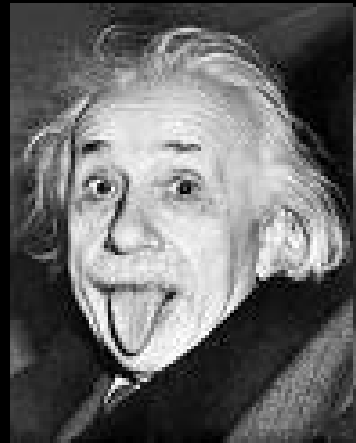


As curvas da luz



Vitor Cardoso (IST, Portugal)

Relatividade Restrita

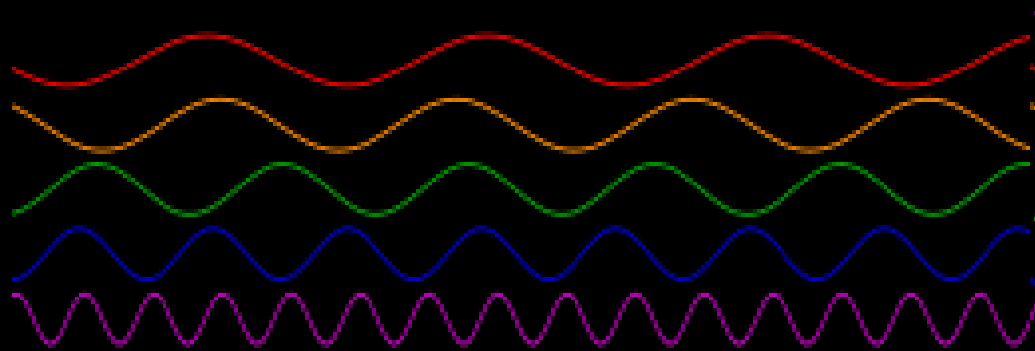
Ondas

Sonoras

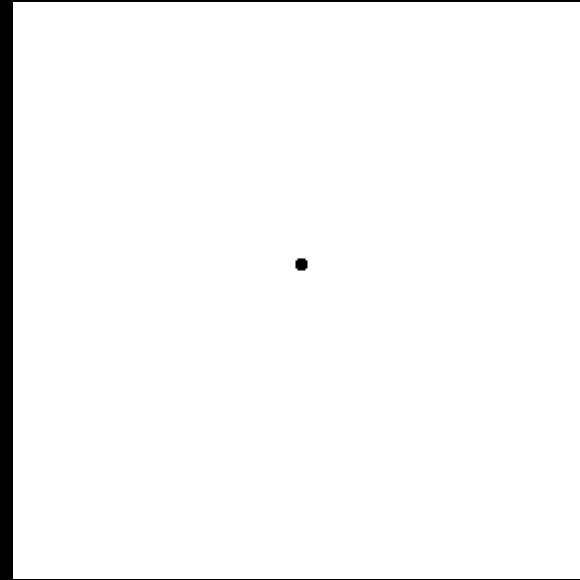
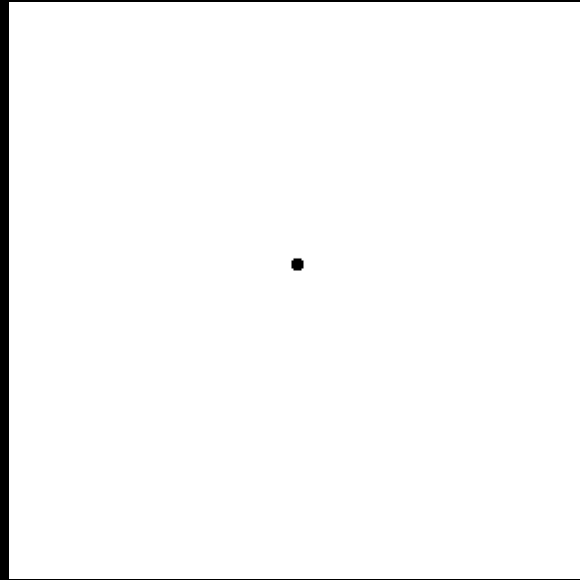


Precisam de
um meio para
se propagarem

De água



Efeito Doppler

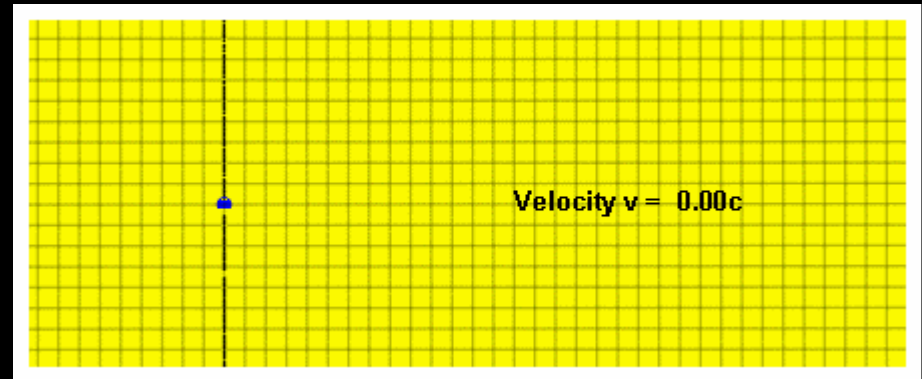
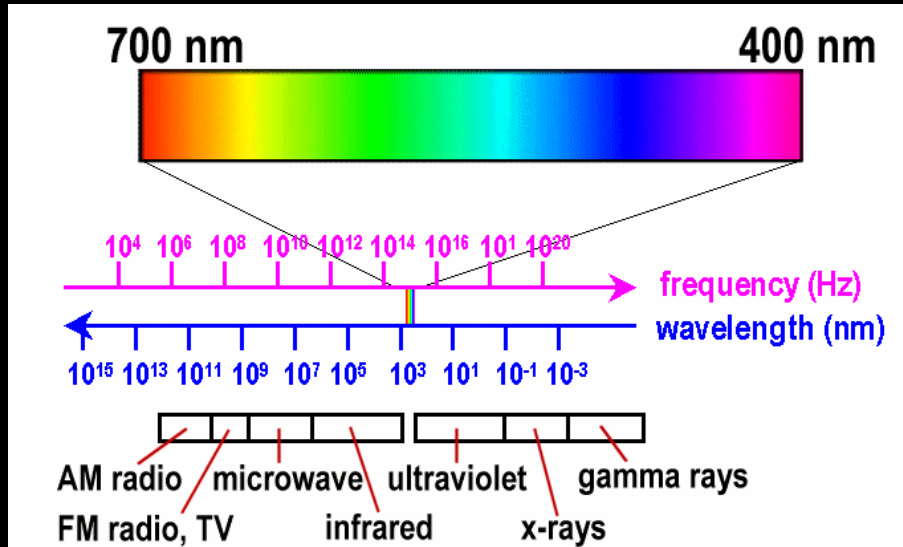




Que acontece se a fonte estiver parada e o observador se aproximar da fonte?

R: Frequência aumenta!

