

O que é a Relatividade Geral ?



Felipe Tovar Falciano

página pessoal www.cbpf.br/~ftovar



PPGCosmo



*Centro Brasileiro de
Pesquisas Físicas – CBPF
Coordenação COSMO*



*PPGCosmo - UFES
International PhD Program
14 institutions in 9 countries*

O que é a Relatividade?

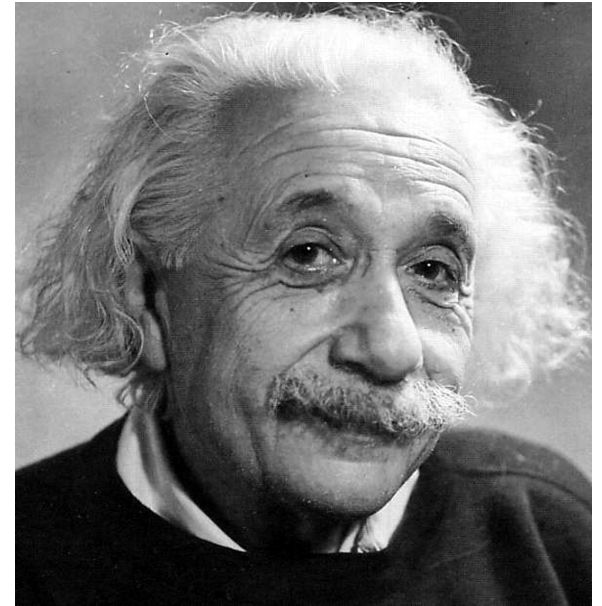


CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Teoria da Relatividade Geral

- Teoria relativística para gravitação
- Não há força gravitacional
- Espaço-tempo é curvo



Albert Einstein
(1879-1955)

Buracos Negros



CBPF

Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Programa de Pós-Graduação em Cosmologia

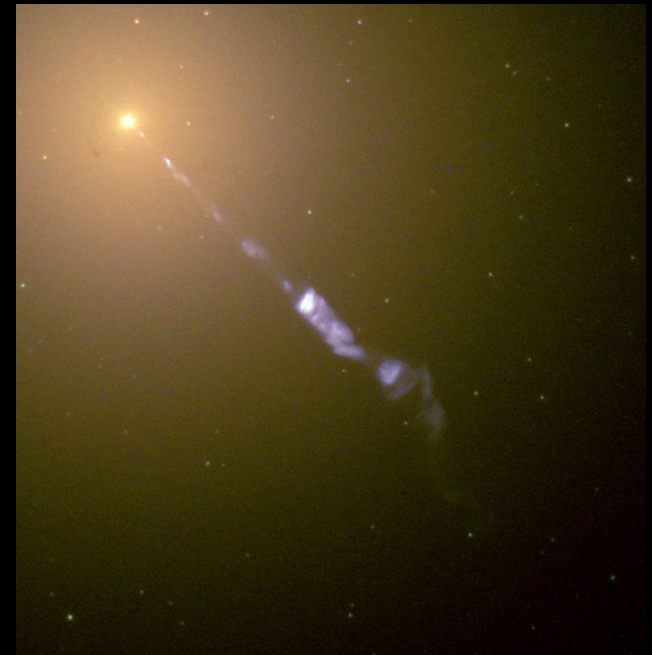


BN supermassivo

$$6.5 \pm 0.7 \times 10^9 M_{\odot}$$



Einstein Hubble Telescope collaboration (2017)



1.5 Kpc (5klight-year)

Ondas Gravitacionais

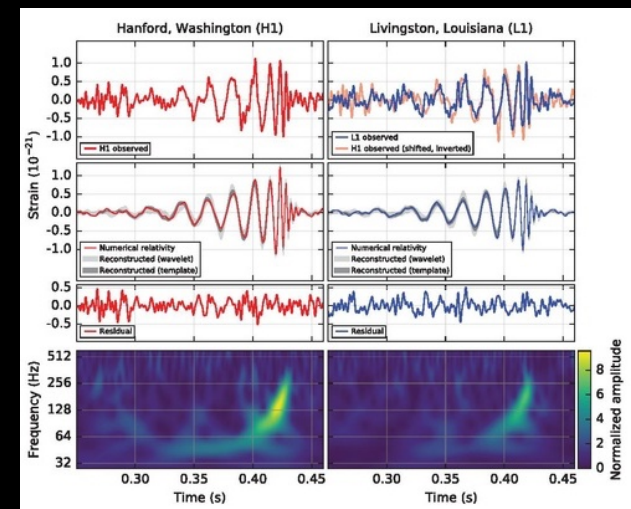
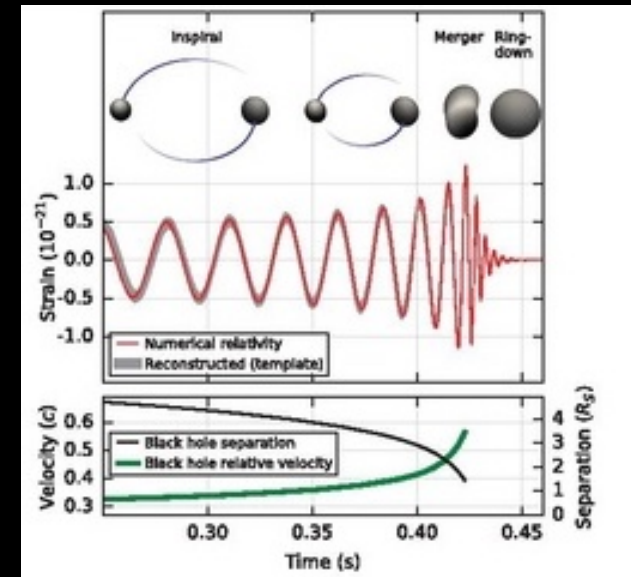
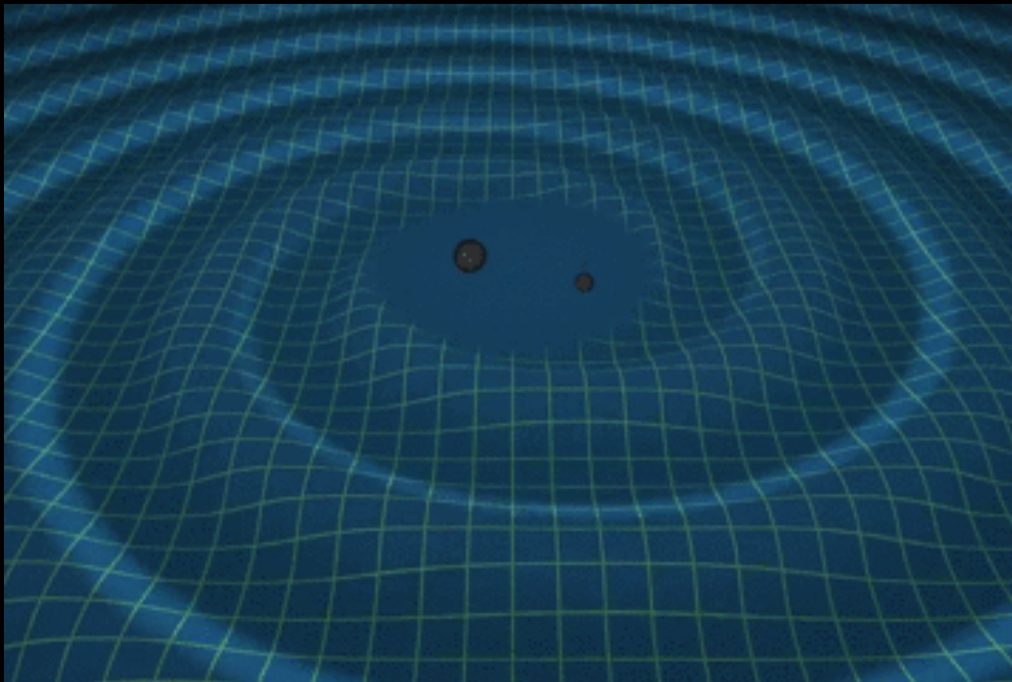


CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Detecção do Ligo – GW150914

Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016)



O que é a Relatividade?



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Isaac Newton (1685)

"Philosophiae naturalis principia mathematica"

J. C. Maxwell et al. (1890)

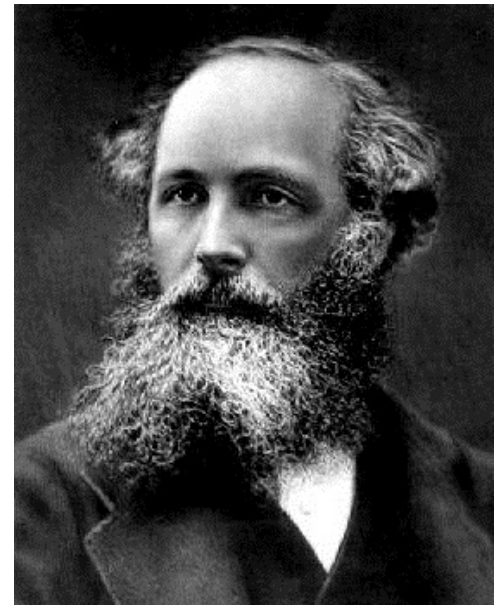
desenvolvem a teoria eletromagnética

Einstein (1905)

"zur Elektrodynamik bewegter Körper"

Einstein (1916)

"Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie"



O que é a Relatividade?



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

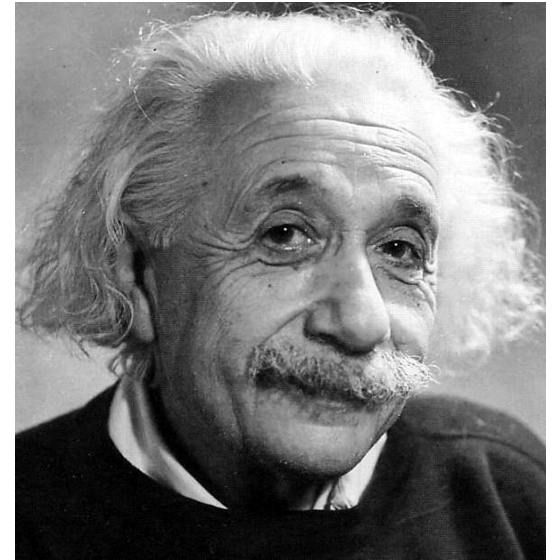
PPG Cosmo

Relatividade Restrita

- Rompe com a noção newtoniana de tempo
- Conceitos são definidos por procedimentos de medida

Relatividade Geral

- Rompe com a noção newtoniana de espaço
- Identifica gravitação com geometria do espaço-tempo



Albert Einstein
(1879-1955)

Relatividade Restrita

Mecânica Newtoniana



Princípio da relatividade
Observadores inerciais

$$\vec{v}_{surfista} = \vec{v}_{cachorro}$$

Relatividade Restrita



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Mecânica Newtoniana



Princípio da relatividade
Observadores inerciais

$$\vec{v}_{\text{dardo}} = \vec{v}_{\text{braço}} + \vec{v}_{\text{atleta}}$$

Relatividade Restrita

Eletromagnetismo de Maxwell



*constância da
velocidade da Luz*

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

Relatividade Restrita

Eletromagnetismo de Maxwell



*constância da
velocidade da Luz*

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

~~*Mecânica Newtoniana*~~

$$\vec{v}_{luz} = \vec{c} + \vec{v}_{caminhão}$$

Relatividade Restrita



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

1. *Princípios da relatividade*
2. *Constância da velocidade da luz*

velocidade da luz

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Transf. de Galileu

$$\vec{x}' = \vec{x} - \vec{v}t$$

$$t' = t$$

Transf. de Lorentz

$$\vec{x}' = \gamma (\vec{x} - \vec{v}t)$$

$$t' = \gamma \left(t - \frac{\vec{v} \cdot \vec{x}}{c^2} \right)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

