

O espaço-tempo curvo na teoria da relatividade geral

Felipe Tovar Falcião



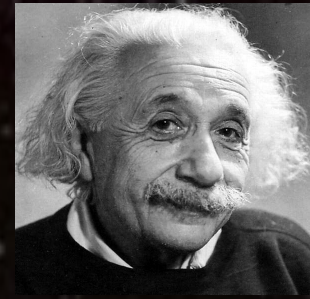
CBPF

**Centro Brasileiro de
Pesquisas Físicas**

Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 Rio de Janeiro, Brasil
Tel:(0xx21) 2141-7100 Fax:(0xx21) 2141-7400 CEP:22290-180

IFCE - 2013

O que é Relatividade?



A. Einstein
(1879-1955)

1685 - Newton "Philosophiae naturalis principia mathematica"

1890 - Maxwell et al. desenvolvem a teoria eletromagnética

1905 - Einstein "zur Elektrodynamik bewegter Körper"

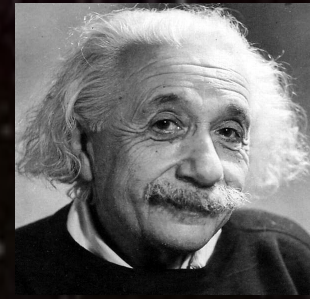
1911 - Einstein propõe a deflecção da luz pelo Sol

1912 – Einstein, Abraham e Nordström propõem uma teoria escalar da gravitação

1913 - Einstein se convence que gravitação deve ser descrita pela métrica

1916 - Einstein "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie"

O que é Relatividade?



A. Einstein
(1879-1955)

teoria relativística da gravidade....

na realidade não há força gravitacional \Rightarrow

\Rightarrow a estrutura do espaço-tempo é curva

A métrica { *contém as propriedades do espaço-tempo*
determina distância e tempo
estabelece as trajetórias de partículas testes

Obs: não há....

- *conceito unívoco de distância*
- *tempo global (separação em espaço e tempo)*

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

propriedades geométricas = distribuição de matéria

Mecânica

x

Eletrromagnetismo

- *Partículas pontuais*
posição e velocidades

- *3 leis de Newton*

- *Observadores inerciais*

- *Campos físicos*
campos elétricos e magnéticos

- *leis de Maxwell*

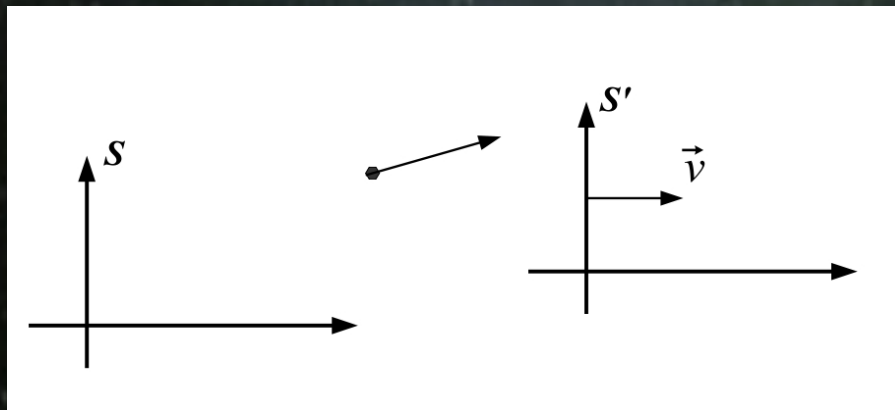
- *Observadores inerciais*

Transformações de Galileu

Incompatível

$$\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}$$

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



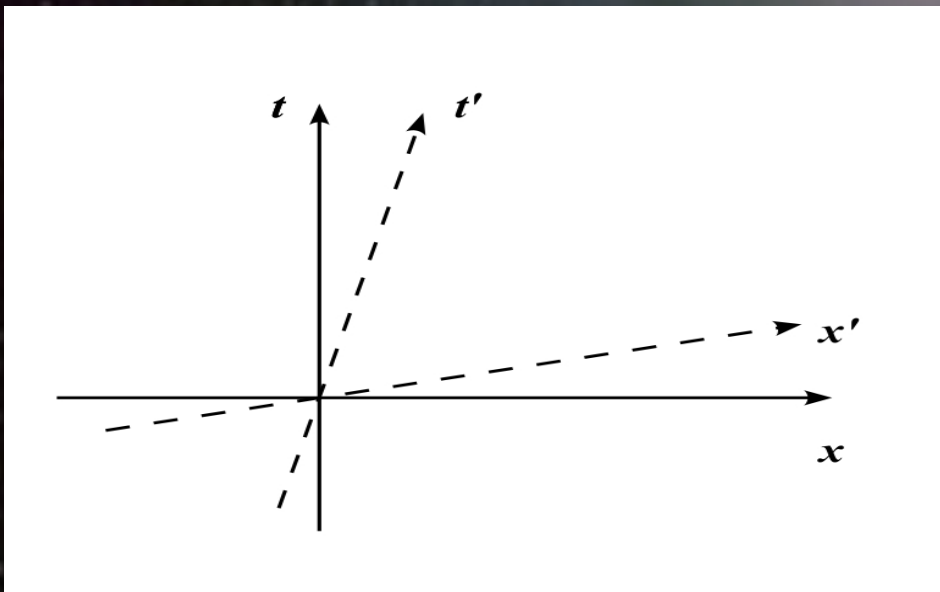
Relatividade Restrita

- *Junção de Newton com Maxwell*

1- *Princípio da relatividade*
Observadores inerciais

2- *Princípio da constância da Luz*

- *Transformações de Lorentz*



Velocidade da Luz

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

Velocidade limite!

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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

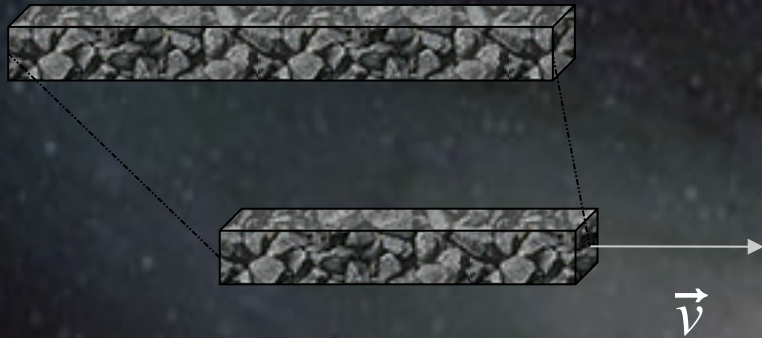
$$t' = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right)$$

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

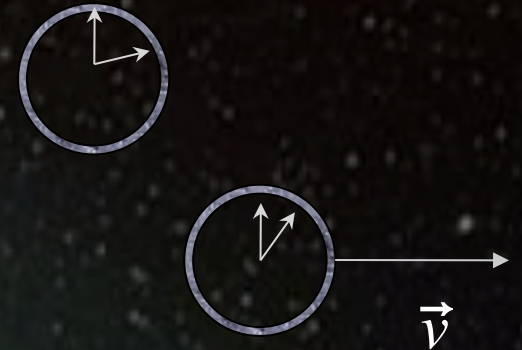
Relatividade Restrita

Efeitos Cinemáticos

Contração de Lorentz



Dilatação Temporal



- *Pseudo-paradoxos.... paradoxo dos gêmeos*

Mas... são realmente reais?

- *relógios atômicos*
- *GPS*

Relatividade Restrita

Mesma dinâmica

$$V^\mu = \frac{dx^\mu}{d\tau} = (\gamma c, \gamma \vec{v})$$

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

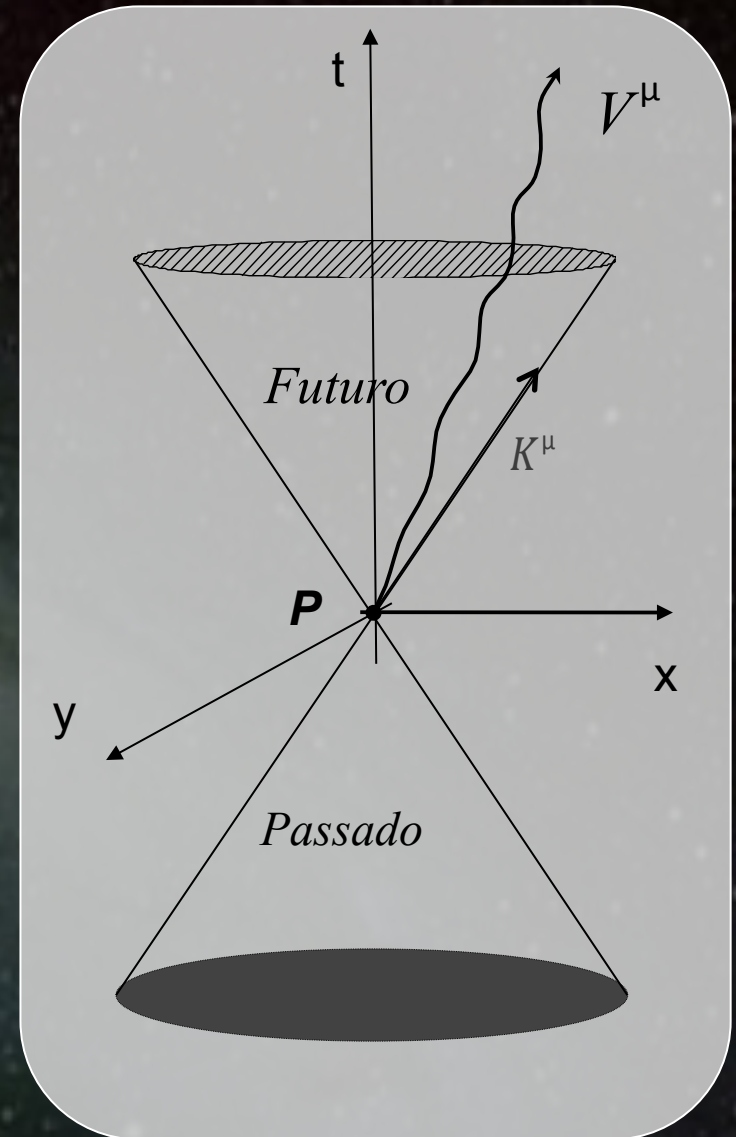
Linha de mundo

$$E = \sqrt{|\vec{p}|^2 c^2 + m^2 c^4}$$

se estiver parado

$$E = mc^2$$

Estrutura Causal



Além da Relatividade Restrita

Gravidade não se encaixa...

