

Buracos negros, imagens e sombras

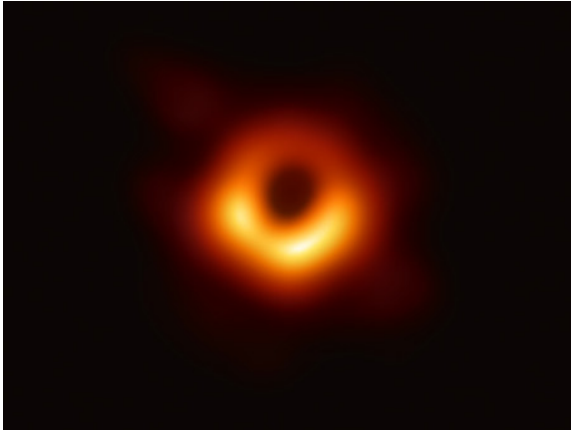
Júlio C. Fabris

DFIS/PPGFis/PPGCosmo/Núcleo Cosmo-ufes - Universidade Federal do Espírito Santo

Astrofísica, Cosmologia e Gravitação

A Imagem do Buraco Negro

"Vendo" o buraco negro



A Imagem do Buraco Negro

Vendo o buraco negro

- ▶ Quão revolucionária é esta imagem?

A Imagem do Buraco Negro

Vendo o buraco negro

- ▶ Para procurar responder a esta pergunta, temos que tentar responder também as seguintes perguntas:
 1. O que é um buraco negro?
 2. Como ele aparece teoricamente?
 3. Como ele aparece na natureza?
 4. Como é possível detectá-lo?

Buraco Negro

Definição

- ▶ O que é um buraco negro?

- ▶ Possível definição:

Um buraco negro é um espaço-tempo estático ou estacionário em que o observador externo está separado da região interna por um horizonte de eventos.

- ▶ Um buraco negro é *invisível* a um observador externo

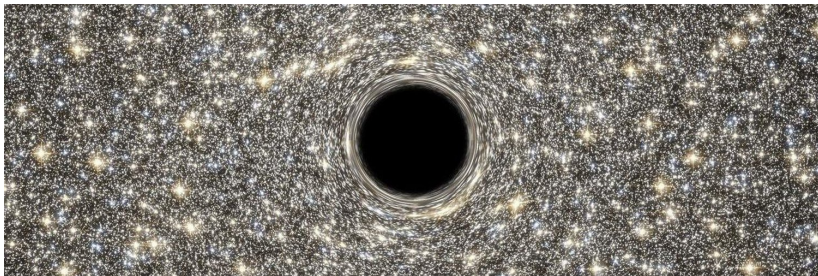
Buraco Negro

Definição

- ▶ Alguns tipos de buracos negros:
 1. A solução estática de Schwarzschild (1916), caracterizada unicamente pela massa M ;
 2. A solução estática de Reissner-Nordström (1916) caracterizada pela massa M e pela carga Q ;
 3. A solução estacionária de Kerr (1963) caracterizada pela massa M e pelo momento angular J .

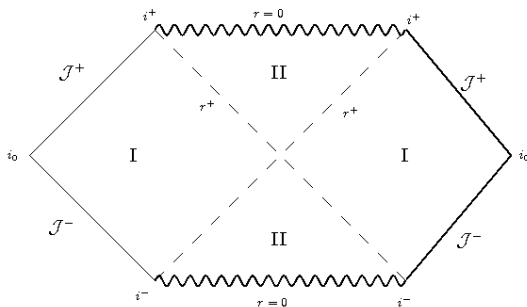
O Buraco Negro

Representação



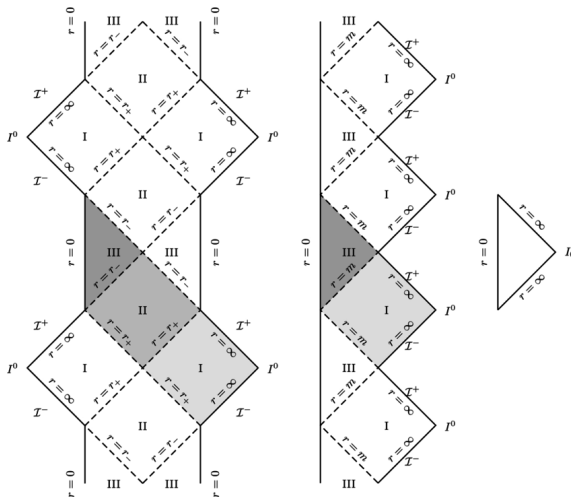
O Buraco Negro de Schwarzschild

Diagrama



O Buraco Negro de Reissner-Nordström

Diagrama



Diagrama



Buraco Negro

Definição

- ▶ Mas, podemos acrescentar também (livremente) o **Corps obscure** de Laplace, apresentado no seu livro *Exposition du Système du Monde*.

Laplace

Le corps obscure



Pierre Simon Laplace (1749-1827)

Buraco Negro

Definição

- ▶ A física newtoniana é baseada principalmente nas leis de Newton.
 1. Se a força é nula sobre um corpo, este corpo tem velocidade constante:

$$\vec{F} = 0 \rightarrow \vec{v} = \text{constante.} \quad (1)$$

2. Se a força não é nula, ela provoca aceleração.

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (2)$$

3. As forças aparecem em pares ação e reação:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (3)$$

Buraco Negro

Definição

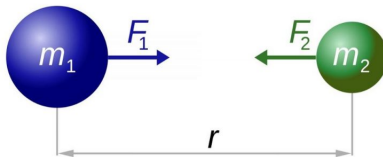
- ▶ A gravitação newtoniana diz como qual é a lei de força entre corpos que se interagem gravitacionalmente:

$$\vec{F}_g = -G \frac{Mm}{r^2} \hat{r}, \quad (4)$$

$$G \sim 6,7 \times 10^{-11} \text{kg}^{-1} \text{m}^3 \text{s}^{-2}. \quad (5)$$

Buraco negro

Gravitação newtoniana



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

Buraco Negro

Definição

- Um conceito importante é o de energia.