Intervalo

$$ds^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2$$



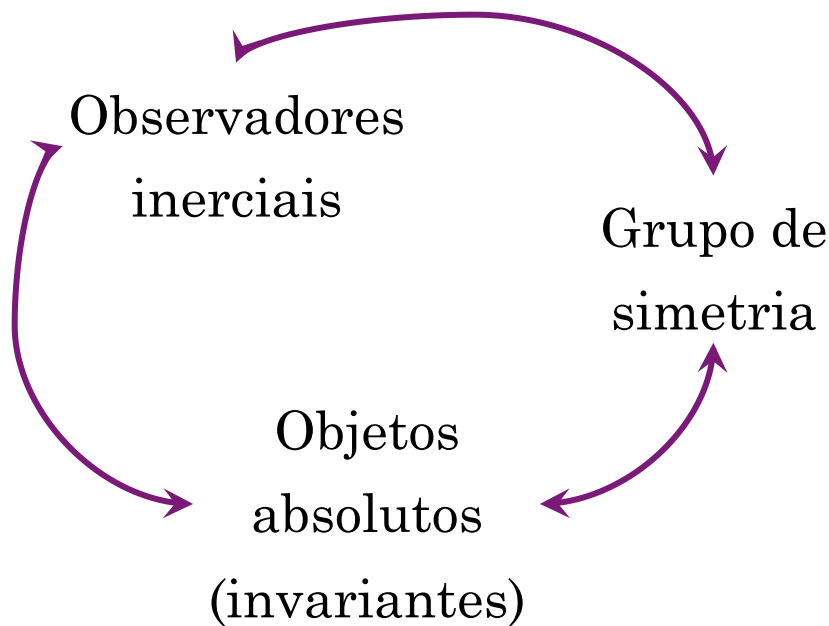
Relatividade Restrita



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

1. *Princípios da relatividade*
2. *Constância da velocidade da luz*



Mecânica Newtoniana

- Transformações de Galileu
- Espaço e tempo absolutos
- Tamanho dos objetos

$$dl^2 = \Delta x^2$$

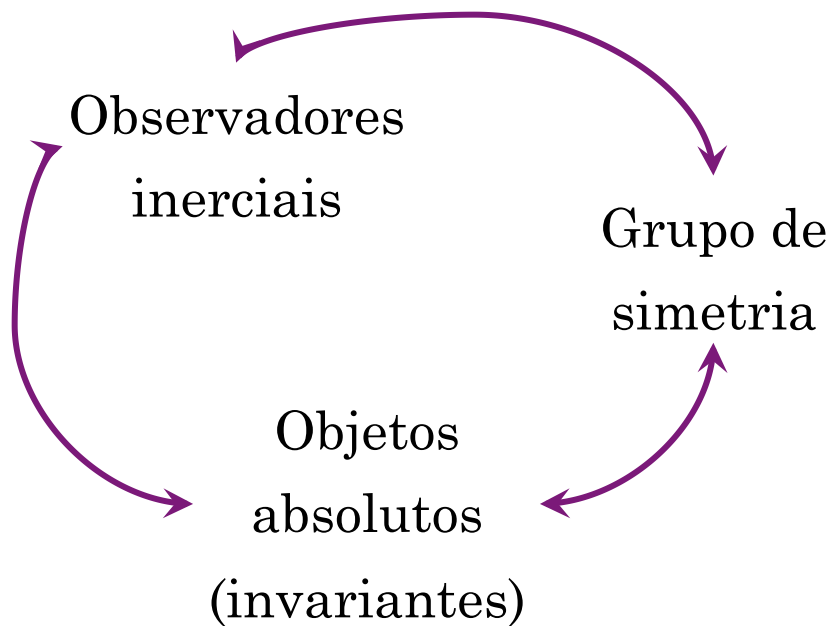
Relatividade Restrita



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

1. *Princípios da relatividade*
2. *Constância da velocidade da luz*



Mecânica Newtoniana

- Transformações de Galileu
- Espaço e tempo absolutos
- Tamanho dos objetos

$$dl^2 = \Delta x^2$$

Relatividade Restrita

- Transformações de Lorentz
- Espaço-tempo absoluto
- Intervalo 4-dimensional

$$ds^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2$$

Relatividade Restrita

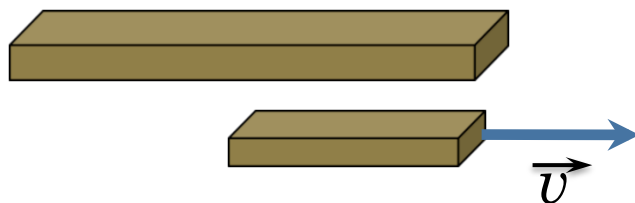


CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Efeitos Cinemáticos

Contração de Lorentz
Dilatação Temporal



Pseudo-paradoxos
paradoxo dos gêmeos

Mas são reais?

- ✓ *relógios atômicos*
- ✓ *GPS*

Objetos quadri-dimensionais

$$v^\mu = \gamma(c, \vec{v})$$

$$P^\mu = \left(\frac{E}{c}, \vec{p} \right)$$

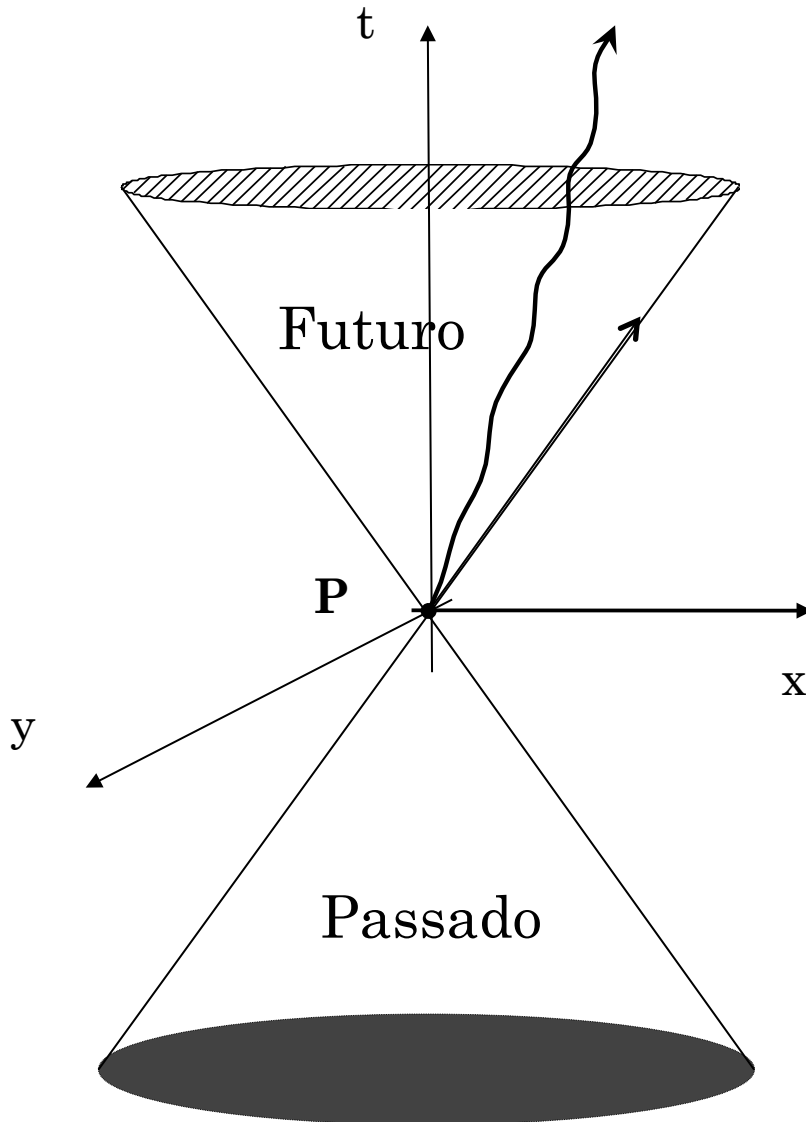
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Se estiver parado

$$E = mc^2$$

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

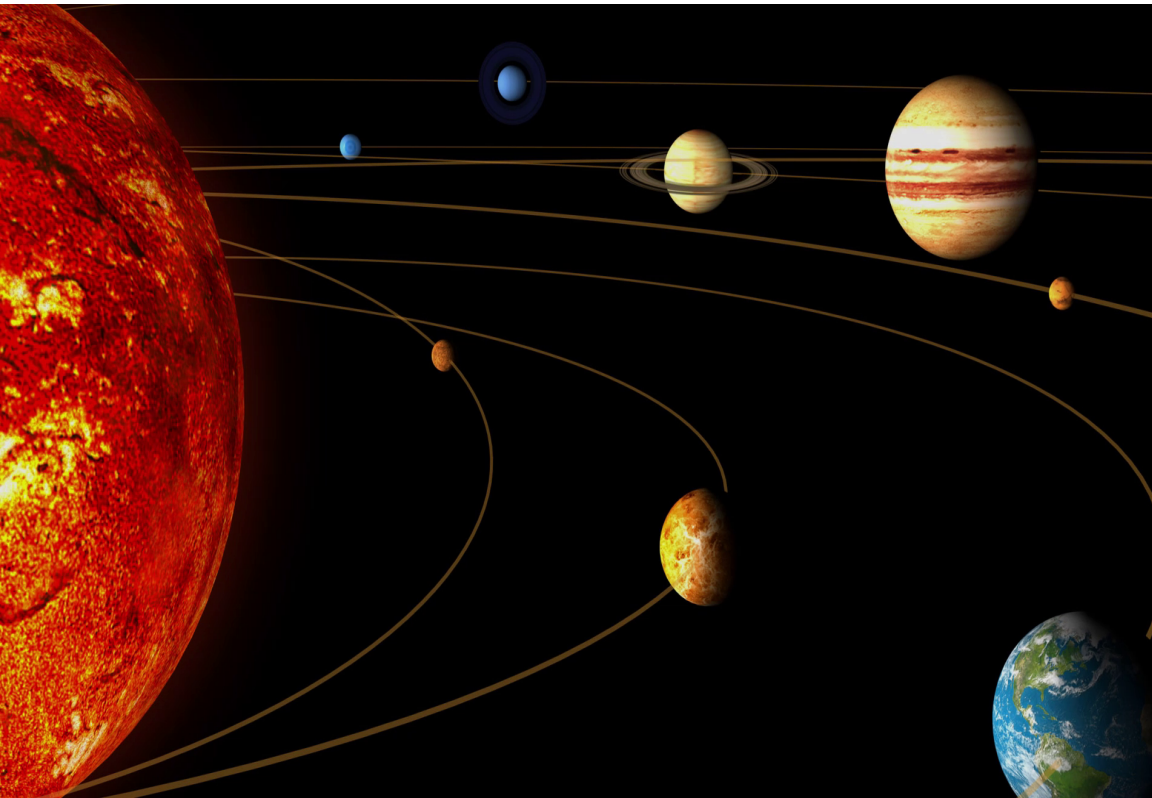
Relatividade Restrita



Nova estrutura causal

*Nada viaja mais
rápido que a luz!*

Gravidade não se encaixa



Ação-a-distância

$$\vec{F} = -G \frac{m M_{\odot}}{r^2} \hat{r}$$

Princípios da Relatividade Geral

- *Princípio de Mach (origem da inércia)*
- *Princípio de Equivalência (natureza da gravitação)*
- *Princípio de Covariância (invariância)*

