

# Teoria da Relatividade Restrita

A natureza do espaço-tempo

Nivaldo A. Lemos

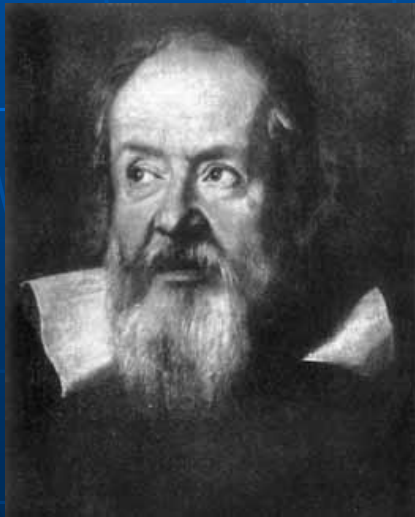
PANORAMA DA FÍSICA

Abril de 2018

# Personagens principais



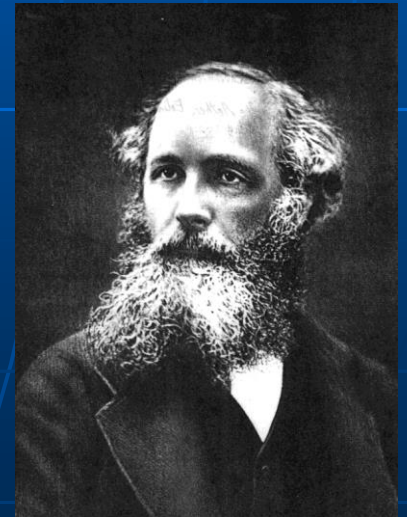
Einstein  
(1879-1955)



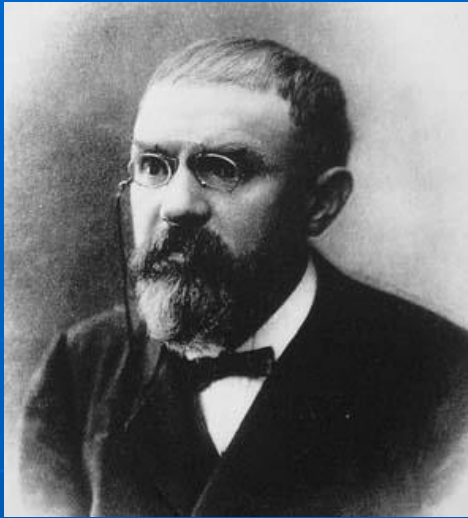
Galileo (1564-  
1642)



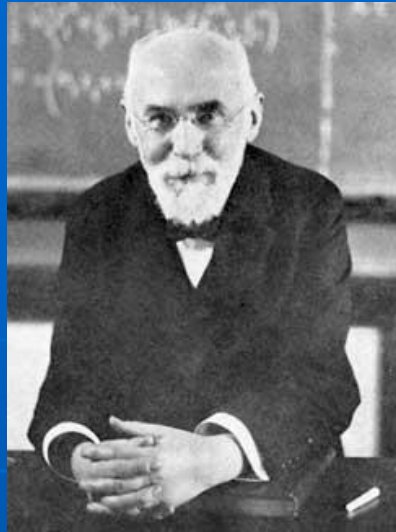
Newton  
(1642-1727)



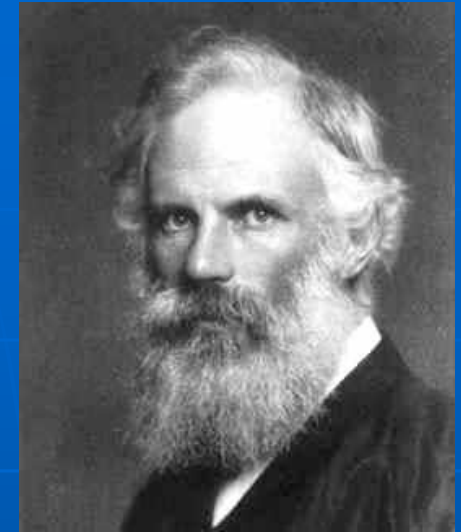
Maxwell (1831-  
1879)



Poincaré  
(1854-1912)



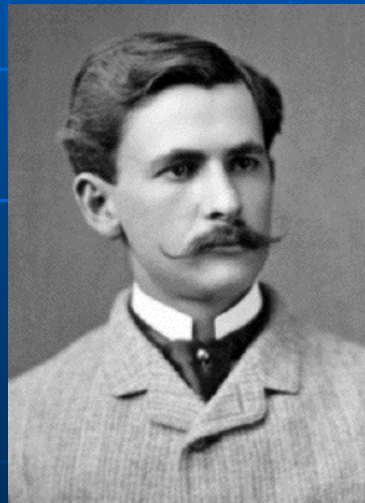
Lorentz  
(1853-1928)



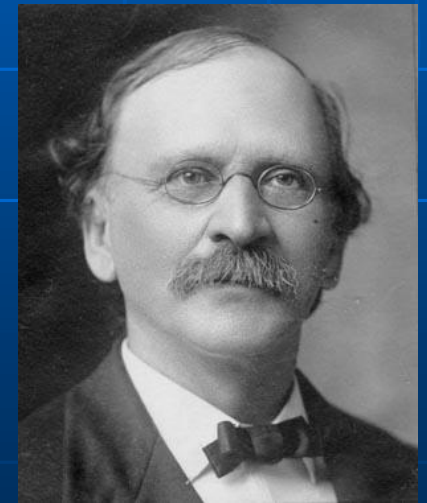
FitzGerald  
(1851-1901)



Minkowski  
(1864-1909)



Michelson  
(1852-1931)



Morley  
(1838-1923)

# A Física de Galileo e Newton

Galileo Galilei introduz a **idealização**: podemos imaginar um fenômeno “puro” e abstrair as imperfeições experimentais, isolando o que é essencial, chegando assim a leis da natureza.

O princípio da relatividade de Galileo é descrito em seu livro “diálogos sobre dois sistemas máximos do mundo”:

*... (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma*

(desde que o movimento seja uniforme e não flutuante para cá e para lá) você não perceberá a menor modificação em todos os efeitos mencionados, e nem de qualquer um deles poderá concluir se o navio se move ou está parado ...

