



Universidade Federal do ABC

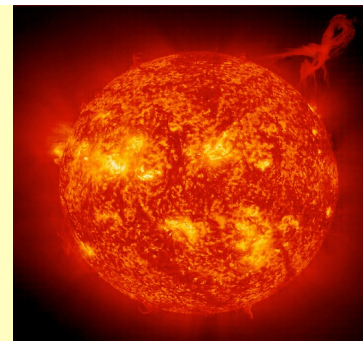
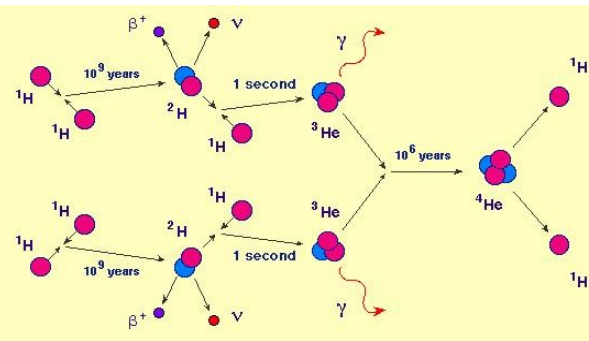
Introdução à Física Estelar

17. Surtos de Raios Gama e Buracos Negros

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Estelar.html>

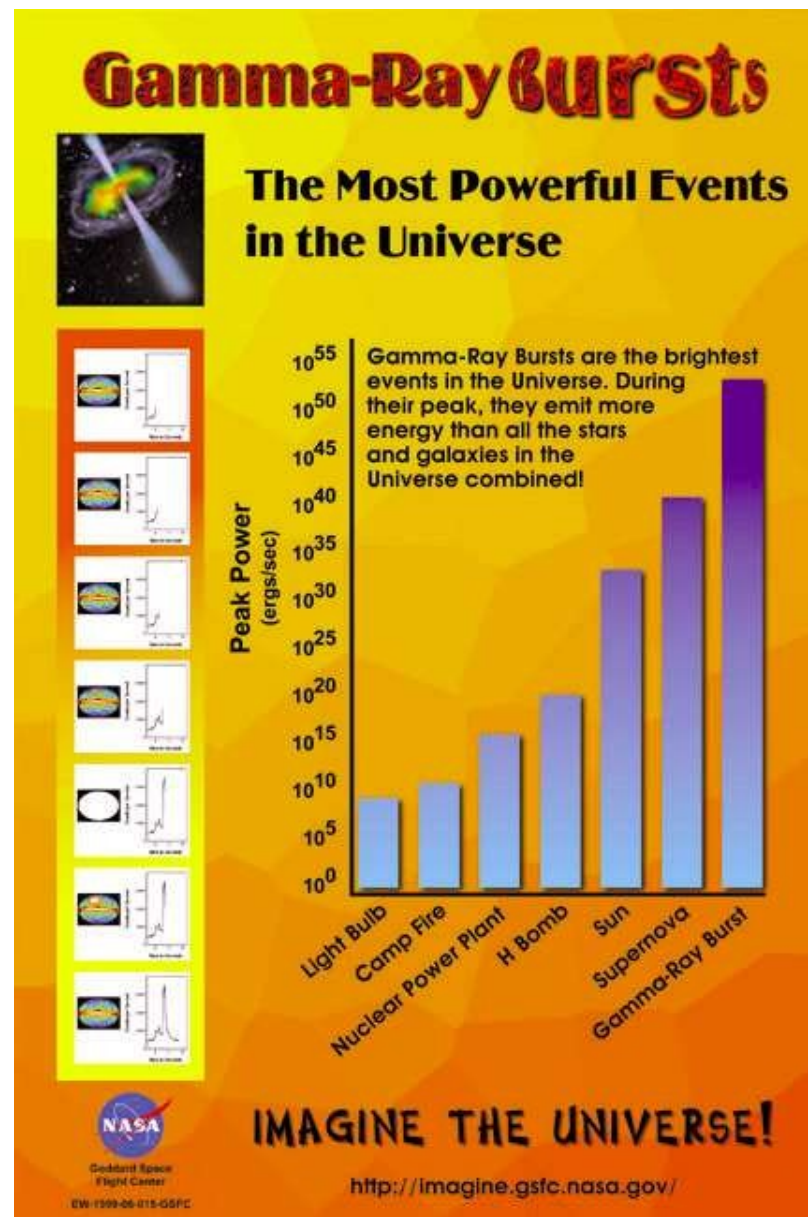


Erupções de Raios Gama ou X

Surtos de raios gama são as **maiores explosões conhecidas** no Universo, $\sim 10^{44}$ J, **colimados** (centenas de vezes mais brilhante que uma Supernova).

se acontecesse uma na Via Láctea apontando pra cá, poderia causar uma extinção em massa, ou até evaporar a Terra.

Eles são responsáveis por produzir **grande parte** dos **elementos químicos pesados** do **Universo** (pelos processos *r* e *rp*).



Erupções de Raios Gama

É observada da ordem do **1 GRB** (do inglês *Gamma Ray Burst*) **por dia** por **observatórios espaciais** como Vela, Compton (CGRO), BeppoSAX, HETE-2 e Swift, distribuídas pelo céu inteiro, indicando uma **origem extra-galáctica**.

Deve acontecer um a cada $\sim 500\,000$ anos por galáxia ($\sim 1/3000$ da taxa de supernovas).

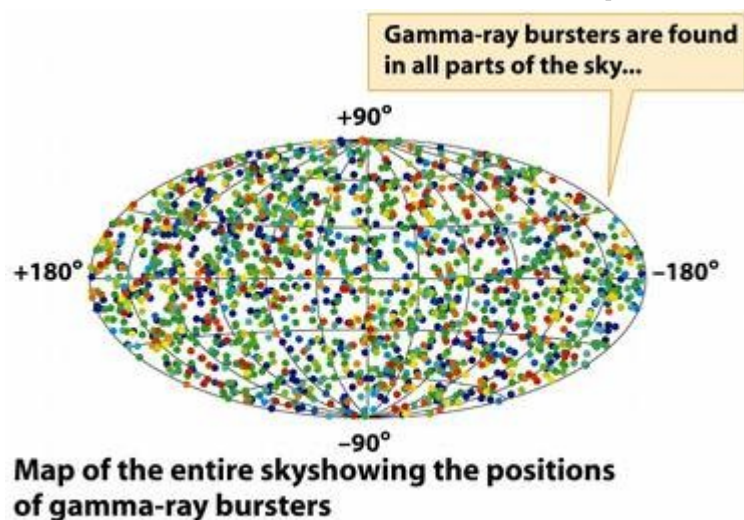


Figure 22-13a
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

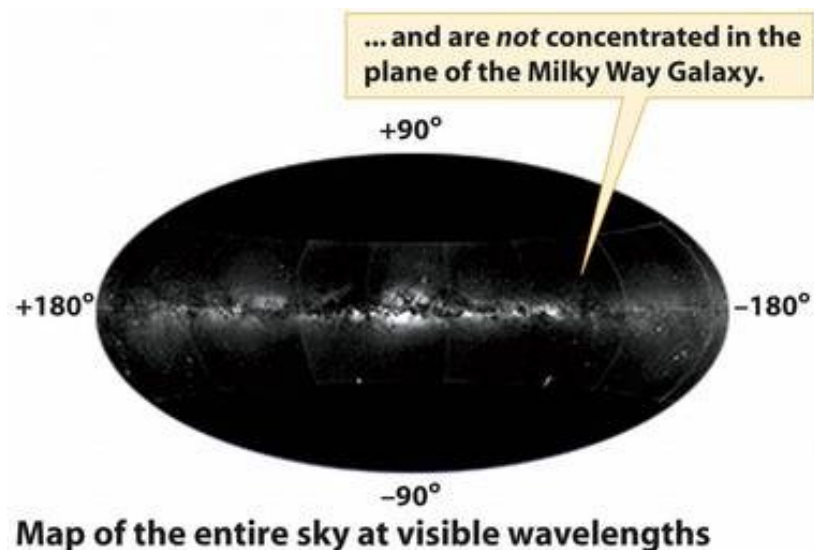


Figure 22-13b
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

www.youtube.com/watch?time_continue=18&v=m3IDJFmD9Ss

Erupções de Raios Gama

Curvas de “Luz”

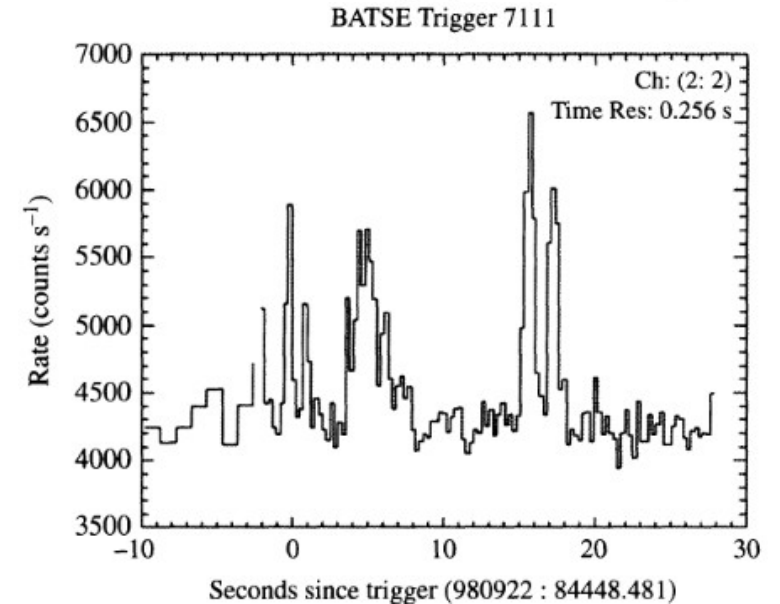
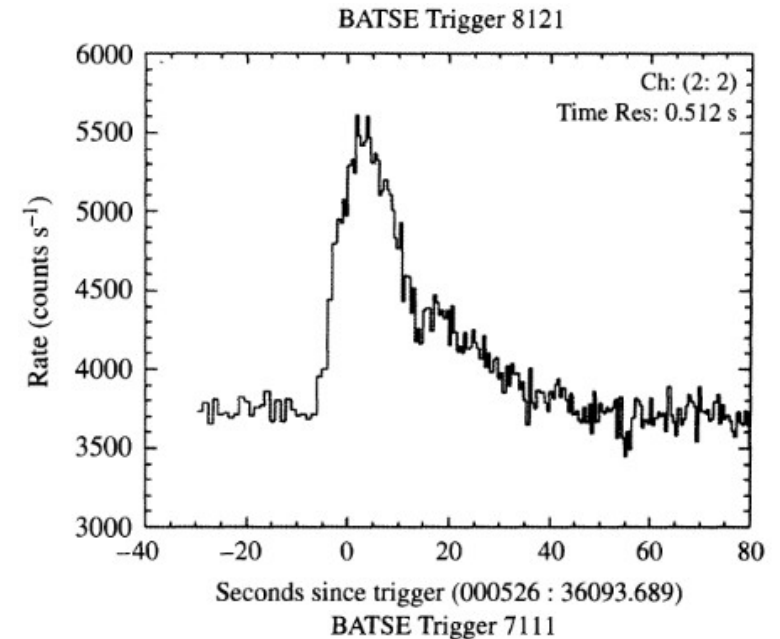
Algumas mostram **curvas** de **radiação gama** (e um pouco **X**), de 1 keV a muitos GeV, com uma **subida rápida**, até 10^{-4} s, seguida por uma **queda exponencial**, similar às curvas de luz de Novas ou Supernovas,

mas **muitos** são mais **complexas**, com **múltiplos picos**.

Dr. Bill Paciesas (Membro do BATSE, instrumento a bordo do CGRO):

“If you've seen one gamma-ray burst, you've seen one gamma-ray burst.”

Frequentemente, há um **afterglow** de **raios X** que dura dias.