- ação-a-distância

Observadores inerciais são especiais...

- não vale aceleração

mas...

$$m_i \approx m_g$$



Gravitação é universal !

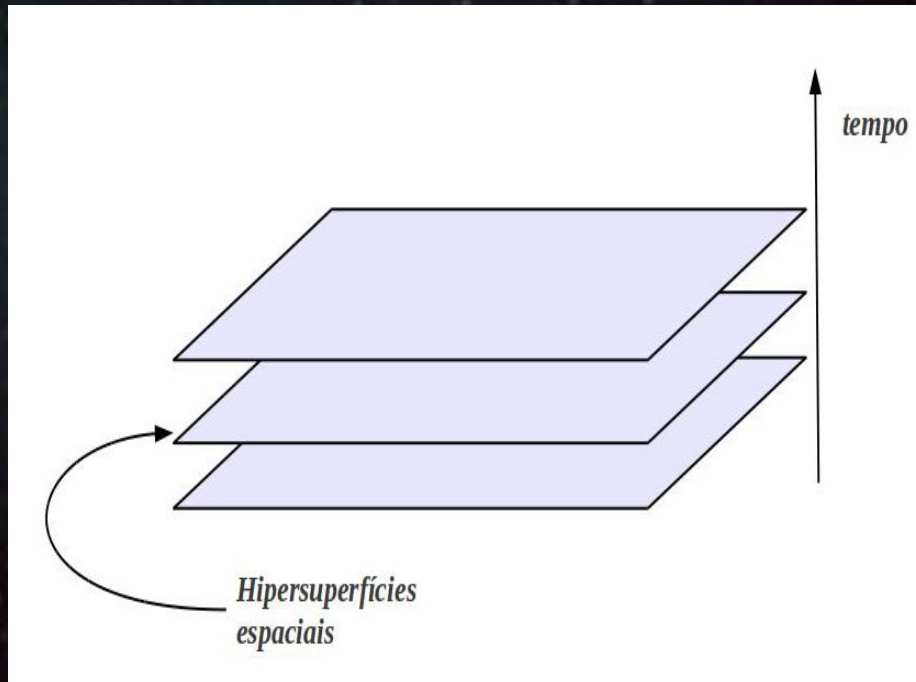
Apollo 15 (1971)

Teoria da Relatividade Geral

Bases conceituais da Relatividade Geral

- *Princípios de Mach....
e o balde de Newton*
- *Princípio de equivalência....
e o movimento dos corpos*
- *Princípio de Covariância....
a estrutura das teorias físicas (objetos absolutos?)*

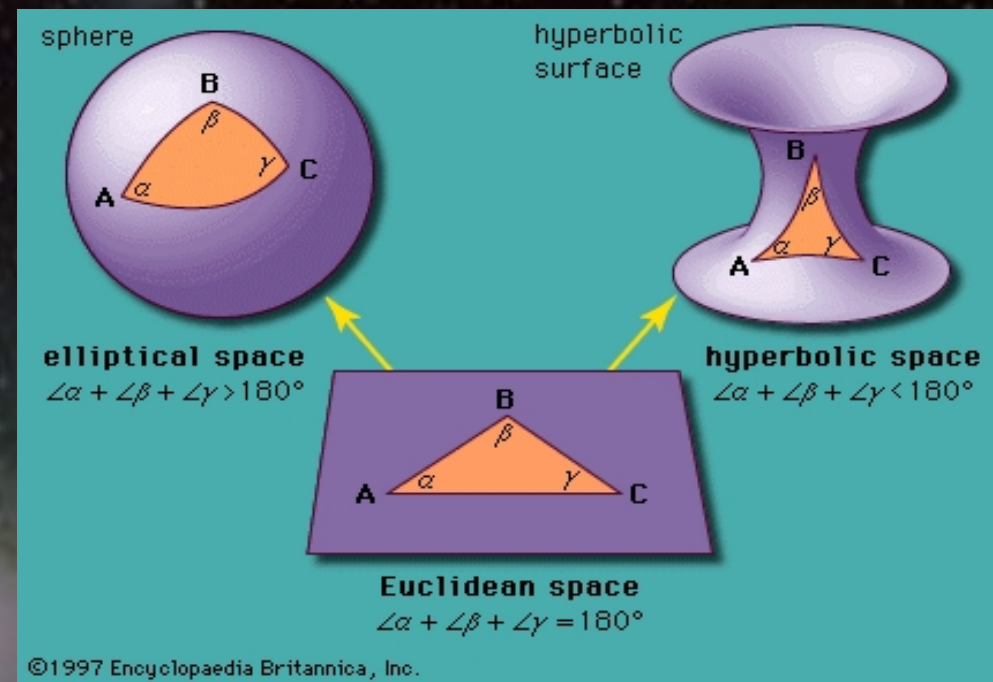
Geometria não-euclidiana



Espaço plano

geometria convencional

menor distância são retas



Espaços curvos

novas relações

curvas geodésicas

Relatividade Geral

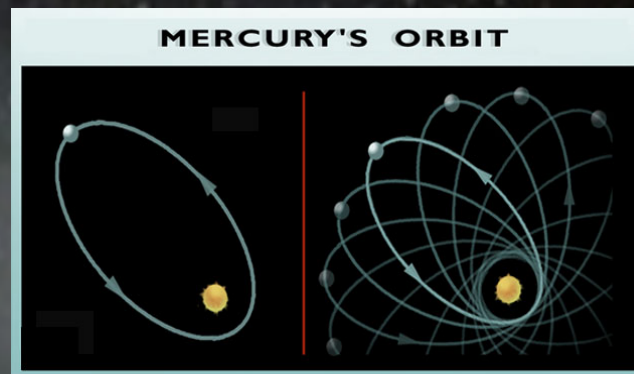
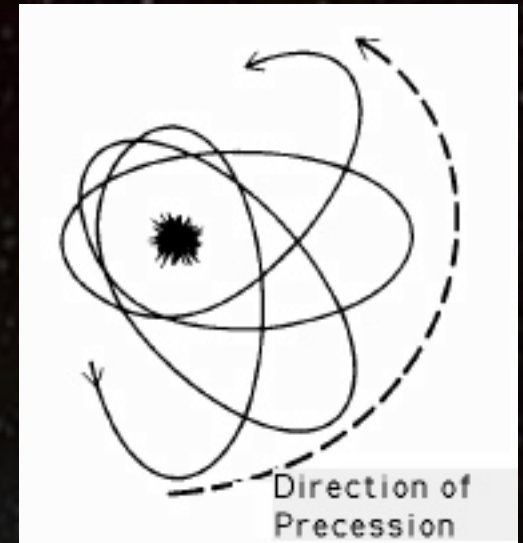
O que é gravitação?

- Teoria de calibre (gauge)
- Quais são os observáveis da teoria?
- Movimentos relativos (desvio geodético)
- Inércia depende da distribuição da matéria mas....
- RG não é uma teoria relacional (Schw \neq Kerr)

