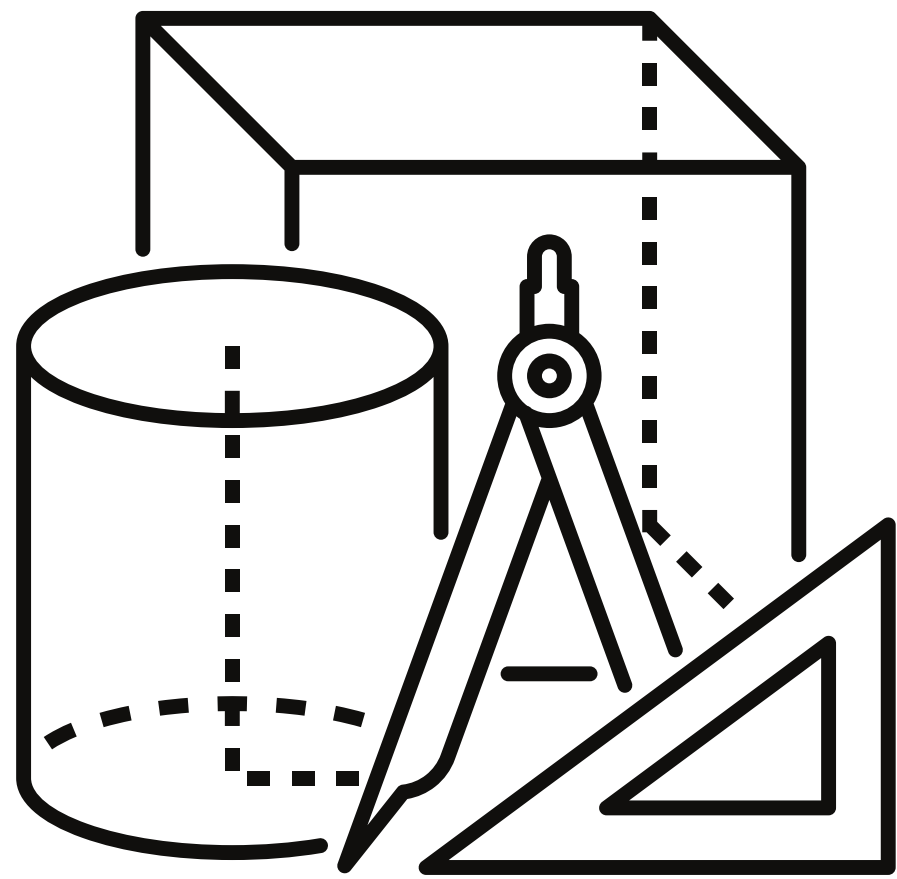




É TUDO RELATIVO

Gabriel Luchini



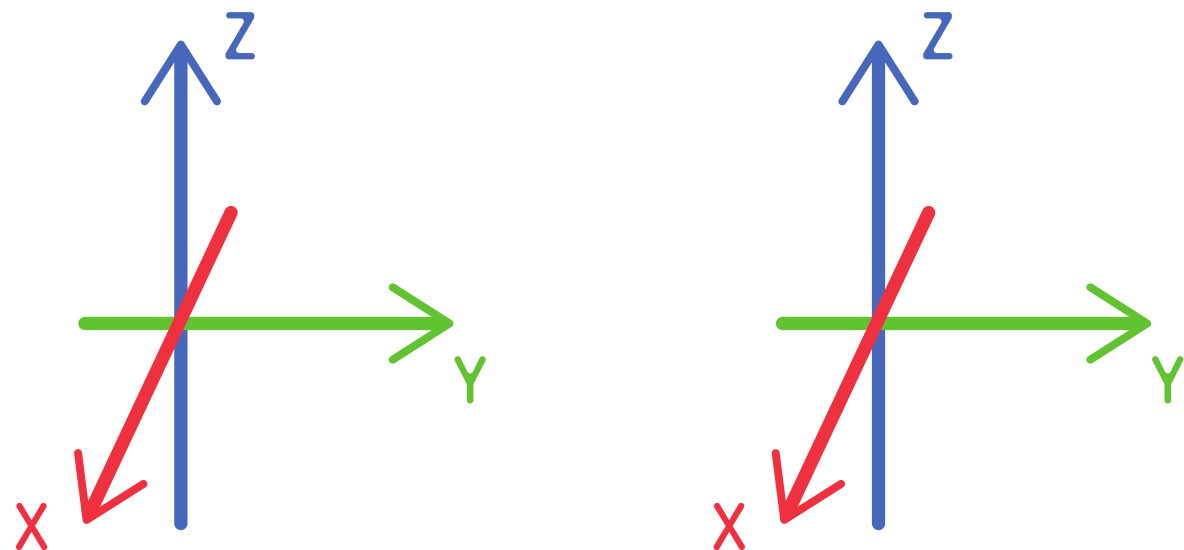


Geometria & Física

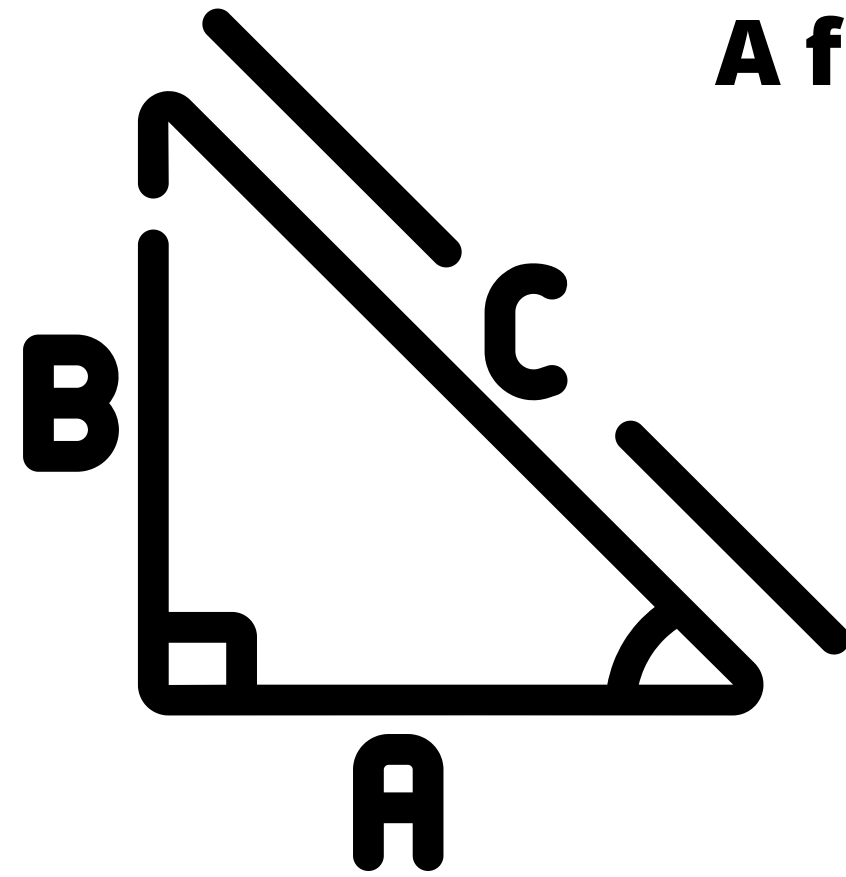
Uma lei física é escrita em um sistema de coordenadas

Em um sistema "galileano" as leis de Newton são válidas

Esses sistemas movem-se com velocidades relativas constantes



O princípio da relatividade: os fenômenos da Natureza se desenvolvem da mesma forma em qualquer sistema galileano.



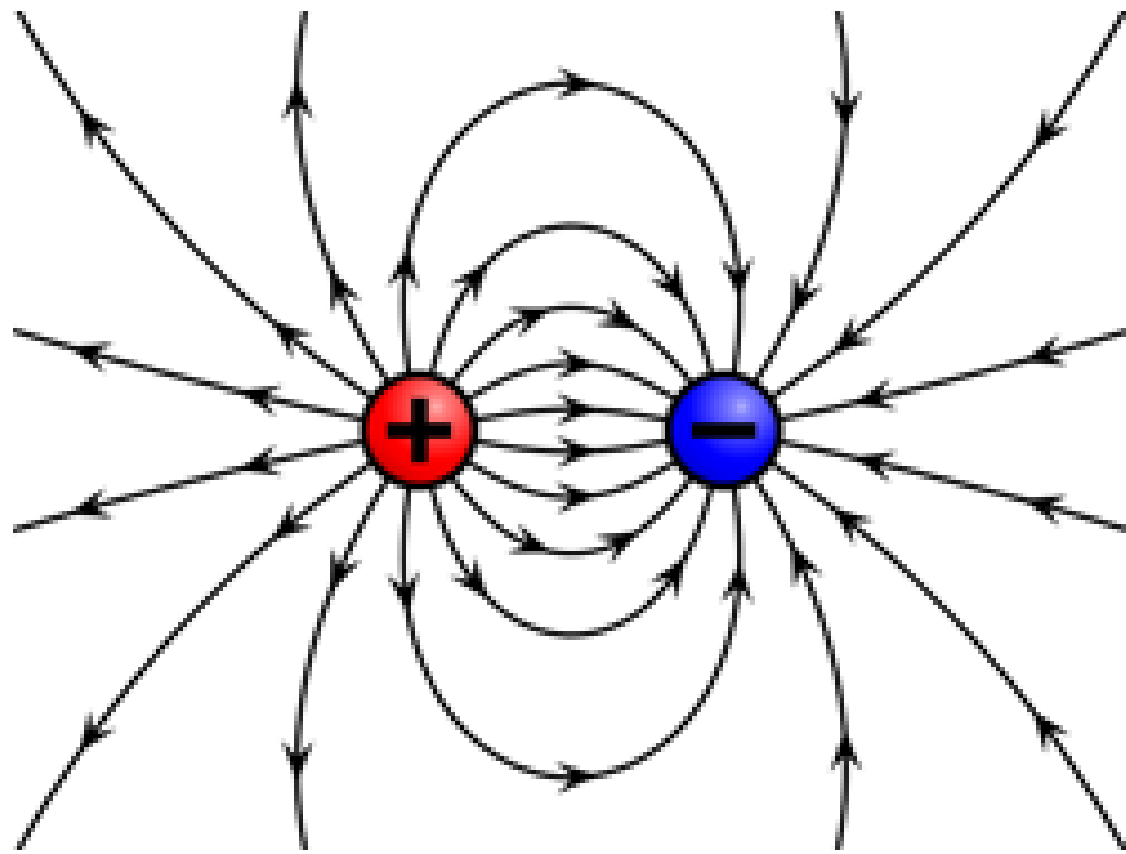
A física newtoniana está em "sintonia" com a geometria euclidiana!