Erupções de Raios Gama

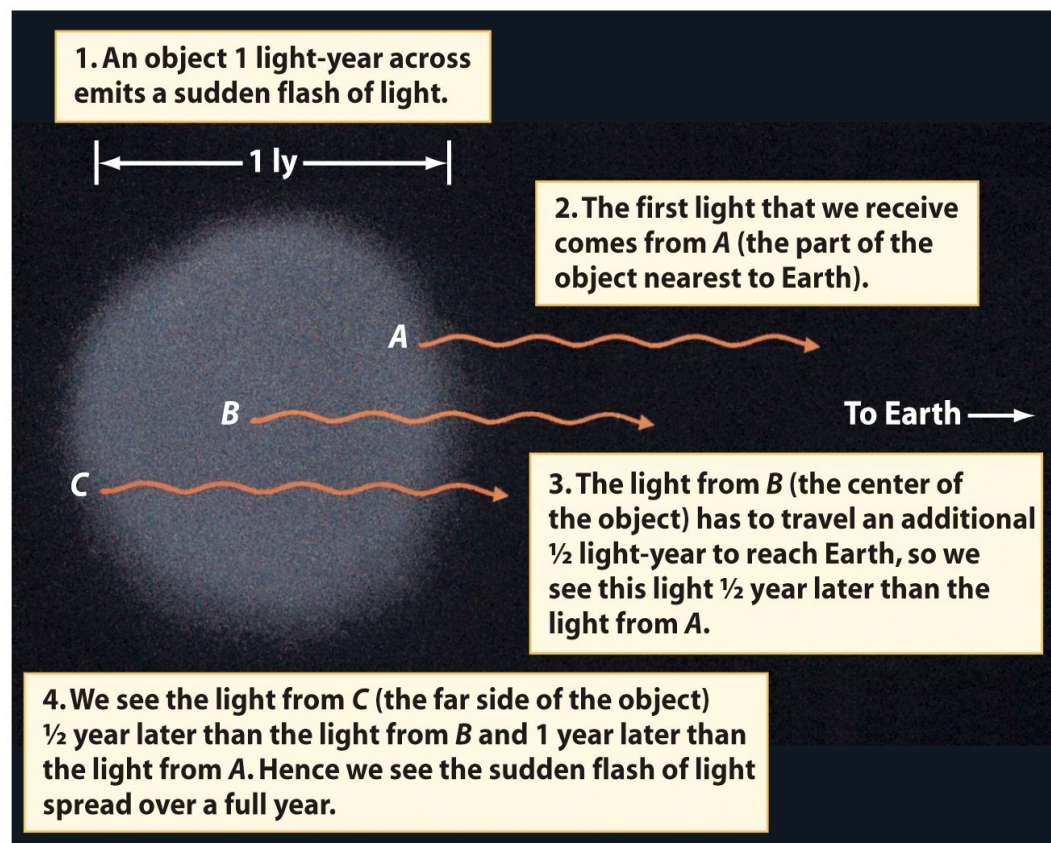
As **escalas** de **tempo** das **variações** nas diferentes partes dos **espectros** dão uma dica quanto aos **tamanhos** dos **objetos** emitindo estas **radiações**:

$$R \sim c \cdot \Delta t / 2$$

ou, para um componente opaco (sem radiação vindo do lado de trás): $R \sim c \cdot \Delta t$

As **variações rápidas** de até 10^{-4} s indicam que as **fontes** dos **Surtos de Raios Gama** medem apenas **poucas dezenas de km**, tamanho típico de **Estrelas de Nêutrons**.

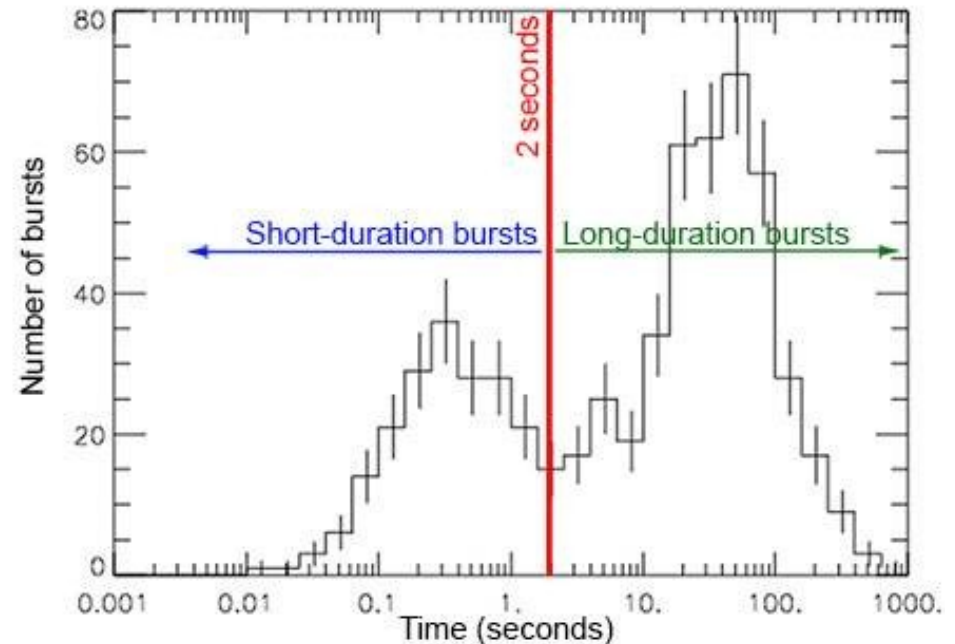
Outra dica, de que os GRB podem ter algo a ver com EdN é a presença de **linhas de aniquilação e^-e^+** com **redshifts gravitacionais altos** e **radiação cíclotron** em **campos magnéticos intensos** nos **espectros**.



Erupções de Raios Gama

Os **GRBs** dividem-se em **duas classes**:

- **de longa duração**: Surtos > 2 s, tipicamente da ordem de **20 s**, e “**moles**” (menos energéticos) **energias totais** emitidas $\sim 10^{44}$ J
- **de curta duração**: < 2 s, usualmente **alguns ms**, e mais “**duros**”, emitem uns **1000 vezes menos energia** que os **longos**



Erupções de Raios Gama Longas

Há **evidências** de que a **emissão** de **energia** é fortemente **colimada** em um **feixe**, com um cone de abertura de apenas alguns graus.

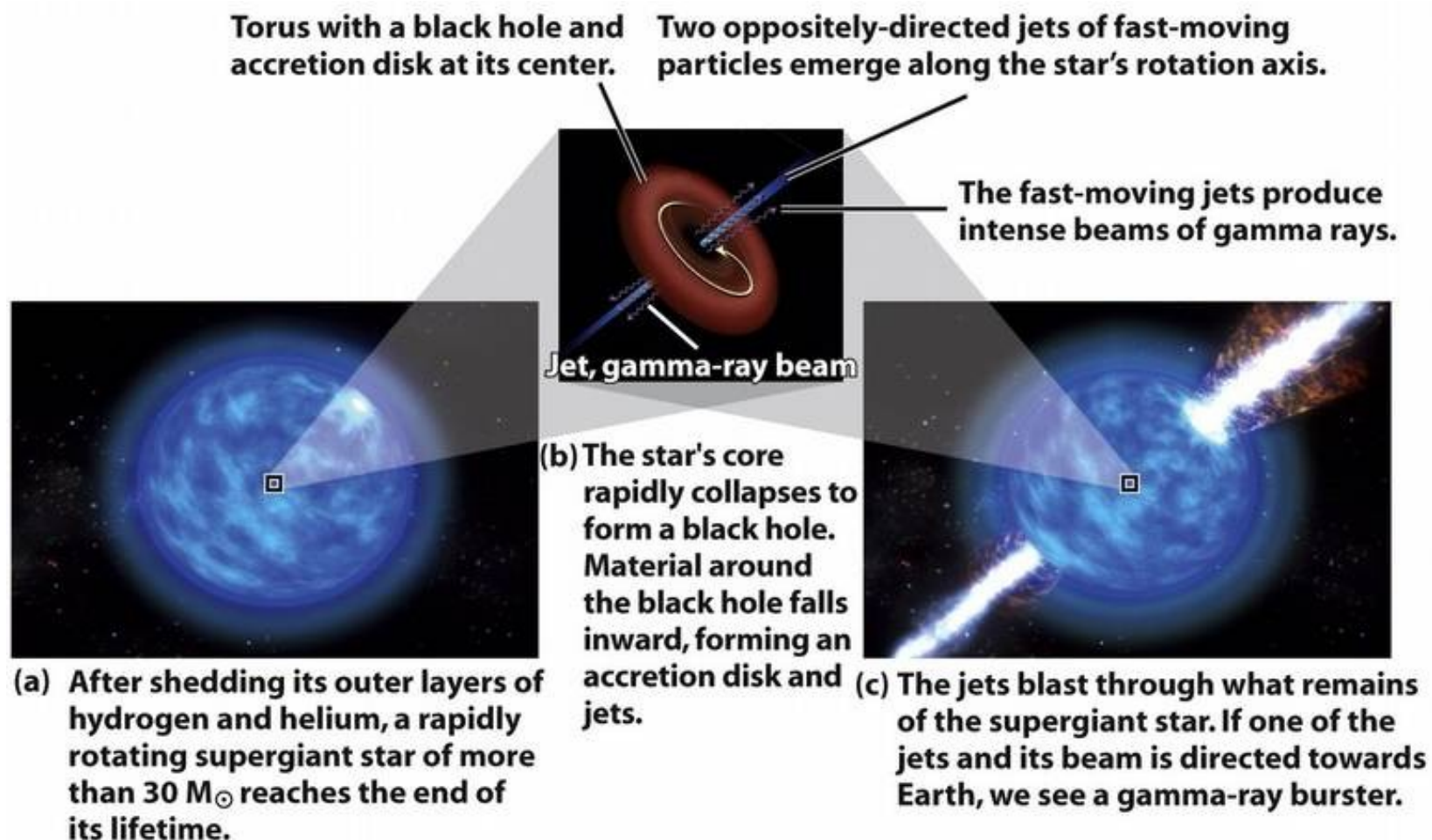
As Erupções de Raios Gama de Longa Duração são, às vezes, **associadas** a **Supernovas**.

Possíveis explicações deste fenômeno incluem:

- **Acreção** de **material** em cima de uma **Estrela de Nêutrons** (\Rightarrow aula anterior)
- **Colapsar** ou **Hipernova**: **colapso** de **estrelas massivas** com **formação** subsequente de um **Buraco Negro**
- **Supranova**: **Estrela de Nêutrons** formada com **massa** acima da **máxima estática**
 \rightarrow **desaceleração** e **colapso** a **Buraco Negro**

Erupções de Raios Gama Longas

Ilustração do Modelo do Colapsar



Erupções de Raios Gama Curtas

Hipótese:
produzidos por
coalescência (*merger*)
de **duas Estrelas de
Nêutrons**
ou de uma **Estrela de
Nêutrons** com um
Buraco Negro
(como mencionado
na aula anterior)



www.youtube.com/watch?v=vw2sLcyV7Vc

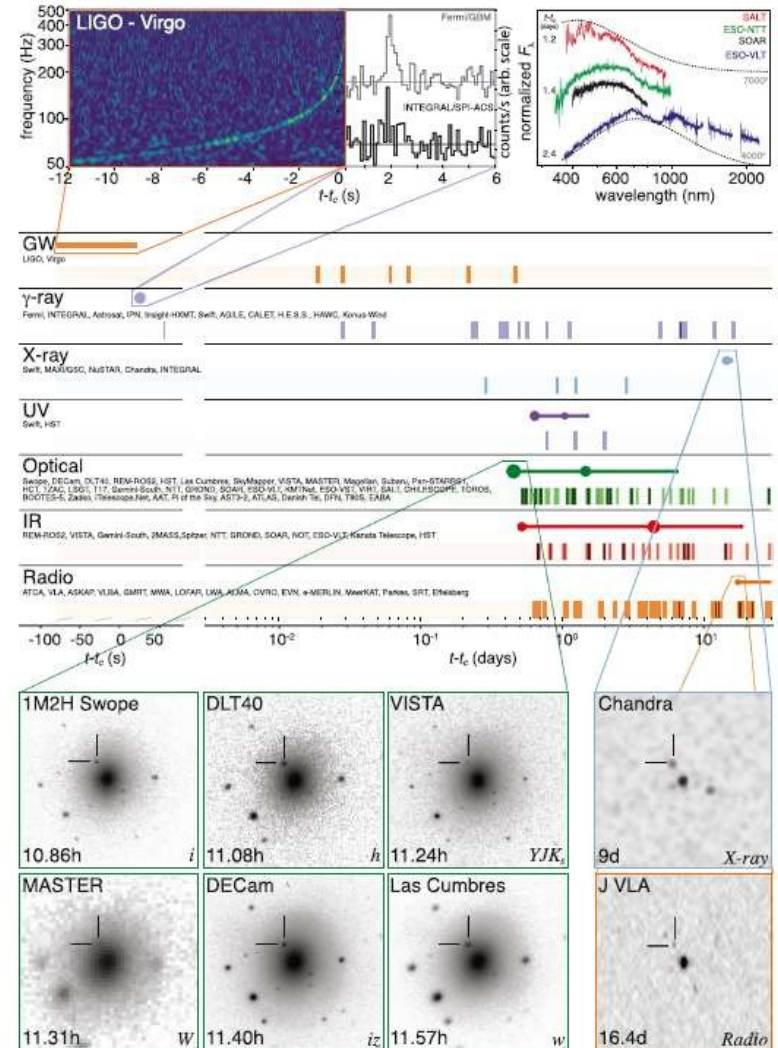
Erupções de Raios Gama Curtas

As **ondas gravitacionais** geradas em vários destes eventos estão sendo **detectadas** desde 2015 pelo “telescópio” de ondas gravitacionais LIGO (=> aula Relatividade).