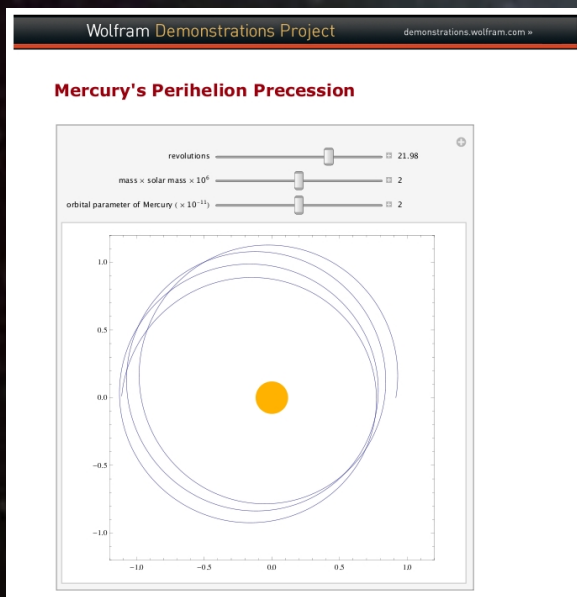
Teoria da Relatividade Geral

Comprovação da Teoria

- *Precessão do perihélio de Mercúrio*



avanço do perihélio

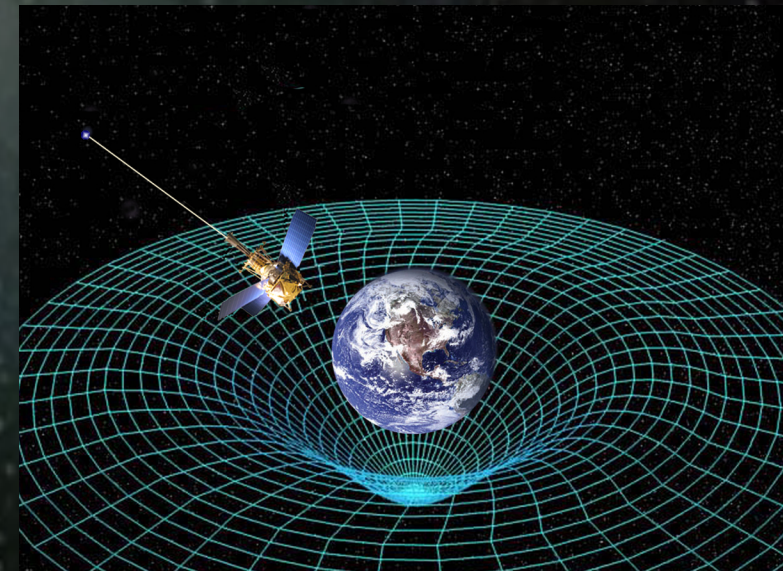
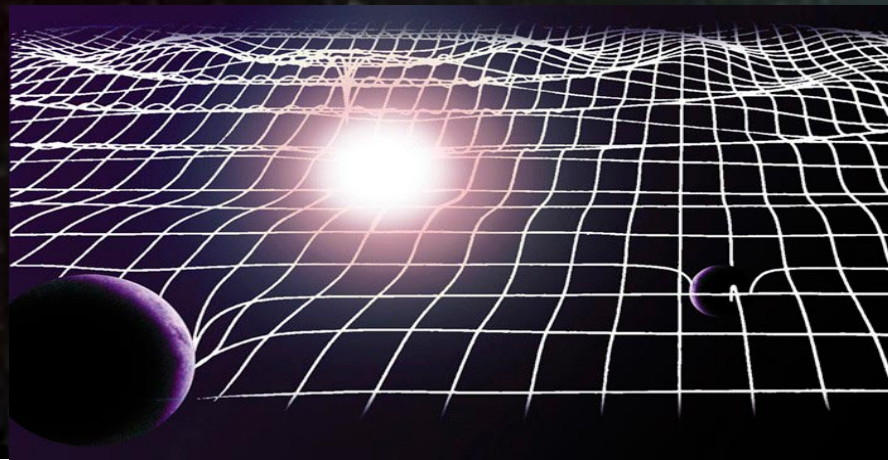
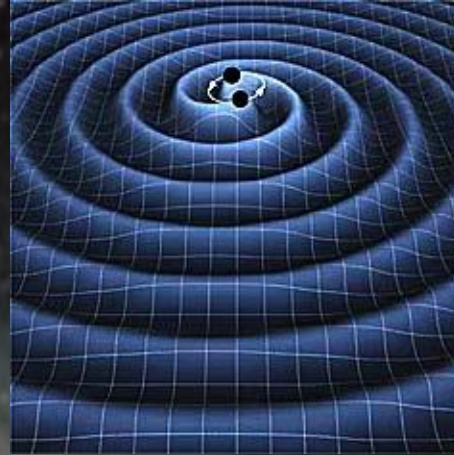
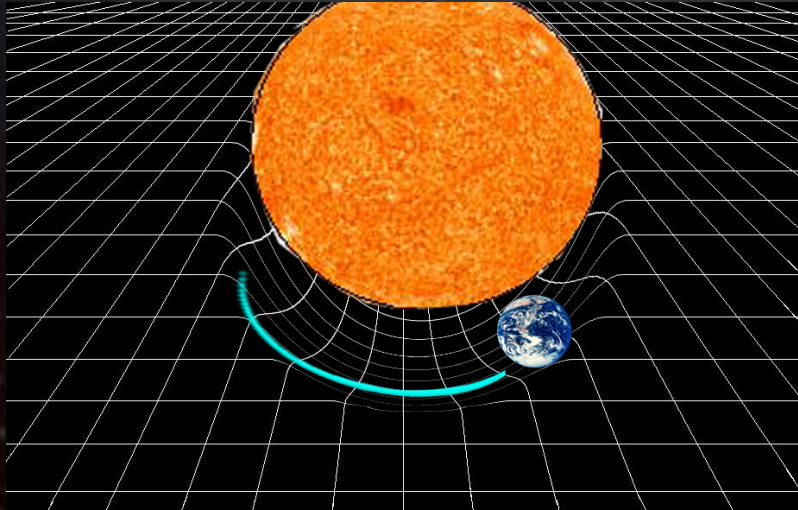


Teoria da Relatividade Geral

Comprovação da Teoria

- Ondas gravitacionais....
e o pulsar binário

O que são ondas gravitacionais?

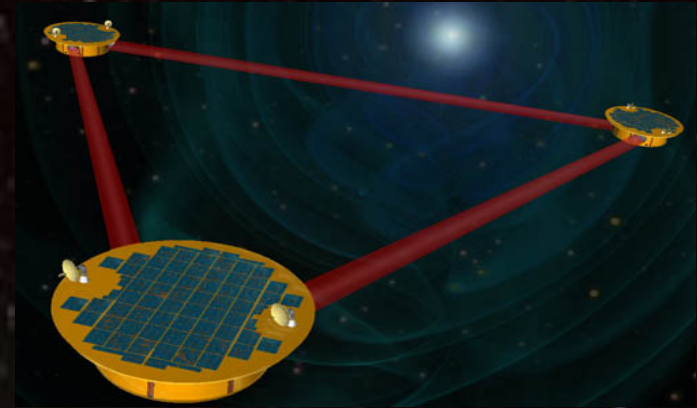


Teoria da Relatividade Geral

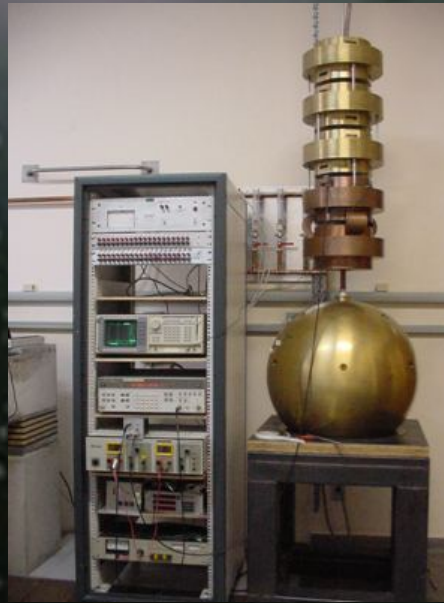
Comprovação da Teoria

- Detectores de ondas gravitacionais....

LISA



LIGO em Lousiana, USA



Mário Schenberg - INPE

Teoria da Relatividade Geral

diagrama Hertzsprung-Russell

Comprovação da Teoria

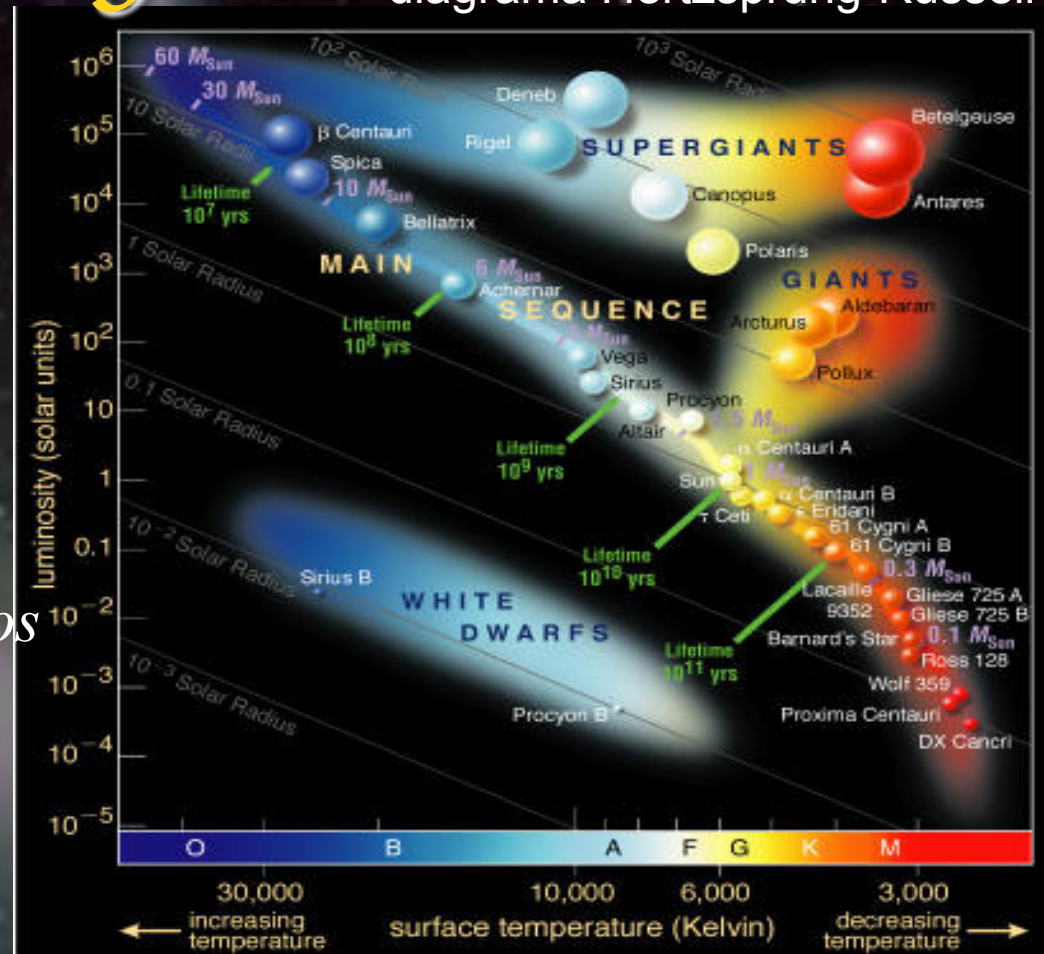
- Ondas gravitacionais...
e o pulsar binário

Pulsares...