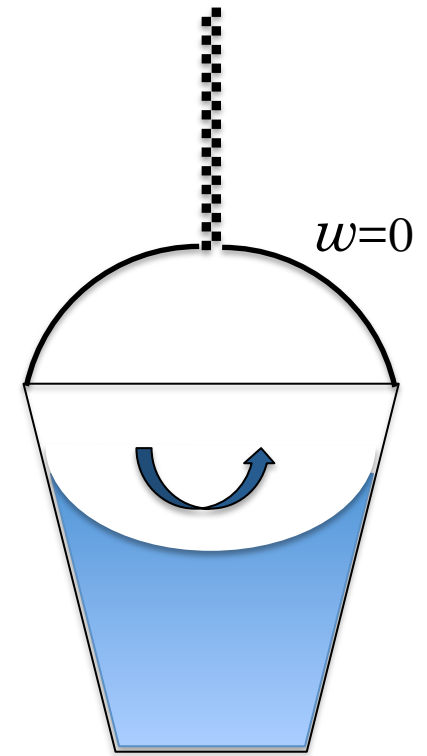
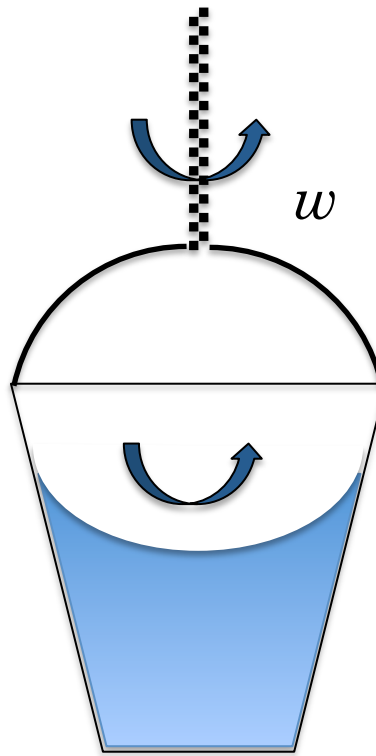
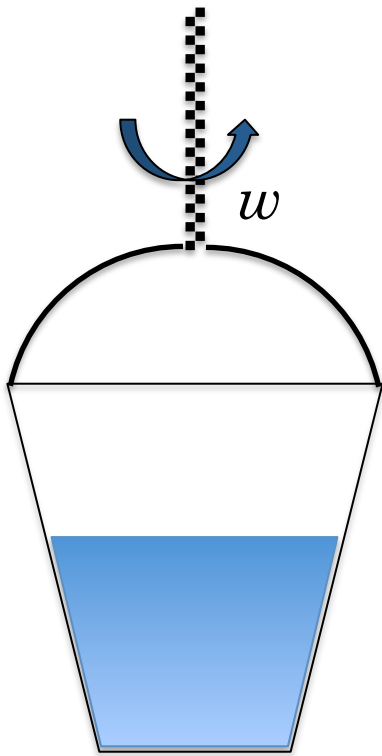
Espaço-tempo curvo



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Princípio de Mach



Espaço-tempo curvo



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Porque o espaço-tempo é curvo?



Elevador de Einstein



Espaço-tempo curvo



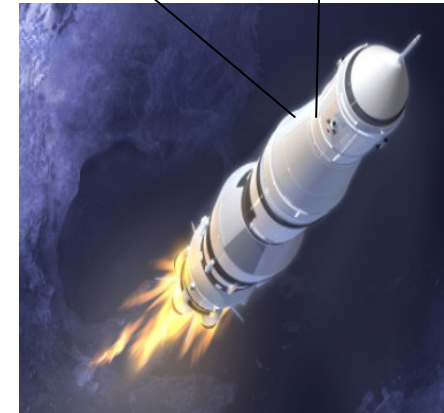
CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Observadores
Inerciais X Acelerados
a separação não é clara



$$m_i \approx m_g$$



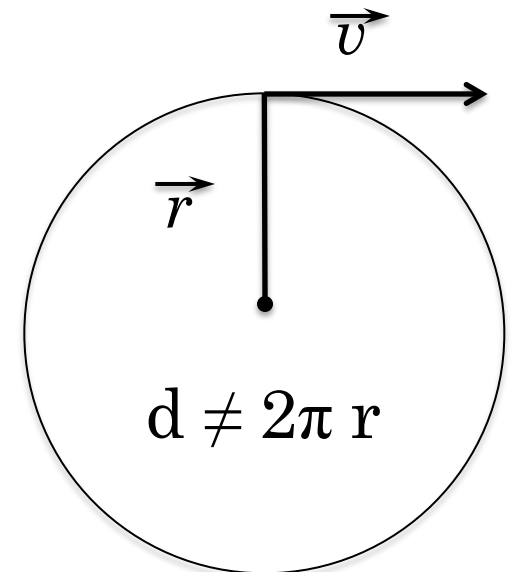
Espaço-tempo curvo



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Observadores acelerados
experimentam espaços curvos



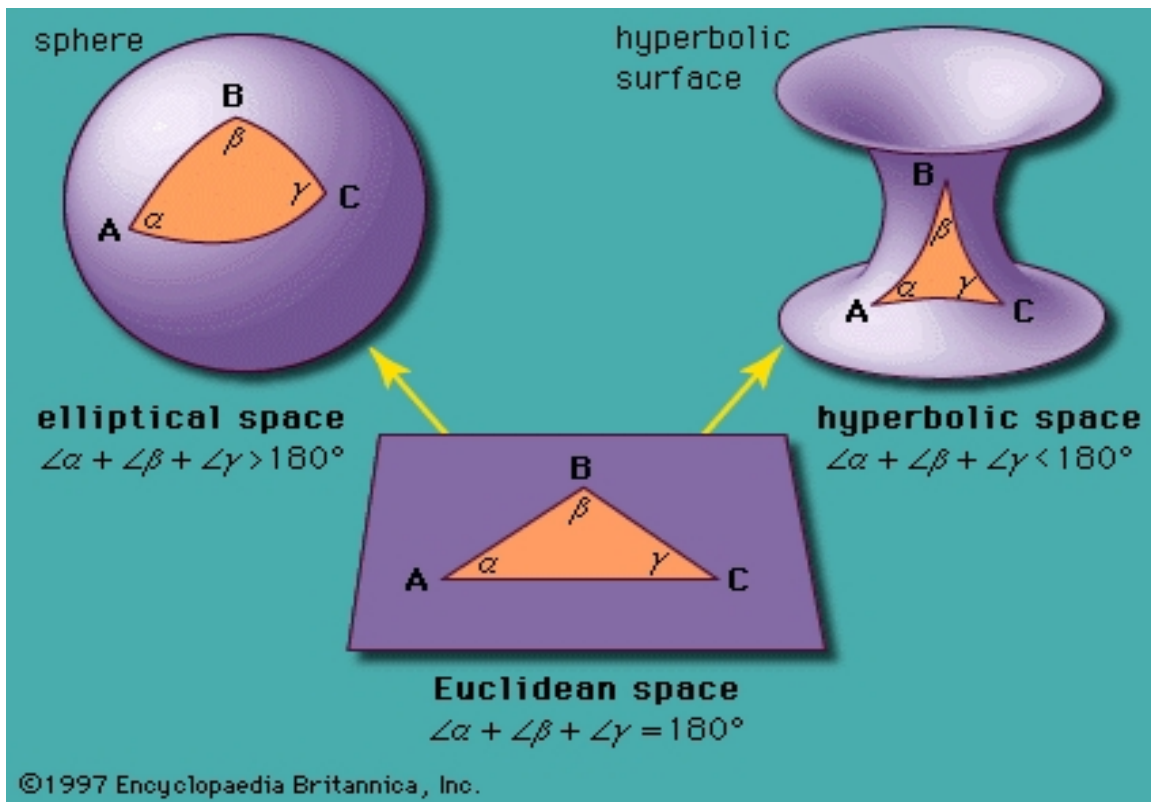
Espaço-tempo curvo



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

O que são espaço-tempos curvos?



Não valem as regras básicas da geometria euclidiana

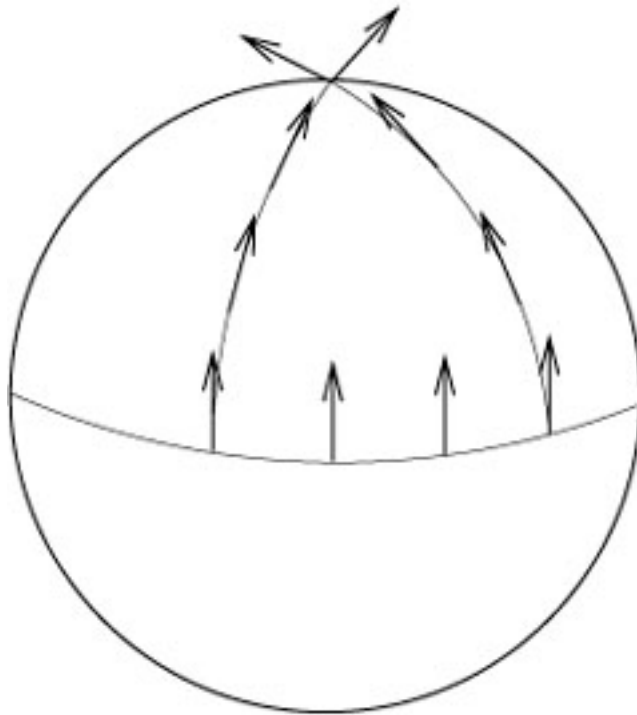
Espaço-tempo curvo



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

O que são espaço-tempos curvos?



- Retas paralelas se cruzam
- Circuito fechado modifica o vetor inicial

O que é a Relatividade?

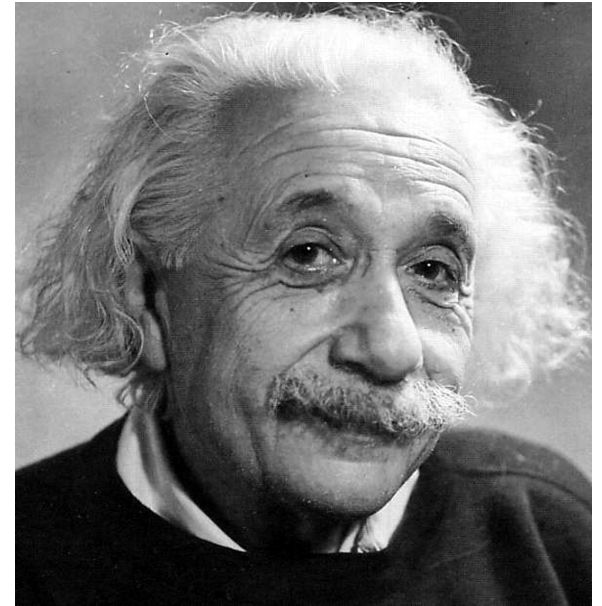


CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Teoria da Relatividade Geral

- Teoria relativística para gravitação
- Não há força gravitacional
- Espaço-tempo é curvo



Albert Einstein
(1879-1955)

