



# Mestrado Profissional em Ensino de Física

Rio de Janeiro, RJ –  
28/05/2019



## BURACOS NEGROS

DAS ESTRELAS NEGRAS À OBSERVAÇÃO DIRETA

Carlos A. D. Zarro (IF-UFRJ)

# MOTIVAÇÃO



☰ MENU

G1

CIÊNCIA E SAÚDE

03/10/2015 05h00 - Atualizado em 03/10/2015 08h32

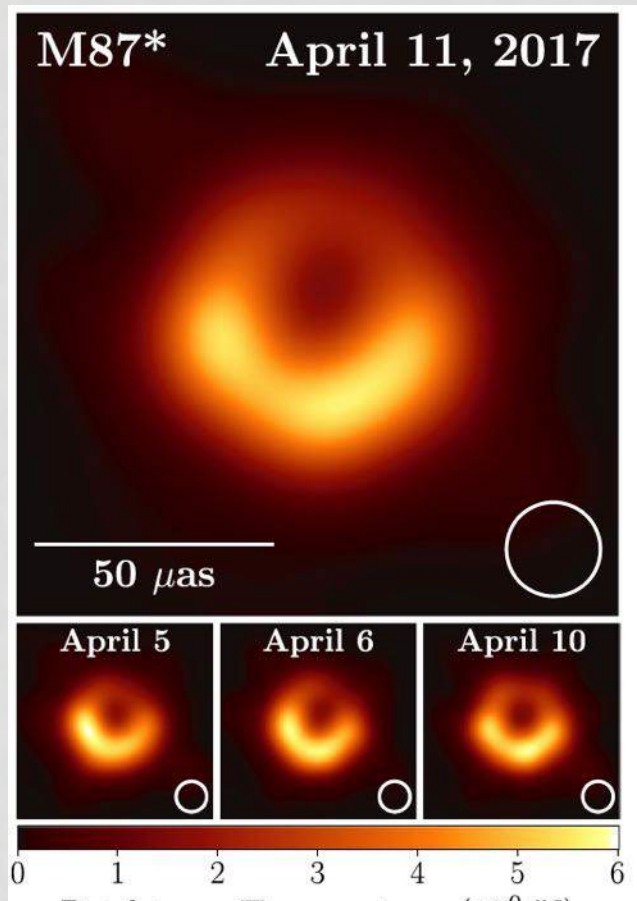
BBC BRASIL

## Superburaco negro põe em xeque teoria da evolução galáctica

Buraco negro é 350 milhões de vezes maior que o Sol e fica a dois bilhões de anos-luz da Terra.



# MOTIVAÇÃO



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

**BBC** Sign in News Sport Weather Shop Reel T

## NEWS

Home Video World UK Business Tech Science Stories Entertainment

### Science & Environment

# First ever black hole image released

By Pallab Ghosh  
Science correspondent, BBC News

🕒 10 April 2019

## Primeira foto de um buraco negro: um dia histórico para a ciência

Centenas de cientistas e pesquisadores e oito telescópios participaram do trabalho para divulgação da imagem

10/04/2019 - 17H31 / ATUALIZADO 17H31 / POR REDAÇÃO GALILEU

# ESTRELAS NEGRAS (SÉCULO XVIII)

Em 1783, John Michell introduziu a ideia de estrela invisível



John Michell

$$v_{escape} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

$$v_{escape} > c$$

$$M = 250000M_{sol}$$

$$R = 0,5R_{sol}$$

A luz seria aprisionada!

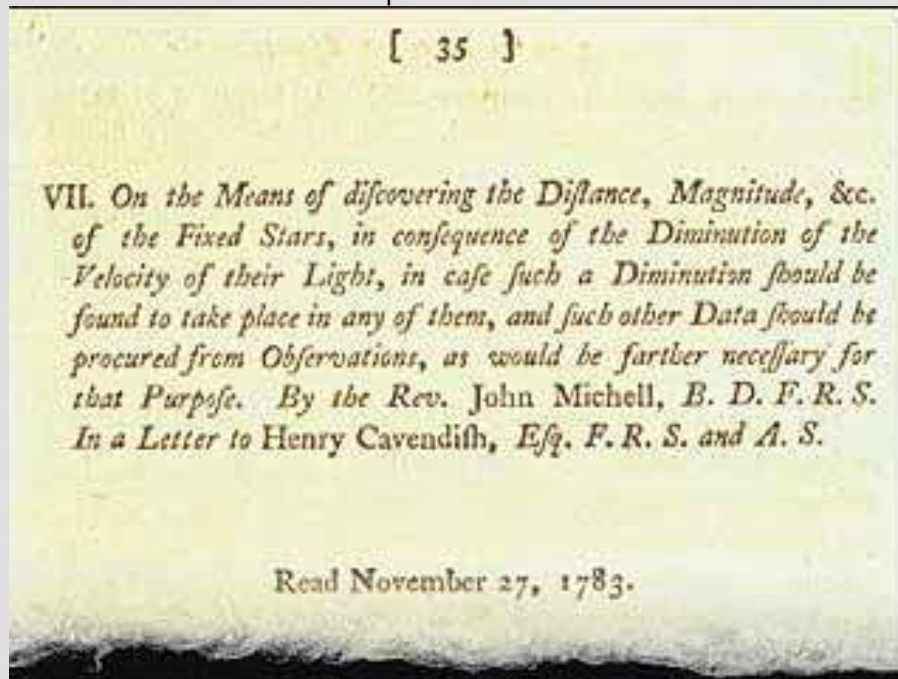
Objeto invisível!



# BURACOS NEGROS: ESTRELAS NEGRAS

- Qual deveria ser o raio de uma estrela com uma dada massa para que nem a luz consiga escapar de seu campo gravitacional?☹

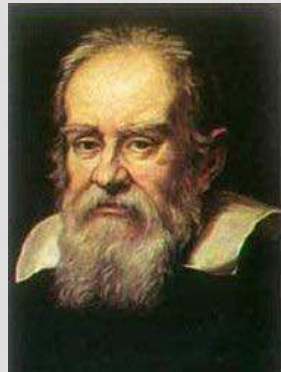
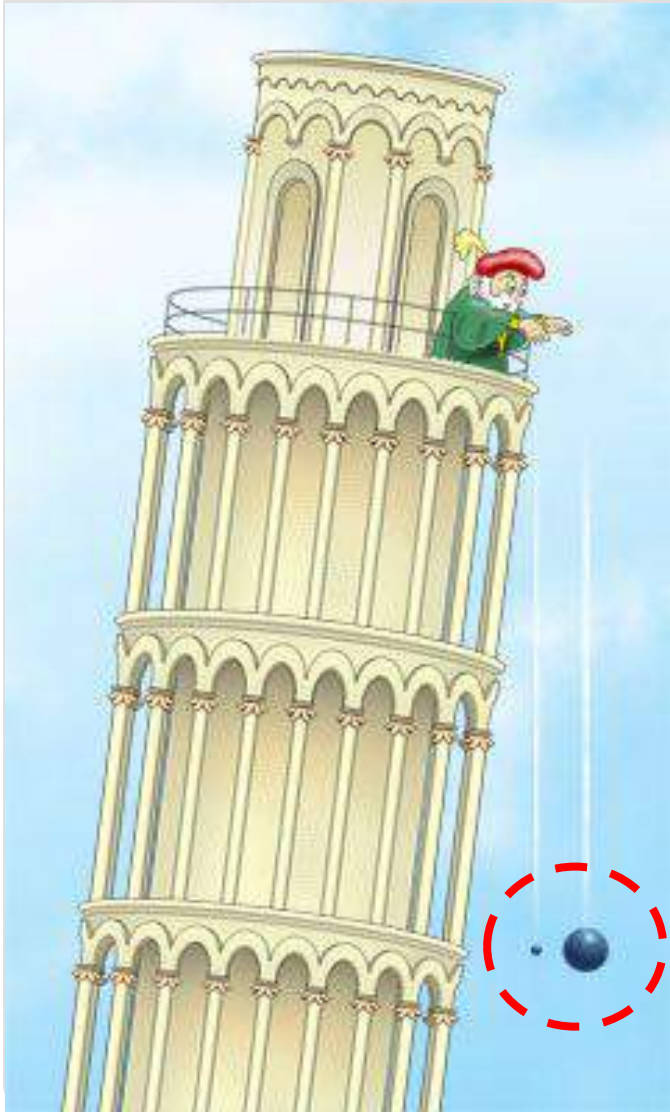
$$V_{\text{escape}}^2 = c^2 = GM/R \Rightarrow GM/c^2R = 1 \text{ (Buraco Negro)}$$



[http://www.amnh.org/education/resources/rfl/web/essaybooks/cosmic/cs\\_michell.html](http://www.amnh.org/education/resources/rfl/web/essaybooks/cosmic/cs_michell.html)

# RELATIVIDADE GERAL

## Experiência da Torre de Pisa:



Galileo Galilei

O tempo de queda dos corpos  
independe da massa



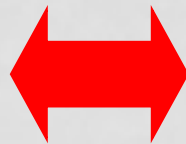
Aceleração da gravidade!

A aceleração da gravidade pode ser  
pensada como uma propriedade do  
espaço!

# RELATIVIDADE GERAL

Em 1915, Einstein publicou o tratado da relatividade geral

Campo gravitacional



Curvatura do espaço-tempo

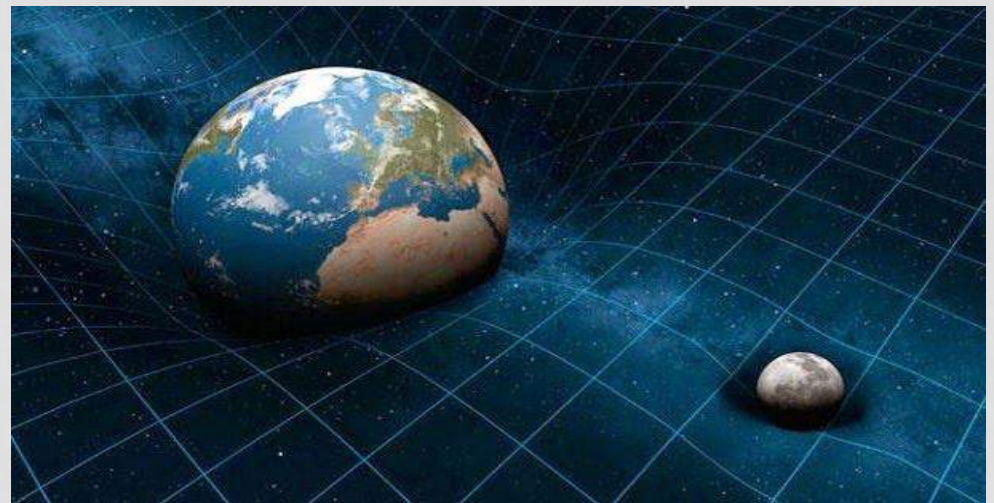
**A matéria curva o espaço-tempo!**

Como formalizar essa descrição?

Curvatura



Métrica



# RELATIVIDADE GERAL (1915)

Equação de campo:

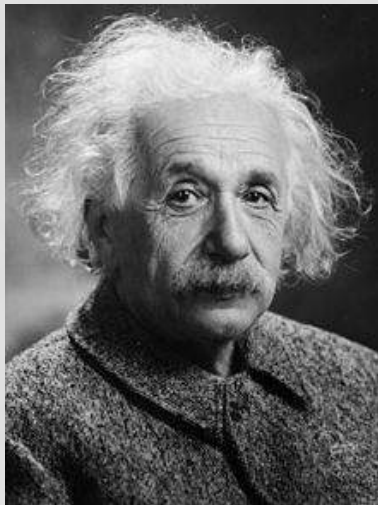
$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Tensor métrico

Tensor de Ricci

Escalar de Ricci

Tensor energia-  
momento



Albert Einstein

844 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 25. November 1915

## Die Feldgleichungen der Gravitation.

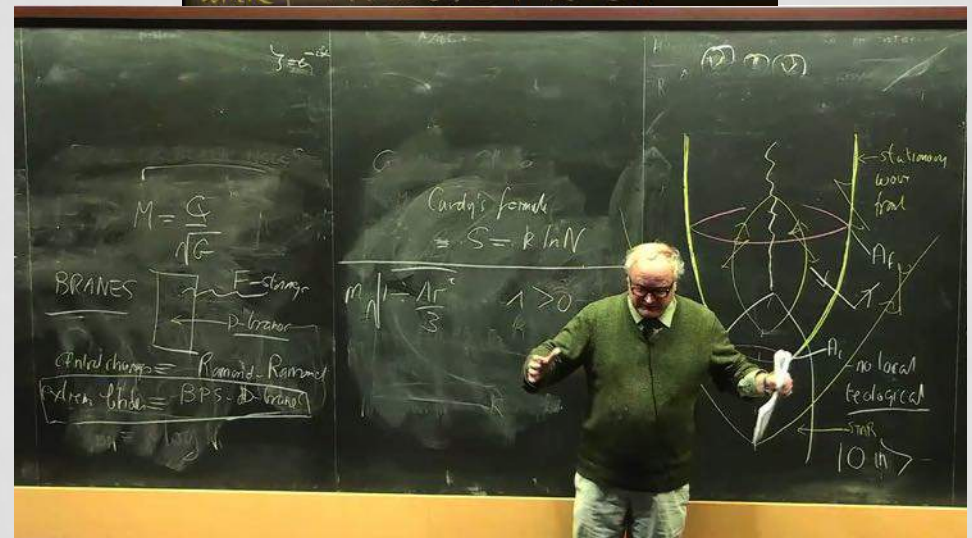
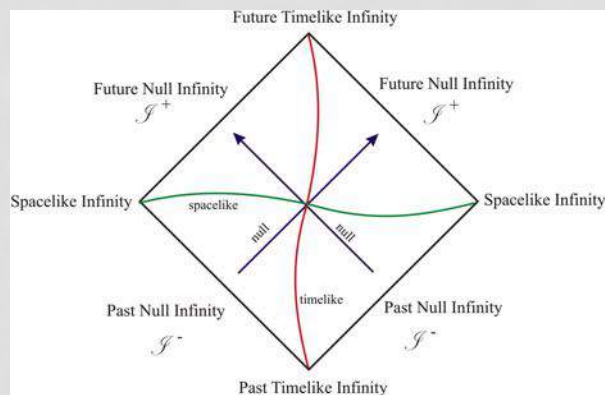
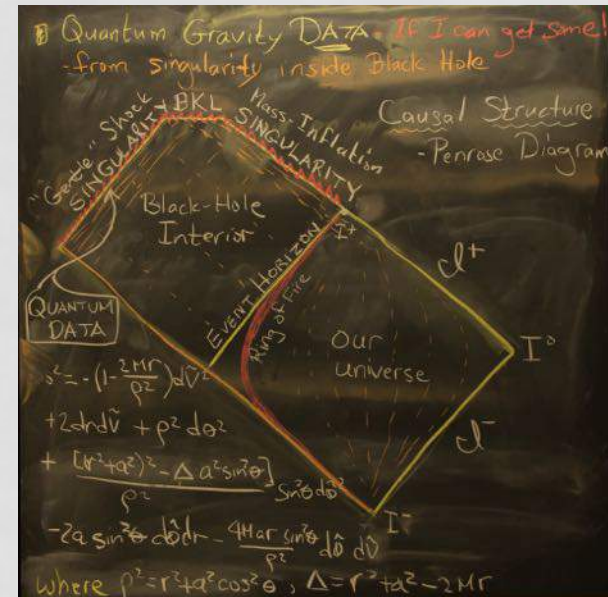
VON A. EINSTEIN.

In zwei vor kurzem erschienenen Mitteilungen<sup>1</sup> habe ich gezeigt, wie man zu Feldgleichungen der Gravitation gelangen kann, die dem Postulat allgemeiner Relativität entsprechen, d. h. die in ihrer allgemeinen Fassung beliebigen Substitutionen der Raumzeitvariablen gegenüber kovariant sind.

Der Entwicklungsgang war dabei folgender. Zunächst fand ich Gleichungen, welche die NEWTONSCHE Theorie als Näherung enthalten



# BURACOS NEGROS TEÓRICOS

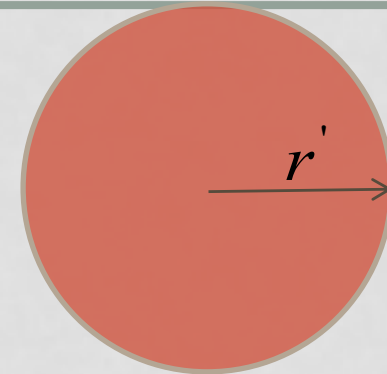


# SOLUÇÃO DE SCHWARZSCHILD (1916)

Solução das equações de campo no vácuo para fontes esfericamente simétricas.