1. A energia cinética, relacionado ao movimento, é dada por

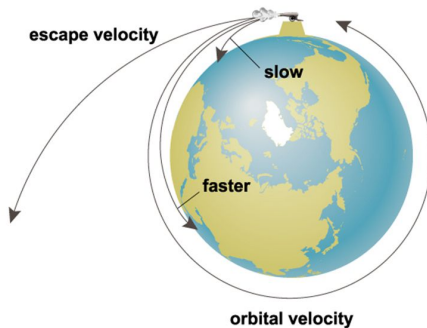
$$E_c = \frac{1}{2}mv^2. \quad (6)$$

2. A energia potencial depende da *lei de força*. No caso da força gravitacional,

$$E_p = -G \frac{mM}{r}. \quad (7)$$

Buraco negro

Gravitação newtoniana



Copyright © Addison Wesley

Buraco Negro

Definição

- ▶ Na mecânica newtoniana, a *velocidade de escape* é a velocidade mínima necessária para que um corpo de massa m possa se *liberar* do campo gravitacional de um planeta ou estrela de raio R e massa M :

$$\frac{1}{2}mv^2 - G\frac{Mm}{R} = 0 \Rightarrow v^2 = \frac{2GM}{R}. \quad (8)$$

- ▶ Para que a velocidade da luz seja a velocidade de escape, então a seguinte relação deve ser satisfeita:

$$\frac{2GM}{Rc^2} = 1. \quad (9)$$

- ▶ Para corpos com massa superior a M , confinadas neste mesmo raio R , a luz não consegue superar o campo gravitacional.

Teoria da Relatividade Geral

Teoria da Relatividade Geral

- ▶ No entanto, a moderna teoria da gravitação é a teoria da Relatividade Geral.
- ▶ Nela a interação gravitacional é descrita como geometria do espaço-tempo.
- ▶ A geometria deixa de ser a euclideana, no espaço tridimensional, onde a distância entre dois pontos é dada por

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2, \quad (10)$$

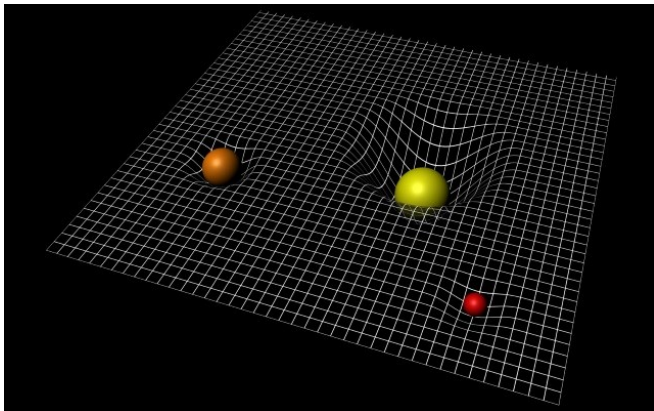
para ser descrita por uma estrutura quadri-dimensional,

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad \mu, \nu = 0, 1, 2, 3, \quad (11)$$

onde os coeficientes $g_{\mu\nu}$ (a métrica) são a solução do problema.

Teoria da Relatividade Geral

Geometria



Teoria da Relatividade Geral

Teoria da Relatividade Geral

- ▶ Existem dois motivos principais para substituir a gravitação newtoniana pela teoria da relatividade geral:
 1. A teoria de Newton não incorpora a ideia que existe uma velocidade limite na natureza, a velocidade da luz c .
 2. A teoria de Newton não incorpora *naturalmente* o princípio da equivalência.

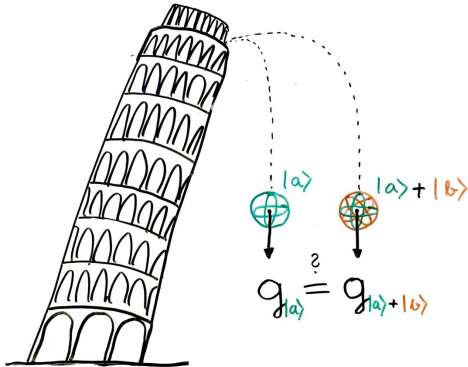
Buraco Negro

Teoria da Relatividade Geral

- ▶ O *princípio da equivalência* estabelece que todos os corpos caem da mesma forma no campo gravitacional.

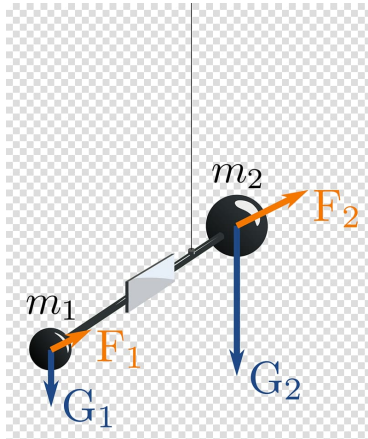
Teoria da Relatividade Geral

Princípio da equivalência



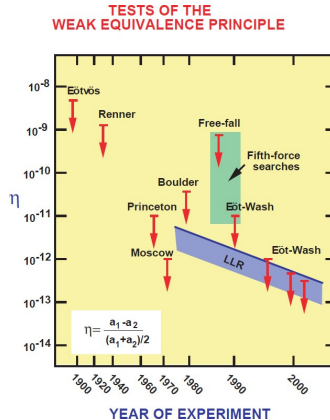
Teoria da Relatividade Geral

Princípio da equivalência



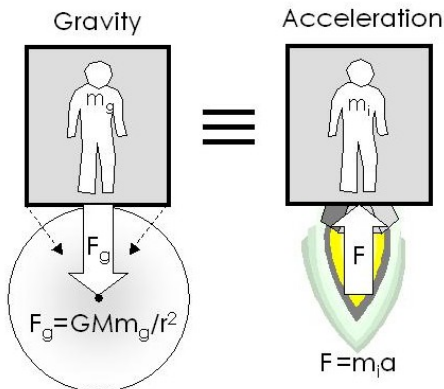
Teoria da Relatividade Geral

Princípio da equivalência



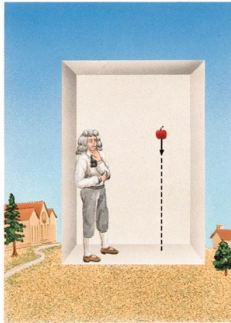
Teoria da Relatividade Geral

Princípio da equivalência



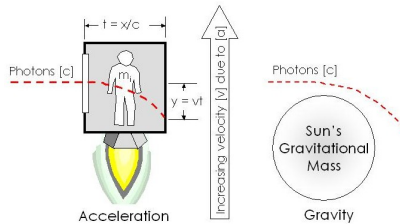
Teoria da Relatividade Geral

Princípio da equivalência



Teoria da Relatividade Geral

Princípio da equivalência



Teoria da Relatividade Geral

Equações

► As equações são,

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu}, \quad (12)$$

$$R_{\mu\nu} = \partial_\rho \Gamma_{\mu\nu}^\rho - \partial_\nu \Gamma_{\mu\rho}^\rho + \Gamma_{\mu\nu}^\rho \Gamma_{\rho\sigma}^\sigma - \Gamma_{\mu\sigma}^\rho \Gamma_{\nu\rho}^\sigma, \quad (13)$$

$$\Gamma_{\mu\nu}^\rho = \frac{1}{2}g^{\rho\sigma}(\partial_\mu g_{\nu\sigma} + \partial_\nu g_{\mu\sigma} - \partial_\sigma g_{\mu\nu}), \quad (14)$$

$$R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}, \quad (15)$$

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_\mu u_\nu - pg_{\mu\nu}. \quad (16)$$

Teoria da Relatividade Geral

Teoria da Relatividade Geral

- ▶ No fundo estas equações querem dizer algo simples: a geometria do espaço-tempo é determinada pela distribuição de matéria.

