

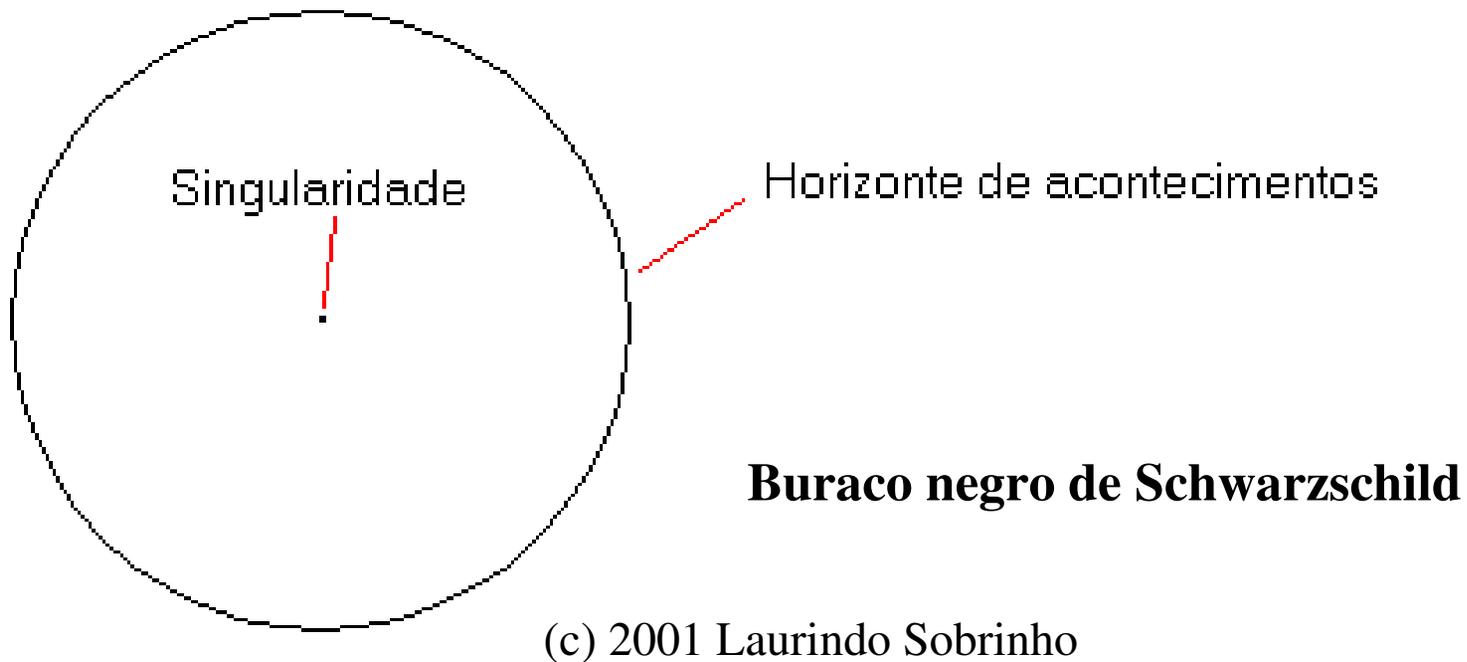
Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira

Buracos Negros: Viagem ao lado de lá

Laurindo Sobrinho

IV Semana da Astronomia
20 de Julho de 2004

Um **Buraco negro** é uma região onde a **força de gravidade** é tão intensa que nem a própria **luz** pode escapar.



Os buracos negros são objectos previstos pela Física!

Para calcular distâncias no **espaço-tempo de Schwarzschild** utilizamos a **métrica de Schwarzschild**.

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

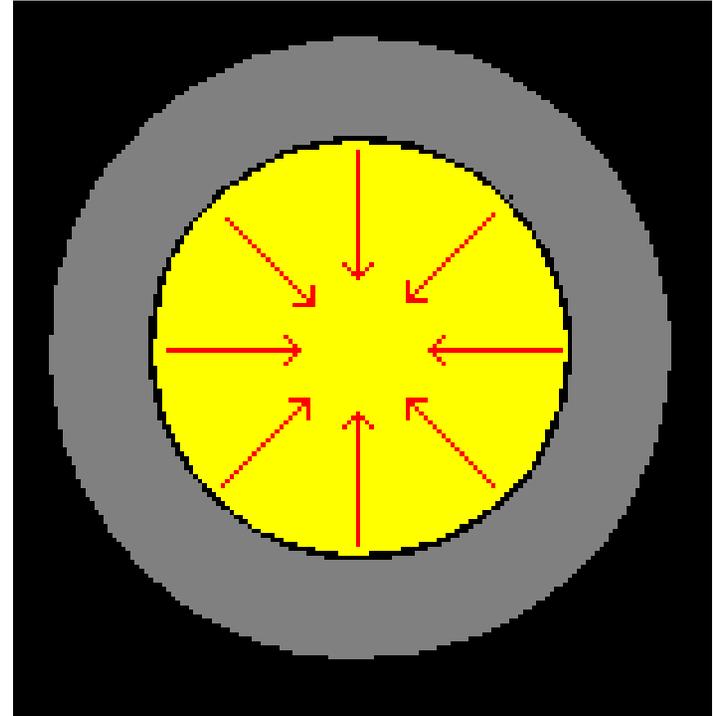
A métrica aqui escrita em **coordenadas esféricas**, inclui também a coordenada tempo (t) e informação acerca da massa (m).
Verifica-se que a métrica apresenta dois pontos sensíveis:

$$r = 0$$

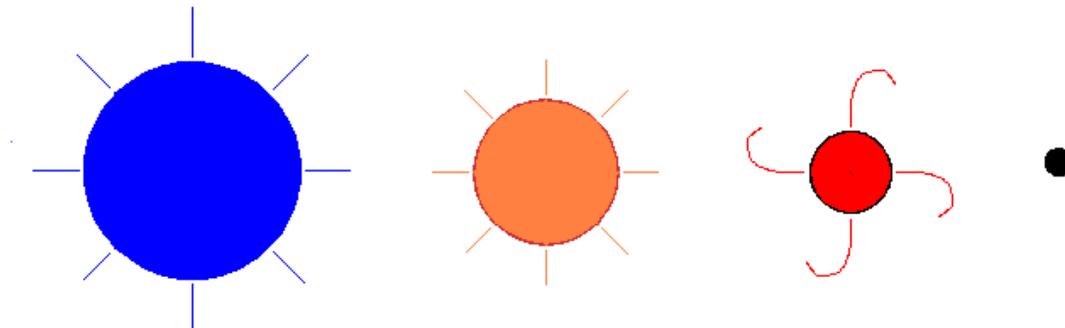
$$r = 2m$$

Formação de buracos negros:

- **Colapso gravitacional** de uma estrela na fase final da sua vida
- **Colapso gravitacional** da região central de uma galáxia
- **Colapso gravitacional** de regiões no universo primordial (nos instantes seguintes ao **Big Bang**).



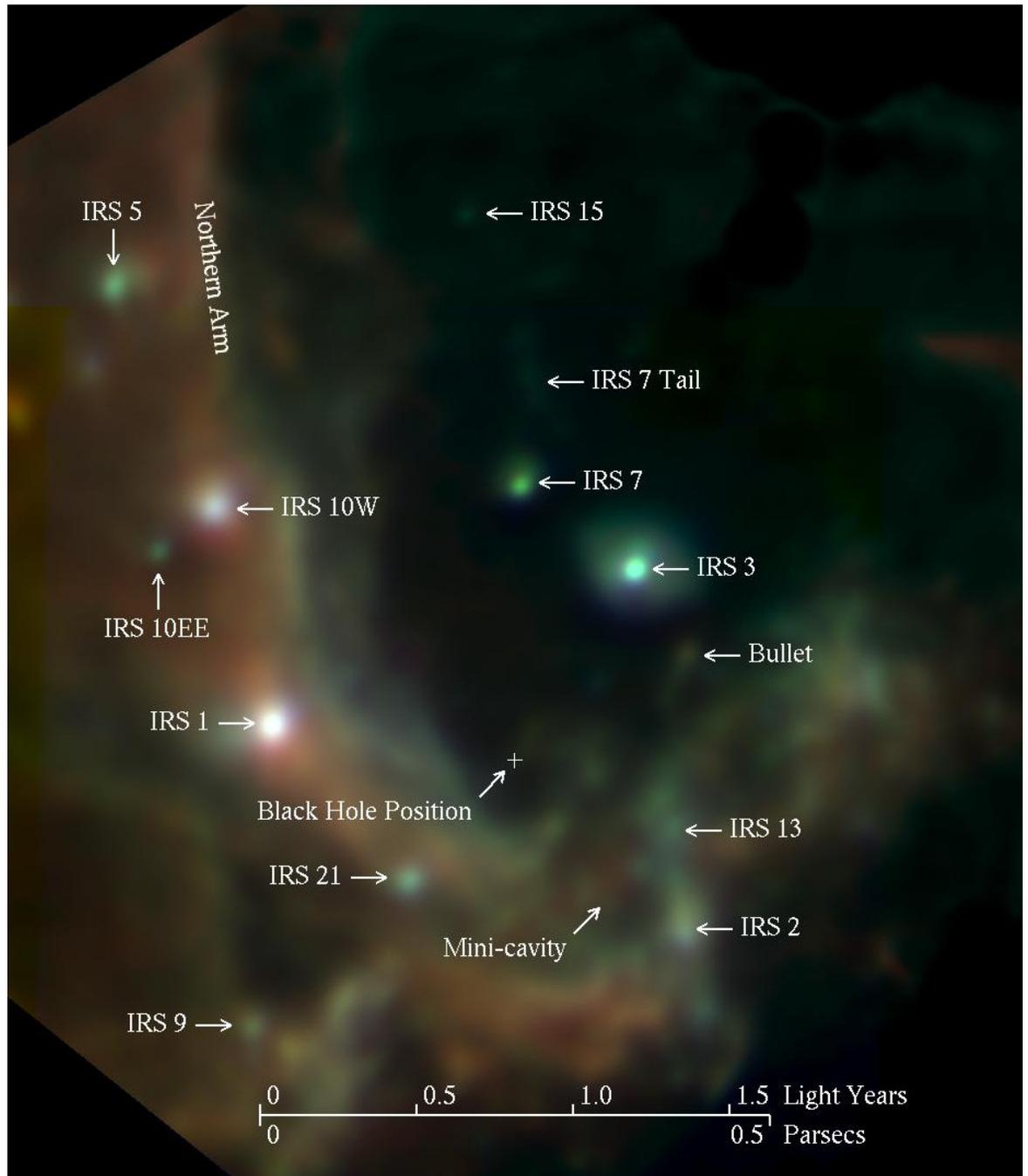
(c) 2001 Laurindo Sobrinho



Existem fortes evidências que apontam para a presença de um Buraco Negro supermassivo no centro da nossa Galáxia - **Via Láctea**

$$M = 3\,000\,000 M_{\odot}$$

MIRLIN -
<http://irastro.jpl.nasa.gov/GalCen/galcen.html>



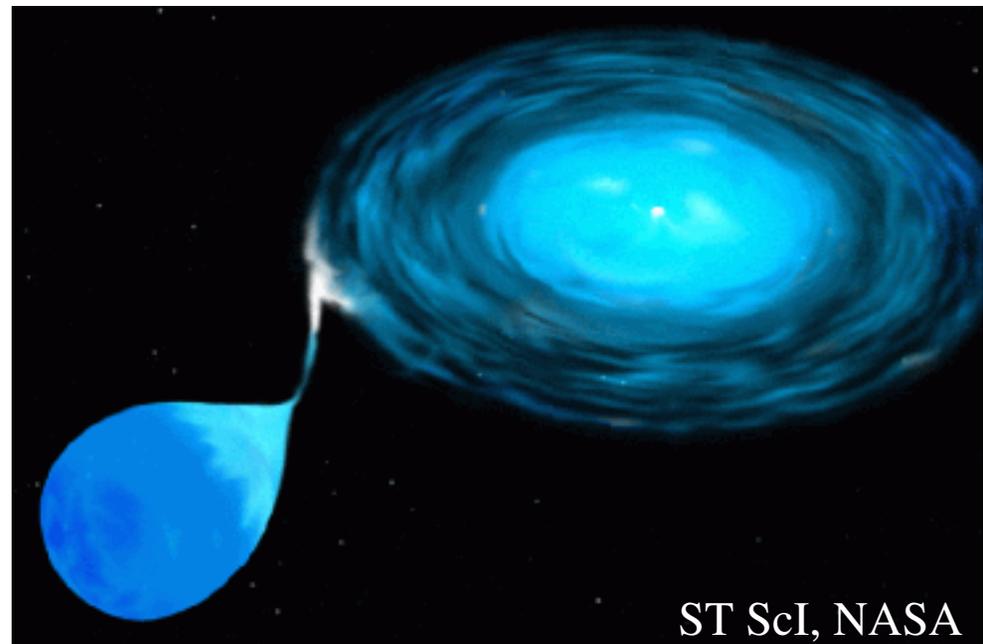
Cygnus X1 é uma fonte de **raios X** que, juntamente com a estrela **gigante azul HD 226868**, forma um sistema binário.

A massa de Cyg X1 situa-se entre **6 e 13 M_{\odot}** .

Temos quase a certeza que Cyg X1 é um buraco negro!



Imagem de Raios X



ST ScI, NASA

Existem muitos outros objectos candidatos a buraco negro:

Supermassivos:

Via Láctea

M106 - NGC 4258

M31 - NGC 224

NGC 3115

M87 - NGC 4486

NGC 821

NGC 1023

NGC 4291

IC 1459

NGC 4486B

NGC 7052

.....