Em 2017 detectaram não apenas as **ondas gravitacionais**, mas também **radiação eletromagnética** (no ótico, radio, raios gama e X, incl. linhas de ouro e platina) de uma destas colisões.

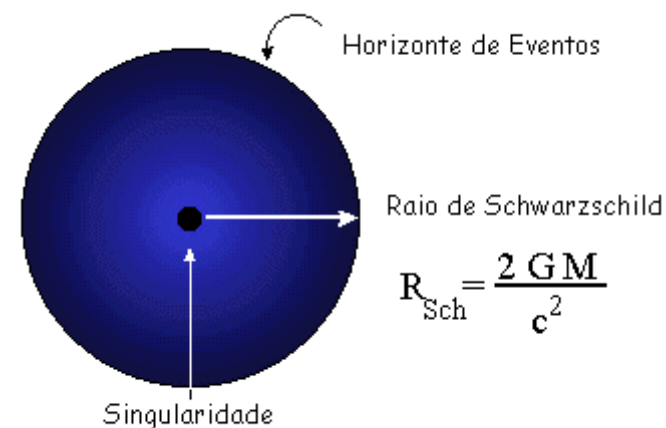
=> Era de **multimensageiros**

Para este evento e similares criaram o nome **kilonova**.



Buracos Negros

Empregando a **Relatividade Geral**, dá pra calcular a **distância**, chamada **Raio de Schwarzschild** R_s , a partir daquela a **luz** não consegue mais **escapar** da **influência** de uma **massa** M , resp. ela sofre um **redshift gravitacional infinito**.



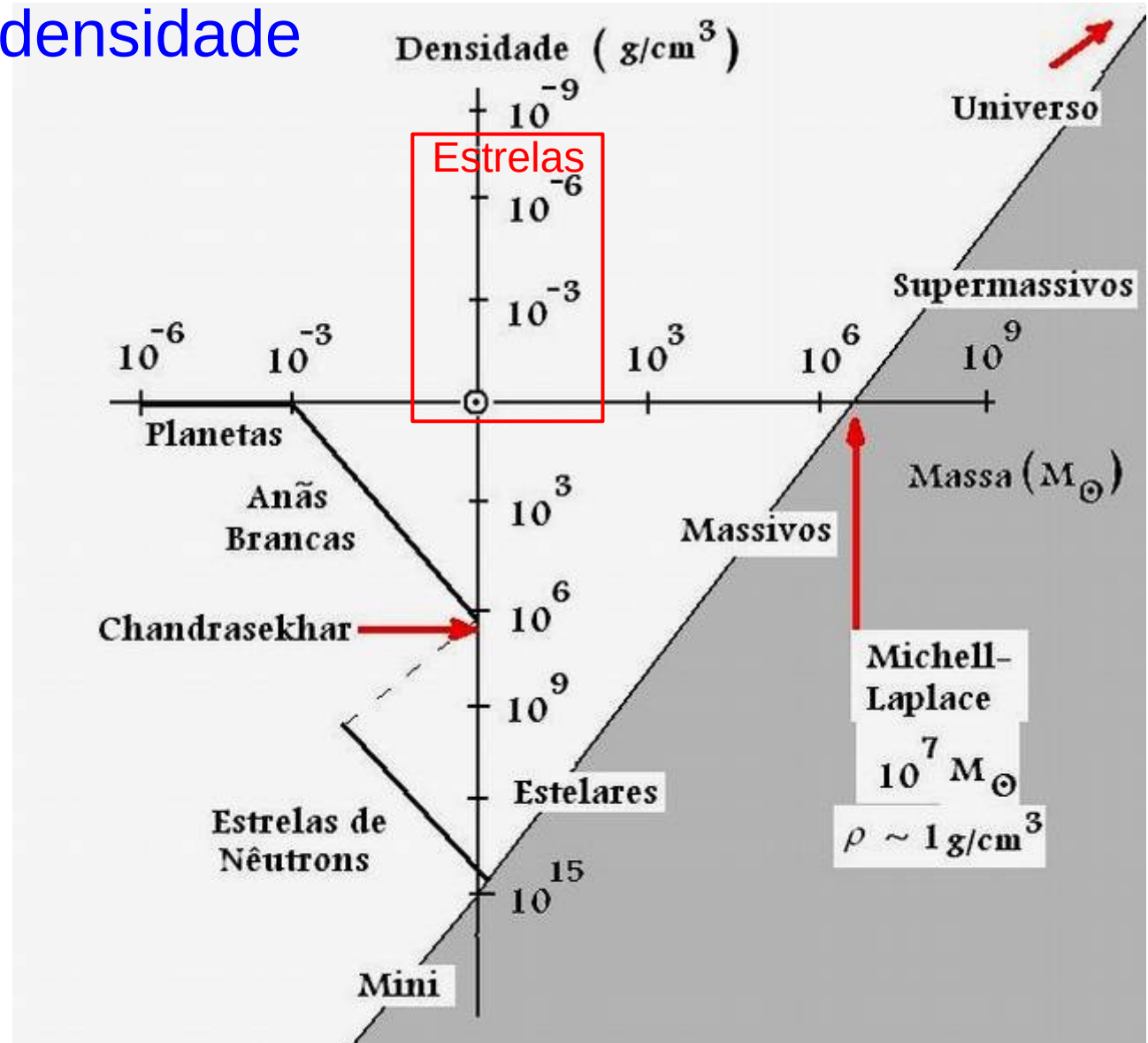
Para a massa do Sol, esta distância é de 3 km.

Se uma **massa** é **concentrada** em um **espaço menor** que a esfera delimitada pelo seu **Raio de Schwarzschild**, temos um **Buraco Negro**.

Buracos Negros eram hipotetizados, usando mecânica Newtoniana, em 1783 por John Mitchell.

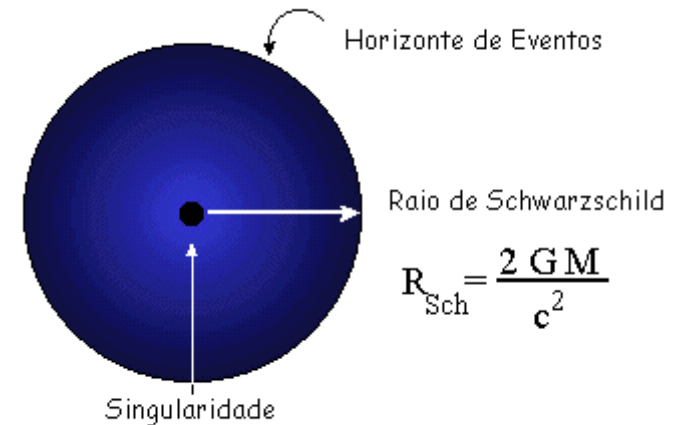
Buracos Negros

Diagrama massa-densidade



Buracos Negros

A **esfera** com **raio** R_s em torno do centro do Buraco Negro é chamada **Horizonte de Eventos**, e é vista como **limite exterior** do **Buraco Negro**.



O **Horizonte de Eventos** se chama assim, por que **não** se pode **ver além** dele (para dentro do Buraco Negro).

Fora de poucos Raios de Schwarzschild, um Buraco Negro de massa M **atrai** outras massas com a **mesma força** que qualquer outra **massa** de quantia M .

=> Um **Buraco Negro não suga!**

Buracos Negros

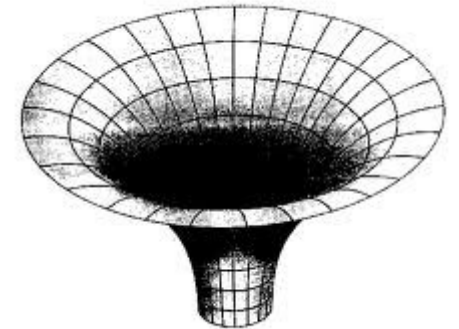
Alguns efeitos bizarros acontecem no **Horizonte de Eventos**:

A **dilatação do tempo** e o **redshift gravitacional** se tornam **infinitos**.

O que significa isto?

Se você joga um relógio **para dentro** de um **Buraco Negro** e **observa** o relógio de fora:

- Ele **nunca alcança** o **Horizonte de Eventos**
 - Ele **anda** cada vez mais **lentamente**
 - Ele se torna cada vez mais **vermelho** e **menos brilhante** até ficar invisível,
- enquanto ele se **aproxima** do **Horizonte de Eventos**.



Espaço curvado por um Buraco Negro

Buracos Negros

De fato, isto acontece também com o próprio material que está formando o Buraco Negro, p. e. a estrela que está colapsando:

O material nunca alcança o Horizonte de Eventos.

=> A velocidade do colapso tende a zero antes de ele ser completado.

=> O Buraco Negro nunca fica pronto.

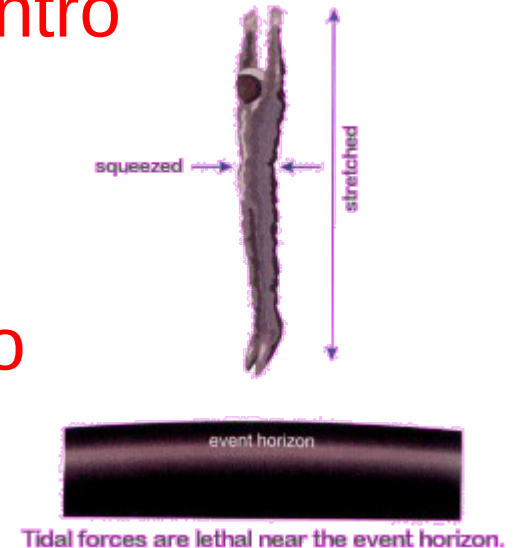
Em lugar disso temos uma “estrela congelada”, mas que é invisível mesmo assim, devido ao *redshift* gravitacional enorme.

Em conclusão, visto de fora, Buracos Negros não existem mas, sim, objetos extremamente similares a Buracos Negros.

Buracos Negros

Para o relógio, ou um amigo **caindo para dentro** do Buraco Negro, a coisa é bem **diferente**:

Caso seja um **Buraco Negro Estelar**, infelizmente, o nosso amigo estará **destruído** por **forças de maré**, devido a diferenças da força nos pés e na cabeça, efeito chamado espaguetificação, **antes** de **alcançar** o **Horizonte de Eventos** (melhor fazer o experimento com um inimigo).



Buracos Negros

Mas tem esperança:

Nos centros de galáxias há **Buracos Negros Supermaciços** que têm **massas** e, portanto, **raios de Schwarzschild, maiores**.

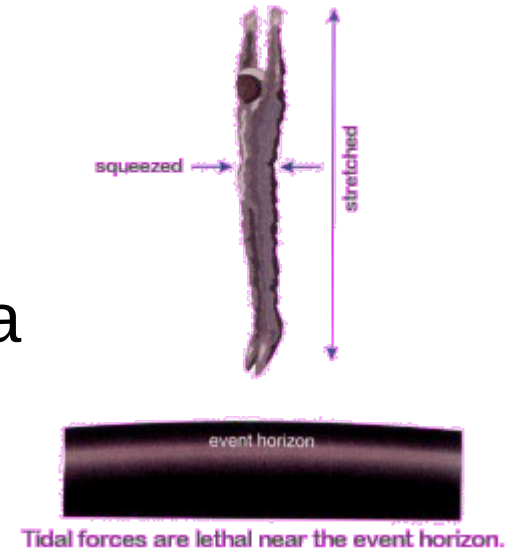
Aquele no centro da Via Láctea tem uma massa de 3.7 mio. M_{\odot} , e portanto, um Raio de Schwarzschild de 12 mio. km.

Já que forças de maré caem com a 3ª potência da distância, temos no Horizonte de Eventos de um Buraco Negro com massa M :

$$F_{\text{maré}} \propto M/R_S^3 \propto M/M^3 = M^{-2}$$

=> mais **fracas** em Buracos Negros de **maior massa**

=> ele pode sobreviver.



Relatividade

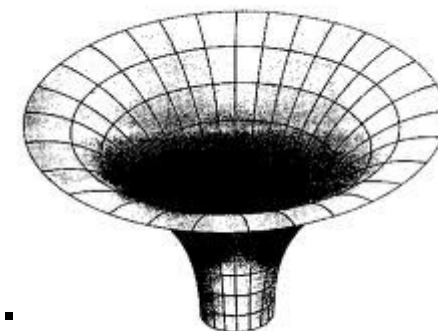
E o que ele vê, caso sobrevive?

