

Buracos Negros

Do encanto de uma teoria à realidade



**Projeto Desmistificando
a Astronomia**

Sebastião Mauro Filho

Tópicos

- 1 - Relatividade Geral e Espaço-tempo.**
- 2 - Buraco negro de Schwarzschild.**
- 3 - Anatomia e propriedades dos buracos negros.**
- 4 - Formação.**
- 5 - Evidências observacionais.**



Velocidade de Escape

Gravitação newtoniana

$$V = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Terra: 40 320 km/h.

Júpiter: 213 120 km/h.

Dark Stars

John Michell, 1783.

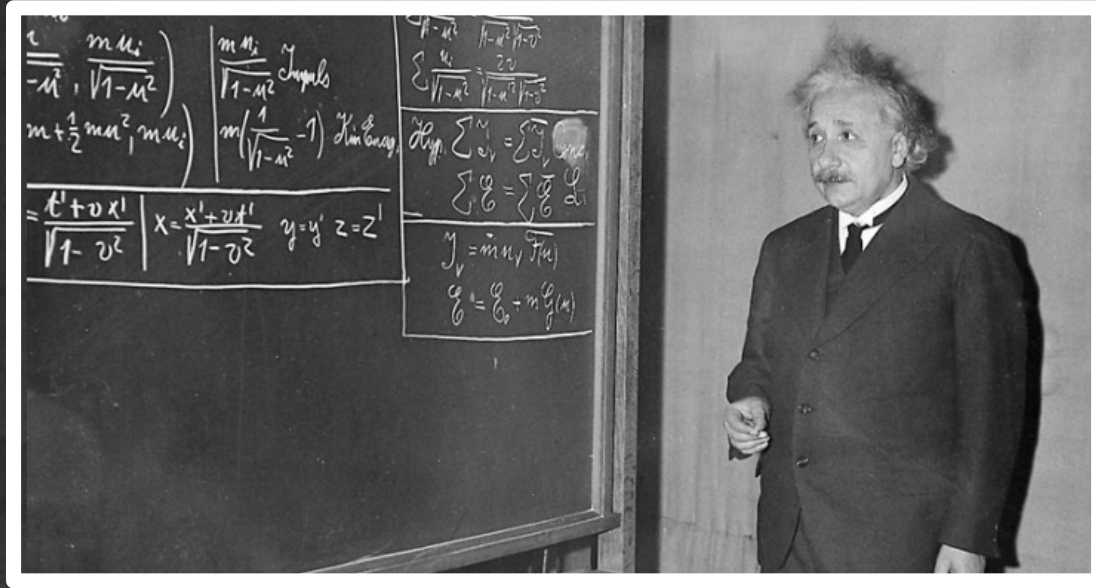
Estrelas compactas.

Gravidade muito forte.

Nem mesmo a luz escape.

Estrelas Escuras

A luz não consegue escapar de seu campo gravitacional.



Albert Einstein

1934.

Foto: TWP. Fonte: Jornal da USP.

Relatividade Especial

1905

A velocidade da luz no vácuo é a mesma em todos os referenciais inerciais.

Relatividade Geral

1915

As leis da natureza são as mesmas em todos os referenciais.

Equações de campo da Relatividade Geral

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$



Geometria do
espaço-tempo



Matéria + energia

Previsões

Buracos negros.
Ondas gravitacionais.
Redshift gravitacional.
Lentes gravitacionais.



A matéria diz ao espaço
como se curvar.



$g_{\mu\nu}$: geometria do
espaço-tempo



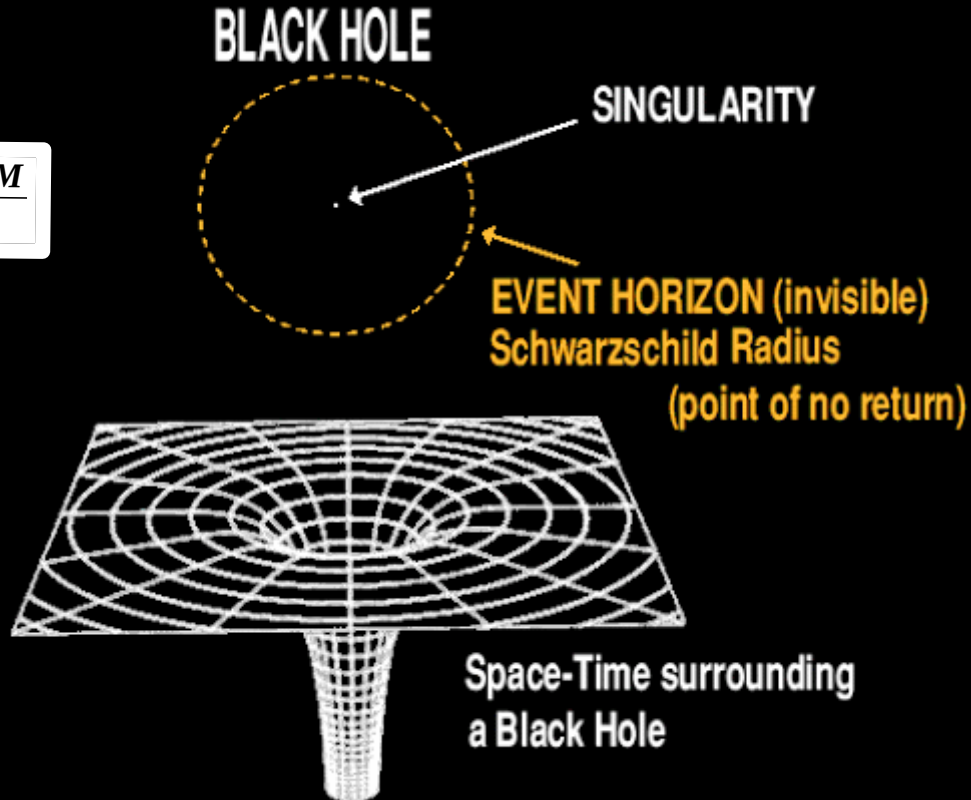
O espaço diz a matéria como
se mover.