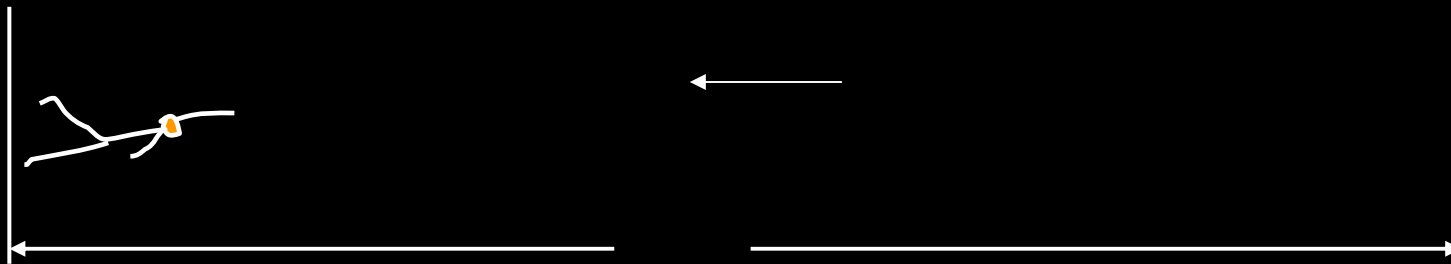
Luz



- Onda electromagnética
- Velocidade $c=300.000$ Km/s
- Efeito Doppler:

Michelson-Morley (1881)

velocidade = 1 m/s corrente=0.5 m/s



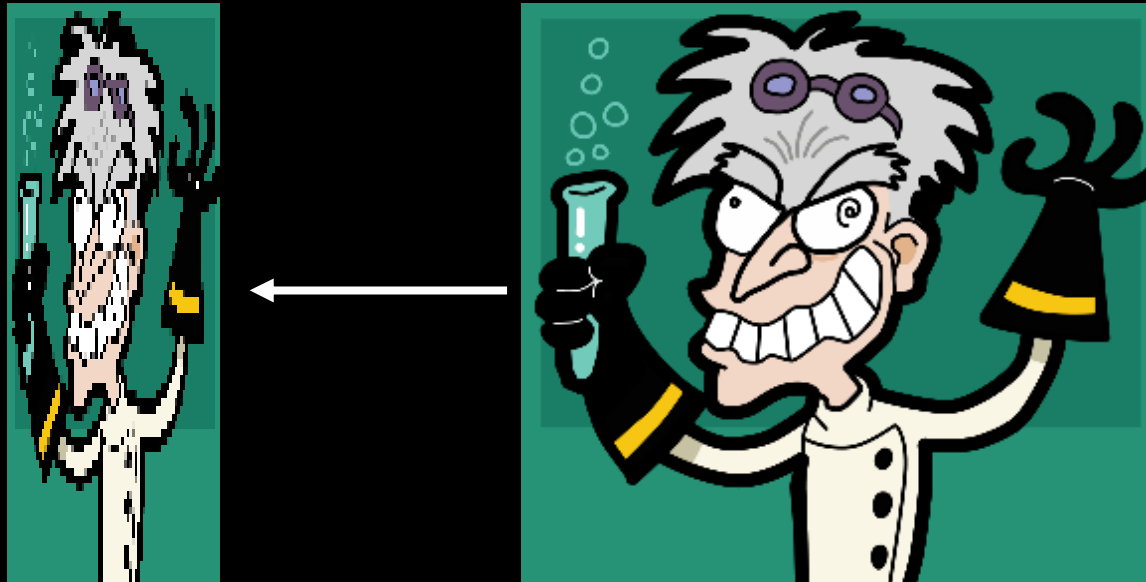
2 Postulados Simples

- “A física é a mesma para todos em movimento uniforme”
 - *O Princípio da Relatividade*
- “A velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos com velocidade constante, independente do movimento da fonte”
 - *Invariância da velocidade da luz*

Contração do espaço

- Objectos em movimento são observados mais pequenos.

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$



Dilatação do tempo

- Relógios em movimento trabalham + devagar:

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

- Foi observado em aviões!



Hafele-Keating (1971)

Viagem à volta da Terra para Este, a cerca de 800 Km/h, ganha-se 0.0001 ms



A Teoria da
Relatividade Geral
(com gravidade)

Gravidade segura tudo e todos na Terra



Até na Australia

Aristóteles (384-322 A.C.):
Coisas pesadas caem + rapidamente



Ioannes Philliponus (~600AC): *"...deixe-se cair da mesma altura dois corpos, um muito mais pesado que o outro....A diferença entre os tempos é muito pequena"*

Giambattista Benedetti (Veneza, 1530-1590)

Simon Stevin (Flamengo, 1548-1620):
Demonstração experimental (1586)

Torre da Igreja de Delft



Galileo (1564-1642): (chegou a Pisa 1589)





Então e uma pena a cair?

R: Efeitos do ar...

Isaac Newton (1642-1727):

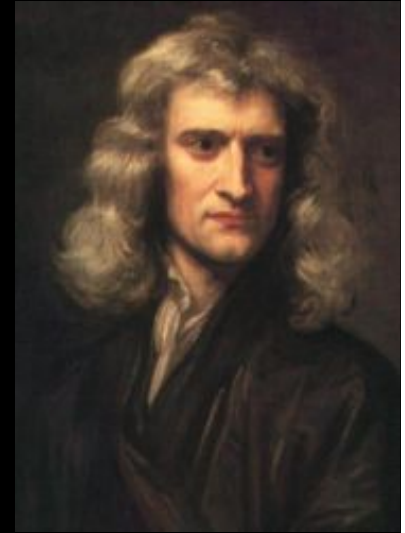
Principia (1687):

$$\vec{F} = m_i \vec{a}$$

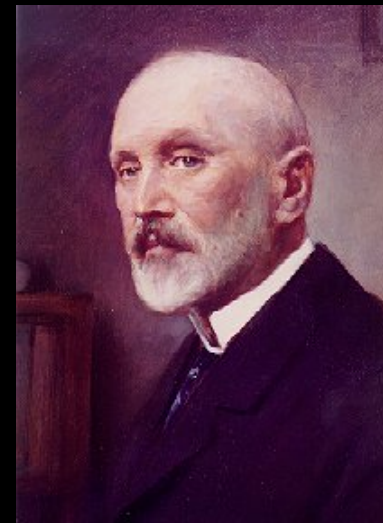
$$\vec{F} = m_g \vec{g}$$

$$m_i = m_g$$

Newton : pêndulo de madeira, ouro, prata, chumbo, etc
Equivalência entre massa inercial e gravitacional $\sim 10^{-3}$.



Roland von Eotvos (1848-1919):
balança de torsão (1889, 1908)
demonstra equivalência $\sim 10^{-9}$.