Ele **alcança**, sim, o **Horizonte de Eventos** em um **tempo** finito, na verdade, **muito curto**.

Olhando para trás, ele vê:

- o **nosso tempo** andando cada vez mais **rapidamente**, até alcançar **rapidez infinita**,
- nós nos tornando cada vez mais **azul**, enquanto ele se **aproxima** do **Horizonte de Eventos**.

Apesar de o nosso tempo se tornar infinitamente rápido pra ele, ele não verá a história do Universo até o fim, porque a luz de lá nunca alcança ele (e ele nunca vai poder nos contar, o que ele viu).



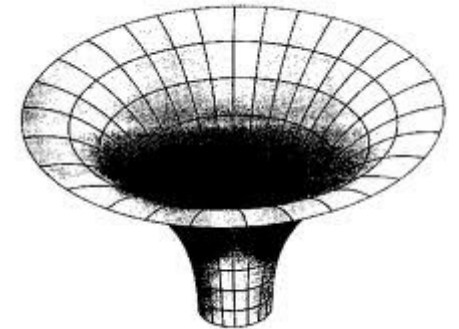
Espaço curvado por um Buraco Negro

Buracos Negros

E o que tem **dentro** de um Buraco Negro?

De alguma forma, deve ter **toda a matéria** daquela ele foi feito (p. e. do caroço colapsado da estrela explodida), mas em uma forma extremamente **densa** que **não** conseguimos descrever com a **física atual**. (gravitação quântica?)

Segunda a teoria, tem uma **singularidade** no **centro**, um estado de **densidade** e **curvatura infinitas**.



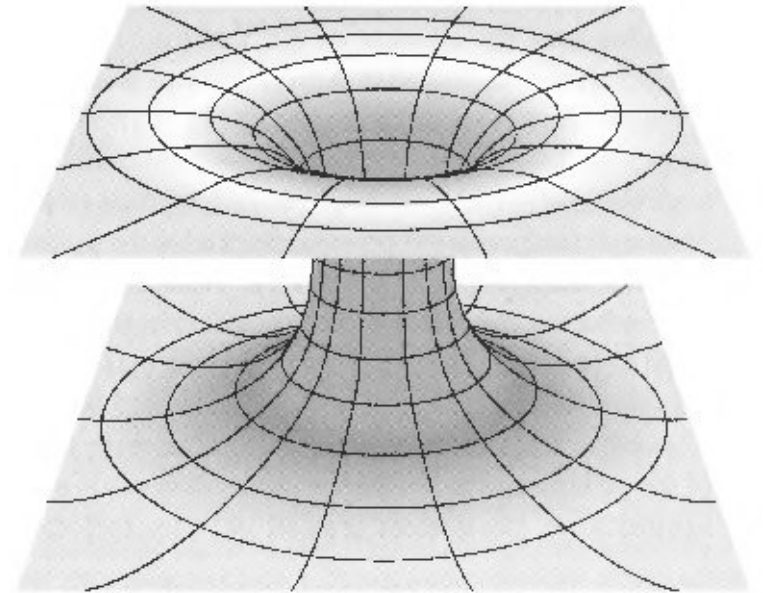
Espaço curvado por um Buraco Negro

Buracos Negros

Gargantas de Schwarzschild, Pontes Einstein-Rosen e Buracos de Minhoca

Algumas Teorias postulam **reaberturas** do **Espaço-Tempo** **atrás** do **Horizonte de Eventos**, que poderiam servir como **túneis** para **lugares/épocas distantes** do **Universo**, mas, por enquanto, estas têm mais a ver com o domínio da Ficção Científica.

Cálculos deste tipo de objeto **não** conseguem criar **mecanismos** para passar algo de um lado pro outro, ainda menos sem enfrentar coisas desagradáveis como singularidades no caminho.



Buracos Negros

As Grandezas que caracterizam um Buraco Negro

Já que **informação** do Buraco Negro **não** tem como **chegar** em **nós**, as **únicas propriedades** que conseguimos **determinar** de **fora** são as que ele já tinha **antes** do colapso, e que foram **conservadas**, os seus:

- **Massa**
- **Momento Angular**
- **Carga Elétrica** (deve ser desprezível, por que cargas positivas e negativas são sempre encontradas juntas, tal que depois do colapso não deve ter nenhuma carga resultante significativa)

Além destas grandezas, não conseguiremos detectar **nenhuma estrutura**. Astrônomos dizem, que “Buracos Negros não têm cabelo”.

Buracos Negros

Buracos Negros em Rotação

Chamados Buracos Negros de **Kerr**.

Alta rotação deve ser **comum** para Buracos Negros de **massas estelares**.

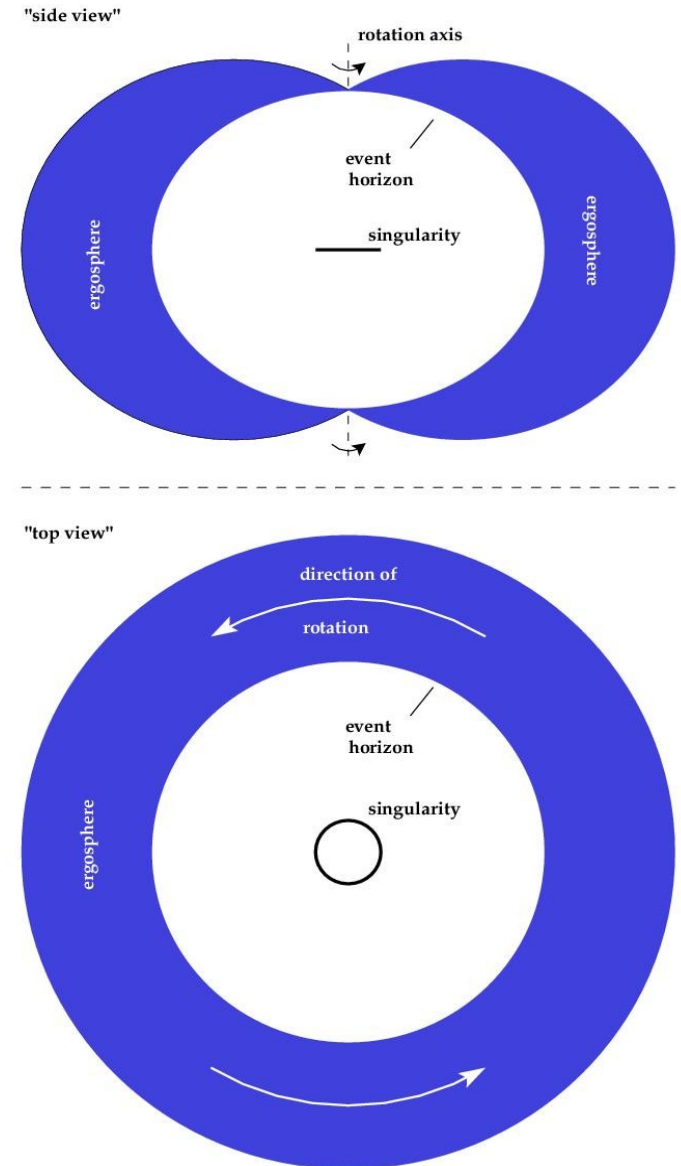
O **momento angular** de um Buraco Negro de Massa M , pode ser no **máximo** $L_{\max} = GM^2/c$.

Exemplo: Buraco Negro de $1 M_{\odot}$:

$$L_{\max} = 8.81 \cdot 10^{41} \text{ kg m}^2/\text{s} \sim 5 L_{\odot}$$

O **Horizonte de Eventos** se **achata**, e a **singularidade** vira um **anel**.

O Buraco (na verdade, qualquer massa em rotação) faz o **Espaço-Tempo** em torno **girar junto**.