estrelas de neutrons

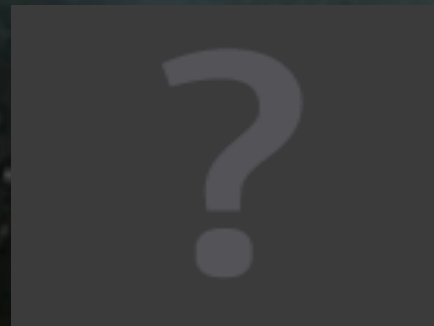
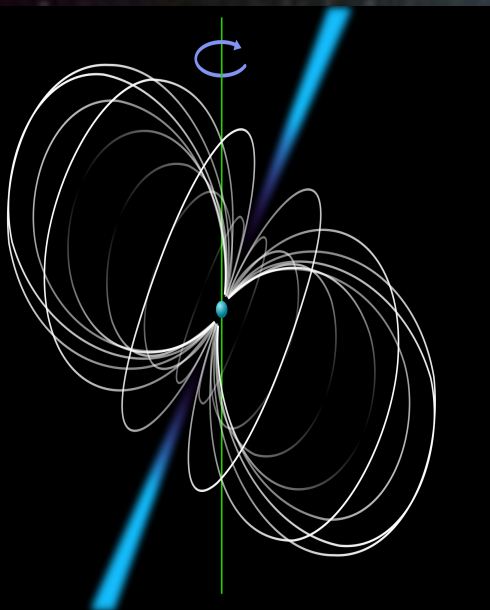
extremamente magnetizadas

períodos de 10^{-3} a 8.51 segundos



formação...

remanescentes de supernovas tipo II, Ib ou Ic



Teoria da Relatividade Geral

Supernovas

- Tipo I- não tem linhas de hidrogênio
 - Tipo Ic - não tem silício nem hélio
 - Tipo Ib - não tem silício;
tem hélio não ionizado
 - Tipo Ia - tem silício ionizado
- Tipo II - tem linhas de hidrogênio

Supernova 1987A
from Universe:Origins and Evolution Homepage

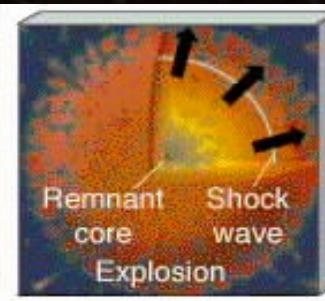
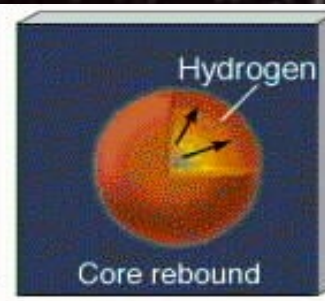
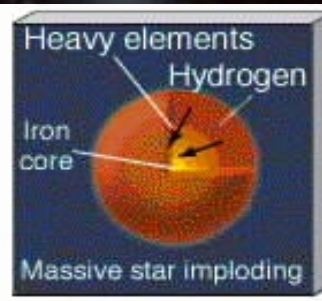


Nebulosa do carangueijo

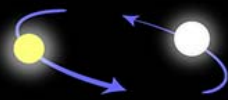


Teoria da Relatividade Geral

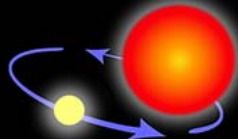
Progenitores das Supernovas



The progenitor of a Type Ia supernova



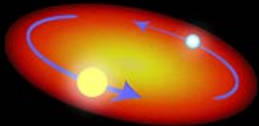
Two normal stars are in a binary pair.



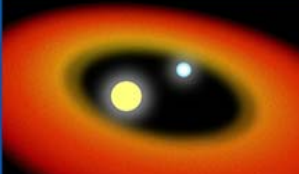
The more massive star becomes a giant...



...which spills gas onto the secondary star, causing it to expand and become engulfed.



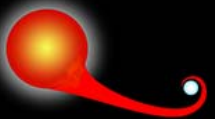
The secondary, lighter star and the core of the giant star spiral inward within a common envelope.



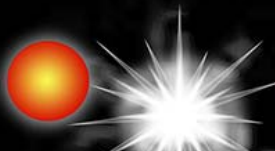
The common envelope is ejected, while the separation between the core and the secondary star decreases.



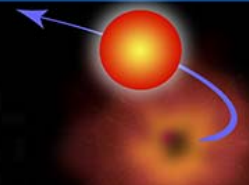
The remaining core of the giant collapses and becomes a white dwarf.



The aging companion star starts swelling, spilling gas onto the white dwarf.

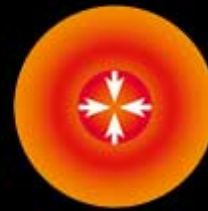


The white dwarf's mass increases until it reaches a critical mass and explodes...

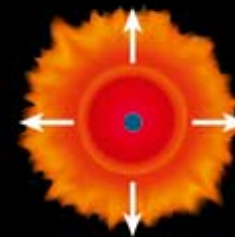


...causing the companion star to be ejected away.

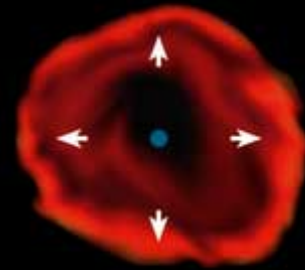
Supernova Tipo II



Implosion



Supernova Explosion

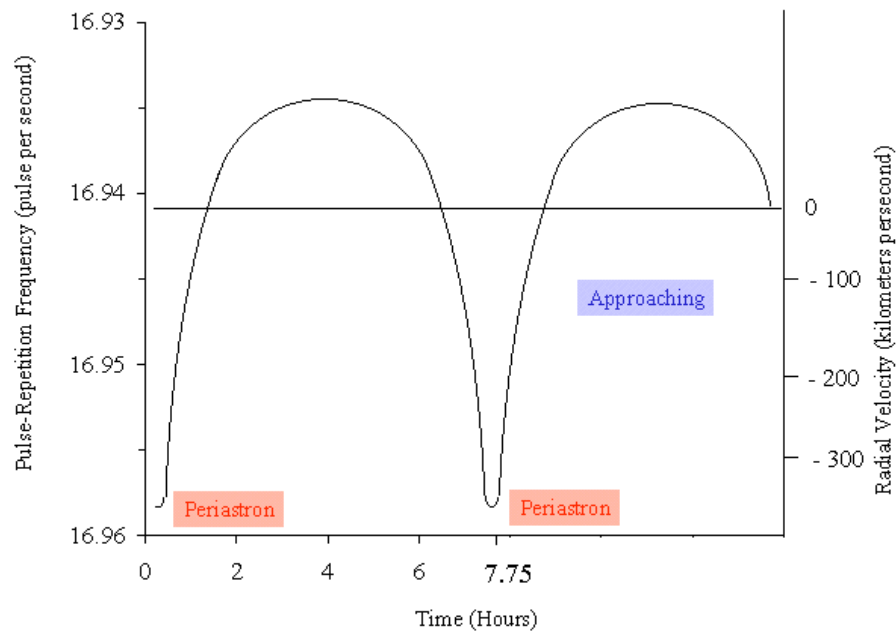


Remnant

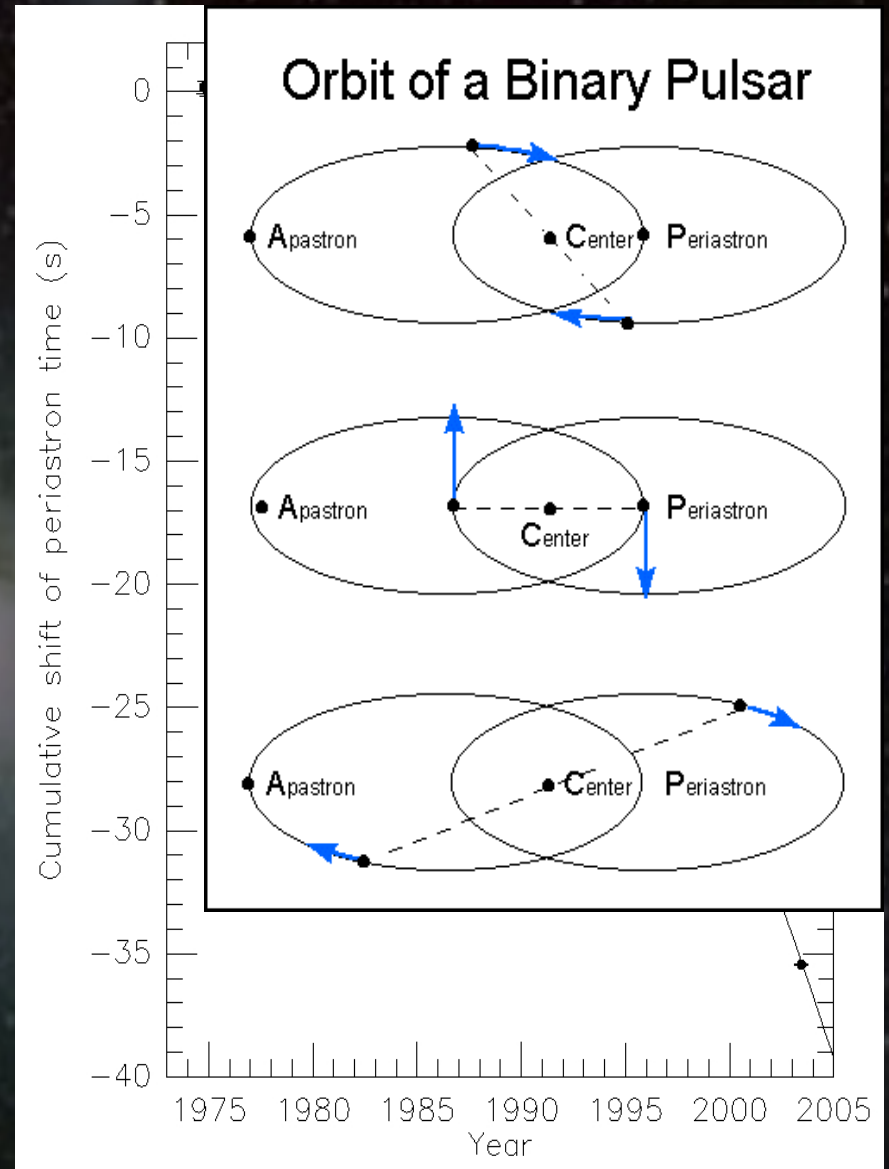
Teoria da Relatividade Geral

Pulsar Binário B1913+16
(Hulse & Taylor 1975)