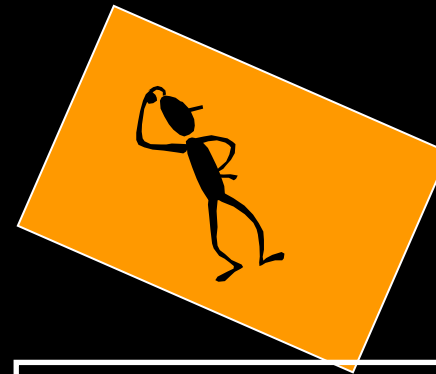
Princípio de Equivalência

Elevador
caindo
livremente



g

=

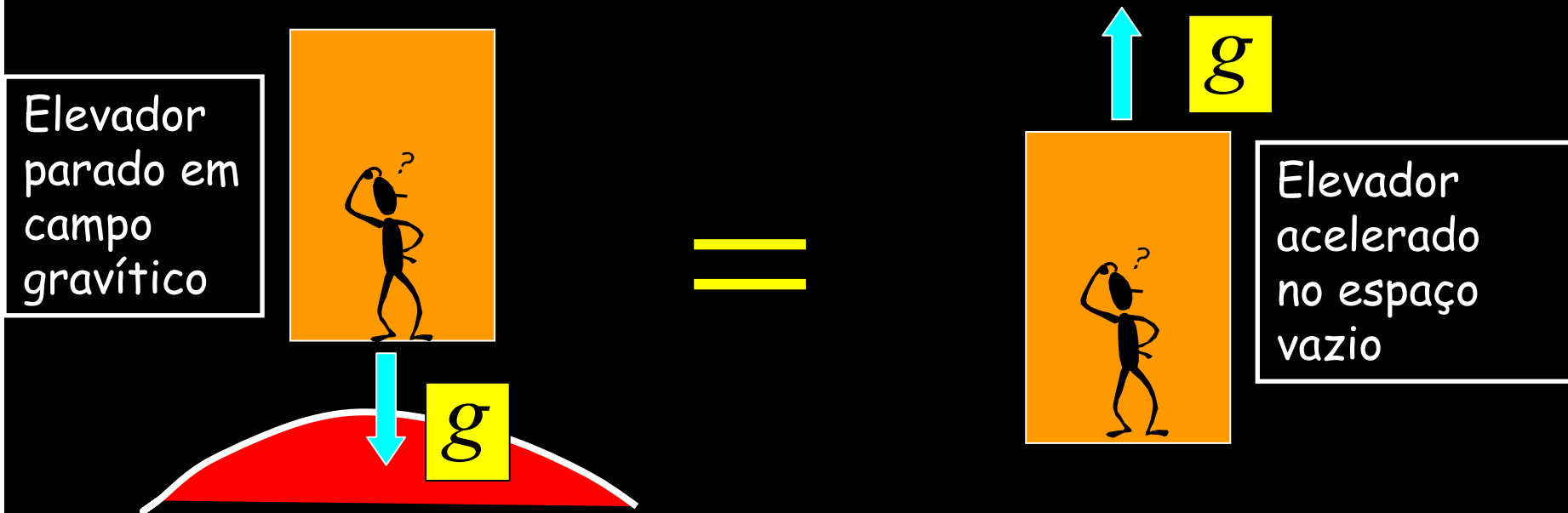


Elevador em espaço
vazio com velocidade
constante

Princípio Equivalência



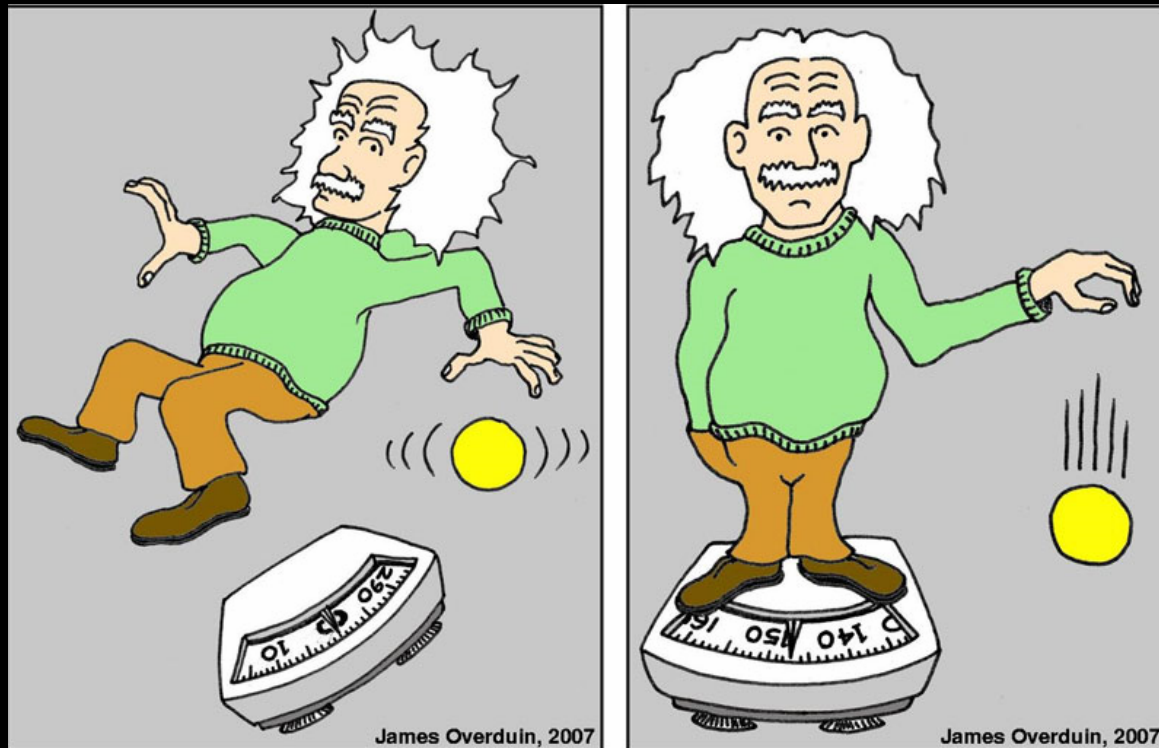
Princípio de Equivalência



Einstein: Não há nenhuma experiência que consiga distinguir entre um campo gravítico e um campo de acelerações

Princípio de Equivalência: Einstein 1907

As leis da mecânica são as mesmas em todos os referenciais em queda livre. A gravidade é indistinguível de qualquer outra aceleração.



O Einstein está no espaço vazio ou num campo gravítico?

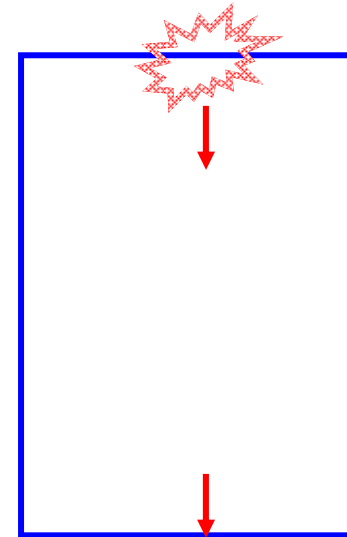
R: Não sabemos!

Consequências I: desvio para o vermelho

Experiência:

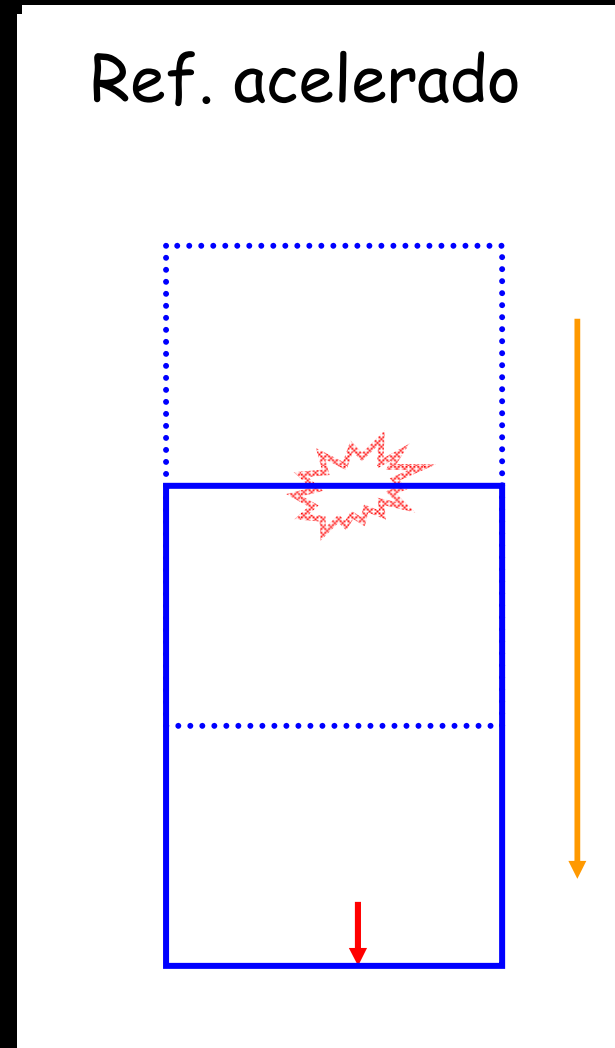
- Acender lanterna no topo de um elevador
- Detector no fundo
- **Referencial em queda livre:** detector vê a luz tal como foi emitida, em particular com a mesma frequência (cor)

