

INTRODUÇÃO À GRAVITAÇÃO E À COSMOLOGIA

Victor O. Rivelles

–

Aula 3

Instituto de Física da Universidade de São Paulo

e-mail: rivelles@fma.if.usp.br

<http://www.fma.if.usp.br/~rivelles>

Escola Norte-Nordeste de Partículas e Campos

J. Pessoa, 10-14/08/2009

- **Redshift gravitacional:** a Terra não é um referencial inercial.
- **Referencial inercial:** na ausência de forças um corpo em repouso permanece em repouso.
- A gravitação é uma força diferente das outras: **afeta todos os corpos da mesma maneira.**

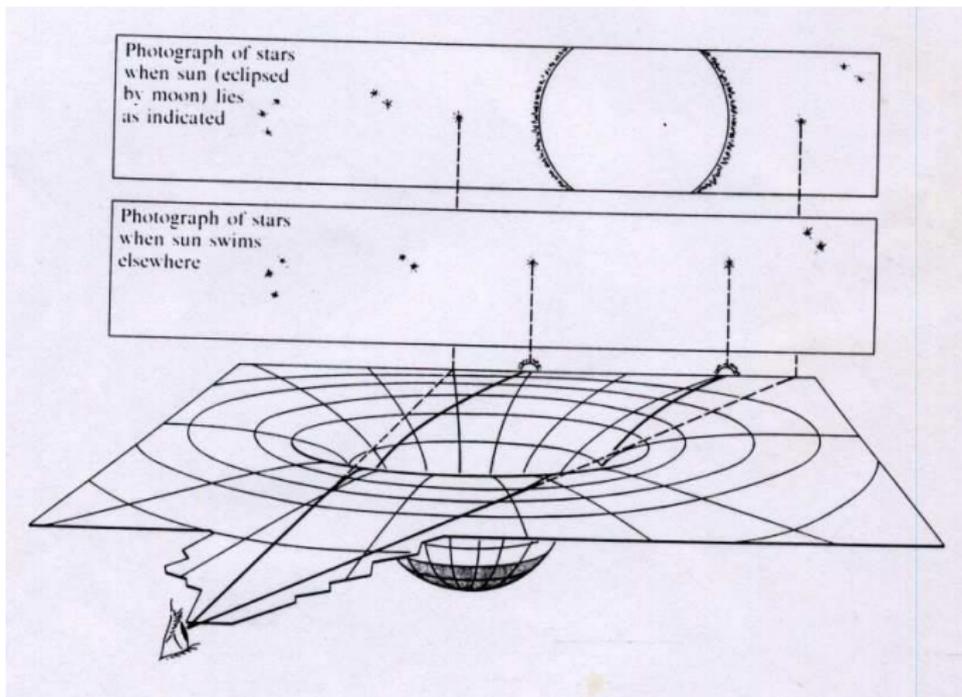
$$F = -\frac{G m M}{r^2}$$

Eletromagnetismo: afeta apenas corpos carregados; **corpos sem carga elétrica não são afetados.**

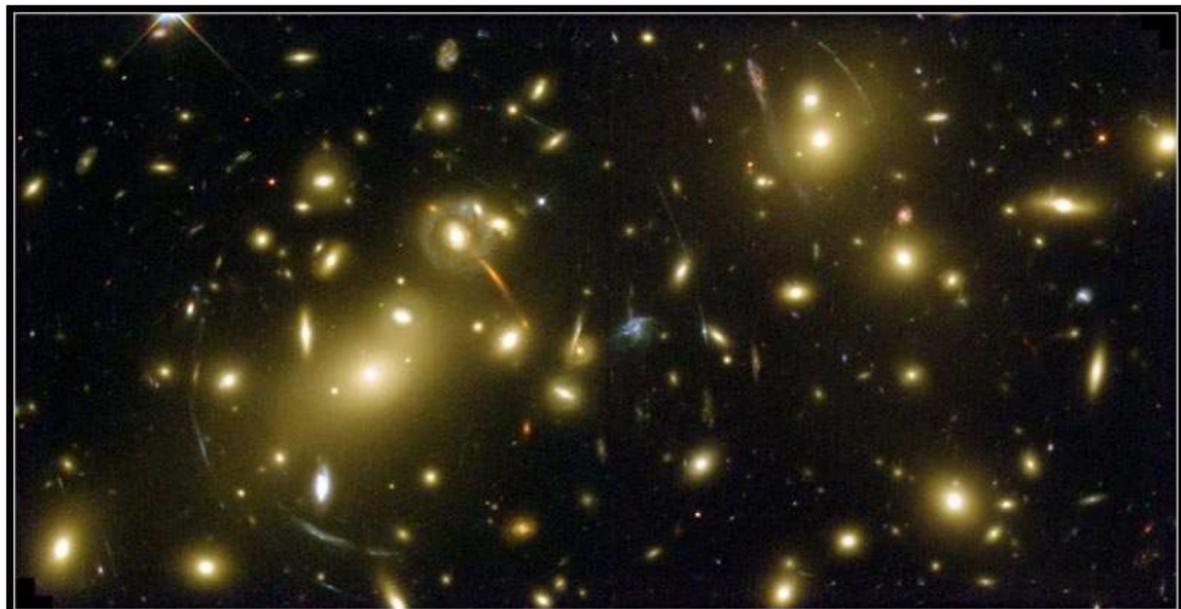
- **Referencial em queda livre** se comporta como um referencial inercial.
- **Válido localmente.** Não é possível encontrar um referencial inercial definido globalmente num campo gravitacional não homogêneo!!!
- Localmente é possível encontrar um referencial inercial.
- Localmente um espaço curvo é plano.
- Partículas em queda livre seguem **geodésicas**.
- **Espaço-tempo curvo.**
- Eqs. de Einstein: $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi T_{\mu\nu}$