Espaço-tempo curvo



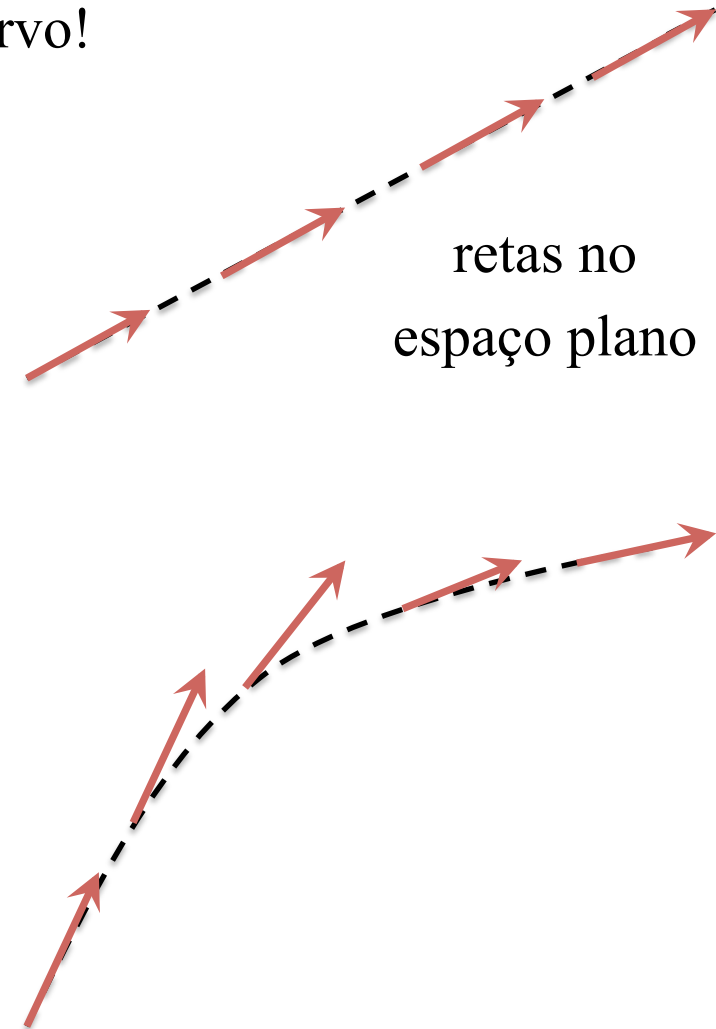
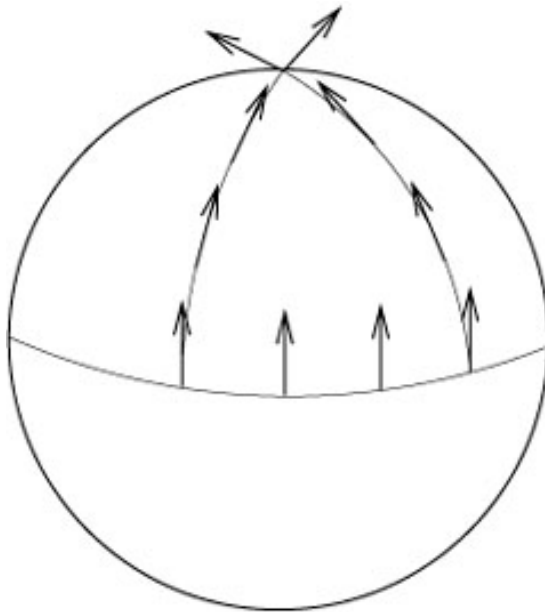
CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

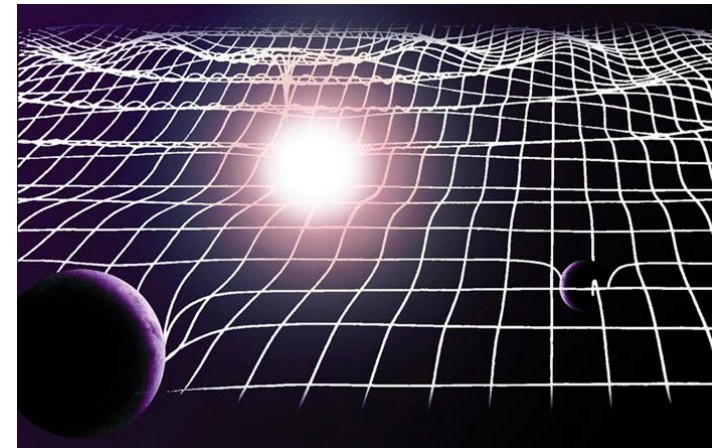
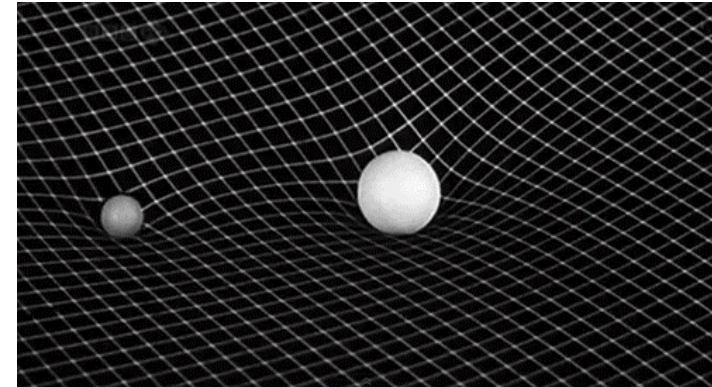
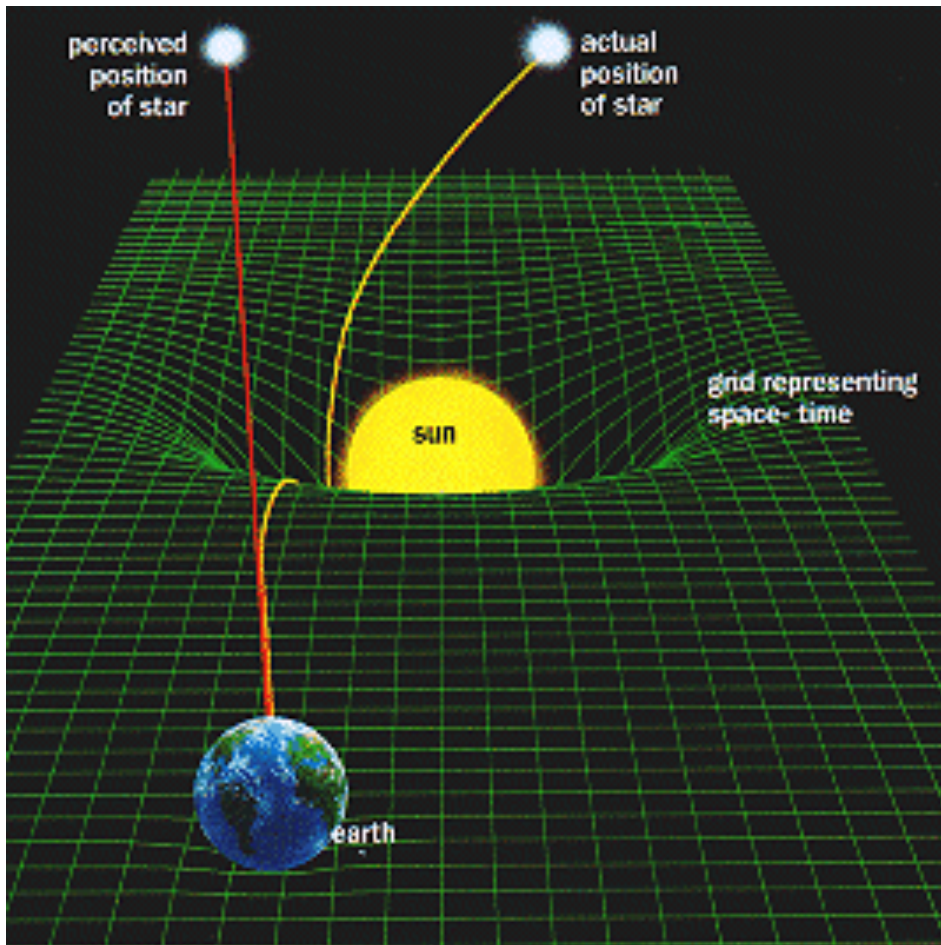
Não há força gravitacional, o espaço-tempo é curvo!

E o movimento dos corpos?

- Curvas geodésicas



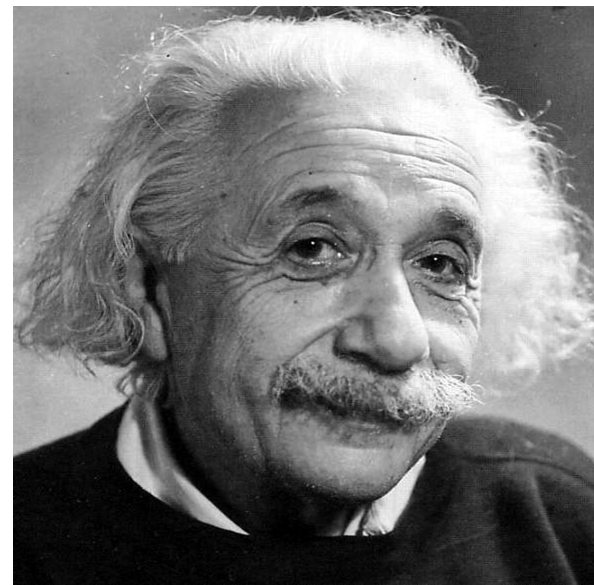
Relatividade Geral



Teoria relativística de gravitação

- não há força gravitacional

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



Obs: perde-se

- tempo global
- conceito unívoco de distância

Curvatura $R_{\mu\nu}$

Métrica $g_{\mu\nu}$

Matéria $T_{\mu\nu}$

Comprovação da RG



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPGCosmo

Testes Clássicos

- Avanço do periélio de mercúrio
- Desvio da luz
- Desvio para o vermelho gravitacional
- *Atraso temporal de Shapiro*

Regime de campo fraco

- *Lunar laser (medida distância à Lua)*
- *Efeito de Lense-Thirring*
- *Formalismo PPN*
- *Testes em escalas pequenas (potencial Yukawa)*

Regime de campo forte

- Pulsar binário
- Detecção direta de ondas gravitacionais
- Sombra de buracos negros