Ref. queda livre



Consequências I: desvio para o vermelho

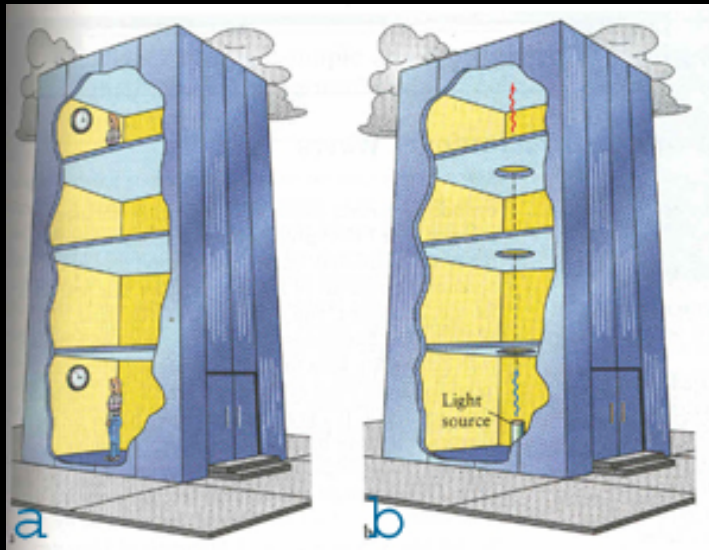
- Luz viaja do topo para o fundo
- Durante a viagem, o elevador é acelerado e afasta-se com velocidade v da luz
⇒ luz fica mais vermelha
- Princípio da Equivalência:
gravidade provoca desvio para o vermelho da luz



Consequências I: desvio para o vermelho

- Luz a "trepar" campo gravitacional fica mais vermelha
- Luz a cair na gravidade fica mais azul

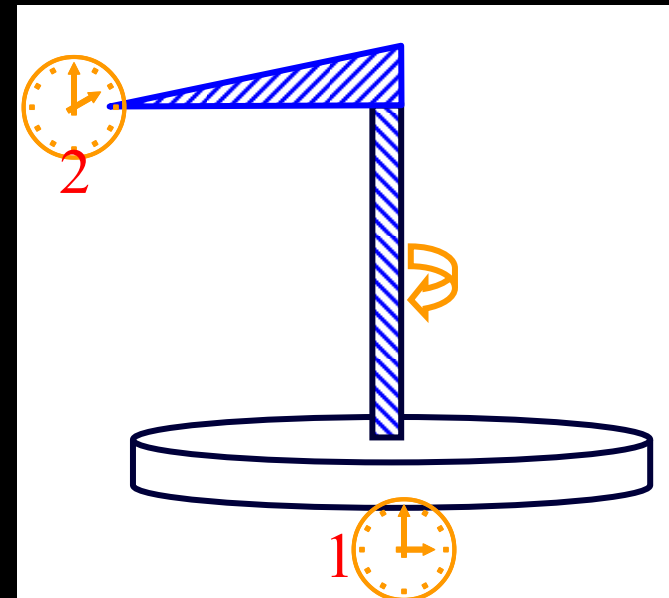
Pound-Rebka (1959)



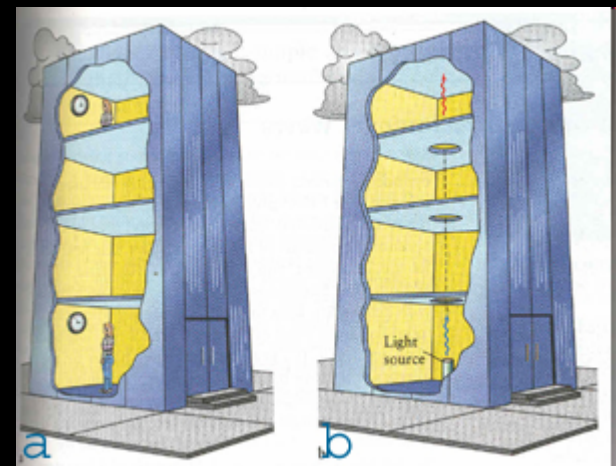
Laboratório de Jefferson, em Harvard

Consequências II: dilatação do tempo

- Relógio 2 move-se com v
⇒ dilatação do tempo
(move-se + devagar)
- Relógio 2 também está acelerado



- Princípio Equivalência:
⇒ Dilatação gravitacional do tempo
De outra forma: se relógio for
a luz, vermelho significa que
bate mais devagar

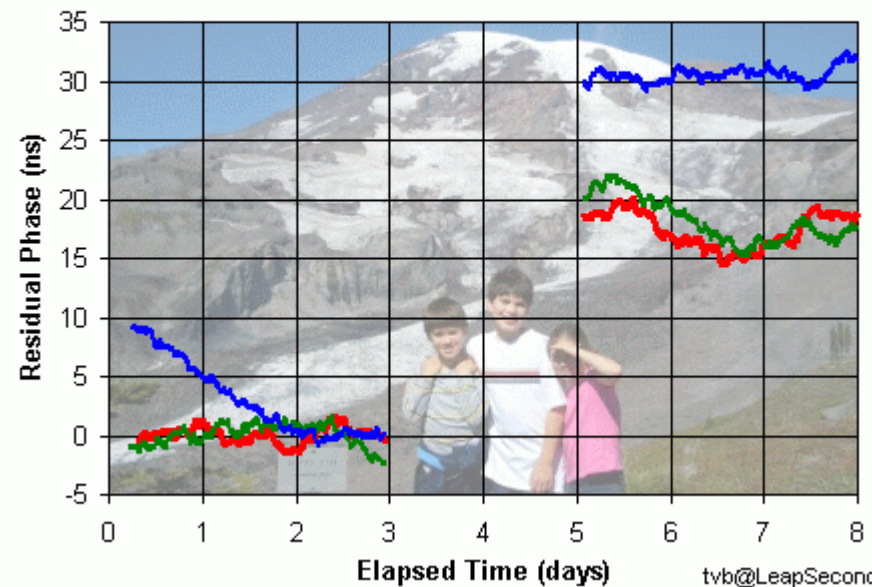


<http://leapsecond.com/great2005/tour/>



GREAT²

Project GREAT - Relativity on Mt Rainier
Three Cesium Clocks: **Red** **Green** **Blue**



www.LeapSecond.com/great2005

tvb@LeapSecond.com

Consequências II: como viver durante 1000 anos!

- Ir para onde a gravidade é muito forte! Por exemplo, buraco negro...



Observador terrestre vê o relógio do astronauta a andar muito muito lentamente \Rightarrow o astronauta envelhece muito lentamente

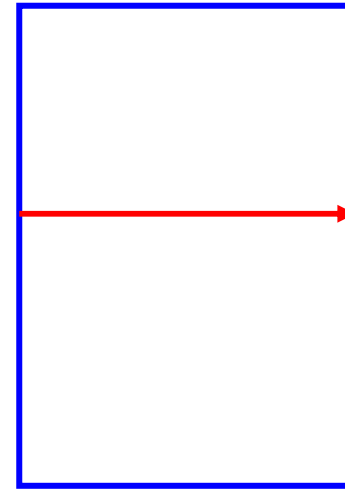
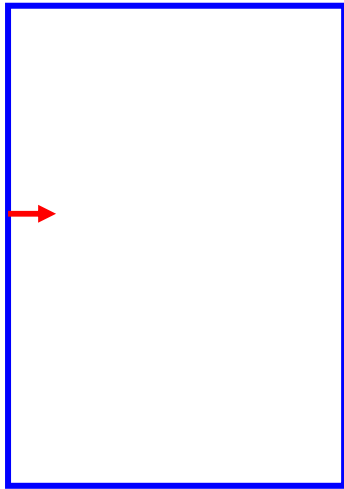
Consequências II: Global Positioning System (GPS)



- Sistema de satélites a emitirem sinais
- Detector na Terra recebe o sinal
- Mede diferença de tempo entre recepção dos sinais

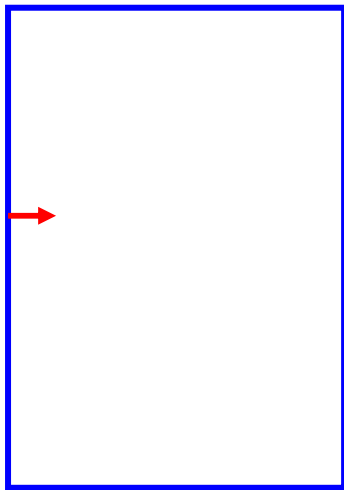
Se efeitos do abrandamento do tempo não fossem tidos em consideração, GPS errava por quilómetros!