As coordenadas do espaço e do tempo têm características distintas: o tempo é universal.

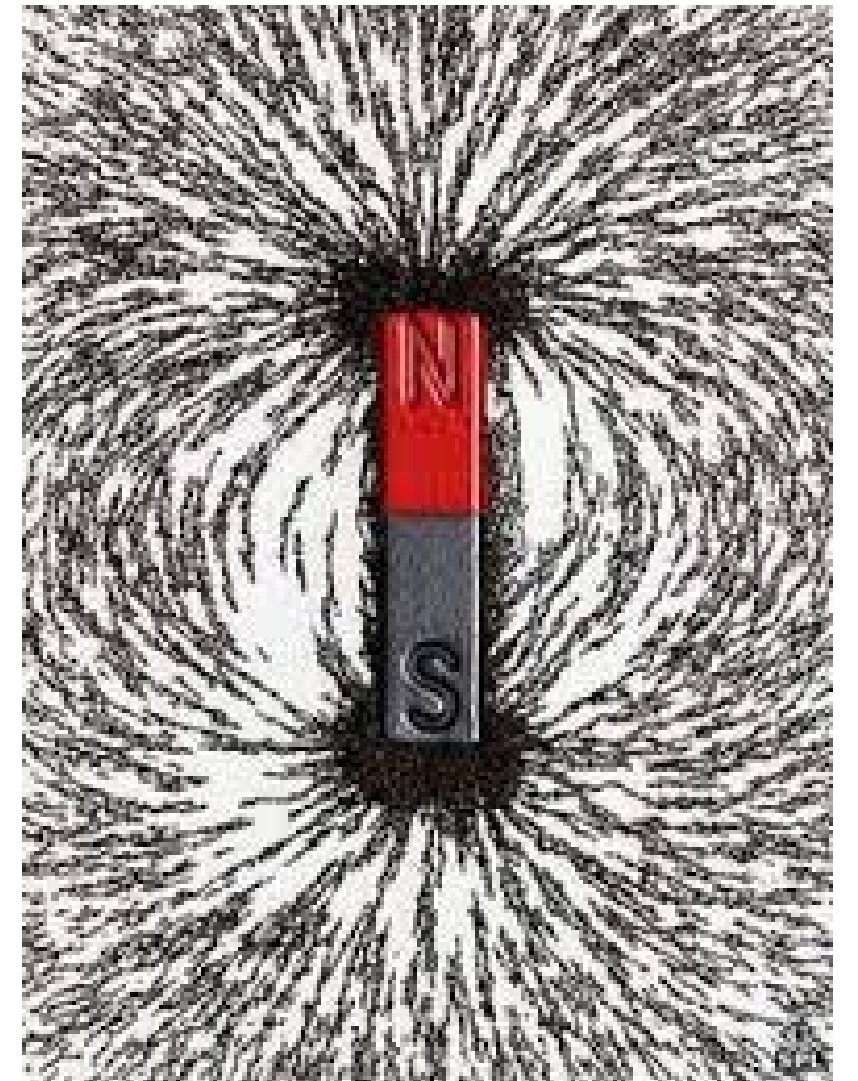
$$C^2 = A^2 + B^2$$

Podemos conectar diferentes referenciais galileanos a partir das transformações que são isometrias no espaço euclidiano: translações, rotações e "impulso".

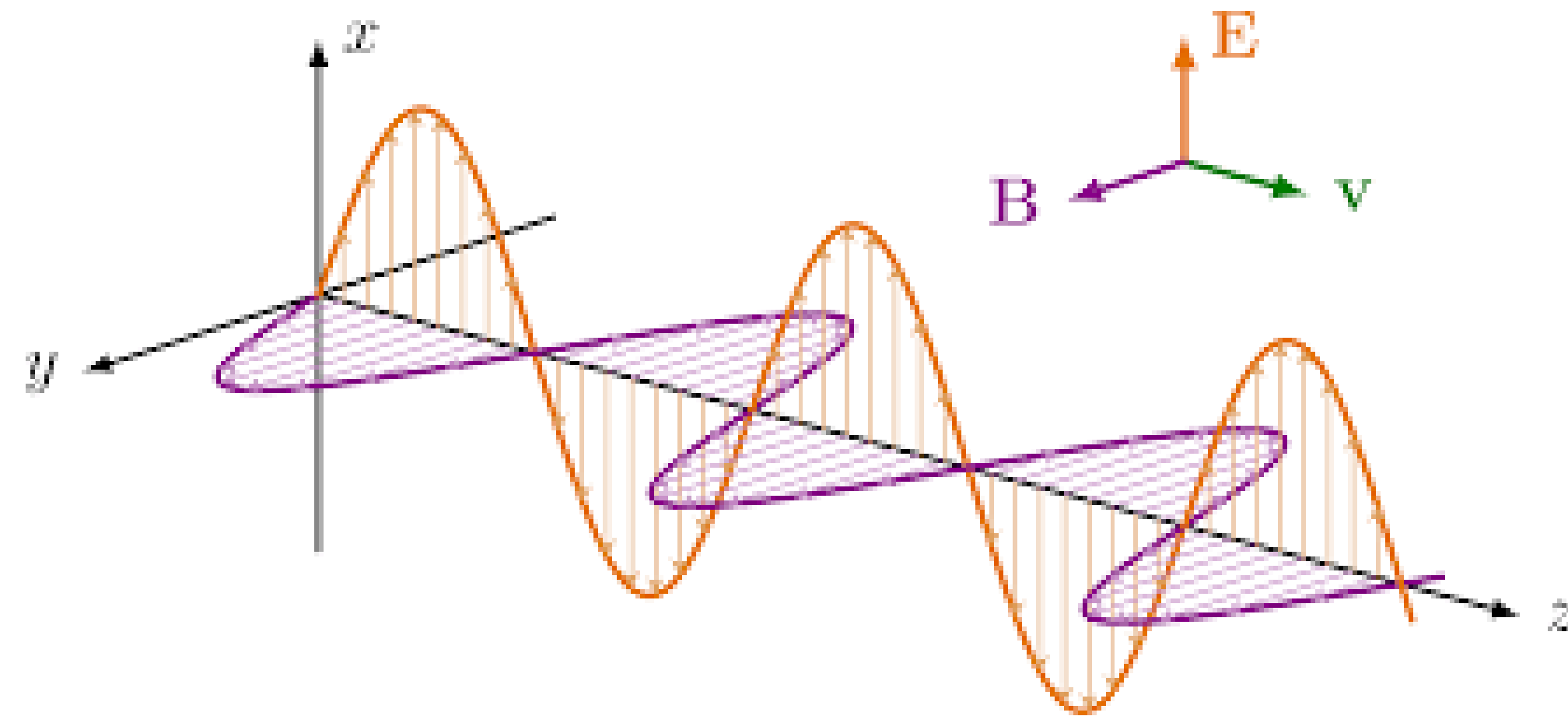
No fim dos anos 1800 além da descrição do movimento dada por Newton, James Clerk Maxwell havia desenvolvido uma teoria matemática para os fenômenos eletromagnéticos.



$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} &= 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= 4\pi\rho \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} \vec{J}.\end{aligned}$$



As equações de Maxwell da eletrodinâmica, entretanto, não estariam em "sintonia" com a geometria euclidiana: em diferentes referenciais, as leis da física parecem ser diferentes.



$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \nabla^2 \vec{E} = 0$$

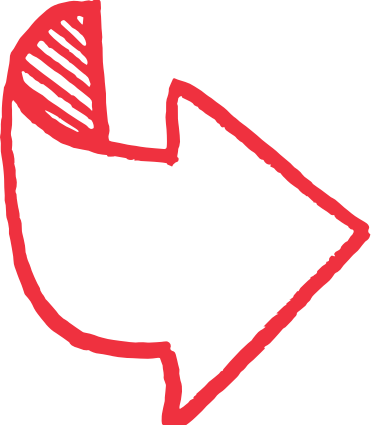
$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \nabla^2 \vec{B} = 0$$

A luz é uma onda eletromagnética e sua velocidade é obtida a partir de dados experimentais. Logo, pelo princípio da relatividade, deve ser a mesma em qualquer referencial galileano.

O princípio de relatividade precisa ser acompanhado de uma nova lei física, extremamente simples: a velocidade da luz é sempre a mesma, para todos os observadores.

Conectando observadores que descrevem a propagação da luz

Um evento é descrito por coordenadas t, x, y, z

$$\begin{array}{llll} x = \pm ct & \therefore & x \mp ct = 0 & x' - ct' = \lambda(x - ct) \\ x' = \pm ct' & \therefore & x' \mp ct' = 0 & x' + ct' = \mu(x + ct) \end{array}$$


As coordenadas se relacionam por uma transformação linear

$$x' = ax - bct \quad ct' = act - bx$$

$$a = \frac{\lambda + \mu}{2} \quad b = \frac{\lambda - \mu}{2}$$

Algumas considerações nos levam às definições das constantes, todas em termos da velocidade com a qual S' se move com respeito a S:

$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

De forma geral, essas transformações deixam invariantes a distância 4-dimensional entre dois eventos, caracterizados por

$$(t, x, y, z) \quad \text{e} \quad (t', x', y', z') = (t + \Delta t, x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$$

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$$

Contração espacial

$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



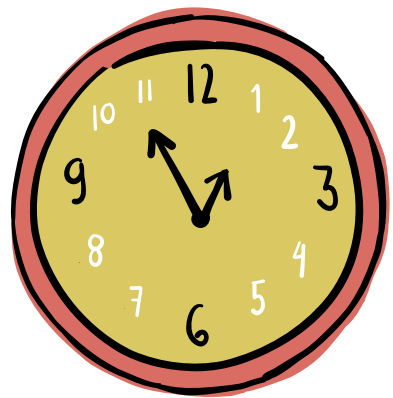
$$x'_i = 0 \quad x'_f = L \quad \Delta x' = L$$

$$x_i = 0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad x_f = L \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \Delta x = L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

A régua em movimento é tanto mais curta quanto maior sua velocidade.