Comprovação da RG

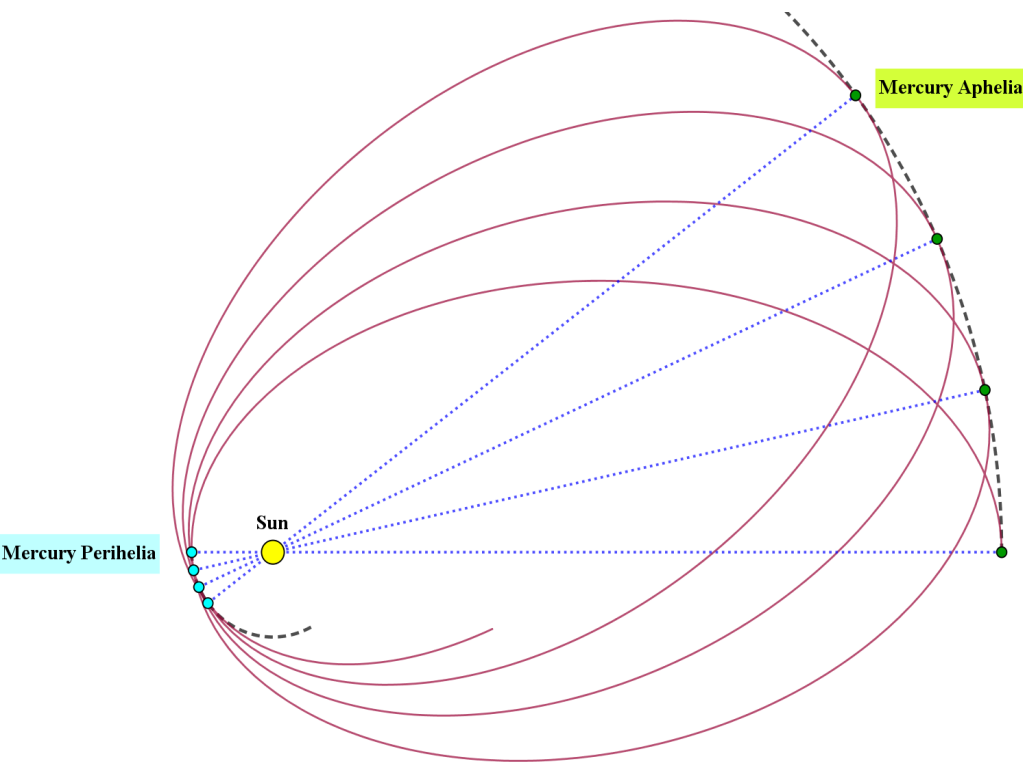


CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

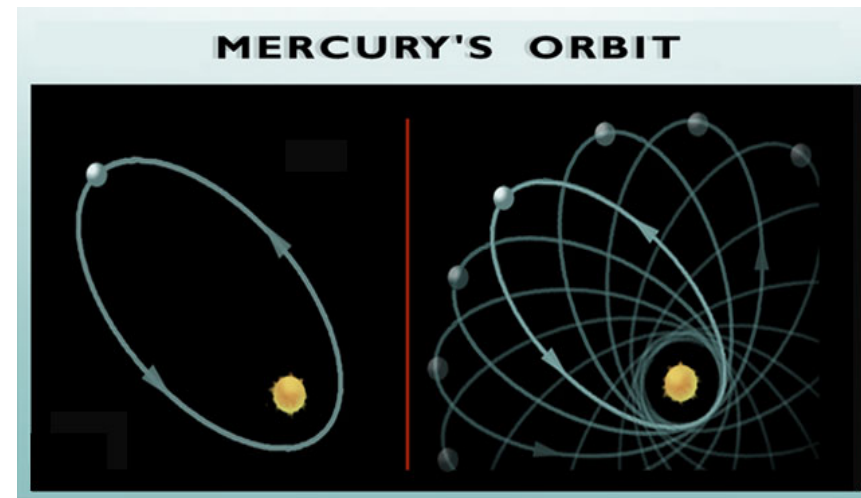
Testes Clássicos

- Avanço do periélio de mercúrio



Le Verrier 1859

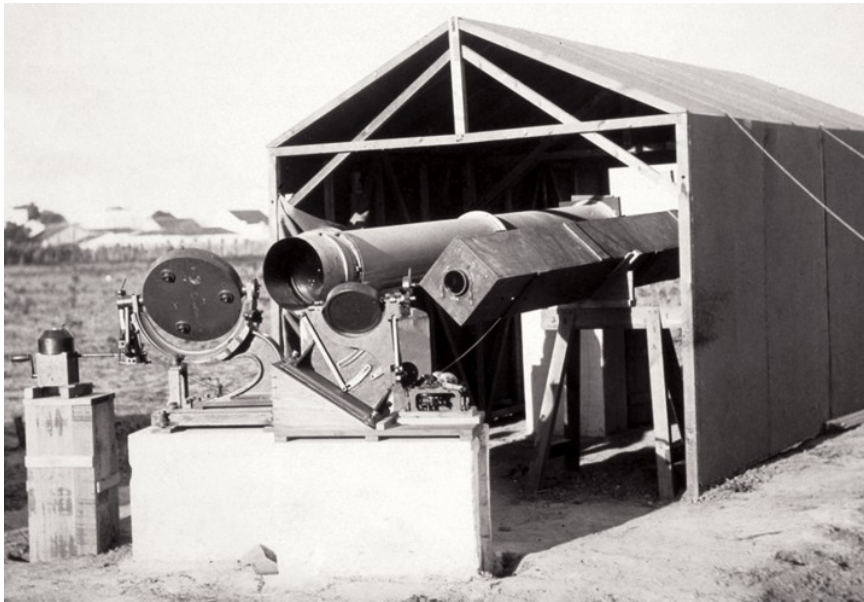
$$\Delta\phi = 43.03'' \text{ por século}$$