Karl Schwarzschild



Fonte com simetria esférica

Tradução do artigo original:  
<http://arxiv.org/pdf/physics/9905030v1.pdf>

# SOLUÇÃO DE SCHWARZSCHILD (1916)

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2 - \frac{1}{1 - \frac{2m}{r}} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2$$

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

Singularidades:

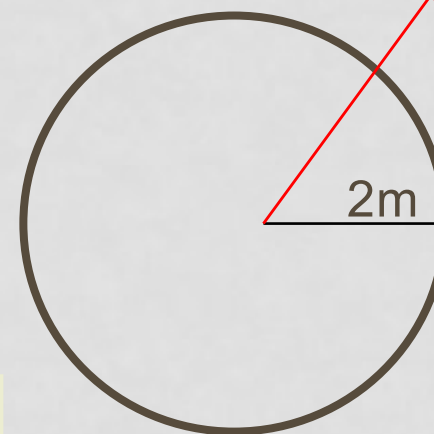
$$r = 0$$

$$r = 2m$$

É removível !

Raio de Schwarzschild:

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



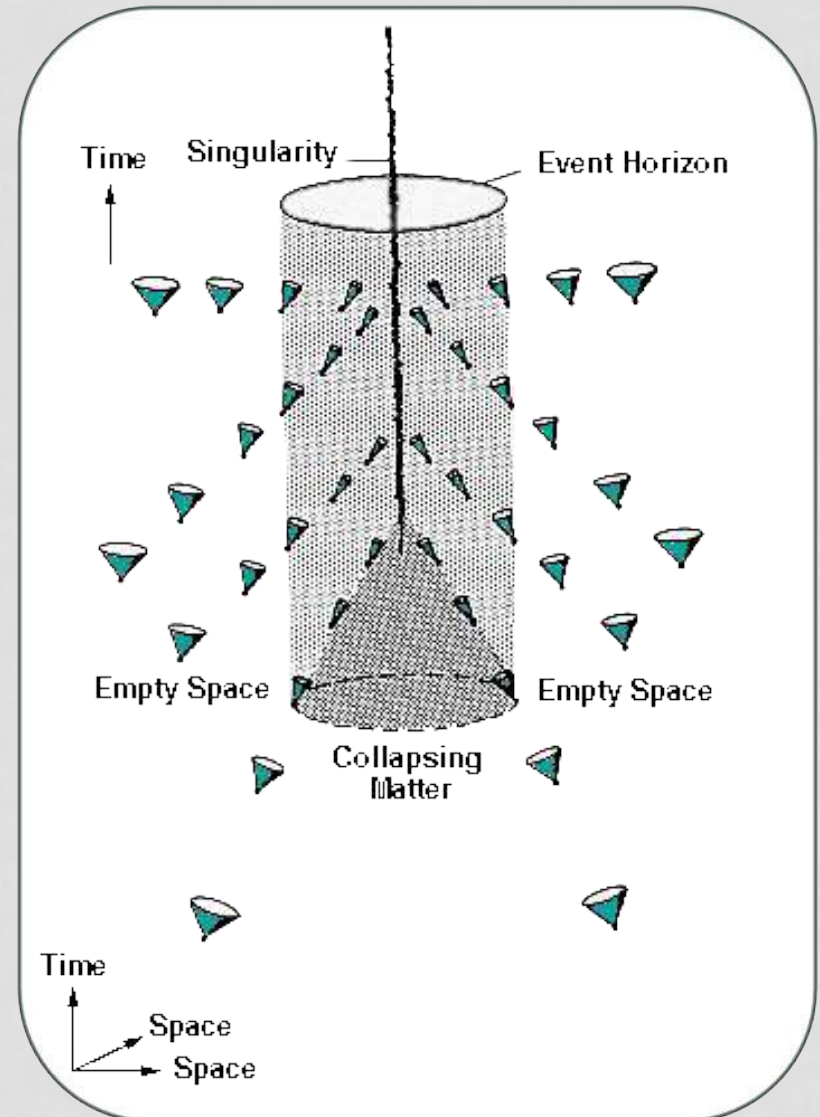
Singularidade



Horizonte de eventos

# BURACOS NEGROS – UM CAMINHO DE UMA SÓ VIA

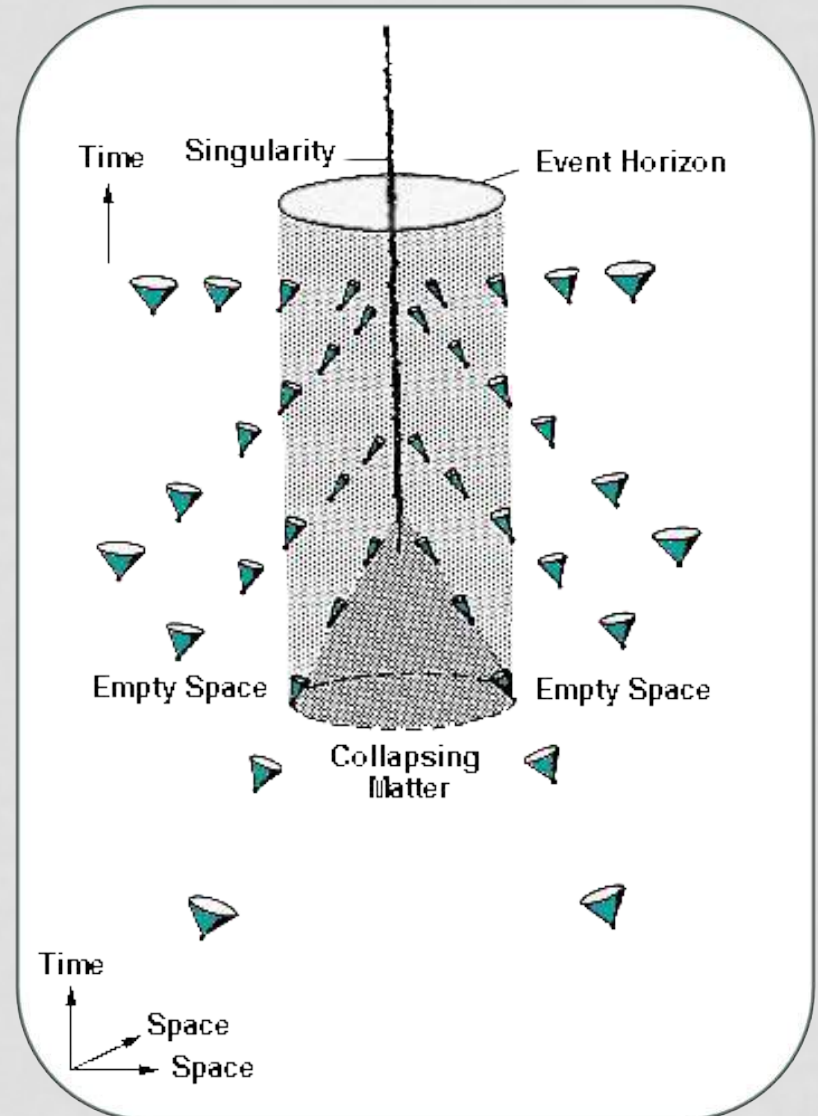
- Não temos acesso a todo o espaço-tempo!



<http://www.phy.syr.edu/courses/modules/LIGHTCONE/schwarzchild.html>

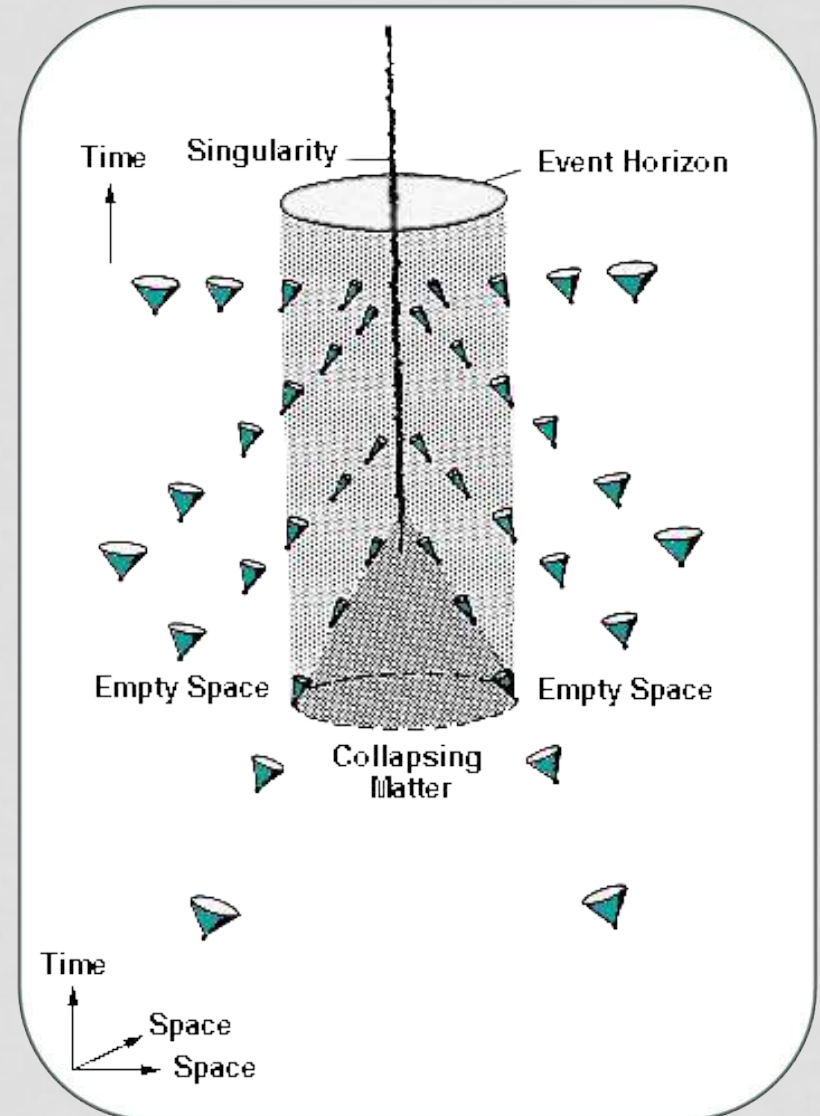
# BURACOS NEGROS – UM CAMINHO DE UMA SÓ VIA

- Não temos acesso a todo o espaço-tempo!
  - Surge um horizonte de eventos.



# BURACOS NEGROS – UM CAMINHO DE UMA SÓ VIA

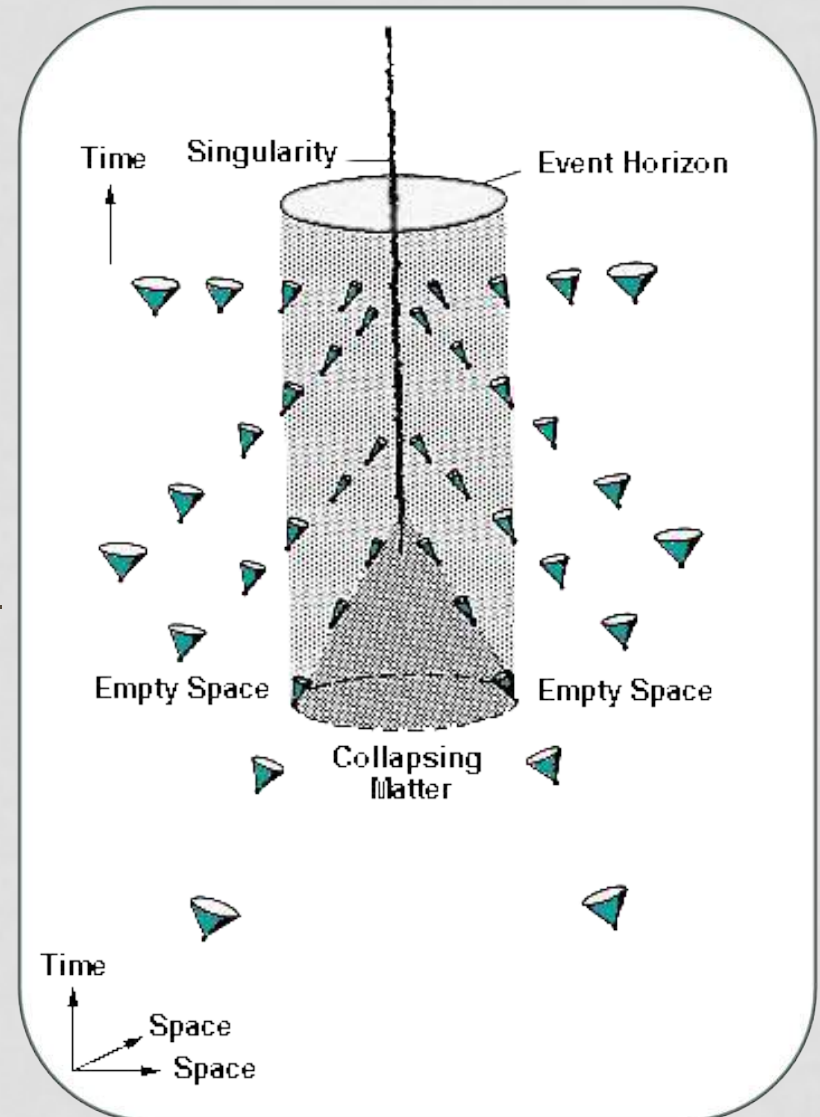
- Não temos acesso a todo o espaço-tempo!
  - Surge um horizonte de eventos.
  - Nada consegue atravessar o horizonte de dentro para fora.



# BURACOS NEGROS – UM CAMINHO DE UMA SÓ VIA

- Não temos acesso a todo o espaço-tempo!
  - Surge um horizonte de eventos.
  - Nada consegue atravessar o horizonte de dentro para fora.
- No centro do buraco negro há uma divergência na curvatura.

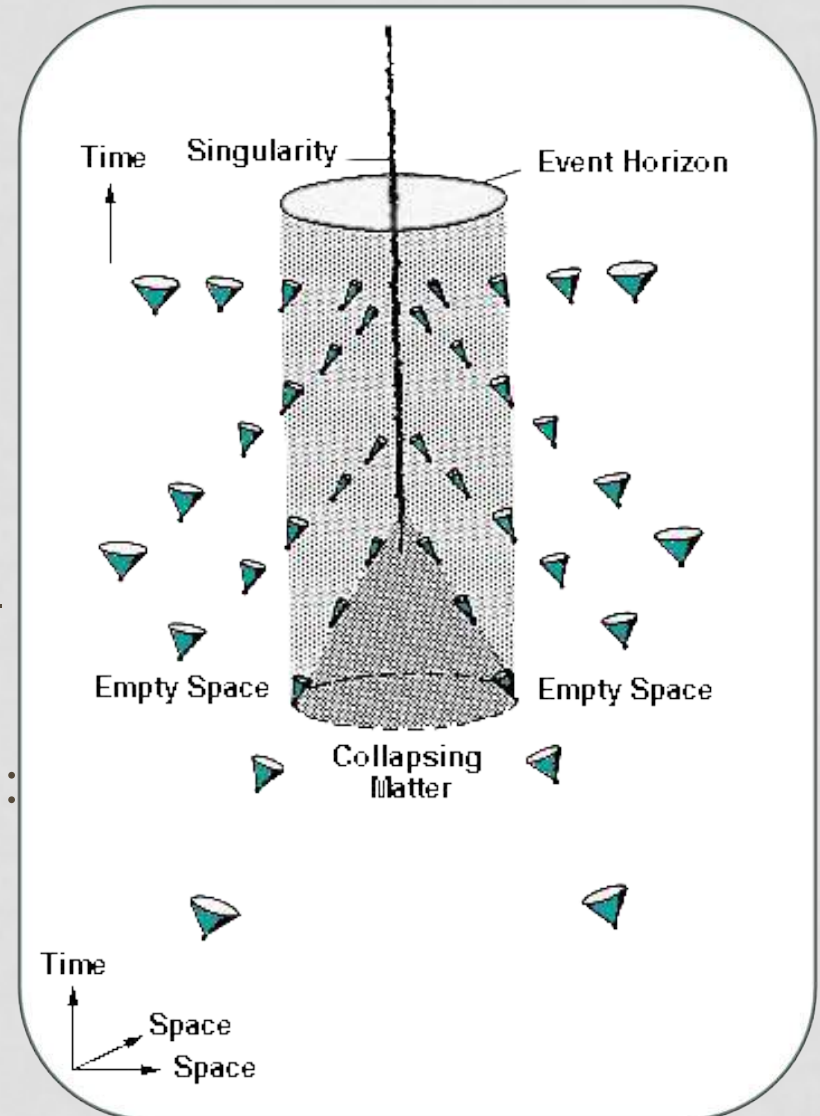
<http://www.phy.syr.edu/courses/modules/LIGHTCONE/schwarzschild.html>



# BURACOS NEGROS – UM CAMINHO DE UMA SÓ VIA

- Não temos acesso a todo o espaço-tempo!
  - Surge um horizonte de eventos.
  - Nada consegue atravessar o horizonte de dentro para fora.
- No centro do buraco negro há uma divergência na curvatura.
  - Conjectura da censura cósmica:
    - A singularidade nunca está nua.