Dilatação temporal

$$t' = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right) \quad x' = \gamma (x - vt) \quad \gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



$$x' = 0;$$

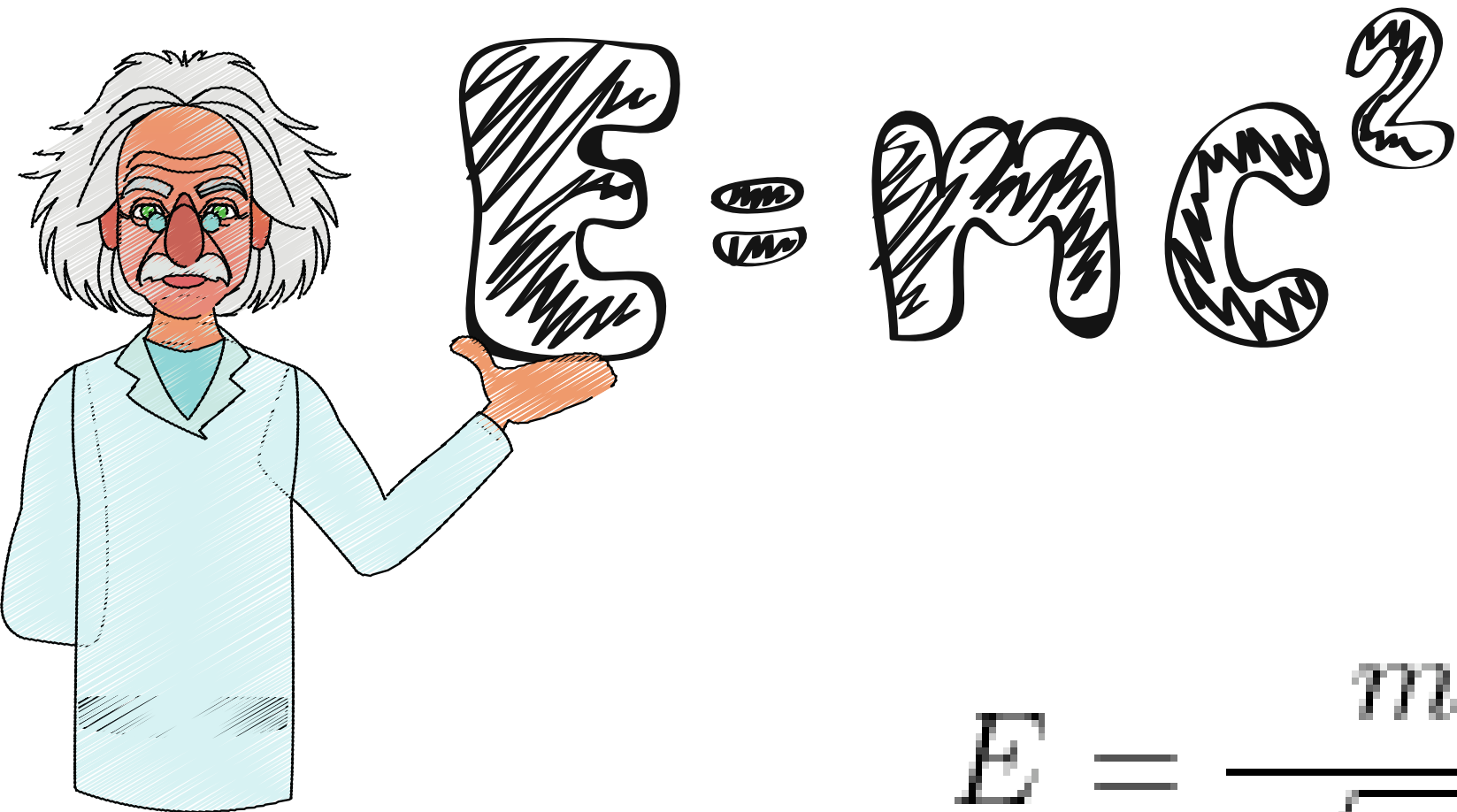
$$\text{tic: } t' = 0$$

$$\text{tac: } t' = 1$$

$$\text{tic: } t = 0$$

$$\text{tac: } t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

O tic-tac do relógio em movimento demora mais para acontecer: o tempo passa mais devagar quanto maior a sua velocidade.



A universalidade da velocidade da luz tem um profundo impacto na dinâmica

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \dots$$

Conservação da energia

Conservação da massa

Essas duas leis de conservação são unificadas no contexto da relatividade, ou seja, quando exigimos que a lei de conservação de energia seja válida em todos os referenciais galileanos.

DOES THE INERTIA OF A BODY DEPEND UPON ITS ENERGY-CONTENT?

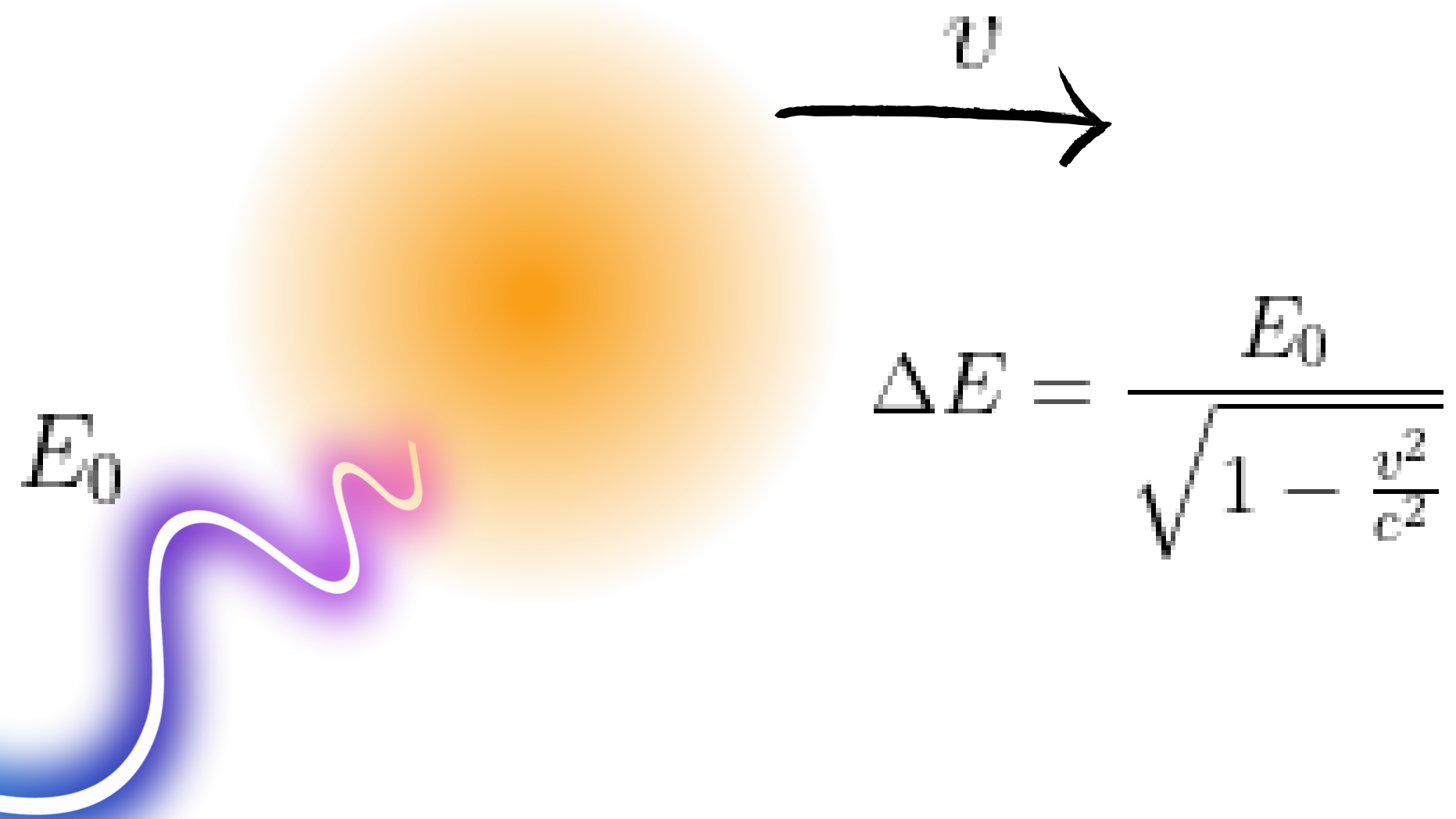
BY A. EINSTEIN

If a body gives off the energy L in the form of radiation, its mass diminishes by L/c^2 . The fact that the energy withdrawn from the body becomes energy of radiation evidently makes no difference, so that we are led to the more general conclusion that

The mass of a body is a measure of its energy-content; if the energy changes by L , the mass changes in the same sense by $L/9 \times 10^{20}$, the energy being measured in ergs, and the mass in grammes.

It is not impossible that with bodies whose energy-content is variable to a high degree (e.g. with radium salts) the theory may be successfully put to the test.