Massa estelar:

Cyg X1

A0620-00

LMC X-3

LMC X-1

GX 339-4

GS 2000+250

GRS 1009-45

4U 1630-47

SAX J1819.3-258

GRO J0422+32

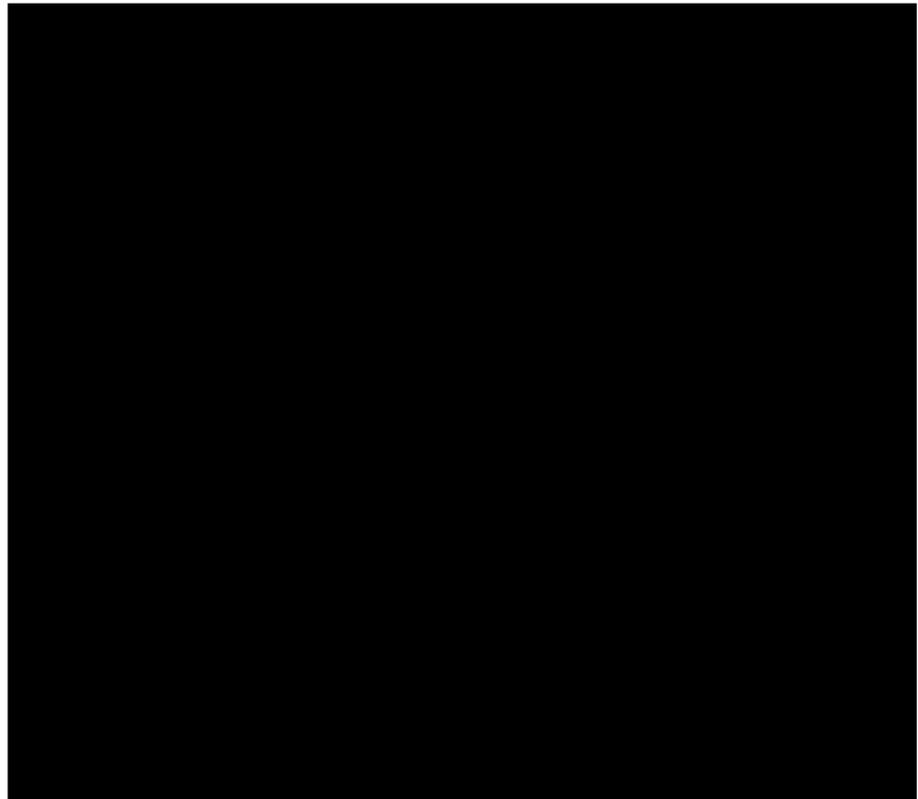
....

Admite-se voluntário(a) para viagem a Buraco Negro

Partida : Julho de 2004

Regresso : a confirmar

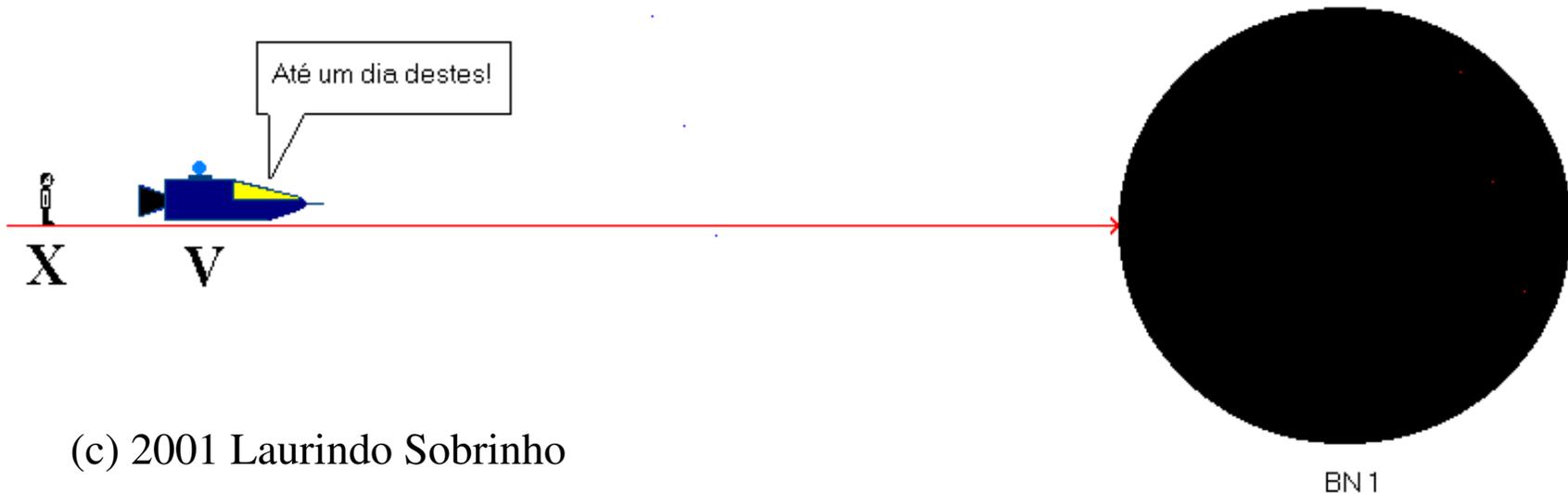
Requisitos : conhecimento
de línguas (em especial
Matemática), especialista
em **Relatividade Geral** e
Mecânica Quântica.



Imagine-se num lugar destes !!!



Viagem a um
buraco negro
de Schwarzschild



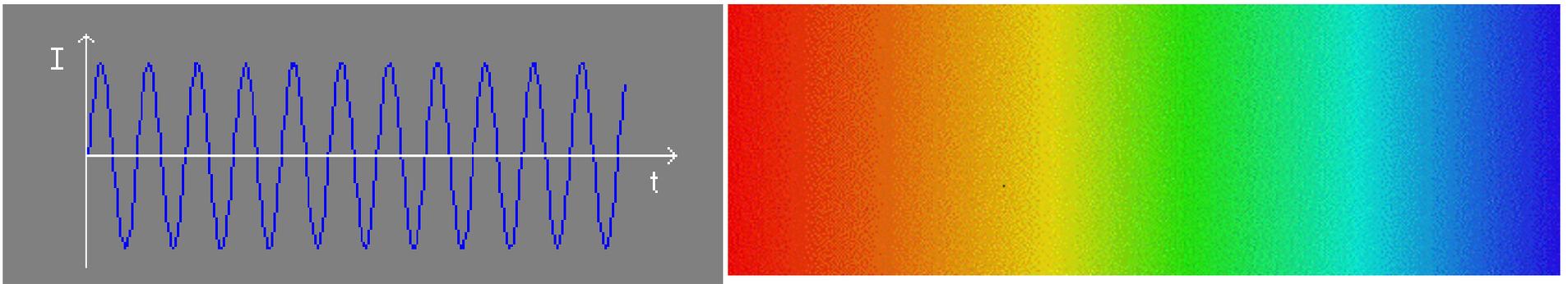
Os dois observadores sincronizam os respectivos relógios e despedem-se.

Obs X – À medida que a nave se aproxima do horizonte de acontecimentos os relógios deixam de estar sincronizados. **O relógio da nave aparenta andar cada vez mais devagar.** Os segundos dele parecem cada vez maiores! **O observador X está a envelhecer mais rapidamente que o observador V!!!**

Vamos supor que na nave existe uma **luz de sinalização azul**.

O que é um raio de luz azul ?

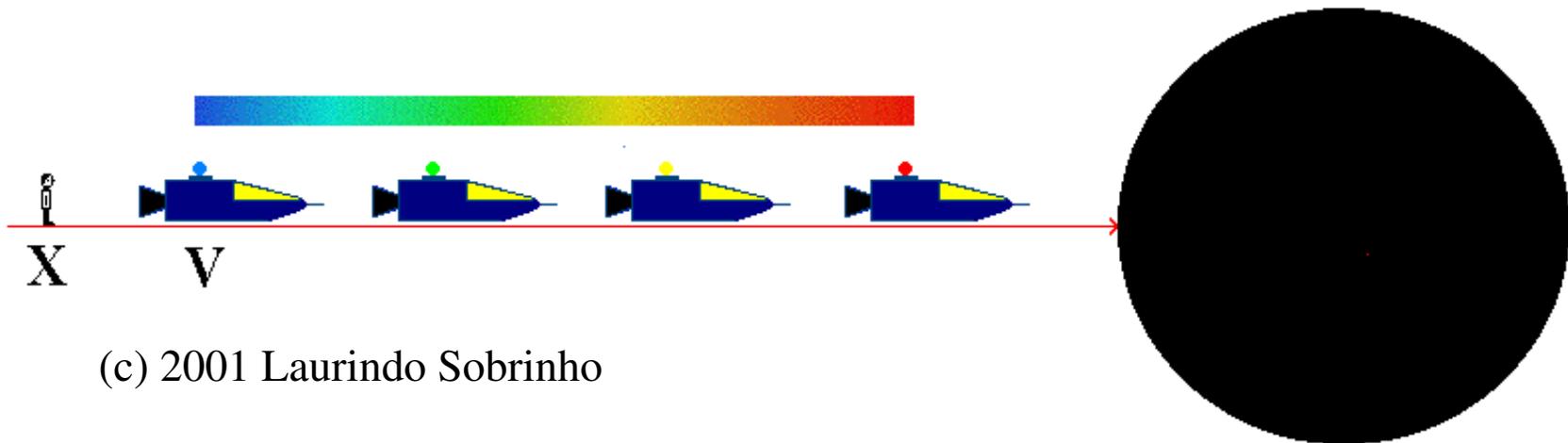
É uma onda electromagnética que efectua **667 000 000 000 000** oscilações por segundo.



Mas, se com a aproximação do horizonte de acontecimentos, o tempo passa cada vez mais devagar então a luz de sinalização vai oscilar mais lentamente. Isso implica que, para o **observador X**, a luz será **cada vez menos azul**. Passará pelo verde, amarelo, vermelho...



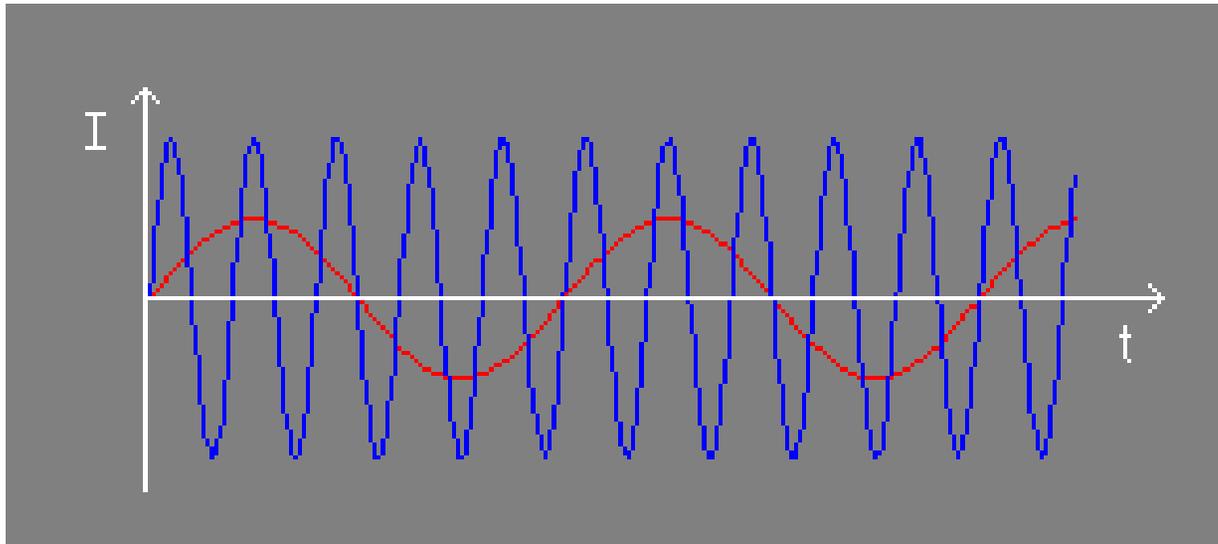
Espectro electromagnético



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

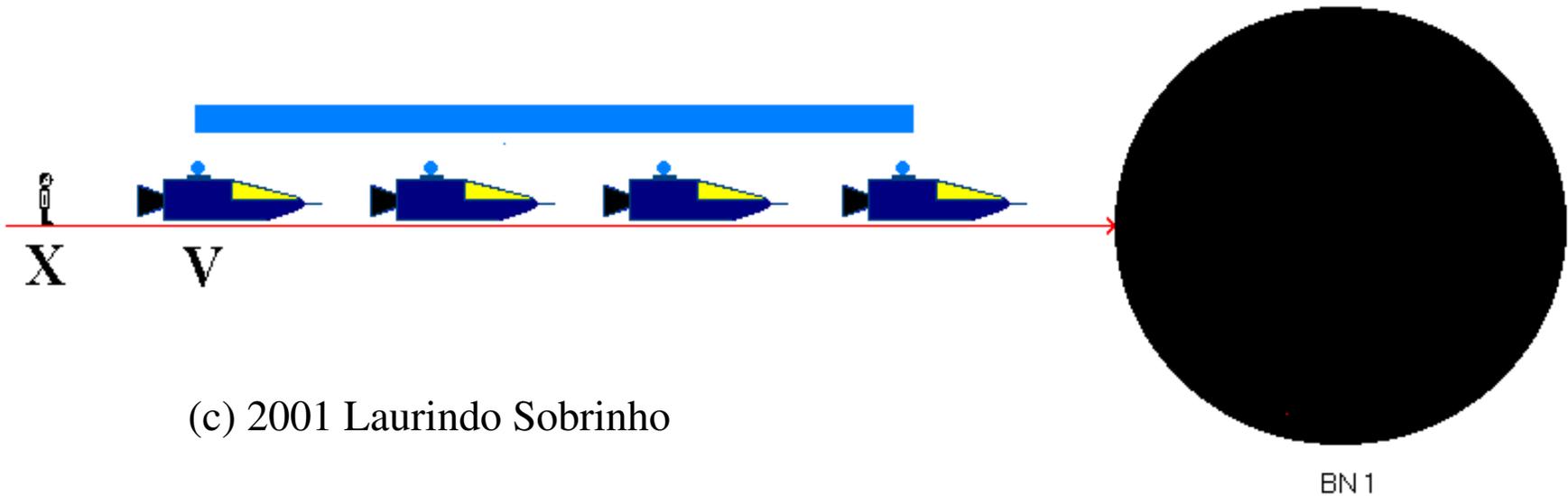
Este fenómeno chama-se
Desvio para o vermelho (RedShift)
 (de origem gravitacional).