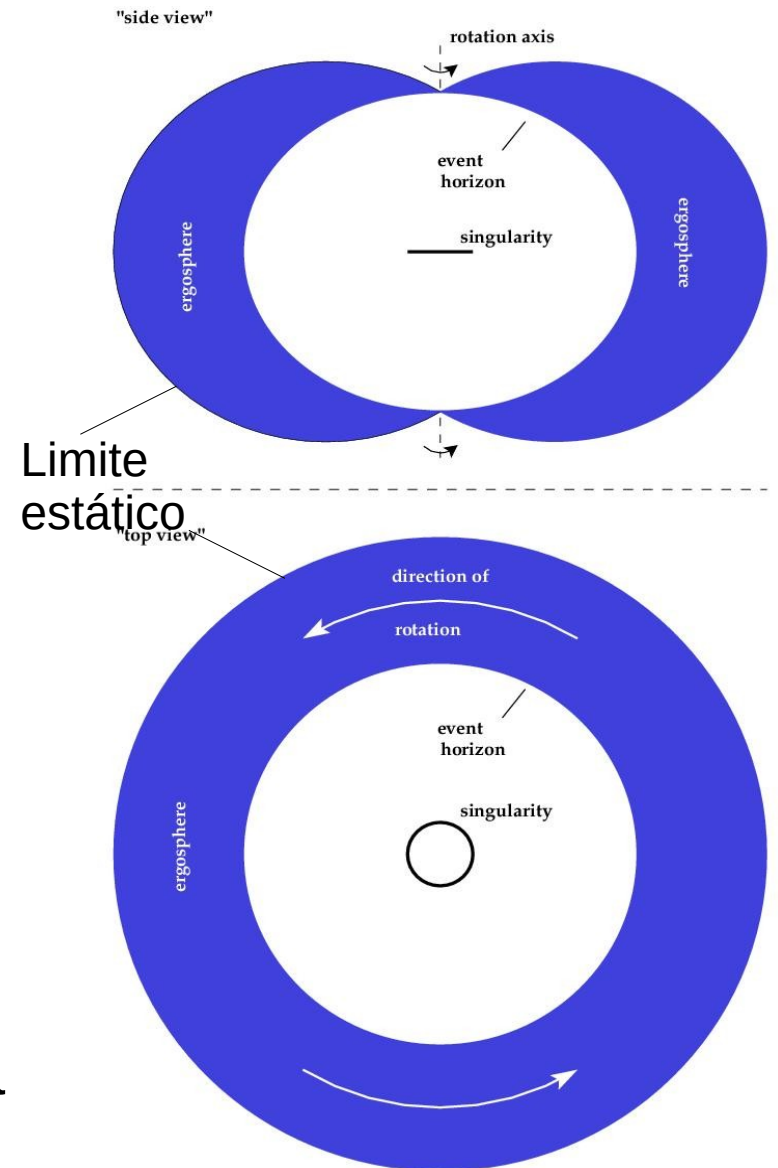


Buracos Negros

Buracos Negros em Rotação

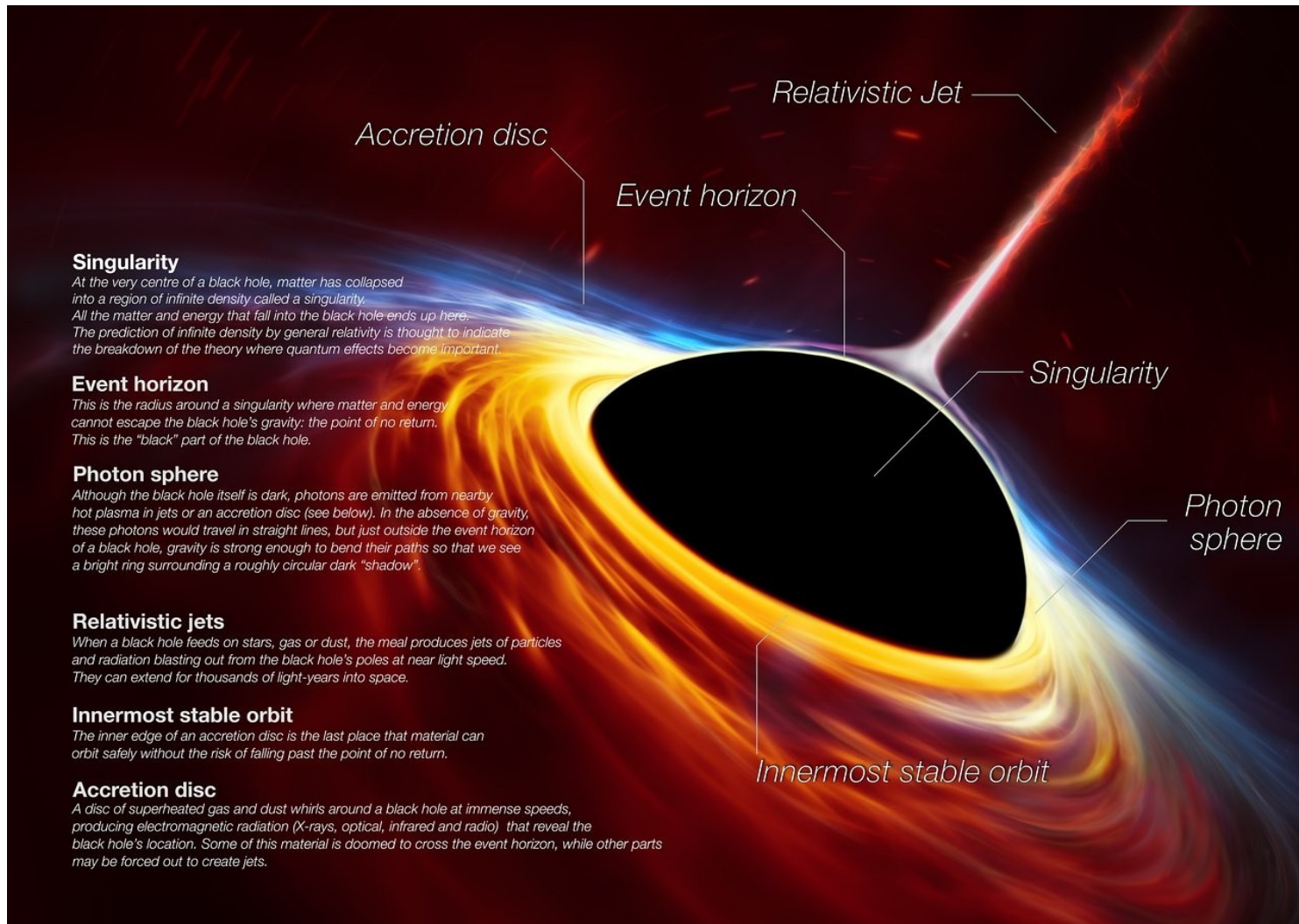
Dentro de um limite chamado **Limite Estático**, esta **rotação** do **Espaço-Tempo** é tão **forte**, que **nada** consegue ficar “**parado**”. **Tudo é forçado a girar junto** com o Buraco Negro, “**frame dragging**”.

Entre o **Horizonte de Eventos** e o **Limite Estático** há uma região chamada **Ergosfera**, ainda fora do “limite sem retorno”, mas dentro da região “sem escapar da rotação”



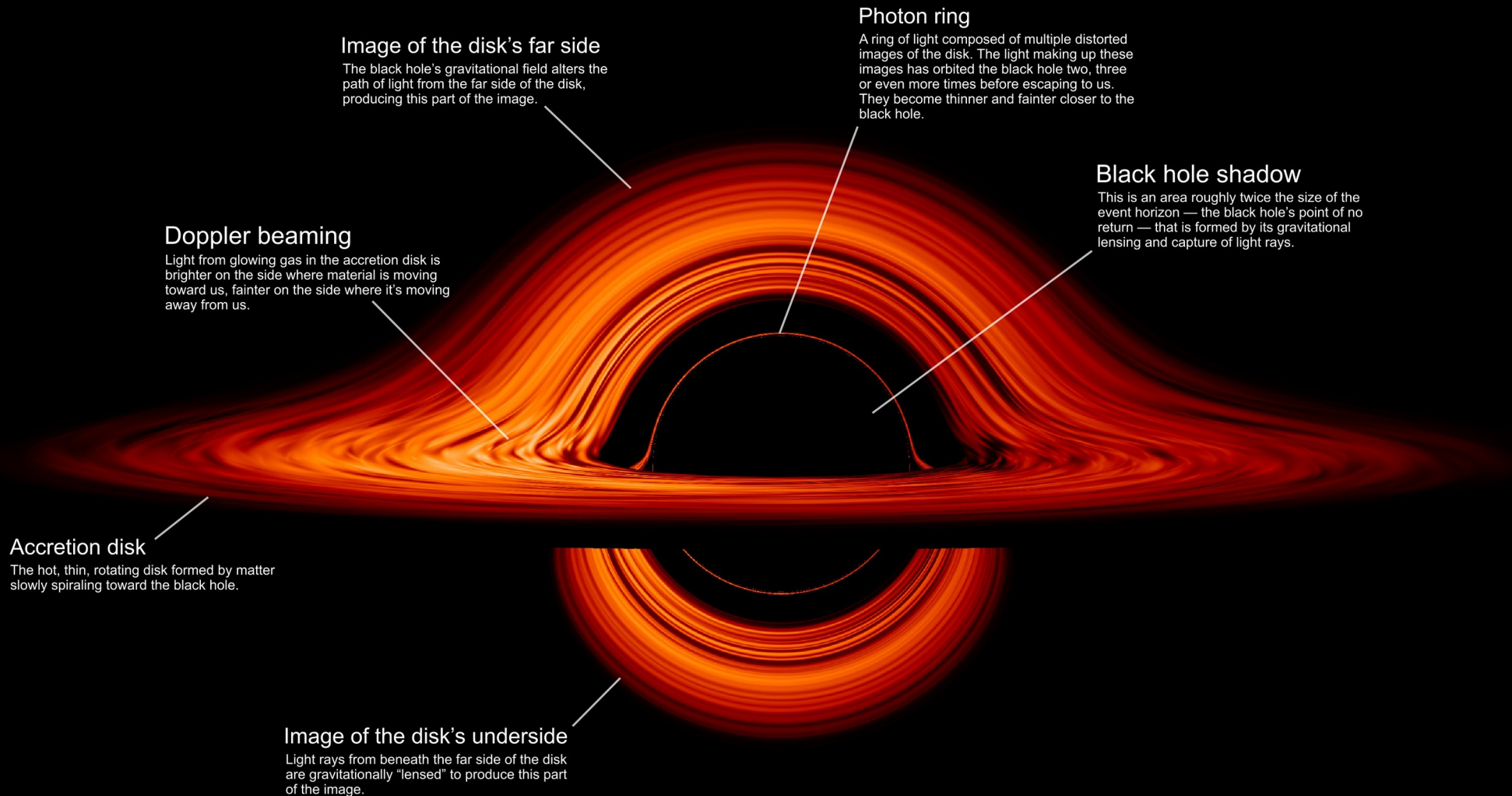
Buracos Negros

Anatomia de Buracos Negros em Rotação



Buracos Negros

Simulação

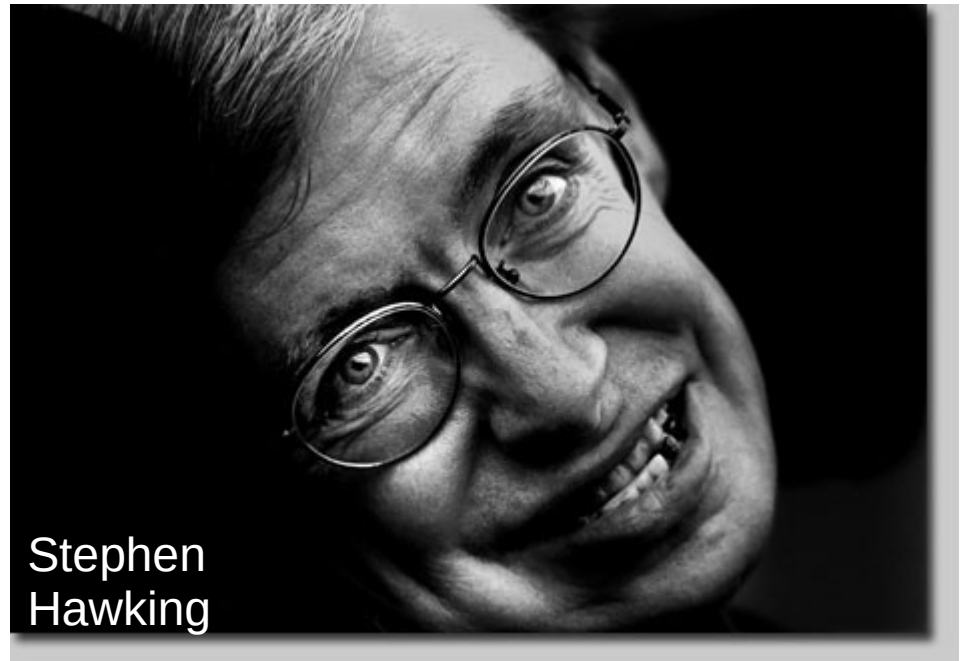


Buracos Negros

Radiação de Hawking

Classicamente, um **Buraco Negro**, uma vez formado, só pode **crescer** e deveria **existir por sempre**, como provado por **Stephen Hawking**.

Porém, o mesmo Stephen Hawking encontrou um **mecanismo quântico** que **possibilita a evaporação de Buracos Negros**, a **Radiação de Hawking**.



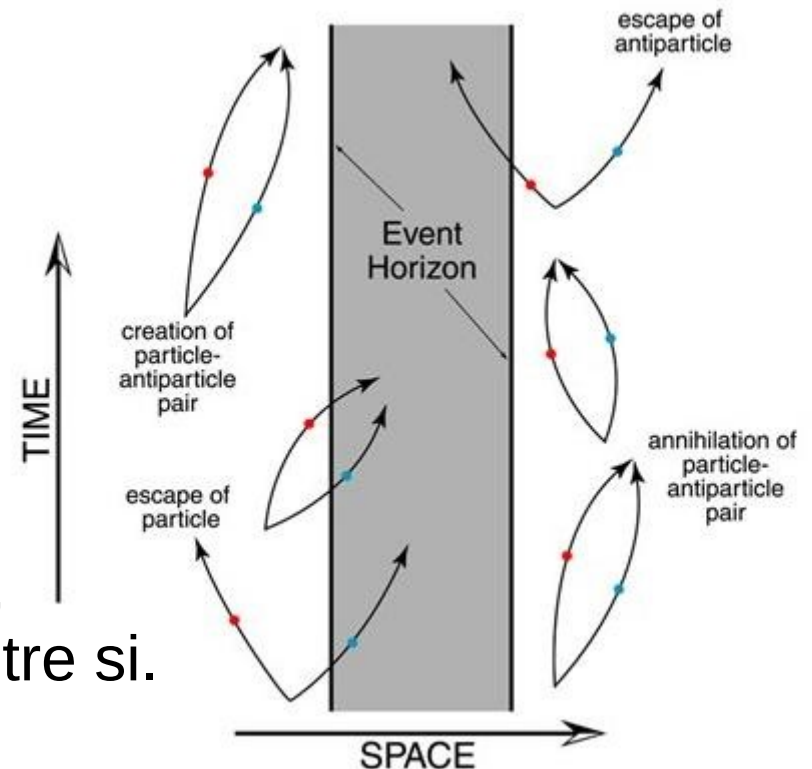
Stephen
Hawking

Buracos Negros

Radiação de Hawking

Segundo ele, **pares de partícula-antipartícula** podem se **formar perto do Horizonte de Eventos** de um Buraco Negro, “**emprestando**” **energia gravitacional** do Buraco.

Esta energia é **devolvida** logo depois, quando as **partículas** se **aniquilam** entre si.



Mas de vez em quando pode ser que uma das partículas **cai no Buraco Negro** antes de se **aniquilar** com o seu parceiro.

O parceiro pode **escapar**, levando junto parte da **energia** “**emprestada**”.

=> O **Buraco Negro** **perde energia**, quer dizer, **massa**.

=> Ele **encolhe**.

Buracos Negros

Radiação de Hawking

A **perda de massa** é proporcional a M^{-2} , de modo que para **Buracos Negros de alta massa**, ela é muito **lenta**:

O tempo de vida de um Buraco Negro antes da sua evaporação é (h = constante de Planck):

$$t_{\text{evap}} = 2560 \cdot \pi^2 \cdot (2GM/c^2)^2 \cdot (M/h) \approx 2 \cdot 10^{67} (M/M_{\odot})^3 \text{ anos}$$

=> um Buraco Negro de uma massa solar levaria 10^{67} anos para evaporar.

Mas um hipotético **Buraco Negro primordial** de inicialmente $\sim 10^{11}$ kg chegaria no seu fim mais ou menos **hoje**.

A **última erupção** seria mais **energética**, emitindo uns 10^{13} W em raios γ , e^- , e^+ e outras partículas.

A **radiação γ** de uma **erupção** destas poderia ser **detectável** (mas não foi detectada ainda).

Buracos Negros

Que Tipos de Buracos Negros existem?
(isto é, se eles existem)

Acredita-se que existem Buraco Negros

- **de Massas Estelares**, com massas de 3 a $15 M_{\odot}$, resultados do **colapso** de **caroços** de **estrelas de alta massa** (=> Aulas Evolução Estelar, Supernovas e Estrelas de Nêutrons),
- **de Massas Intermediárias**, $100 - 10\,000 M_{\odot}$, provavelmente encontrados como **fontes ultraluminosas de raios X** nos **centros** de alguns **aglomerados globulares** e **galáxias anãs**,

Buracos Negros

Que Tipos de Buracos Negros existem?