1993 - prêmio Nobel em Física



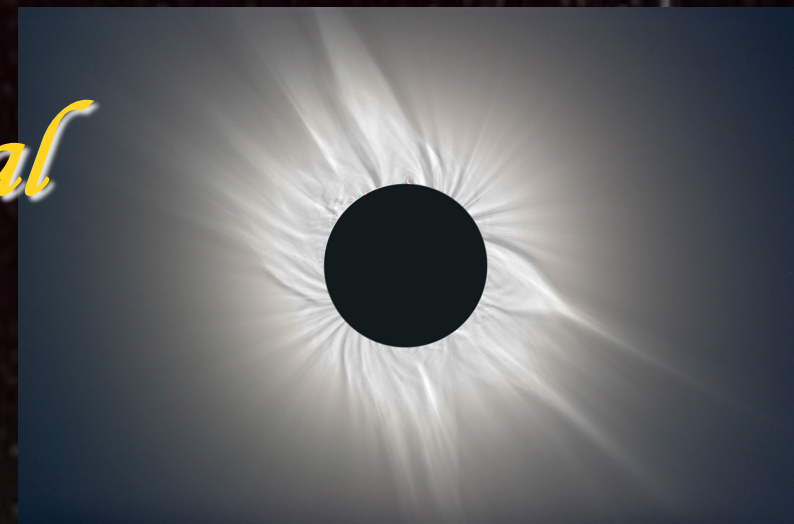
variação frequência → sistema binário



Teoria da Relatividade Geral

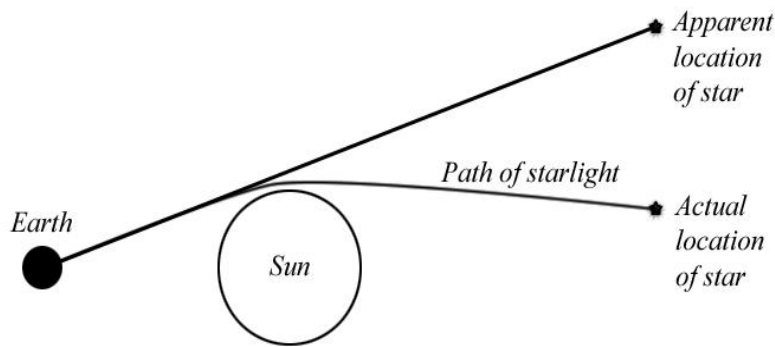
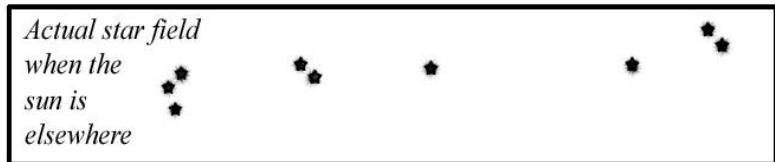
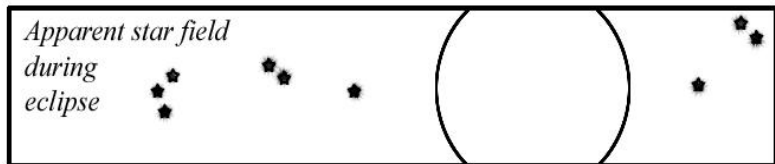
Comprovação da Teoria

- Sobral e a ilha de Príncipe...
e as lentes gravitacionais



Einstein em 1911

$$\Delta_{Total} = \frac{2GM}{c^2 R} \approx .83''$$

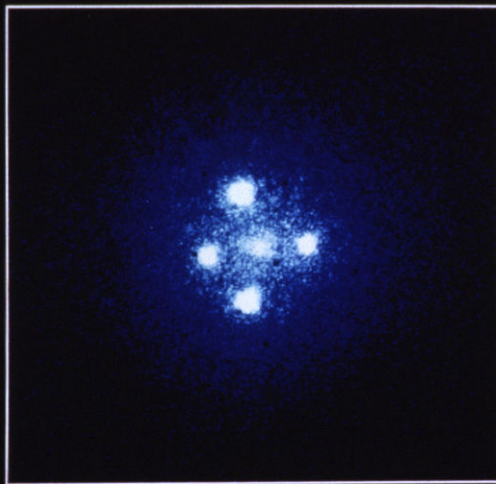
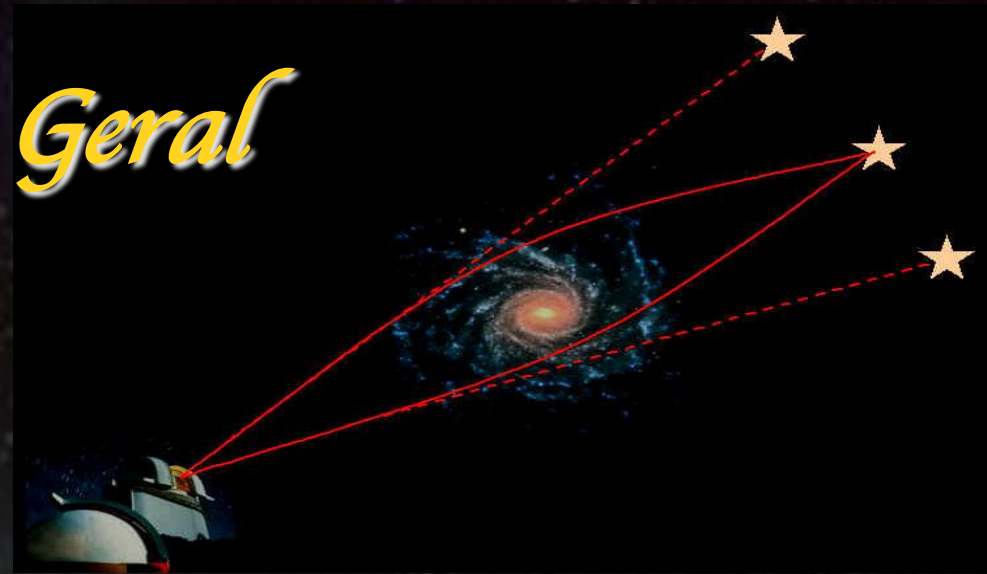


Data	Local	Nº estrelas	Desvio (seg)
Maio 1919	Sobral	7	1.98 ± 1.16
	Ilha Príncipe	15	1.61 ± 0.40
Setembro 1922	Austrália	11-14	1.77 ± 0.40
Fevereiro 1952	Sudan	9-11	1.70 ± 0.10