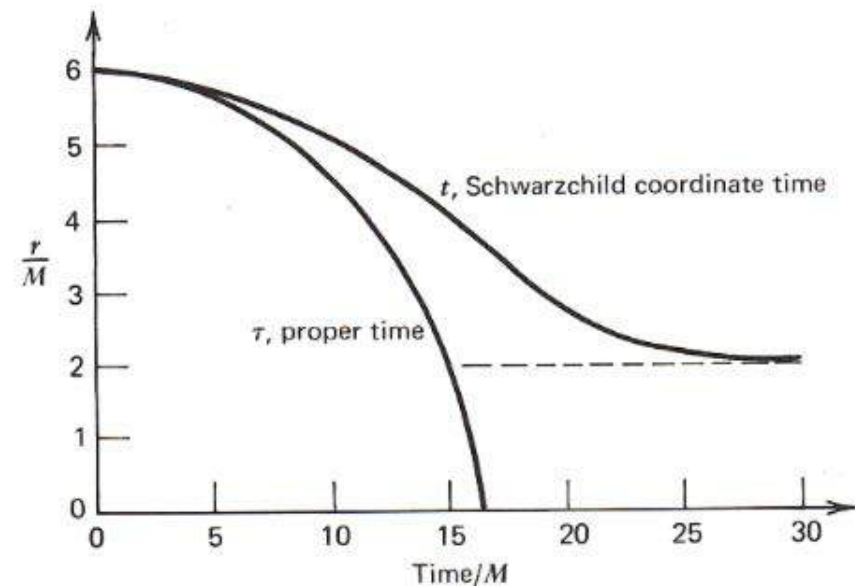
<http://www.phy.syr.edu/courses/modules/LIGHTCONE/schwarzschild.html>





# A NATUREZA DO HORIZONTE DE EVENTOS

- Horizonte de eventos são superfícies nulas.
- Os escalares de curvatura não são divergentes: **É possível remover a singularidade da métrica**
- Um observador em queda livre num buraco negro de Schwarzschild cai em tempo próprio finito dentro do horizonte!



# COORDENADAS QUE EVITAM A SINGULARIDADE EM $R=2M$

- É possível uma escolha de coordenadas que **remova** a singularidade da métrica em  $r=2m$ !
- Há **várias** possibilidades: Eddington-Filkenstein, Novikov, Tolman-LeMaître-Bondi, Painleve-Gullstrand, Kruskal-Szekers.....

- O "truque" consiste em seguir um observador em queda livre ou um raio de luz entrante (*ingoing*) no buraco negro!

144

CHAPTER IX

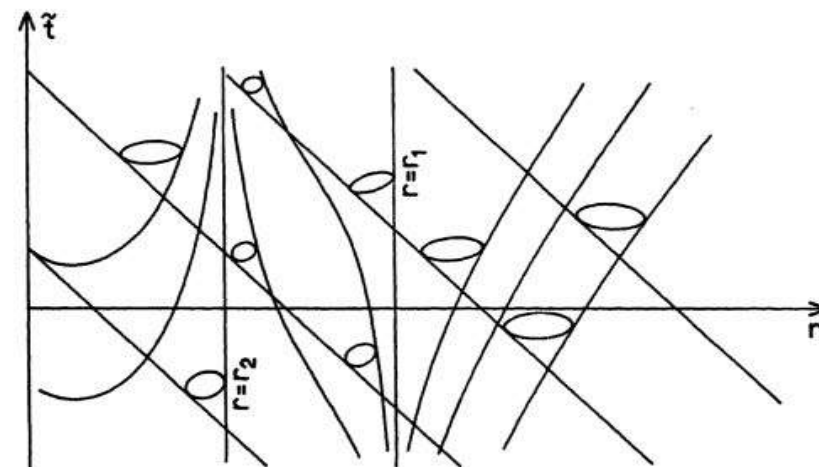
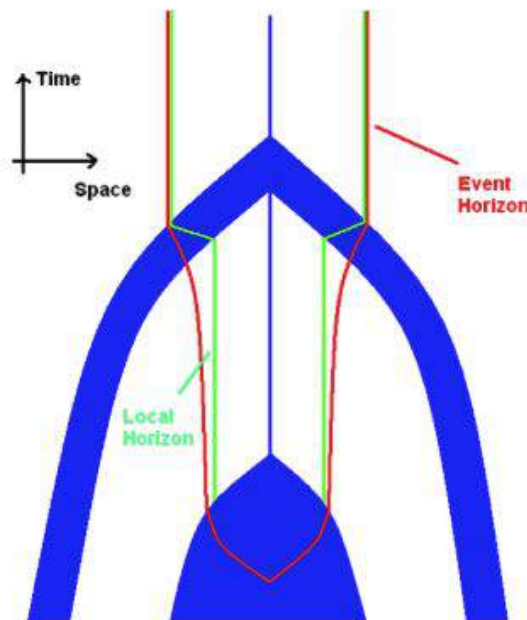


Fig. 24. Radial null geodesics and light cones of the metric (38.8).

# HORIZONTES DE EVENTOS SÃO A ÚLTIMA PALAVRA?

- A singularidade da métrica de um horizonte de eventos pode ser removida, porém
  - Eles continuam a separar duas regiões do espaço, funcionando como uma “membrana de uma via”
  - São superfícies nulas
  - O aspecto mais perturbador: **São teleológicos!!!**

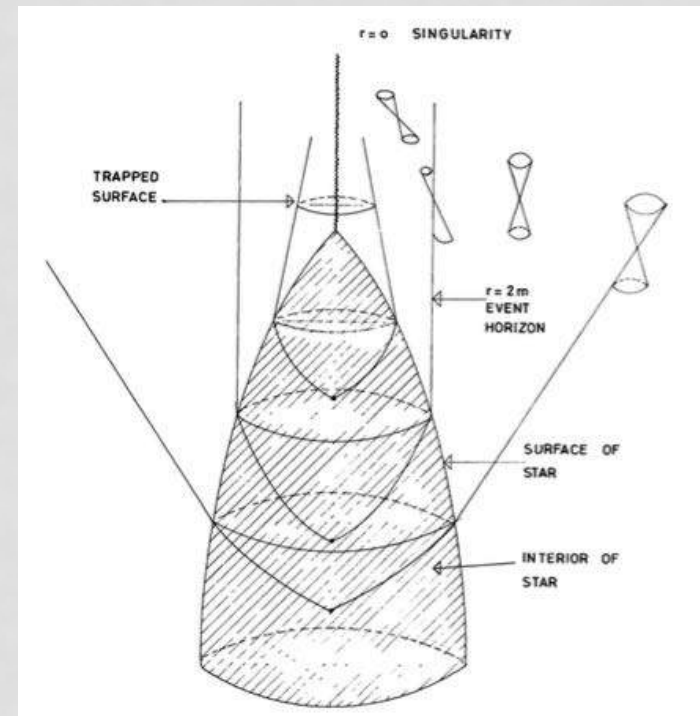
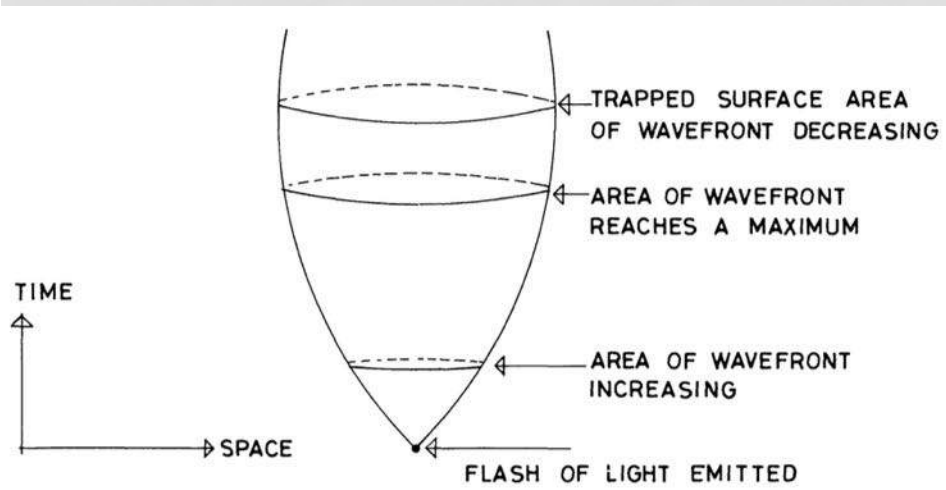


No colapso de uma casca esférica de massa num buraco negro, vemos que o horizonte de eventos (curva vermelha) continua a crescer mesmo sem a entrada de matéria no buraco negro!

**Nestas situações dinâmicas, qual seria então a melhor definição para um horizonte?**

# HORIZONTES DINÂMICOS

- Neste caso, deveremos buscar estruturas que possam ser definidas localmente:
  - Superfície de desvio para vermelho infinita:  $g_{00}=0$ .
  - Superfícies armadilhadas:



- Horizonte aparente: a superfície armadilhada mais externa.
- Note que nem sempre os horizontes coincidem!

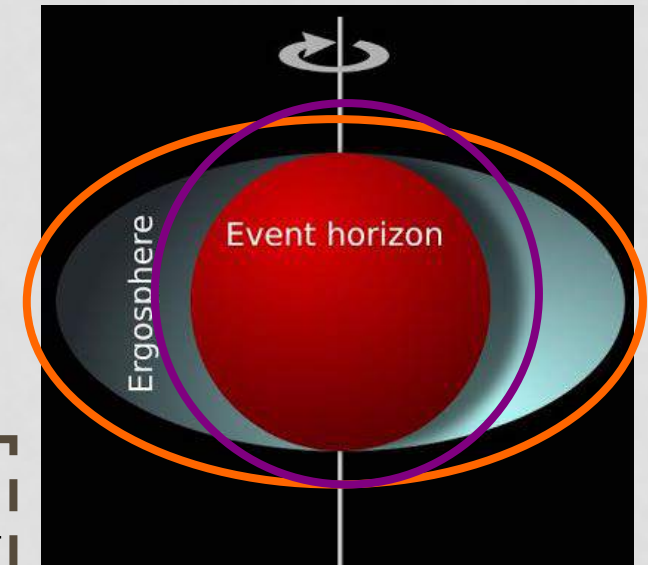
# BURACOS NEGROS DE KERR (1963)



Roy Kerr

Massa:  $M$

Momento angular:  $L$



$$\Sigma = r^2 + \frac{a^2}{c^2} \cos^2 \theta$$

$$\Delta = r^2 - \frac{2GMr}{c^2} + \frac{a^2}{c^2}$$

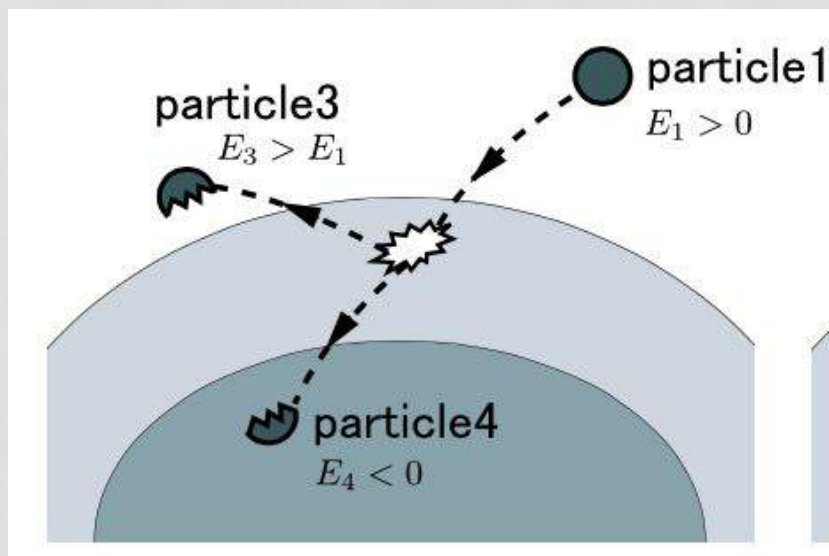
$$\vec{a} = \frac{\vec{L}}{M}$$

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2GMr}{c^2 \Sigma} \right) c^2 dt^2 - \frac{4aGMr \sin^2 \theta}{c^3 \Sigma} c dt d\phi + \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2$$

$$+ \Sigma d\theta^2 + \left( r^2 + \frac{a^2}{c^2} + \frac{2a^2 Mr \sin^2 \theta}{c^4 \Sigma} \right) \sin^2 \theta d\phi^2$$

# PROCESSO DE PENROSE

- Horizonte de Eventos está limitado pela ergosfera
- Dentro da ergosfera é impossível que um observador permaneça com a mesma coordenada radial
- Entre o horizonte de eventos e a ergosfera, há possibilidade de termos órbitas com energia negativa!
- Processo de Penrose:



<http://arxiv.org/pdf/1409.7502v2.pdf>

- Se o buraco negro tem a maior velocidade angular possível, então o processo é 48 vezes mais eficiente que os processos nucleares em estrelas.
- O processo pode ser repetido, mas o spin será cada vez menor.

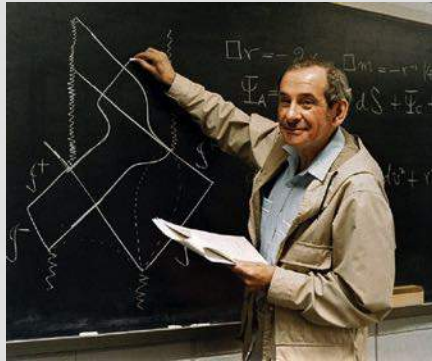
# SUPERRADIÂNCIA (~1970)

- Dicke: Superradiância é a amplificação da radiação devido à coerência de emissão do meio.
- Zel'dovich: um cilindro feito de um material absorvedor e rodando com frequência  $\Omega$  é capaz de amplificar modos de radiação escalar ou eletromagnética se  $\omega - m\Omega < 0$ , onde  $\omega$  é a frequência da onda e  $m$  o número quântico azimutal com respeito ao eixo de rotação.
- Ele sugeriu que este efeito ocorreria para um buraco negro de Kerr.
- Este efeito de superradiância foi verificado! Como entendê-lo?
  - Podemos pensar nisto como a emissão induzida de radiação pelo buraco (induzido pelo campo incidente). **Efeito clássico!**
  - **Efeito quântico:** emissão espontânea (independente do campo incidente)
  - Para o equilíbrio térmico entre um átomo e o campo de radiação é necessário considerar a emissão induzida e espontânea.

**O que ocorre num buraco negro em equilíbrio com um banho térmico?**

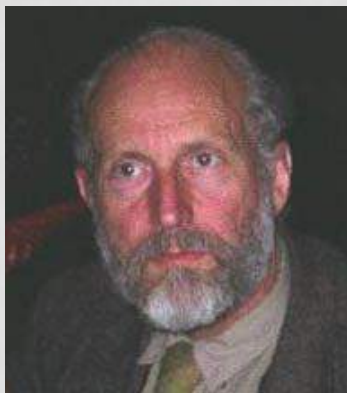
Há emissão espontânea apenas para buracos negros de Kerr?

# TEOREMAS DE UNICIDADE (60'S E 70'S)



Werner Israel

**Teorema de Israel:** A métrica de Schwarzschild é a única que descreve um campo gravitacional estático em relatividade geral.



Brandon Carter

**Teorema de Carter-Robinson:** A métrica de Kerr é a única que descreve um campo gravitacional estático axisimétrico em relatividade geral.