## **Princípio da Relatividade**

As leis da mecânica são válidas em todos os referenciais inerciais.

Na visão newtoniana, o espaço-tempo é absoluto:

1. O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, em si próprio, e por sua própria natureza flui igualmente sem relação com qualquer coisa externa [...]
2. O espaço absoluto, por sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre igual e imóvel [...]

Consequências: um intervalo de tempo medido num referencial inercial é o mesmo em todos os referenciais inerciais; uma distância medida num referencial inercial é a mesma em todos os referenciais inerciais.

Formulação matemática das leis da natureza. Sucesso sem precedentes: movimento dos planetas, marés, projéteis. O universo possui uma ordem matemática.

Primeira grande unificação: leis terrestres e leis celestes são as mesmas!

E a luz? Newton explicou o arco-íris e decompôs a luz branca com um prisma. Acreditava na teoria corpuscular.

# O Drama da Física Clássica

As equações de Maxwell descrevem todos os fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos (unificação).

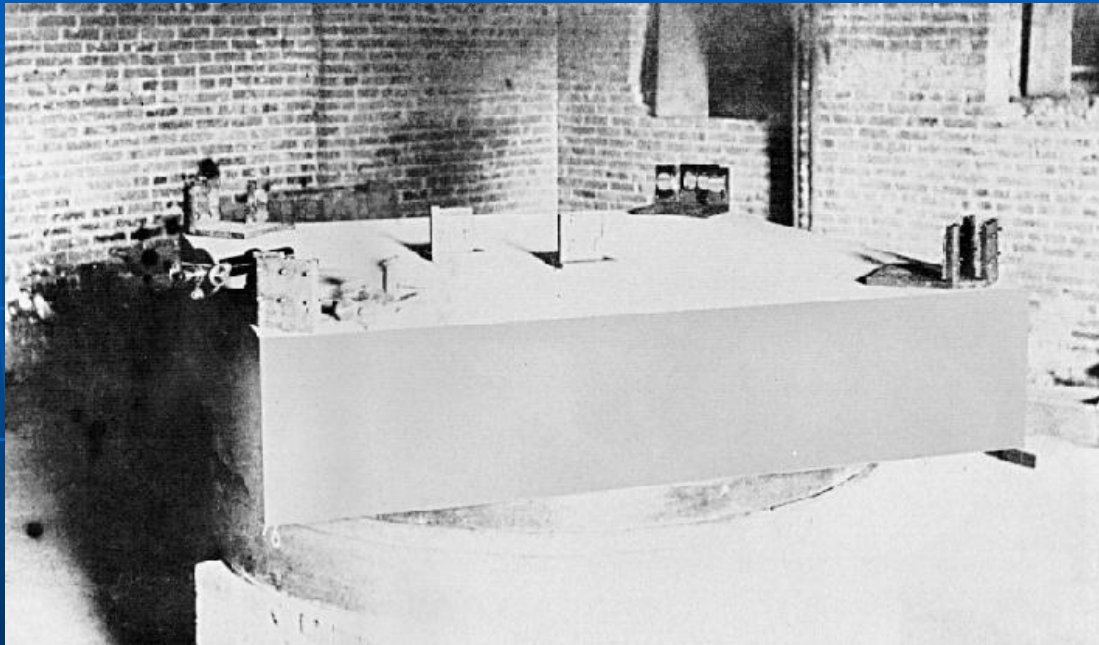
Problema com a versão ondulatória: uma onda precisa de um meio para se propagar. Surge o **ÉTER...**

Sistema de referência absoluto: o éter está em repouso.

Propriedades estranhas e contraditórias: extremamente rígido (para que a luz tenha a velocidade que tem) mas tão tênue que passa por dentro de materiais transparentes. Os corpos celestes atravessam o éter sem encontrar qualquer resistência, como se o éter não existisse.

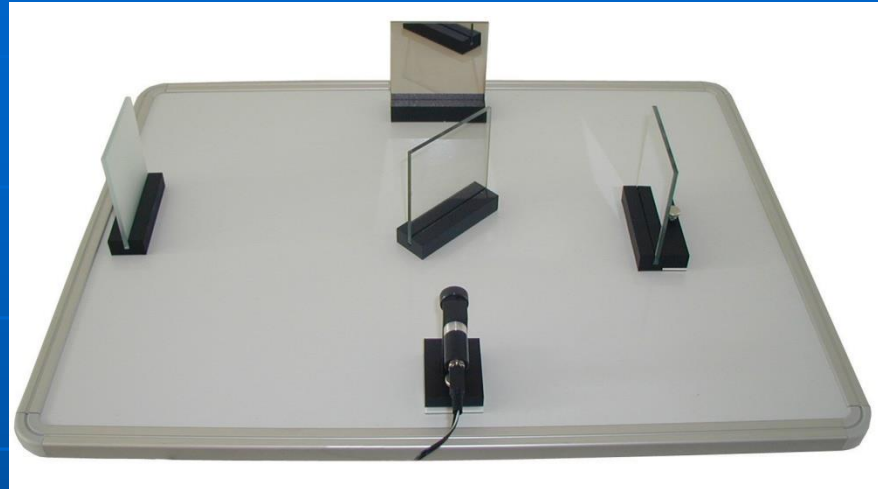
A busca do éter se torna um dos grandes problemas experimentais e teóricos do final do século XIX.

Entre outras experiências, talvez a mais notável seja a de Michelson e Morley (1887):

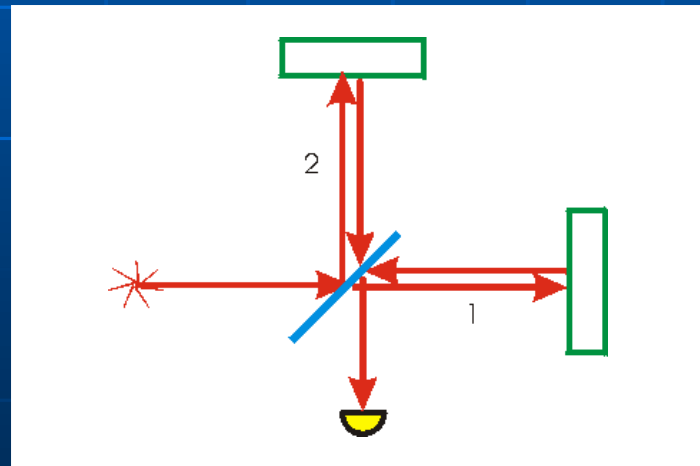


Interferômetro original de MM.