- **Supermaciços** (ou supermassivos), de centenas de milhares a bilhões M_{\odot} , nos **centros** de **galáxias**, e

- **Primordiais**, 10^{-8} kg - $100\,000 M_{\odot}$, formados nos **primeiros instantes** do **Universo**.

Não foram **detectados** ainda, talvez poderão ser detectados pela **radiação de Hawking** no hora de eles **darem seu último suspiro**.

Evidências para Buracos Negros

Existe **prova** que os **Buracos Negros estelares** existem?

Foram encontrados alguns **sistemas binários**, similar àqueles contendo uma Anã Branca ou uma Estrela de Nêutrons,

onde dá para determinar a **massa** do **componente “invisível”** através do seu **efeito** sobre o **componente visível** (Leis de Kepler), e um limite superior para o seu **raio** através da radiação nos **raios X** emitida pelo **disco de acreção**.

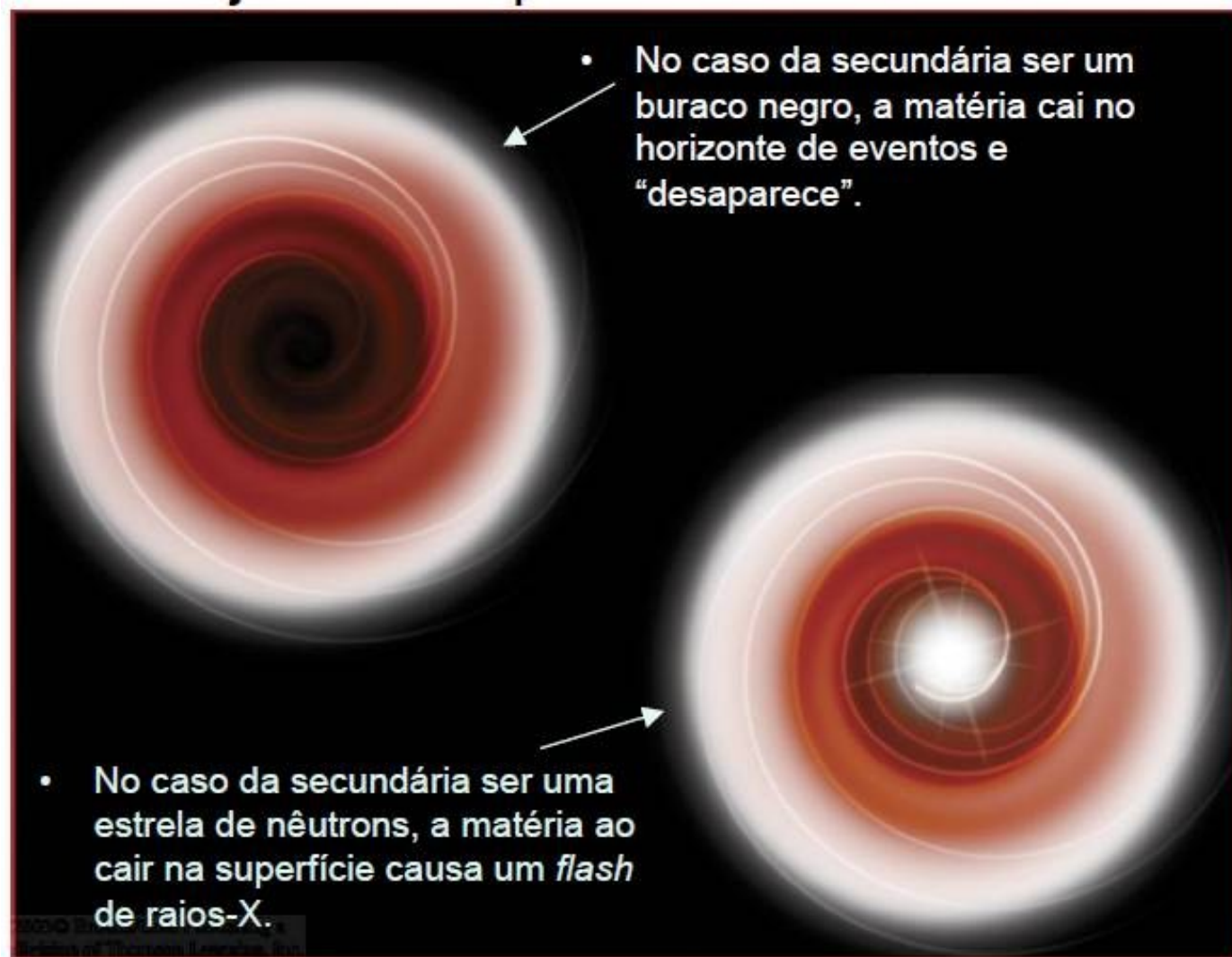


Cygnus X-1 (interpretação artística)

Evidências para Buracos Negros

Além disso, se o **componente invisível** é um **Buraco Negro** não acontece um **surto de raios X** (ou γ).

Só há a emissão em raios X do disco de acreção, que não ocorre em surtos.



Evidências para Buracos Negros

Em Cygnus X-1, LMC X-3 e V404 Cyg e outros encontra-se

massas maiores que $3 M_{\odot}$:

Cygnus X-1: $10 M_{\odot}$,

V404 Cyg: $12 M_{\odot}$,

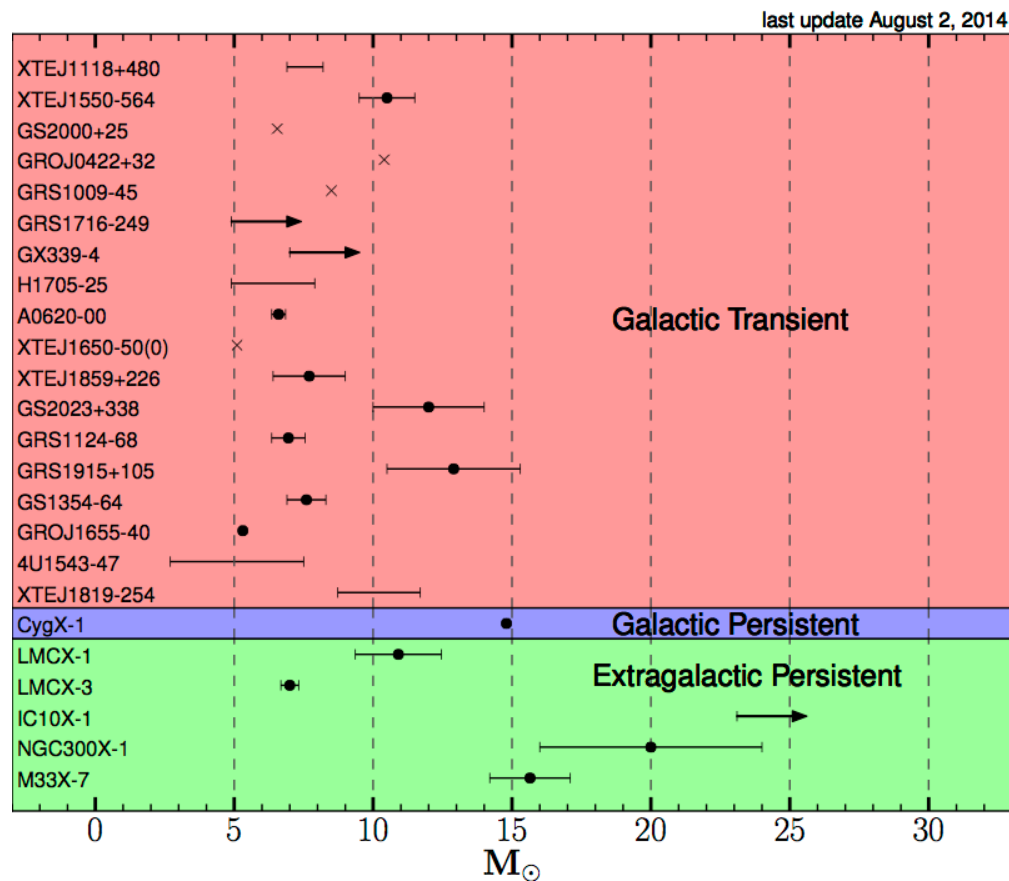
etc.

Já que a **massa limite** para **Estrelas de Nêutrons**

é entre 2.2 e $2.9 M_{\odot}$,

estas “estrelas” invisíveis e compactas devem ser **objetos mais massivos e densos** ainda.

=> **Buracos Negros**



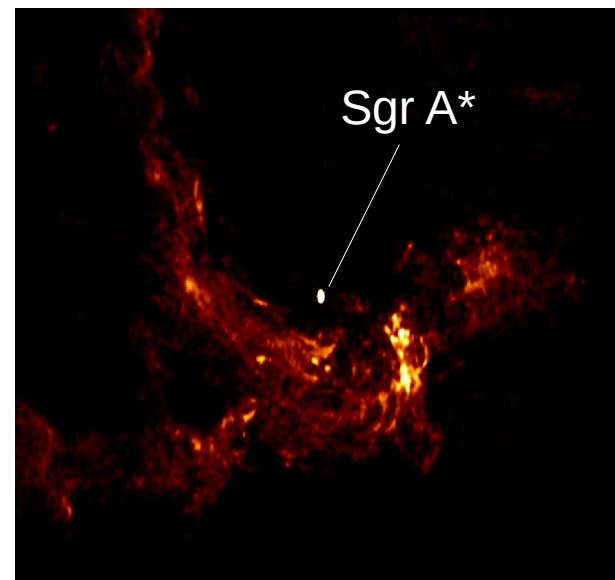
Evidências para Buracos Negros

E dos Supermaciços?

Imagens da região central da Via Láctea revelam uma **fonte pontiforme** de **radiação** em **rádio** forte, **Sagitário A*** (Sgr A*), que coincide com o **centro** de uma **fonte** misteriosa de **radiação infravermelha** chamada **IRS 16**, e com uma **fonte** pequena (≤ 0.1 pc) de **raios X**.

Ao contrário de outros objetos na região central da Via Láctea, Sgr A* **não** se **movimenta**.

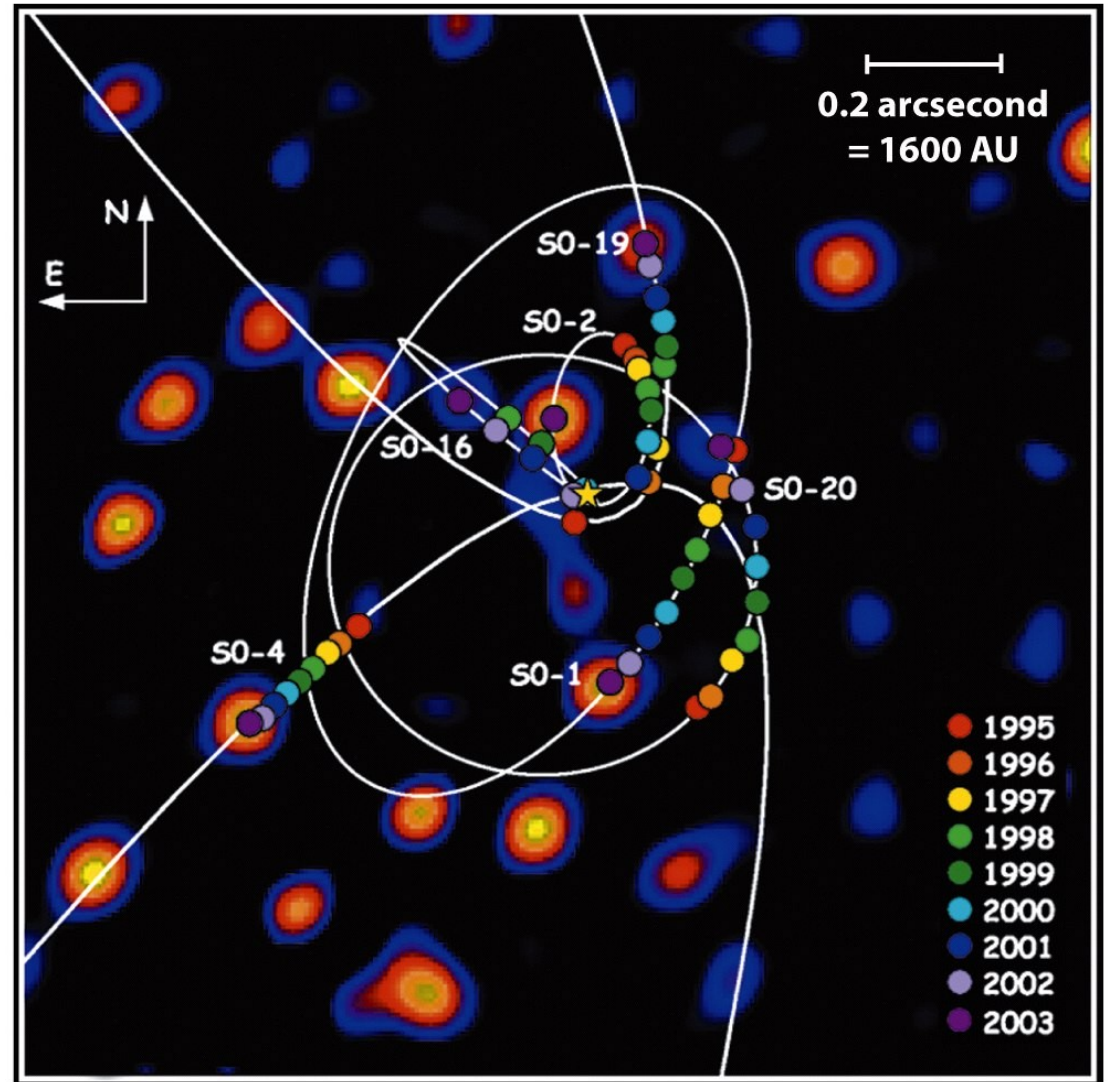
Sgr A* parece ser o verdadeiro **Centro Galáctico**.