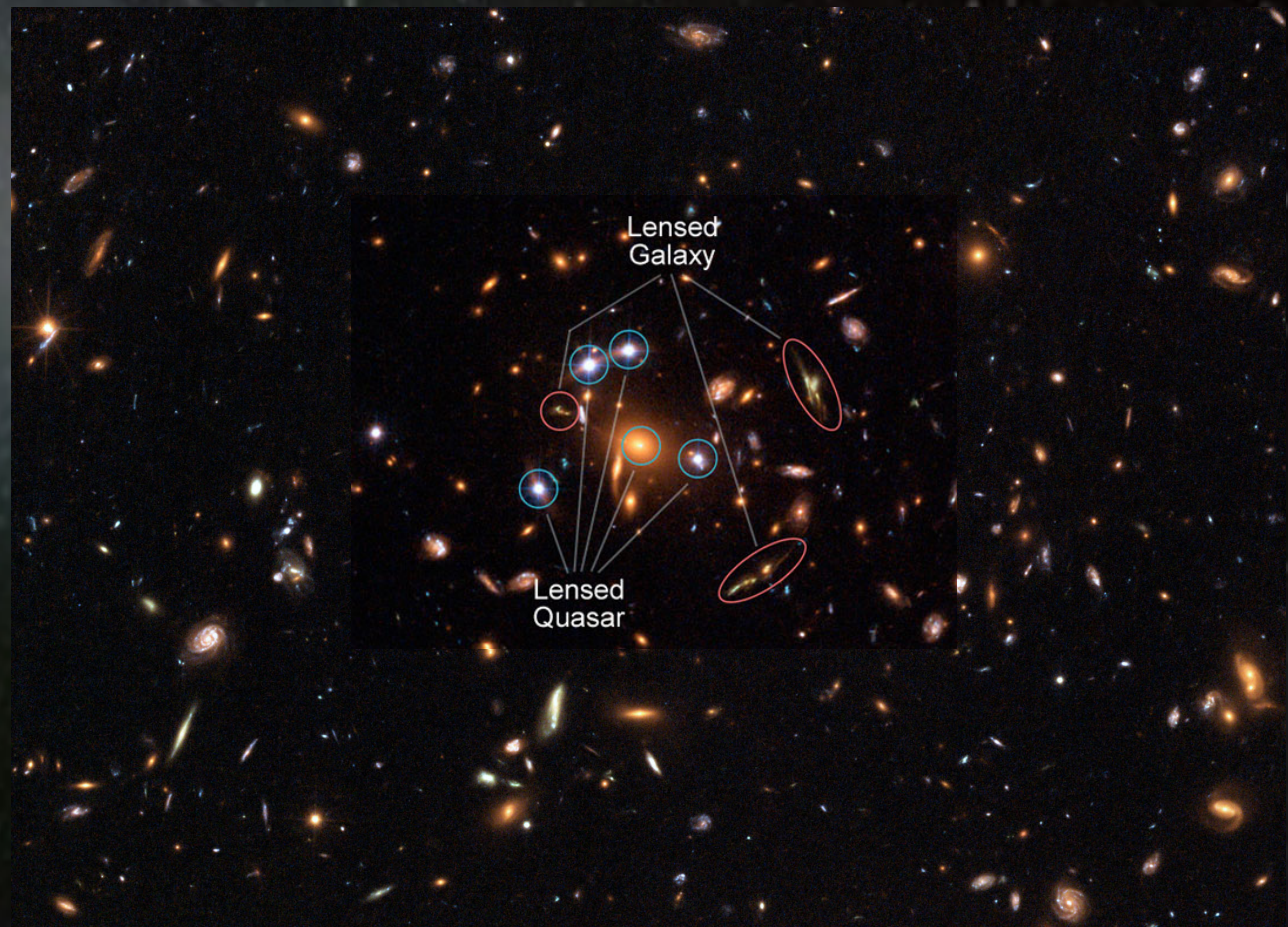
Teoria da Relatividade Geral

Comprovação da Teoria

- *Sobral e a ilha de Príncipe...
e as lentes gravitacionais*



Gravitational Lens G2237+0305



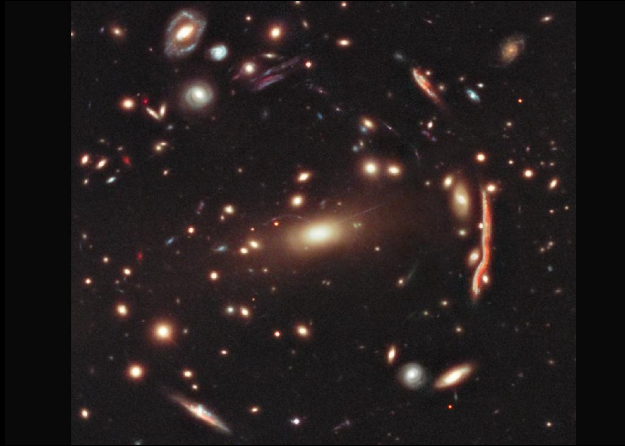
Lentes gravitacionais



Gravitational Lens in Abell 2218

HST - WFPC2

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



Aglomerado da Bala

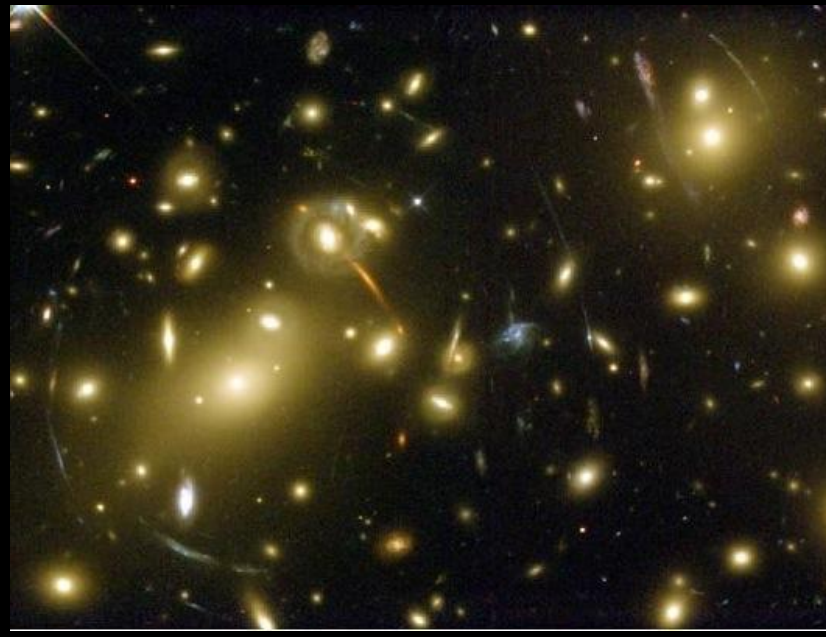
Einstein Ring Gravitational Lenses

Hubble Space Telescope · ACS

J073728.45+321618.5	J095629.77+510006.6	J120540.43+491029.3	J125028.25+052349.0
J140228.21+632133.5	J162746.44-005357.5	J163028.15+452036.2	J232120.93-093910.2

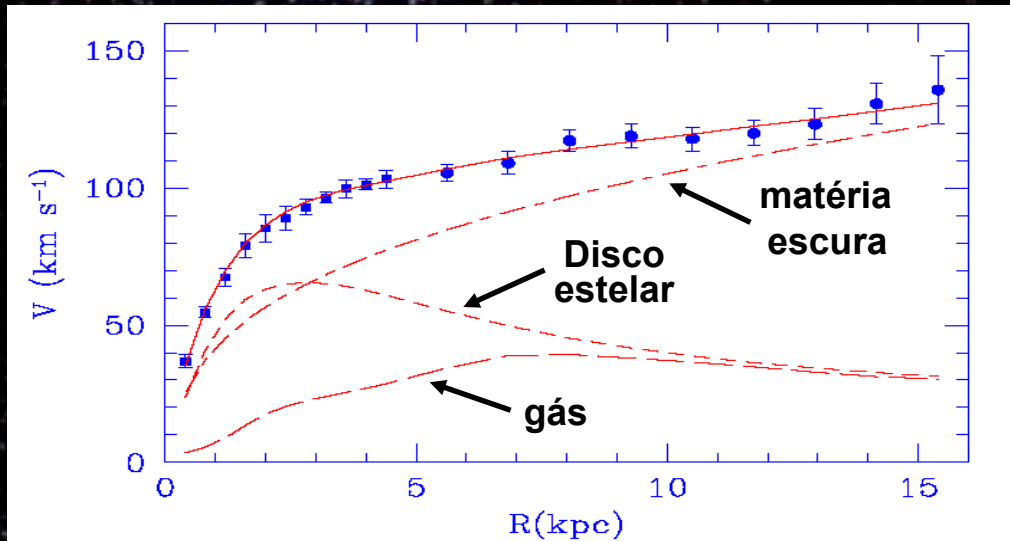
NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

STScI-PRC05-32

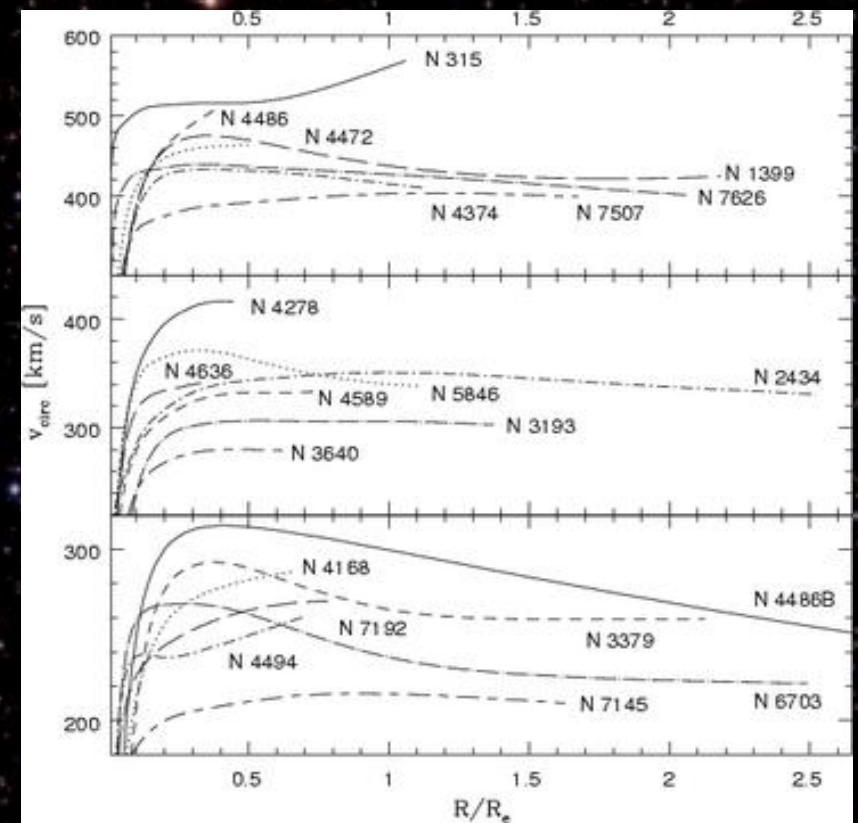


Matéria Escura

- *Curvas de velocidade das galáxias...*
- *Quanta matéria ?*



Galáxia M33 astro-ph/9909252



Sinais de matéria escura

- picos da CMB
- lentes gravitacionais
- formação de estrutura
- curvas de rotação das galáxias

Porque não é matéria bariônica?

Se é escura... como conseguimos observar?

Teoria da Relatividade Geral

Buracos Negros

- ↪ *Estágio final de uma estrela*
- ↪ *Possui um horizonte de eventos*
- ↪ *É realizado na Natureza?*

Sustentação de uma estrela....

Anã branca:

- *tamanho similar ao da Terra; massa Solar*
- *luminosidade ~ energia termal;*
- *pressão da degenerescência dos elétrons;*

Estrela de Neutrons:

- *raios da ordem de 12 Km; massa Solar ~ 1.4 a 3*
 - *emissão em raios-X*
- pressão da degenerescência dos neutrons;*

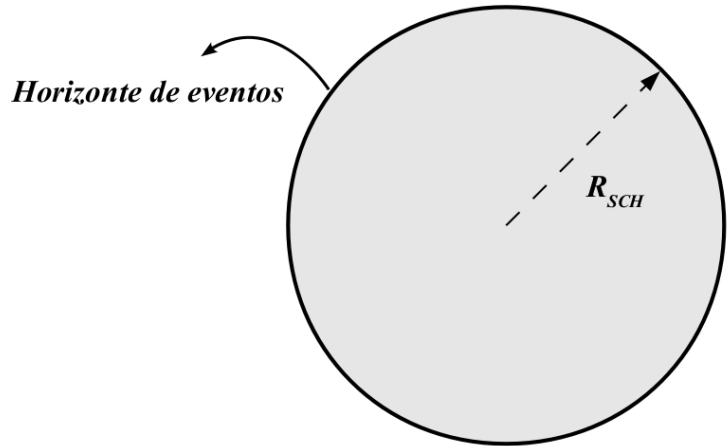
Estrela de quarks (?)

