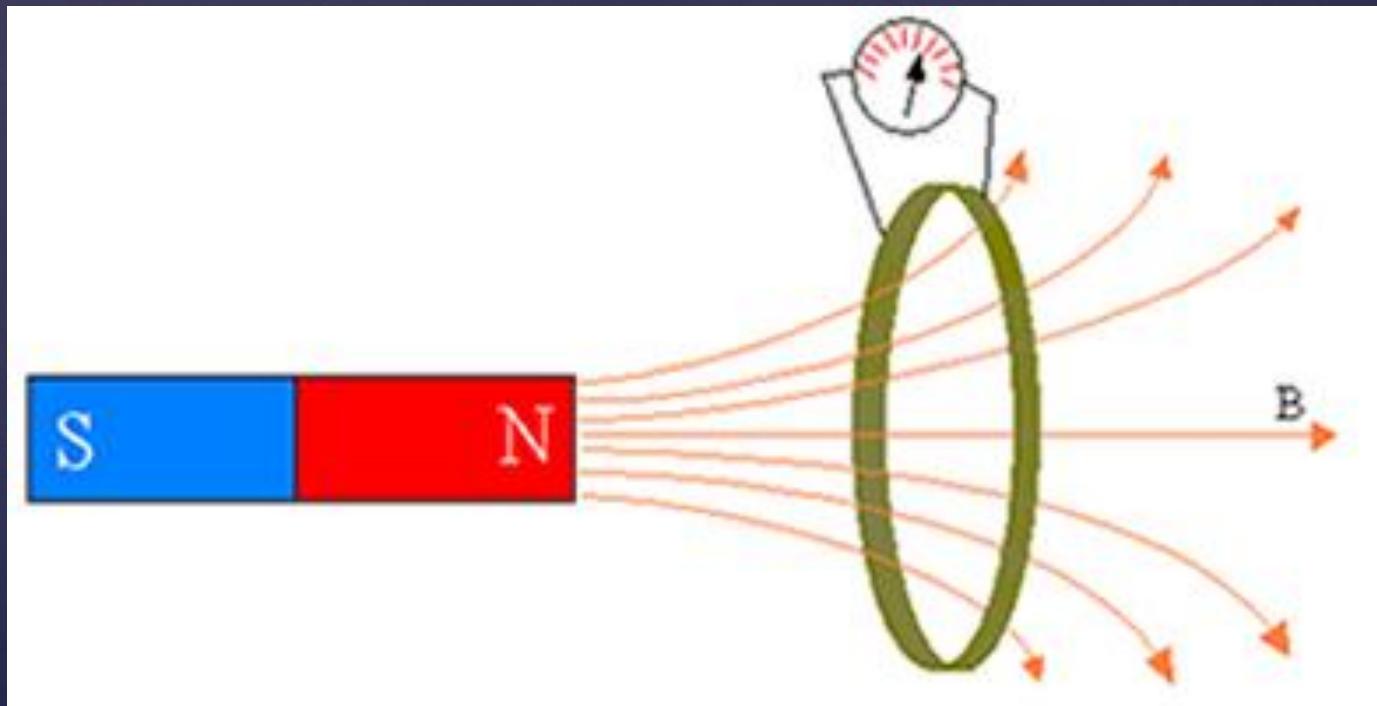
“Como é bem conhecido, a eletrodinâmica de Maxwell – tal como usualmente entendida no momento -, quando aplicada a corpos em movimento, produz assimetrias que não parecem ser inerentes ao fenômeno. Considere-se, por exemplo, a interação eletrodinâmica entre um imã e um condutor. O fenômeno observável, aqui, depende apenas do movimento relativo entre o condutor e o imã, ao passo que o ponto de vista usual faz um distinção clara entre os dois casos, nos quais um ou outro dos dois corpos está em movimento (...)