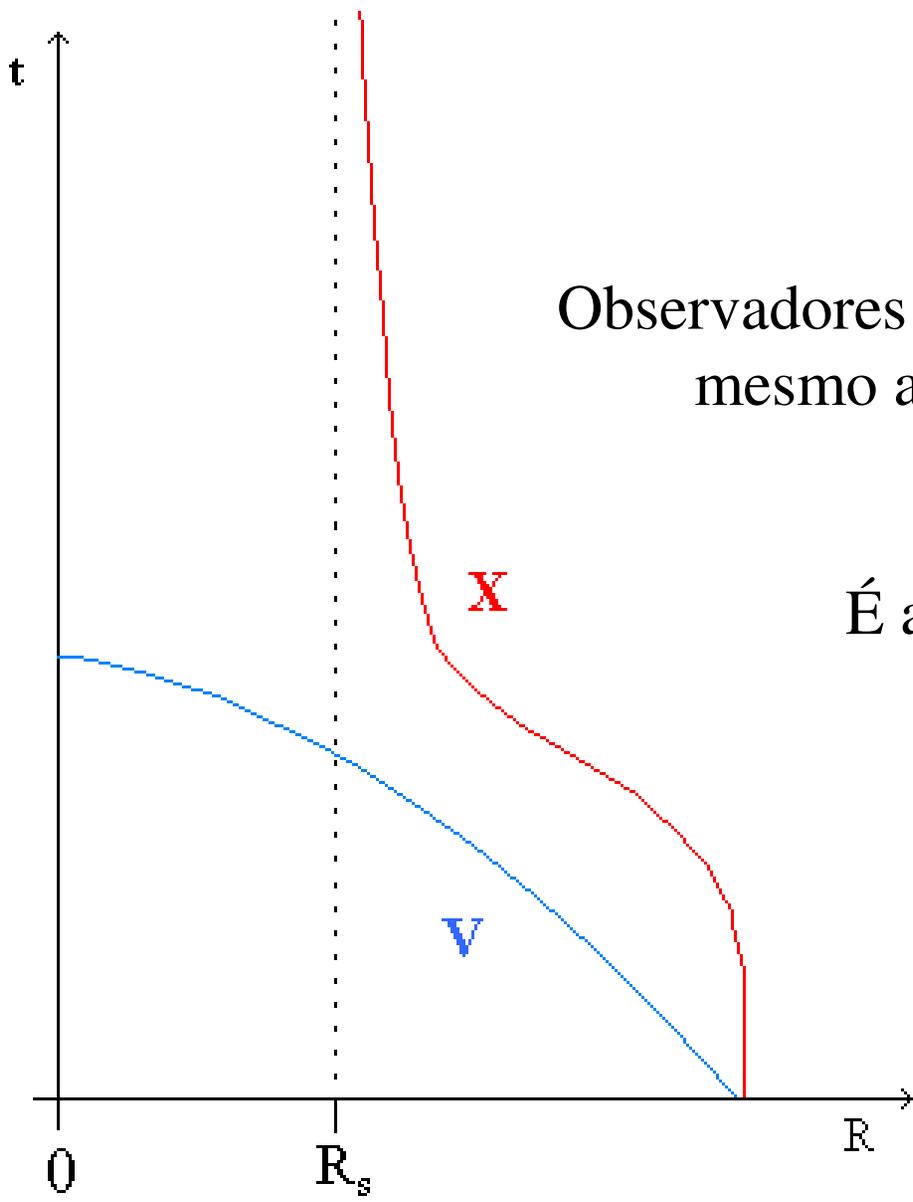
Depois do vermelho a luz deixa de ser visível mas continua a ser detectável no domínio dos raios infra-vermelhos e depois como uma onda de rádio. Além disso a radiação é cada vez menos intensa.



Do ponto de vista do observador X a nave **nunca** chega ao **horizonte**. No entanto como a luz que vem da nave é cada vez menos intensa esta acaba por ser indetectável. Haverá um ponto em que essa radiação será confundível com a radiação de fundo.

Obs V - O nosso voluntário chega ao horizonte de acontecimentos, passa para o lado de lá, num tempo **finito** de acordo com o seu relógio. A sua luz de sinalização continua azul como sempre.





Observadores diferentes podem ver o mesmo acontecimento de forma diferente.

Ambos têm razão.
É aqui que entra a palavra **RELATIVIDADE.**

(c) 2001 Laurindo Sobrinho

Órbitas Circulares

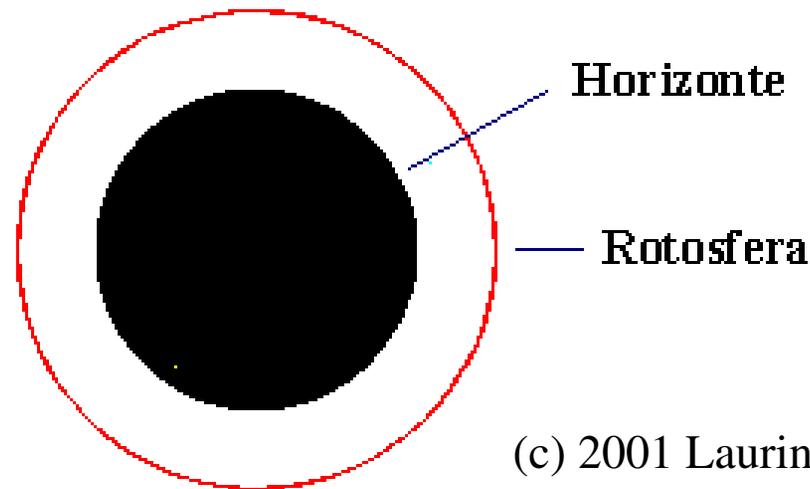
Um objecto permanece em órbita se tiver a velocidade adequada. Quanto mais baixa a órbita maior terá de ser essa velocidade.

No caso de um buraco negro de Schwarzschild uma órbita circular de raio $3m$ é permitida se o objecto viajar à velocidade da luz.

Órbitas fechadas de raio inferior não são permitidas.

$$R_s = 2m \quad \longrightarrow \quad 3m = 1.5R_s$$

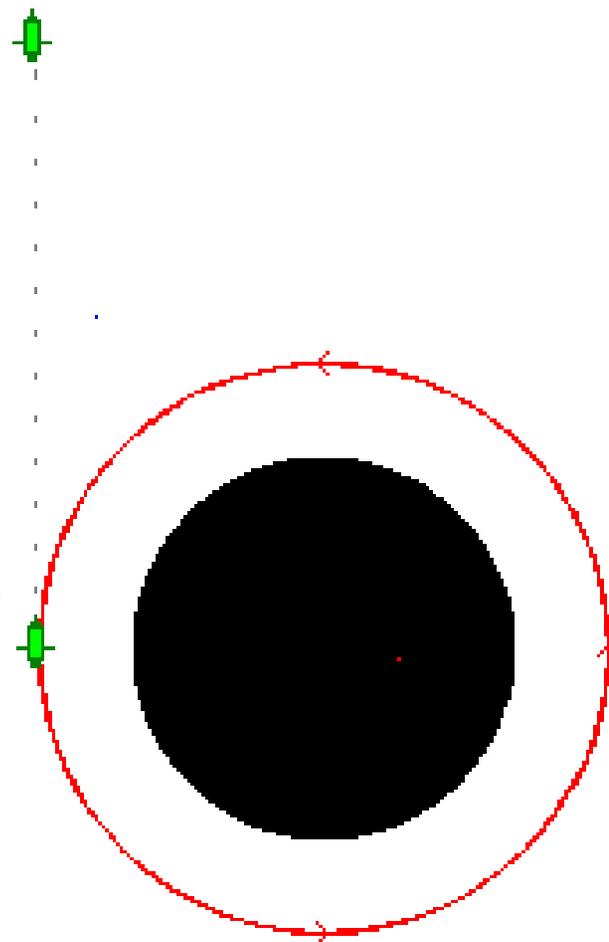
Se um raio de luz for emitido perpendicularmente ao horizonte de acontecimentos a uma distância de exactamente 1.5 raios de Schwarzschild ($1.5 R_s$) então esse raio de luz irá descrever uma órbita circular.



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

Esta é a única órbita circular possível para os raios de luz. É uma órbita **instável**. Qualquer perturbação levará o raio de luz a escapar ou a cair para o buraco negro. A superfície esférica de raio $1.5 R_s$ chama-se **ROTOSFERA**.

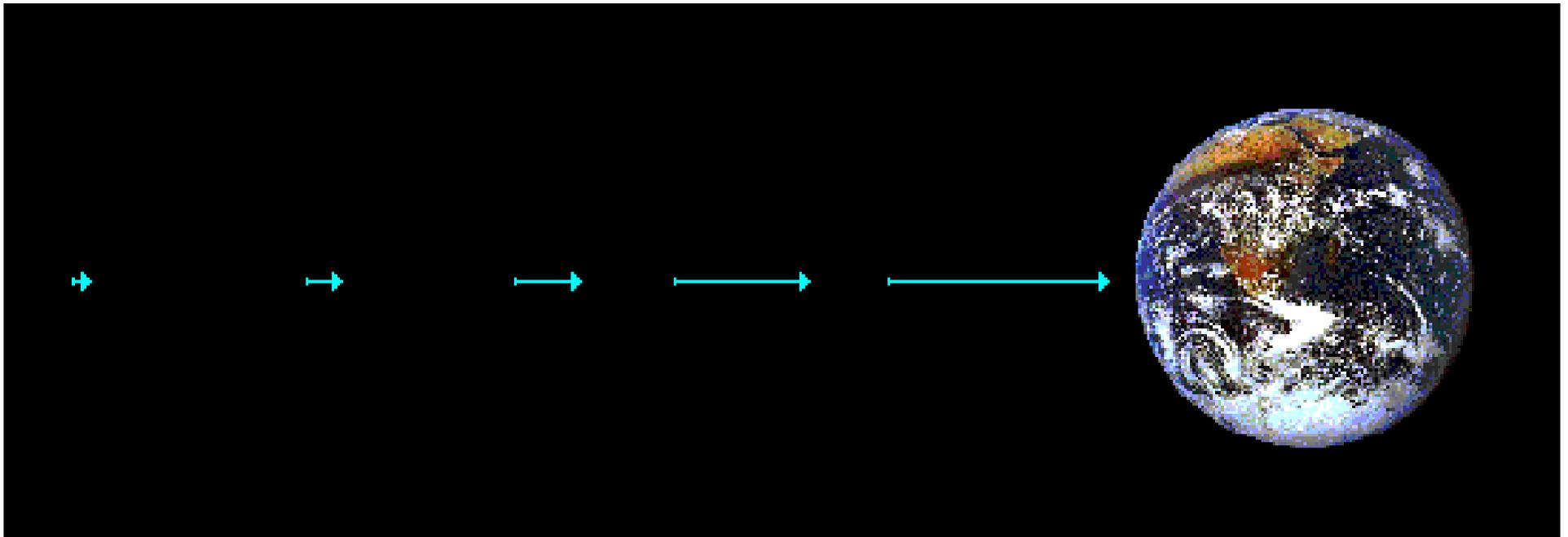
**Está uma nave igual
à nossa lá adiante !**



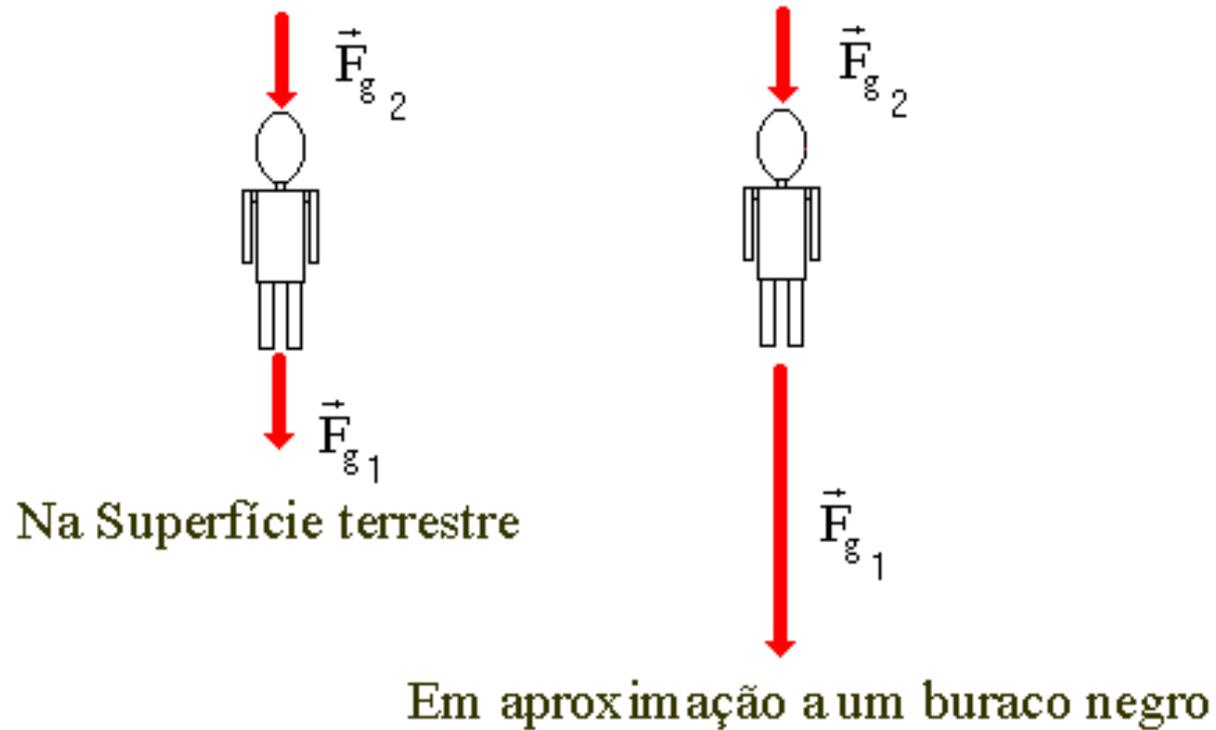
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

Forças de maré

A aceleração da gravidade diminui com a distância ao centro do planeta. À medida que subimos em altitude ficamos sujeitos a uma força gravítica menor.