Teoria da Relatividade Geral

Geodésicas

- ▶ Partículas livres se deslocando unicamente sob a ação da gravidade seguem a *equação da geodésica*:

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\lambda^2} + \Gamma_{\rho\sigma}^\mu \frac{dx^\rho}{d\lambda} \frac{dx^\sigma}{d\lambda} = 0, \quad (17)$$

onde λ é o *parâmetro afim*.

Teoria da Relatividade Geral

Geodésicas

- ▶ A equação da geodésica diz algo simples também: a partícula se desloca livremente em uma geometria curva.
- ▶ Não existe *força gravitacional*.
- ▶ O que interpretamos como força é simplesmente o efeito da curvatura do espaço-tempo sobre o movimento da partícula.

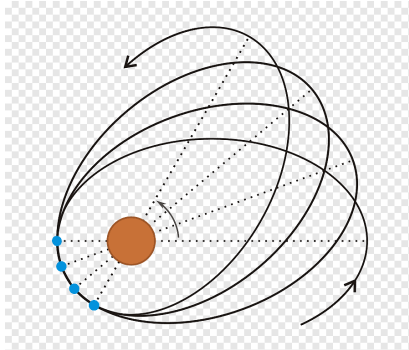
Relatividade Geral

Consequências

- ▶ Algumas das consequências da teoria da relatividade geral:
 1. As órbitas dos planetas são elipses *girantes*.
 2. A luz é defletida pelos corpos massivos.
 3. Existem buracos negros, objetos que contêm uma região interna inacessível para o observador externo.
 4. Existem ondas gravitacionais.

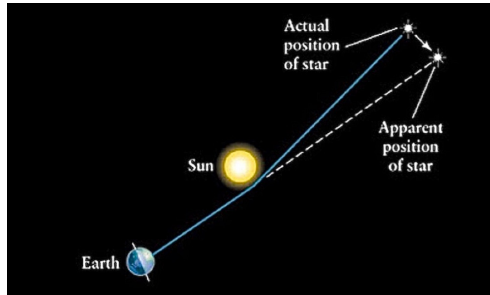
Teoria da Relatividade Geral

Órbitas



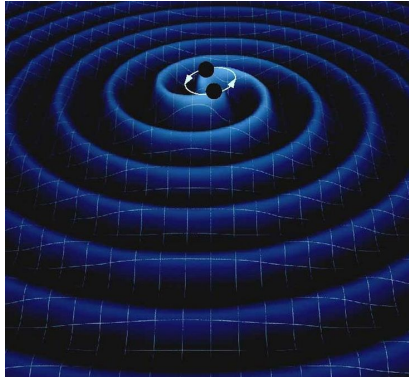
Teoria da Relatividade Geral

Órbitas



Teoria da Relatividade Geral

Órbitas



Teoria da Relatividade Geral

Órbitas

- ▶ A precessão da órbita de Mercúrio já era conhecida desde o século XIX.
- ▶ Efeitos (newtonianos) dos outros planetas sobre Mercúrio explicava boa parte da precessão.
- ▶ Mas, um pequeno efeito residual de $40''$ por século resistia a qualquer explicação.
- ▶ A Teoria da Relatividade Geral trouxe a explicação.

Teoria da Relatividade Geral

Deflexão da luz

- ▶ A deflexão da luz por corpos massivos era (de uma certa forma) predito pela teoria newtoniana.
- ▶ Mas, a Teoria da Relatividade trouxe uma explicação mais coerente e com o valor correto.

Teoria da Relatividade Geral

Ondas gravitacionais

- ▶ As ondas gravitacionais é uma das predições mais espetaculares.
- ▶ Elas foram detectadas em 2017 e renderam um prêmio Nobel aos líderes do projeto que levou a esta detecção.

Buraco Negro

Solução de Schwarzschild

- ▶ Schwarzschild, em 1916, praticamente no seu leito de morte, encontrou a solução estática a simetria esférica, o que poderia representar uma estrela nesta teoria.
- ▶ Ele partiu da métrica

$$ds^2 = B(r)dt^2 - A(r)dr^2 - r^2d\Omega^2, \quad (18)$$

onde $A(r)$ e $B(r)$ eram as funções desconhecidas a serem determinadas.

Buraco Negro

Solução de Schwarzschild

- Solução:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2. \quad (19)$$

- Logo se observou que algo estranho acontece em

$$\frac{2GM}{c^2 r} = 1. \quad (20)$$

- Aliás, este é a condição em que a velocidade de escape é igual à velocidade da luz deduzida por Laplace.

Buraco Negro

Solução de Schwarzschild

- ▶ No entanto, na Teoria da Relatividade Geral o raio tal que,

$$r = \frac{2GM}{c^2}. \quad (21)$$

é denominado de **horizonte de eventos**, uma híper-superfície que separa a região externa (que contém o infinito espacial) da região interna, esta inacessível ao observador localizado na região externa (nós!).

- ▶ **A existência do horizonte de eventos é a característica essencial do buraco negro.**

Buraco Negro

Solução de Schwarzschild

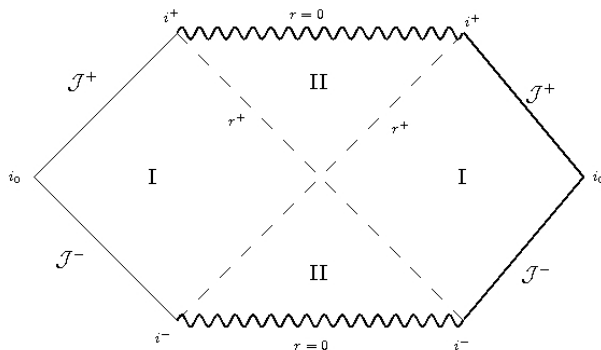
- ▶ Apenas nas décadas de 50 e 60, mais de 40 anos depois da solução de Schwarzschild, é que o conteúdo desta solução começou a ser compreendido, quando Kruskal (1960) mostrou que ela poderia ser re-escrita como:

$$ds^2 = \frac{32G^3M^3e^{-\frac{rc^2}{2GM}}}{c^6r}(dT^2 - dX^2) - r^2d\Omega^2. \quad (22)$$

- ▶ Neste momento, o conceito de *Buraco Negro* se consolidou.