Buraco negro de Schwarzschild

$$ds^2 = (1 - r_s/r) dt^2 - (1 - r_s/r)^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$



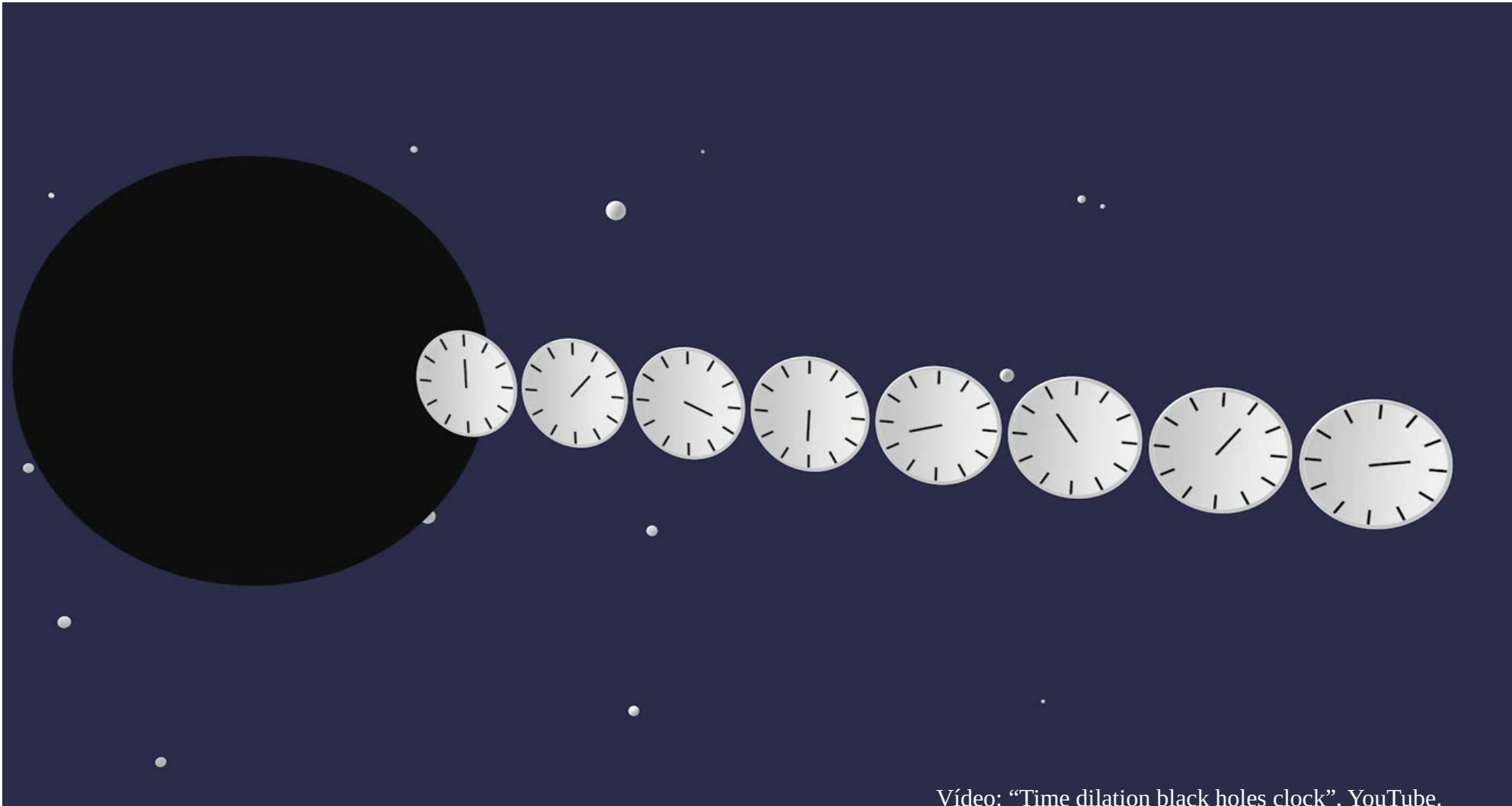
- 1 - Objeto estático e esférico = espaço-tempo de Schw. (1916).
- 2 - Horizonte de eventos (r_s).
- 3 - Singularidade.
- 4 - Espaço-tempo estável.