(c) 2001 Laurindo Sobrinho



A diferença entre as duas forças chama-se **força de maré**.

$$\Delta F = F_{g1} - F_{g2}$$

Seríamos alvo de um processo de esticamento chamado **esparguetificação**.



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

No caso dos buracos negros mais pequenos a **esparguetificação** começa ainda do lado de fora do horizonte. Se fosse esse o caso do exemplo anterior o nosso voluntário estaria feito num 'esparguete' antes de ter atingido o horizonte de acontecimentos.

Evitando a Singularidade

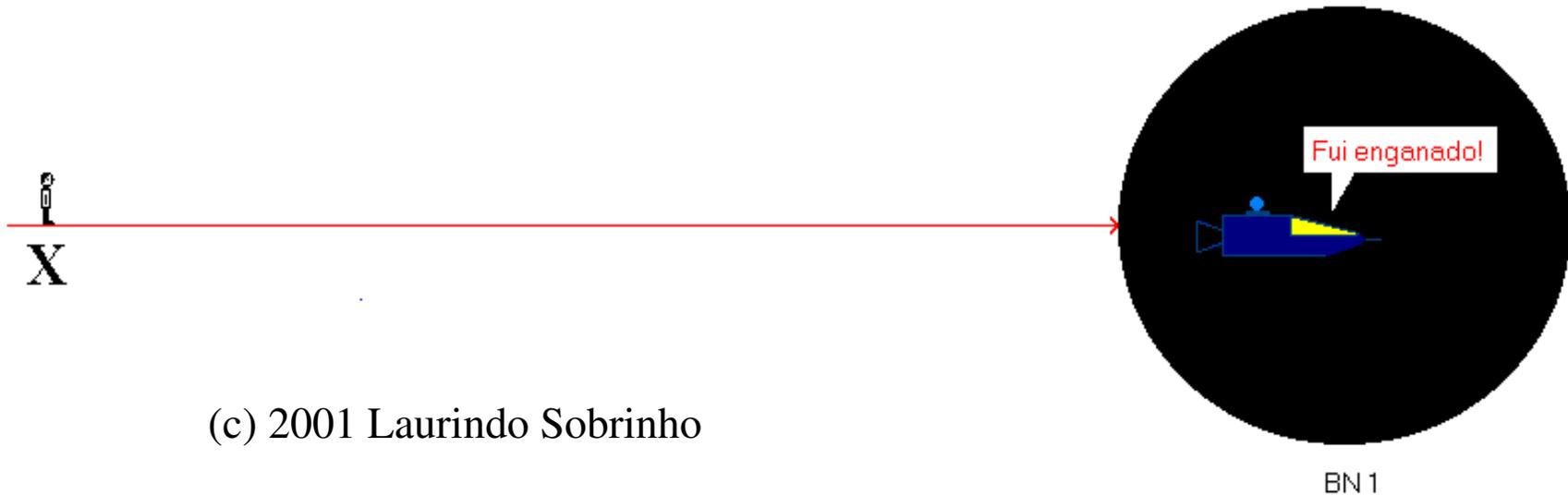
Uma vez ultrapassado o **horizonte de acontecimentos** será possível evitar a **singularidade** ?

NÃO !!!

Qualquer tentativa para escapar, ficar em repouso ou a orbitar a singularidade só faz com que esta seja atingida ainda mais rapidamente.

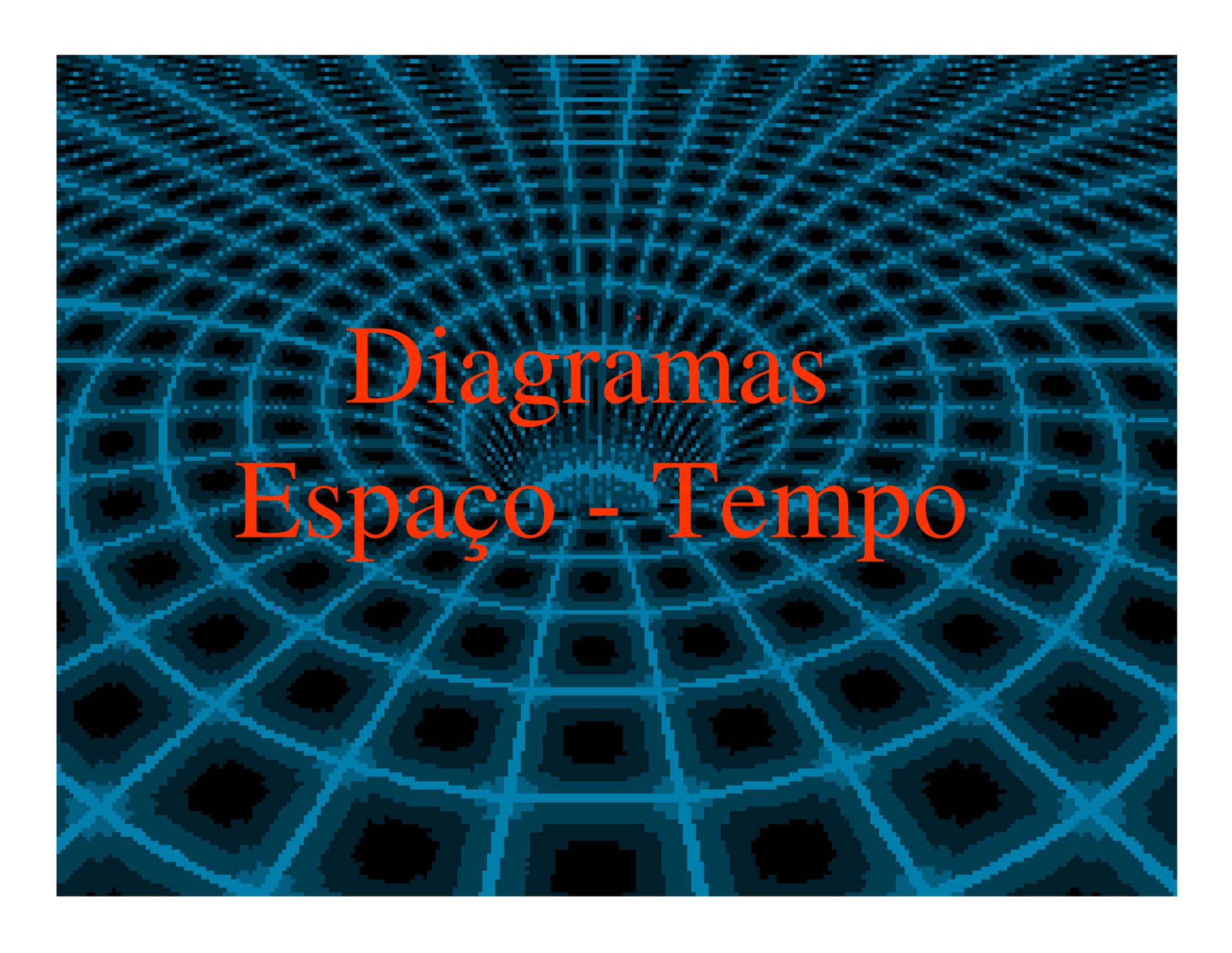
O melhor é desligar os reactores e deixar-se ir !!!

A singularidade está no **futuro** do nosso voluntário e ele nada pode fazer para a evitar.



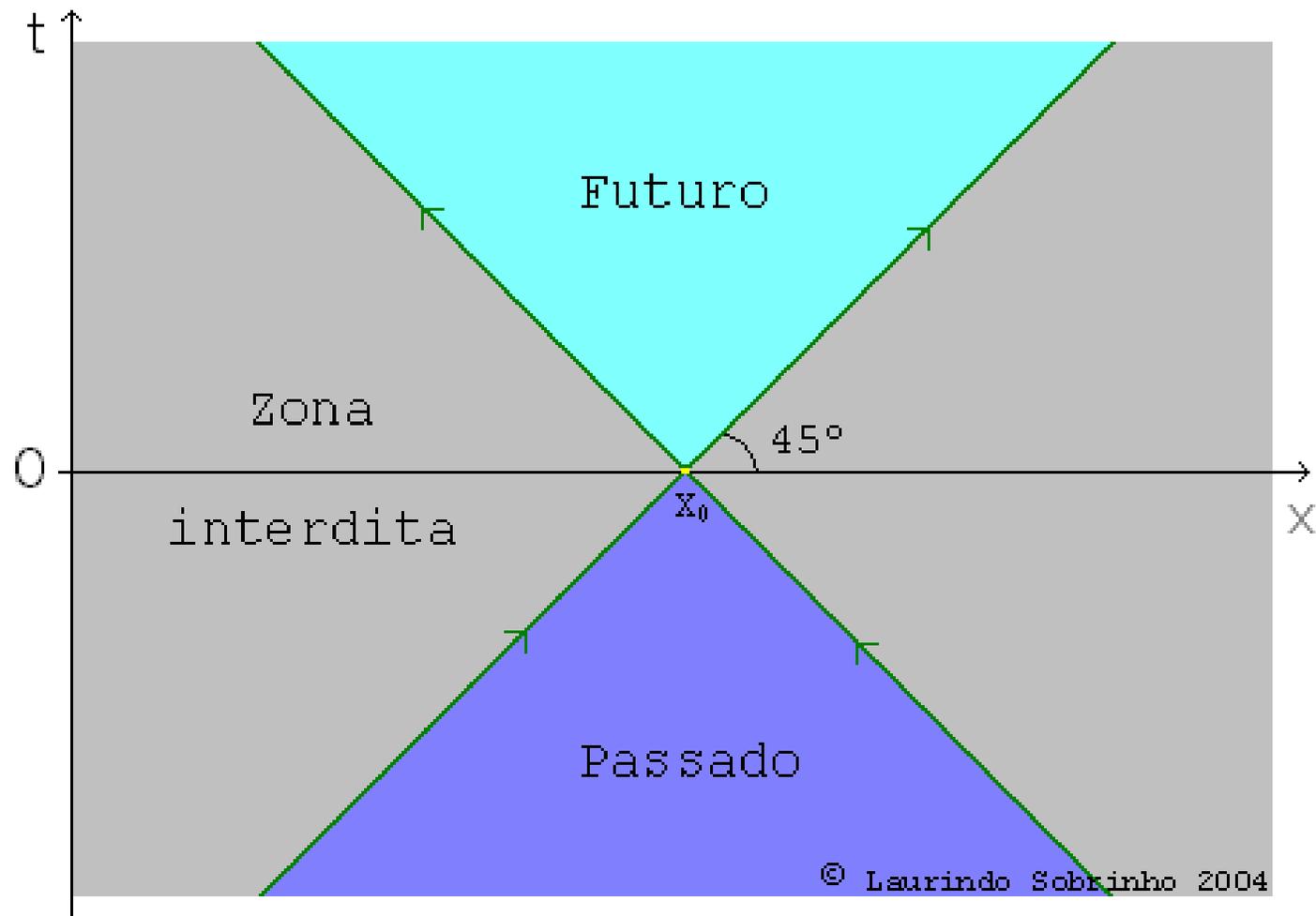
Esta parte final da viagem é super rápida
(menos de 10 segundos).