O Buraco Negro de Schwarzschild

Diagrama



Buraco Negro

Características

- ▶ Os buracos negros talvez sejam o objeto mais simples existentes na natureza.
- ▶ Eles são caracterizados por apenas três parâmetros:
 1. sua massa M ,
 2. sua carga Q ,
 3. seu momento angular J .

Buraco Negro

Termodinâmica

- ▶ Campos quânticos na vizinhança de um buraco negro permitem definir uma termodinâmica:

$$TdS = dM. \quad (23)$$

- ▶ Nesta relação temos:

$$T = \frac{1}{8\pi M} \quad (\hbar = c = G = \kappa_B = 1), \quad (24)$$

$$S = 4\pi M^2 = \frac{A_H}{4}. \quad (25)$$

Buraco Negro

Classificação dos buracos negros

- ▶ Os possíveis buracos negros podem ser classificados da seguinte forma.
 1. Buracos negros estelares, com massas $M \sim 3 - 30 M_{\odot}$.
 2. Buracos negros supermassivos, $M \sim 10^6 - 10^9 M_{\odot}$.
 3. Buracos negros com massas intermediárias, $M \sim 10^3 M_{\odot}$.
 4. Buracos negros primordiais, com massas até uma massa solar.
 5. Micro-buracos negros.

Frolov & Zelnikov, *Introduction to Black Hole Physics* (2011).

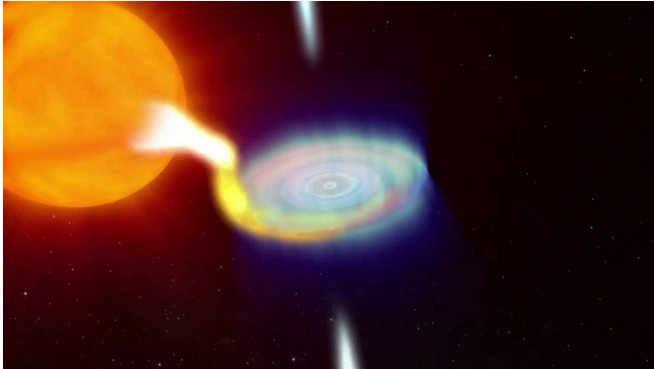
Buracos Negros Estelares

Disco de acreção

- ▶ Existem vários candidatos para buracos estelares.
- ▶ Estes candidatos aparecem sobretudo em sistemas binários: a existência de uma estrela companheira "normal" permite transferência de massa para o buraco negro, formando um disco de acreção, com consequente emissão de radiação eletromagnética, sobretudo sob a forma de raio-X.

Buracos Negros Estelares

Disco de acreção



Buracos Negros Estelares

Lista de candidatos

Table 1.1 Stellar mass black holes candidates in binary systems (From Remillard and McCluskey 2000)

Coordinate	Name	Year	Spec.	P_{orb} (h)	$f(M)/M_{\odot}$	M_{BH}
0422+32	(GRO J)	1992/1	M2V	5.1	1.19 ± 0.02	3.7–5.0
0538–641	LMC X–3	–	B3V	40.9	2.3 ± 0.3	5.9–9.2
0540–697	LMC X–1	–	O7III	93.82008	0.13 ± 0.05	10.91 ± 1.41
0620–003	(A)	1975/1	K4V	7.8	2.72 ± 0.06	8.7–12.9
1009–45	(GRS)	1993/1	K7/M0V	6.8	3.17 ± 0.12	3.6–4.7
1118+480	(XTE J)	2000/2	K5/M0V	4.1	6.1 ± 0.3	6.5–7.2
1124–684	Nova Mus 91	1991/1	K3/K5V	10.4	3.01 ± 0.15	6.5–8.2
1354–64	(GS)	1987/2	GIV	61.1 ^s	5.75 ± 0.30	–
1543–475	(4U)	1971/4	A2V	26.8	0.25 ± 0.01	8.4–10.4
1550–564	(XTE J)	1998/5	G8/K8IV	37.0	6.86 ± 0.71	8.4–10.8
1650–500	(XTE J)	2001/1	K4V	7.7	2.73 ± 0.56	–
1655–40	(GRO J)	1994/3	F3/F5IV	62.9	2.73 ± 0.09	6.0–6.6
1659–487	GX 339–4	1972/10	–	42.1	5.8 ± 0.5	–
1705–250	Nova Oph 77	1977/1	K3/7V	12.5	4.86 ± 0.13	5.6–8.3
1819.3–2525	V4641 Sgr	1999/4	B9III	67.6	3.13 ± 0.13	6.8–7.4
1859+226	(XTE J)	1999/1	–	9.2	7.4 ± 1.1	7.6–12.4
1915+105	(GRS)	1992/Q	K/MIII	804.0	9.5 ± 3.0	10.0–18.0
1956+350	Cyg X–1	–	O9.7I	134.4	0.244 ± 0.005	6.8–13.3
2000+251	(GS)	1988/1	K3/K7V	8.3	5.01 ± 0.12	7.1–7.8
2023+338	V404 Cyg	1989/1	K0III	155.3	6.08 ± 0.06	10.1–13.4
	M33 X-7		O7-O8	82.80	0.46 ± 0.08	15.65 ± 1.45
	IC 10 X-1		WR	34.40	7.64 ± 1.26	23–33

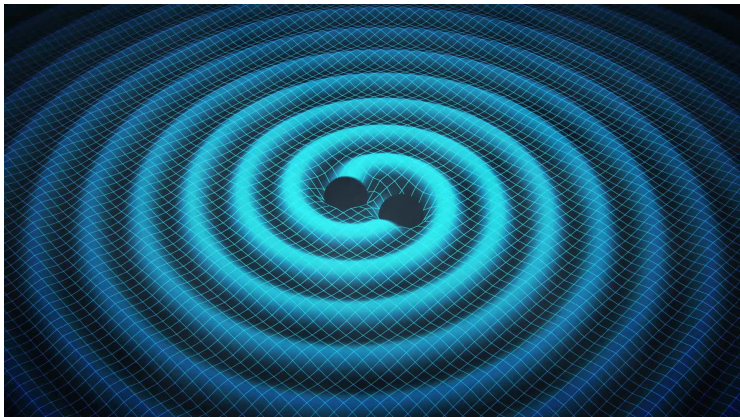
Ondas Gravitacionais

GW150914

- ▶ Entretanto, em setembro de 2015 foi anunciada a primeira detecção direta de ondas gravitacionais pela colaboração LIGO.
- ▶ Este evento corresponde a fusão de dois buracos negros resultando em um único buraco negro.
- ▶ A consequência deste processo é a emissão de ondas gravitacionais.