Versão moderna do interferômetro de MM.



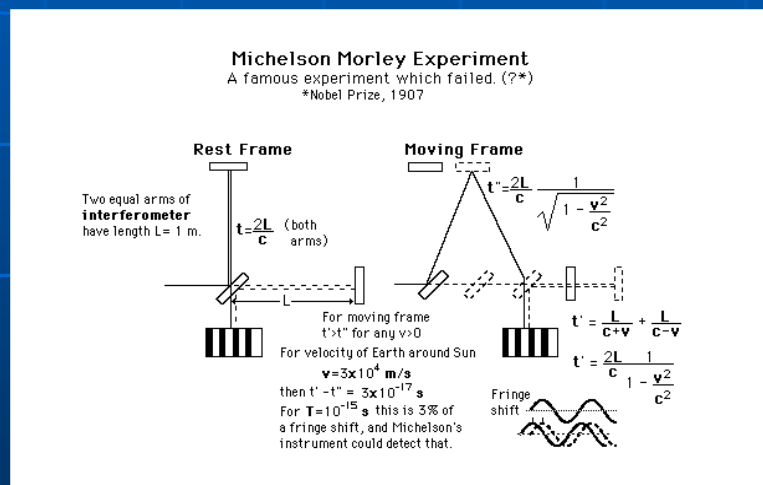
Descrição simplificada do que acontece





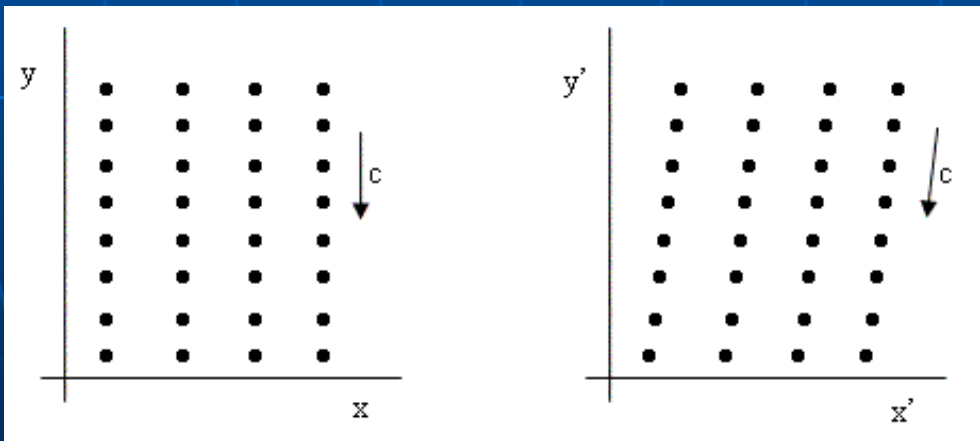
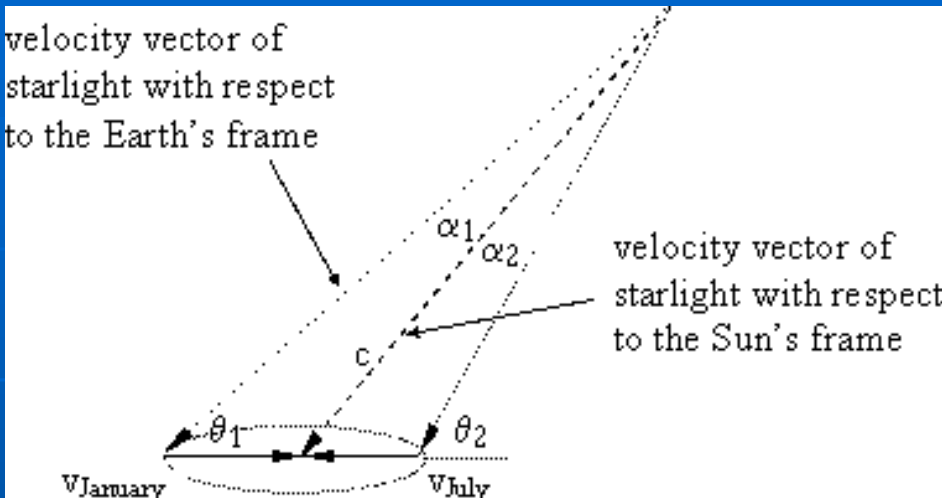
Caso exista um éter, o movimento da Terra em relação a ele provocará um “vento”, o que mudará a velocidade da luz, gerando franjas de interferência. A presença de franjas de interferência permitiria determinar a velocidade **absoluta** da Terra, isto é, a velocidade da Terra em relação ao referencial do éter.

Resultado negativo: nenhum movimento das franjas de interferência quando o aparato experimental é girado de 90 graus...