Comprovação da RG

Testes Clássicos

- Desvio da luz

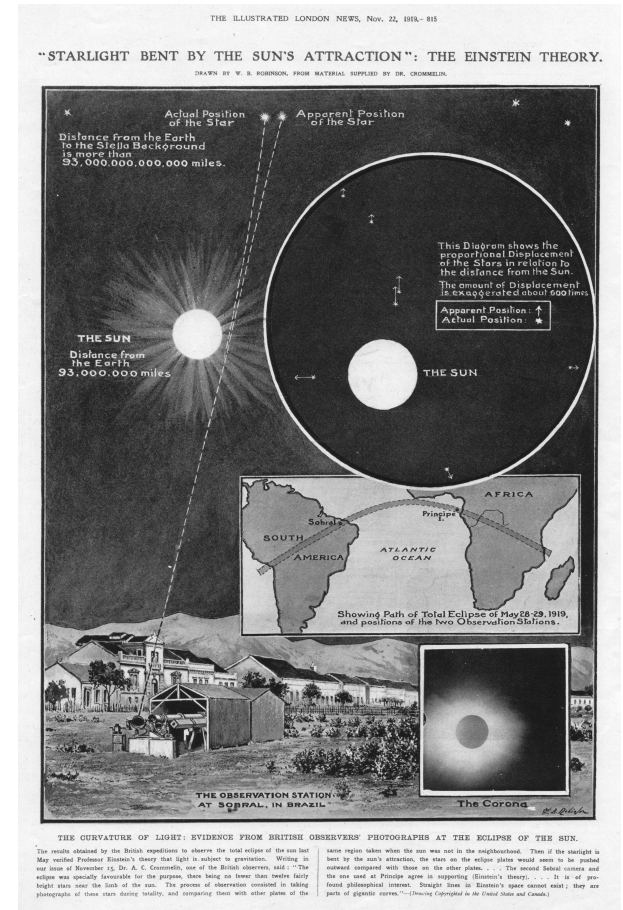


Telescópio refrator astrográfico
Eclipse Sobral 1919



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo



Comprovação da RG

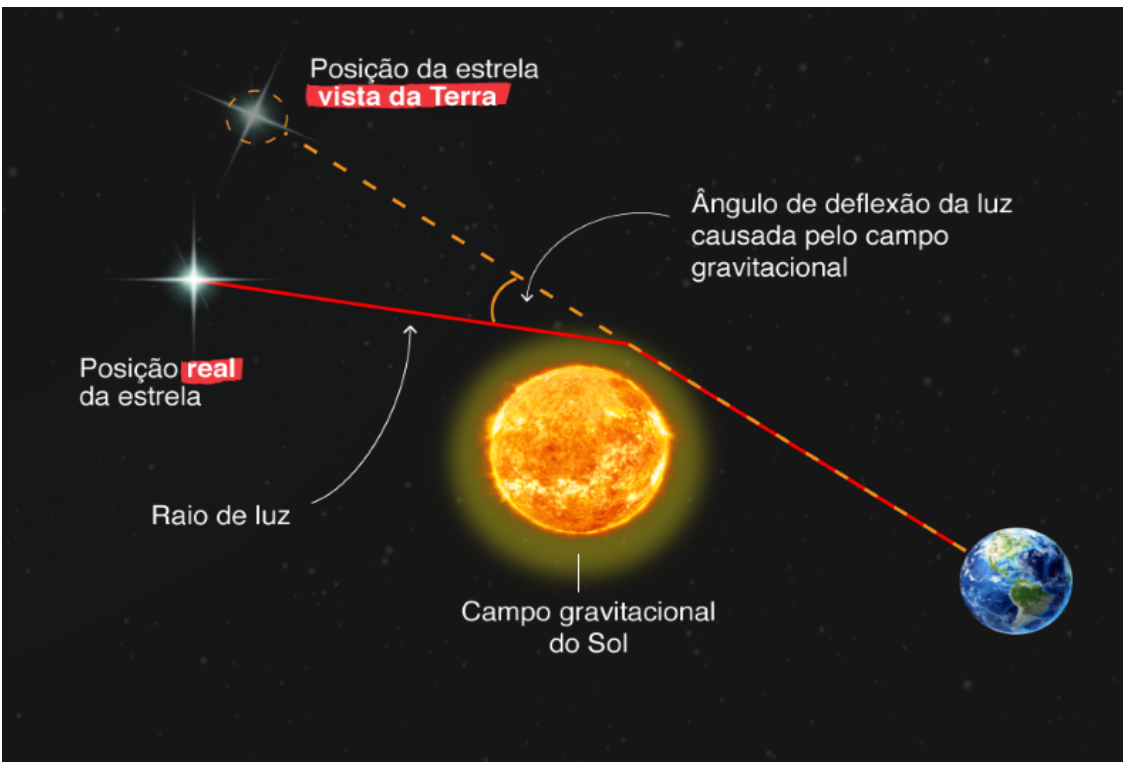


CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

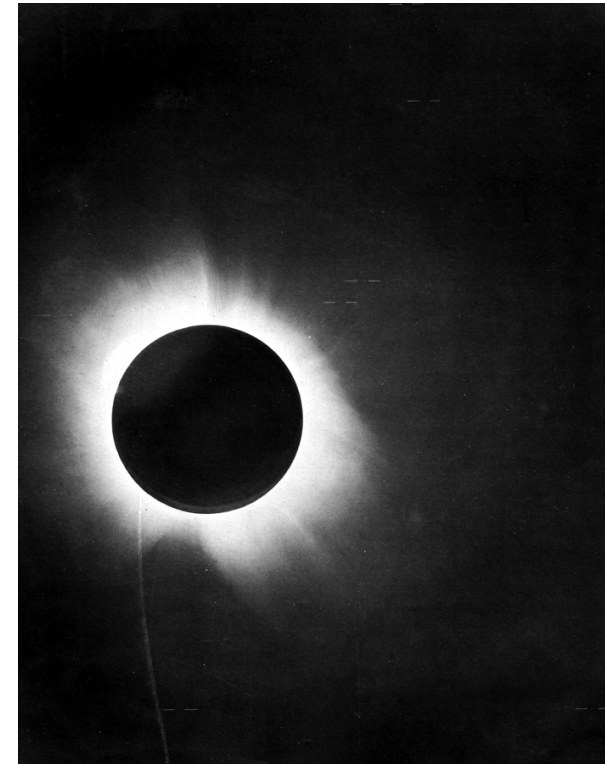
Testes Clássicos

- Desvio da luz



Fonte: NASA

BBC

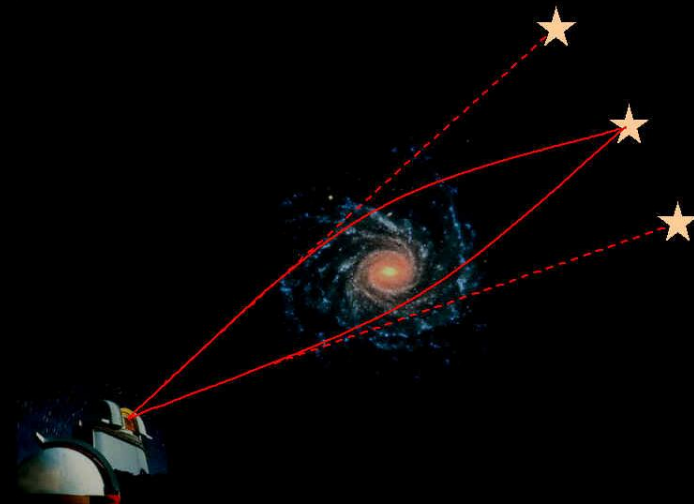
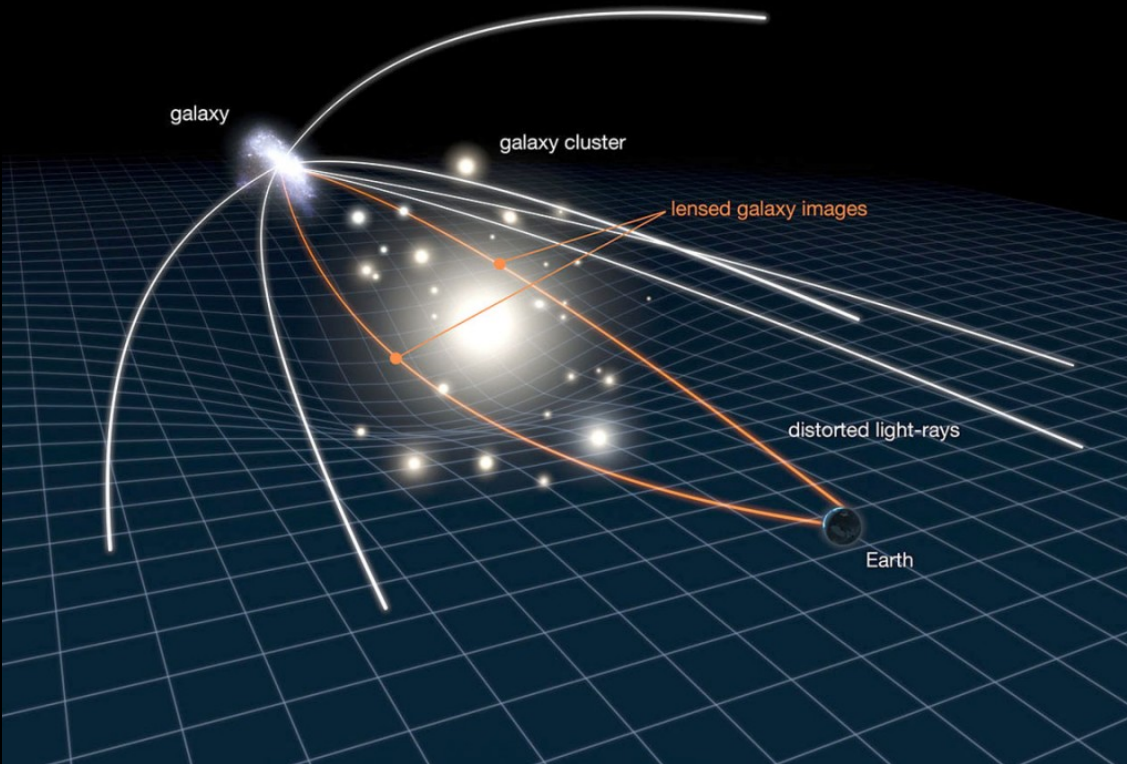


Lentes Gravitacionais



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

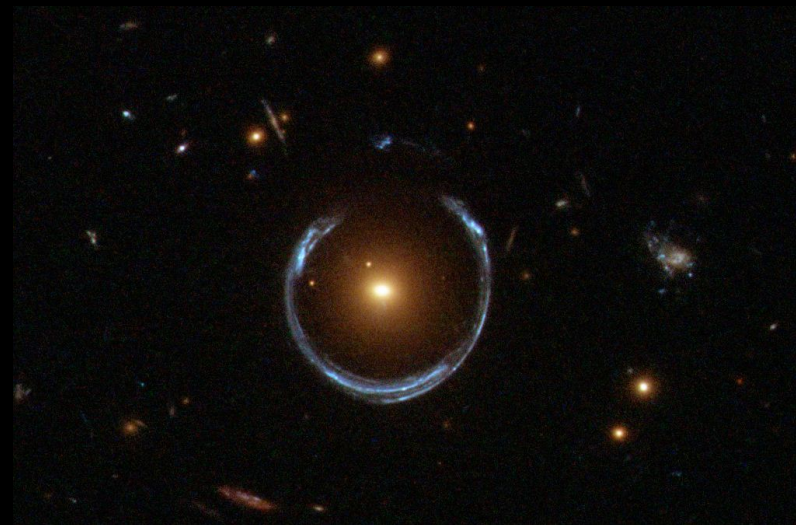


Lentes Gravitacionais



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

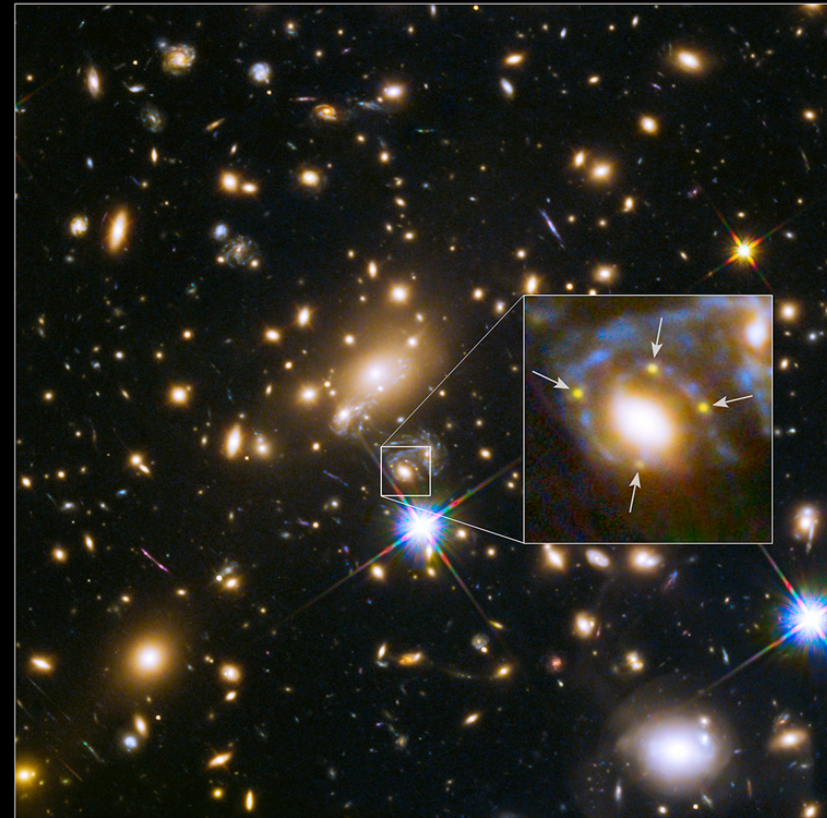
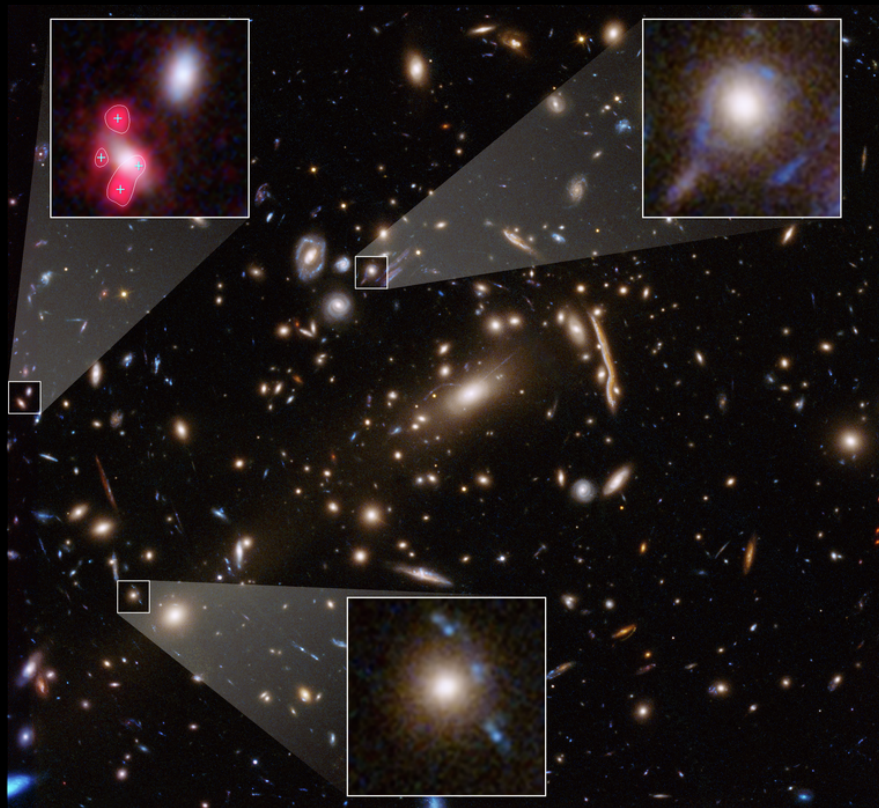


Lentes Gravitacionais



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo



Supernova Refsdal ■ **Galaxy Cluster MACS J1149.5+2223**
Hubble Space Telescope ■ ACS/WFC ■ WFC3/IR

NASA and ESA

STScI-PRC15-08a

Comprovação da RG



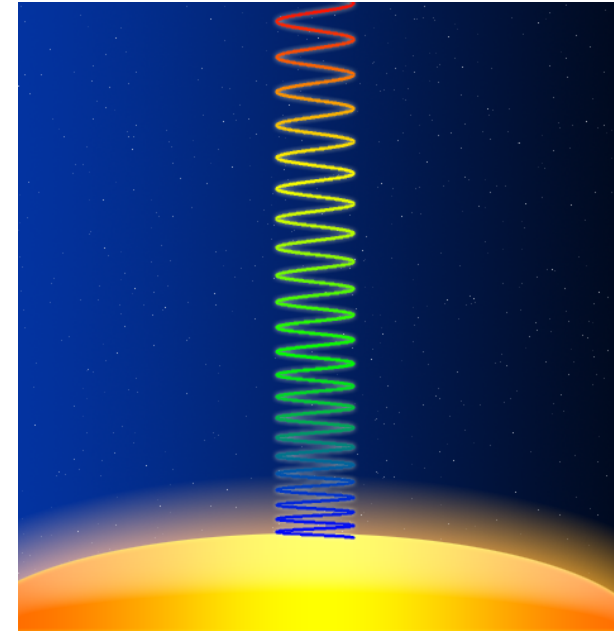
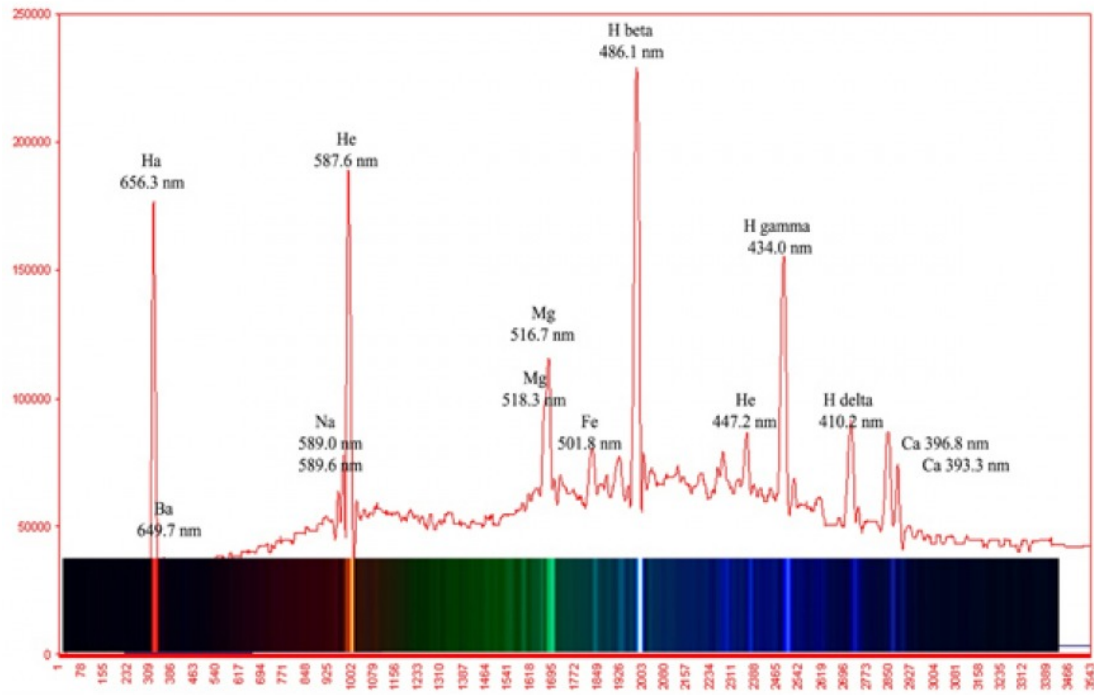
CBNP
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Testes Clássicos