**No interior do buraco negro espaço e tempo trocam de
papeis não sendo, por isso, possível estar em repouso num
ponto do espaço!**



Diagramas Espaço - Tempo

Diagrama de Minkowski para o espaço-tempo **plano**



Trajectórias no espaço-tempo de Minkowski

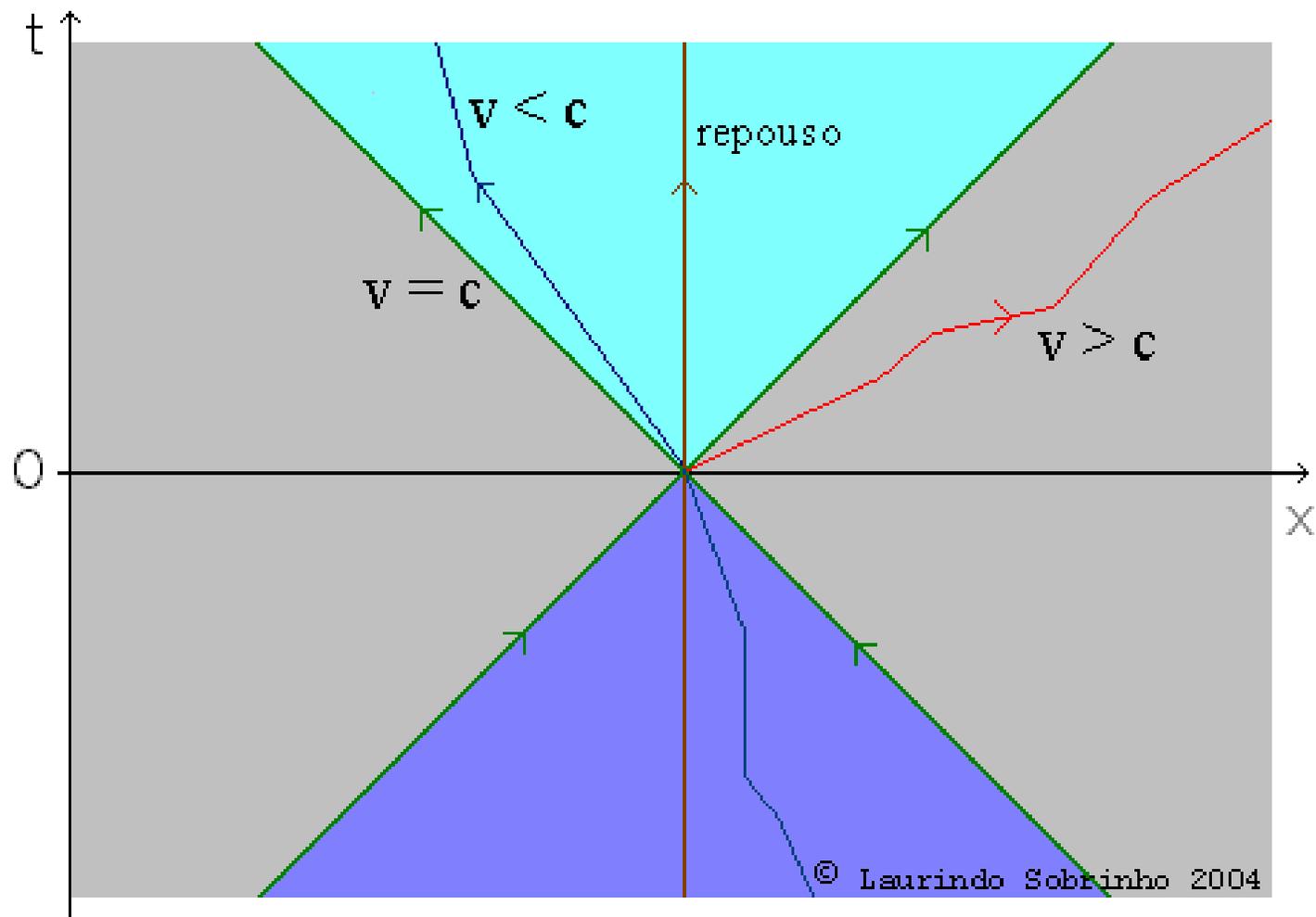
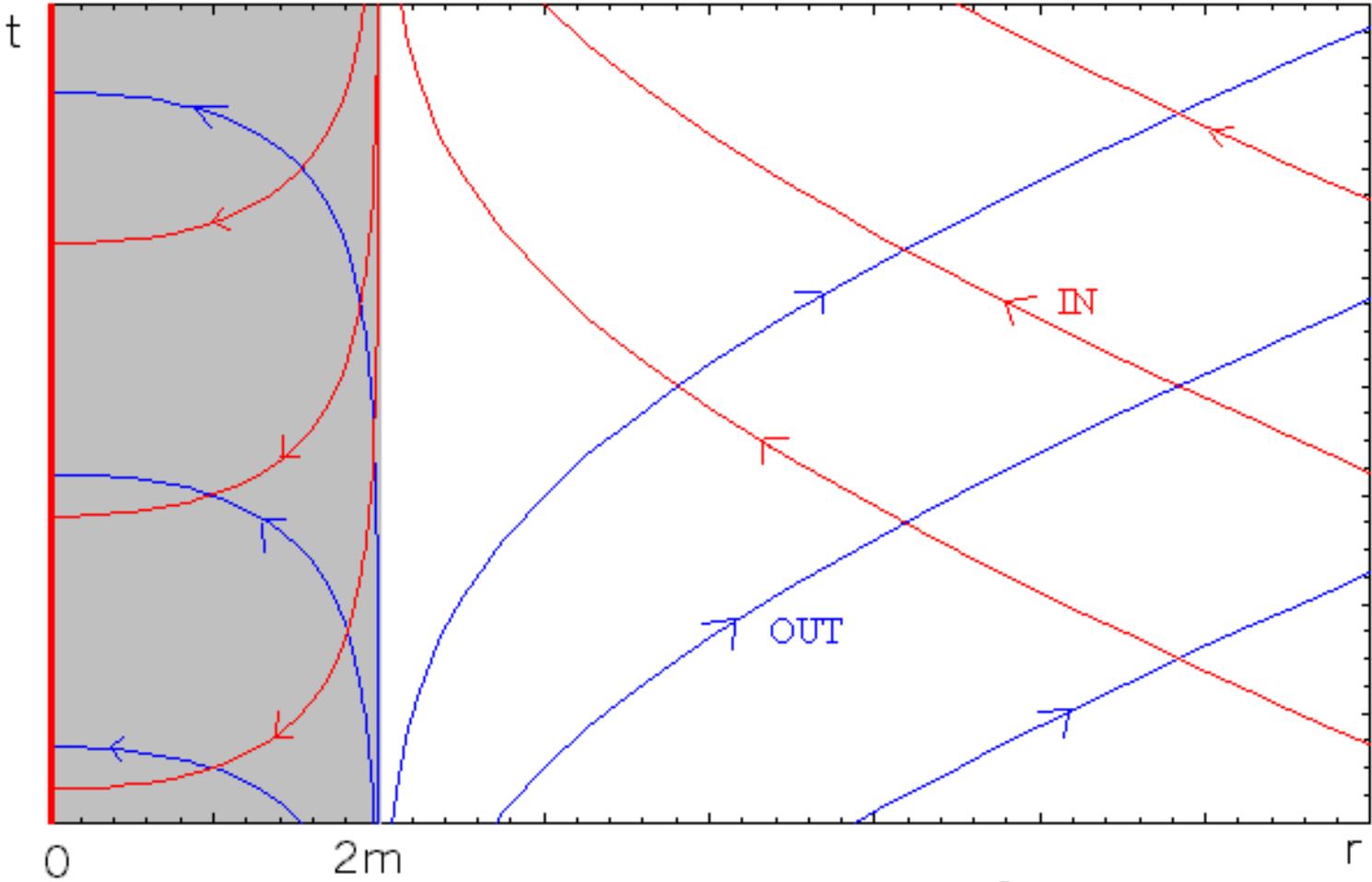
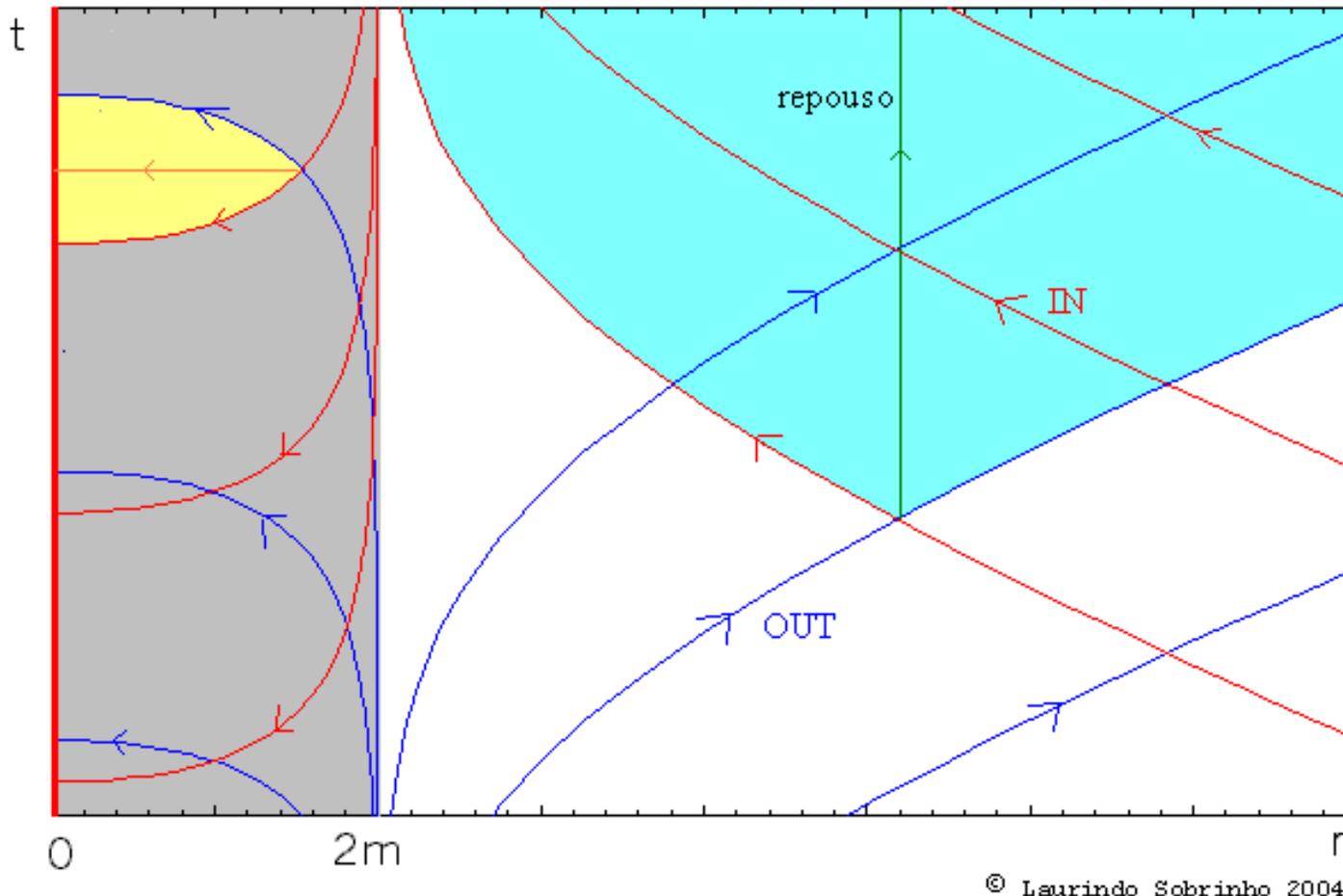


Diagrama espaço-tempo para um buraco negro de Schwarzschild





Do lado de cá do horizonte é possível estar em **repouso** num ponto do espaço. Do lado de lá do horizonte isso não é possível e a singularidade faz sempre parte do futuro.

$$r = 2m$$

Singularidade matemática - pode ser evitada utilizando um sistema de coordenadas adequado.

$$r = 0$$

Singularidade física (real) - existe em todos os sistemas de coordenadas. Não pode ser evitada.

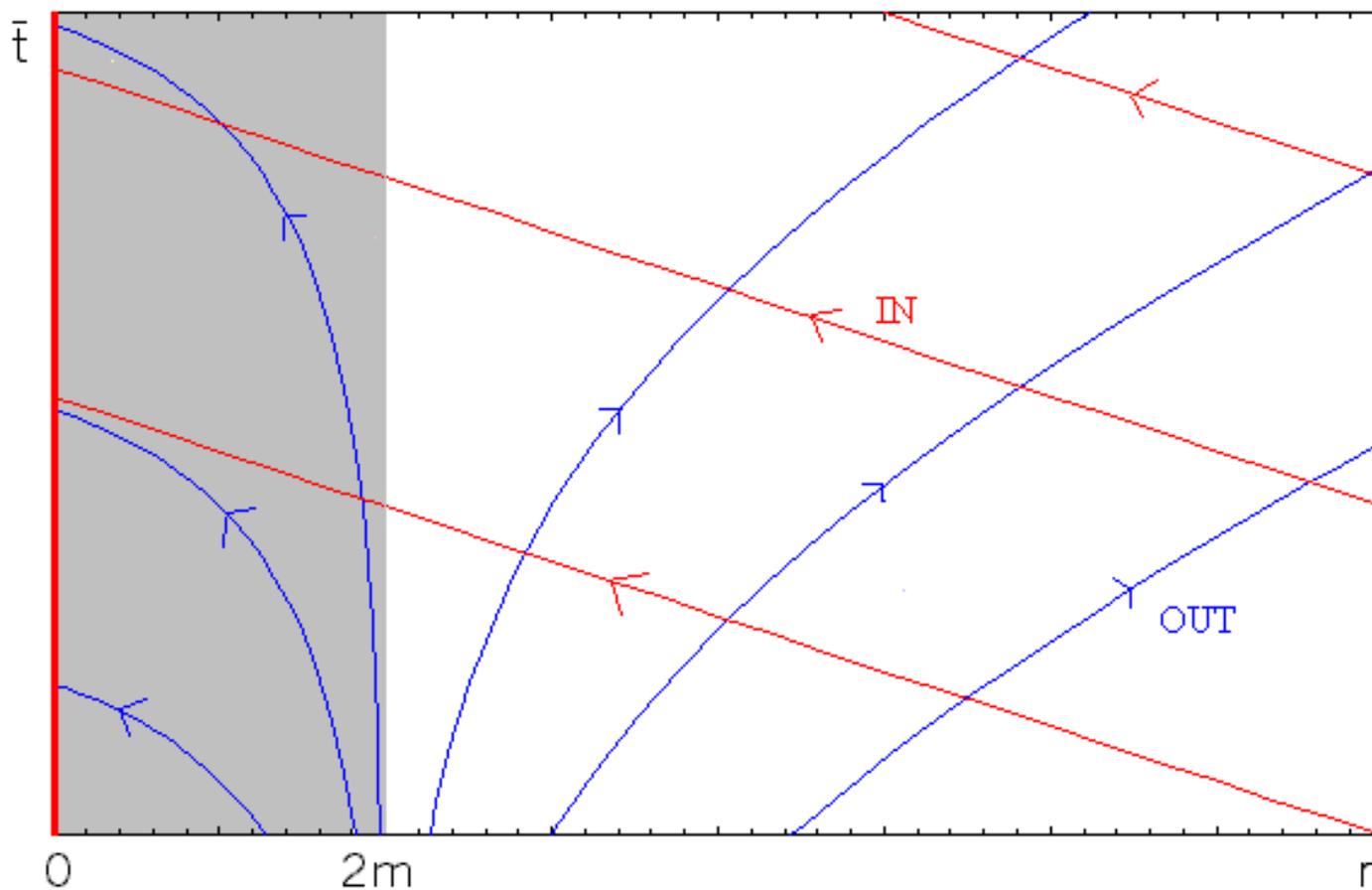
Mudança de coordenadas:

$$\bar{t} = t + 2m \ln (r-2m)$$

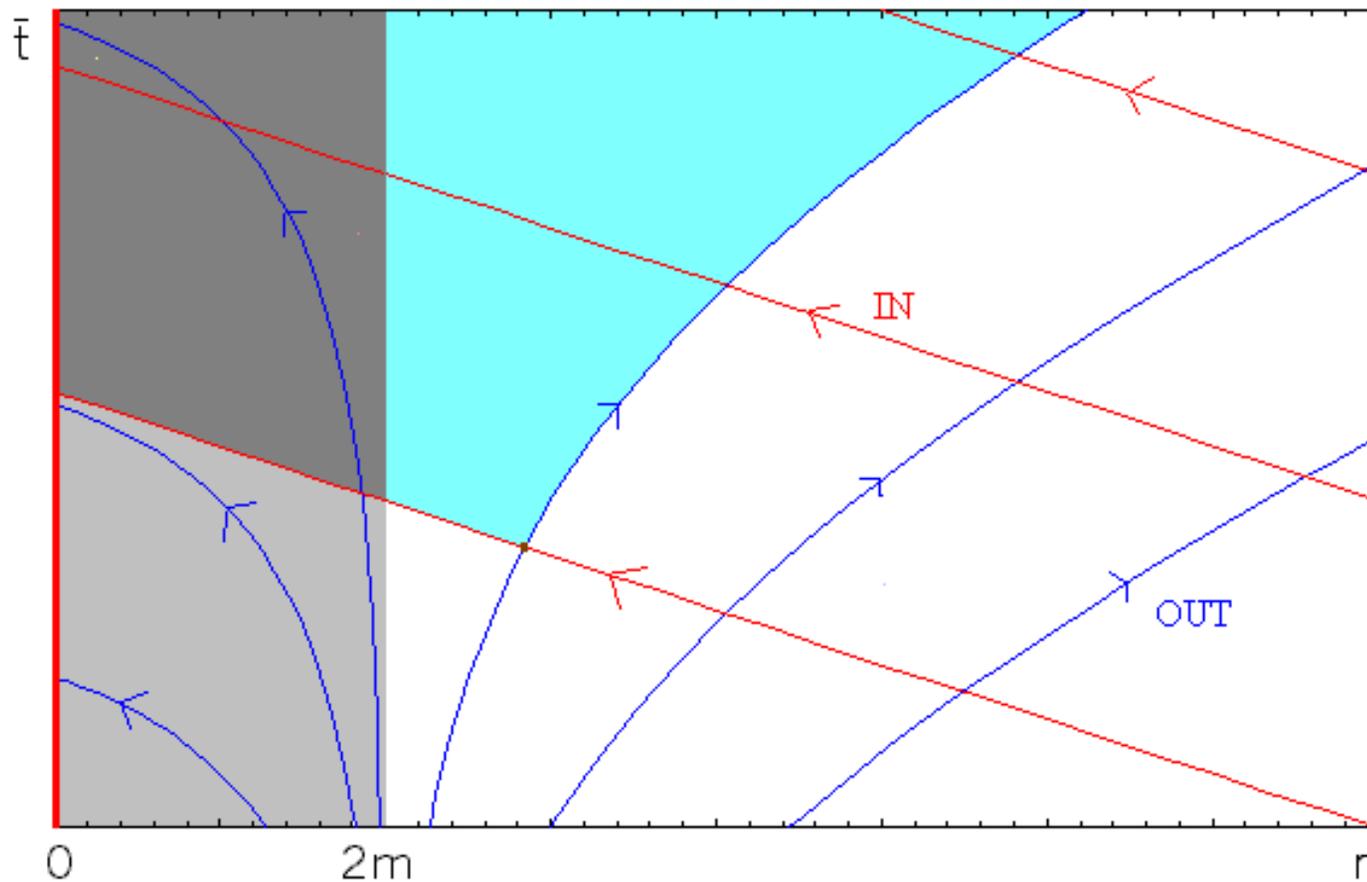


coordenada do **tempo avançado**

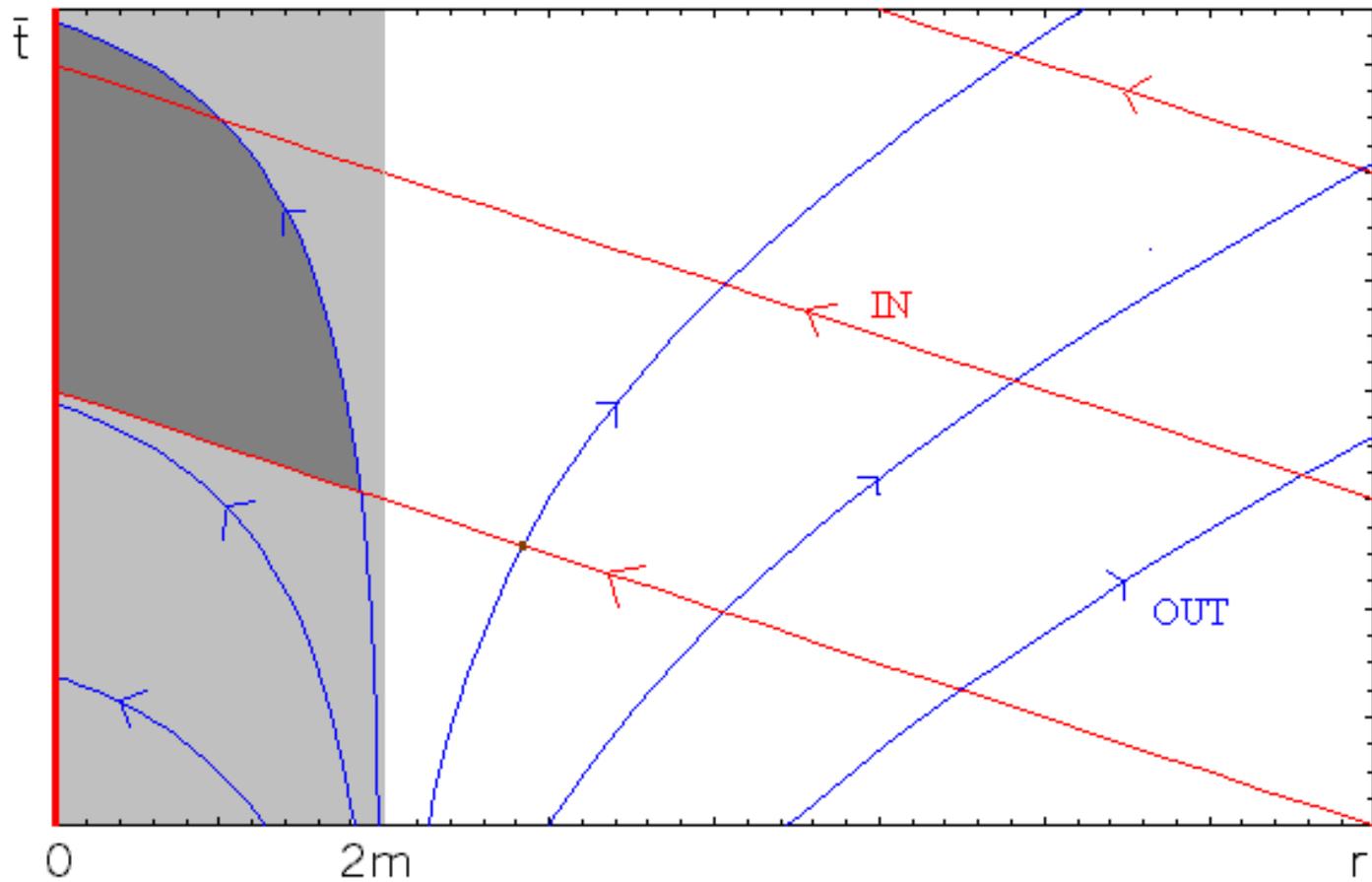
Utilizando o **tempo avançado** as geodésicas seguidas pelos fótons que se encaminham para o buraco negro são representadas por **linhas rectas**.



Futuro de um observador localizado **fora** do horizonte de acontecimentos de um buraco negro de Schwarzschild (com a coordenada **tempo avançado**).



Futuro de um observador localizado **dentro** do horizonte de acontecimentos de um buraco negro de Schwarzschild (com a coordenada **tempo avançado**). O futuro passa sempre pela **singularidade**.



A mudança de coordenadas:

$$\bar{t} = t + 2m \ln (r-2m)$$

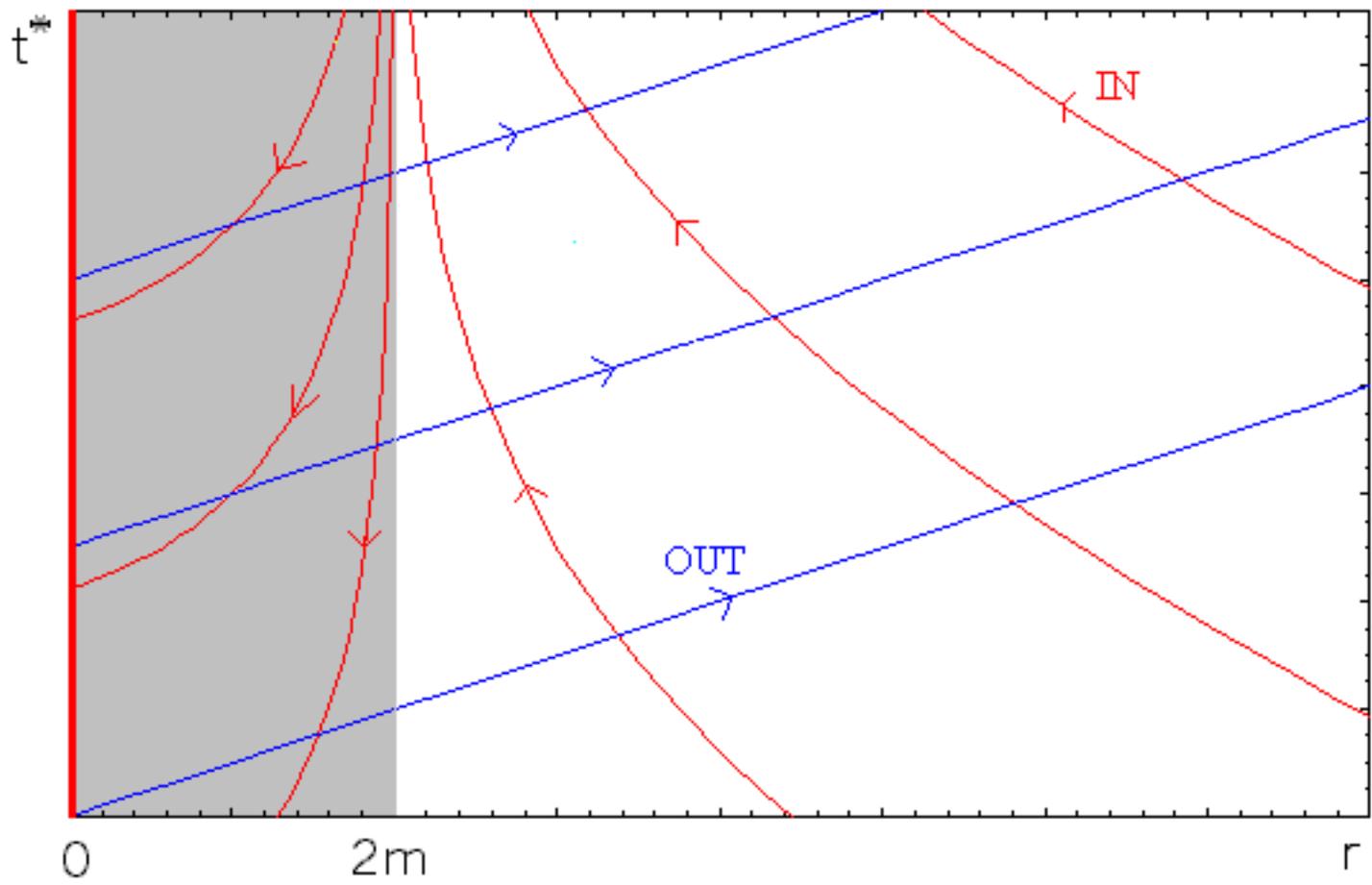
--- **tempo avançado**

foi introduzida de forma a remover a singularidade existente em $r=2m$. Existe no entanto outra mudança de coordenadas que permite remover igualmente essa singularidade.