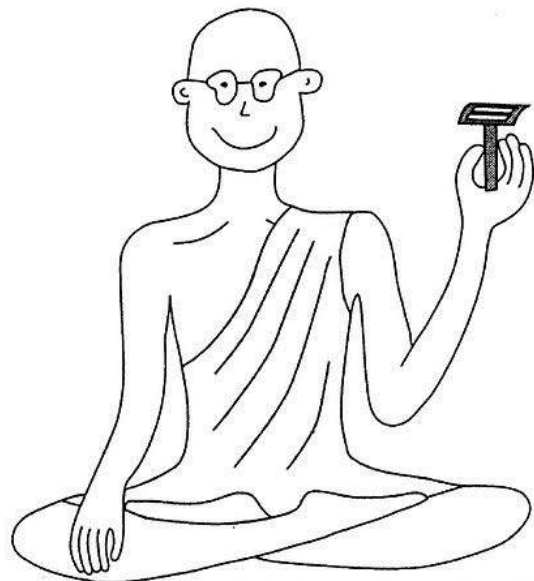
# TEOREMAS DE UNICIDADE (60'S E 70'S)

Estes são os chamados de **teoremas de unicidade**, que podem ser generalizados para incluir campos eletromagnéticos, de maneira que o buraco negro mais geral possível é descrito por sua **massa**, **momento angular**, **carga elétrica** e **carga magnética**.

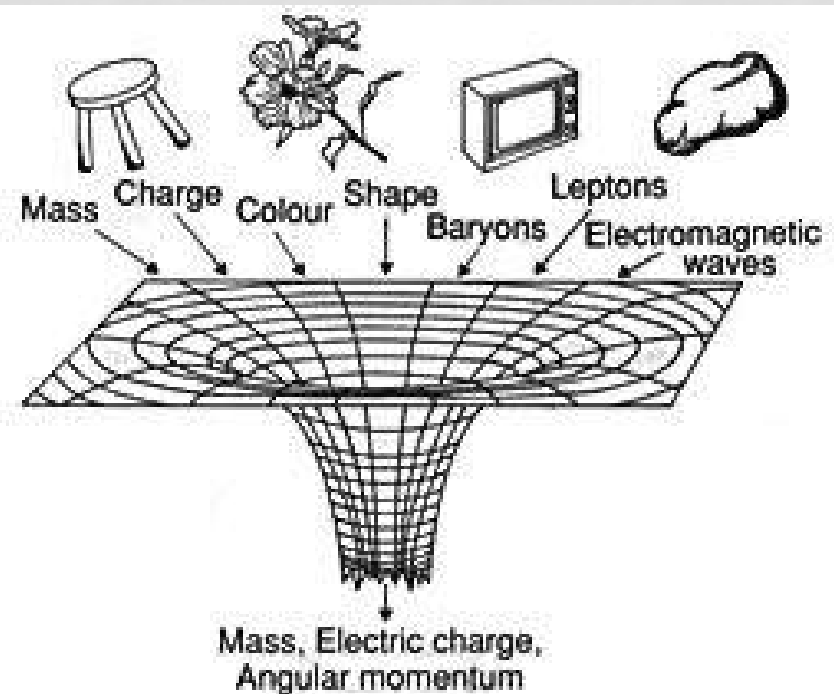
|                    | <i>Massa</i> | <i>Carga Elétrica</i> | <i>Momento Angular</i> |
|--------------------|--------------|-----------------------|------------------------|
| Schwarzschild      | <b>SIM</b>   | <b>NÃO</b>            | <b>NÃO</b>             |
| Reissner-Nordström | <b>SIM</b>   | <b>SIM</b>            | <b>NÃO</b>             |
| Kerr               | <b>SIM</b>   | <b>NÃO</b>            | <b>SIM</b>             |
| Kerr-Newman        | <b>SIM</b>   | <b>SIM</b>            | <b>SIM</b>             |

# TEOREMAS DE UNICIDADE (60'S E 70'S)

Note que não importa o que entre no buraco negro apenas temos acesso a poucas grandezas (massa, carga e momento angular).



According to the black hole **no-hair theorems**, an **electrically neutral rotating black hole** in General relativity is completely described by its **mass  $M$**  and **angular momentum  $S$**

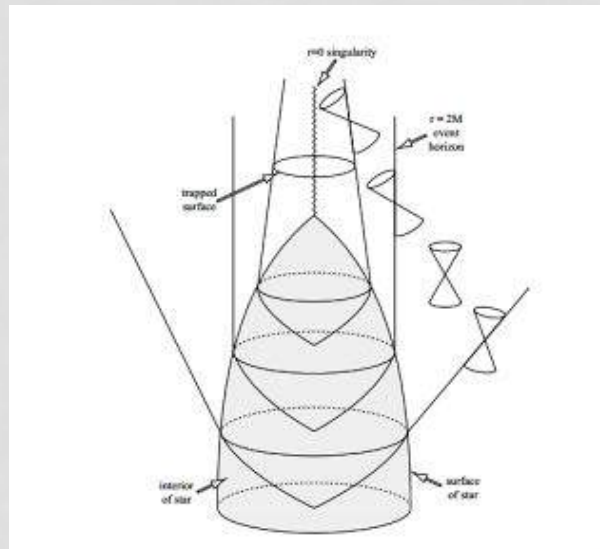


**Buracos negros não têm cabelo!**

# TEOREMAS DE SINGULARIDADE (60'S E 70'S)



Roger Penrose



Stephen Hawking

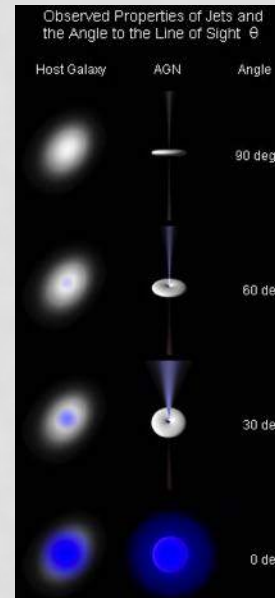
Um buraco negro pode ser formado pelo colapso de matéria usual?

Hawking e Penrose mostram, usando técnicas de análise global em geometria diferencial, supondo que a energia local da matéria é positiva, que as **curvas geodésicas não são completas**, ou seja, não podem ser extendidas tão longe se queira!

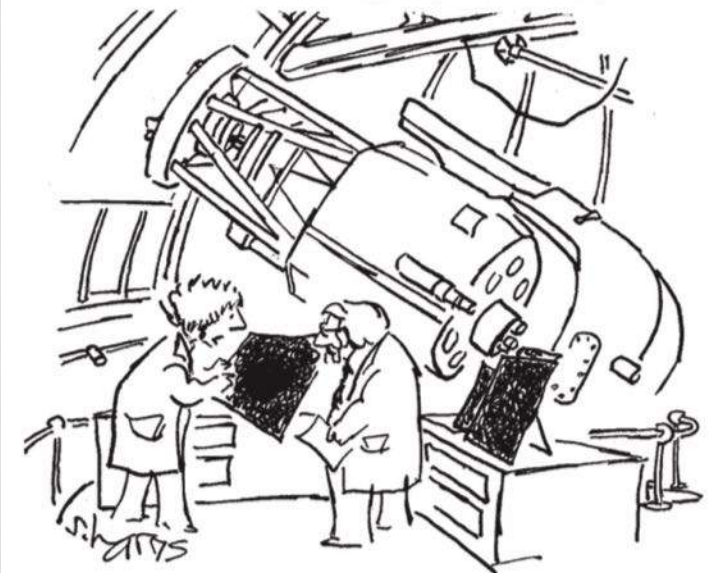
# BURACOS NEGROS ASTROFÍSICOS



[http://spaceinimages.esa.int/Images/2013/02/Rapidly\\_rotating\\_black\\_hole\\_accreting\\_matter](http://spaceinimages.esa.int/Images/2013/02/Rapidly_rotating_black_hole_accreting_matter)



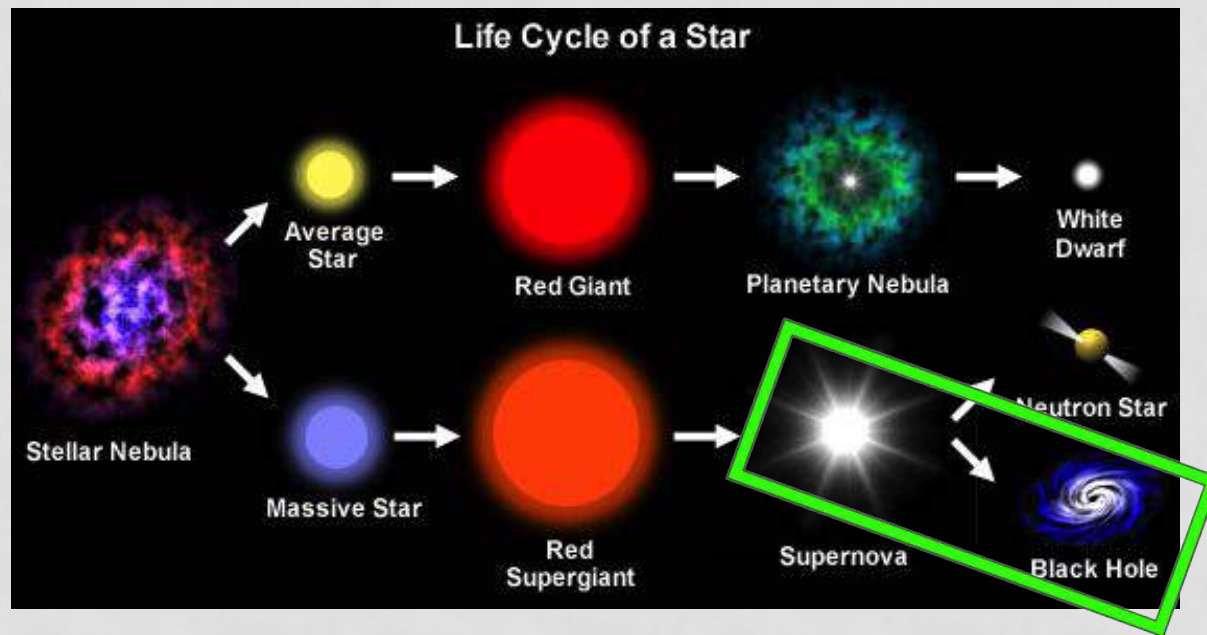
[http://en.wikipedia.org/wiki/Active\\_galactic\\_nucleus](http://en.wikipedia.org/wiki/Active_galactic_nucleus)



"IT'S BLACK, AND IT LOOKS LIKE A HOLE. I'D SAY IT'S A BLACK HOLE."

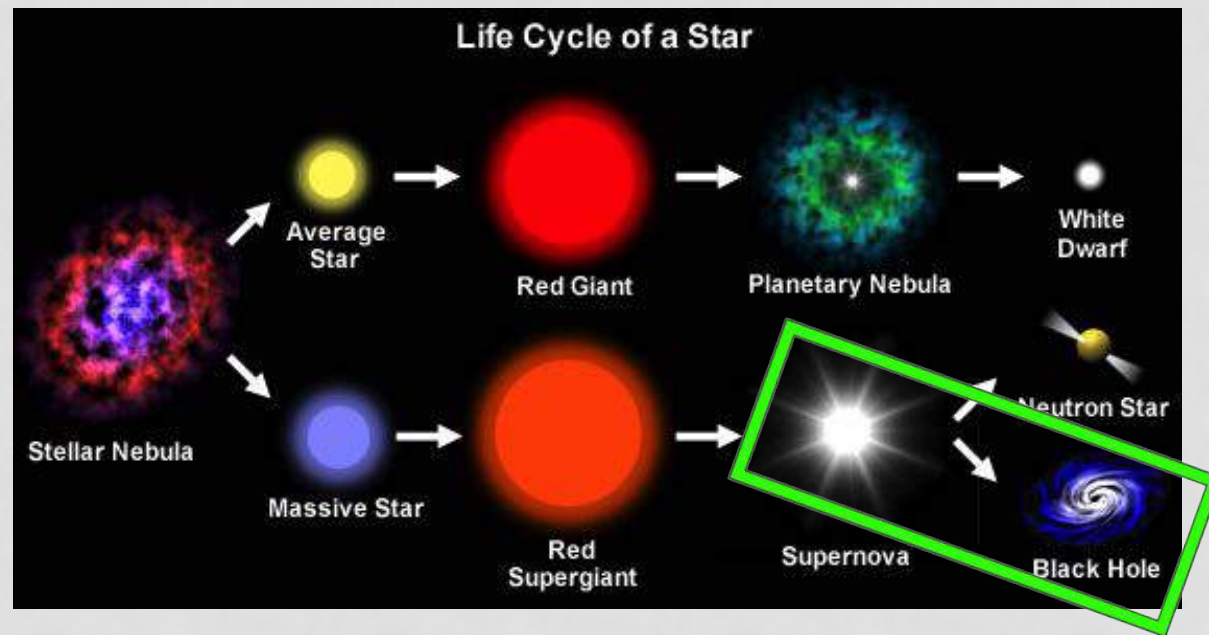
Referência Principal: **Gravity's fatal attraction: black holes in the universe.** M. Begelman e M. Rees, Cambridge (2<sup>nd</sup> Edition, 2010)

# BURACOS NEGROS POR COLAPSO ESTELAR



Se a massa da estrela for pelo menos três vezes maior do que a do sol, não há chance de equilíbrio!

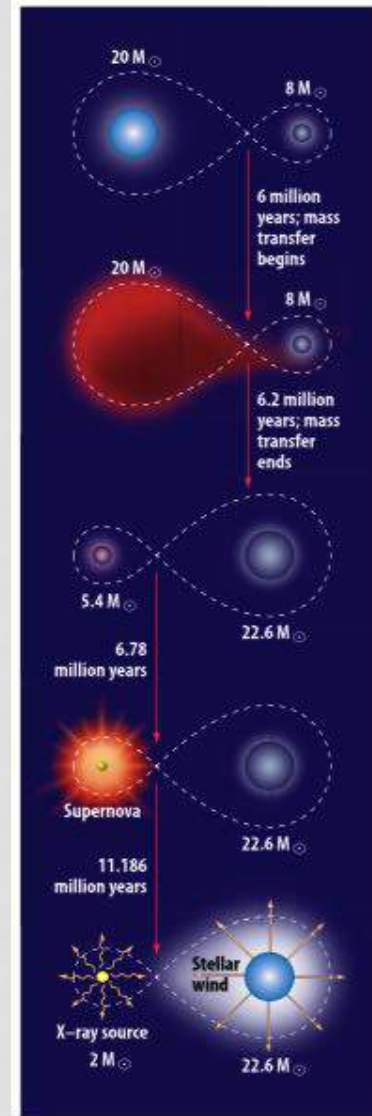
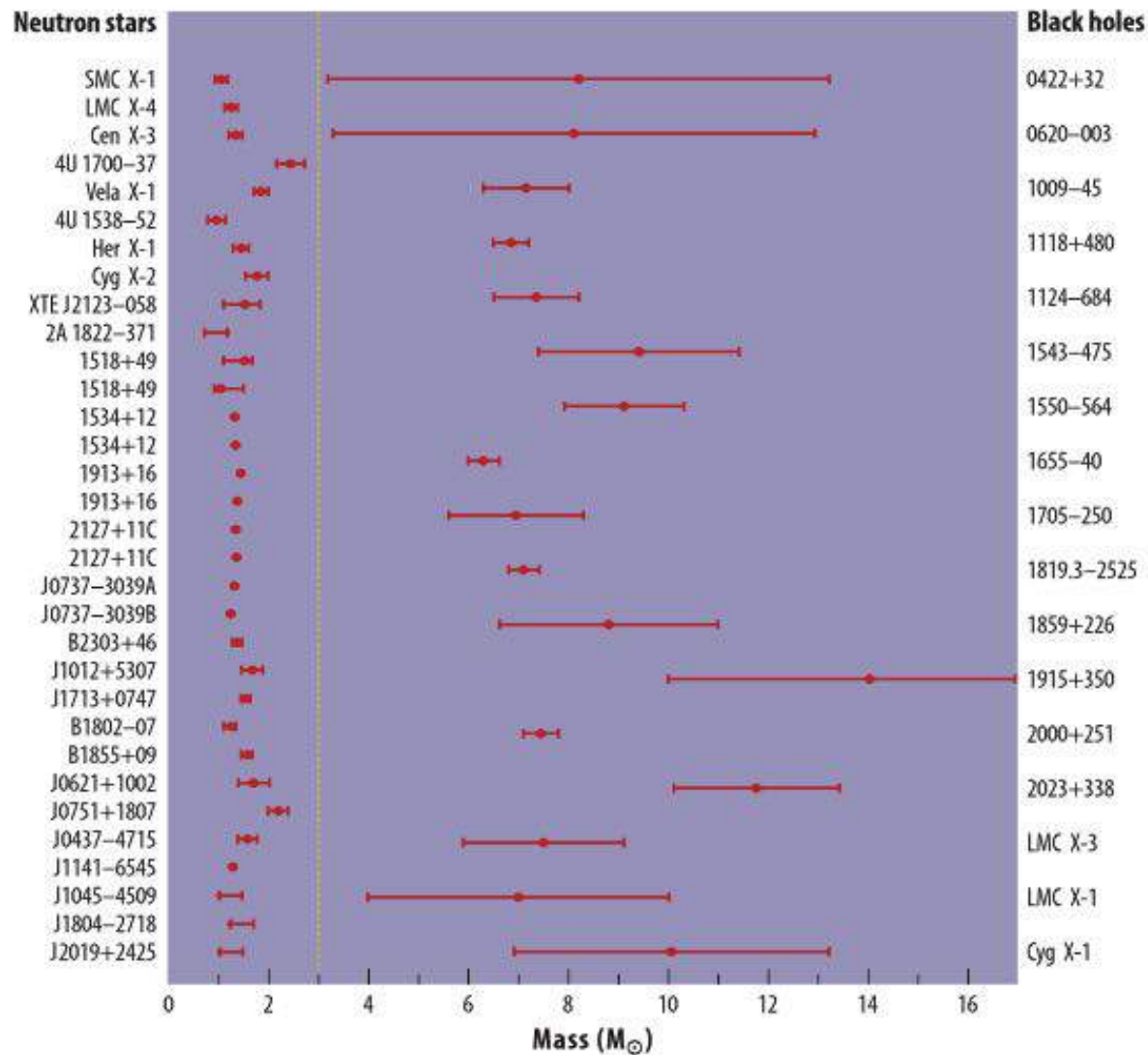
# BURACOS NEGROS POR COLAPSO ESTELAR