LENTEs GRAVITACIONAIS

Lentes Gravitacionais



A curvatura do espaço-tempo distorce o caminho dos raios de luz



Galaxy Cluster Abell 2218

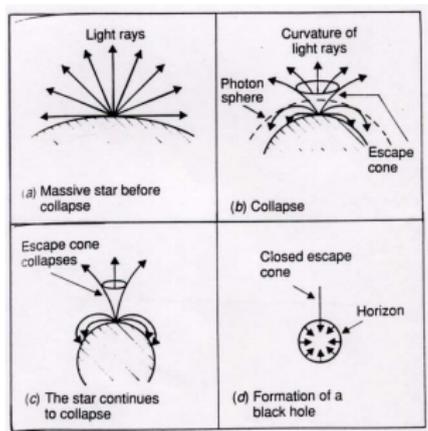
HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08

BURACOS NEGROS

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2MG}{r} \right) dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{r} \right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$

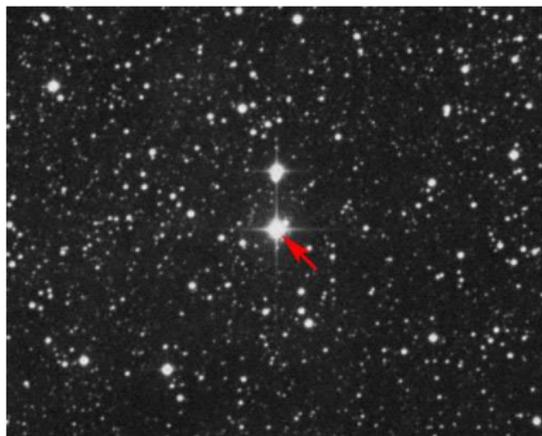
- A métrica é singular em $r = 2GM$, o horizonte do buraco negro (para o Sol 3 Km!!!)
- A métrica é singular em $r = 0$ (singularidade verdadeira)
- Para $r < 2GM$ espaço e tempo “trocam” de papel.
- Andar para a “frente” no tempo significa andar para r decrescente dentro do buraco negro
- Uma vez dentro do buraco negro o único caminho é **cair na singularidade**. Não há como sair do buraco negro.
- Próximo da singularidade a força gravitacional é tão intensa que é necessário levar em conta **efeitos quânticos**. Ninguém sabe como fazer isso.



RADIAÇÃO DE HAWKING

- Princípio da incerteza $\Delta E \Delta t > \hbar$ permite que partículas virtuais de energia E existam por um tempo $\Delta t \sim \hbar/E$.
- Criação de pares perto do horizonte: uma delas escapa para o infinito e a outra atravessa o horizonte.
- A radiação dessas partículas tem o espectro da radiação de corpo negro com temperatura $T = \frac{\hbar}{8\pi M}$
- O buraco negro não é tão negro como se imaginava
- Energia $E = kT = \frac{\hbar}{8\pi M}$, $k = 1$
- Área do buraco negro $A = 4\pi r^2 = 16\pi M^2$
- Então $dA = 32\pi M dM$ ou $dM = \frac{dA}{32\pi M} = \frac{\hbar}{8\pi M} d\left(\frac{A}{4\hbar}\right)$
- Comparando com $dE = T dS$ obtemos $S = \frac{A}{4\hbar}$
- A entropia é proporcional à área e não ao volume! (princípio holográfico)
- Buraco negro irradia e “evapora”: problema da perda de informação (evolução não unitária)
- Buraco negro do tamanho do comprimento Compton $L_c = \frac{\hbar}{Mc}$, $R_s = \frac{GM}{c^2}$
implica que sua massa $M = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$ que é a massa de Planck!

EXISTEM BURACOS NEGROS?