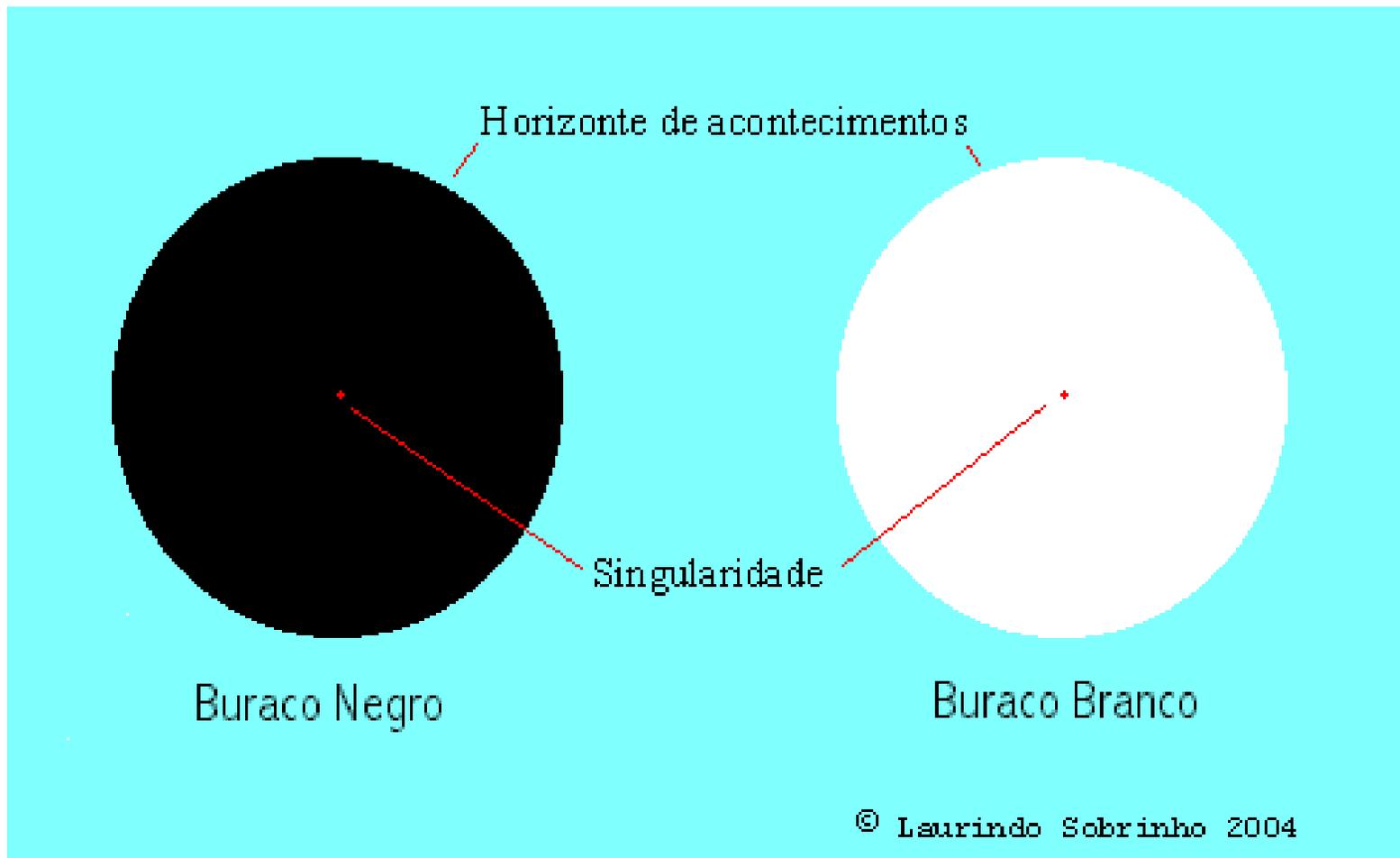
$$t^* = t - 2m \ln (r-2m)$$

--- **tempo retardado**

Utilizando o **tempo retardado** obtemos, no entanto, um objecto que já **não é um buraco negro**. Trata-se de um objecto de onde tudo pode sair mas nada pode entrar (a não ser que tenha velocidade superior à da luz).



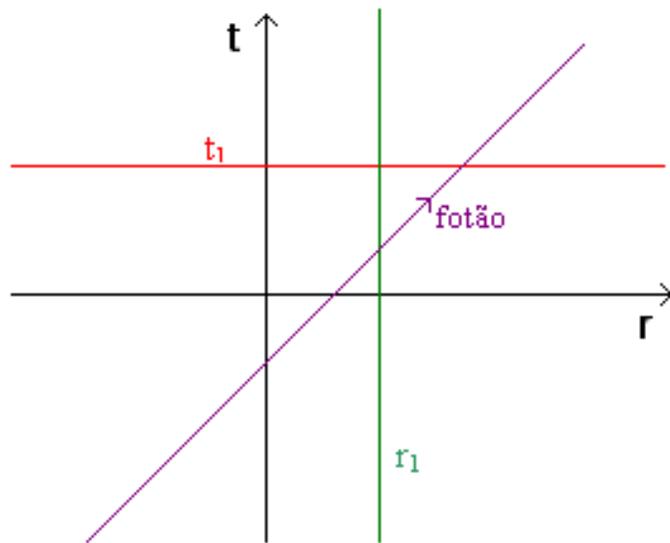
A este novo objecto, que funciona como o 'inverso' de um **buraco negro**, chamou-se **buraco branco**.



Diagramas de Penrose

Diagrama espaço-tempo fechado

(os **infinitos** são representados por **linhas** recorrendo a uma mudança de coordenadas adequada)



© Laurindo Sobrinho 2004

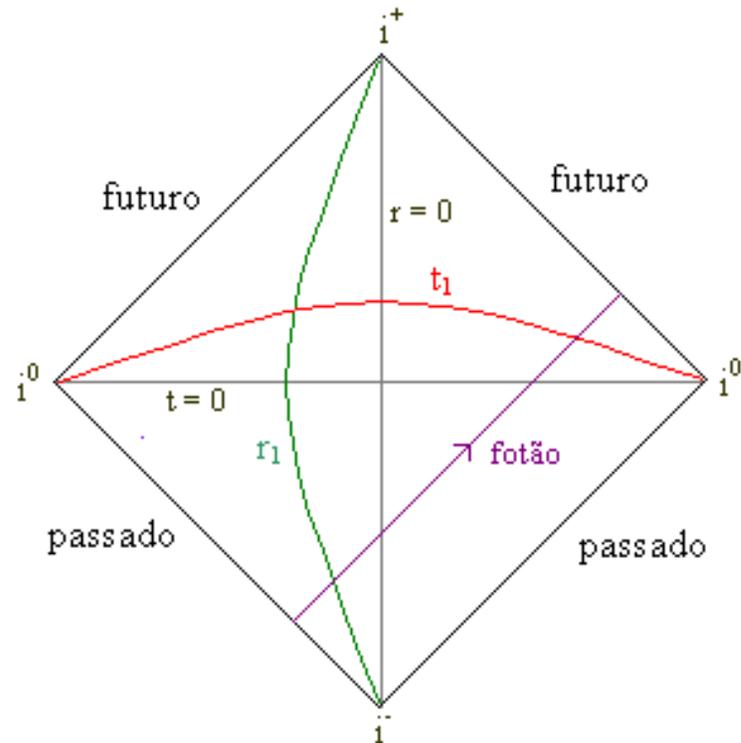
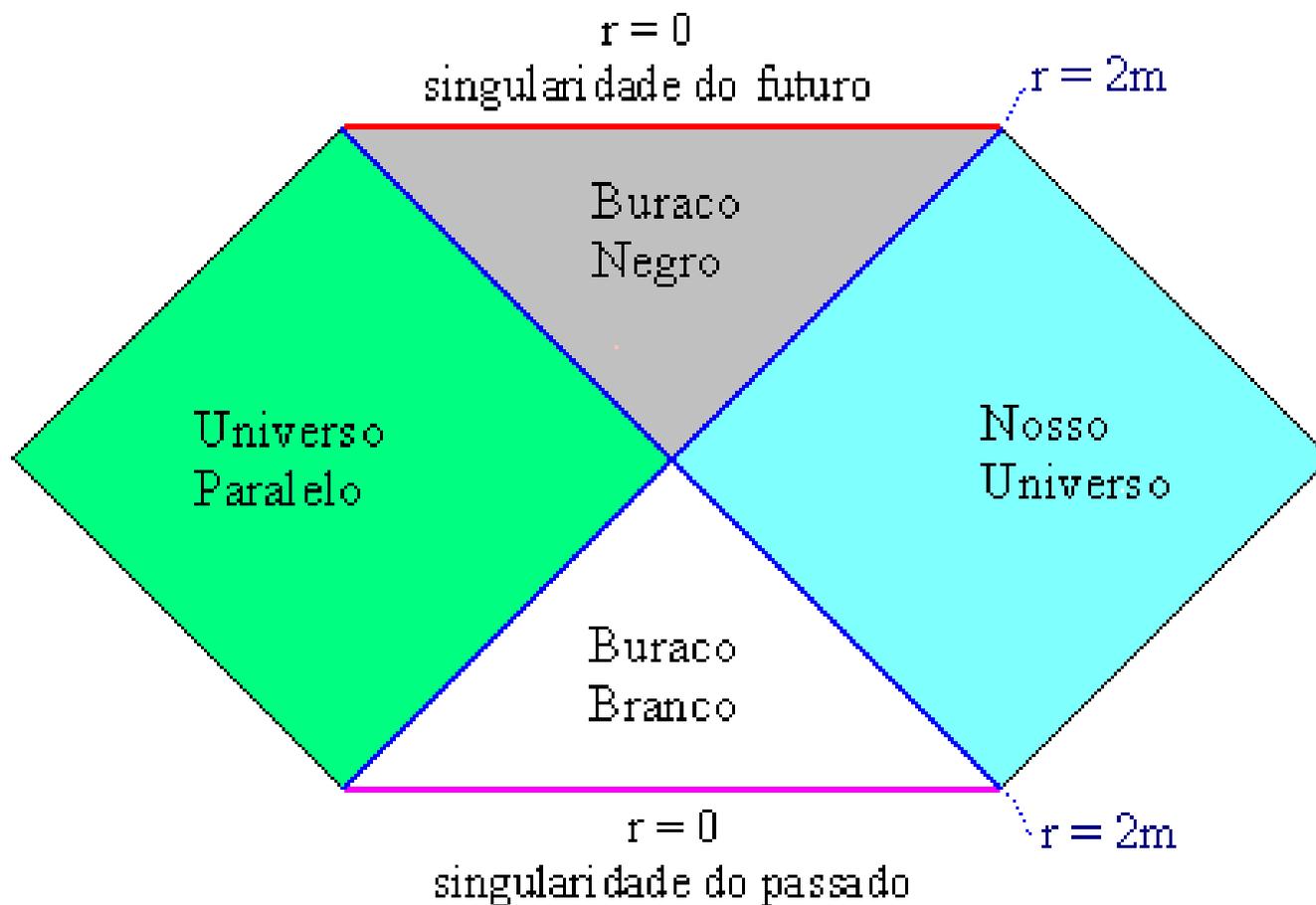
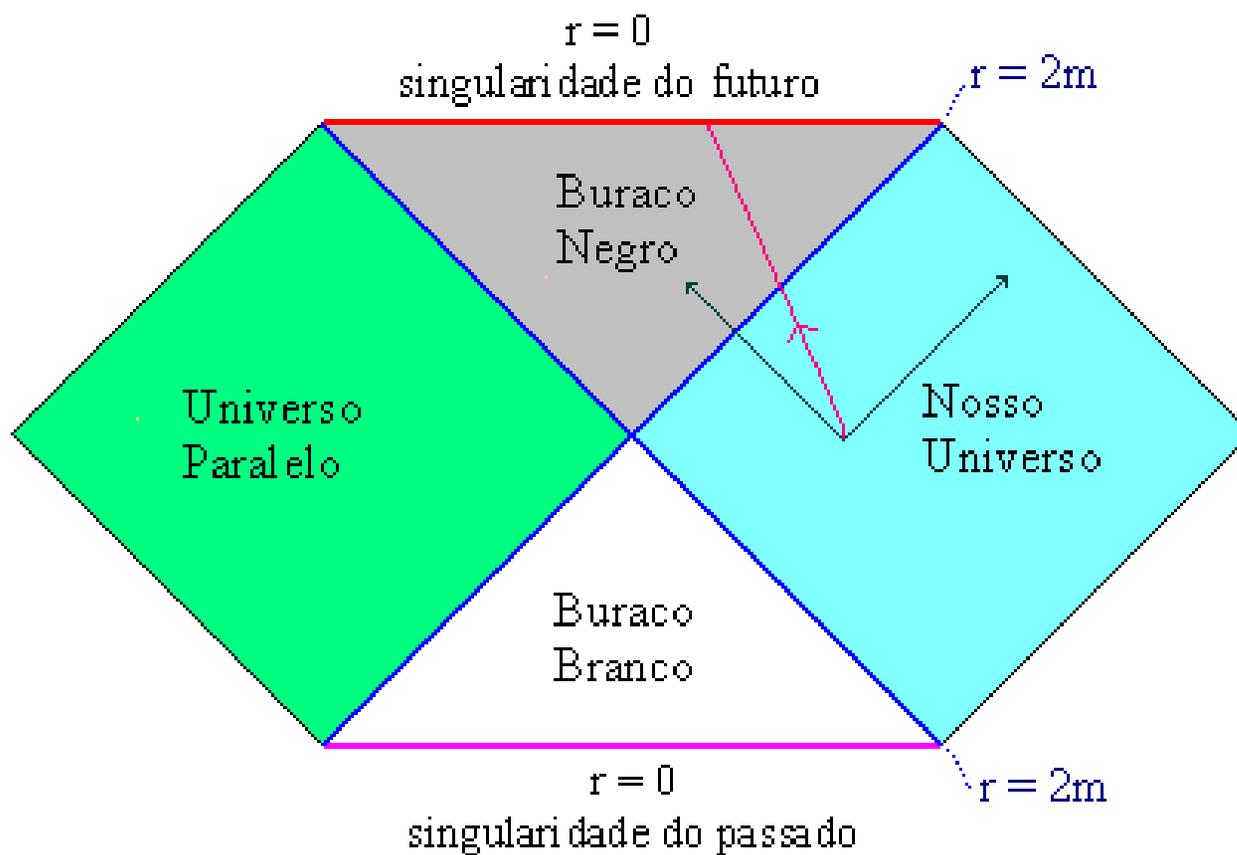