If the theory corresponds to the facts, radiation conveys inertia between the emitting and absorbing bodies.



$$E = \frac{\left(m + \frac{E_0}{c^2}\right) c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

A massa inercial de um corpo muda de acordo com a mudança de energia desse corpo

(Mais) Geometria & Física

Gravidade

ELETROMAGNETISMO

FORÇA NUCLEAR FORTE

FORÇA NUCLEAR FRACA

DON'T BELIEVE
TELL YOU

WHAT THEY
ABOUT GRAVITY

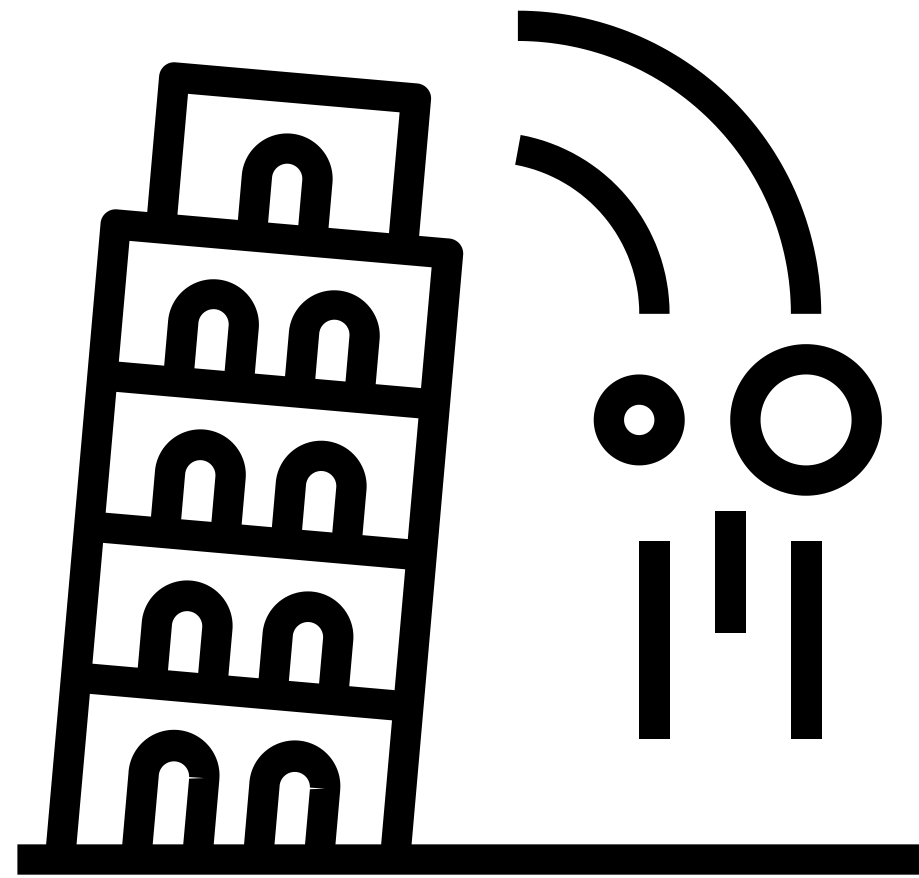
CRU



O problema da ação-à-distância e o conceito de campo

$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

A força gravitacional sobre o corpo não depende de nenhuma propriedade daquele corpo!

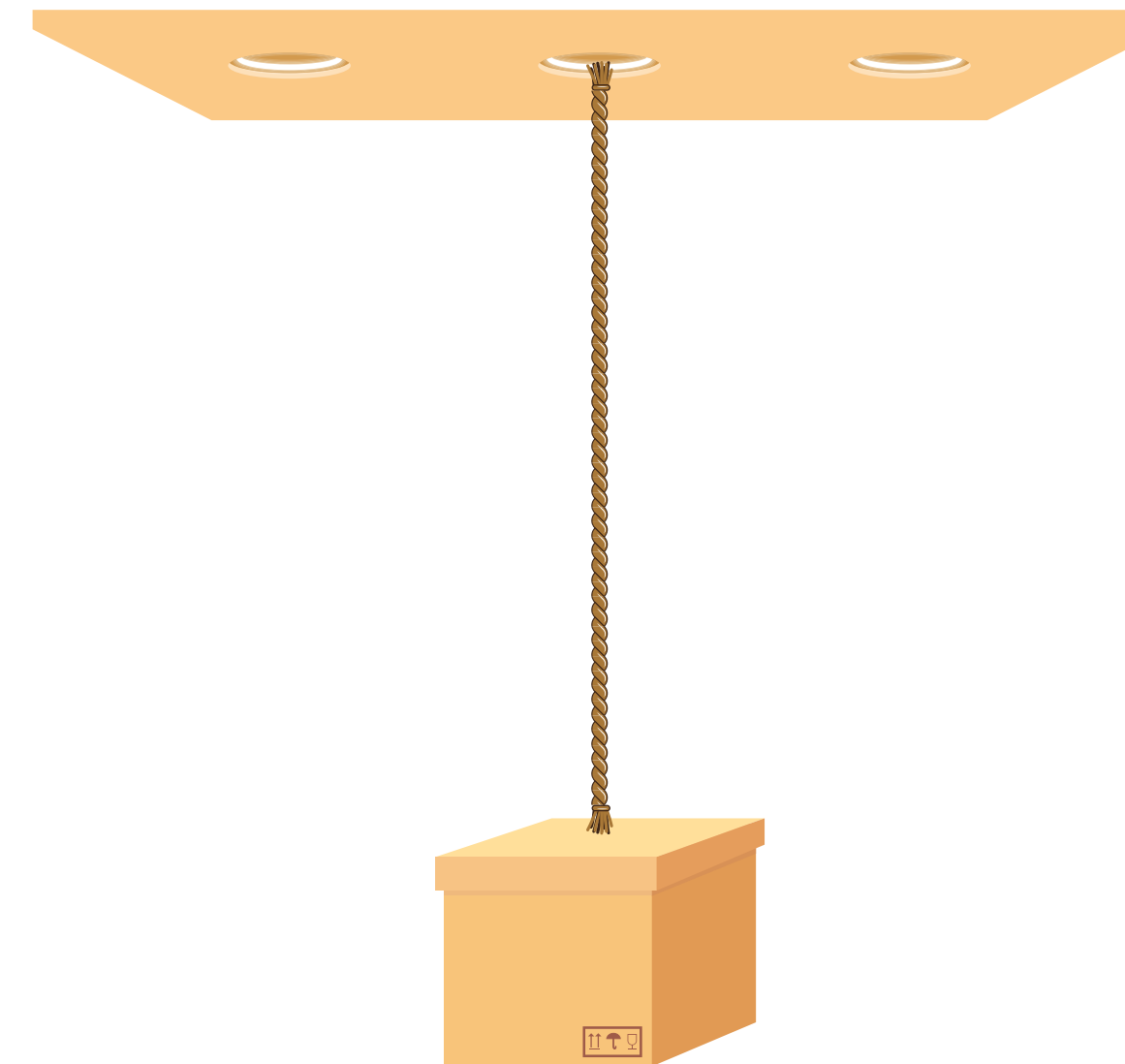
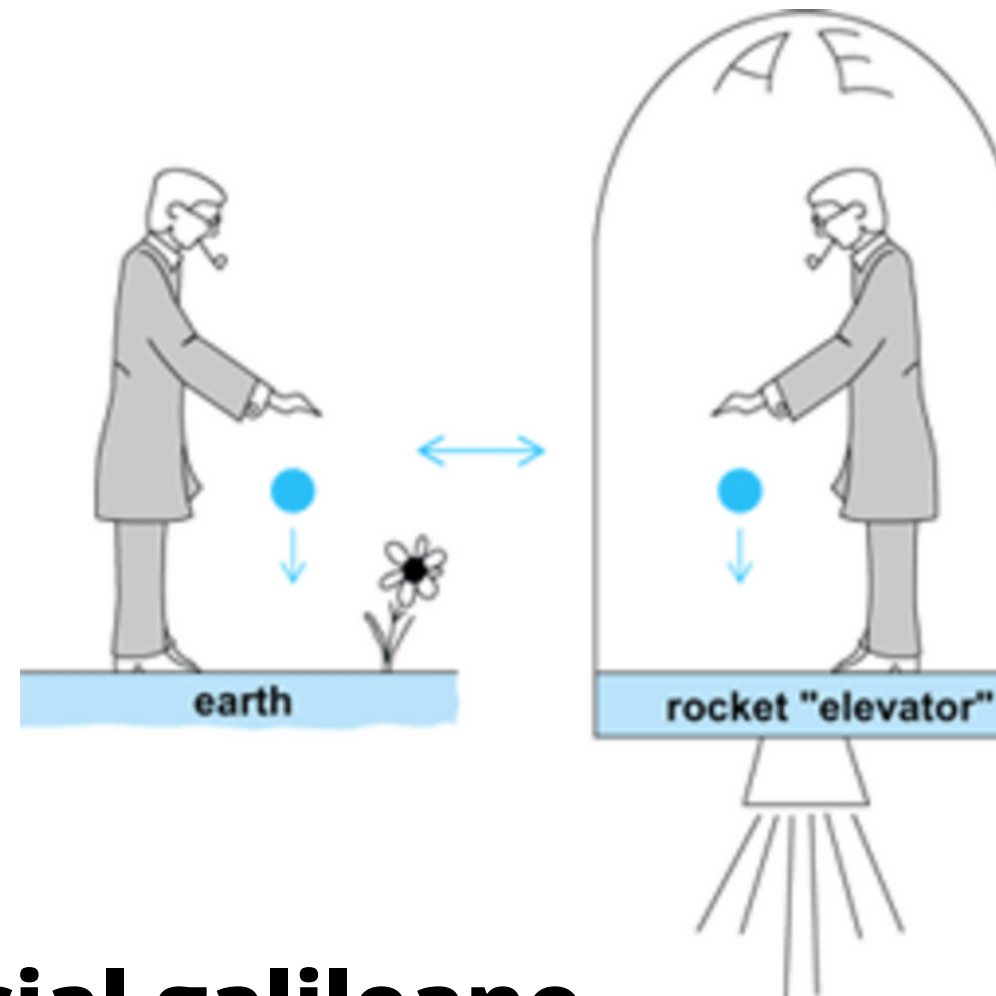
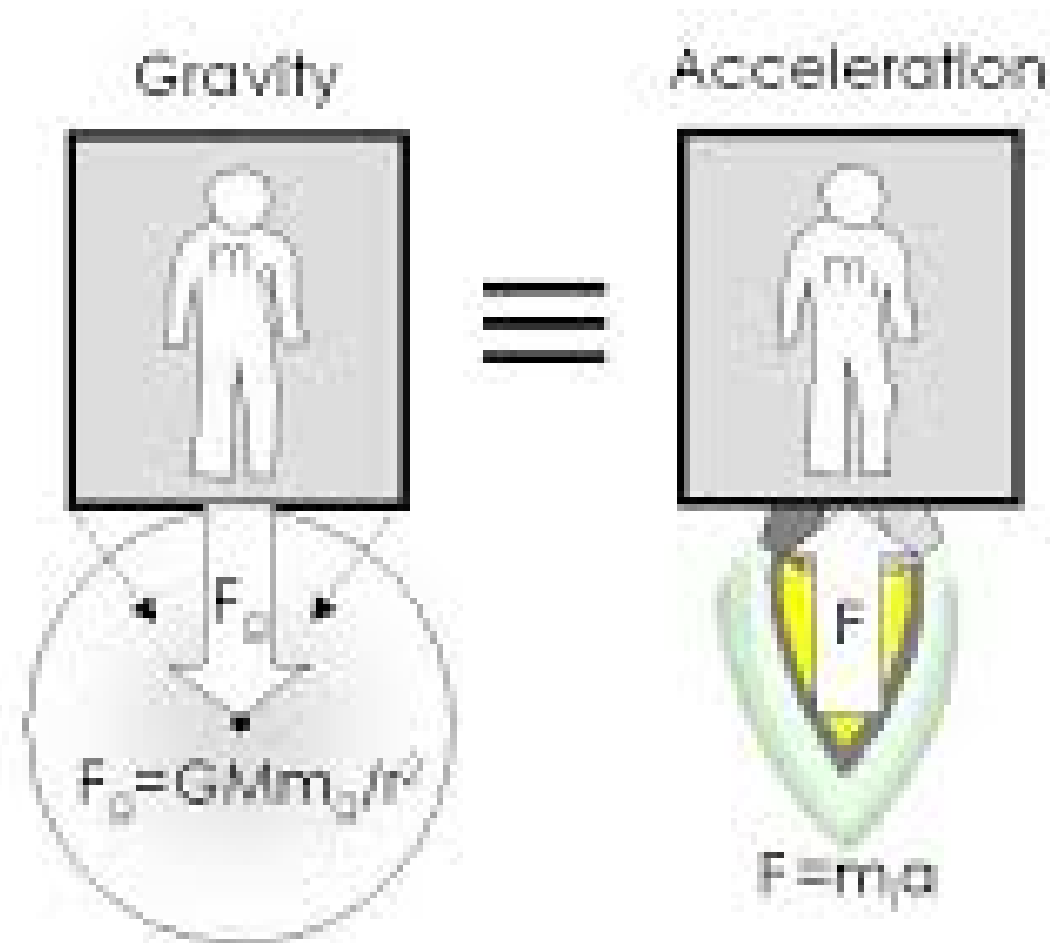


