
INTRODUÇÃO À RELATIVIDADE GERAL - Aula 3

Victor O. Rivelles

Instituto de Física

Universidade de São Paulo

rivelles@fma.if.usp.br

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

XXI Jornada de Física Teórica – 2006

Revisão

Redshift gravitacional: a Terra não é um referencial inercial

Revisão

Redshift gravitacional: a Terra não é um referencial inercial

Referencial inercial: na ausência de forças um corpo em repouso permanece em repouso

Revisão

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**

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

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

Revisão

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**

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

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!!!

Revisão

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**

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

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

Revisão

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**

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

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

Revisão

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**

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

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

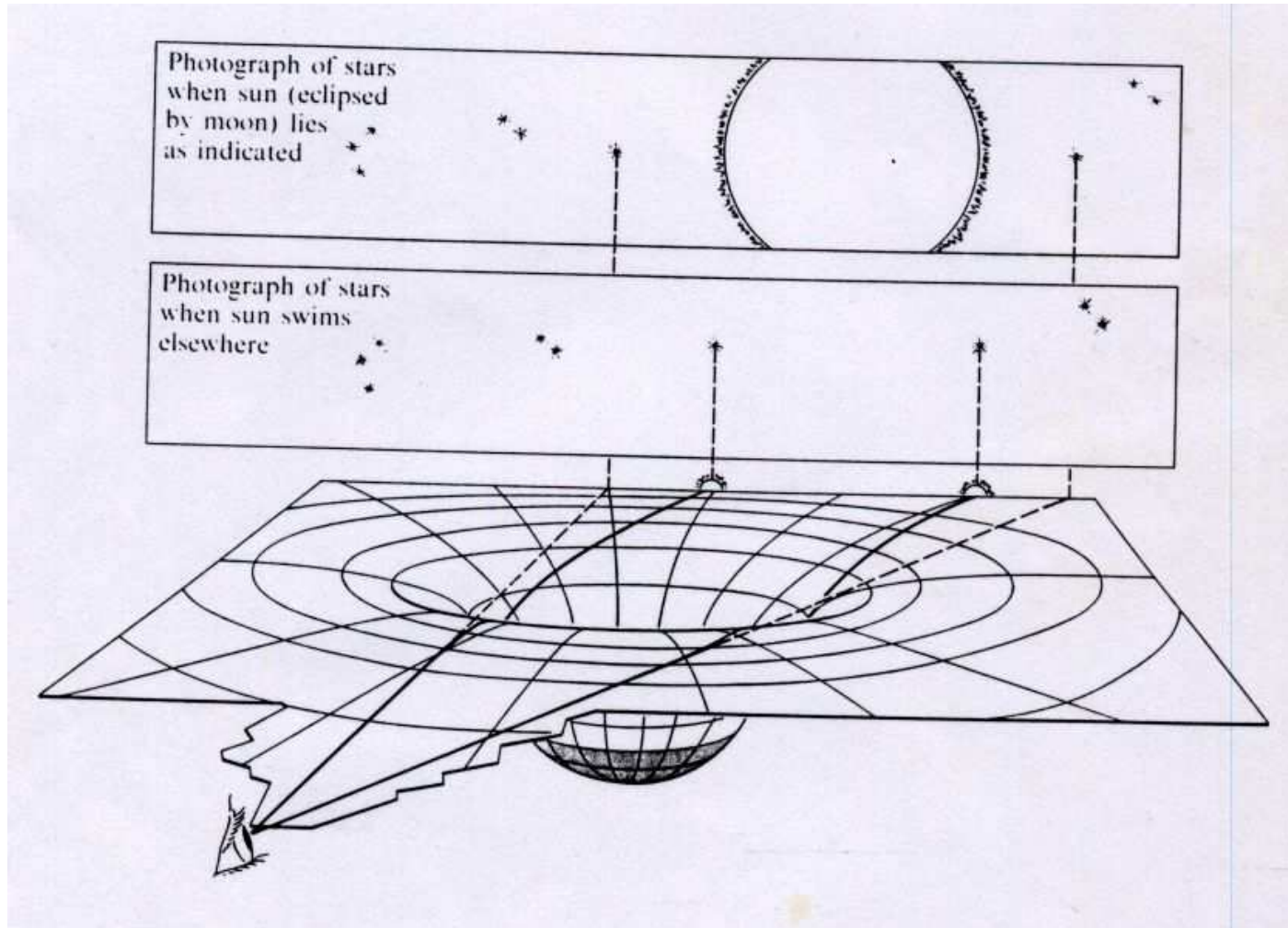
Partículas em queda livre seguem **geodésicas**