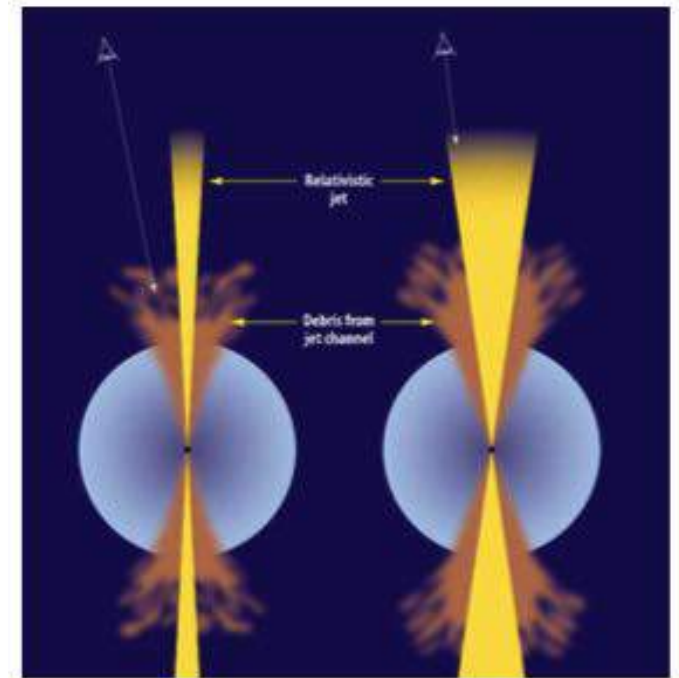
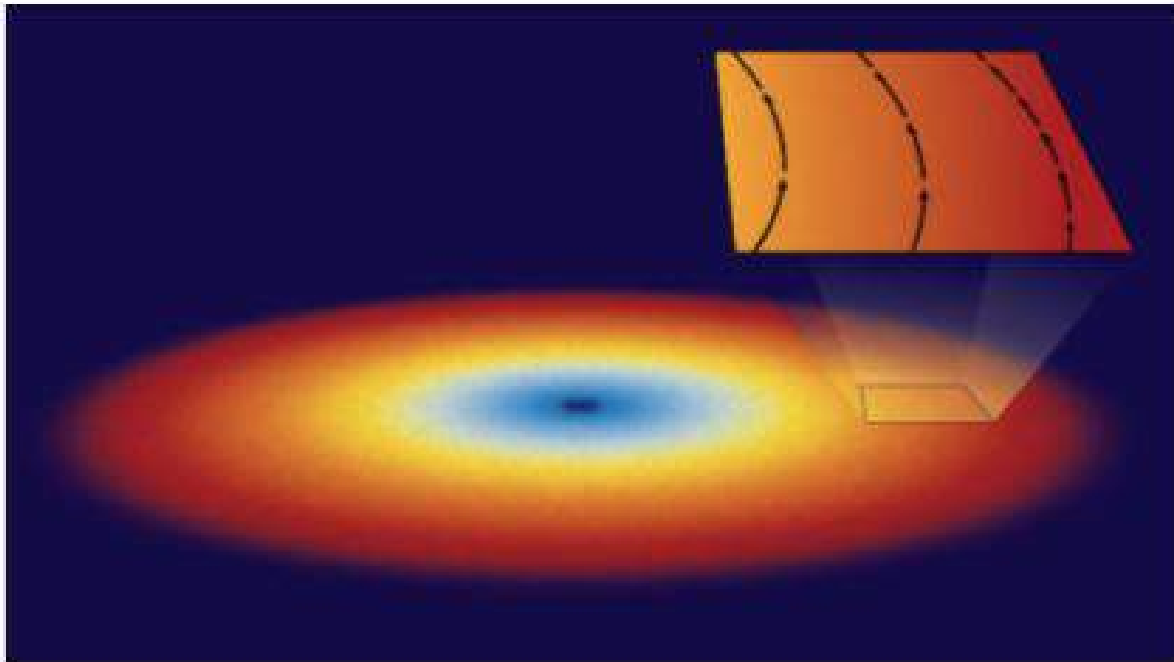
Se a massa da estrela for pelo menos três vezes maior do que a do sol, não há chance de equilíbrio!

A gravidade triunfará!

# BURACOS NEGROS POR COLAPSO ESTELAR



# BURACOS NEGROS POR COLAPSO ESTELAR



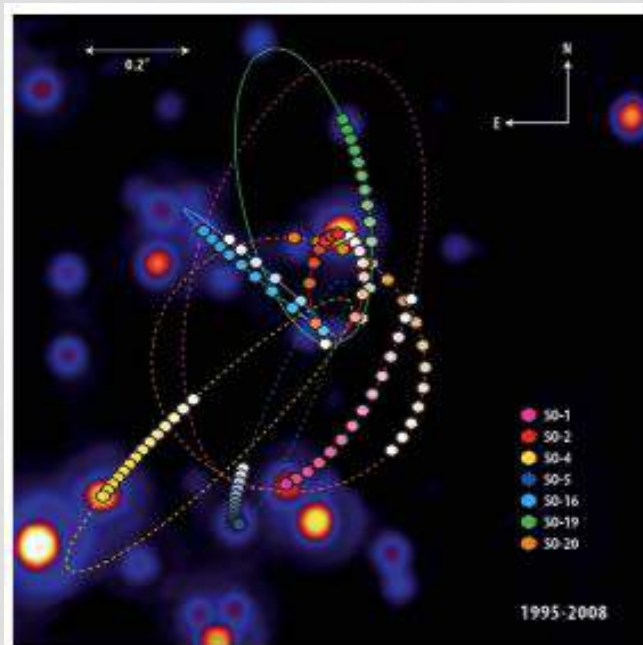
Discos de acreção e jatos relativísticos perto de estruturas compactas!



# BURACOS NEGROS SUPERMASSIVOS

Foi observado, em 1974, uma fonte de rádio bastante compacta a poucos parsecs do centro da Via Láctea, cujo nome é **Sagittarius A\***.

O movimento próprio de estrelas individuais foi seguido durante anos, e mostram um movimento em torno de Sagittarius A\*.



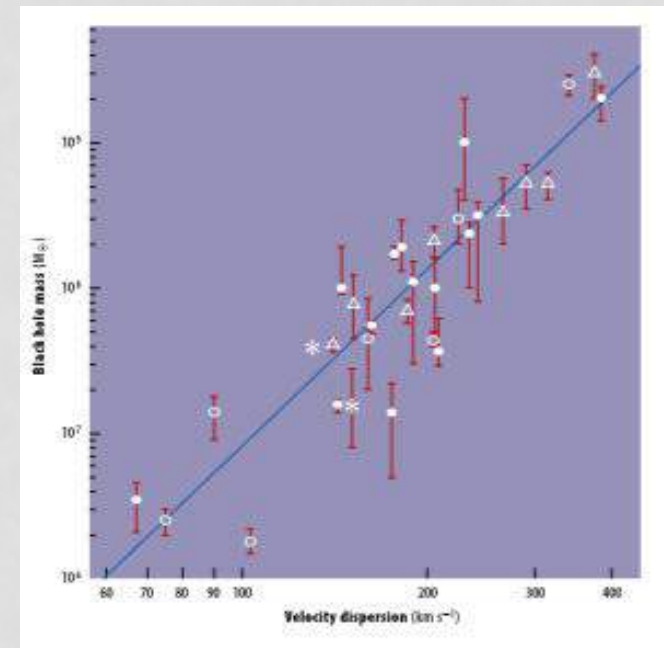
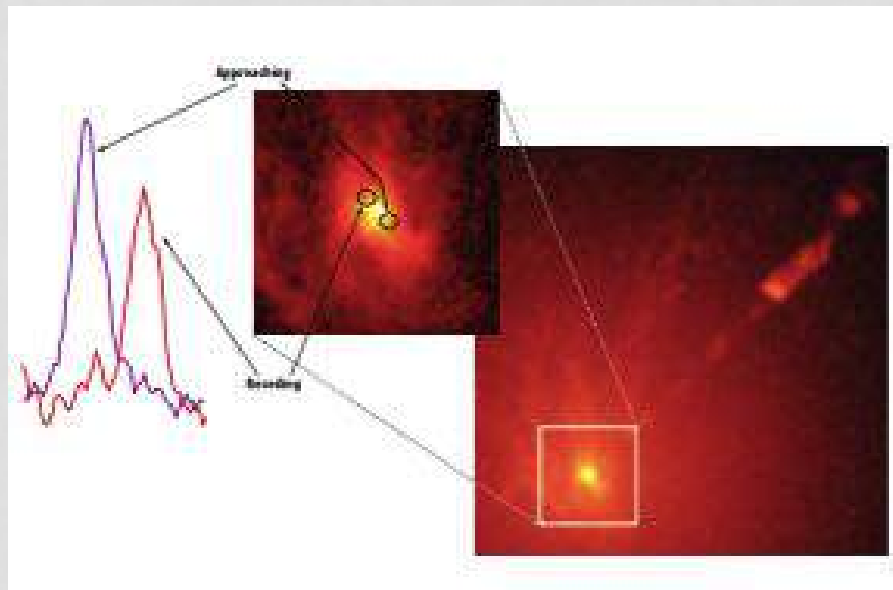
A massa deste objeto compacto foi estimada em:

$$M=(4,1\pm 0,6)\times 10^6 M_{\odot}$$

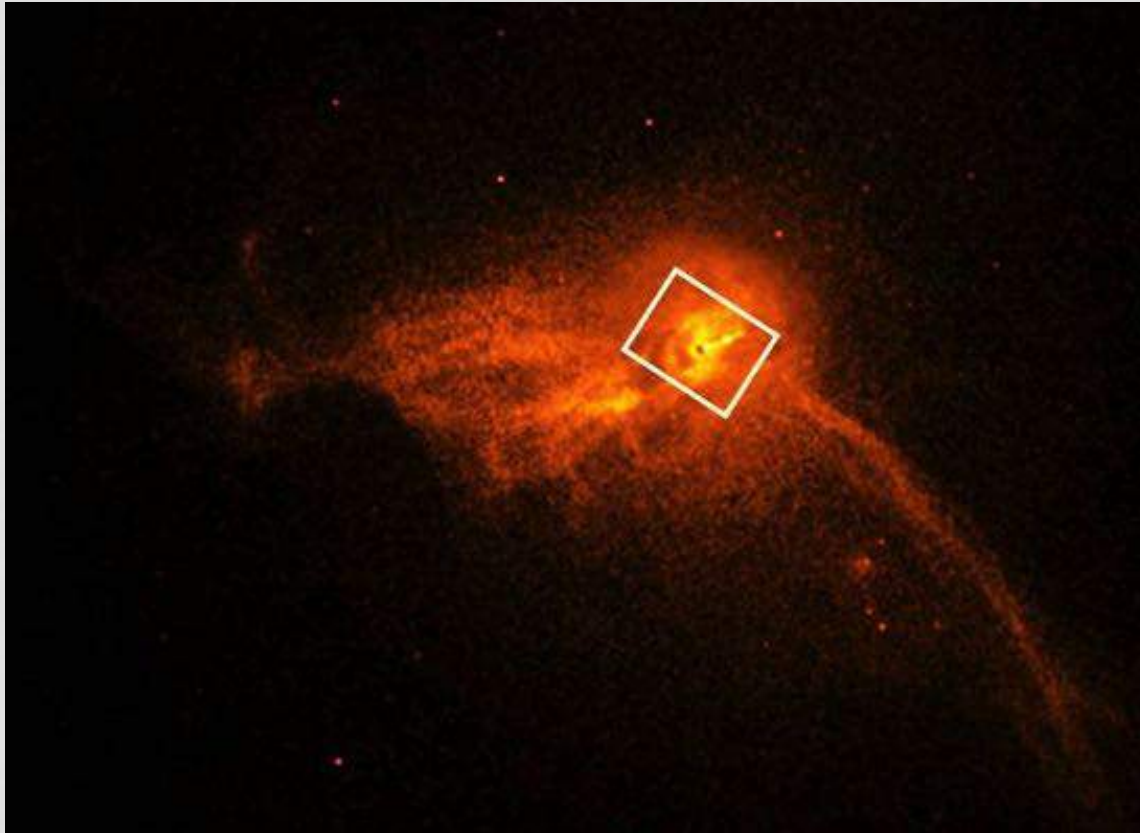
Mais do que isto, este objeto é consistente com um buraco negro de Kerr.

# BURACOS NEGROS SUPERMASSIVOS

- Em outras galáxias observamos também um material próximo ao centro galáctico orbitando rapidamente em torno de uma concentração central de massa.
- Há também forte emissão de energia numa pequena região do espaço.
- O Processo de formação dos buracos negros supermassivos é desconhecido, embora possa ocorrer devido ao colapso da matéria escura.



# OBSERVAR DIRETAMENTE UM BURACO NEGRO?



Revista Galileu:

<https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/Espaco/noticia/2019/04/primeira-foto-de-um-buraco-negro-um-dia-historico-para-ciencia.html>

Galáxia M87

Como melhorar a resolução desta imagem?