- Desvio para o vermelho gravitacional

The Solar Chromosphere Spectrum (Flash Spectrum)



Anã branca - Sirius B
(Walter Adams - 1925)

Comprovação da RG

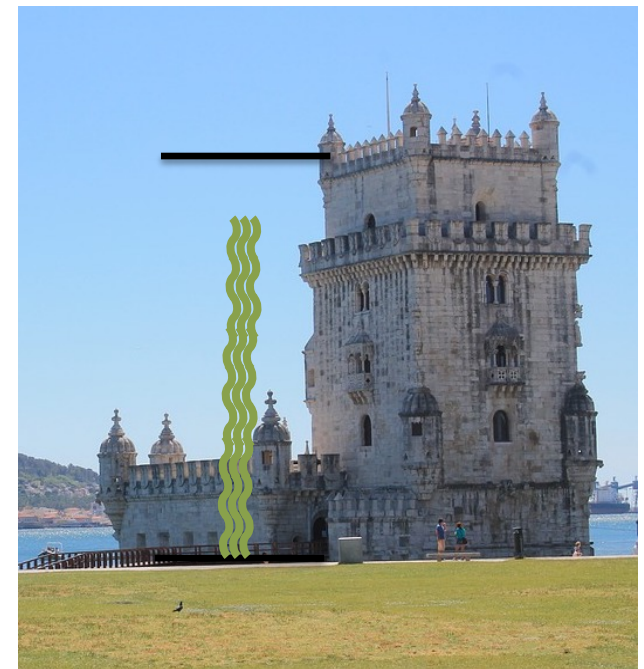


CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Testes Clássicos

- Desvio para o vermelho gravitacional



Experimento Pound-Rebka
(original em Harvard - 1959)

Comprovação da RG

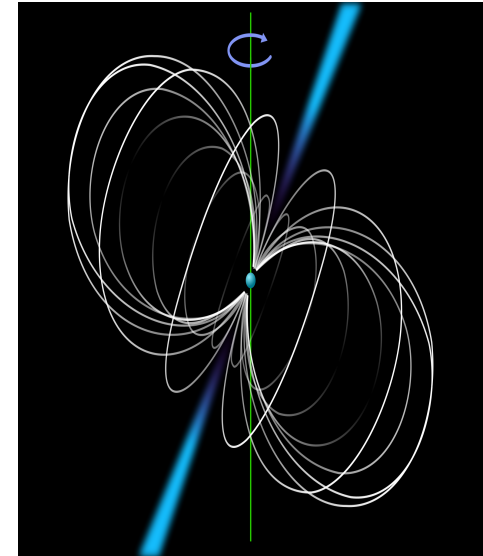
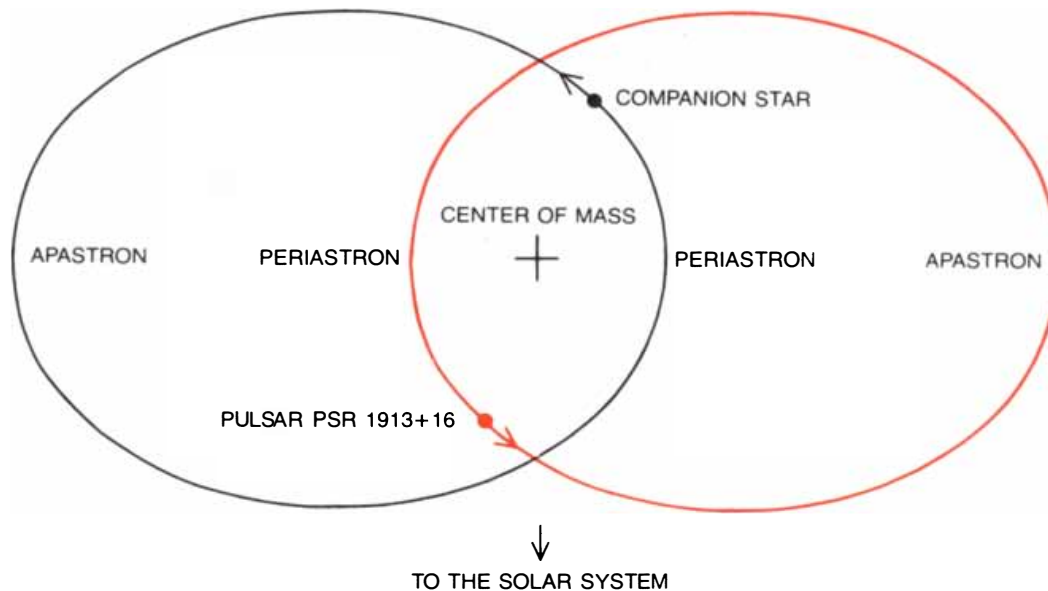


CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Regime de Campo Forte

- Pulsar binário $\rightarrow$ ondas gravitacionais



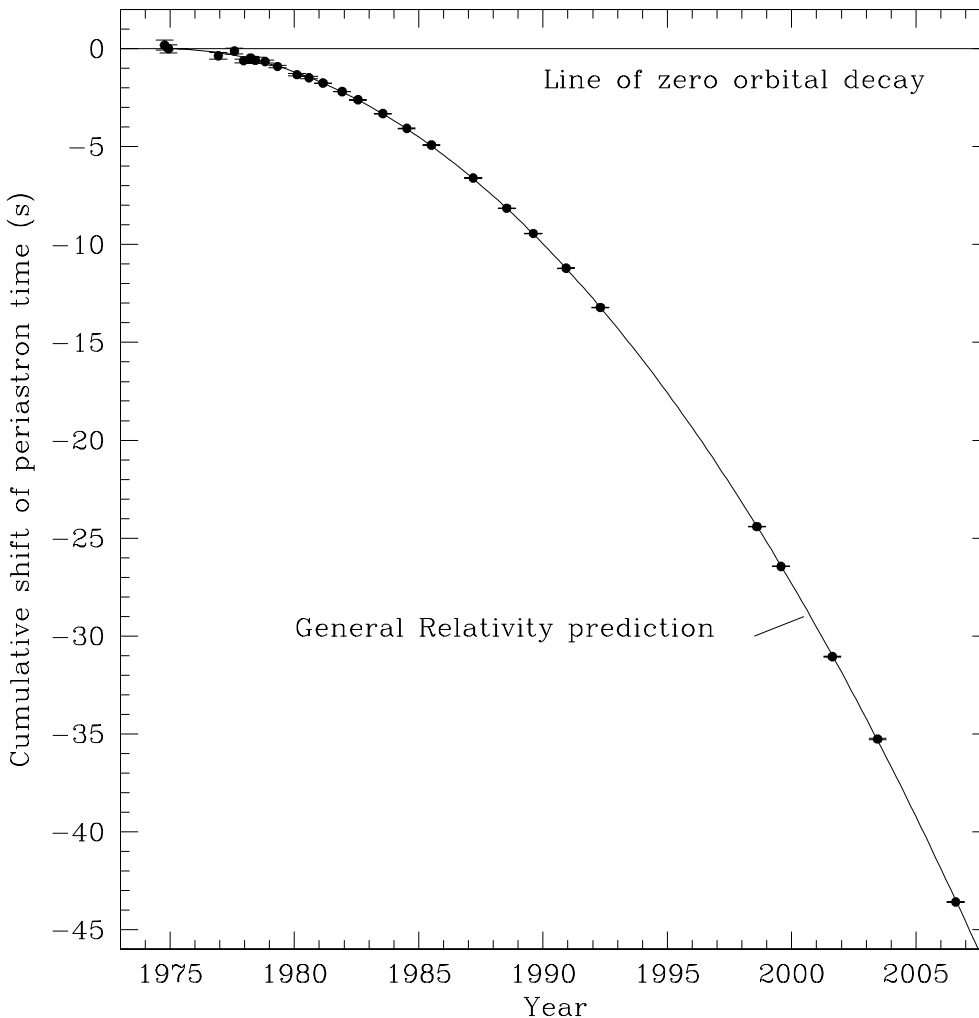
Comprovação da RG



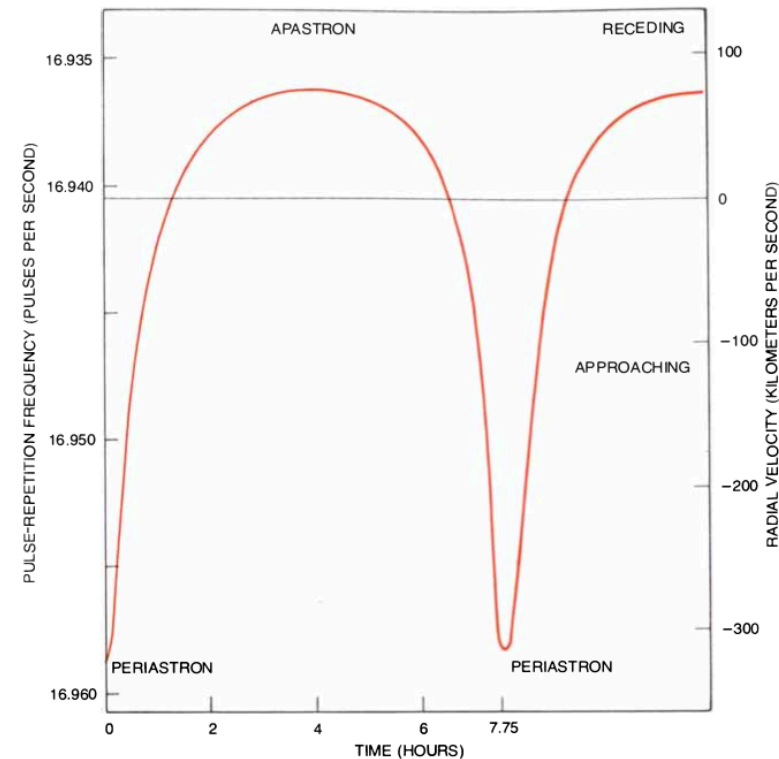
CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Pulsar Binário B1913+16 (Hulse & Taylor 1975)