Máquina do tempo



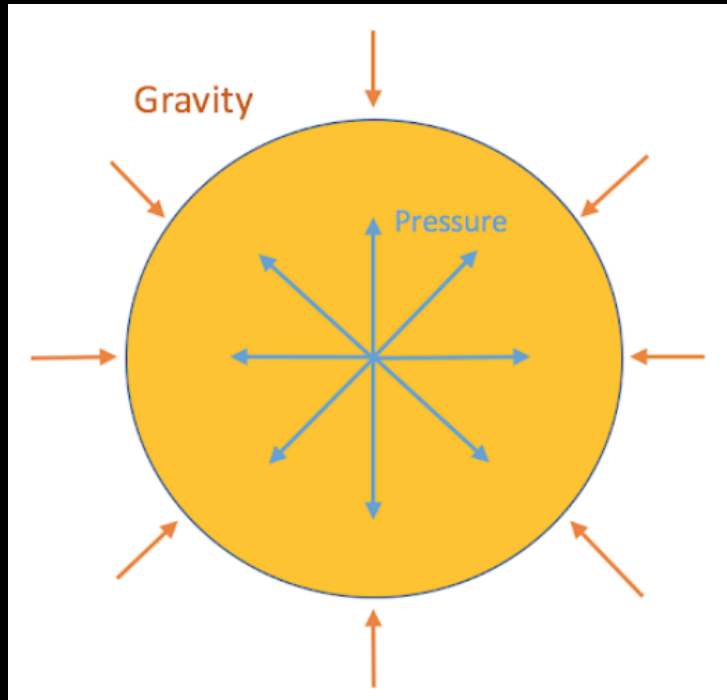
Para um observador distante do BH, o tempo não passa sobre o horizonte de eventos.

Passar pela vizinhança de um BN e retornar a Terra será uma viagem ao futuro.



Vídeo: “Time dilation black holes clock”, YouTube.

Mas eles existem? Que objeto astronômico daria origem a eles?



Limite de Chandrasekhar:1931

Equilíbrio estelar: *gravidade x pressão de degenerência dos elétrons.*

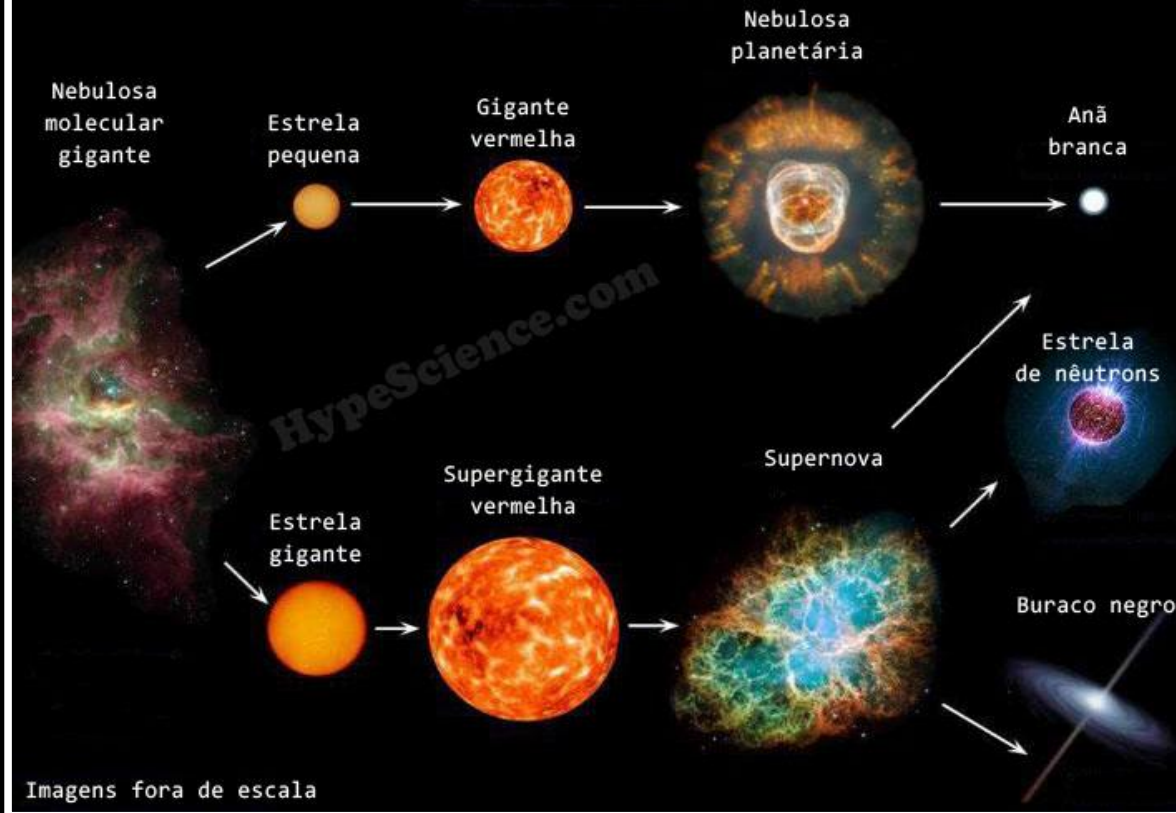
Massa superior para anãs brancas: $1,44 M_{\odot}$.

Limite de Oppenheimer-Volkoff:1939

Equilíbrio estelar: *Gravidade x pressão de degenerência dos nêutrons + interação forte.*

Massa superior para estrelas de nêutrons: $3 M_{\odot}$.

CICLO DE VIDA ESTELAR



Anã branca:
 $0,45 M_{\text{Sol}} < M < 8 M_{\text{Sol}}$

Estrela de nêutrons:
 $8 M_{\text{Sol}} < M < 25 M_{\text{Sol}}$

Buraco negro:
 $25 M_{\text{Sol}} < M$



E se o Sol fosse um buraco negro?

Raio do Sol: 696 340 km.

Densidade média: 1400 kg/m³.