Espaço-tempo curvo

Eqs. de Einstein: $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi T_{\mu\nu}$

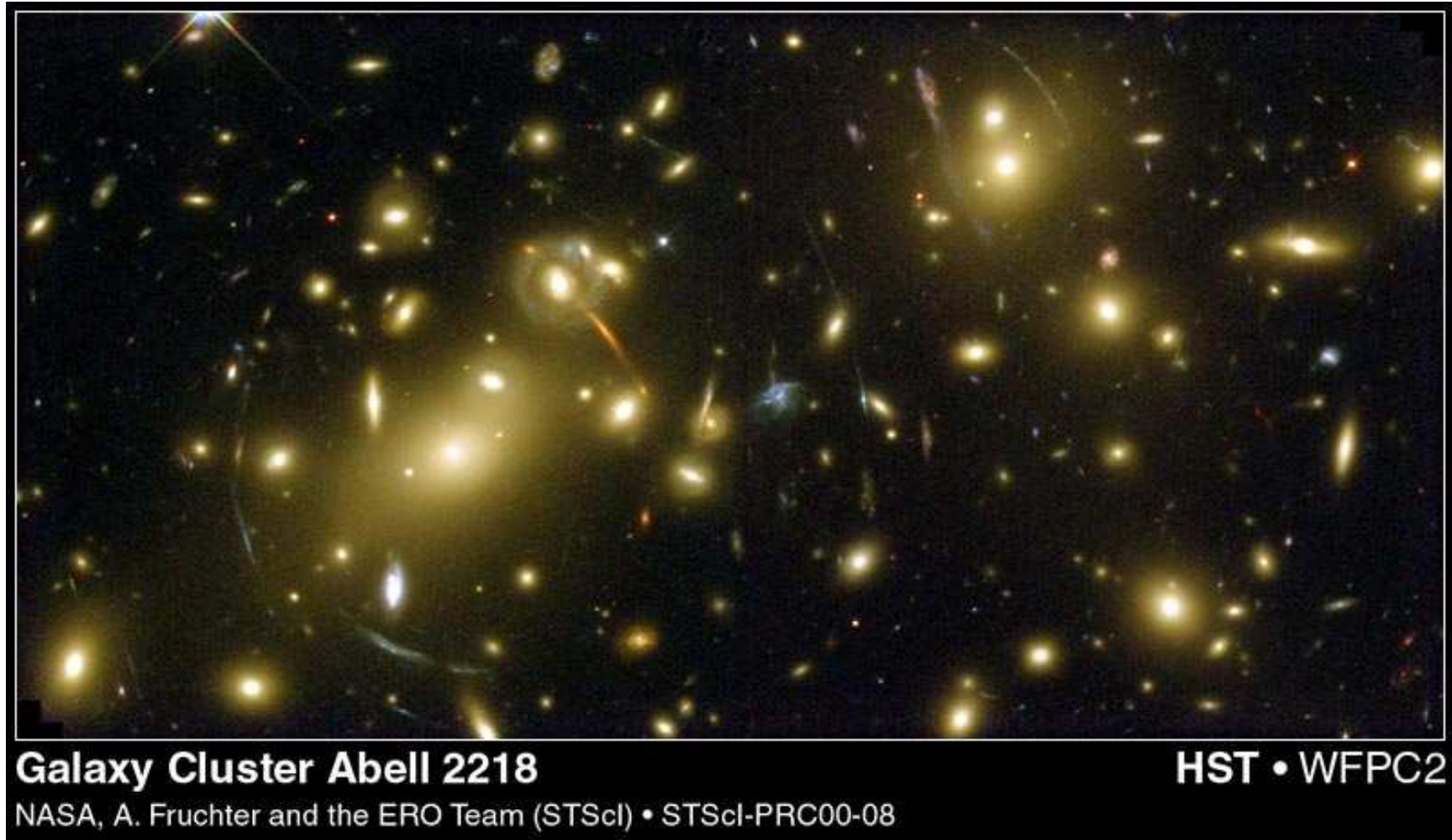
Efeitos da Relatividade Geral

Lentes Gravitacionais

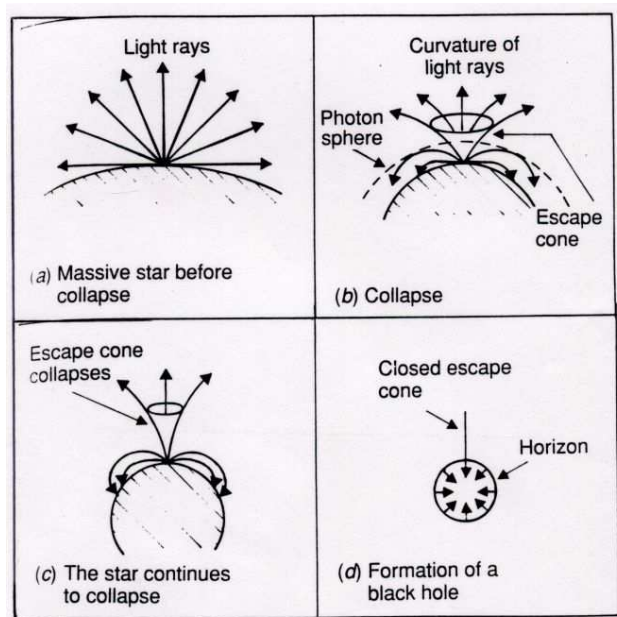


A curvatura do espaço-tempo distorce o caminho dos raios de luz

Lentes Gravitacionais

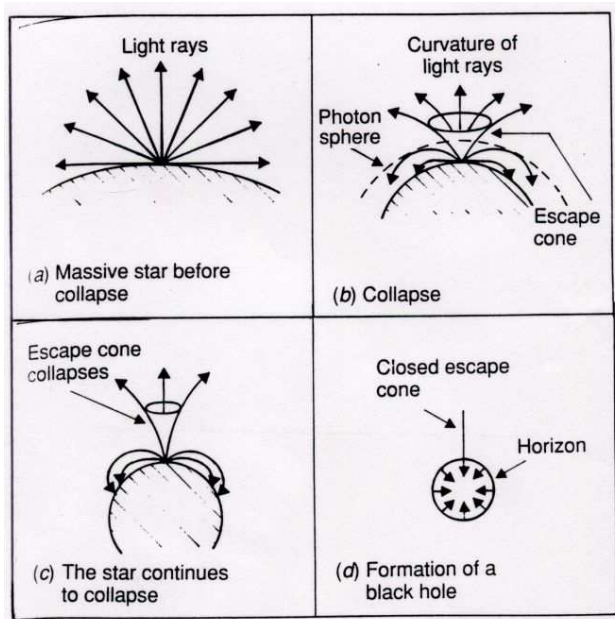