(...) Pois se o imã está em movimento e o condutor está em repouso, surge, nas vizinhanças do imã, um campo elétrico com um valor definido de energia que produz uma corrente onde quer que estejam localizadas partes do condutor. Se o imã, contudo estiver em repouso, enquanto o condutor se move, não surge qualquer campo elétrico na vizinhança do imã, mas, sim, uma força eletromotriz no condutor, que não corresponde a nenhuma energia per se, mas que, supondo-se uma igualdade do movimento relativo, nos dois casos, dá origem a correntes elétricas de mesma magnitude e sentido que as produzidas, no primeiro caso, pelas forças elétricas.

Indução de Faraday

X

Força de Lorentz



Exemplos deste tipo – em conjunto com as tentativas malsucedidas de detectar um movimento da Terra relativo ao “meio luminífero” – levam à conjectura de que não apenas os fenômenos da mecânica mas também os da eletrodinâmica não têm propriedades que correspondam ao conceito de repouso absoluto. Ao contrário, as mesmas leis da eletrodinâmica e da óptica serão válidas para todos os sistemas de coordenadas nos quais valem as equações da mecânica, como foi recentemente demonstrado para quantidades de primeira ordem.

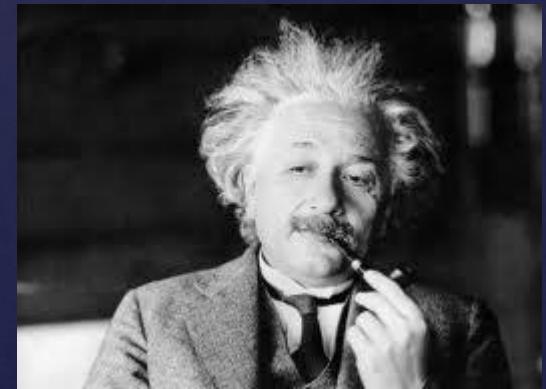
Elevaremos essa conjectura (cujo conteúdo, daqui em diante, será chamado de “princípio da relatividade”) à condição de um postulado. Iremos também introduzir outro postulado, apenas aparentemente incompatível com esse, a saber: que a luz sempre se propaga no espaço vazio com uma velocidade definida, que é independente do estado de movimento do corpo emissor. Esses dois postulados são suficientes para a obtenção de uma eletrodinâmica dos corpos em movimento simples e consistente, baseada na teoria de Maxwell para corpos em movimento.

A introdução de um “éter luminífero” irá se provar supérflua, uma vez que o ponto de vista a ser desenvolvido aqui não exigirá um “espaço em repouso absoluto”, dotado de propriedades especiais, nem atribuirá um valor de velocidade a um ponto do espaço vazio, onde os processos eletromagnéticos estão ocorrendo.

Como toda eletrodinâmica, a teoria a ser aqui desenvolvida está baseada na cinemática de um corpo rígido, pois as assertivas de qualquer teoria desse tipo têm a ver com as relações entre corpos rígidos (sistemas de coordenadas), relógios e pulsos eletromagnéticos. Uma consideração insuficiente desse aspecto está na raiz das dificuldades que a eletrodinâmica dos corpos em movimento tem de enfrentar no momento.

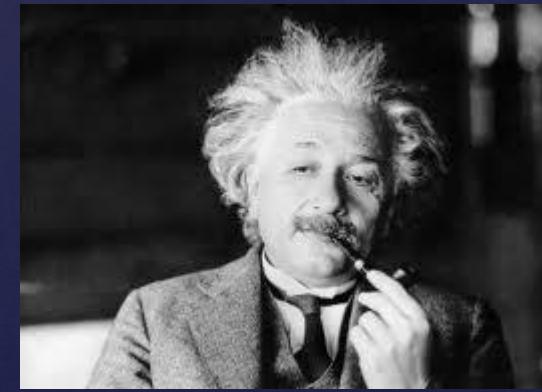
1. As leis que descrevem a mudança dos estados dos sistemas físicos são independentes de qualquer um dos dois sistemas de coordenadas que estão em movimento de translação uniforme, um em relação ao outro, e que são utilizados para descrever essas mudanças.