Ondas Gravitacionais

GW150914



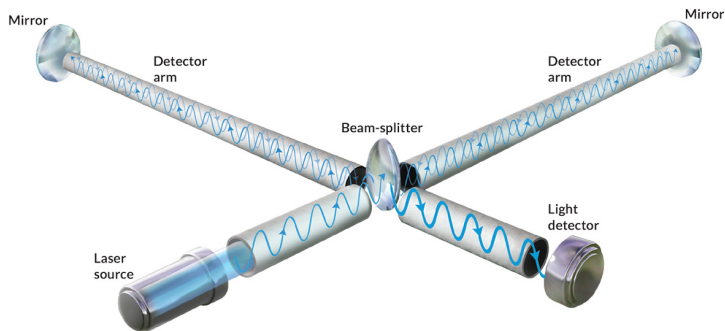
Ondas Gravitacionais

GW150914



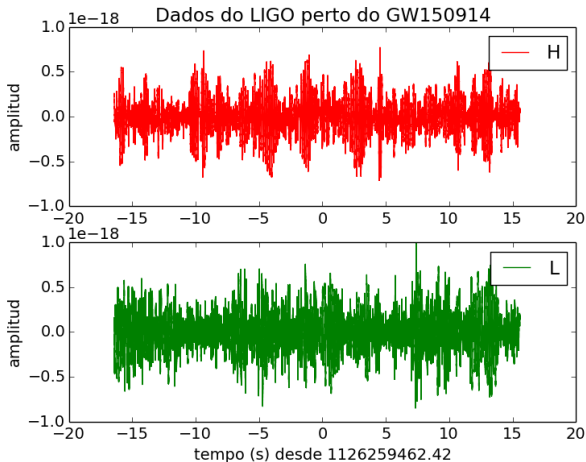
Ondas Gravitacionais

GW150914



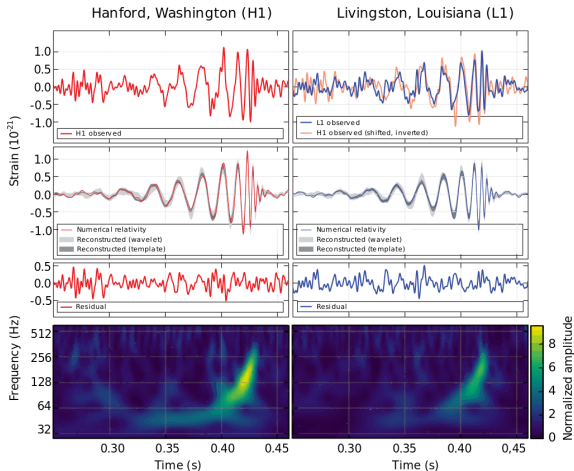
Ondas Gravitacionais

GW150914



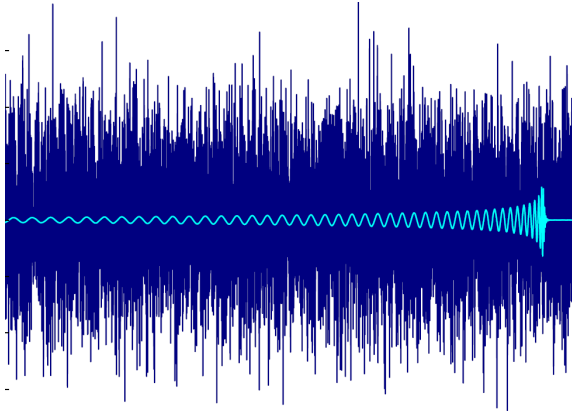
Ondas Gravitacionais

GW150914



Ondas Gravitacionais

GW150914



Ondas Gravitacionais

GW150914

► Características:

1. Coalescência de dois buracos negros, um de $35 M_{\odot}$ outro de $30 M_{\odot}$;
2. O Buraco negro resultante tinha $62 M_{\odot}$;
3. $3M_{\odot}$ foram emitidos sob a forma de ondas gravitacionais resultando em uma energia liberada de

$$Mc^2 \sim 5 \times 10^{47} J; \quad (26)$$

4. Distância de $440 Mpc$;
5. Duração do evento foi de $0,2 s$;
6. Potência liberada de $2,5 \times 10^{48} W$ (10^{20} vezes a potência irradiada pelo Sol).

Ondas Gravitacionais

GW150914

- ▶ Apesar dos ruídos, a detecção das ondas gravitacionais teve uma significância estatística de mais de 99%.

Buracos Negros Supermassivos

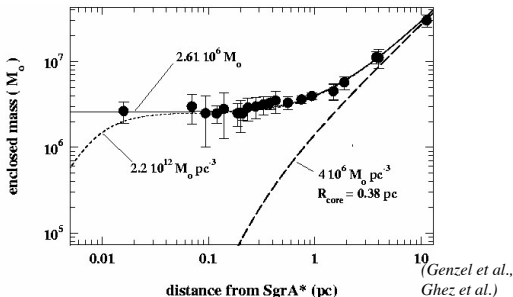
Onde existem

- ▶ Acredita-se hoje que praticamente toda galáxia hospeda em seu centro um buraco negro supermassivo.
- ▶ Na região central da Galáxia, a densidade chega a $\rho \sim 10^6 M_{\odot}/pc^3$.