Buracos Negros



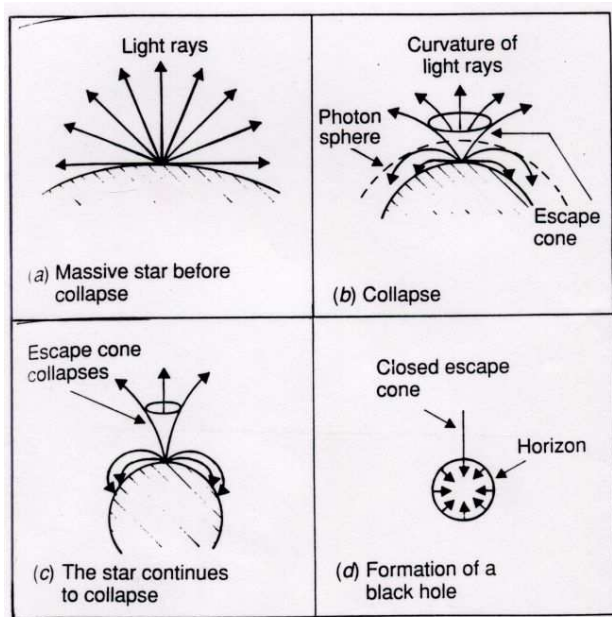
Buracos Negros

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



Buracos Negros

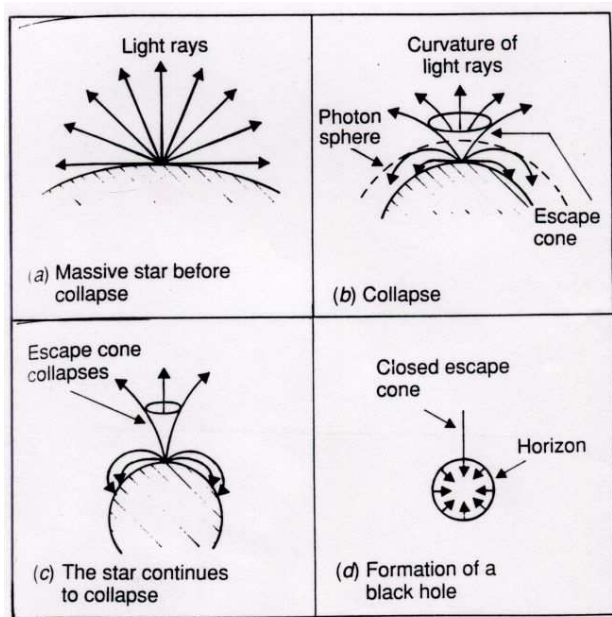
$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2MG}{r} \right) dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{r} \right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$