Sagitário A Oeste

Evidências para Buracos Negros

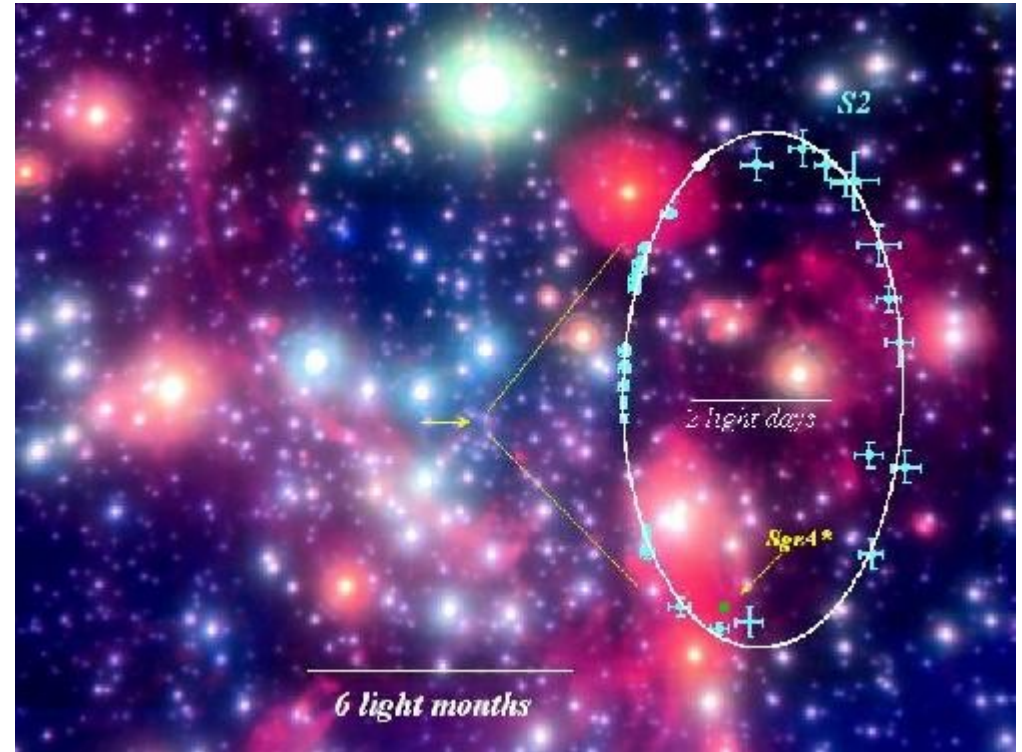
Há **estrelas orbitando**
Sgr A* (★ na imagem)
tão **rapidamente**
que dá pra **observar**
o **movimento**.



<https://www.youtube.com/watch?v=DRCD-zx5QFA>

Evidências para Buracos Negros

A estrela mais próxima do Centro Galáctico, S2, orbita Sgr A* em apenas **15.2 anos**, chegando a **120 AU** do **Centro**, órbita só poucas vezes a de Plutão em torno do Sol!

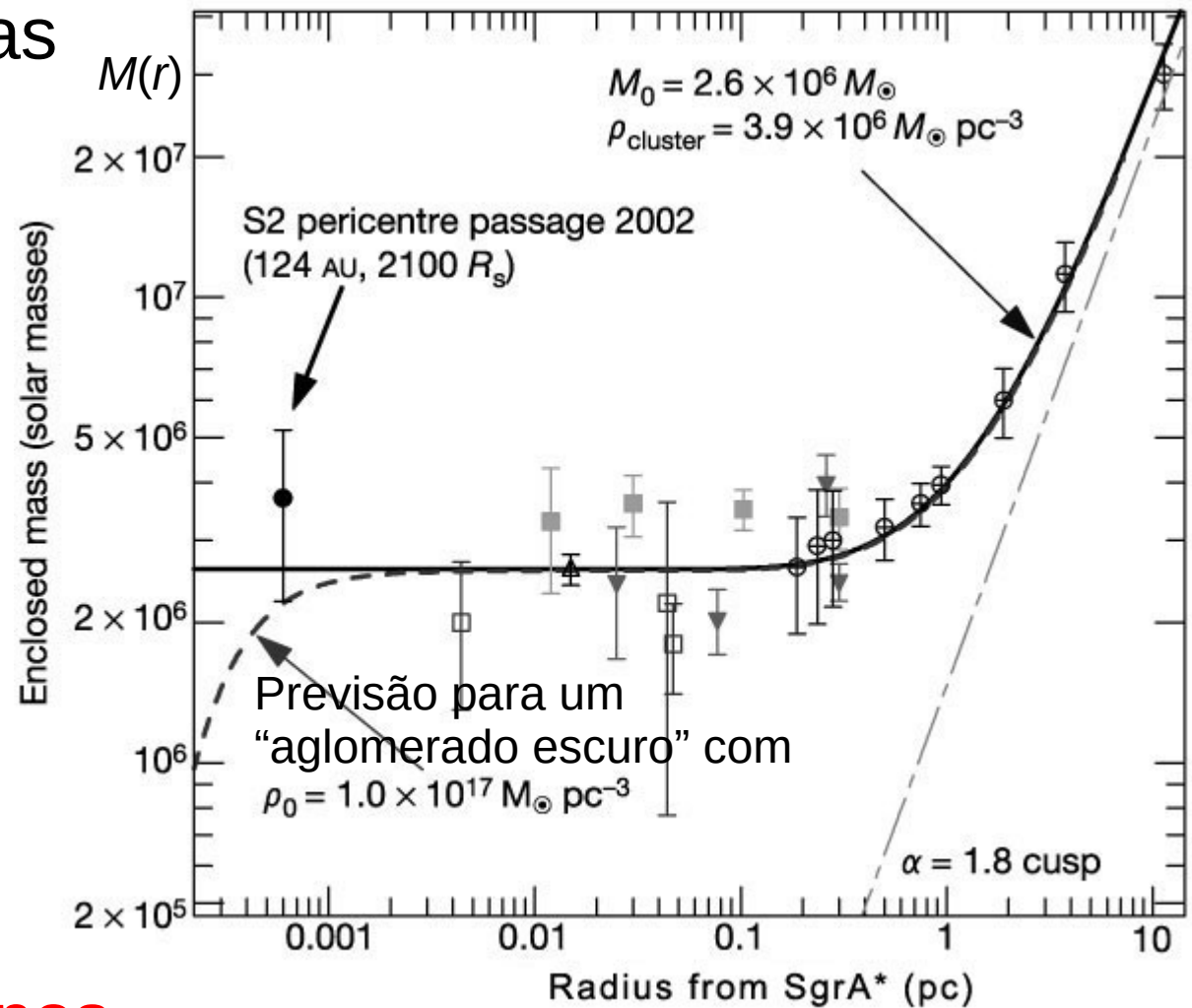


Evidências para Buracos Negros

Usando estas estrelas podemos fazer uma **curva de rotação**, e uma da **massa contida**, M_r prop. $v(r)^2$, do **parsec central** da **Via Láctea**.

De 0.2 pc para 0.0006 pc, M_r **não diminui**.

=> Nos **120 AU internos** da **Galáxia** se concentra uma **massa de 3.7 mio. M_\odot** .



Evidências para Buracos Negros

O que é, então, esta fonte, com **raio** de **no máximo 120 AU**, **massa** de **3.7 mio. M_{\odot}** , e que emite relativamente **pouca radiação** ($\leq 10^4 L_{\odot}$)?

Será que é um **aglomerado denso** de **estrelas** de **baixa luminosidade** (Anãs Marrons / Estrelas de Nêutrons)?

Umas estrelas seriam ejetados dentro de 10^8 anos, outras colidiriam => **instável**.

A única explicação que conhecemos para um objeto tão denso e escuro é um **Buraco Negro Supermaciço**, em contraste aos **Buracos Negros Estelares** formados na morte de estrelas, de massas bem menores.

Evidências para Buracos Negros

O **Raio de Schwarzschild** de um Buraco Negro desta massa é

$$R_{\text{Sgr A}^*} = 2GM_{\text{Sgr A}^*}/c^2 = 0.08 \text{ AU},$$

ainda **menor** que a **resolução** observacional de 2 AU da imagem em rádio.

Calculando a **energia potencial gravitacional liberada** por **material** de massa M sendo **acretado** por esta massa (caindo da distância r_i até a distância r_f do centro da massa):

$$E = GM_{\text{Sgr A}^*}M/r_f - GM_{\text{Sgr A}^*}M/r_i = GM_{\text{Sgr A}^*}M(1/r_f - 1/r_i)$$

supondo $r_f = R_{\text{Sgr A}^*}$ e $r_i \gg r_f$:

$$E = GM_{\text{Sgr A}^*}M/R_{\text{Sgr A}^*} = GM_{\text{Sgr A}^*}Mc^2/2GM_{\text{Sgr A}^*} = 1/2Mc^2$$

Evidências para Buracos Negros

Levando em conta que metade desta energia é usada para aquecer o disco de acreção (teorema do virial), obtemos para uma **acrecção** à **taxa** \dot{M} uma **luminosidade máxima** de:

$$L_{\max} = \frac{1}{2} \cdot dE/dt = \frac{1}{2} \cdot d[\frac{1}{2}Mc^2]/dt = \frac{1}{4} \cdot \dot{M}c^2$$

Para uma taxa \dot{M} de 10^{-3} a $10^{-2} M_{\odot}$ por ano, L_{\max} é da ordem de $10^{10} L_{\odot}$ e mais que **explica** a **radiação** vinda de **Sgr A***.

=> A explicação **Buraco Negro Supermaciço no Centro da Via Láctea** funciona (e é a única que conhecemos).

Evidências para Buracos Negros

De vez em quando deve cair uma **estrela** dentro do Buraco Negro, sendo destruída no caminho por **forças de maré**, e **aumentando** a **luminosidade** de **Sgr A*** por **poucos anos**.