$$F = m_{\text{inerc}} a$$

$$a = \frac{m_{\text{inerc}}}{m} \frac{GM}{r^2}$$

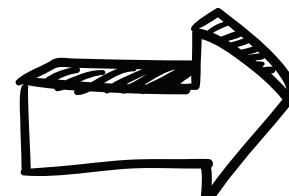
A experiência nos mostra que a aceleração sofrida por um corpo é igual a intensidade do campo gravitacional aonde ele se encontra, o que nos leva à conclusão de que as massas inercial e gravitacional são idênticas!

O princípio de equivalência



Enquanto de um referencial galileano podemos dizer que a caixa está acelerada para cima, a partir da caixa, o observador diz que ela está em repouso em um campo gravitacional.

Isso é uma consequência da igualdade entre massa gravitacional e inercial: o campo gravitacional é equivalente à ação de uma aceleração do referencial!

Relatividade Geral  **Gravitação**

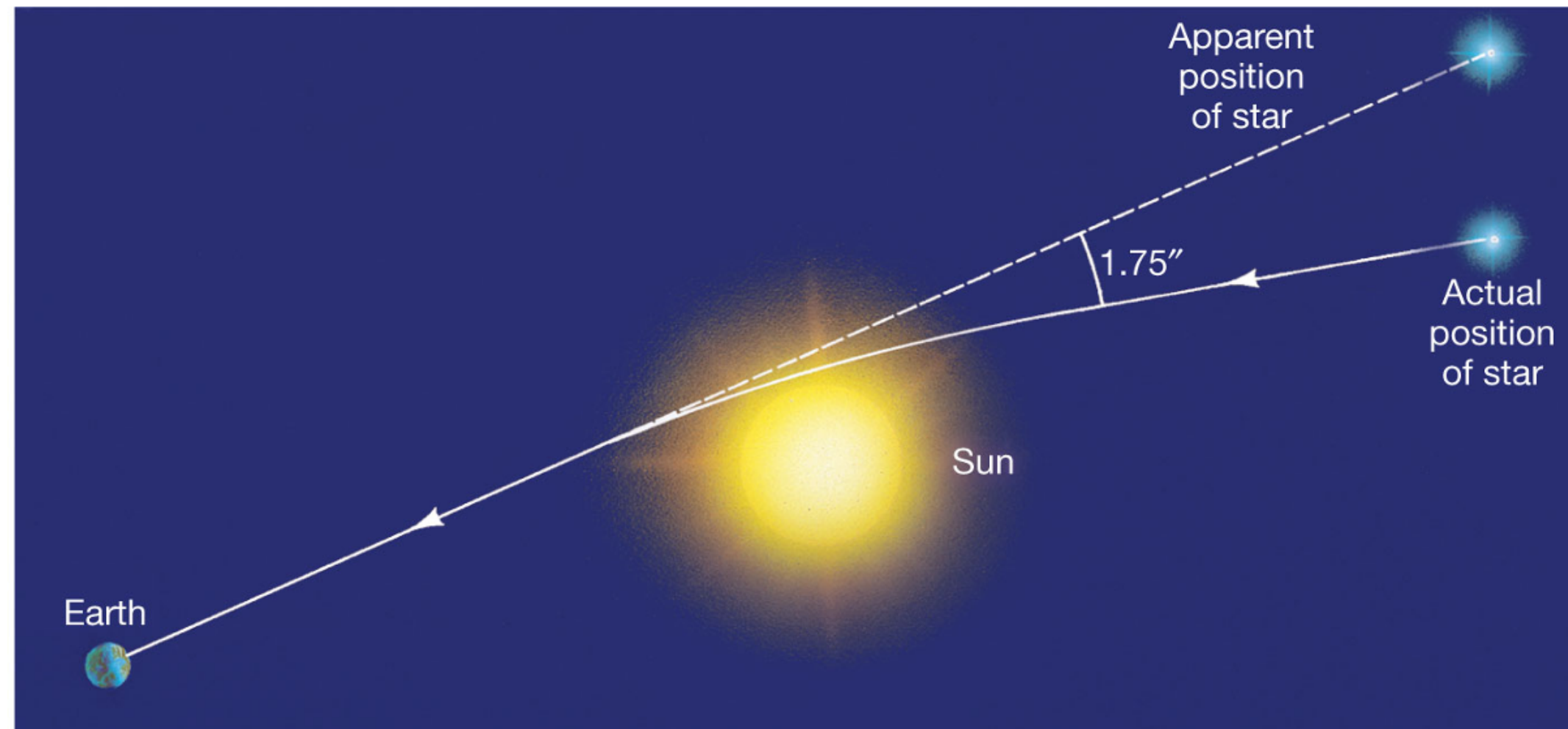
O princípio da relatividade geral e a geometria



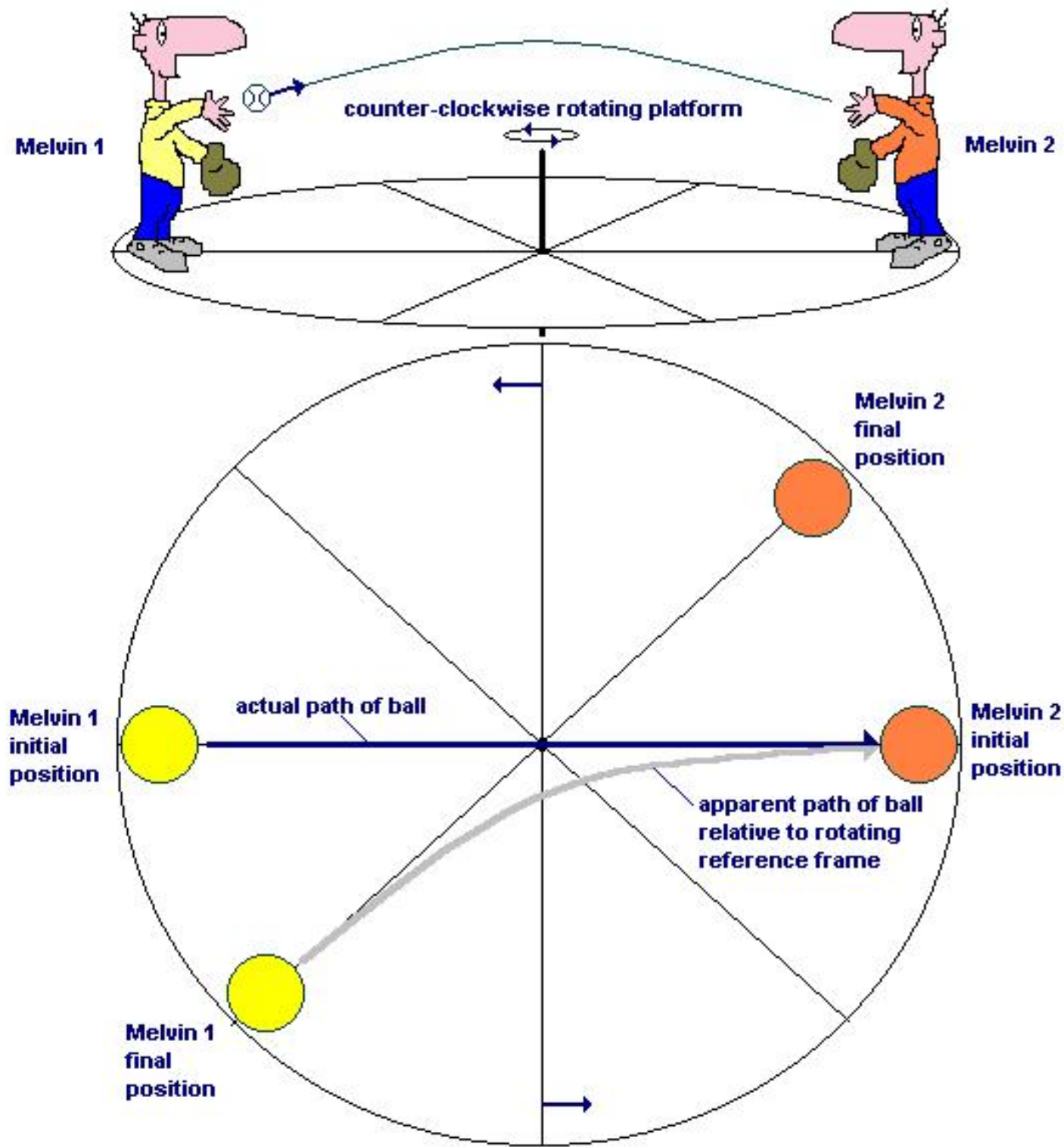
Há portanto um limite para os postulados da relatividade especial: a existência de campos gravitacionais

Referenciais acelerados podem ser interpretados como campos gravitacionais.