- 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)

Buracos Negros

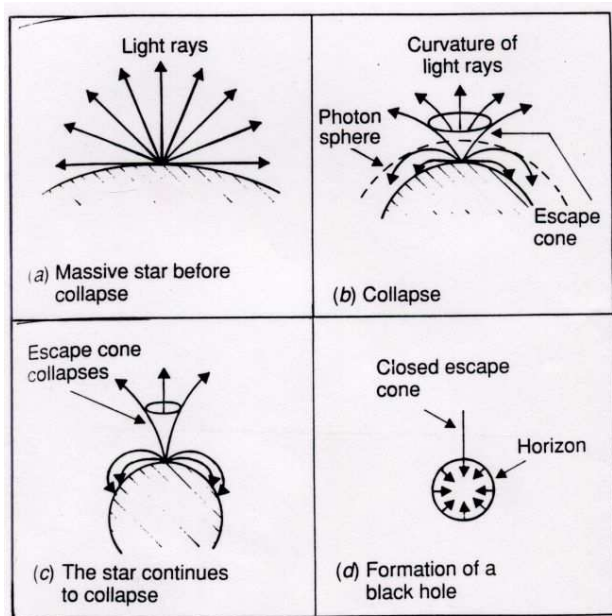
$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2MG}{r} \right) dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{r} \right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$



- 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.