Teoria da Relatividade Geral

Buracos Negros

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) dt^2 - \frac{1}{\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$

$$R_{SCH} = \frac{2GM}{c^2}$$



Raio de

Raio

Físico

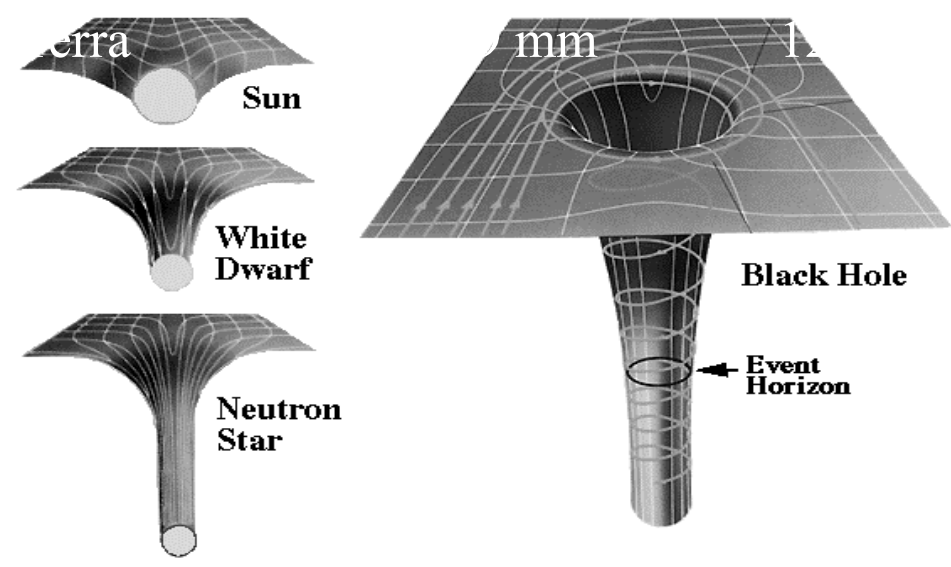
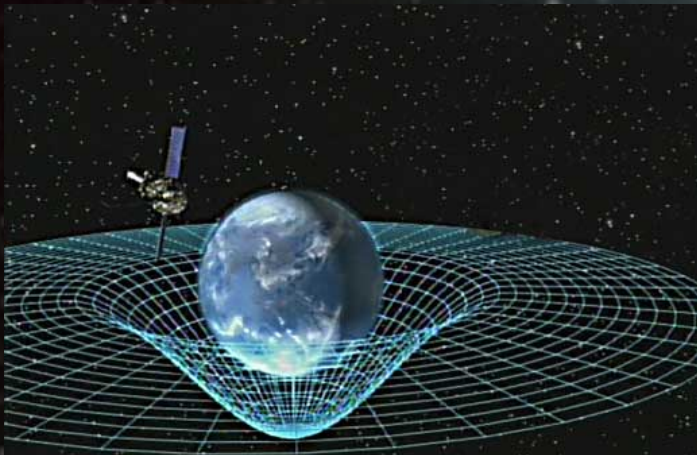
Schwarzschild

Est. Neutrons 9 Km

12 Km

Sol

3 Km



Teoria da Relatividade Geral

Horizonte de eventos

buraco negro na Via Lactea

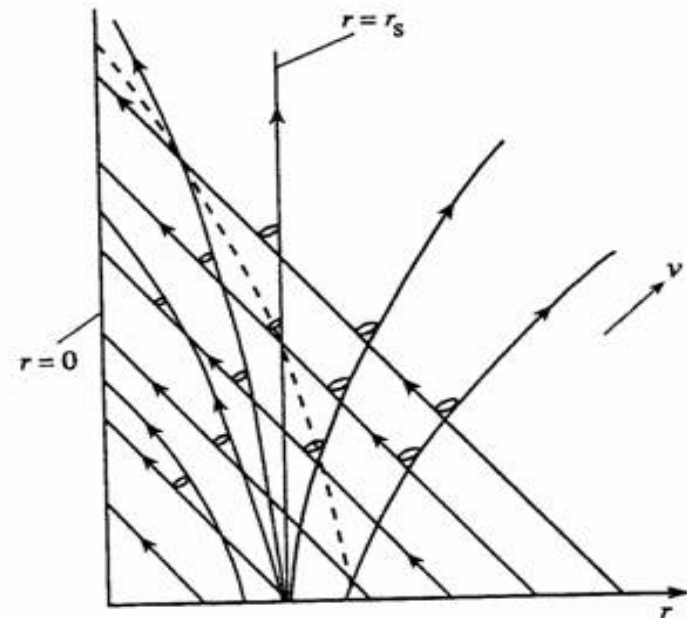
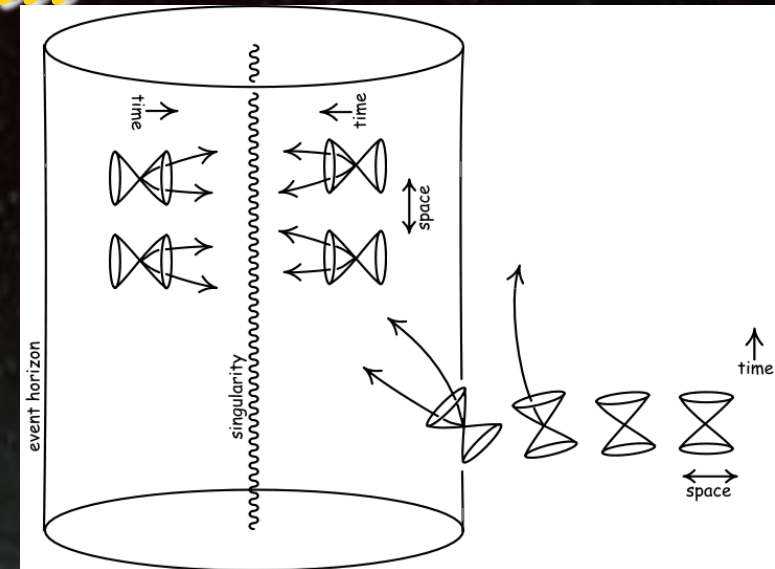
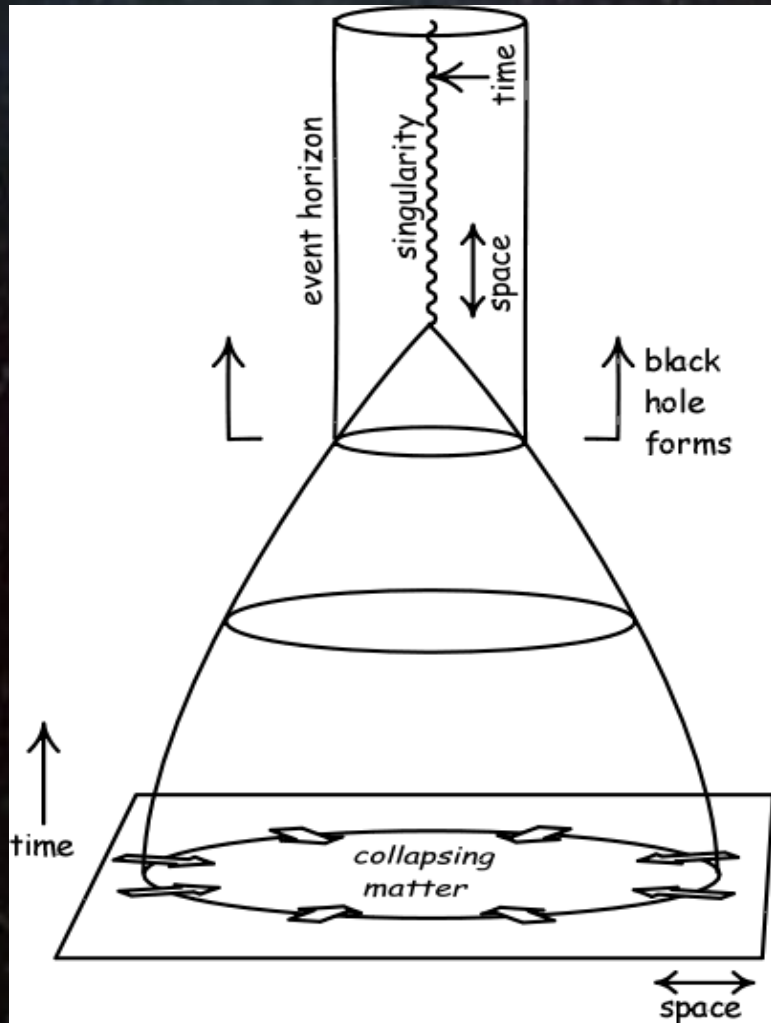
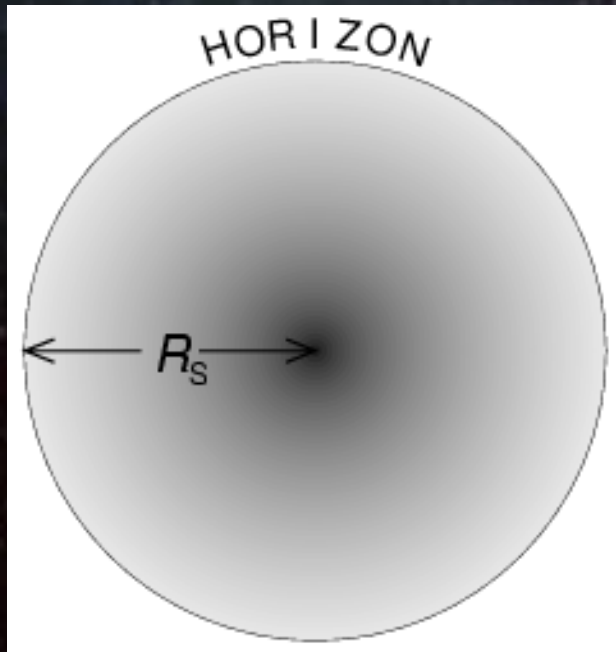


Figure 4.3. Trajectories of light rays (full lines) and an inward-falling particle (broken line) moving radially near a black hole.