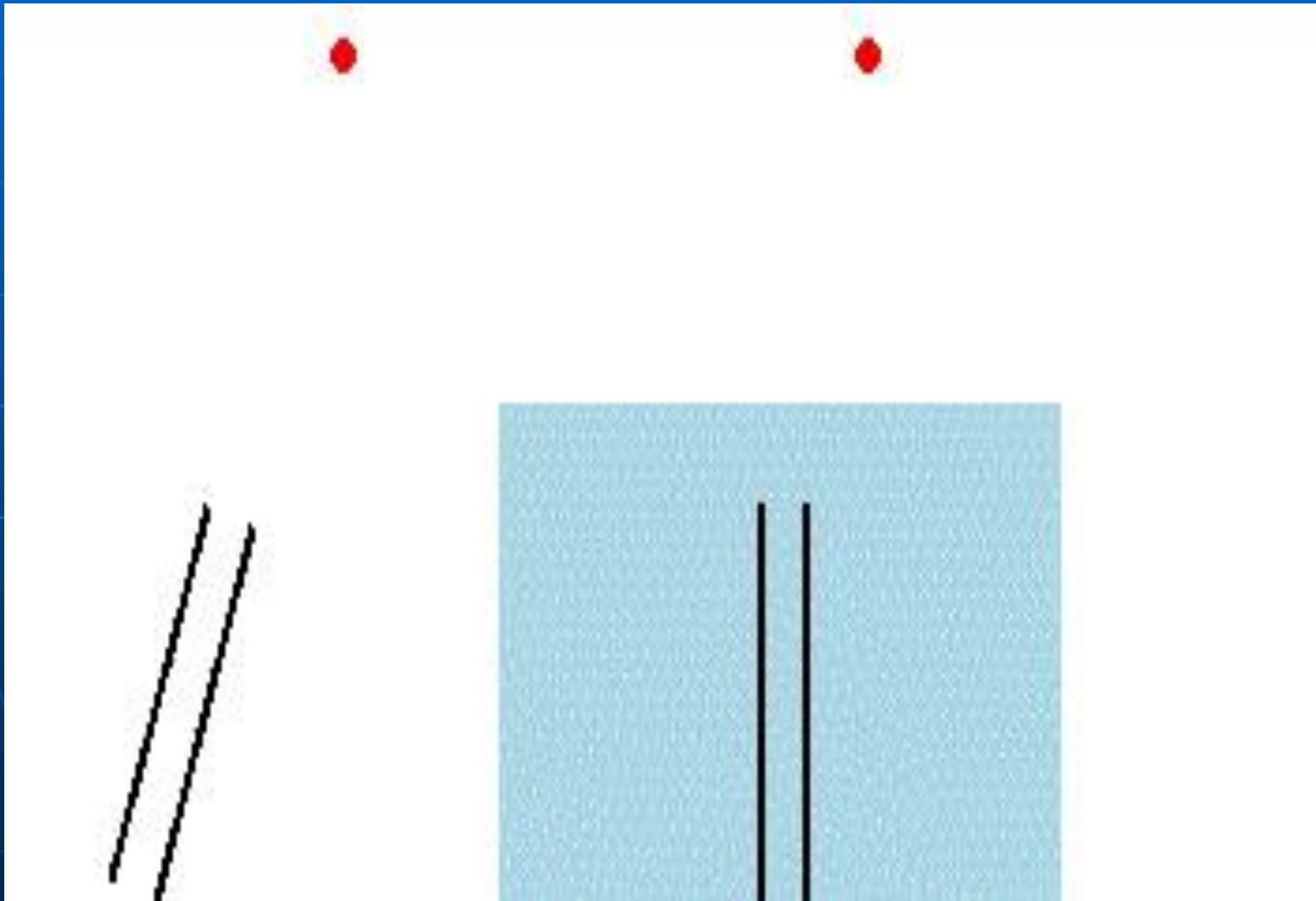


Hipótese proposta para salvar o éter: arraste do éter pela Terra. Se a Terra arrasta uma camada de éter enquanto se move, a experiência de Michelson-Morley se realizou efetivamente no referencial do éter.

# Aberração da luz (Bradley, 1727)



# Aberração Estelar



# Aberração Estelar

Refutou a hipótese do arraste do éter pela Terra.

FitzGerald: hipótese da contração de um corpo material em movimento, para salvar o éter e justificar o resultado negativo da experiência de Michelson e Morley. Lorentz levou a sério, como resultado da influência do éter nas partículas materiais.

# HIPÓTESE DA CONTRAÇÃO DOS COMPRIMENTOS

SCIENCE

LETTERS TO THE EDITOR 1889

**The Ether and the Earth's Atmosphere.** I HAVE read with much interest Messrs. Michelson and Morley's wonderfully delicate experiment attempting to decide the important question as to how far the ether is carried along by the earth. Their result seems opposed to other experiments showing that the ether in the air can be carried along only to an inappreciable extent. I would suggest that almost the only hypothesis that can reconcile this opposition is that **the length of material bodies changes, according as they are moving through the ether or across it, by an amount depending on the square of the ratio of their velocity to that of light.** We know that electric forces are affected by the motion of the electrified bodies relative to the ether, and it seems a not improbable supposition that the molecular forces are affected by the motion, and that the size of a body alters consequently. It would be very important if secular experiments on electrical attractions between permanently electrified bodies, such as in a very delicate quadrant electrometer, were instituted in some of the equatorial parts of the earth to observe whether there is any diurnal and annual variation of attraction, - diurnal due to the rotation of the earth being added and subtracted from its orbital velocity; and annual similarly for its orbital velocity and the motion of the solar system. **GEO. FRAS. FITZ GERALD.**

Dublin, May 2.

# O artigo de Einstein (1905)

*Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*, Annalen der Physik, 1905, v. 17.

Outros artigos fundamentais publicados por Einstein em 1905 na mesma revista: efeito fotoelétrico e movimento browniano.

### *3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.*

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

# O Dilema de Einstein

Escolha entre a busca do éter ou uma reformulação radical das concepções bem estabelecidas a respeito de espaço e tempo!

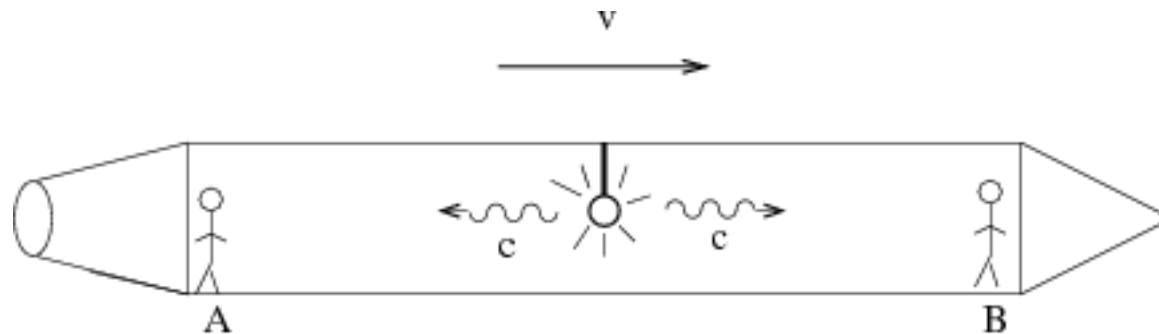
A teoria da relatividade restrita é baseada em dois postulados simples:

- 1. As leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais.**
- 2. A velocidade da luz no vácuo é a mesma em todos os referenciais inerciais, não depende da velocidade da fonte nem do observador.**

Estes postulados implicam que **não existe um referencial absoluto. Adeus, éter!** A partir destes dois postulados, Einstein deduz as transformações de Lorentz.