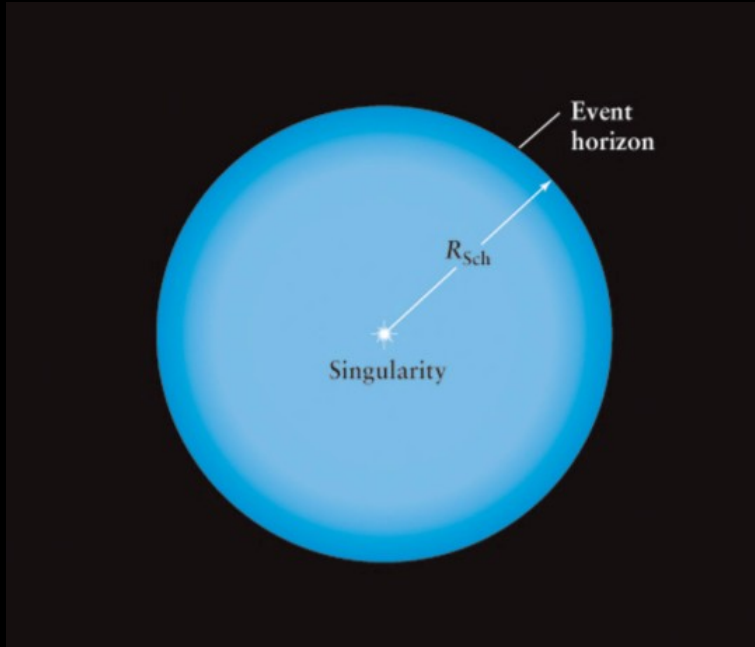
Raio de Schwarzschild: 3 km.

Densidade média: 1,77 x 10²⁸ kg/m³.

Fonte: Nasa canal no YouTube

<https://www.youtube.com/watch?v=wymMn-SmALY>

Buraco negro massa-estelar: anatomia



Horizonte de eventos

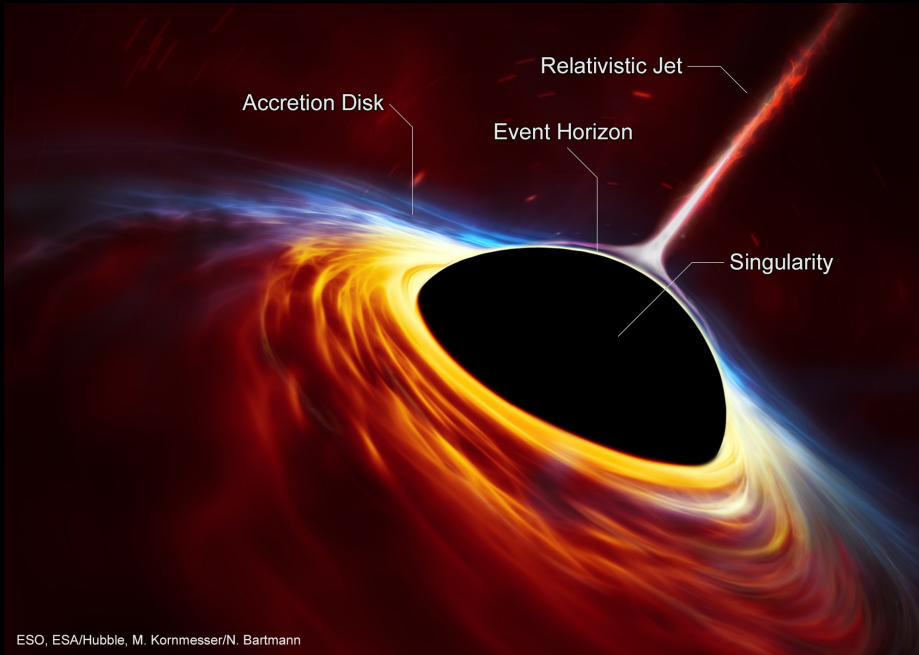
Região sem retorno. Ao ser atravessada não é mais possível escapar.

Singularidade

Centro do buraco negro para o qual toda a matéria colapsa após atravessar o horizonte de eventos.

Buracos negros são objetos compactos e extremamente densos cuja gravidade é tão forte que nem mesmo a luz consegue escapar do horizonte de eventos.

Buraco negro supermassivo: anatomia



Disco de acreção

Formado por gás e poeira que ao girar com altíssimas energias, esquenta devido ao atrito, emitindo radiação.

Jato relativístico

Jato de radiação e partículas sendo lançadas ao espaço com velocidades próximas a velocidade da luz.

Classes de buracos negros

A black hole is depicted at the center, surrounded by a glowing accretion disk. A bright blue jet of light or gas is shown being ejected from the top of the black hole. The background is a dark, starry space with a galaxy visible in the upper left corner.