Consequências III: gravidade atrai a luz

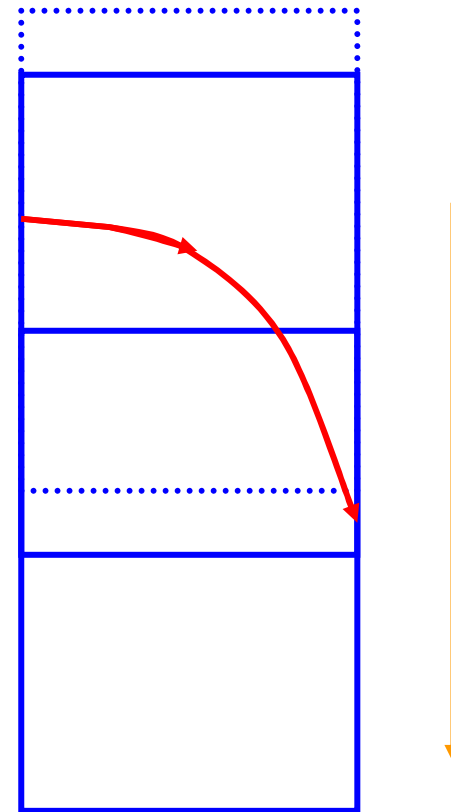


Observador num referencial em queda livre

Consequências III: gravidade atrai a luz



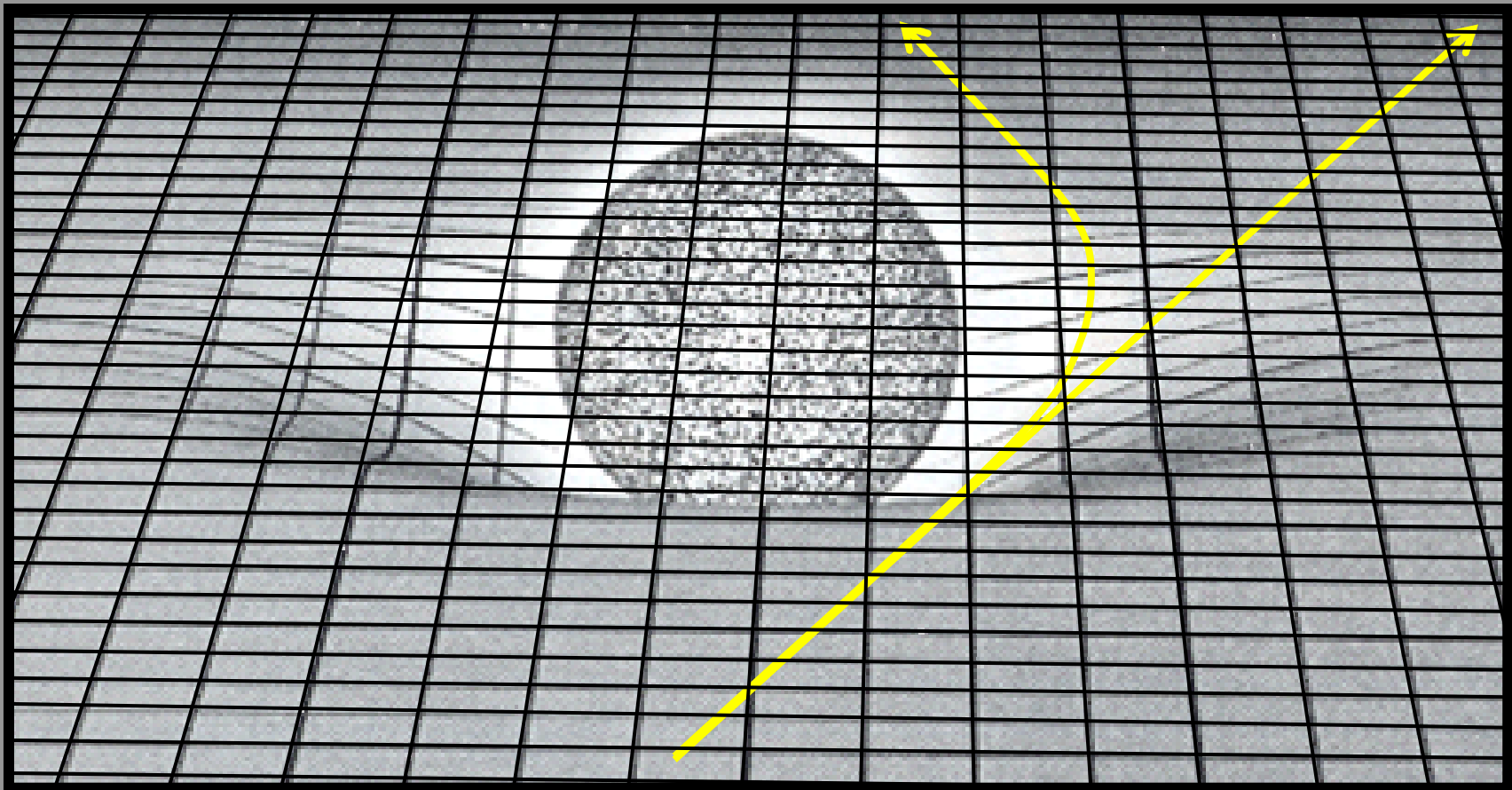
Princípio Equivalência:
Referencial acelerado é
equivalente a gravidade





A gravidade atrai a luz!

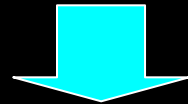
Consequências III: gravidade atrai a luz



Massa-Energia

$$E = mc^2$$

Gravidade extrai energia de matéria que tente escapar



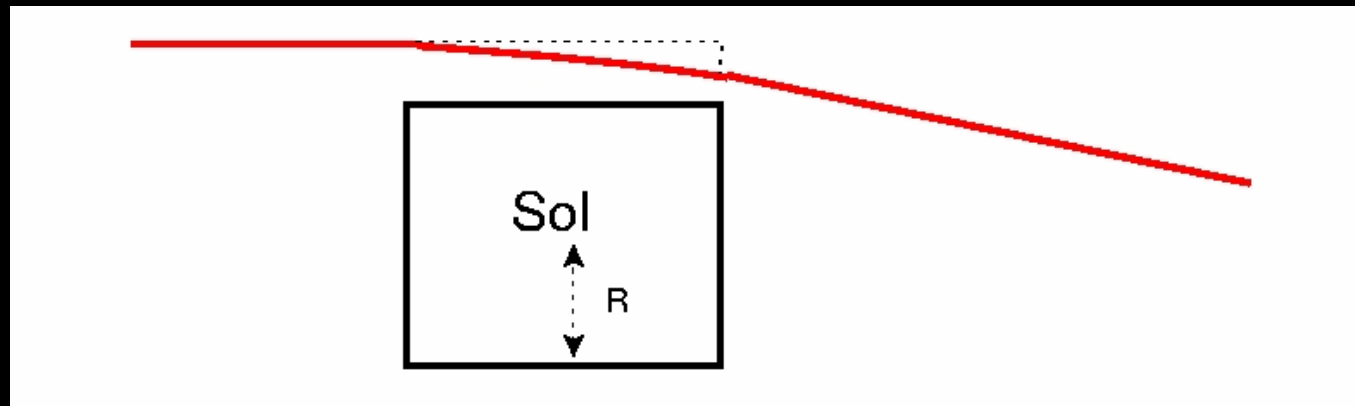
Gravidade extrai energia de luz



Desvio para o vermelho, dilatação do tempo

Outros pontos de vista \longrightarrow mesmo resultado final

Consequências III: gravidade atrai a luz



Tempo que leva a percorrer $2R$:

$$2R/c$$

Distância que cai nesse tempo:

$$1/2g t^2 = 2g R^2/c^2$$

Logo, ângulo:

$$gR/c^2 = GM/Rc^2$$

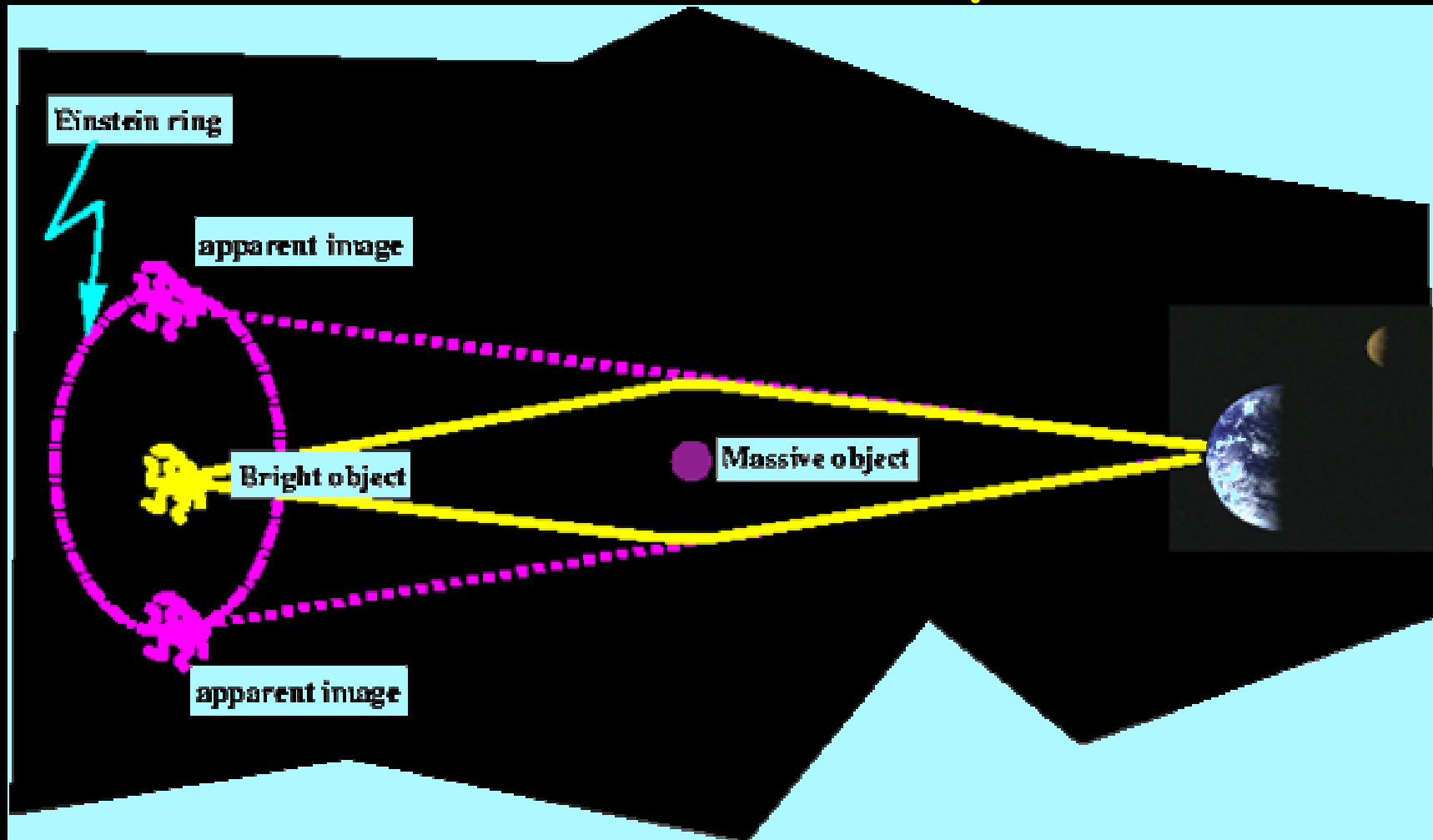
Para o Sol ($M= 2 \times 10^{30}$ Kg e $R=7 \times 10^8$ m): $1.7''$ (segundos d'arco)