Primeira consequência cinemática: o fim da **simultaneidade absoluta**. Fenômenos simultâneos num referencial inercial, **não** são necessariamente simultâneos em outro referencial inercial.

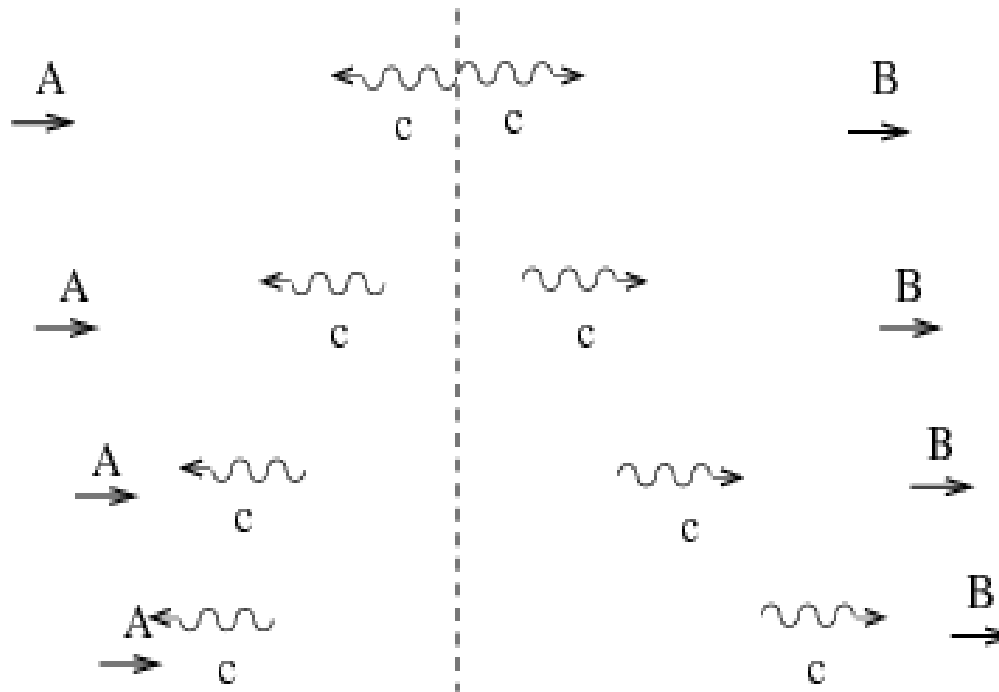
# RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE



Uma nave espacial move-se no espaço sideral com velocidade constante em relação à Terra. Uma lâmpada se acende no ponto médio entre os astronautas A e B situados nas extremidades da nave. Para um observador em repouso dentro da nave, a luz da lâmpada chega simultaneamente aos astronautas A e B.



# SITUAÇÃO VISTA DA TERRA



A luz da lâmpada chega ao astronauta A antes de chegar ao astronauta B.

**Os eventos (chegada da luz a A e B) não são simultâneos para um observador em repouso na Terra.**

# Consequências dos postulados de Einstein

A partir dos dois postulados de Einstein podemos deduzir consequências cinemáticas sobre o espaço e o tempo que contrariam nossa experiência do dia a dia.

- Dilatação do tempo
- Contração dos comprimentos (FitzGerald-Lorentz)
- Adição de velocidades
- $E = mc^2$

# Dilatação do Tempo

Um astronauta está numa nave espacial que se move com velocidade constante  $v$  em relação à Terra.

Tempo medido no relógio de pulso do astronauta:  $\Delta t_0$

Tempo medido no relógio de pulso de um observador na Terra:  $\Delta t$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Como  $\Delta t > \Delta t_0$ , para o observador fixo o tempo parece passar mais lentamente no relógio em movimento.

# “Paradoxo” dos Gêmeos

Dois irmãos gêmeos: um permanece na Terra e o outro faz uma viagem interestelar de ida e volta com velocidade

$$v = \frac{3}{5} c \approx 180.000 \text{ km/s}$$

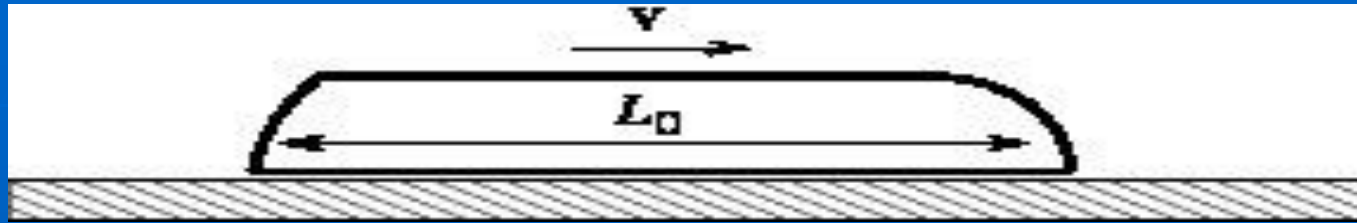
em relação à Terra.

Passam-se 20 anos até o volta do viajante, segundo o seu próprio relógio. O tempo transcorrido pelo relógio do gêmeo que ficou na Terra é 25 anos. Quando os irmãos se reencontram, o gêmeo viajante está 5 anos mais jovem do que o gêmeo que ficou na Terra.

Aparente paradoxo: para o viajante, o gêmeo que ficou na Terra é que se afastou e depois retornou. No reencontro, o gêmeo que ficou na Terra é que deveria estar 5 anos mais jovem.

Solução do “paradoxo”: os dois referenciais não são equivalentes. Se o referencial da Terra é inercial, o referencial do viajante não é inercial **o tempo todo** porque sua nave teve que sofrer uma aceleração para inverter o sentido da sua velocidade.