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 fótons virtuais de energia E existam por um tempo $\Delta t \sim \hbar/E$

Radiação de Hawking

Princípio da incerteza $\Delta E \Delta t > \hbar$ permite que fótons virtuais de energia E existam por um tempo $\Delta t \sim \hbar/E$

Criação de pares perto do horizonte: fóton com energia E escapa para o infinito e o fóton com energia $-E$ atravessa o horizonte

A radiação desses fótons 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

Radiação de Hawking

Princípio da incerteza $\Delta E \Delta t > \hbar$ permite que fótons virtuais de energia E existam por um tempo $\Delta t \sim \hbar/E$

Criação de pares perto do horizonte: fóton com energia E escapa para o infinito e o fóton com energia $-E$ atravessa o horizonte

A radiação desses fótons 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

Área do buraco negro $A = 4\pi r^2 = 16\pi M^2$

Então $dA = 32\pi M dM$ ou $dM = \frac{dA}{32\pi M} = \frac{\hbar}{8\pi M} d\left(\frac{A}{4\hbar}\right)$

Radiação de Hawking

Princípio da incerteza $\Delta E \Delta t > \hbar$ permite que fótons virtuais de energia E existam por um tempo $\Delta t \sim \hbar/E$

Criação de pares perto do horizonte: fóton com energia E escapa para o infinito e o fóton com energia $-E$ atravessa o horizonte

A radiação desses fótons 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

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)

Radiação de Hawking

Princípio da incerteza $\Delta E \Delta t > \hbar$ permite que fótons virtuais de energia E existam por um tempo $\Delta t \sim \hbar/E$

Criação de pares perto do horizonte: fóton com energia E escapa para o infinito e o fóton com energia $-E$ atravessa o horizonte

A radiação desses fótons 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

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)

Radiação de Hawking

Princípio da incerteza $\Delta E \Delta t > \hbar$ permite que fótons virtuais de energia E existam por um tempo $\Delta t \sim \hbar/E$

Criação de pares perto do horizonte: fóton com energia E escapa para o infinito e o fóton com energia $-E$ atravessa o horizonte

A radiação desses fótons 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

Área do buraco negro $A = 4\pi r^2 = 16\pi M^2$

Então $dA = 32\pi M dM$ ou $dM = \frac{dA}{32\pi M} = \frac{\hbar}{8\pi M} d\left(\frac{A}{4\hbar}\right)$

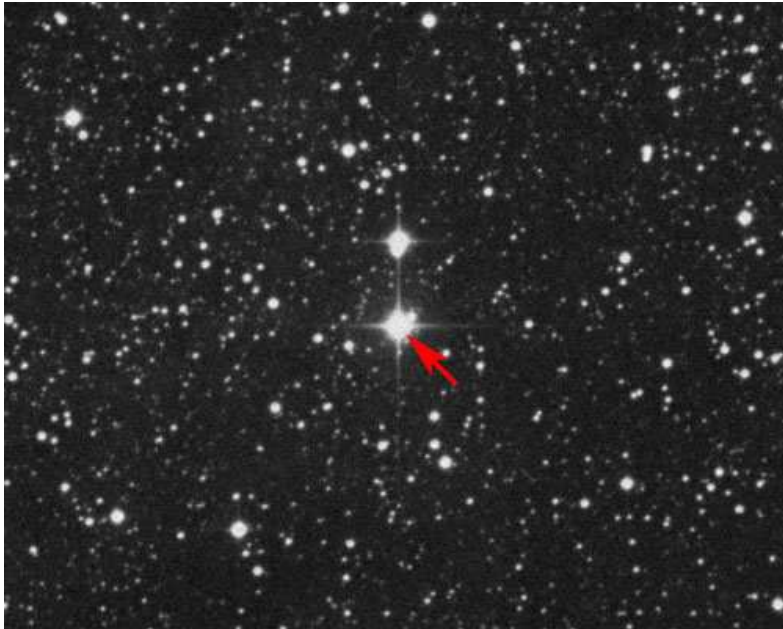
Comparando com $dE = T dS$ obtemos $S = \frac{A}{4\hbar}$