Teoria da Relatividade Geral

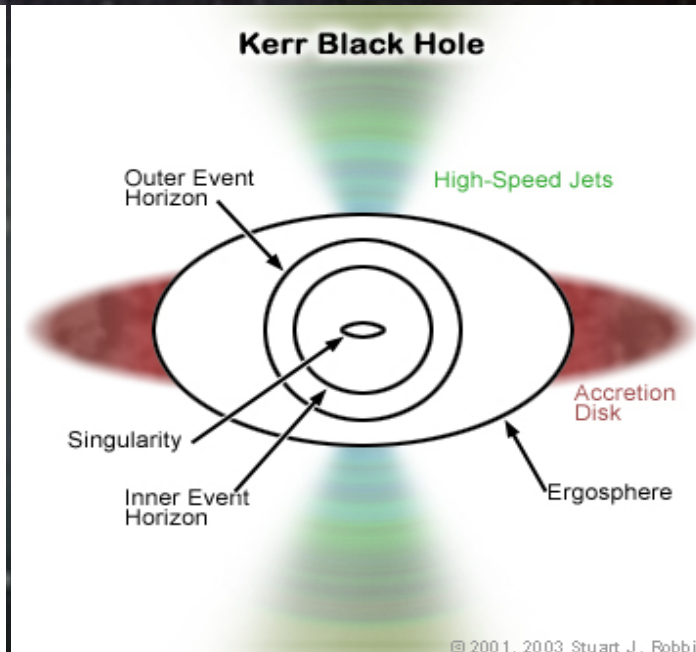
Tipos de Buracos negros

Schwarzschild



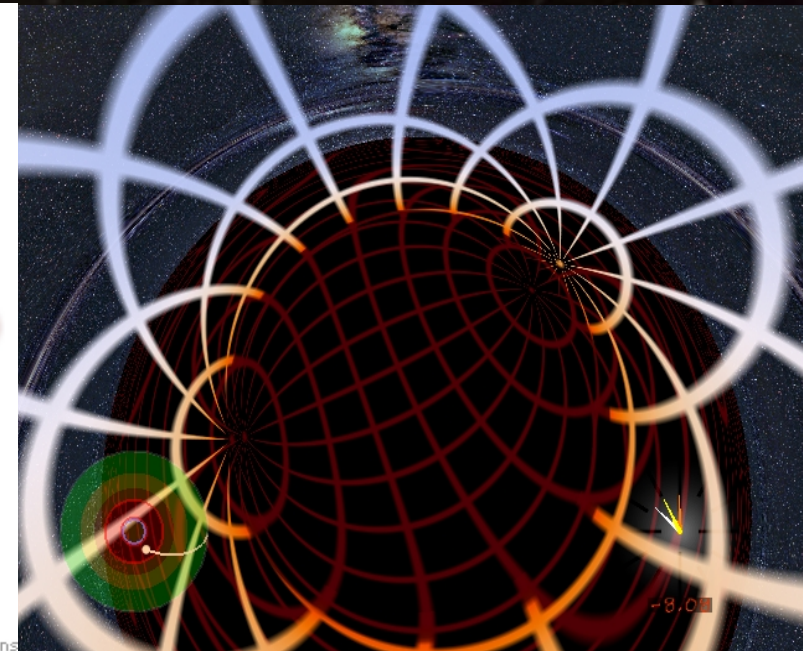
M

Kerr



M, J

Reissner-Nordström

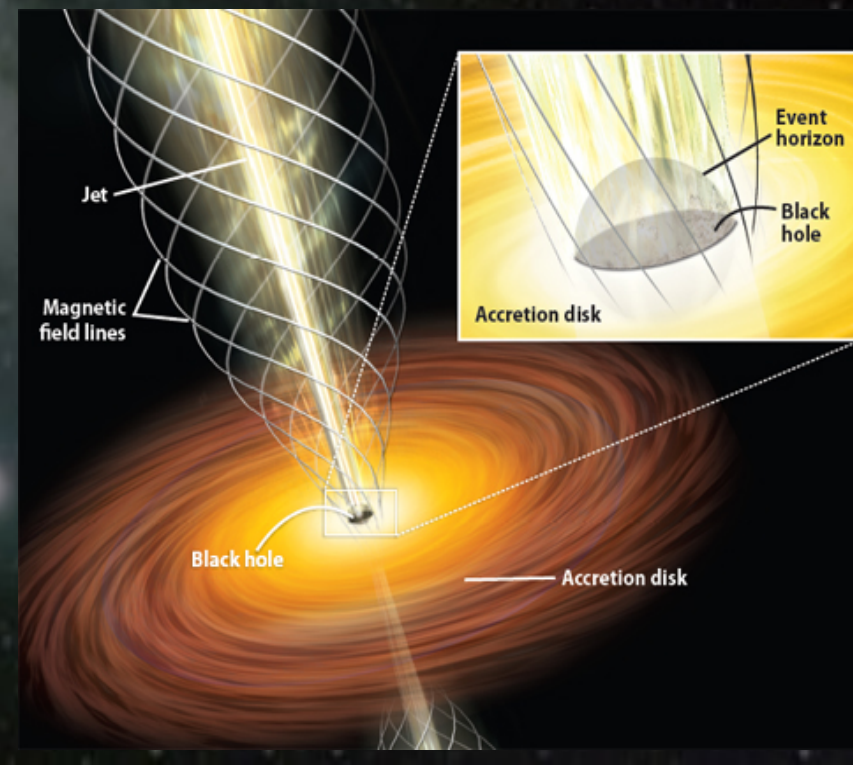
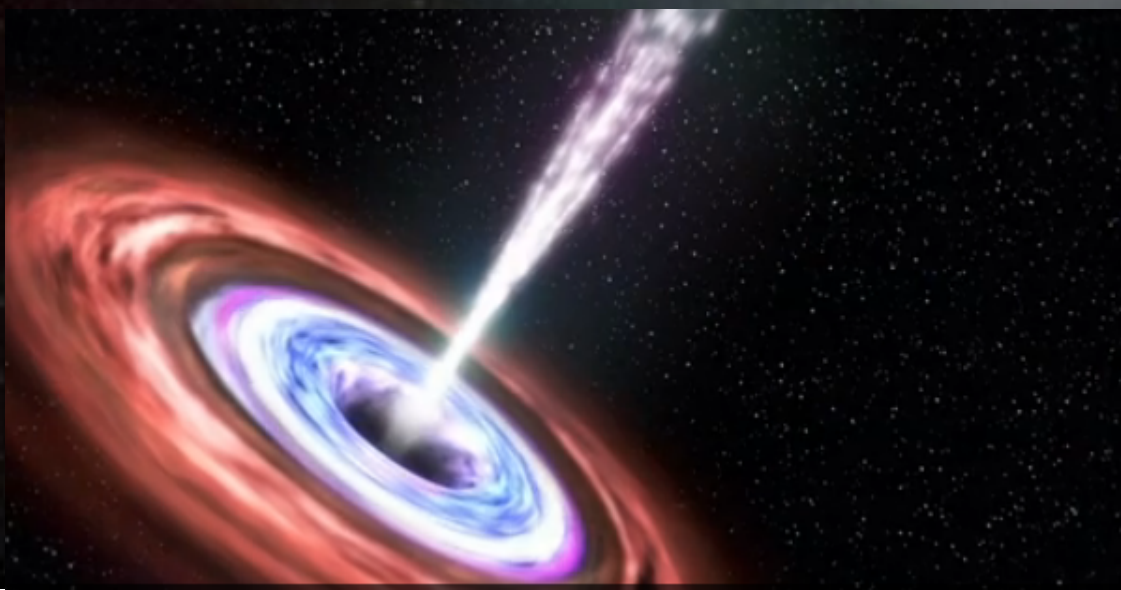
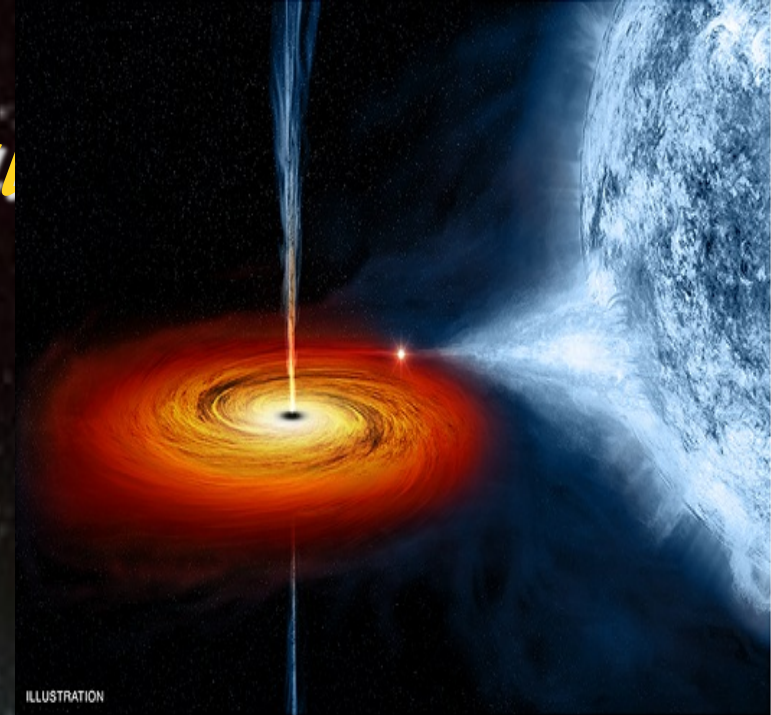


M, Q

Buraco negro mais geral possível - Kerr-Newman (M, J, Q)

Teoria da Relatividade Geral

Mas....



Teoria da Relatividade Geral

Desafios...

Testes em regimes mais intensos

Aplicação na Cosmologia

Relatividade Numérica

Questões teóricas....

energia gravitacional,

entropia,

relação com mecânica quântica

Singularidades

gravitação como um fenômeno emergente