# Contração dos Comprimentos

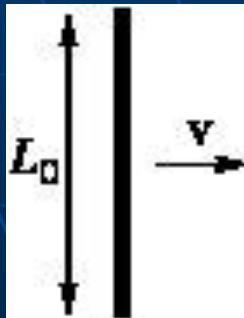


Comprimento do trem medido por um observador em repouso dentro do trem:  $L_0$

Comprimento do trem medido por um observador na plataforma, que vê o trem passando com velocidade  $v$ :

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Objetos parecem mais curtos na direção do movimento.



Não há nenhuma alteração na direção perpendicular ao movimento:  $L = L_0$ .

# Adição de Velocidades

Seja  $u$  a velocidade de um objeto em relação a um referencial que se move com velocidade constante  $v$  em relação ao referencial inercial T.

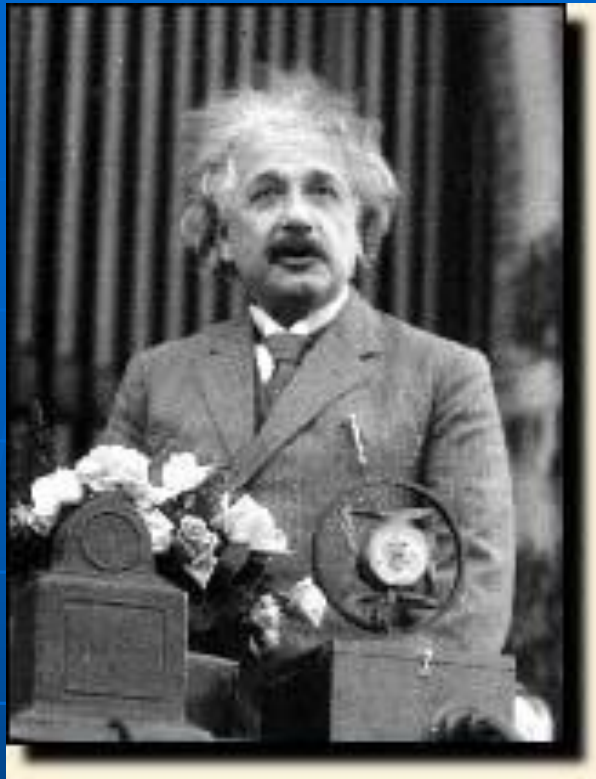
Galileo-Newton

$$v_T = u + v$$

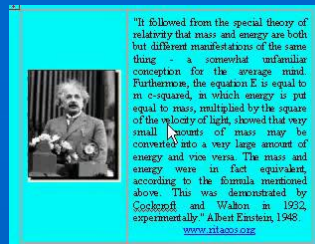
Einstein

$$v_T = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}$$

Propriedade: se  $u = c$  então  $v_T = c$ .



$$E=mc^2$$



Esta é a equação mais famosa da Física, a única que se transformou num elemento da cultura de massa.

Einstein provou esta relação de várias maneiras, e a obteve pela primeira vez em seu artigo de 1905 em que perguntava "A inércia de um corpo é uma medida de seu conteúdo energético?".

Resposta positiva: uma massa  $m$  em repouso tem energia  $E = mc^2$ .

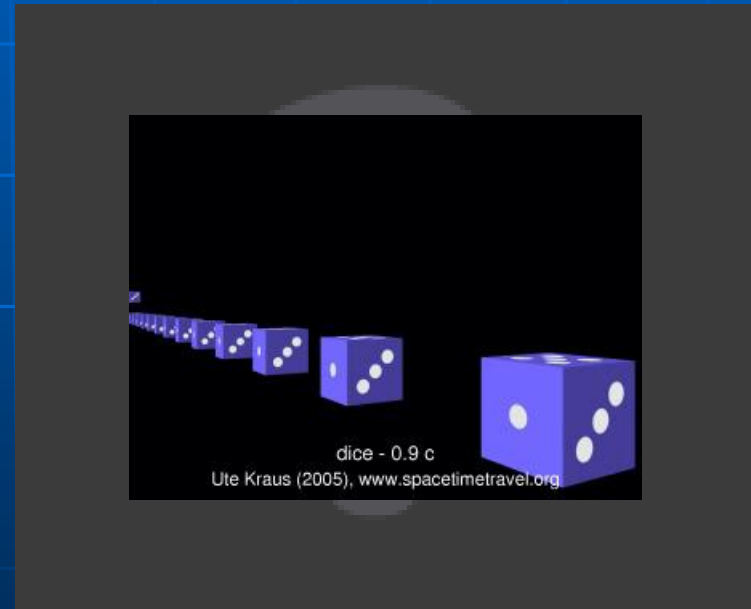
*It followed from the special theory of relativity that mass and energy are both but different manifestations of the same thing -- a somewhat unfamiliar conception for the average mind. Furthermore, the equation  $E$  is equal to  $m c$ -squared, in which energy is put equal to mass, multiplied by the square of the velocity of light, showed that very small amounts of mass may be converted into a very large amount of energy and vice versa. The mass and energy were in fact equivalent, according to the formula mentioned above. This was demonstrated by Cockcroft and Walton in 1932, experimentally.*