Portanto, para entender a gravitação, precisamos entender a natureza do espaço e do tempo.

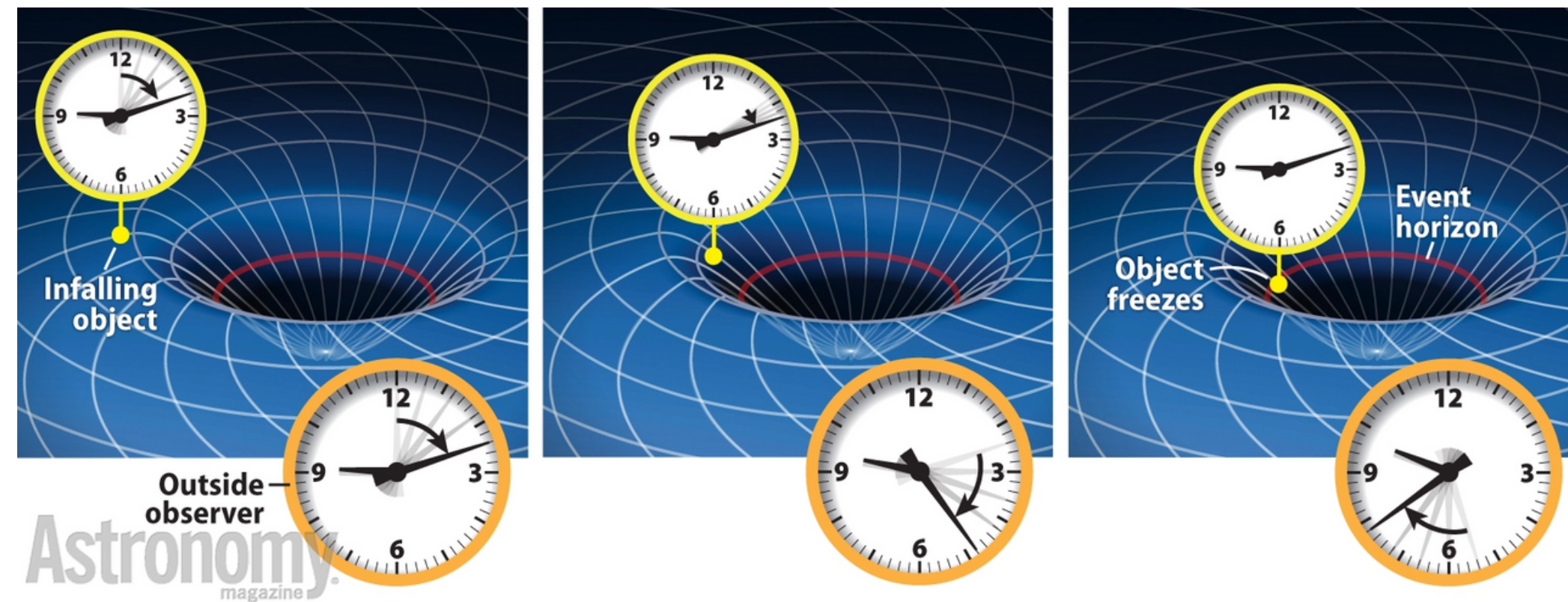


Réguas e relógios no espaço-tempo curvo

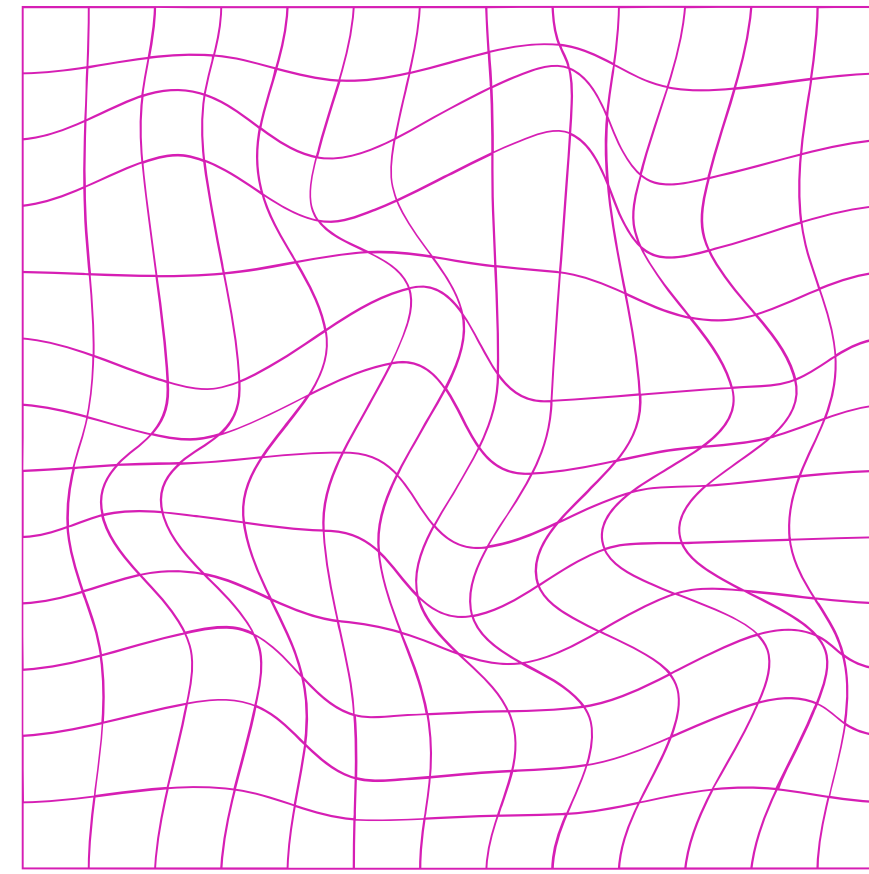
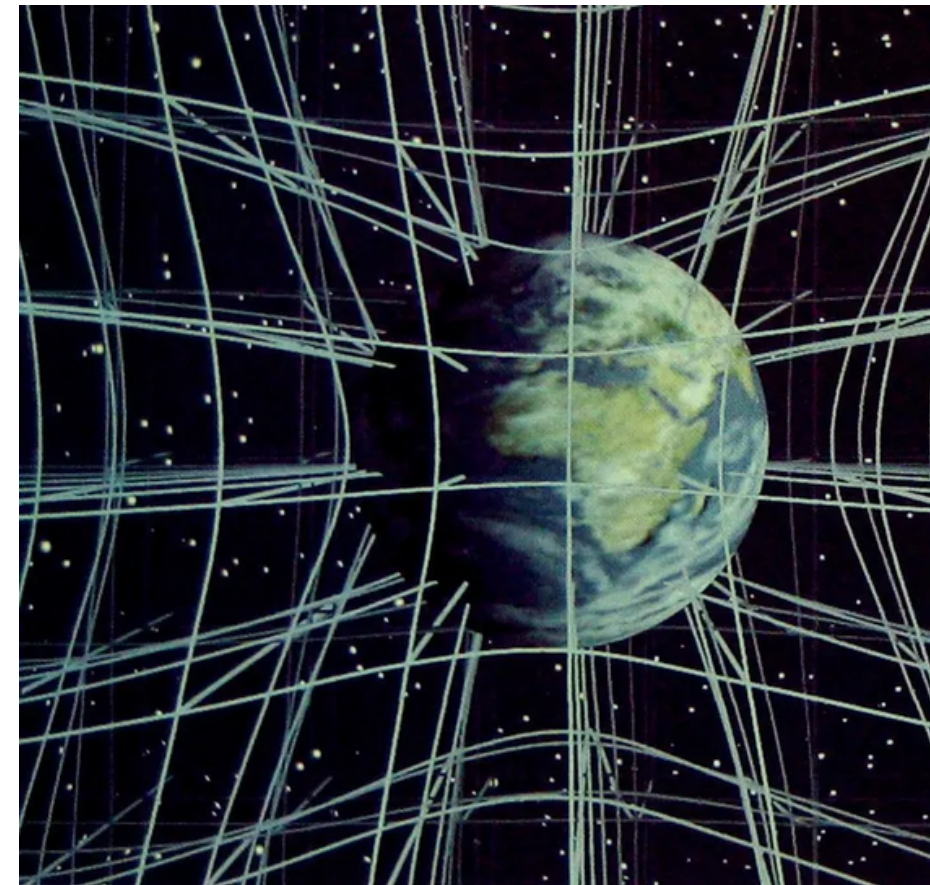
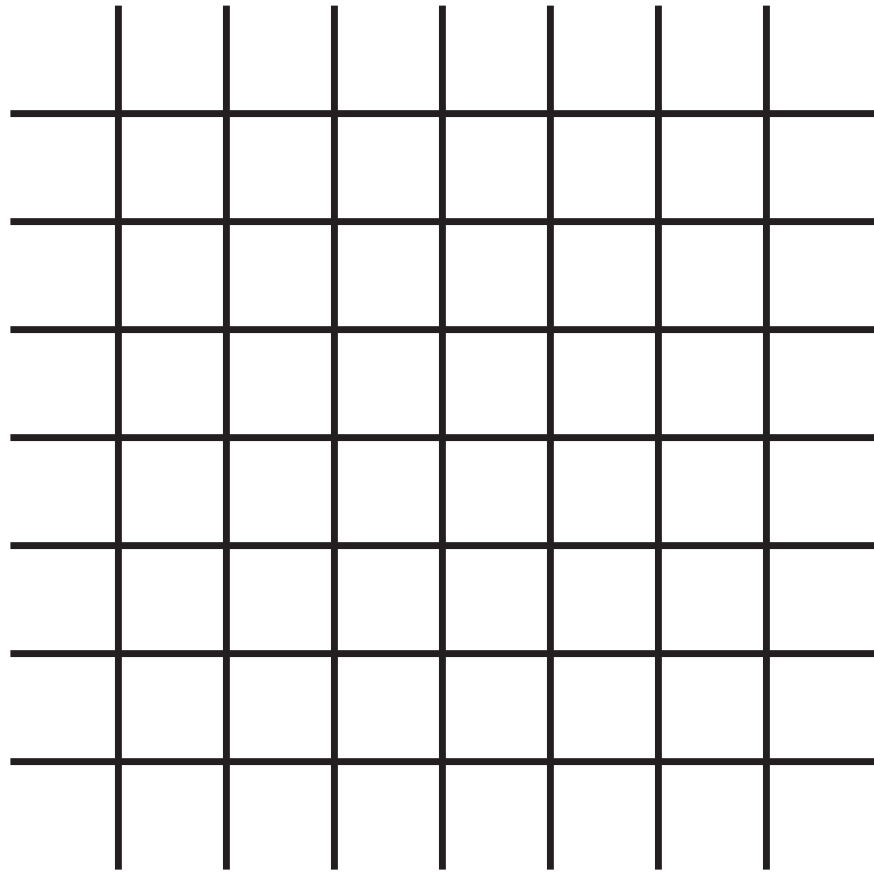


A relação entre comprimento da circunferência medido por alguém que o faz de um referencial galileano e o raio do disco, não resulta em 3,141592...