# MÉTODOS INTERFEROMÉTRICOS

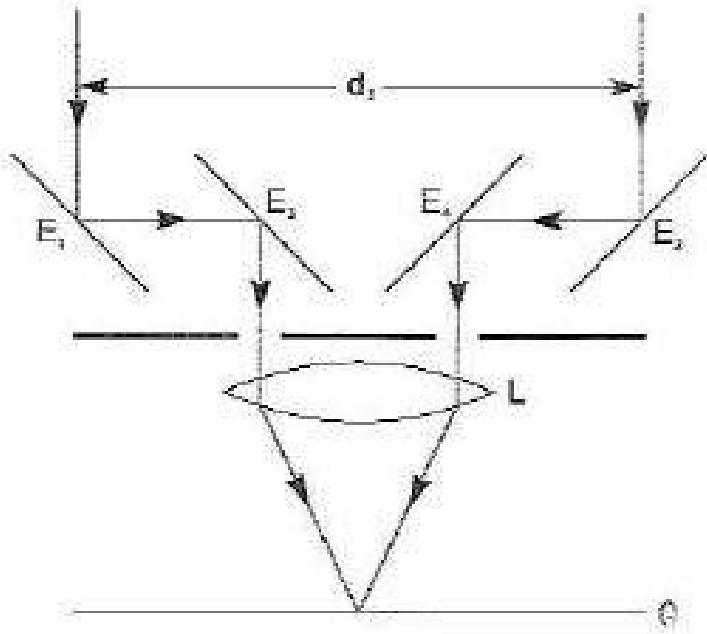


Fig. 3.20 Interferômetro estelar de Michelson

H. Moysés Nussenzveig, Física Básica Volume 4  
Editora Edgard Blücher (2010)



[https://en.wikipedia.org/wiki/Albert\\_A.\\_Michelson](https://en.wikipedia.org/wiki/Albert_A._Michelson)

Albert Michelson (1852-1931)

Michelson mediu o diâmetro angular da estrela Beteugelse:

$$d_{\perp} \sim 3m \Rightarrow \Delta\theta \sim 0,047''$$

# MÉTODOS INTERFEROMÉTRICOS

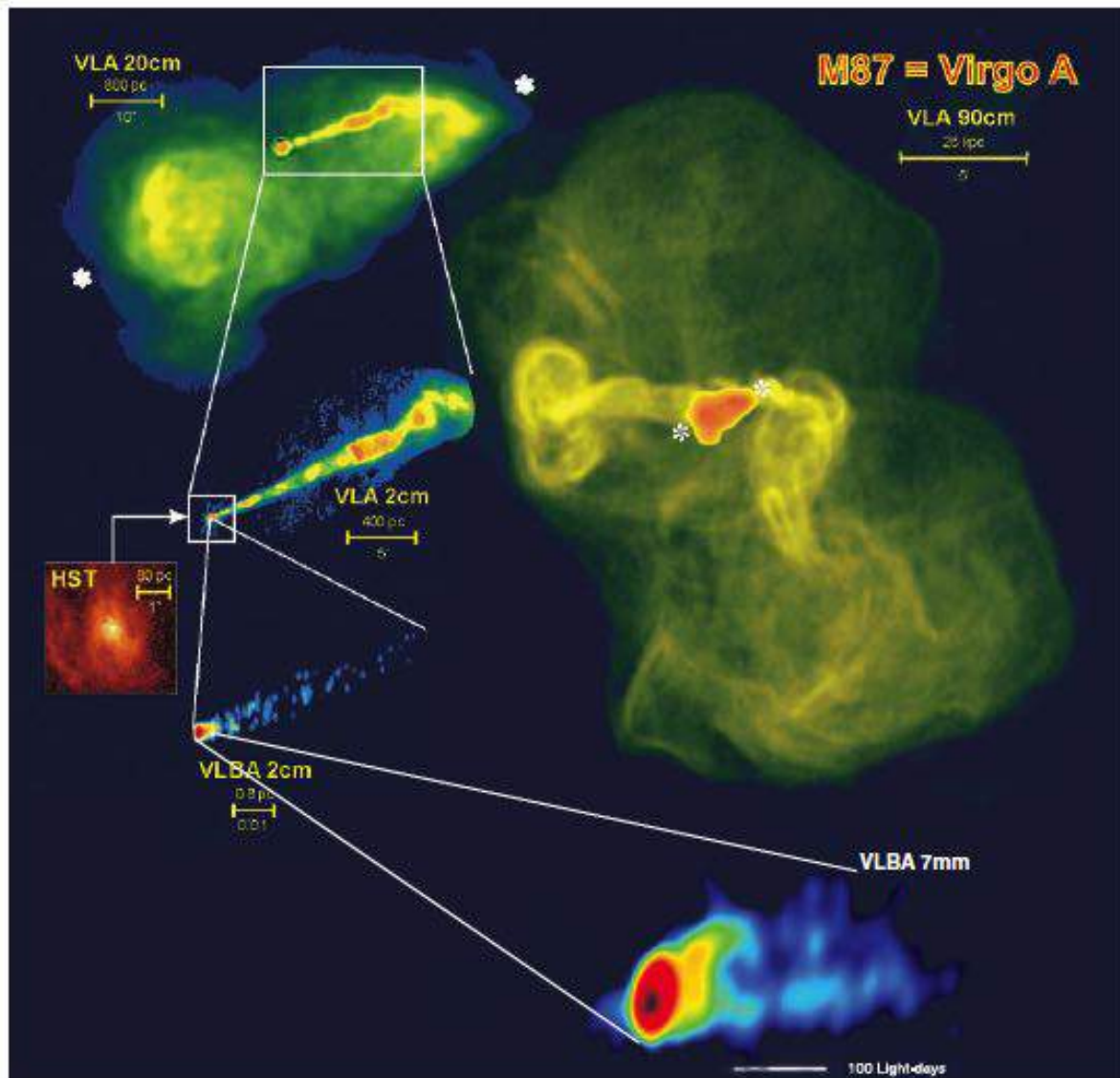
- Problemas com coerência da luz...
- $\Delta\theta \sim \frac{\lambda}{d_{\perp}}$  Quanto maior o “braço” do interferômetro maior a resolução angular
- Solução: buscar “braços” cada vez maiores!



VLBA (Very Long Baseline Array)

Uma rede de radiotelescópicos na América do Norte e Havaí.

# MÉTODOS INTERFEROMÉTRICOS



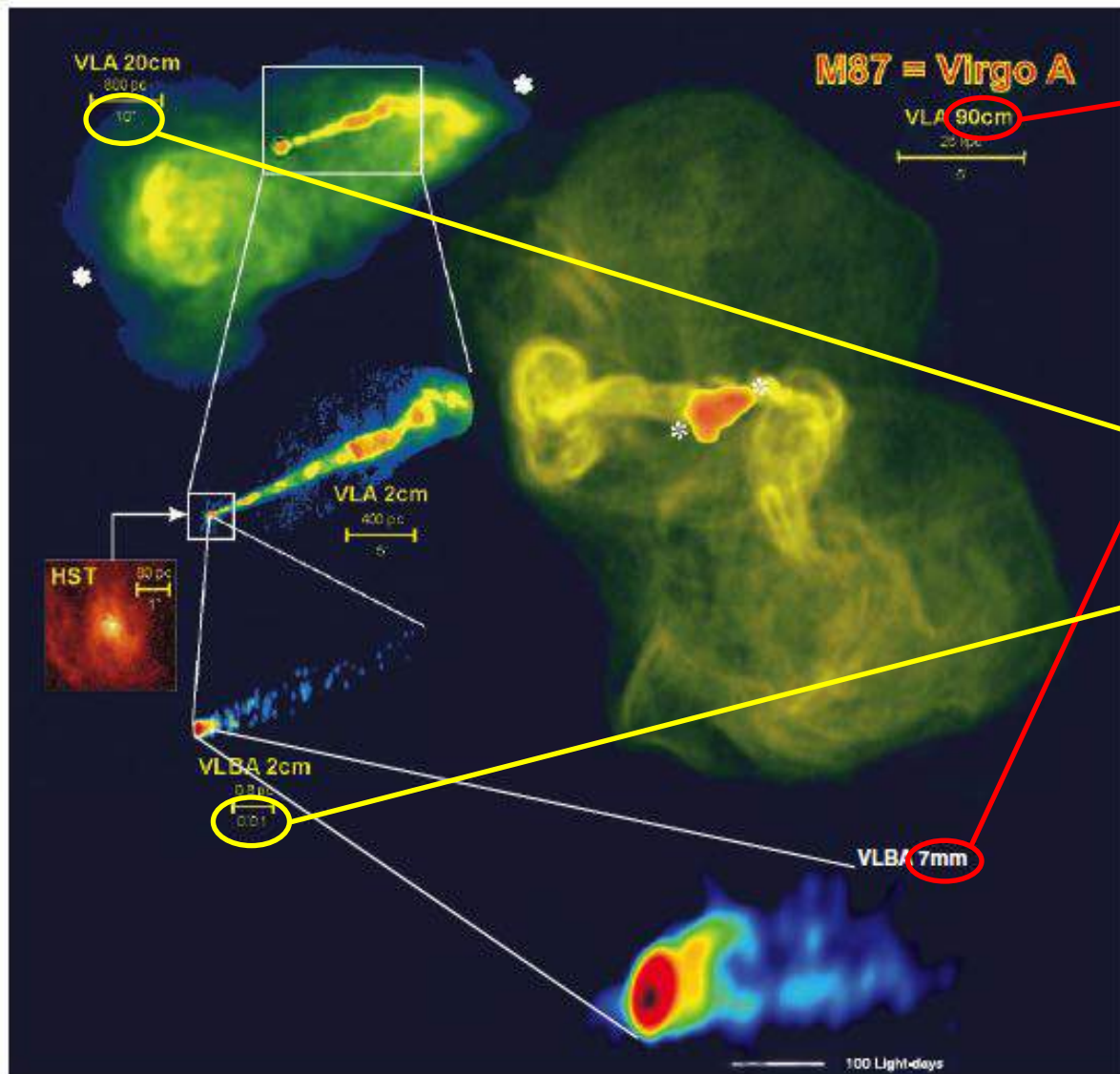
VLA: braços separados por 40 km.

VLBA: milhares de km.

O grande avanço é que não há interferometria em tempo real.

Os dados dos telescópios individuais são gravados em separado.

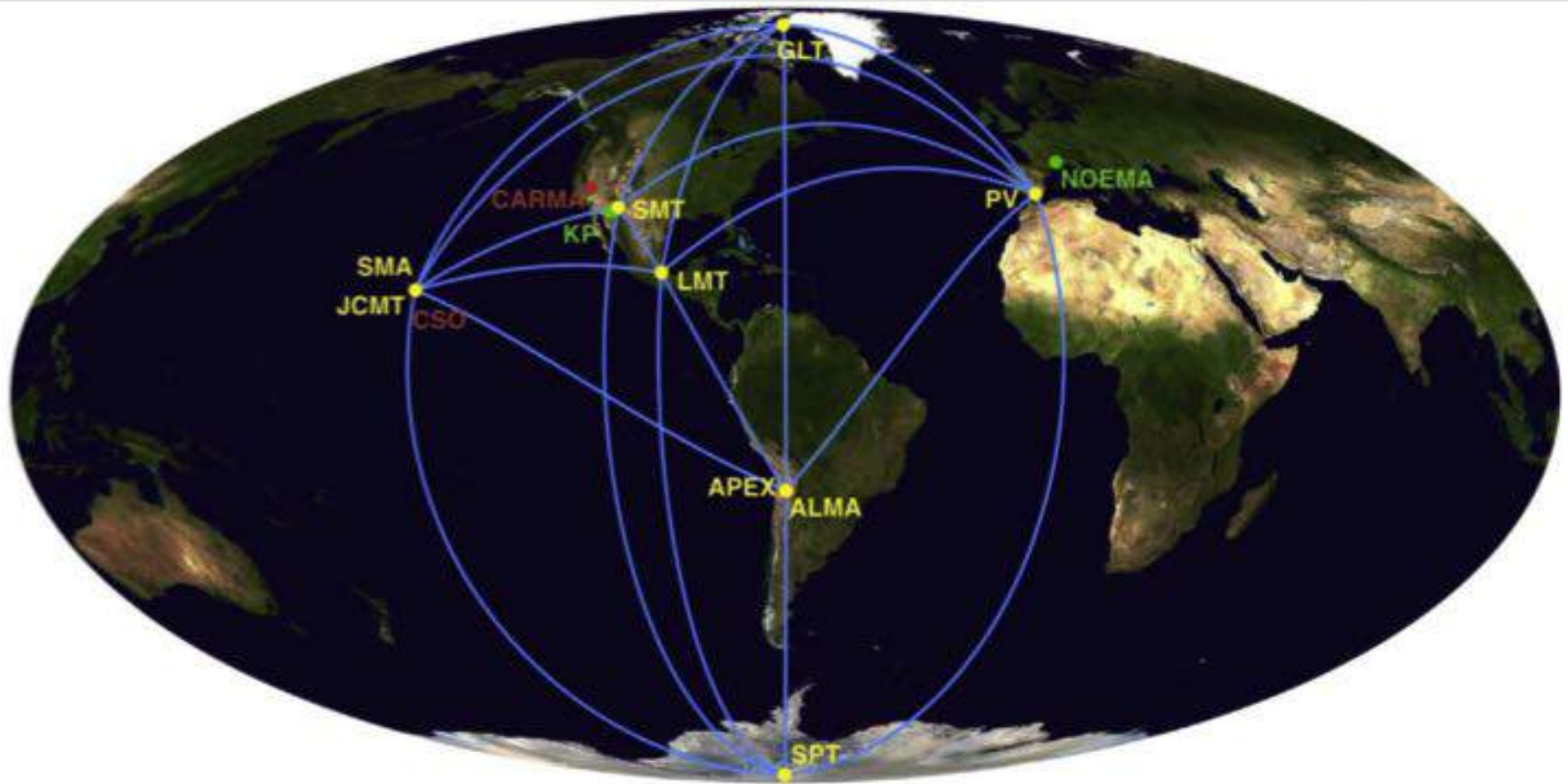
# MÉTODOS INTERFEROMÉTRICOS



Comprimento de onda medido

Resolução angular

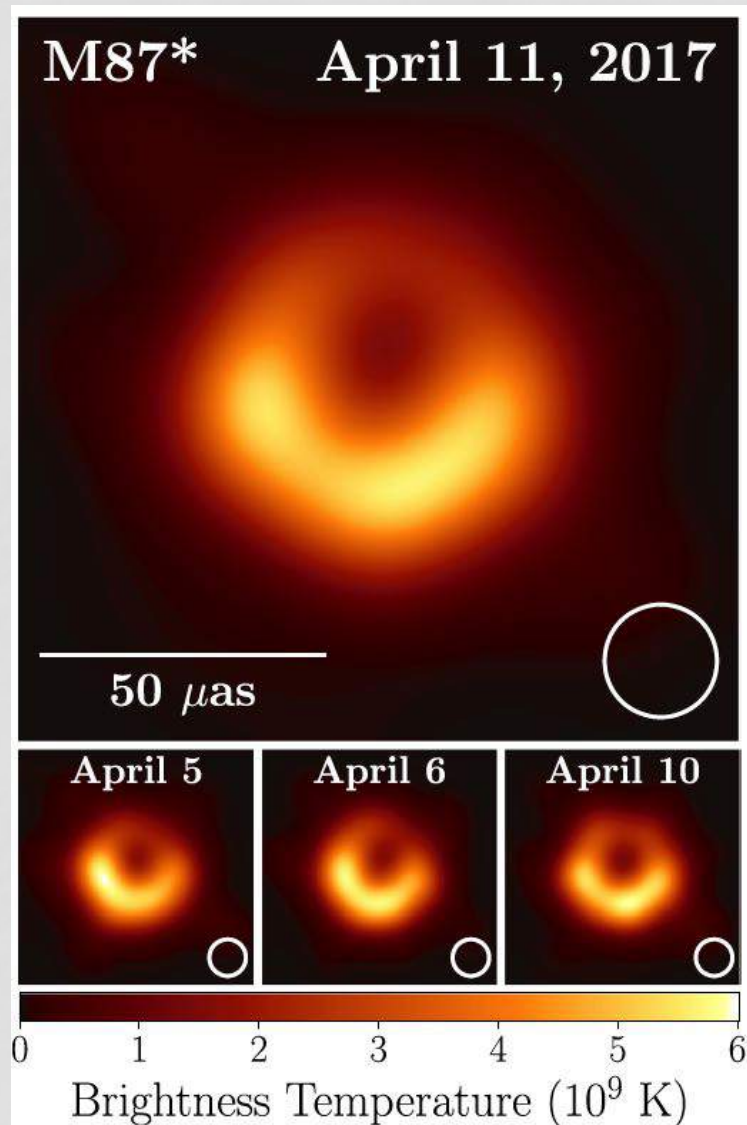
# EVENT HORIZON TELESCOPE



The Event Horizon Telescope Collaboration, *First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation*, *The Astrophysical Journal Letters*, **875**:L2 (2019)