# O efeito Penrose-Terrell

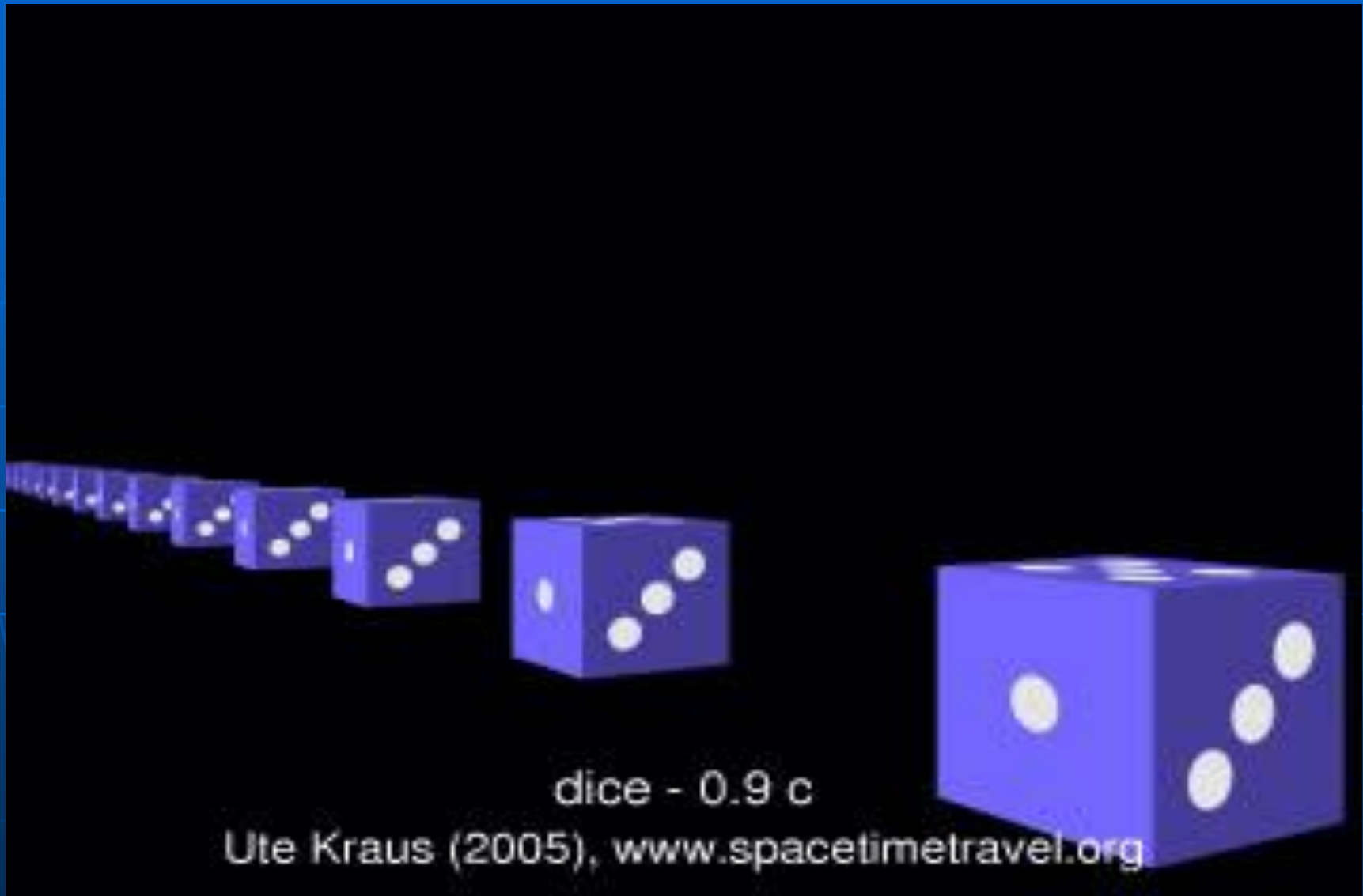
Um objeto em movimento sofre uma contração de Lorentz.

Mas como ele aparece visualmente? Uma fotografia, por exemplo?

Os raios de luz que chegam ao observador partem em tempos diferentes. A combinação da finitude da velocidade da luz com a contração de Lorentz aparece, geometricamente, como uma rotação!







dice - 0.9 c

Ute Kraus (2005), [www.spacetime travel.org](http://www.spacetime travel.org)



0% LICHTGESCHWINDIGKEIT



0% LICHTGESCHWINDIGKEIT  
SPEED OF LIGHT

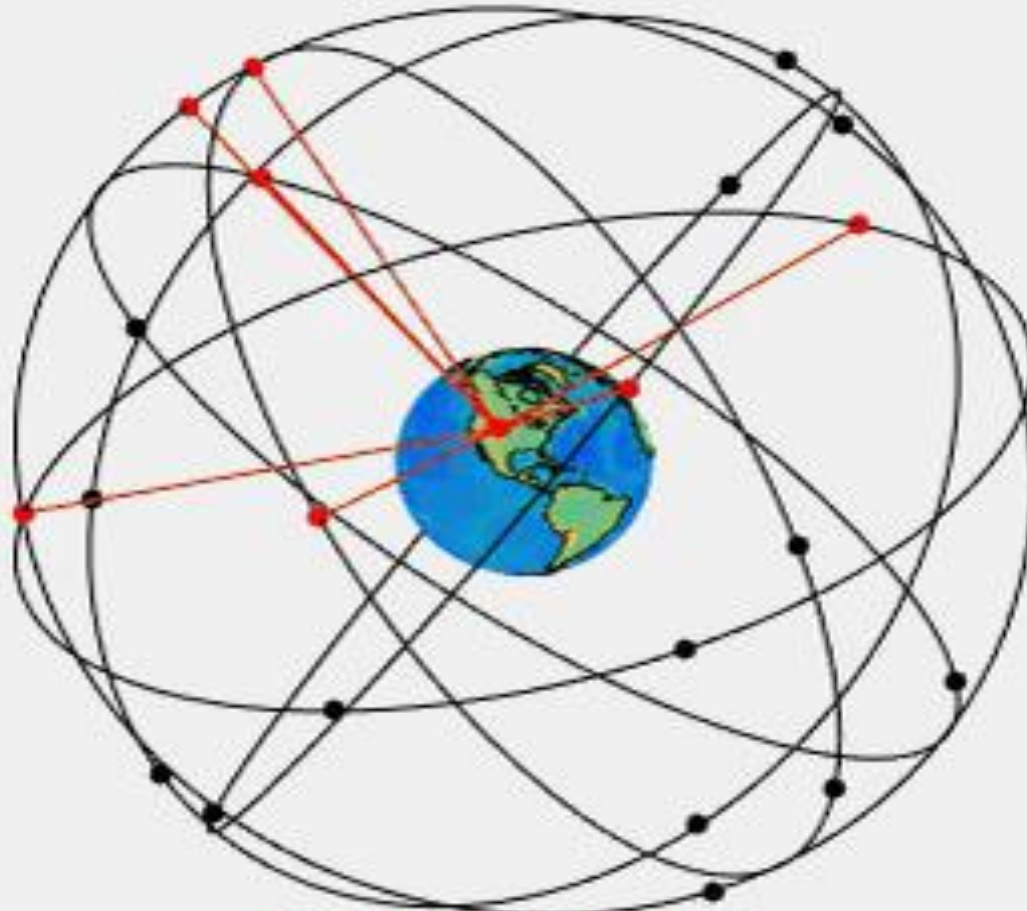
Estas são algumas das consequências mais simples da relatividade restrita, de caráter cinemático. O estudo da dinâmica relativística é importante nas experiências de física de partículas.