Buraco negro de massa-estelar

- 1 - *Forma-se a partir da morte de estrelas massivas.*
- 2 – *Massa: cerca de 3 a dezenas de massas solares.*
- 3 - *Presente em basicamente todos os lugares onde se formam estrelas.*

Buraco negro supermassivo

- 1 - *Processo de formação desconhecido.*
- 2 - *Massa: de milhões à bilhões de massas solares.*
- 3 - *Encontrados em quase todo centro galáctico.*

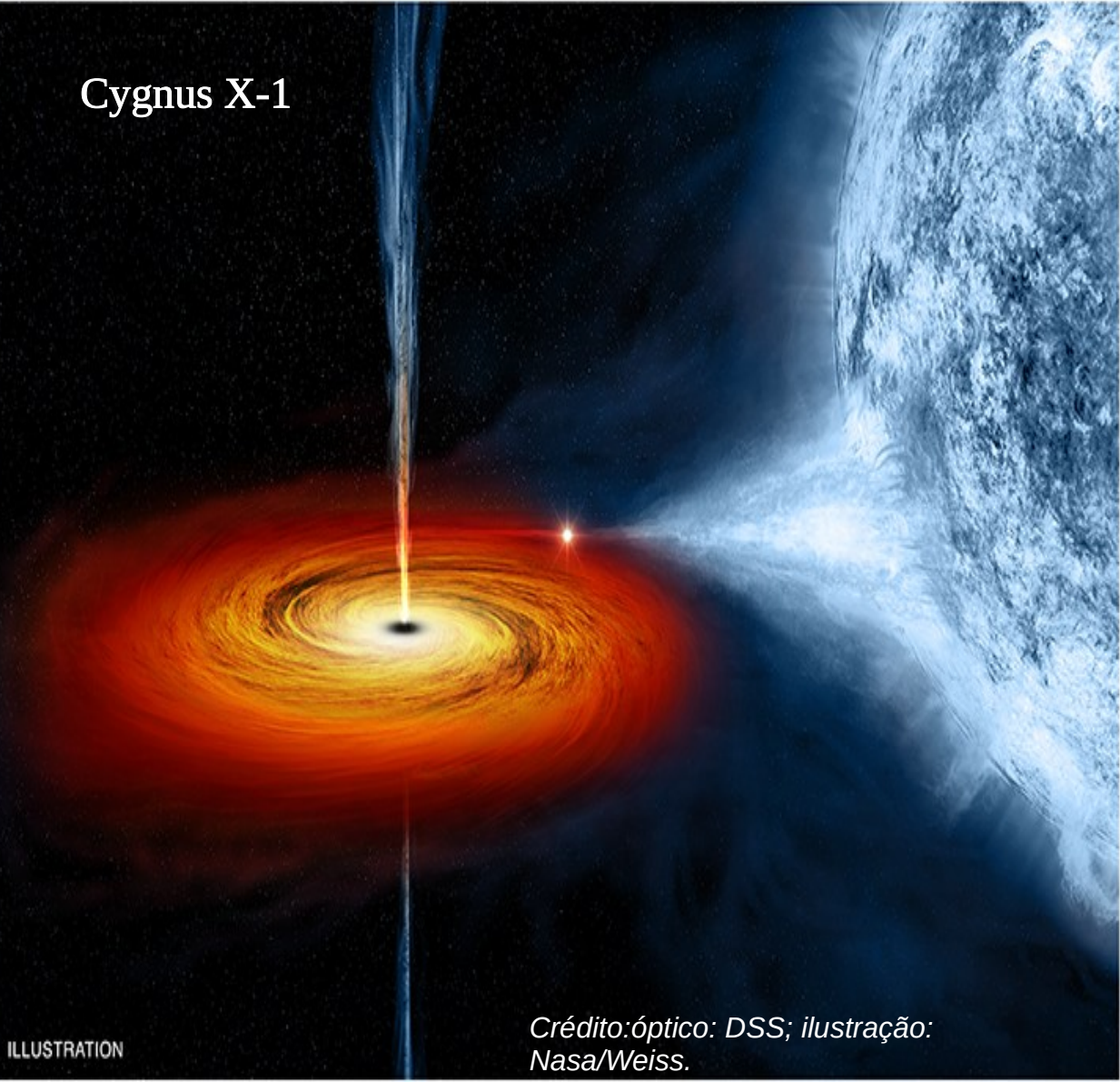
Se buracos negros são invisíveis, como podemos observá-los?

- 
- 1 - Efeitos de lentes gravitacionais.
 - 2 - Sombra.
 - 3 - Estrelas orbitando o “nada”.
 - 4 - Disco de acreção.
 - 5 - Fontes invisíveis de raios-X e raios Gama.



Característica: fonte intensa de raio-X.
Localização: Constelação de Cisne, Via Láctea.
Massa: $14,8 M_{\text{Sol}}$.
Distância: 6070 anos-luz.
Raio do horizonte de eventos: 44 Km.
Rotação do horizonte de eventos: 800 Hz.
Descoberto: 1964.

Cygnus X-1



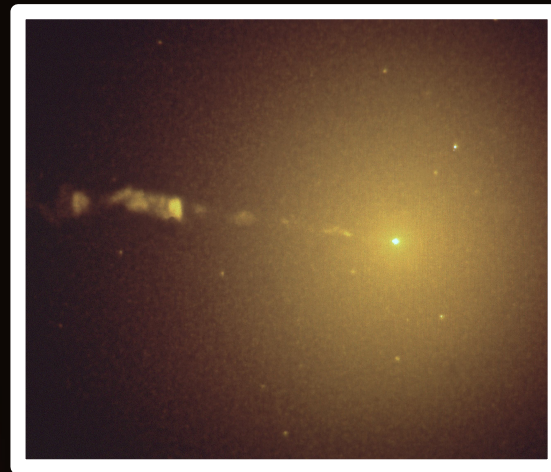
ILLUSTRATION

Crédito:óptico: DSS; ilustração: Nasa/Weiss.