# EVENT HORIZON TELESCOPE

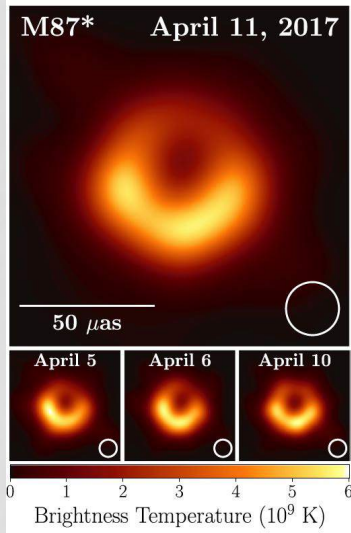


- Comprimento de onda medido: 1,3 mm (230 GHz)
- “Braços” do interferômetro: de 160 a 10.700 km
- Resolução angular de  $\Delta\theta \sim \frac{\lambda}{d_{\perp}} \sim 25$   $\mu\text{arcsec}$
- Massa encontrada:

$$M = (6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_{\odot}$$

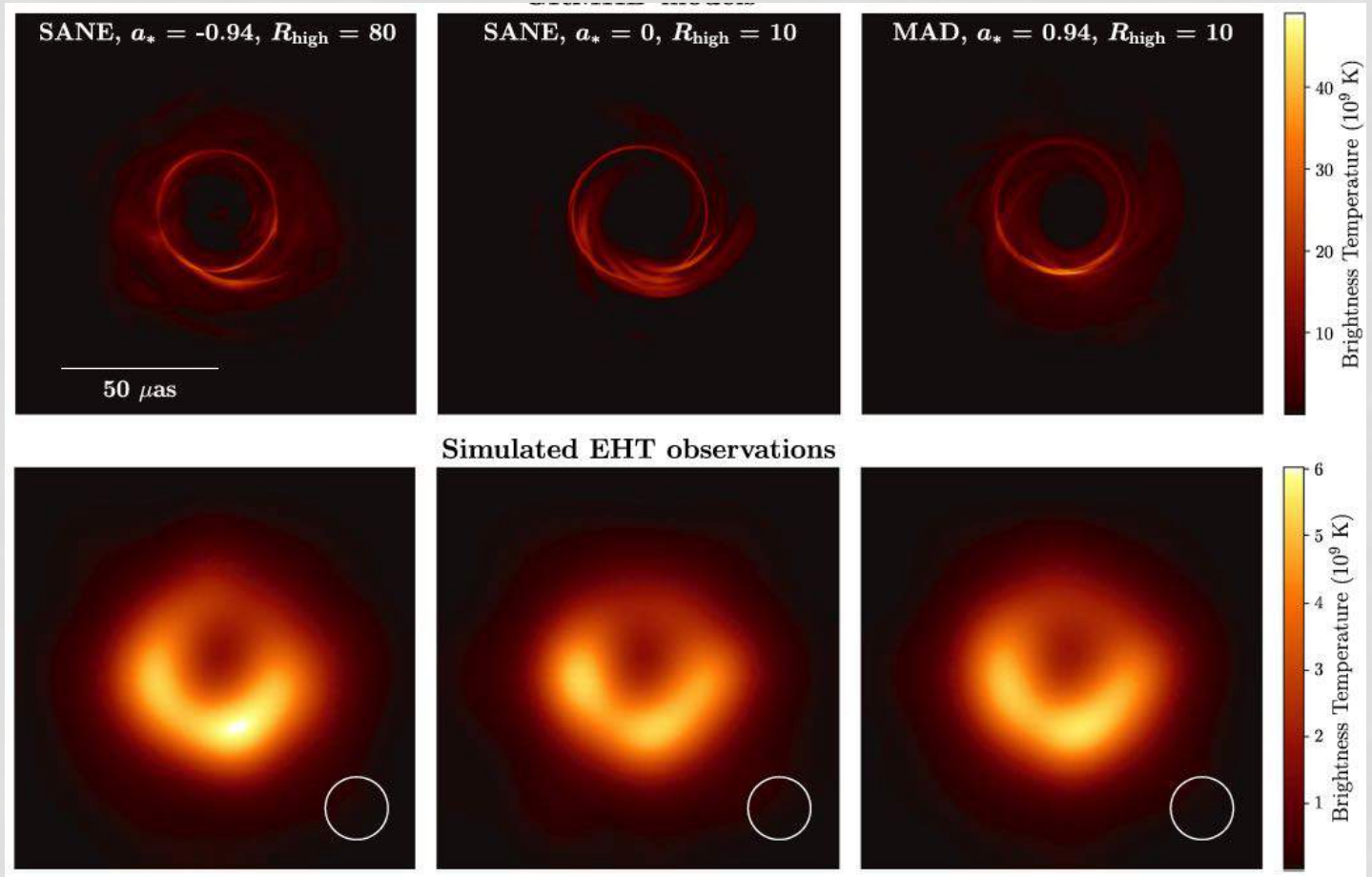
The Event Horizon Telescope Collaboration,  
*First M87 Event Horizon Telescope Results. I.*  
*The Shadow of the Supermassive Black Hole,*  
*Astrophysical Journal Letters Letters*, **875:L1**  
(2019)

# SERÁ QUE É UM BURACO NEGRO?



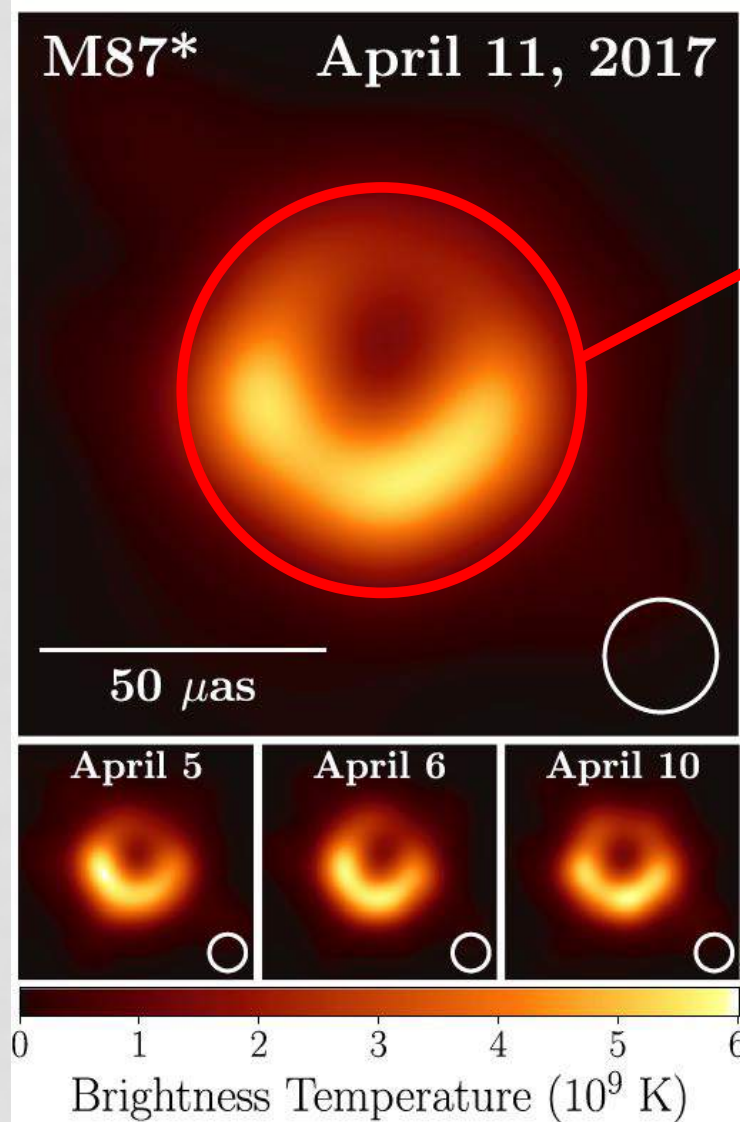
The Event Horizon Telescope  
Collaboration,  
*First M87 Event Horizon  
Telescope Results. I.  
The Shadow of the  
Supermassive Black Hole,*  
*Astrophysical Journal Letters*  
Letters, **875:L1** (2019)

## Simulações



Consistente com os modelos de disco de acreção e buraco negro de Kerr!

# ENTENDO A FIGURA

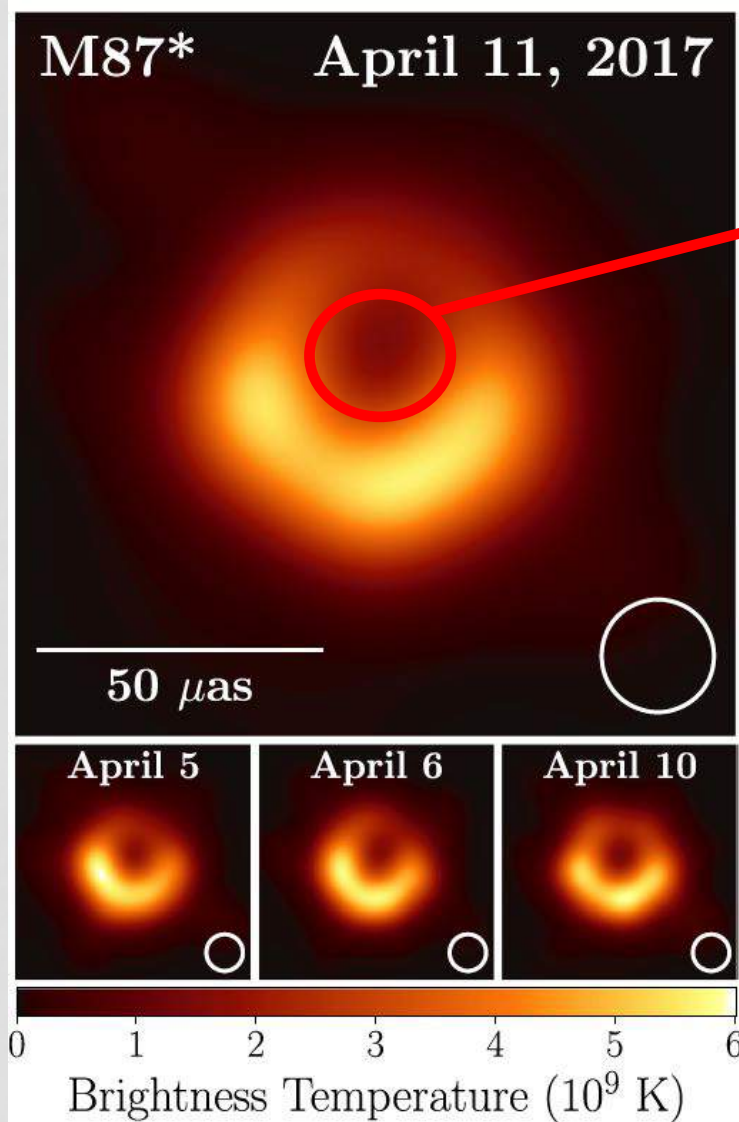


**Pergunta 1:**

Como explicar o este halo luminoso?

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

# ENTENDO A FIGURA

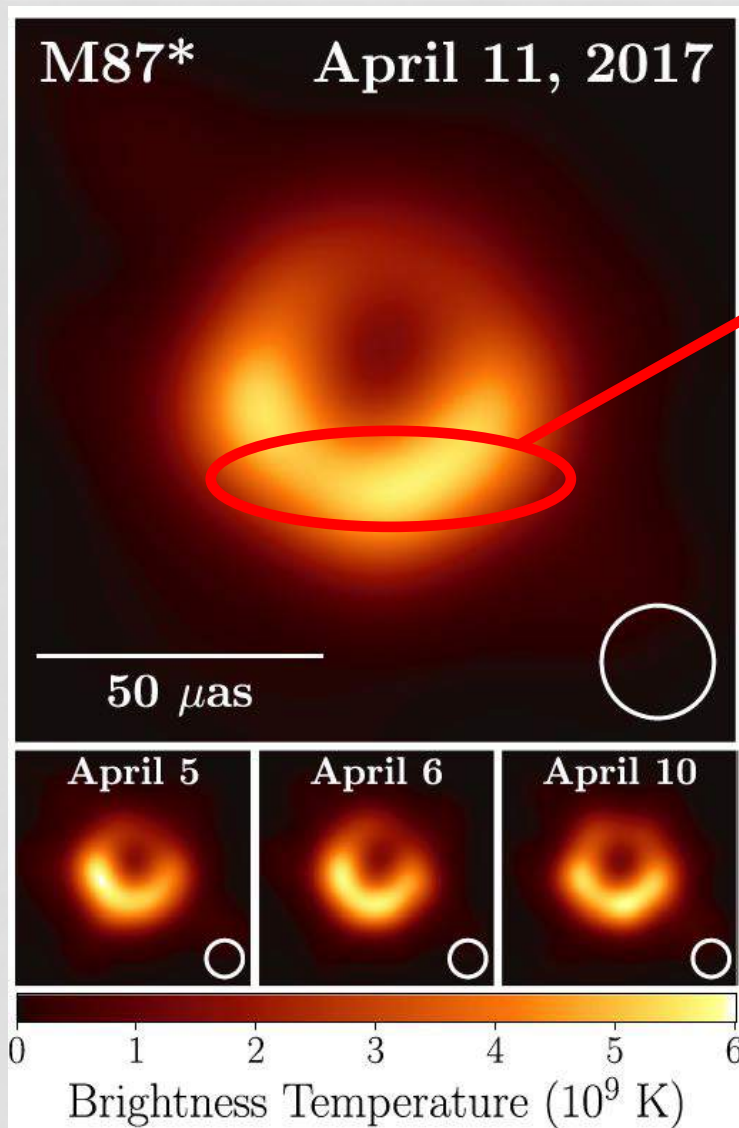


**Pergunta 2:**

Esta sombra central é o horizonte de eventos?

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

# ENTENDO A FIGURA



## Pergunta 3:

Por que a região inferior é mais brilhante que a superior?

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

# O SLIDE MAIS IMPORTANTE DE TODOS!

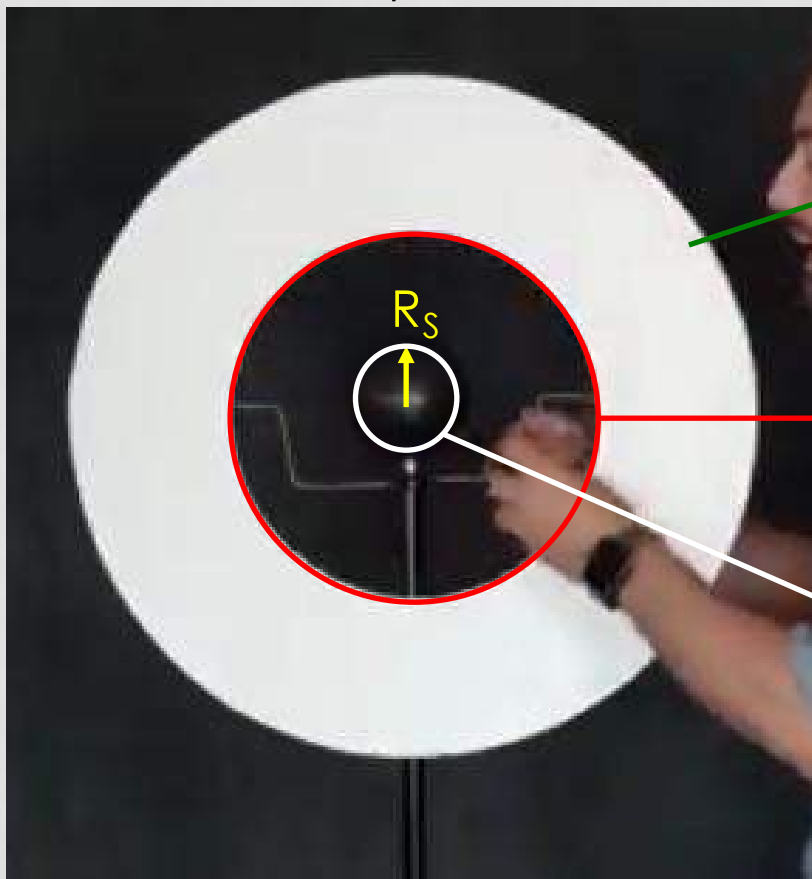
## Sugestão de Vídeo no Youtube: Canal Veritasium (Legendado!)