Buracos negros supermassivos

A Galáxia

Dynamical Evidence for a Supermassive Black Hole at the Galactic Center



Note: $R_s (M_\bullet = 2.6 \times 10^6 M_\odot) = 7.8 \times 10^8 \text{ cm} = 6.5 \times 10^{-8} \text{ arcsec}$

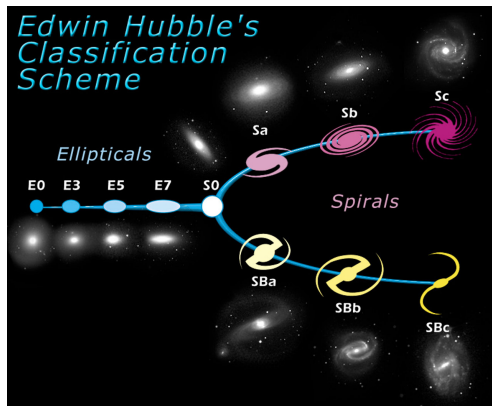
Buracos negros supermassivos

Galáxias



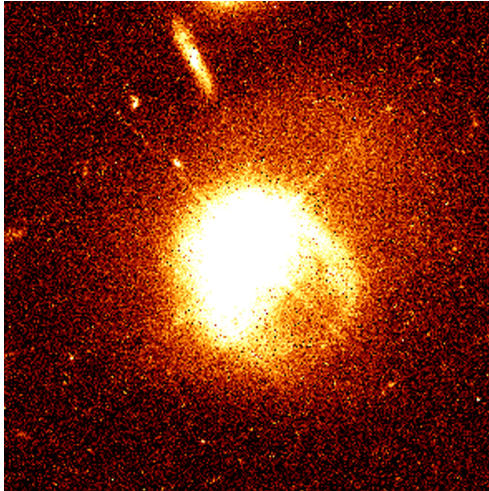
Buracos negros supermassivos

Galáxias



Buracos negros supermassivos

Quasares



Buracos negros supermassivos

Quasares

- ▶ Quasares (*Quasi-estelar objects*) são objetos compactos, com desvio para o vermelho até de $z \sim 7$ (presentes quando o universo tinha a idade de menos de um bilhão de anos), com forte emissão em rádio, e passíveis de serem visto no ótico.
- ▶ Possuem uma luminosidade da ordem de $L \sim 10^{12} - 10^{13} L_{\odot}$, mais que uma galáxia (grande) típica.
- ▶ Possível fonte de toda esta energia: um buraco negro supermassivo que está absorvendo a massa de toda uma galáxia.

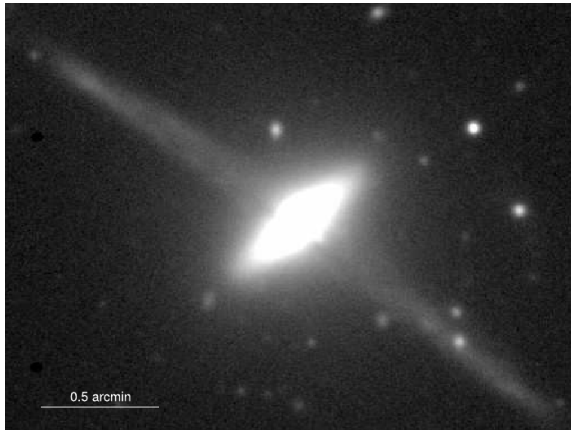
Buracos negros supermassivos

Galáxias de núcleo ativo - AGM

- ▶ As galáxias de núcleo ativos (AGN) possuem um núcleo com forte emissão de radiação que não pode ser explicada pela presença de estrelas, sugerindo a existência de um buraco negro supermassivo no seu centro.

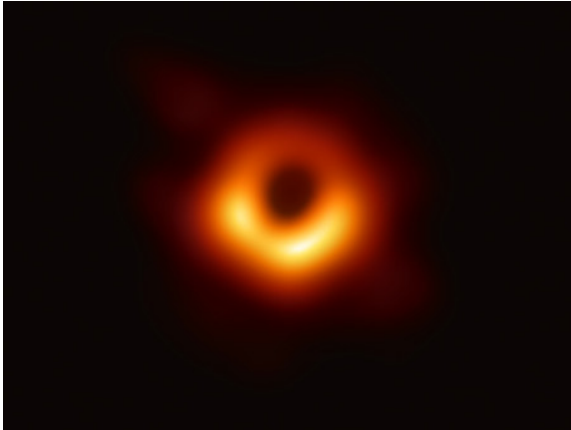
Buracos negros supermassivos

AGN



Buracos negros supermassivos

EHT - Messier 87



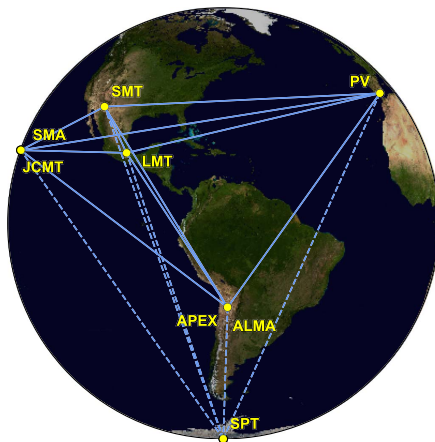
O projeto EHT

Detectando buracos negros supermassivos

- ▶ O projeto **Event Horizon Telescope** - EHT é constituído por uma rede de radiotelescópios espalhados na superfície terrestre.
- ▶ O próprio nome do projeto indica o desafio representado pela detecção de buracos negros: determinar o horizonte de eventos, propriedade essencial de um buraco negro.

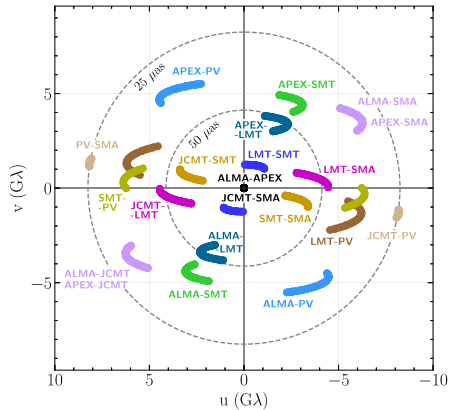
O Buraco Negro M87

A rede de antenas



O Buraco Negro de M87

Observando o núcleo galáctico



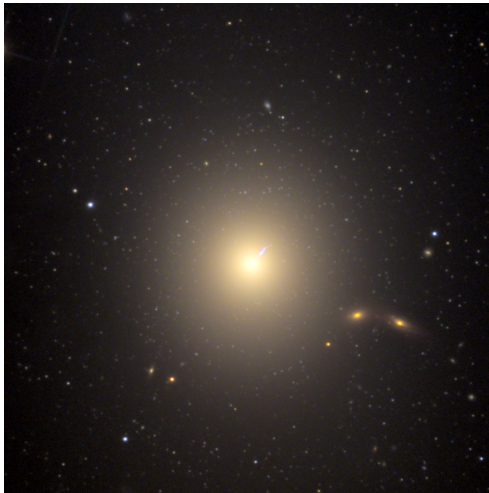
A galáxia hospedeira

Messier 87

- ▶ A galáxia hospedeira do buraco negro observado pelo EHT é uma galáxia elíptica gigante, distante a aproximadamente 16 Mpc , com uma massa estimada $M \sim 2 \times 10^9 M_{\odot}$, maior que a massa da nossa galáxia.