O tempo de um relógio que está na borda, quando comparado com o tempo marcado por um no centro, passa mais lentamente.



Equação de Einstein



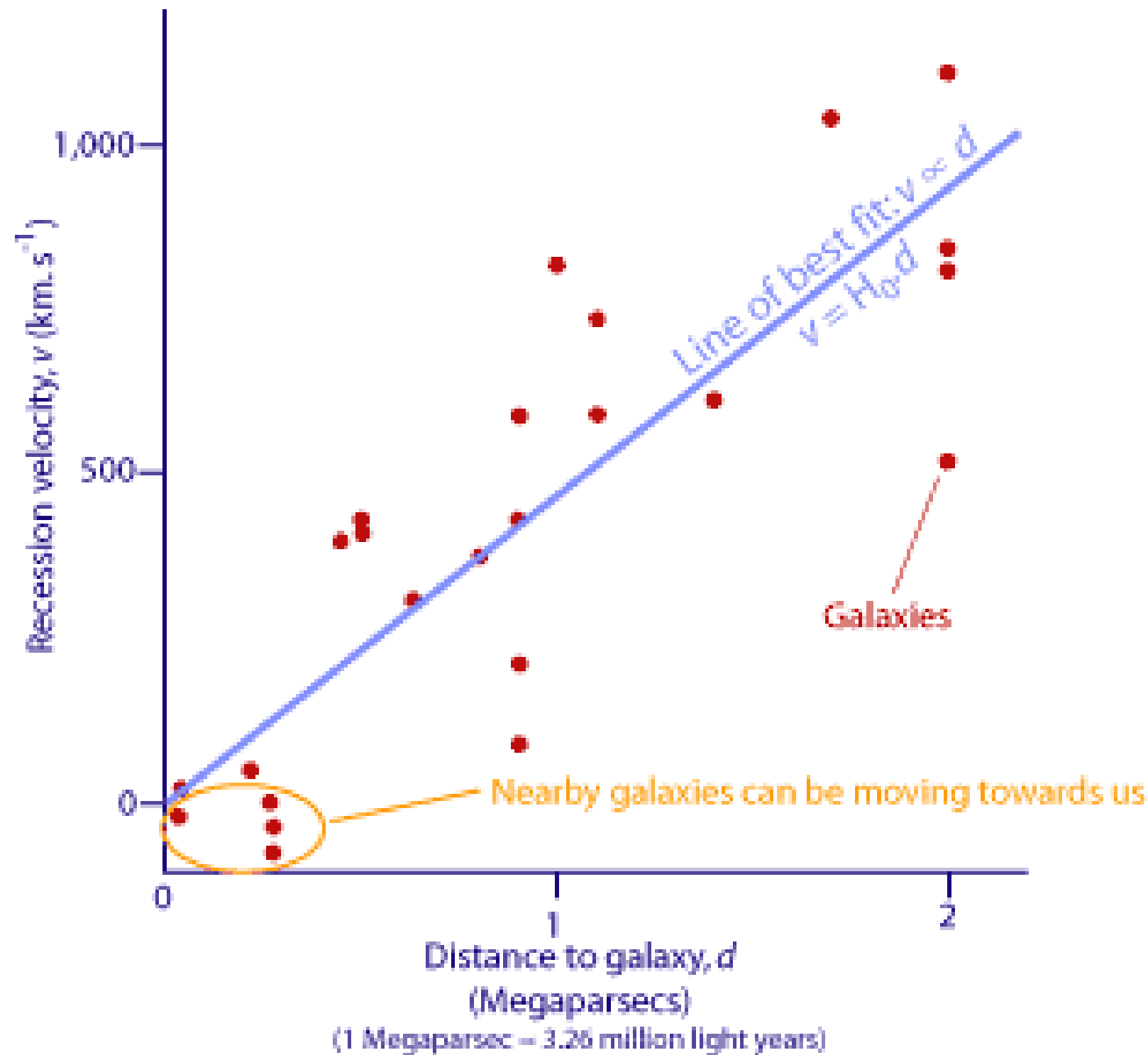
**Física em um
referencial não
inercial**

**Geometria não euclidiana;
espaço-tempo curvo**

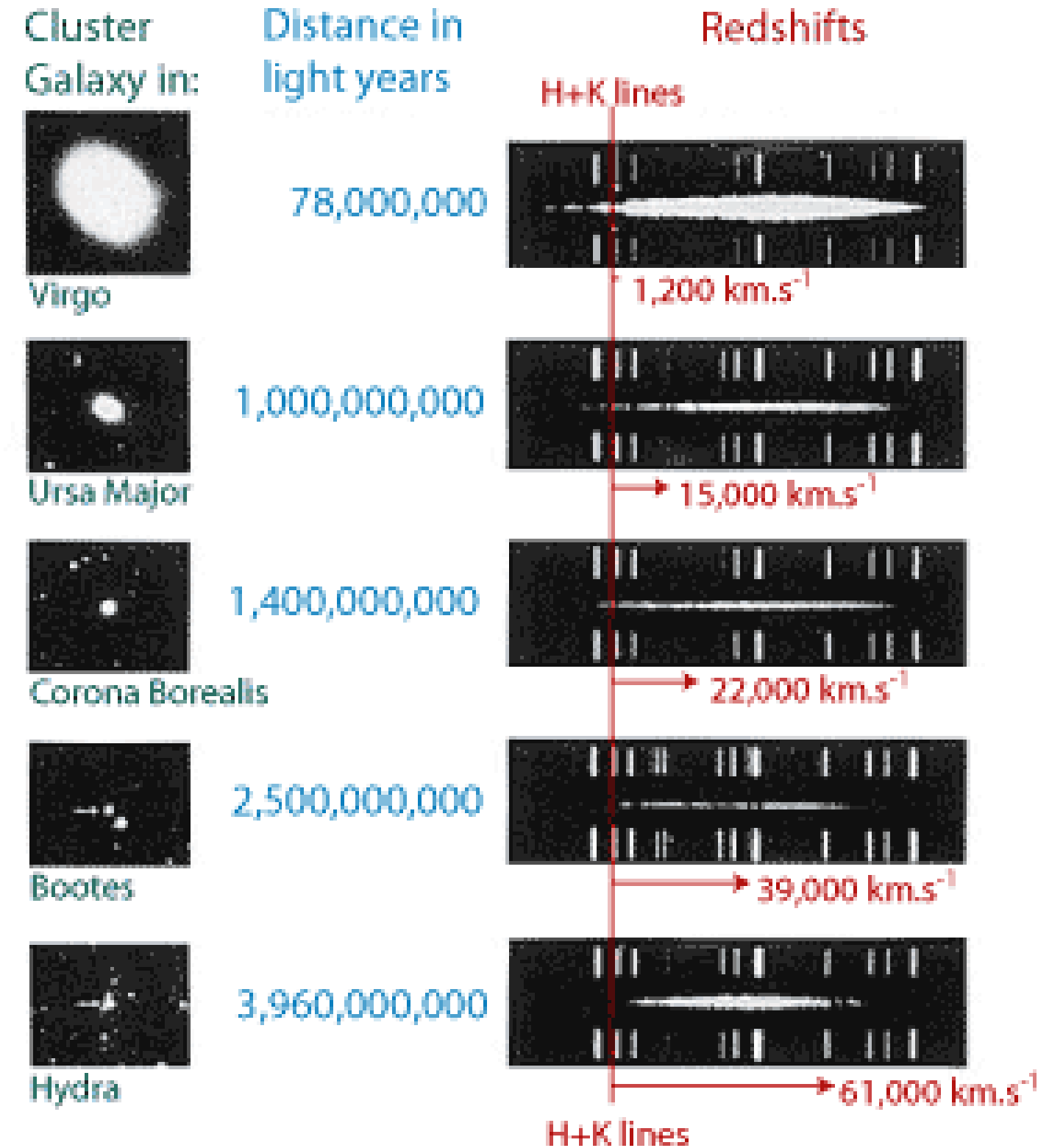
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