<https://www.youtube.com/watch?v=zUyH3XhpLTo&feature=youtu.be&fbclid=IwAR2MnVQL9iz6V4n1983vdf2Oa9tMiu5RUhEWuT76S SxzCXt1fnsNTbyhKr8&app=desktop>



# ENTENDENDO O HALO LUMINOSO

Vista superior



Disco de Acreção

Órbita Circular estável mais interior (ISCO)

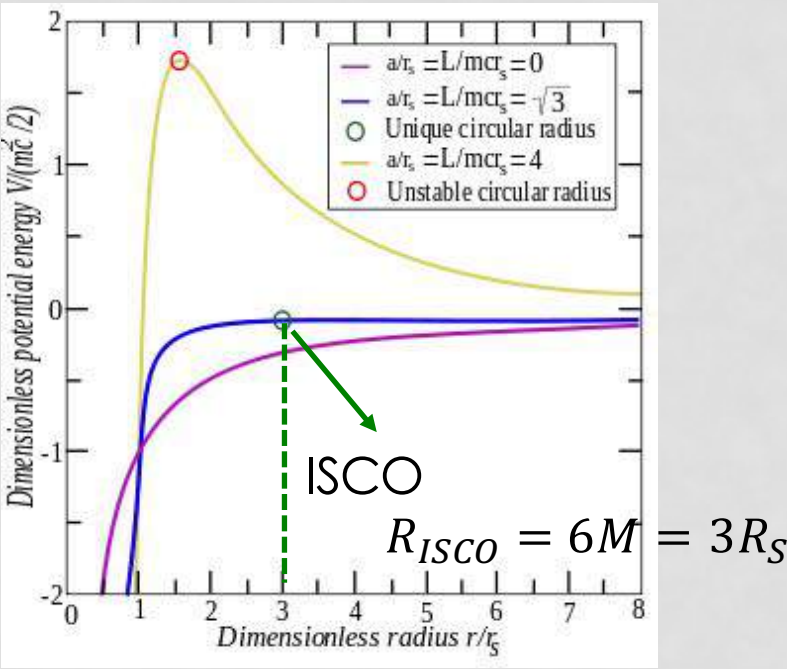
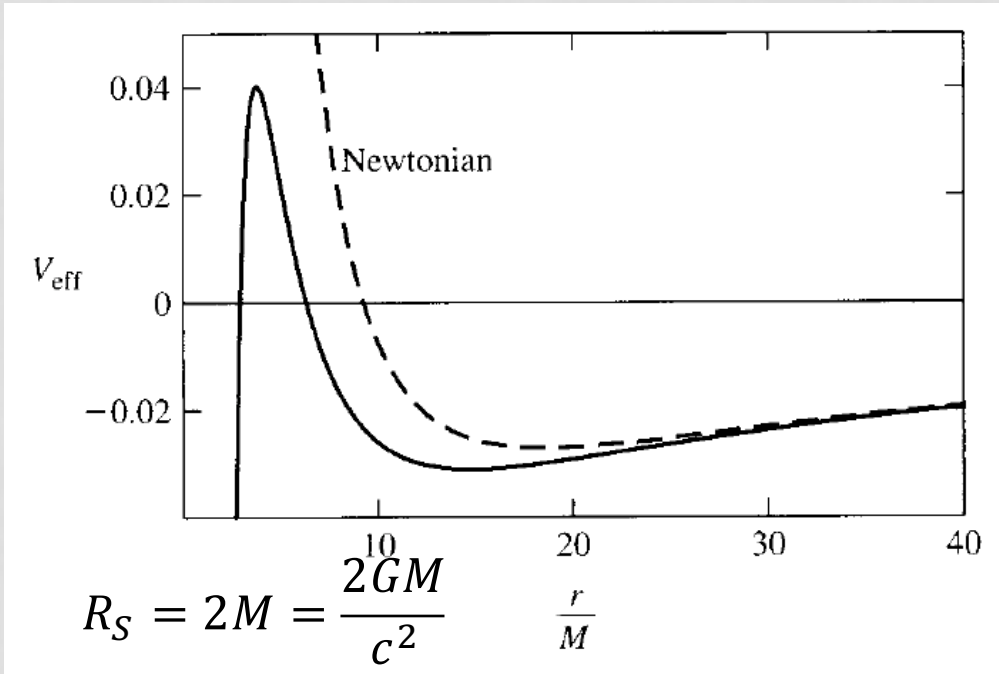
Horizonte de eventos do BN

# ENTENDENDO O HALO LUMINOSO

Movimento radial de uma partícula com massa num BN de Schwarzschild

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} \left( \frac{dr}{d\tau} \right)^2 + V_{\text{eff}}(r).$$

$$V_{\text{eff}}(r) \equiv \frac{1}{2} \left[ \left( 1 - \frac{2M}{r} \right) \left( 1 + \frac{\ell^2}{r^2} \right) - 1 \right] = -\frac{M}{r} + \frac{\ell^2}{2r^2} - \frac{M\ell^2}{r^3}$$

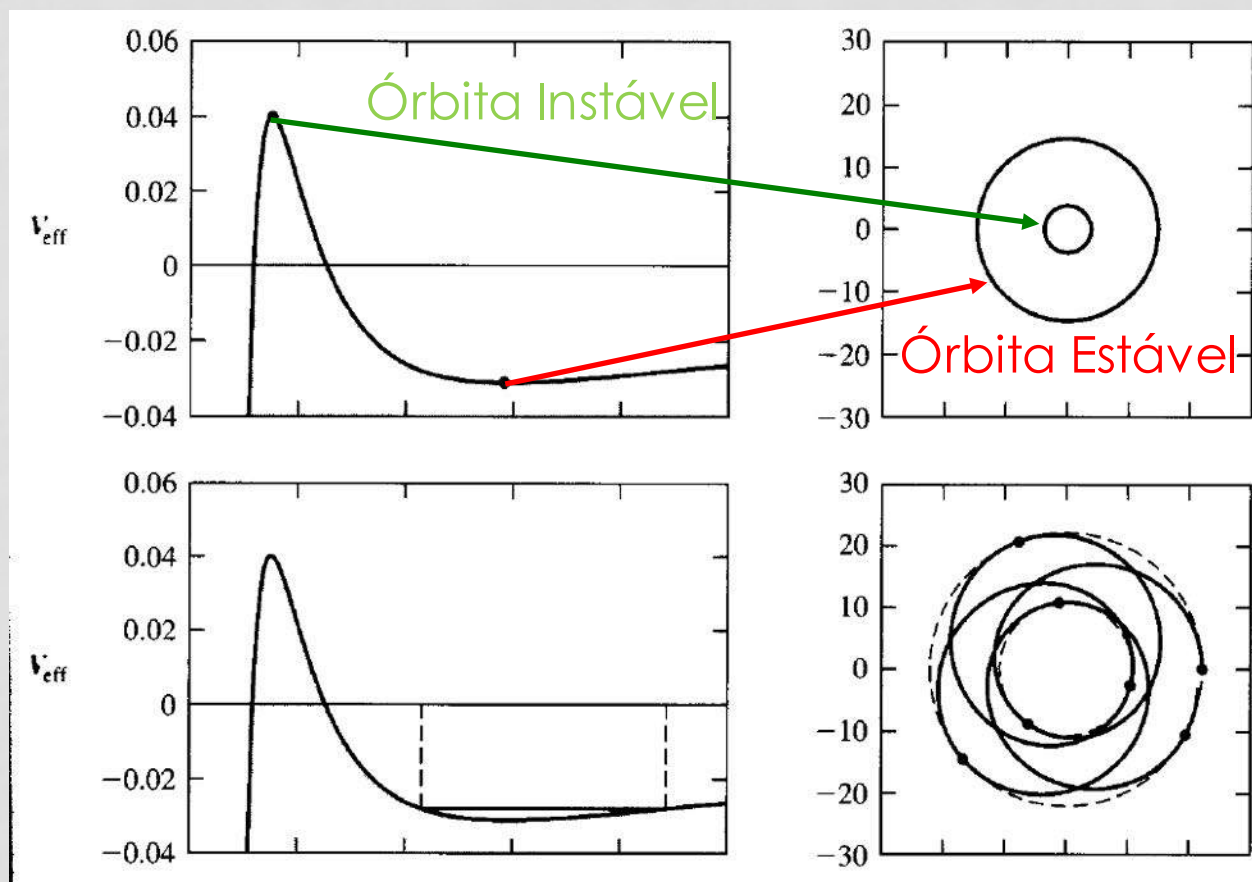


J. Hartle, Gravity, Pearson (2003)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild\\_geodesics](https://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild_geodesics)

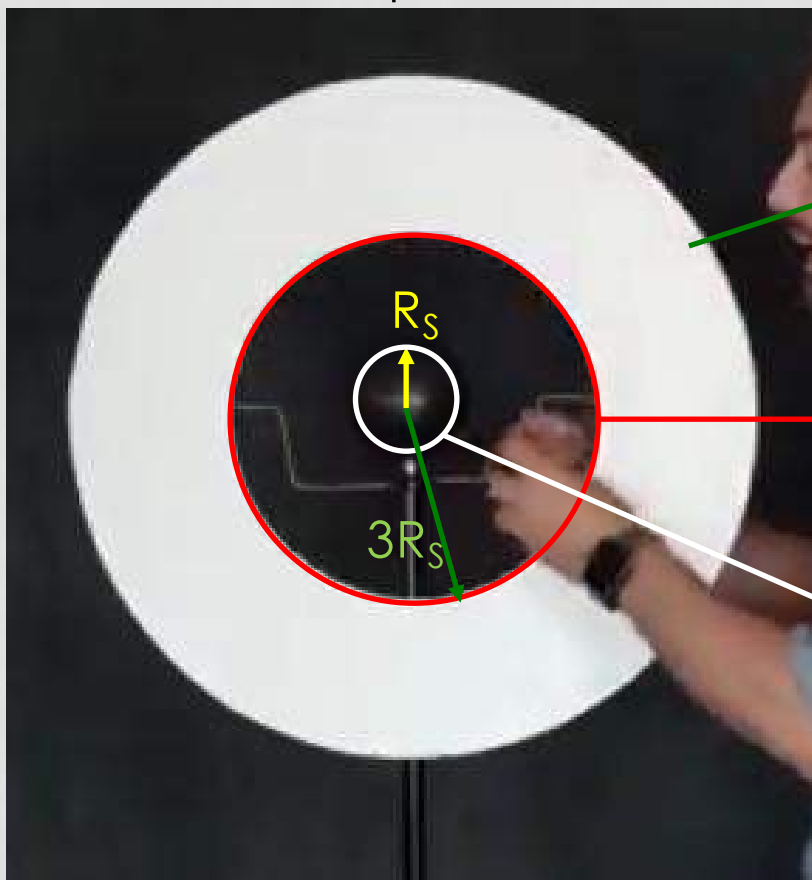


# ENTENDENDO O HALO LUMINOSO



# ENTENDENDO O HALO LUMINOSO

Vista superior



Disco de Acreção

Órbita Circular estável mais interior (ISCO)

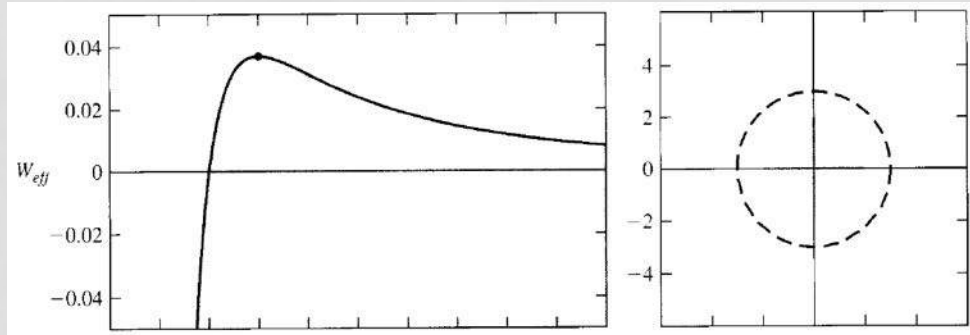
Horizonte de eventos do BN

# JÁ NO CASO DA LUZ...

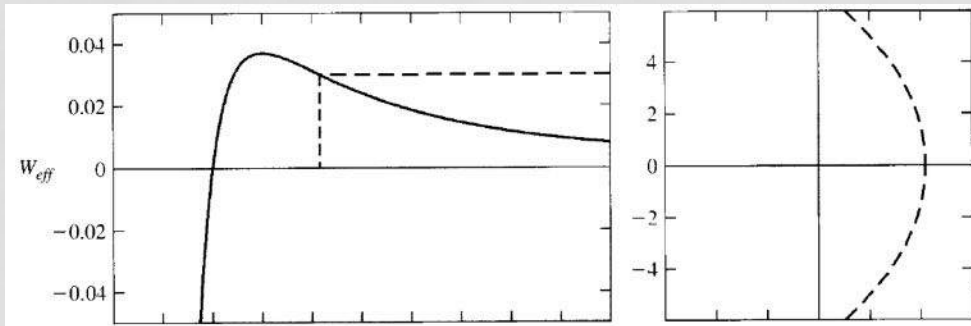


<https://www.youtube.com/watch?v=zUyH3XhpLTo&feature=youtu.be&fbclid=IwAR2MnVQL9iz6V4n1983vdf2Oa9tMiu5RUhEWuT76SSxzCXt1fnsNTbyhKr8&app=desktop>

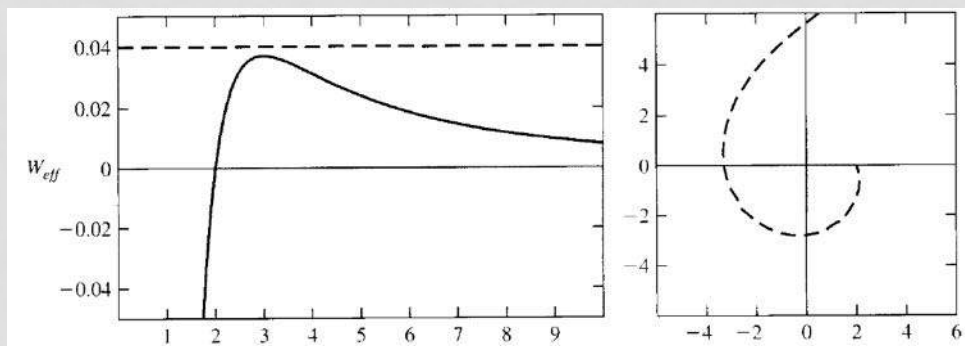
# JÁ NO CASO DA LUZ...



Órbita Circular (Instável)



Espalhamento da luz



Luz entrando no horizonte

# RESPONDENDO A PERGUNTA 1



<https://www.youtube.com/watch?v=zUyH3XhpLTo&feature=youtu.be&fbclid=IwAR2MnVQL9iz6V4n1983vdf2Oa9tMiu5RUhEWuT76SSxzCXt1fnsNTbyhKr8&app=desktop>



# RESPONDENDO A PERGUNTA 2

Vista superior



<https://www.youtube.com/watch?v=zUyH3XhpLTo&feature=youtu.be&fbclid=IwAR2MnVQL9iz6V4n1983vdf2Oa9tMiu5RUhEWuT76SSxzCXt1fnsNTbyhKr8&app=desktop>

A sombra central é bem maior do que o horizonte de eventos!



Devido à grande distorção da luz nesta superfície, podemos quase que ver a parte de trás dela!

# RESPONDENDO A PERGUNTA 3

The Event Horizon Telescope Collaboration, *First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring*, *Astrophysical Journal Letters*, **875:L5** (2019)

Efeito Doppler Relativístico!



E assim, um lado deste disco de acreção  
vai parecer muito mais brilhante do que o outro

<https://www.youtube.com/watch?v=z0yH3xnPLr0&redir=youu.be&rbcid=IWAKZMNVQL9iz6V4n1983vdf2Oa9tMiu5RUhEWuT76SSxzCXt1fnsNTbyhKr8&app=desktop>

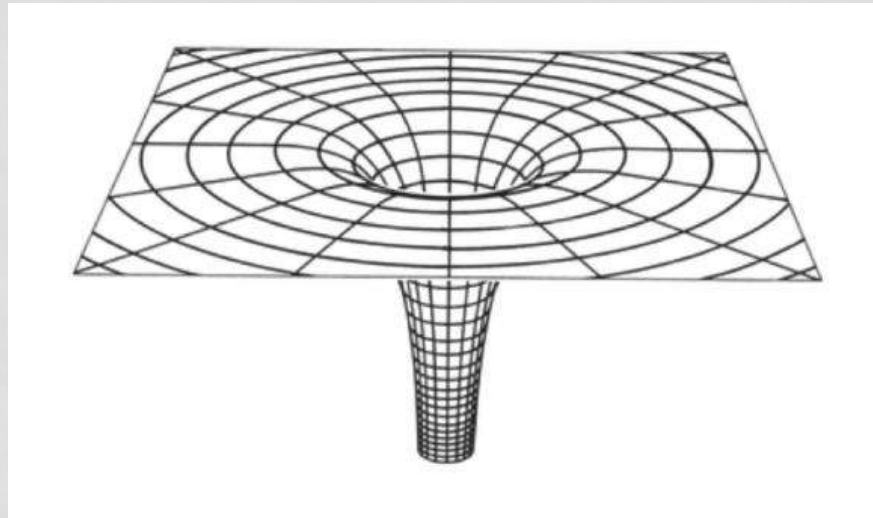
Aproximando do observador  
(mais brilhante)

Afastando-se do observador  
(menos brilhante)

# MUITO OBRIGADO!

Termodinâmica

Gravitação



Mecânica Quântica

Palestra de A. Strominger (**Buracos negros são os osciladores harmônicos do século XXI**)  
<http://www.perimeterinstitute.ca/videos/black-holes-harmonic-oscillators-21st-century>