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)

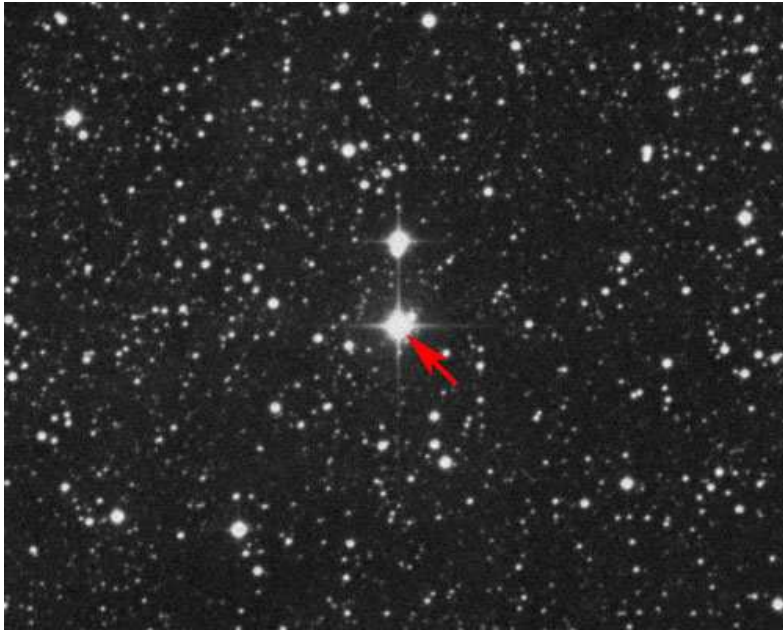
Buraco negro do tamanho do comprimento Compton $L_c = \frac{\hbar}{Mc}$, $R_s = \frac{GM}{c^2}$ implica que sua massa $M = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$ que é o comprimento de Planck!

Buracos negros existem?

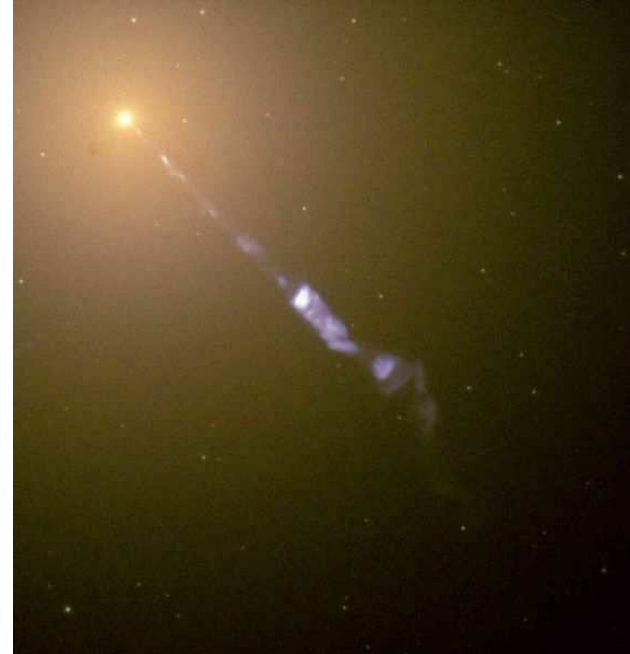


Cygnus-X1: buraco negro com 10 massas solares orbitando uma estrela gigante azul

Buracos negros existem?