A previsão de Hubble

Hubble's Plot of Galaxy Velocity & Distance



Relation Between Redshift and Distance for Distant Galaxies



13.7 Bilhões de anos!

Um pouco de física do ensino médio e a forma do universo

$$E = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{GMm}{r}$$

$$E = \frac{1}{2} m H^2 r^2 - \frac{4\pi G r^2 \rho}{3}$$

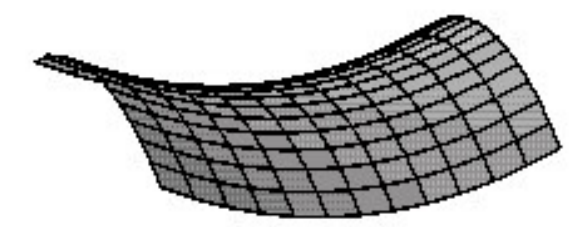
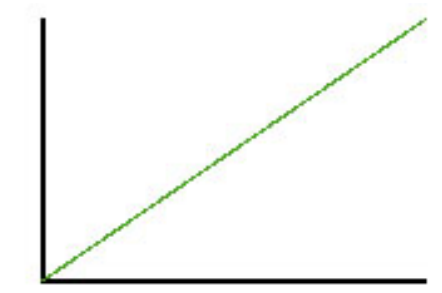
$$\frac{E}{m r^2} = H^2 - \frac{8\pi G \rho}{3}$$

$$\frac{-K}{r^2} = H^2 - \frac{8\pi G \rho}{3}$$

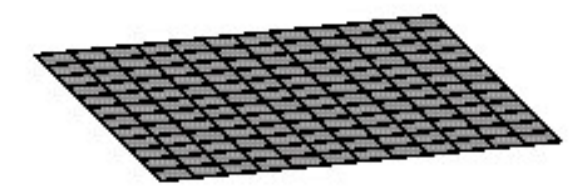
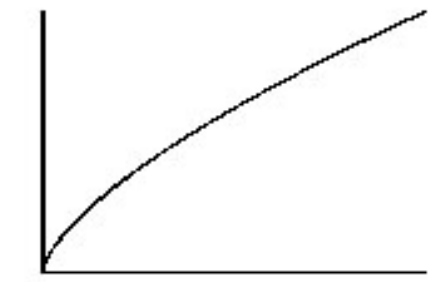
$$K = 0$$

$$K > 0$$

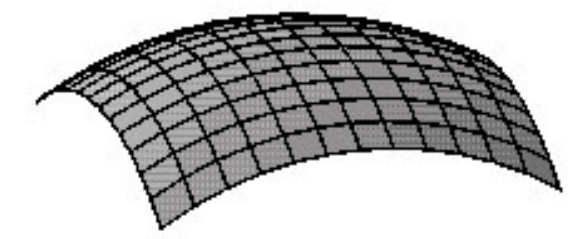
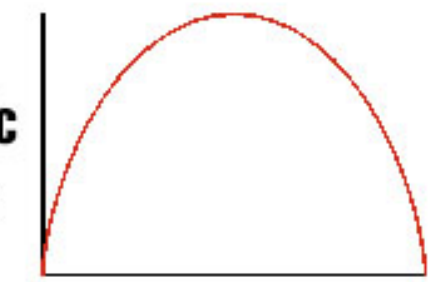
$$K < 0$$



Open



Flat

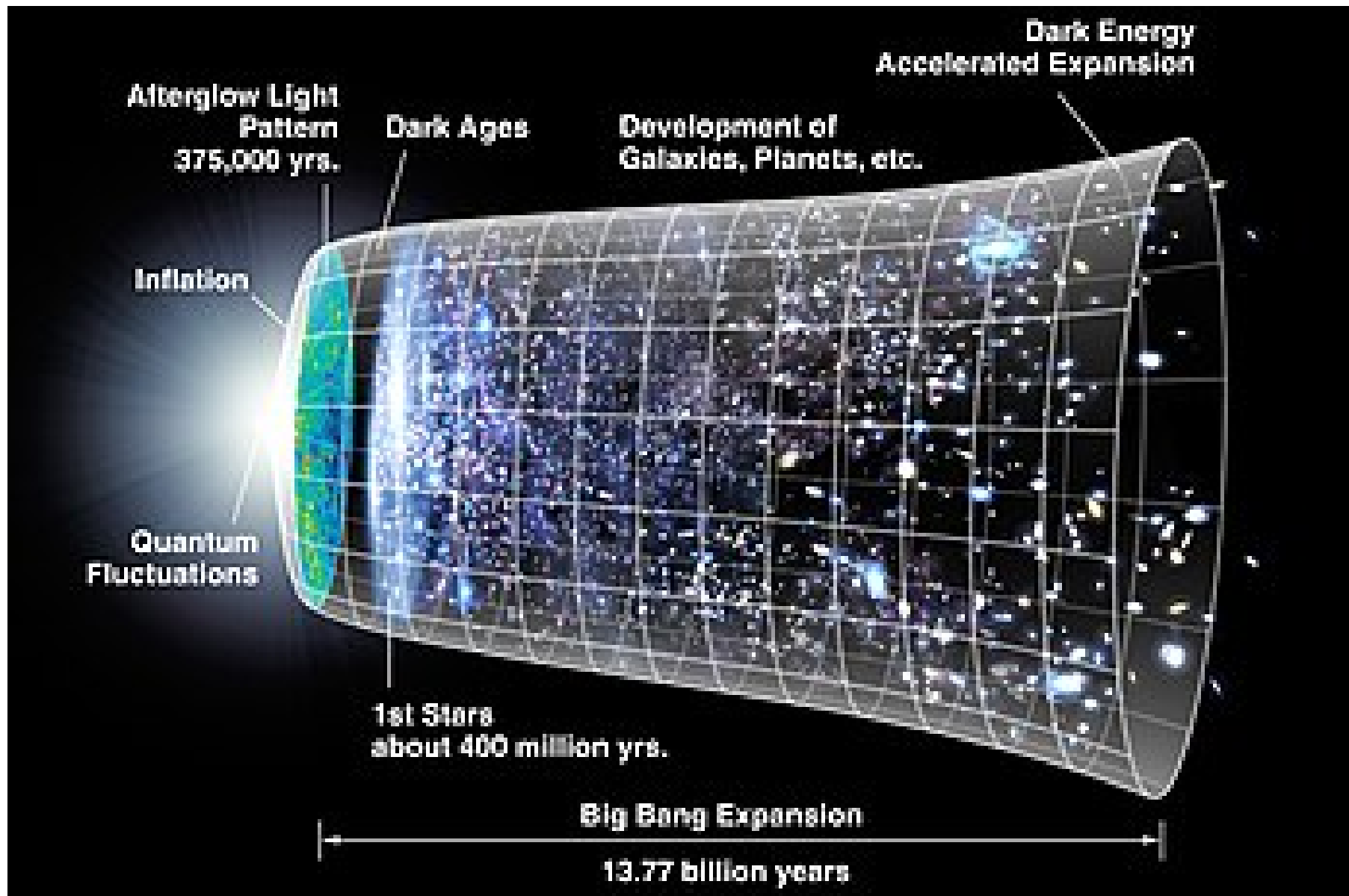


Closed

Cosmic Scale

Cosmic Time

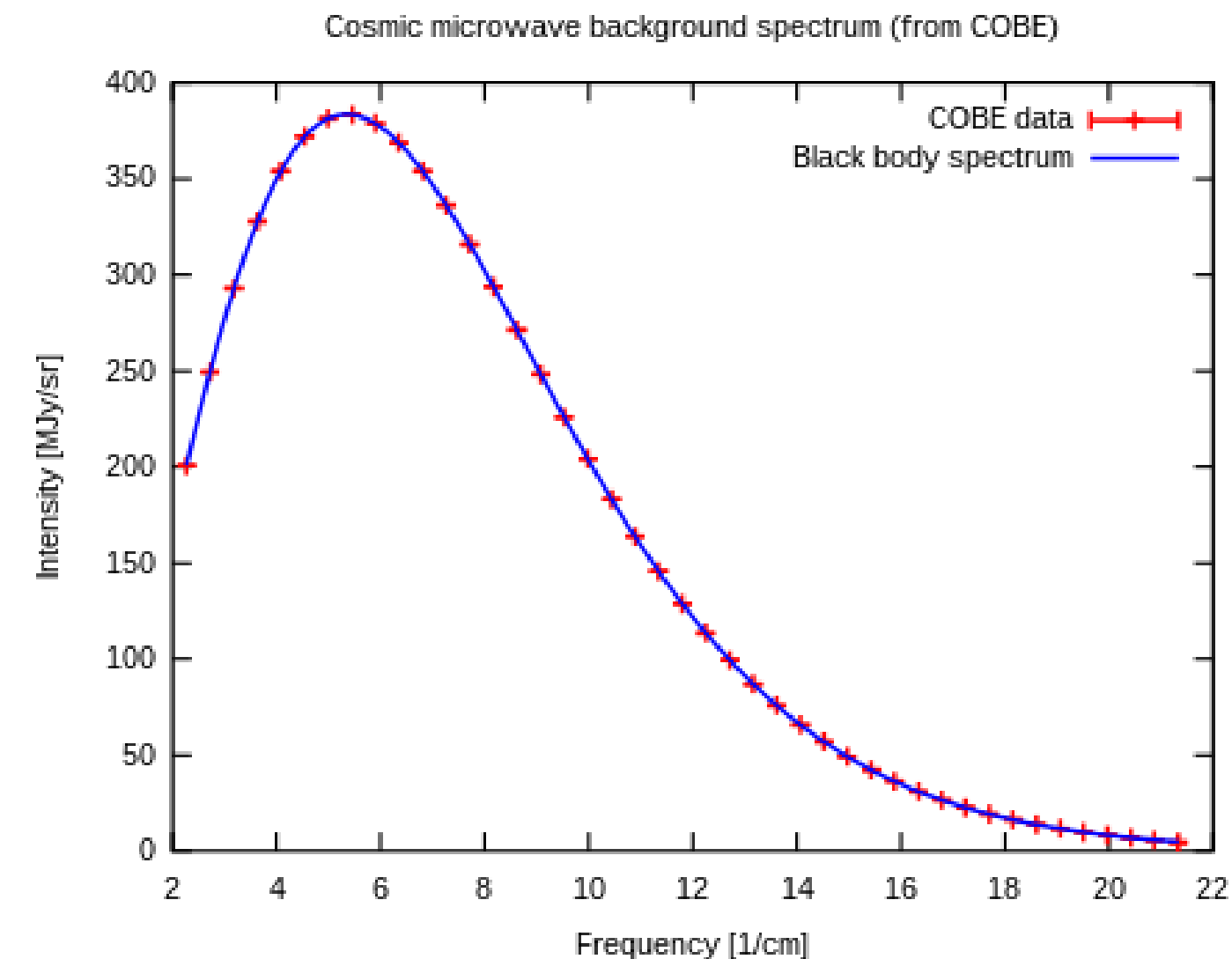
O Grande Bum!



**Relatividade geral +
Hubble: tudo teve um
início(?)**

29: Gamow propõe a radiação cósmica de fundo

65: Penzias e Wilson detectam a CMB



Alguns problemas

Problema do horizonte: a homogeneidade do universo indica que ele deve ter começado assim... o que é muito suspeito! Partes do universo que nunca tiveram contato têm as mesmas propriedades.

Problema da planitude: observações mostram que o universo é plano, $k=0$!

Não há fontes para a formação de estruturas no universo

Só conhecemos 16% da matéria no universo. Sabemos que existe a "matéria escura" mas não sabemos o que é... sabemos que é fria e não colidem!