OPTICAL

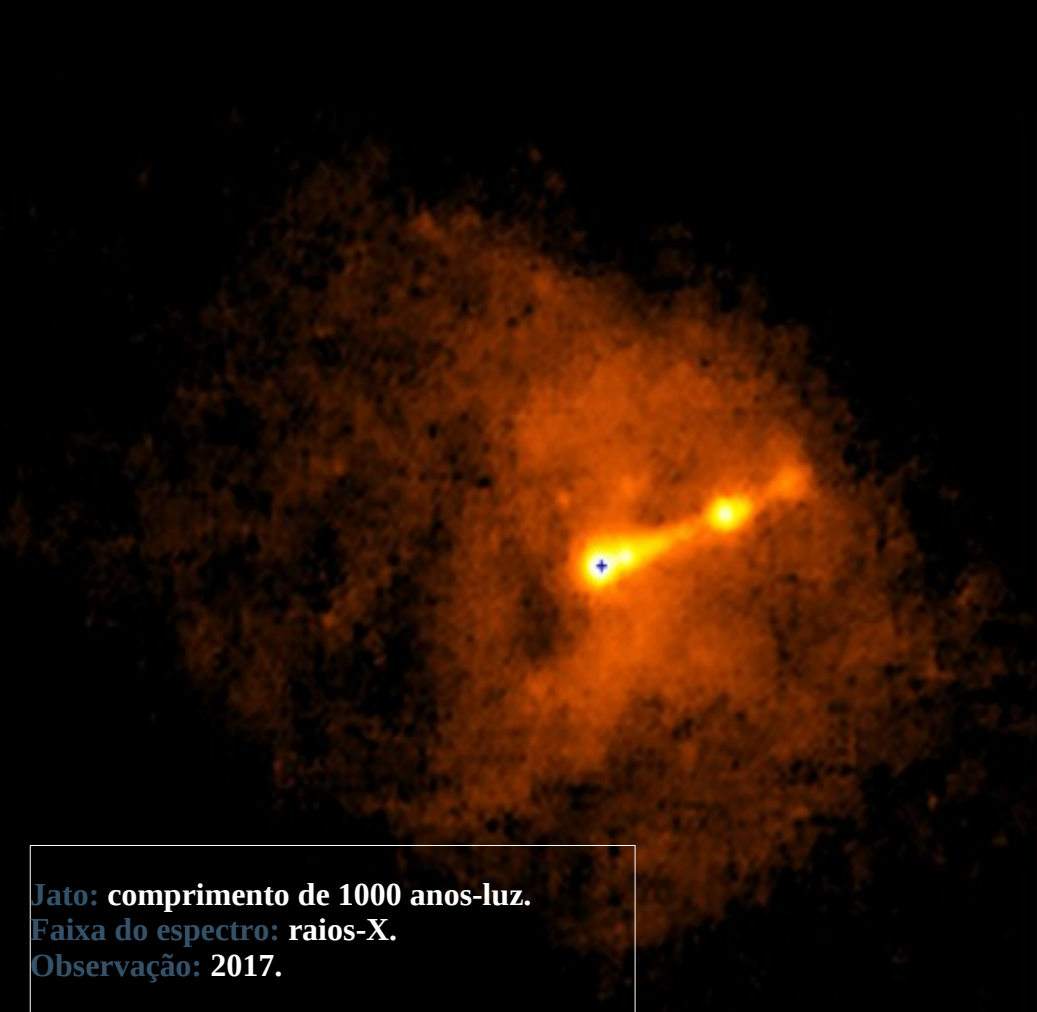
Buraco negro supermassivo

Localização: Galáxia M87.
Posição: 22 anos-luz do centro de M87.
Massa: $6,5 \times 10^9 M_{\odot}$.
Raio do horizonte de eventos: 20×10^9 Km
(além da órbita de Plutão).
Distância: 55 milhões de anos-luz.
Faixa do espectro: 1,3 mm (rádio).
Trabalho: 2019.