A galáxia hospedeira

Messier 87



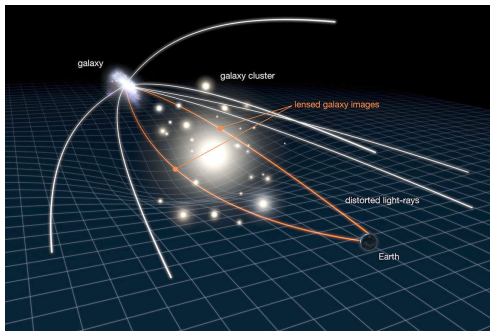
Detectando o buraco negro

Lentes gravitacionais

- ▶ O efeito que se usa para detectar os buracos negros em alguns casos é o de lentes gravitacionais.

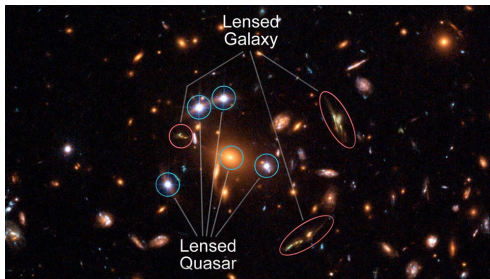
Detectando o buraco negro

Lentes gravitacionais



Detectando o buraco negro

Lentes gravitacionais



Detectando o buraco negro

Lentes gravitacionais



O Buraco Negro M87

Artigos

- ▶ Seis artigos foram publicados no número de abril de 2019 do *Astrophysical Letters* relatando os resultados das análises feitas praticamente há dois anos atrás.

O Buraco Negro M87

Comentários

When surrounded by a transparent emission region, black holes are expected to reveal a dark shadow caused by gravitational light bending and photon capture at the event horizon. To image and study this phenomenon, we have assembled the Event Horizon Telescope, a global very long baseline interferometry array observing at a wavelength of 1.3mm . This allows us to reconstruct event-horizon-scale images of the supermassive black hole candidate in the center of the giant elliptical galaxy M87. We have resolved the central compact radio source as an asymmetric bright emission ring with a diameter of $42 \pm 3\mu\text{as}$, which is circular and encompasses a central depression in brightness with a flux ratio 10 : 1.

O Buraco Negro M87

Comentários

Active galactic nuclei (AGNs) are central bright regions that can outshine the entire stellar population of their host galaxy. Some of these objects, quasars, are the most luminous steady sources in the universe and are thought to be powered by supermassive black holes accreting matter at very high rates through a geometrically thin, optically thick accretion disk. In contrast, most AGNs in the local universe, including the Galactic center and M87, are associated with supermassive black holes fed by hot, tenuous accretion flows with much lower accretion rates.

O Buraco Negro M87

Comentários

A typical GRMHD simulation in the library is characterized by two parameters: the dimensionless spin $a_* = Jc/GM^2$, where J and M are, respectively, the spin angular momentum and mass of the black hole, and the net dimensionless magnetic flux over the event horizon $\varphi = \Phi/\sqrt{(MR_g^2)}$, where Φ and M are the magnetic flux and mass flux (or accretion rate) across the horizon, respectively.

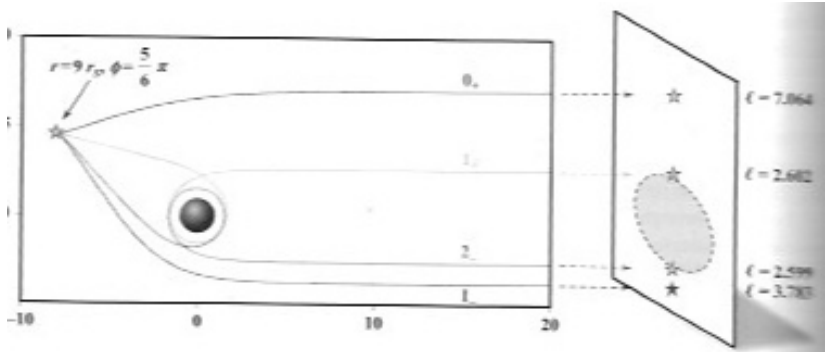
O Buraco Negro M87

Características

- ▶ Tamanho angular: $2,0 \times 10^{-11} \text{ rad}$ ($\sim 40 \mu\text{as}$).
- ▶ Distância: 16 Mpc .
- ▶ Tamanho em km: $5 \times 10^9 \text{ km}$ (da ordem do Sistema Solar).
- ▶ $R_s \sim 5 \times 10^9 \text{ km}$.

O Buraco Negro de M87

A sombra do buraco negro



O Buraco Negro de M87

A sombra do buraco negro

222 *Particles and Light Motion in Schwarzschild Spacetime*



Fig. 7.18 Images of the four circular orbits for the angles $\alpha = 30^\circ$.

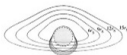


Fig. 7.19 Images of the four circular orbits for the angles $\alpha = 15^\circ$.

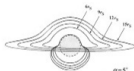


Fig. 7.20 Images of the four circular orbits for the angles $\alpha = 5^\circ$.

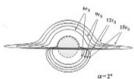
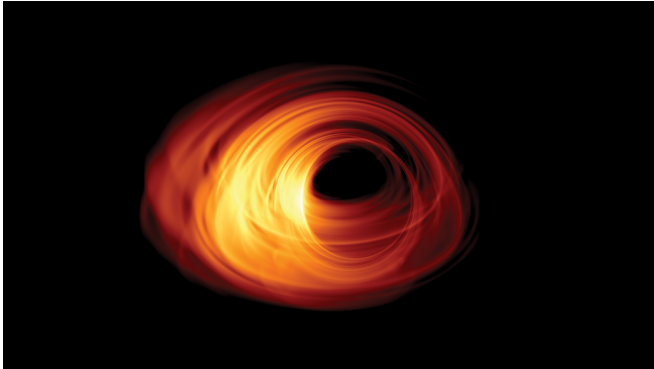


Fig. 7.21 Images of the four circular orbits for the angles $\alpha = 2^\circ$.