Consequências III: gravidade atrai a luz

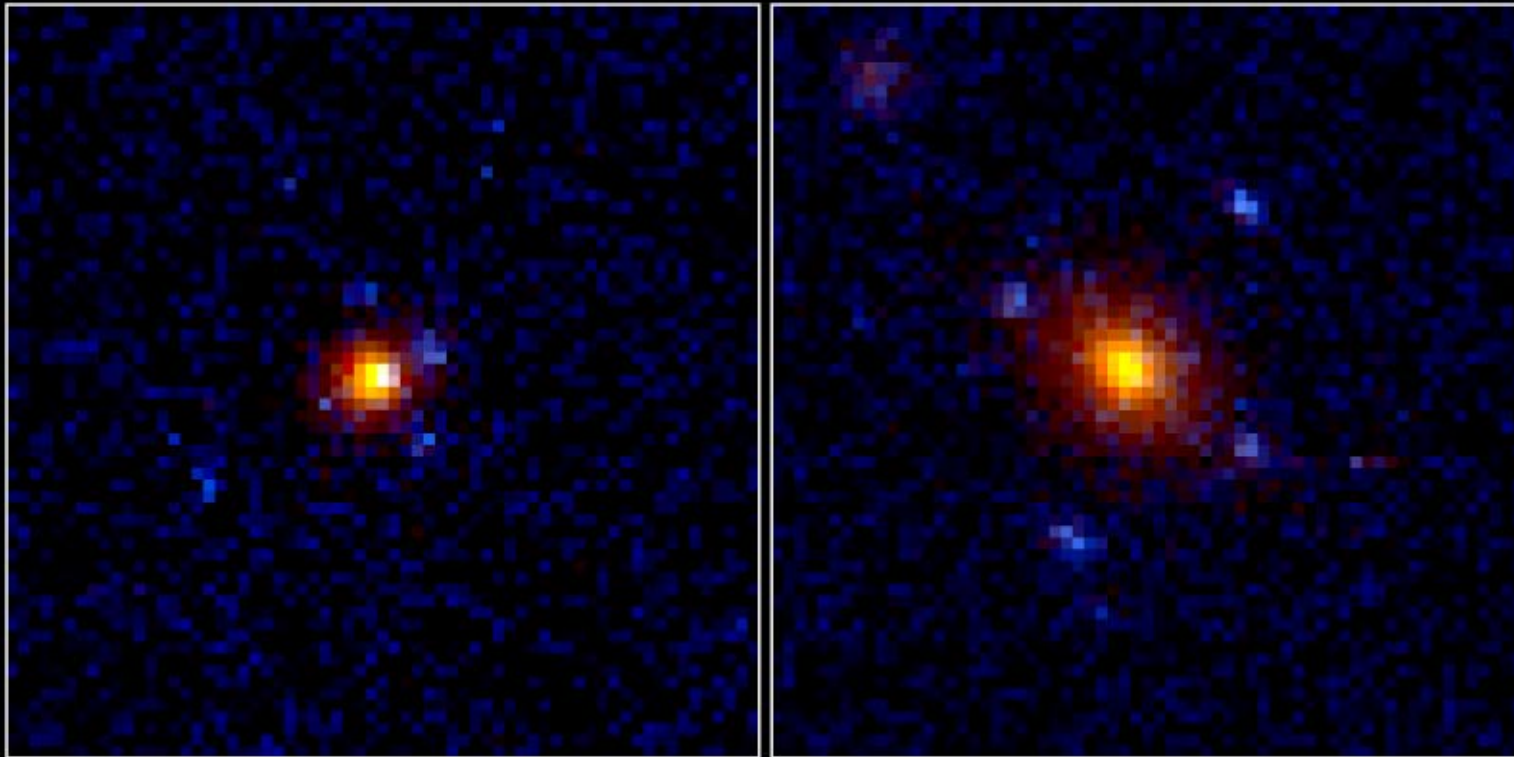


Placa na Roça Sundy

Outros Exemplos



Exemplos

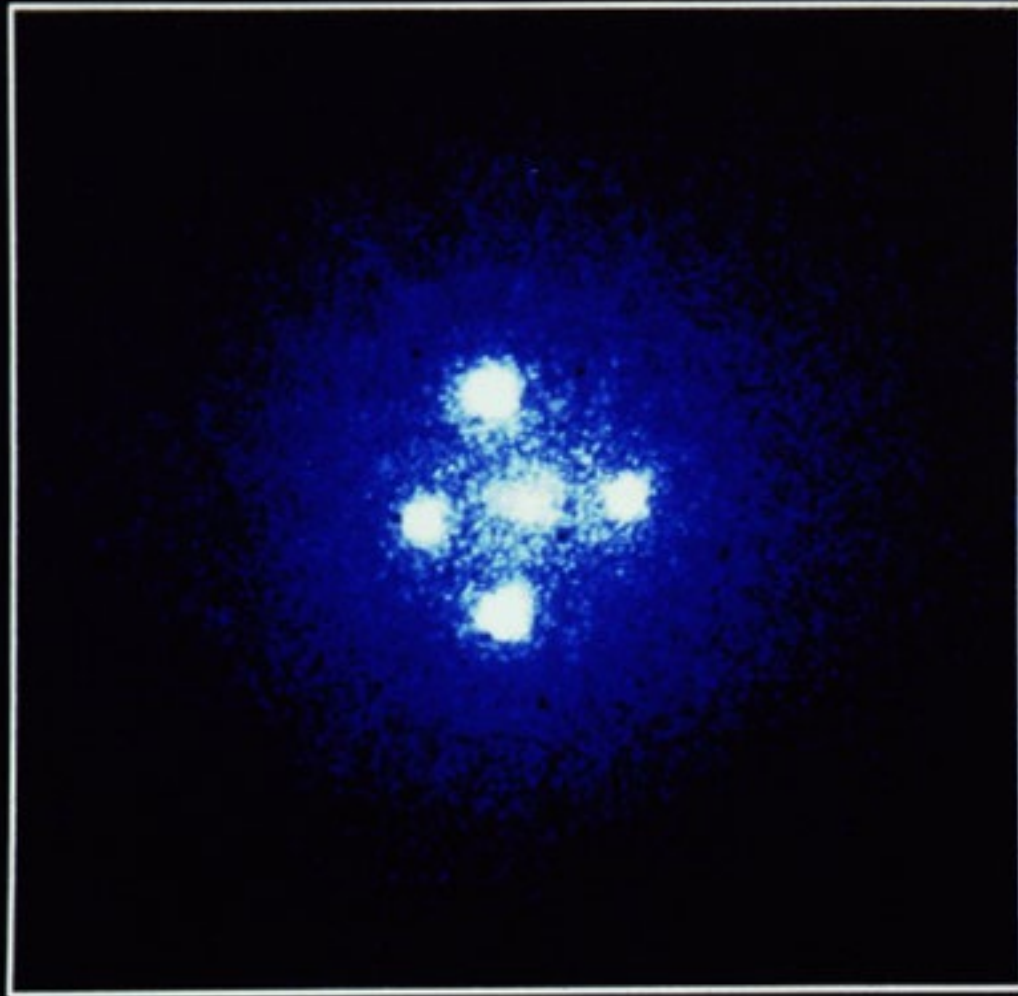


Gravitational Lenses

HST · WFPC2

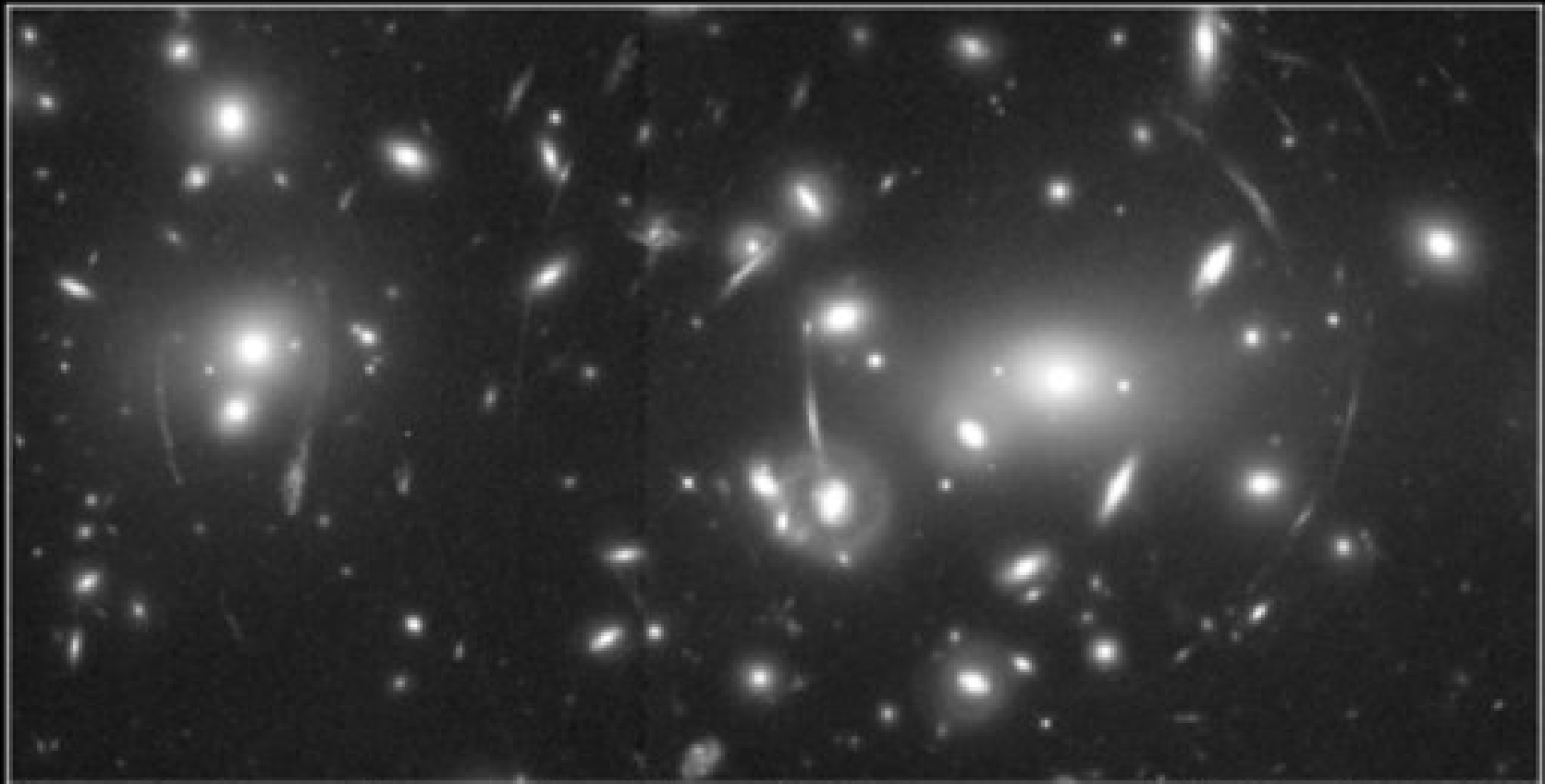
PRC95-43 · ST ScI OPO · October 18, 1995 · K. Ratnatunga (JHU), NASA