Galáxia M87

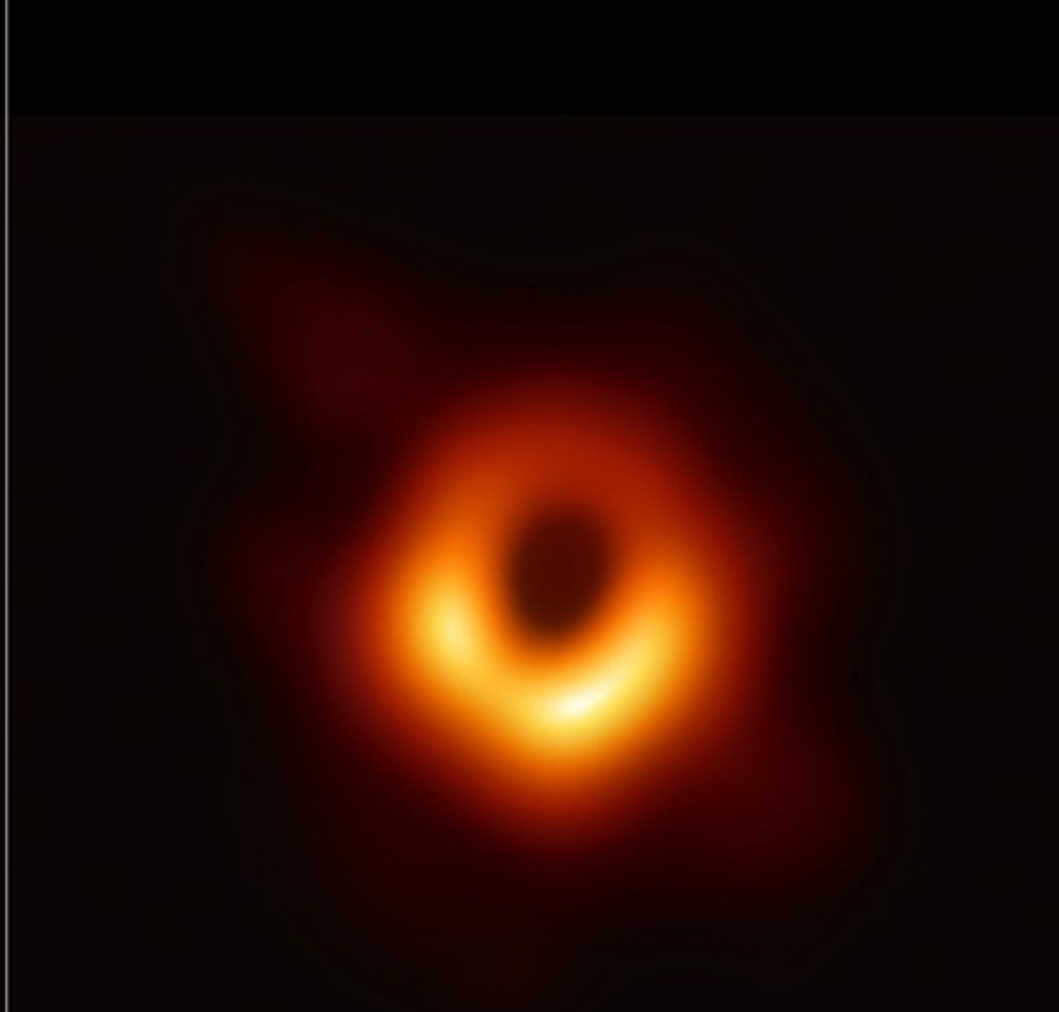
Tipo: elíptica.
Localização: Constelação de Virgem.
Diâmetro: 240 000 anos-luz.
Distância: 55 milhões de anos-luz.



Jato: comprimento de 1000 anos-luz.
Faixa do espectro: raios-X.
Observação: 2017.

Chandra X-ray

Credit: Left: NASA/CXC/SAO; Right: Event Horizon Telescope Collaboration.

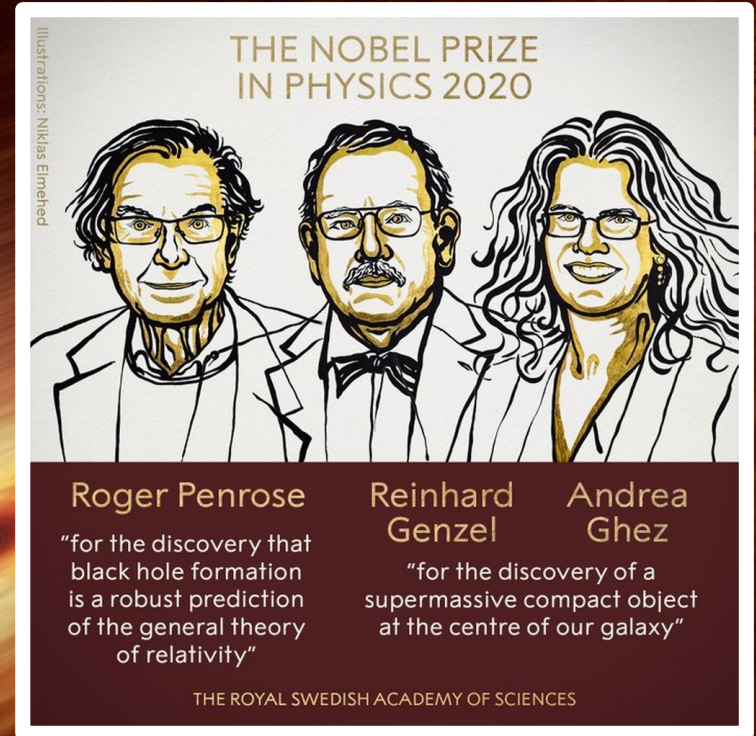


(not to same scale)

EHT

Buraco negro supermassivo no centro da Via Láctea

- 1 – BH Sagitário A*: fonte de ondas de rádio.
- 2 – Massa: 4 milhões de M_{sol} .
- 3 – Distância da Terra: 26 000 anos-luz.
- 4 – Observação: grupo de estrelas no centro da Via Láctea.
- 5 – Estrela S2: período orbital de 16 anos.
- 6 – Tempo de observação: 16 anos.