1993 - prêmio Nobel em Física



variação frequência

Ondas Gravitacionais

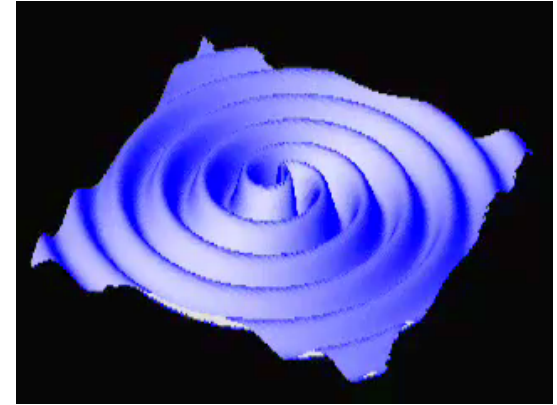


CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPGCosmo

Regime de Campo Forte

- Fusão de BNs $\rightarrow$ ondas gravitacionais



LIGO em Lousiana, USA



Mário Schenberg - INPE

Ondas Gravitacionais



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo

Regime de campo forte

- Fusão de Buracos Negros

PRL 116, 061102 (2016)

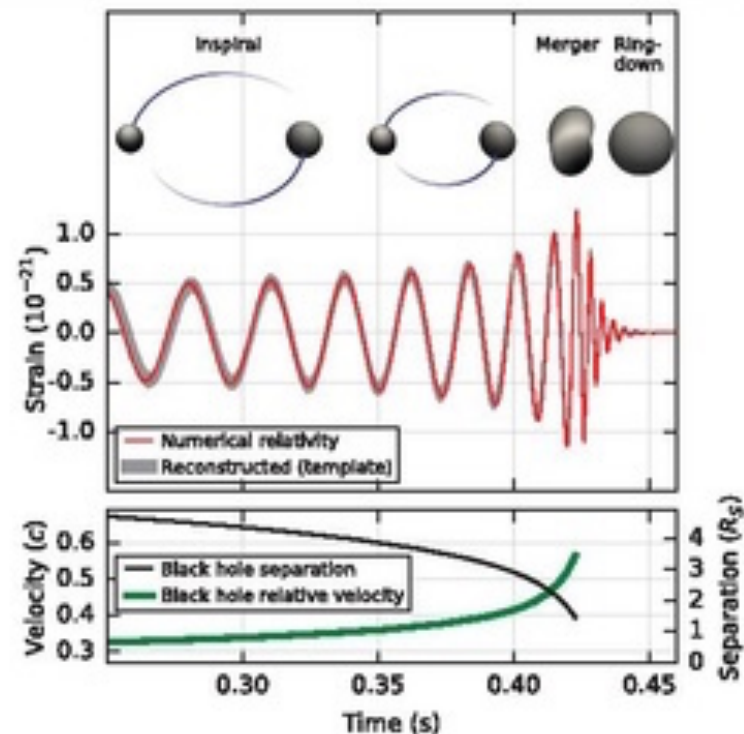
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016

propagation time, the events have a combined signal-to-noise ratio (SNR) of 24 [45].

Only the LIGO detectors were observing at the time of GW150914. The Virgo detector was being upgraded, and GEO 600, though not sufficiently sensitive to detect this event, was operating but not in observational mode. With only two detectors the source position is primarily determined by the relative arrival time and localized to an area of approximately 600 deg^2 (90% credible region) [39,46].

The basic features of GW150914 point to it being produced by the coalescence of two black holes—i.e., their orbital inspiral and merger, and subsequent final black hole ringdown. Over 0.2 s, the signal increases in frequency and amplitude in about 8 cycles from 35 to 150 Hz, where the amplitude reaches a maximum. The most plausible explanation for this evolution is the inspiral of two orbiting masses, m_1 and m_2 , due to gravitational-wave emission. At the lower frequencies, such evolution is characterized by the chirp mass [11]



Ondas Gravitacionais

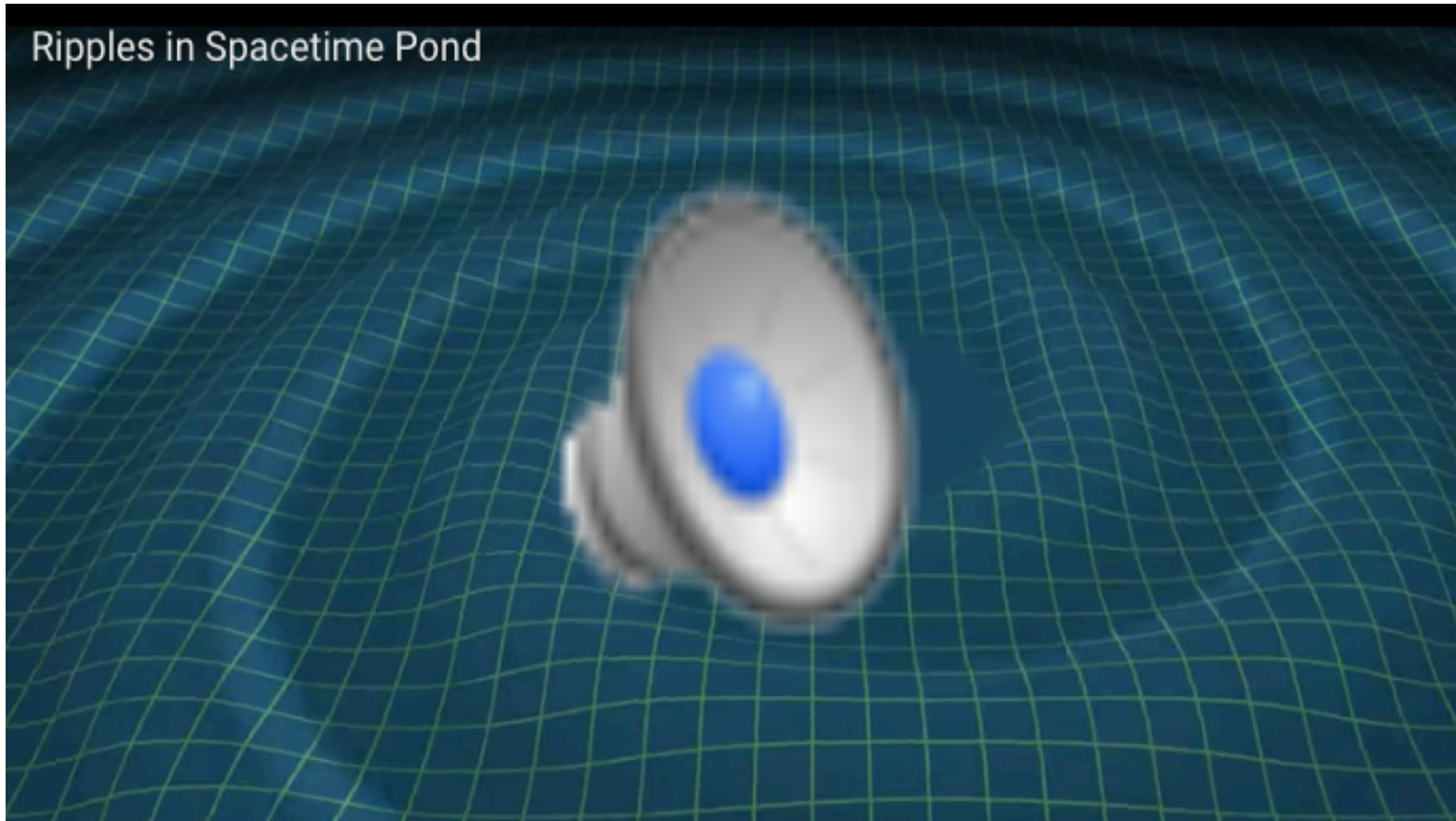


CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

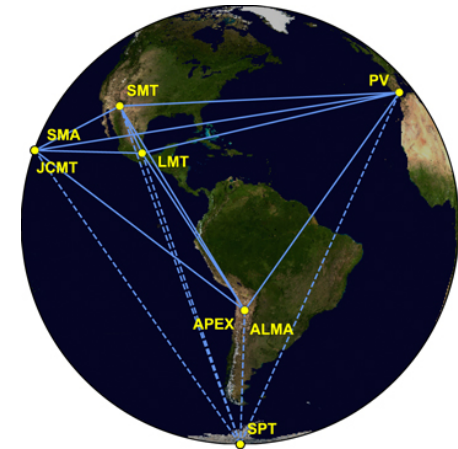
PPG Cosmo

Regime de campo forte

- Fusão de buracos negros



- Foto do buraco negro

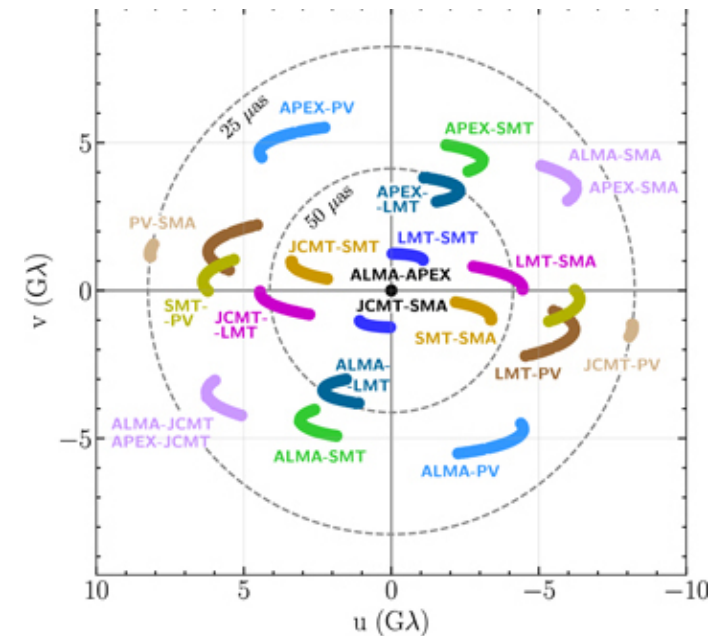


M87* April 11, 2017

50 μas

April 5 April 6 April 10

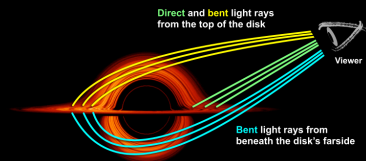
Brightness Temperature (10^9 K)



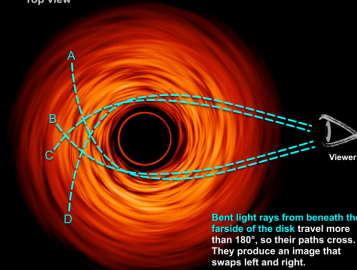
Feixes de luz vindos do BN

A Warped Look at Black Hole Optics

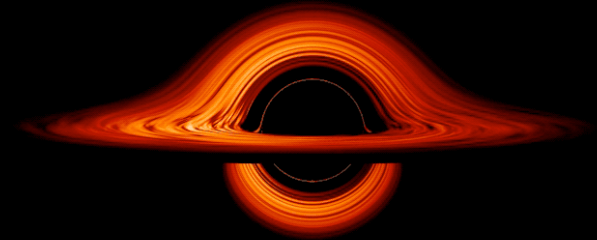
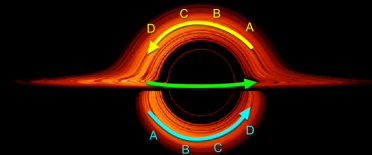
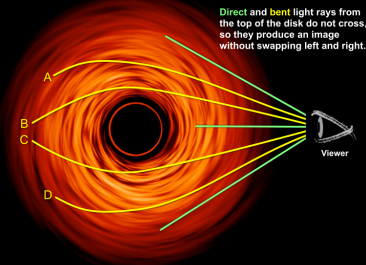
Side view



Top view



Top view



Buracos Negros



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

PPG Cosmo



O que é a Relatividade Geral !



Felipe Tovar Falciano