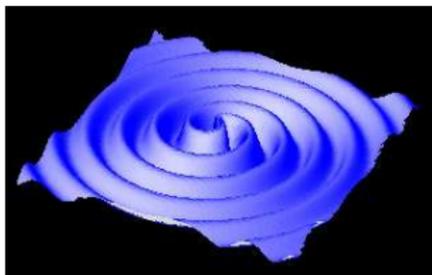
Cygnus-X1: buraco negro com 10 massas solares orbitando uma estrela gigante azul



Jato emitido pela galáxia M87 causado por um buraco negro supermassivo no centro da galáxia

O buraco negro no centro de nossa galáxia!

ONDAS GRAVITACIONAIS



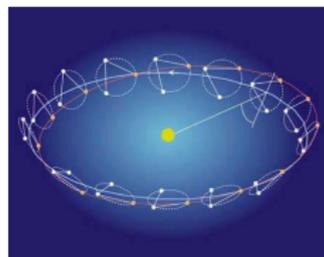
Ondas gravitacionais produzidas pela colisão de dois buracos negros



Detector esférico Mário Schenberg na USP (massa ressonante)



LIGO: detector de ondas gravitacionais (interferometria com laser) 4 Km



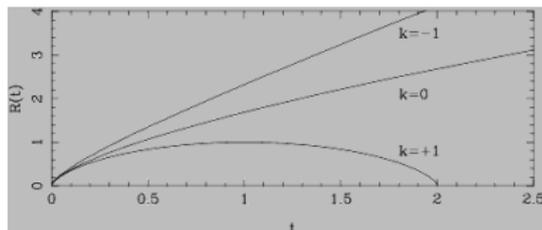
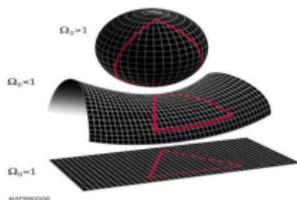
LISA: Conjunto de tres satélites usando interferometria. Distância de 5 milhões Km, lançamento em 2015

COSMOLOGIA

- Cosmologia é o estudo da origem, estrutura e evolução do Universo.
- Princípio cosmológico: o universo é homogêneo e isotrópico.
- 1922 Friedmann encontra soluções cosmológicas da relatividade geral:

$$ds^2 = -dt^2 + R^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right)$$

- $k = 1$ universo **fechado**
- $k = -1$ universo **aberto**
- $k = 0$ universo **plano**
- $R(t)$ é o fator de escala do universo.
- Volume do universo R^3



- O universo está em expansão (ou contração)

UNIVERSO EM EXPANSÃO

- Na época acreditava-se que o Universo era **estático**!
- Em 1917 Einstein modifica suas equações para obter um universo estático.
- Introduce a **constante cosmológica!**

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

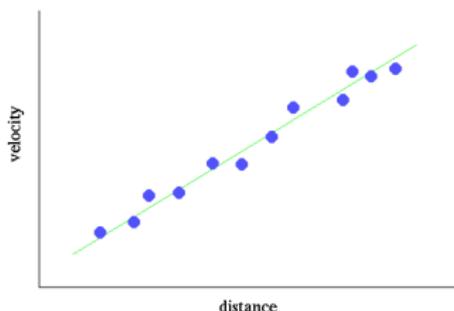
- Em 1929 Hubble descobriu que as galáxias estão se afastando de nós e portanto o **Universo está em expansão!**
- Einstein afirma que cometeu o maior erro de sua vida!

Lei de Hubble: A velocidade de recessão é proporcional à distância da galáxia.

$$\vec{v} = H_0 \vec{r}$$

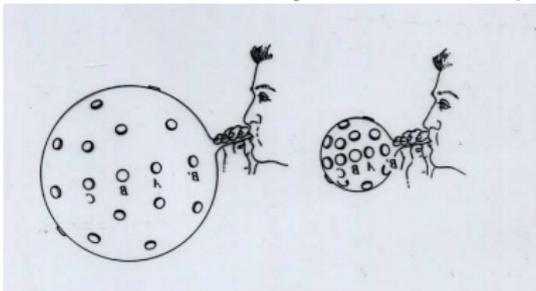
$$H_0 = \frac{\dot{R}}{R} \text{ hoje.}$$

Hubble's law



UNIVERSO EM EXPANSÃO

- Descreve o comportamento médio das galáxias.
- Não está em contradição com o Princípio Cosmológico.



- Como as galáxias estão se afastando uma das outras elas deveriam estar **mais próximas no passado**.
- Portanto, no passado, aconteceu o ...

BIG BANG

- A explosão inicial, há cerca de 13.7 bilhões de anos atrás.



- Cosmologia do Big Bang.
- Em 1949 Gamow prevê a existência da **radiação cósmica de fundo** deixada pelo Big Bang.

RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO

- Em 1965 a radiação cósmica de fundo é **descoberta** por Penzias e Wilson.



Hoje em dia utilizam-se satélites: **WMAP**
Detecta a radiação de fundo à 2.7K e diferenças de temperatura de **micro-Kelvin**.