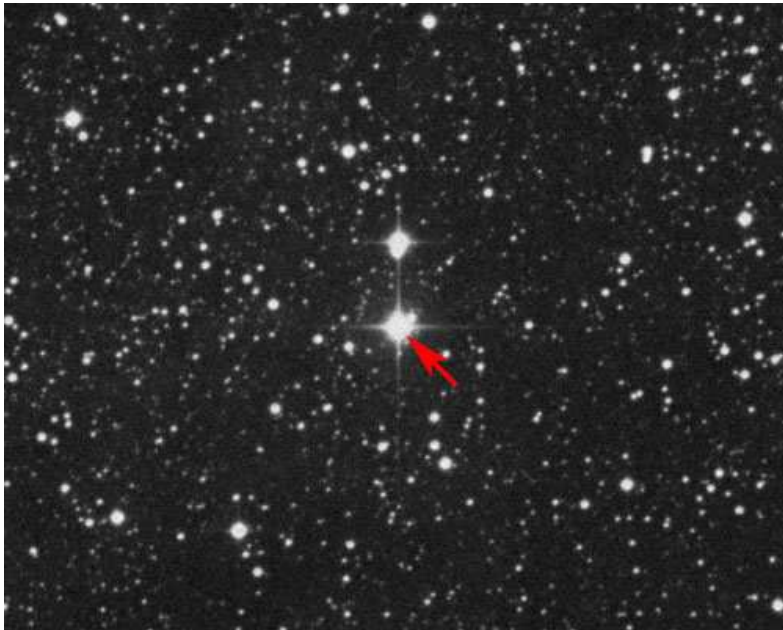


Cygnus-X1: buraco negro com 10 massas solares orbitando uma estrela gigante azul

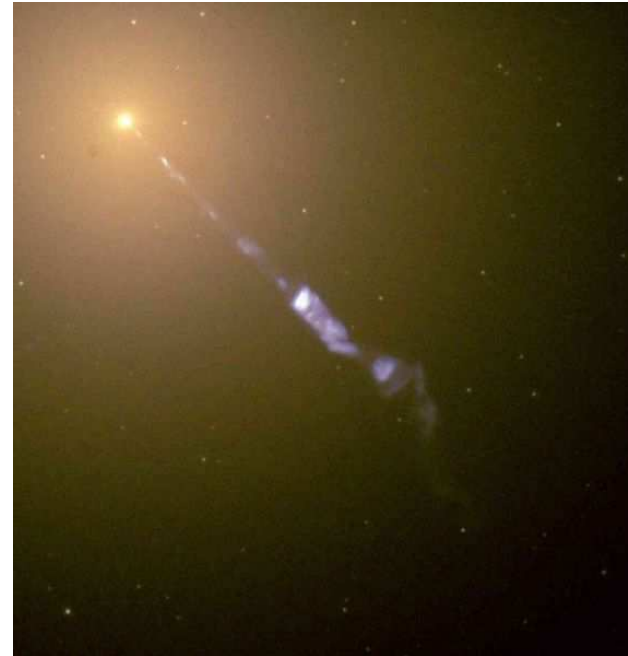


Jato emitido pela galáxia M87 causado por um buraco negro supermassivo no centro da galáxia

Buracos negros existem?



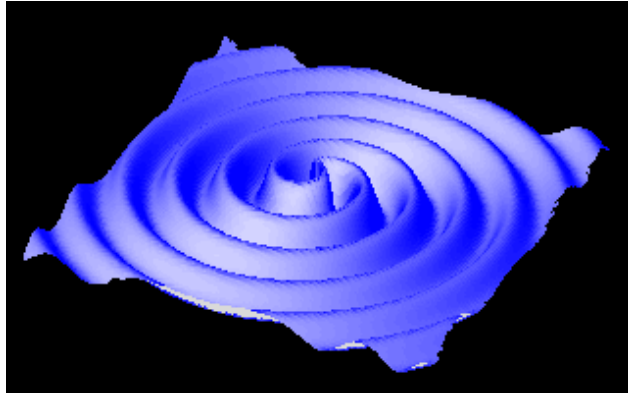
Cygnus-X1: buraco negro com 10 massas solares orbitando uma estrela gigante azul