Exemplos



Gravitational Lens G2237+0305

Exemplos

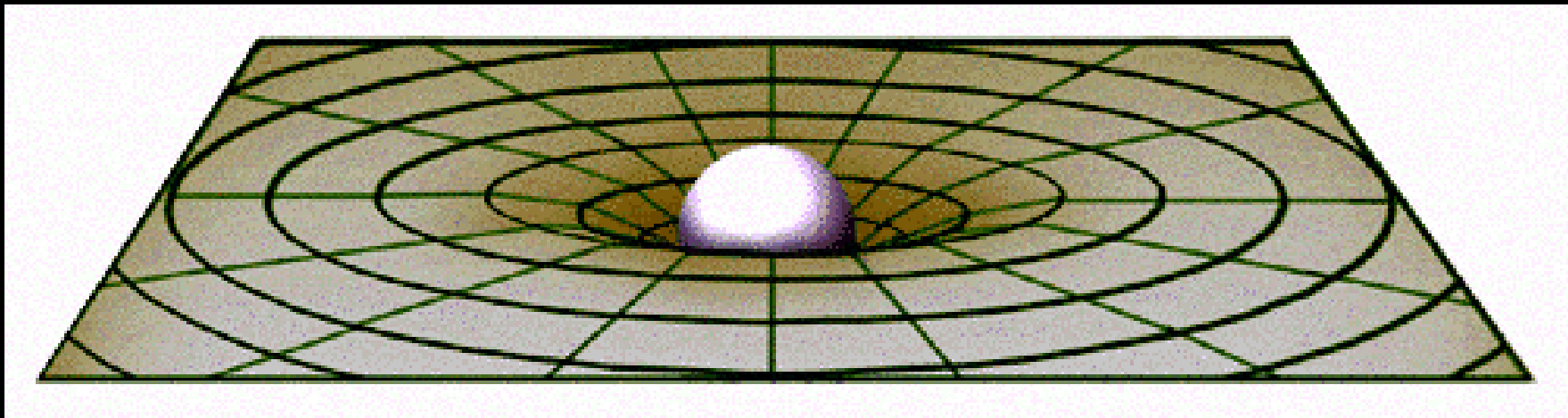


Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

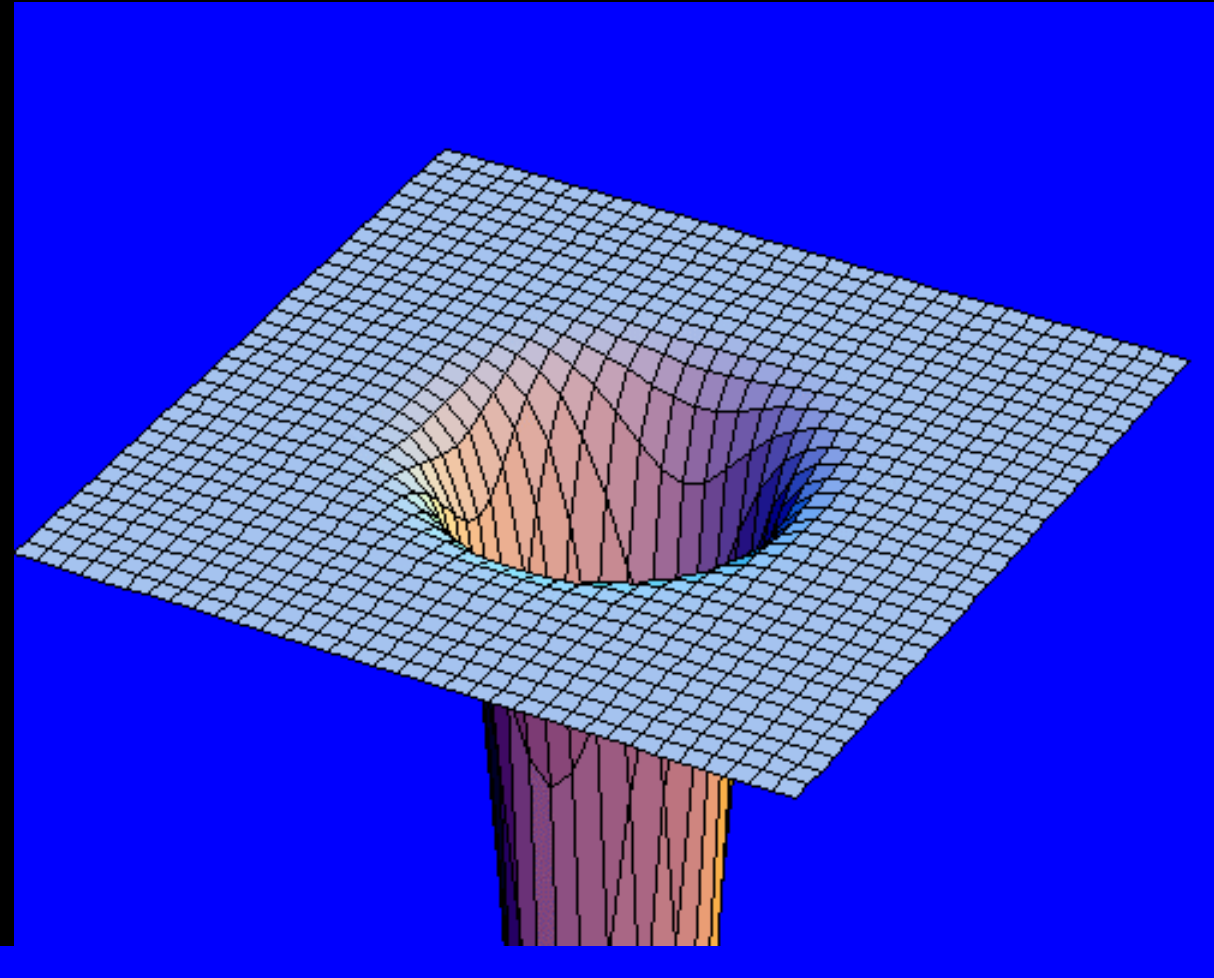
PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

A massa curva o espaço-tempo



Obrigado

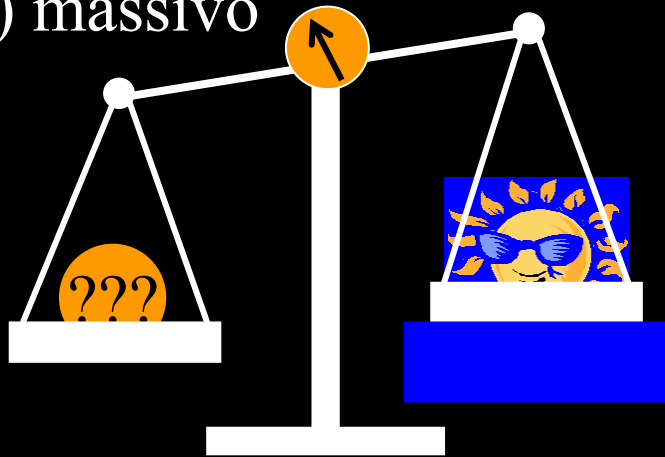
Buracos Negros



Buracos Negros

- Tempo flui *devagar* perto de corpos massivos, espaço é "esticado" (circunferência $< 2\pi R$)
- Crítico: razão *circunferência/massa* do objecto. Se razão for pequena, efeitos de RG são grandes (i.e., mais massa na mesma região ou mesma massa em região mais pequena)

1) massivo



2) pequeno



O Raio de Schwarzschild

- RG prevê: Se massa estiver dentro de circunferência mais pequena que certo comprimento

The diagram shows the inequality $Circumference < 2M \cdot \frac{2\pi G}{c^2}$ on a blue background. Annotations include: 'Circunferência crítica' pointing to the word 'Circumference'; 'mass' pointing to '2M'; 'Constante gravitacional' pointing to 'G'; and 'Velocidade Da luz' pointing to 'c^2'.

$$Circumference < 2M \cdot \frac{2\pi G}{c^2}$$

O espaço-tempo na vizinhança muda consideravelmente. Um observador longe do objecto vê raio crítico em

The diagram shows the formula $R_s = \frac{2GM}{c^2} = 3(M / M_{Sun}) \text{ kilometers}$ on a blue background. An annotation 'Raio de Schwarzschild' points to the variable R_s .

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} = 3(M / M_{Sun}) \text{ kilometers}$$

- A **dilatação do tempo** torna-se infinita nesta superfície.

Buracos Negros

- Para um observador longínquo e parado, o correr do tempo na superfície crítica (em R_S) abranda *infinitamente*.
- Luz emitida perto desta superfície é muito desviada para o vermelho (frequências mais baixas) e mesmo na superfície, o desvio é *infinito*.