O Buraco Negro de M87

A sombra do buraco negro



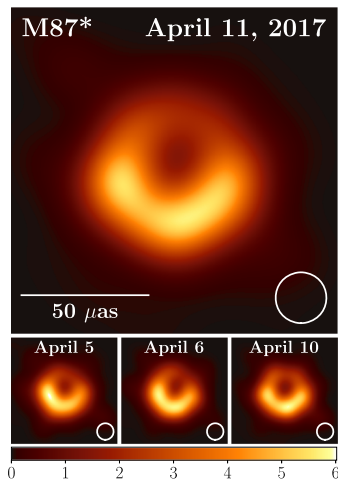
O Buraco Negro de M87

A sombra do buraco negro

- ▶ Desafio maior: reconstruir a imagem global de um objeto do qual só se conheciam partes.
- ▶ Trabalho computacional de montar um quebra-cabeça evitando que a resposta seja dada *a priori*.
- ▶ Ao mesmo tempo, criando-se uma biblioteca de possíveis objetos que poderiam corresponder ao buraco negro no centro de uma galáxia.

O Buraco Negro de M87

Imagem reconstituída



O Buraco Negro na nossa galáxia

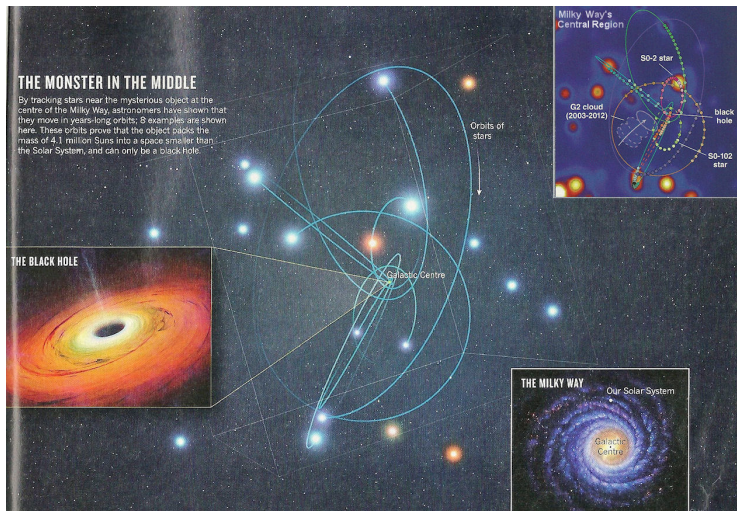
Sagittarius A

- ▶ Por que não observar o buraco negro no centro da nossa galáxia?

Another primary EHT source, *SgrA, has a precisely measured mass three orders of magnitude smaller than that of *M87**, with dynamical timescales of minutes instead of days. Observing the shadow of *Sgr A** will require accounting for this variability and mitigation of scattering effects caused by the interstellar medium.**

O Buraco Negro no centro da Galáxia

Evidências



O Buraco Negro de M87

É um buraco negro?

At the same time, it is more difficult to rule out alternatives to black holes in GR, because a shadow can be produced by any compact object with a spacetime characterized by unstable circular photon orbits.

Indeed, while the Kerr metric remains a solution in some alternative theories of gravity, non- Kerr black hole solutions do exist in a variety of such modified theories.

Furthermore, exotic alternatives to black holes, such as naked singularities, boson stars, and gravastars, are admissible solutions within GR and provide concrete, albeit contrived, models.

O Buraco Negro de M87

É um buraco negro?

Some of such exotic compact objects can already be shown to be incompatible with our observations given our maximum mass prior. For example, the shadows of naked singularities associated with Kerr spacetimes with $a^* > 1$ are substantially smaller and very asymmetric compared to those of Kerr black holes. Also, some commonly used types of wormholes predict much smaller shadows than we have measured.

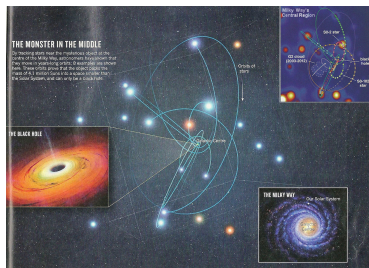
O Buraco Negro de M87

É um buraco negro?

However, other compact-object candidates need to be analyzed with more care. Boson stars are an example of compact objects having circular photon orbits but without a surface or an event horizon.

O Buraco Negro no centro da Galáxia

Evidências



Sobral e a Teoria da Relatividade Geral

O eclipse de 1919

- ▶ Uma história que, de uma certa forma, começa em Sobral, Ceará, em 29 de maio de 1919.

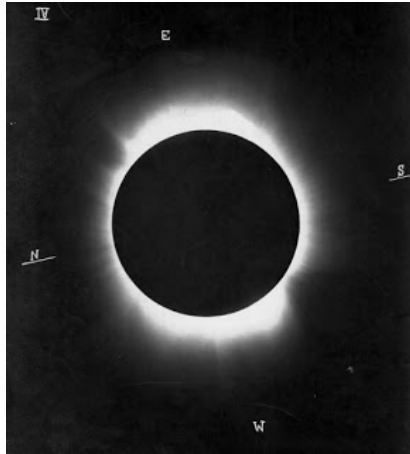
Sobral e a Teoria da Relatividade Geral

O eclipse de 1919



Sobral e a Teoria da Relatividade Geral

O eclipse de 1919



Sobral e a Teoria da Relatividade Geral

O eclipse de 1919



100 anos do Eclipse de Sobral

29 e 30 de Maio de 2019
Local: Auditório do CCE, UFES

SEMINÁRIOS

O Eclipse em Sobral e a Teoria da Relatividade Geral
Júlio C. Fabris (PPGFis/PPGCosmo)

Gravitação Pós-Newtoniana e Aplicações
Davi C. Rodrigues (PPGIta/PPGCosmo)

Da revolução dos conceitos de espaço e tempo à Teoria da Relatividade Geral
Flávio G. Alvarenga (PPGEnfis)

Cosmologia moderna e futura
Valério Marra (PPGFis/PPGCosmo)

Albert Einstein e a Divulgação Científica
Laércio Ferracioli (PPGEnfis)

OUTRAS ATIVIDADES

- Sessões do Planetário de Vitória
- Exposição sobre a expedição de Sobral
- Sessão de observação do céu noturno

ORGANIZAÇÃO

Davi C. Rodrigues (PPGFis/PPGCosmo)	Júnior Diniz Toniato (PPGCosmo)
Flávio G. Alvarenga (PPGEnfis)	Laércio Ferracioli (PPGEnfis)
Giuseppe Camiletti (PPGEnfis)	Sérgio M. Bisci (PPGEnfis)
Júlio C. Fabris (PPGFis/PPGCosmo)	Thiago R. P. Caramés (PPGFis)

Para mais informações e para realizar a inscrição acesse
www.cosmo-ufes.org/sobral2019







Kitty, §22/12/2005 †28/11/2018