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

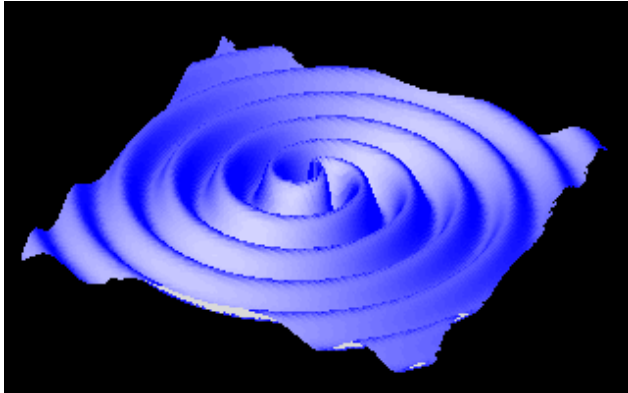
O buraco negro no centro de nossa galaxia!

Ondas Gravitacionais



Ondas gravitacionais produzidas pela colisão de dois buracos negros

Ondas Gravitacionais

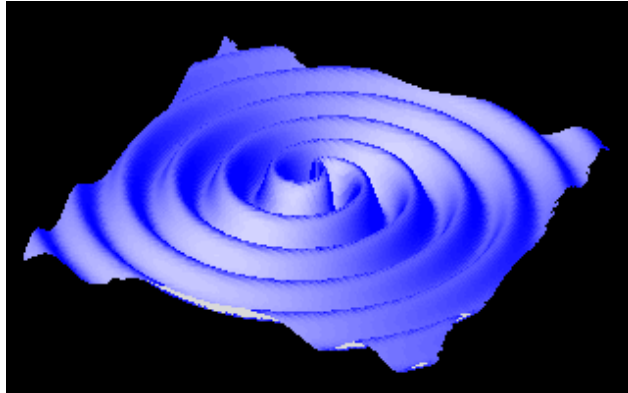


Ondas gravitacionais produzidas pela colisão de dois buracos negros



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

Ondas Gravitacionais



Ondas gravitacionais produzidas pela colisão de dois buracos negros

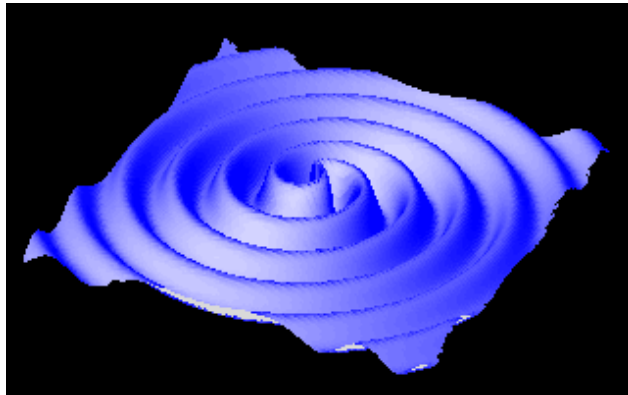


Detector esférico Mário Schenberg na USP (massa ressonante)



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

Ondas Gravitacionais



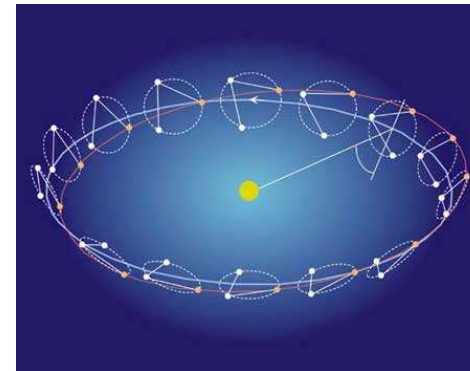
Ondas gravitacionais produzidas pela colisão de dois buracos negros



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