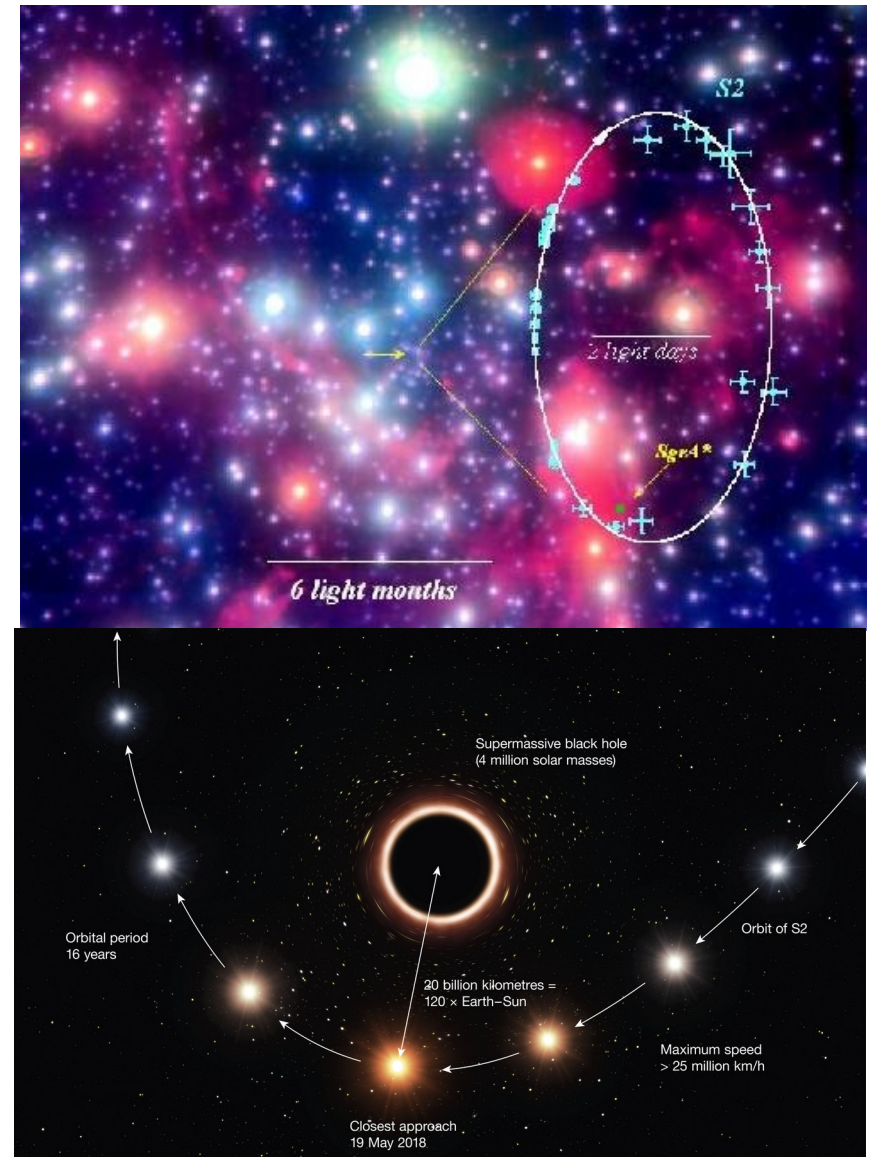
Em 2018, o instrumento GRAVITY da ESO detectou muitas de gás rodando a ~30% a velocidade da luz numa órbita circular rente ao horizonte de eventos de Sgr A*.



Simulação de material orbitando perto de um Buraco Negro

Evidências para Buracos Negros

Outra dica, de que se trata de um Buraco Negro, também vem de **S2** (aquela estrela que passa muito próximo do Centro Galáctico):
Em 2018 observaram, também com o instrumento GRAVITY, no espectro desta estrela o **redshift gravitacional** e em 2020, a **precessão do perigalácticon** da sua órbita (fenômenos vistos na aula Relatividade).



Evidências para Buracos Negros

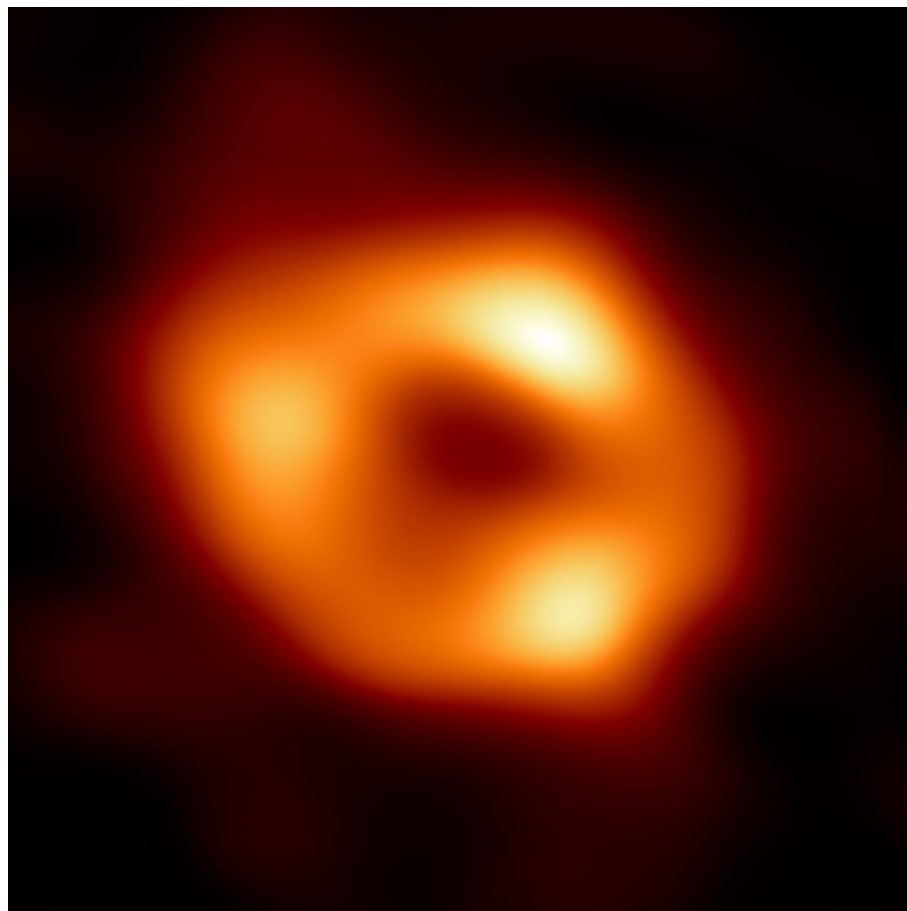
12/05/2022:

Publicada a “foto” (imagem em rádio) do **disco de acreção** em torno de Sgr A* pelo *Event Horizon Telescope* (EHT), uma rede de Antenas de radiação em rádio estendendo-se pela Terra inteira:

- tirada em 2017 (5 anos de processamento de dados)

- **diâmetro**: $\sim 50 \mu'' \Rightarrow \frac{1}{3} \text{ AU}$, descartando ainda mais

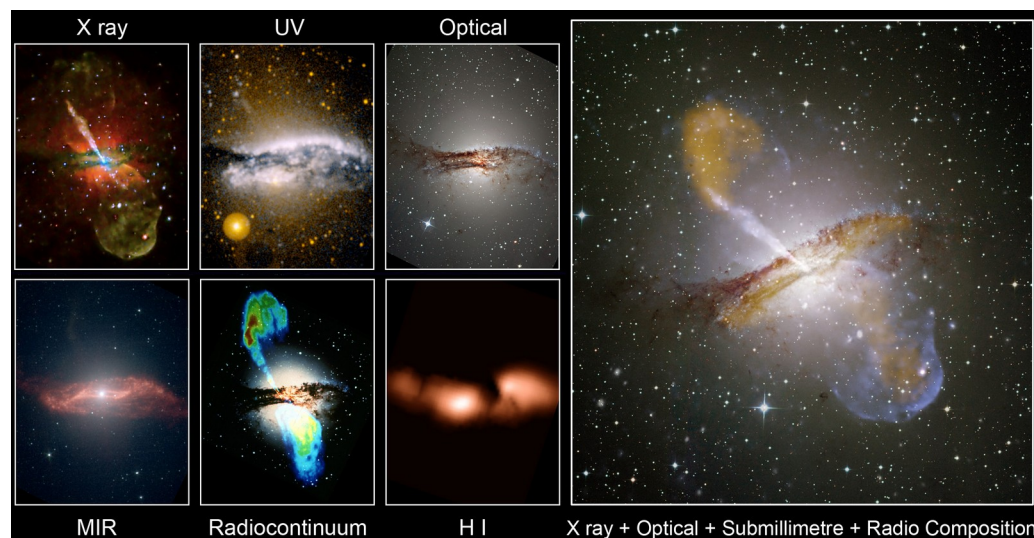
possibilidades outras que um **Buraco Negro**.



Evidências para Buracos Negros

E em outras galáxias?

Há **galáxias** mostrando sinais de **atividade violenta** em várias partes do espectro, chamadas **Galáxias Ativas**.



Centaurus A em várias faixas espectrais

A atividade provém dos seus **núcleos**, chamados **AGNs** (ingl. *Active Galactic Nuclei*).

Mais precisamente, de uma região tão pequena que parece uma estrela em telescópios, tal que também foram chamados de **Quasares** (*QUAsi-StellAr Radio sources*) ou QSRs ou **QSOs** (*Quasi-Stellar Objects*).

Evidências para Buracos Negros

O tamanho pequeno também é evidenciado pelas **variações rápidas** da **emissão** em **várias faixas espectrais**, revelando tamanhos de **poucos AU**, da ordem do **raio de Schwarzschild** pra **massa necessária** para explicar a **emissão** desta região pelo cálculo do **limite de Eddington**, algumas **$10^8 M_{\odot}$** .



Interpretação artística de um quasar

=> A **fonte de energia** deve ser **acrecção** num **Buraco Negro!**

Evidências para Buracos Negros

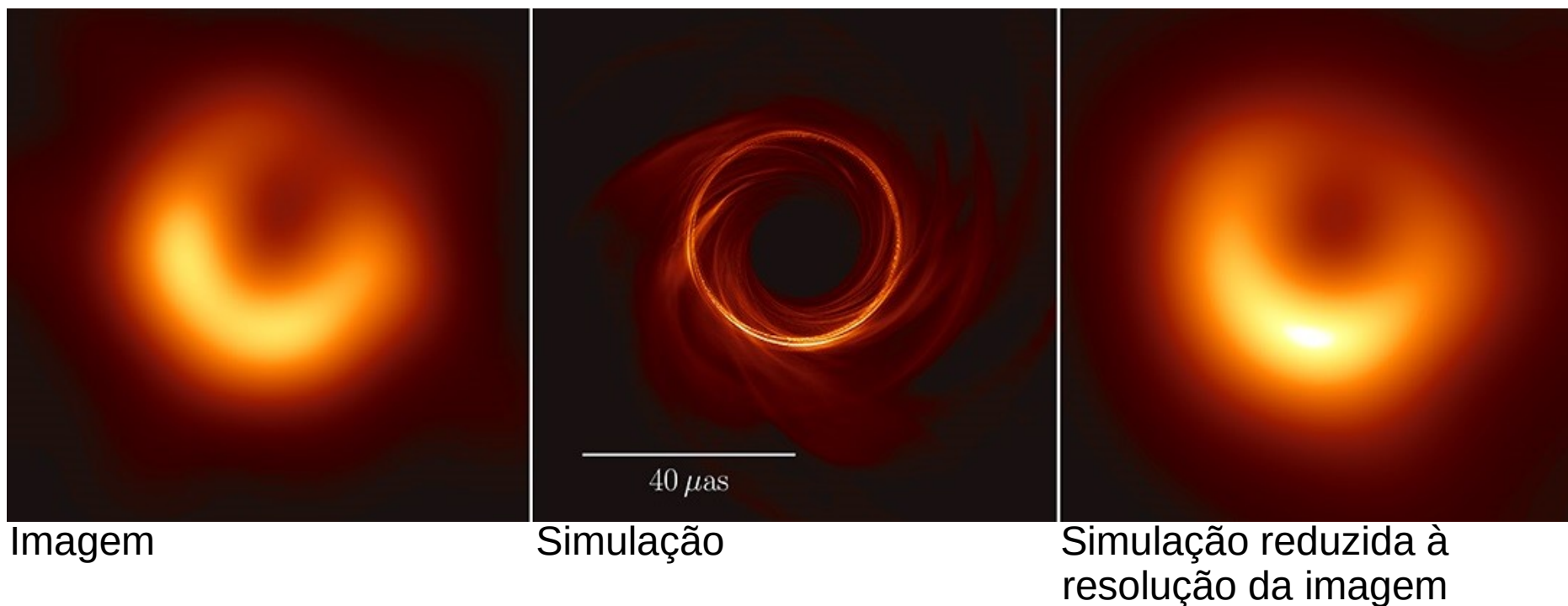


Em 04/2019 foi publicada, também pelo EHT, a primeira “**imagem** direta” do **Buraco Negro central** de uma **galáxia ativa**, melhor: do **disco de acreção** e da falta de emissão no meio, do BN central da **galáxia central** do **aglomerado** de **galáxias** de **Virgo, M87**.

A 16.4 Mpc da Terra, o Buraco Negro tem $\sim 6.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$, um raio de Schwarzschild de ~ 0.0006 pc = 120 AU, e está acretando $\sim 0.1 M_{\odot}$ /ano.

A sua “sombra” vista na imagem é ~ 0.0015 pc.

Evidências para Buracos Negros



Simulações do **disco** de **acrecção** **reproduzem** bem a **imagem**. A parte inferior do “anel” está indo na nossa direção e parece mais brilhante por **colimação relativística**.

Mais sobre Sgr A* e quasares na disciplina
Noções de Astronomia e Cosmologia.



Universidade Federal do ABC

Introdução à Física Estelar

FIM PRA HOJE