## A Relatividade Especial (1905): Os Postulados

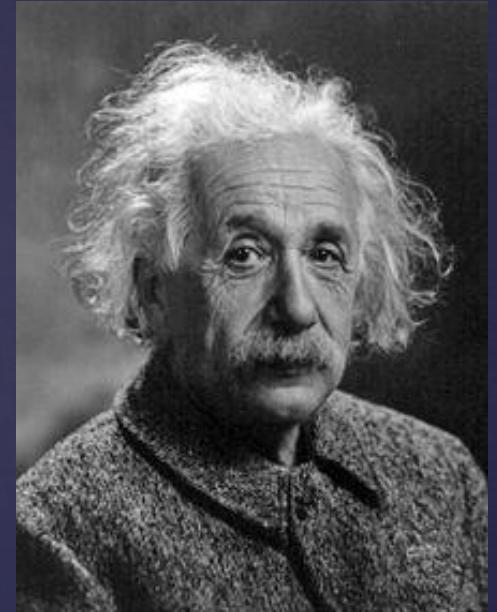


2. Todo raio de luz move-se no sistema de coordenadas de “repouso” com uma velocidade fixa  $V$ , independentemente do fato de este raio de luz ter sido emitido por um corpo em repouso ou em movimento

## A Relatividade Especial (1905): Os Postulados

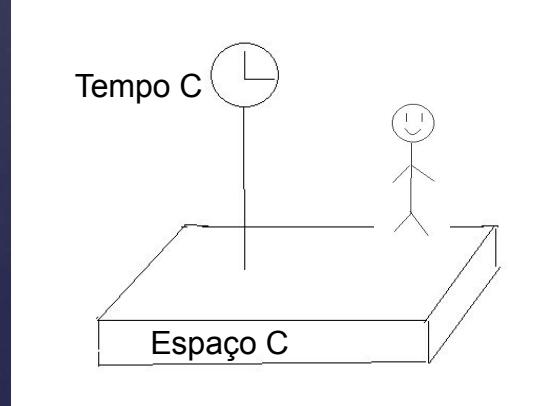
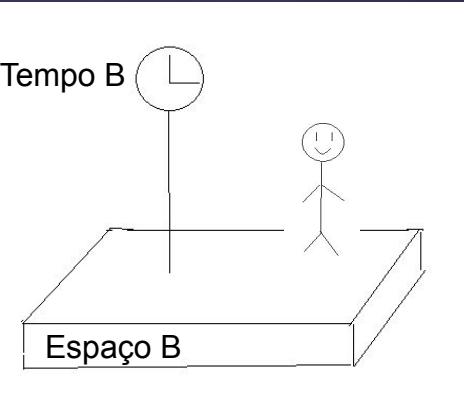
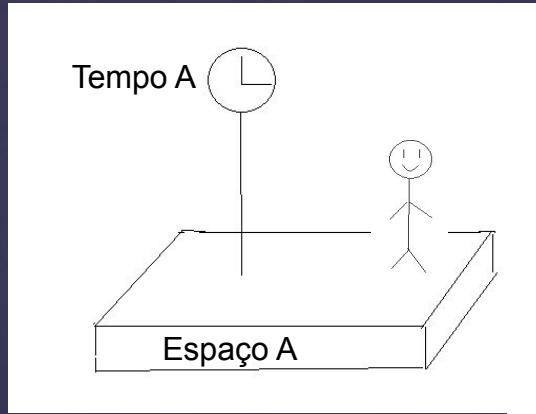


- A distância entre dois eventos (“o comprimento”) depende do referencial;
- O tempo transcorrido entre dois eventos também.



# A Relatividade Especial (1905): As Consequências.

# Imagen de Mundo na Física Einsteiniana (Versão Fofinha!).



# As Transformações de Lorentz

- Considerando dois referenciais inerciais com velocidade  $v$  entre si na direção do eixo  $y$ , temos:

$$x' = x$$

$$y' = \gamma(y - vt)$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma[t - (vx/c^2)]$$

- Dadas as coordenadas  $x, y, z, t$ , de um evento, o intervalo relativístico é uma constante

$$s^2 = (ct)^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

PS: Aqui estamos considerando um evento de origem de coordenadas nulas.

# A Teoria da Absolutidade