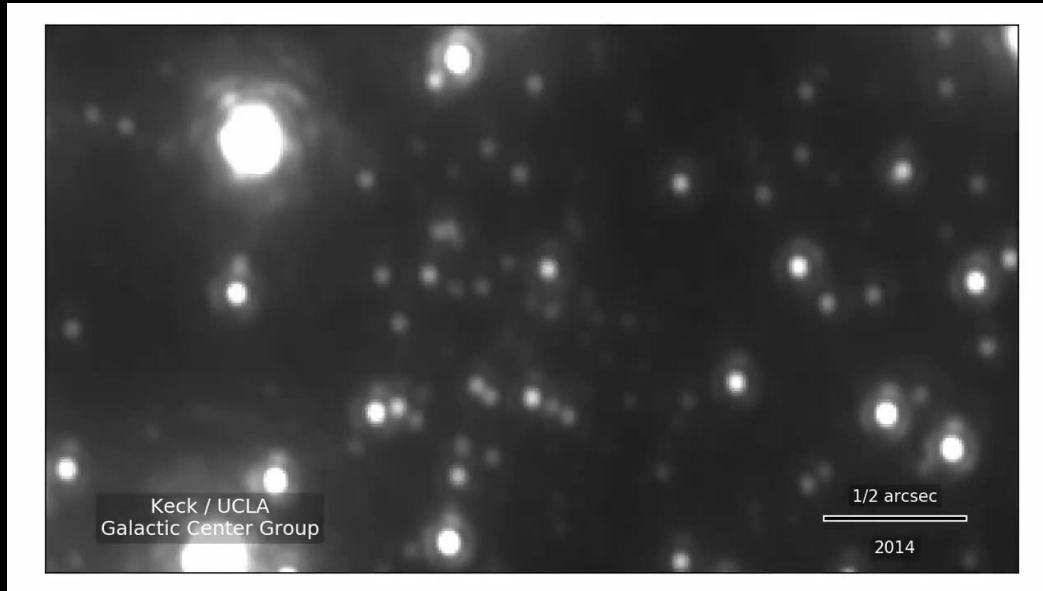
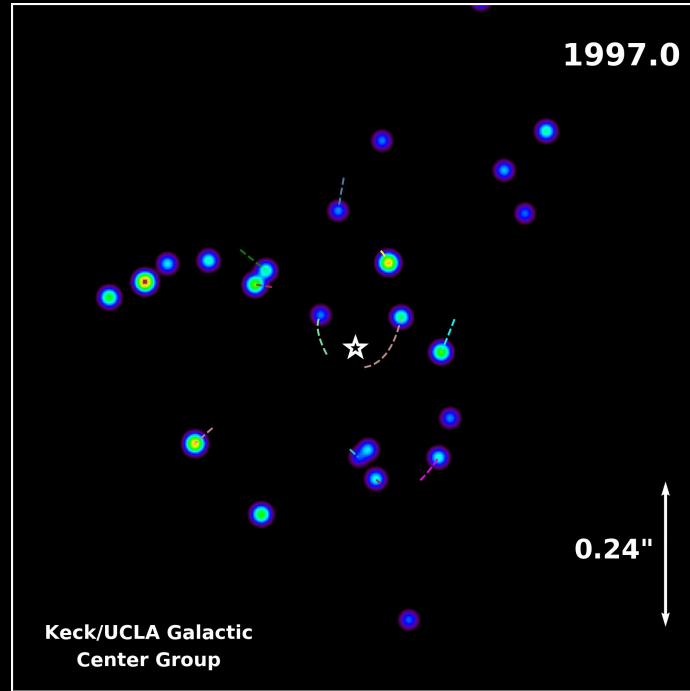


Imagem de estrelas orbitando Sagitário A*.
Fonte: <http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/animations.html>



Animação das órbitas estelares em torno do buraco negro supermassivo no centro da Via Láctea.

Fonte: <http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/animations.html>

Espaguetização de estrelas

An artistic rendering of a star being spaghettified by a black hole. The star is shown as a bright yellow-white object being stretched into a long, thin filament of orange and red material. The background is dark with some faint stars and a reddish glow.

AT2019qiz

Massa do buraco negro: $10^6 M_{sol}$.

Estrela espaguetizada: *massa do Sol.*

Distância: *215 milhões de anos-luz.*

Galáxia: *2MASXJ04463790-1013349.*

Observação: *UV, óptico e raios X.*

Telescópios: *VLT e NTT do ESO.*

Anos das observações: *2019/2020.*

Crédito: ESO / M. Kornmesser.



Fonte: <https://www.eso.org/public/videos/eso2018b/>

Referências

Artigos e livros

A. Einstein. *Relativity: the special and general theory*. Editor: Ancient Wisdom Publications, 2010.

L. D. Landau; E. M. Lifshitz. *The classical theory of fields*. Editor: Pergamon Press plc, 1994.

V. P. Frolov; A. Zelnikov. *Introduction to Black Hole Physics*. Editor: Editora : OUP Oxford, 2015.

Chandrasekhar, S. "The Density of White Dwarf Stars". *Philosophical Magazine*. 11 (70): 592–596, 1931.

Chandrasekhar, S. "The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs". *Astrophysical Journal*. 74: 81–82, 1931.

Oppenheimer, J. R.; Volkoff, G. M. "On Massive Neutron Cores". *Physical Review*. 55 (4): 374–381, 1939.

Event Horizon Telescope Collaboration, *First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole*. *The Astrophysical Journal Letters*, 875:L1 (17pp), 2019.

M. Nicholl, et al. *An outflow powers the optical rise of the nearby, fast-evolving tidal disruption event AT2019qiz*, *MNRAS* 499, 482–504 (2020).

Animações, imagens e vídeos

BH em M87:

<https://eventhorizontelescope.org/>

<https://chandra.harvard.edu/blackhole/>

BH Sgr A*:

<http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/animations.html>

Cygnus X-1:

https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/multimedia/cygnusx1.html

Einstein:

<https://jornal.usp.br/atualidades/albert-einstein-o-genio-do-seculo-20/>

Espaghetização de estrela (AT2019qiz)

<https://www.eso.org/public/videos/eso2018b/>

<https://www.eso.org/public/news/eso2018/>



Obrigado!