Surpreendentemente, a relatividade restrita tem uma aplicação PRÁTICA! Nos aparelhos de GPS (Global Positioning System).

Temos que considerar o efeito da dilatação do tempo. A surpresa maior ainda é que temos que considerar também o efeito do campo gravitacional sobre os relógios (efeito da **relatividade geral!**).

# GPS

## 31 Satélites em Órbita da Terra



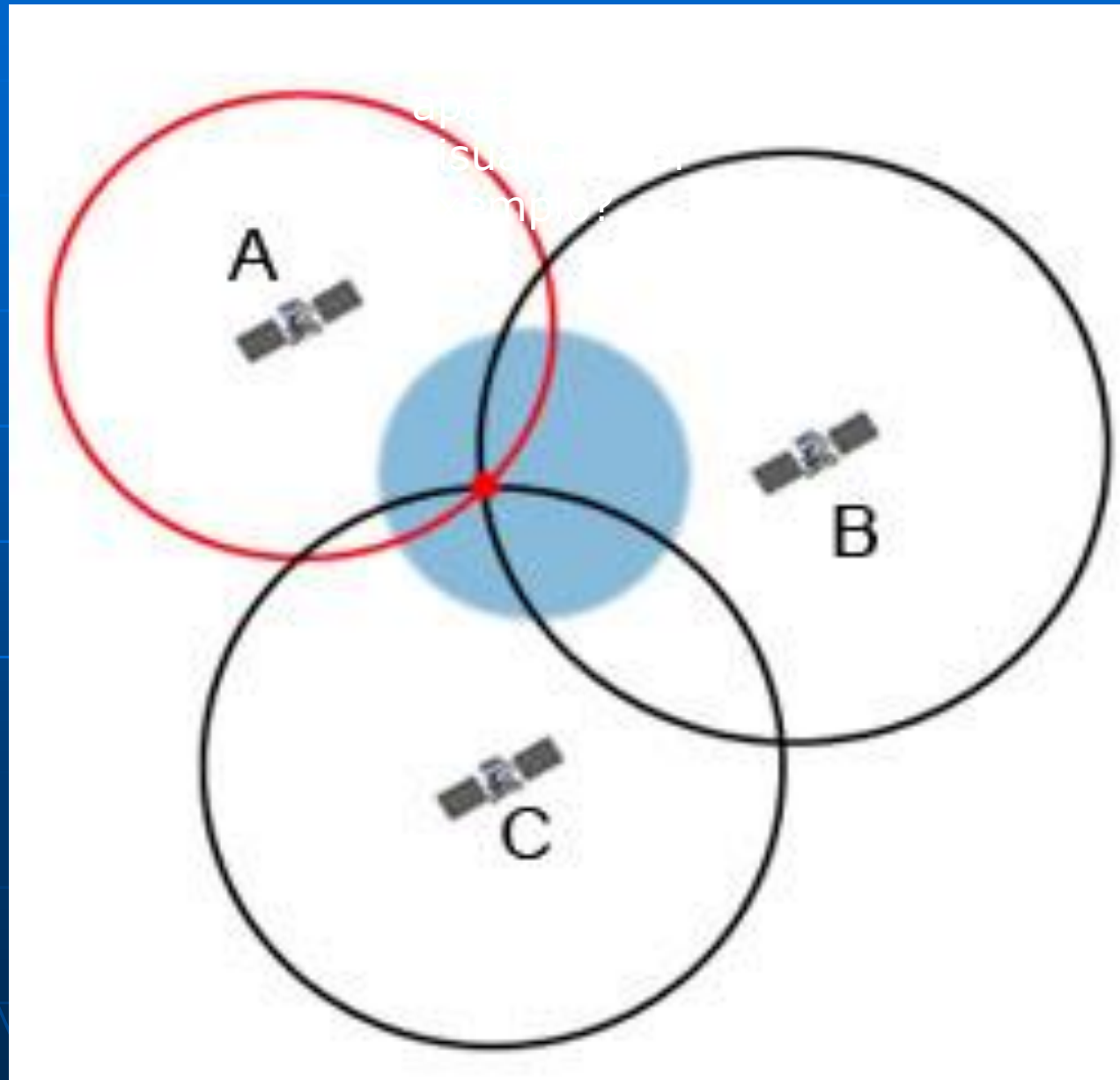
7 visible satellites

# Operação do GPS

Cada satélite está equipado com um relógio atômico e envia constantemente sinais com duas informações: sua posição e o instante da emissão do sinal. Pelo intervalo de tempo  $\Delta t$  entre a emissão do sinal e sua chegada ao receptor de GPS na Terra, fica determinado que o receptor está sobre uma esfera de raio  $R = c\Delta t$  com centro no satélite emissor.

O sinal de três satélites basta para determinar univocamente a posição do receptor: as três esferas se intersectam num único ponto. Para compensar a menor precisão do relógio do receptor, o sinal de um quarto satélite é levado em conta.

# GPS



De acordo com a relatividade especial (ou restrita), o tempo passa mais devagar nos relógios dos satélites, que estão em movimento, comparados com relógios fixos na Terra. Há uma competição com um outro efeito previsto pela relatividade **geral**: o tempo passa mais rapidamente em campos gravitacionais mais fracos. O resultado líquido desses dois efeitos é o seguinte: o relógio em cada satélite se adianta de aproximadamente

39 microssegundos

por dia em relação aos relógios na Terra. Isto parece muito pouco, mas multiplicado pela velocidade da luz dá uma distância de quase 12 km. Além disso, o efeito é cumulativo: em uma semana, sem a devida correção, o sistema GPS daria nossa localização com erro superior a 80 km, isto é, seria totalmente inútil.



**A relatividade  
tem um impacto  
direto  
nas nossas  
vidas.**