Diagrama de Penrose para a solução de Schwarzschild



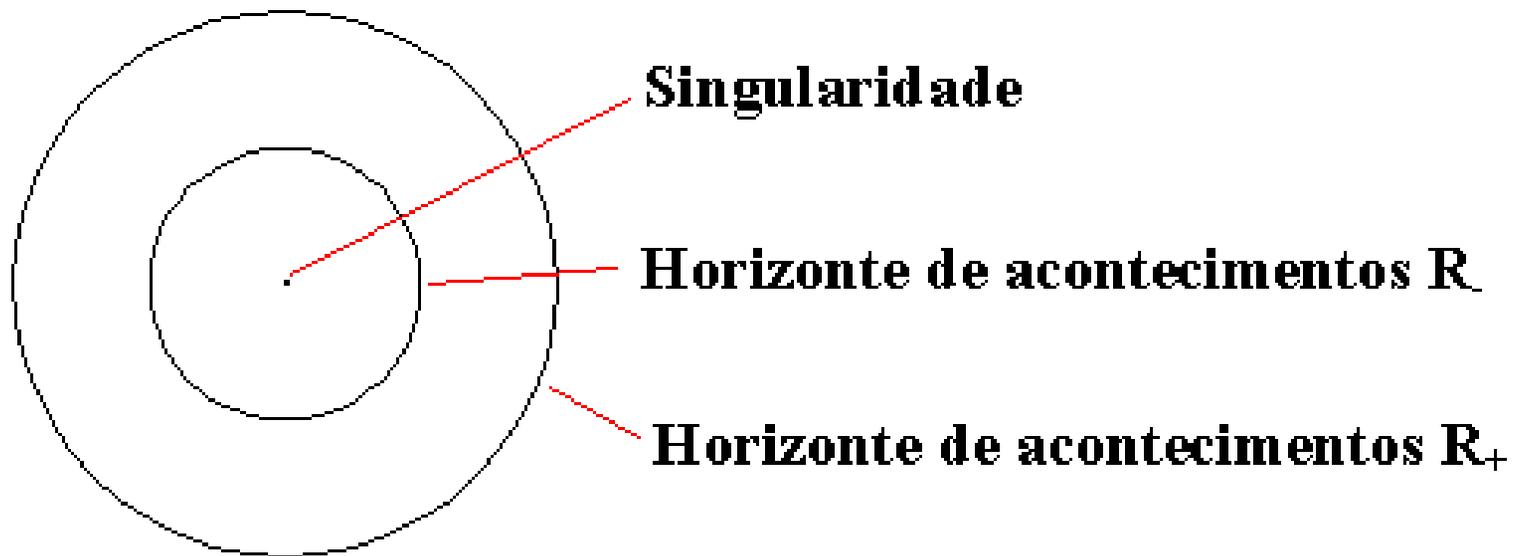
Todas as trajetórias para partículas com massa devem fazer com a vertical um ângulo inferior a 45° .





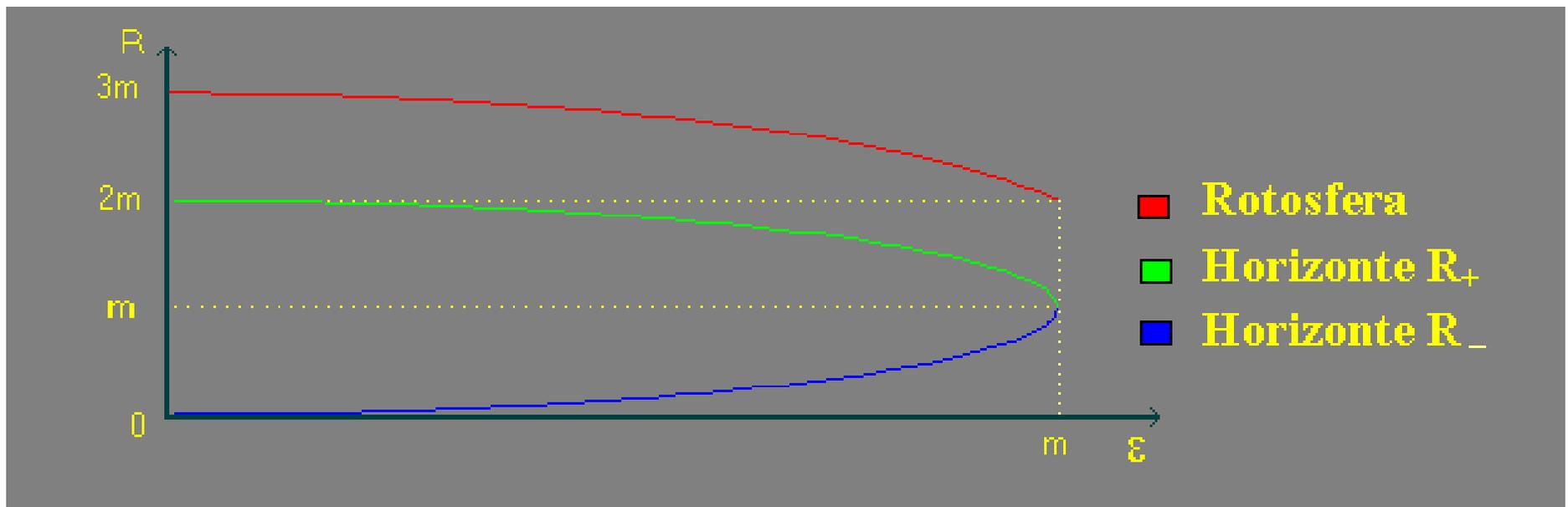
Viagem a um
buraco negro de
Reissner-Nordström

Os **buracos negros de Reissner-Nordström** distinguem-se dos de Schwarzschild por possuírem **carga eléctrica ϵ** . À volta destes buracos negros existe, além de um **campo gravítico**, um **campo eléctrico**. Os buracos negros de Reissner-Nordström são simetricamente esféricos e possuem, além de **uma singularidade** pontual, **dois horizontes de acontecimentos**.



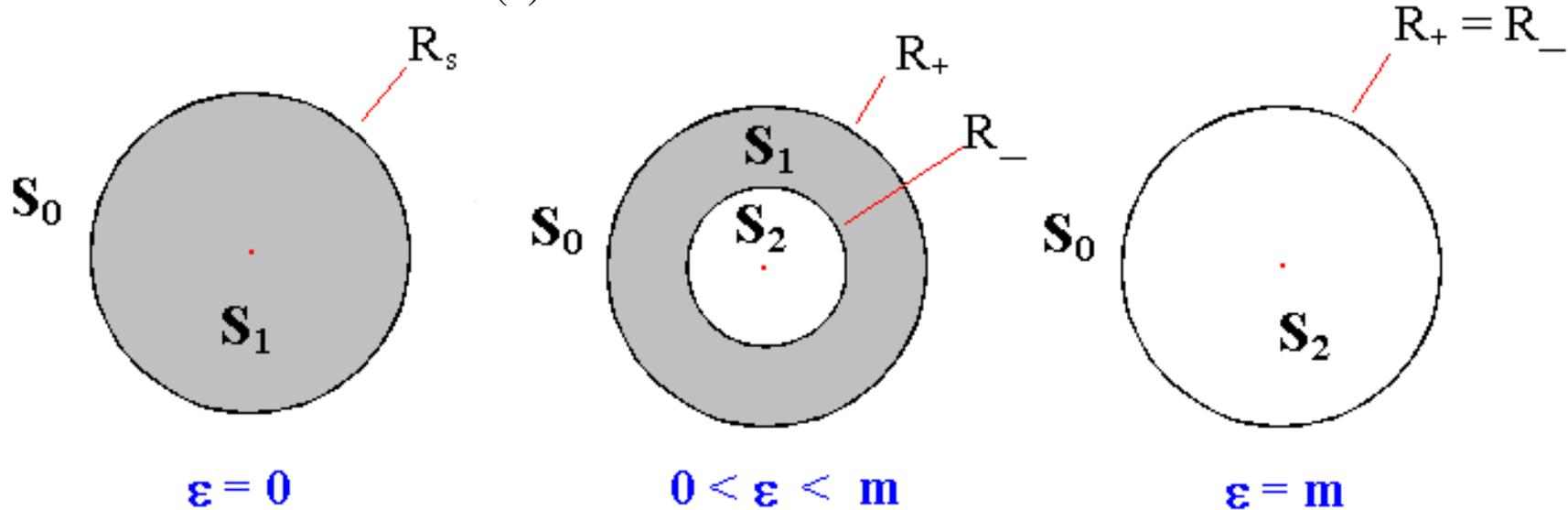
O horizonte mais externo (R_+) é análogo ao horizonte presente nos buracos negros de Schwarzschild. O seu raio varia entre $2m$ ($\epsilon=0$) e m ($\epsilon=m$).

O horizonte mais interno (R_-) não existe nos buracos negros de Schwarzschild. O seu raio varia entre 0 ($\epsilon=0$) e m ($\epsilon=m$).



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

(c) 2001 Laurindo Sobrinho



A região S_0 é o nosso universo (exterior ao buraco negro). A região S_1 é uma região igual à que existe num buraco negro de Schwarzschild. Não é possível estar em repouso em S_1 . A região S_2 , embora esteja no interior do buraco negro, volta a ser uma região igual a S_0 . Podemos ficar em repouso nesta região.

Num buraco negro de Reissner-Nordstrom é possível evitar a singularidade !!!!

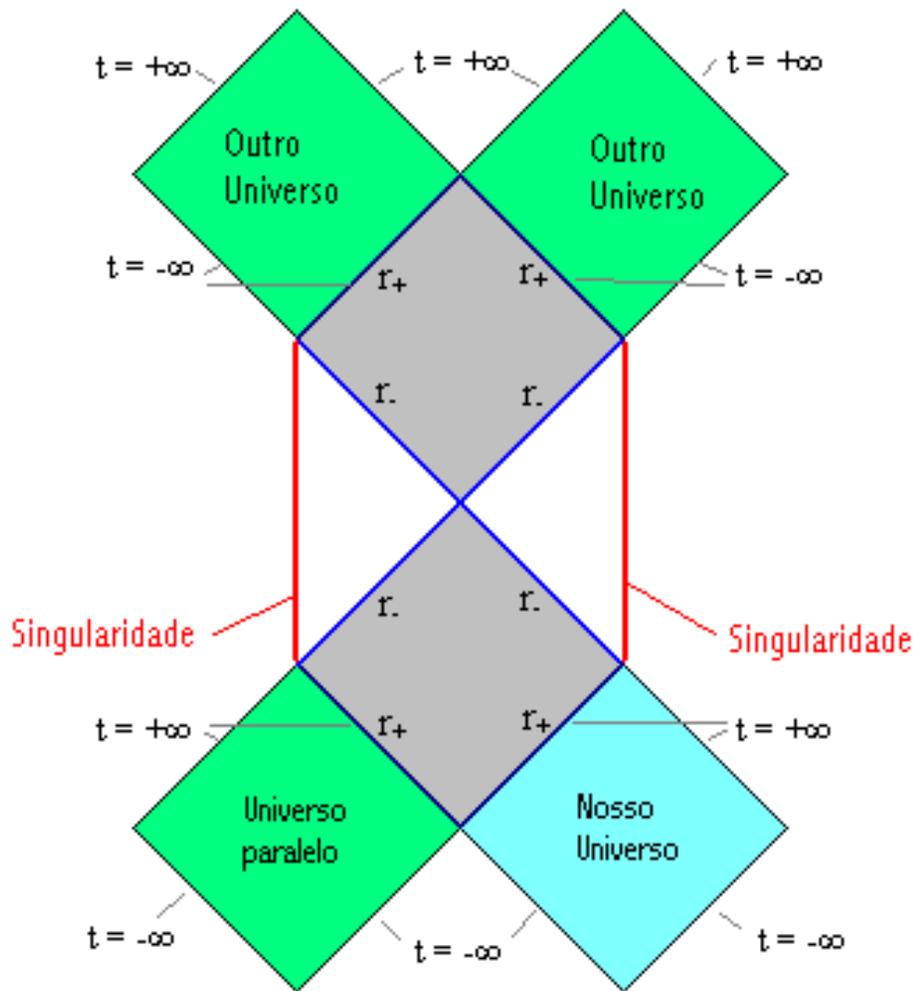


Diagrama de Penrose para um buraco negro de Reissner-Nordström

É possível evitar a singularidade orbitando em torno dela ou saindo mesmo para outro Universo por meio de um buraco branco.

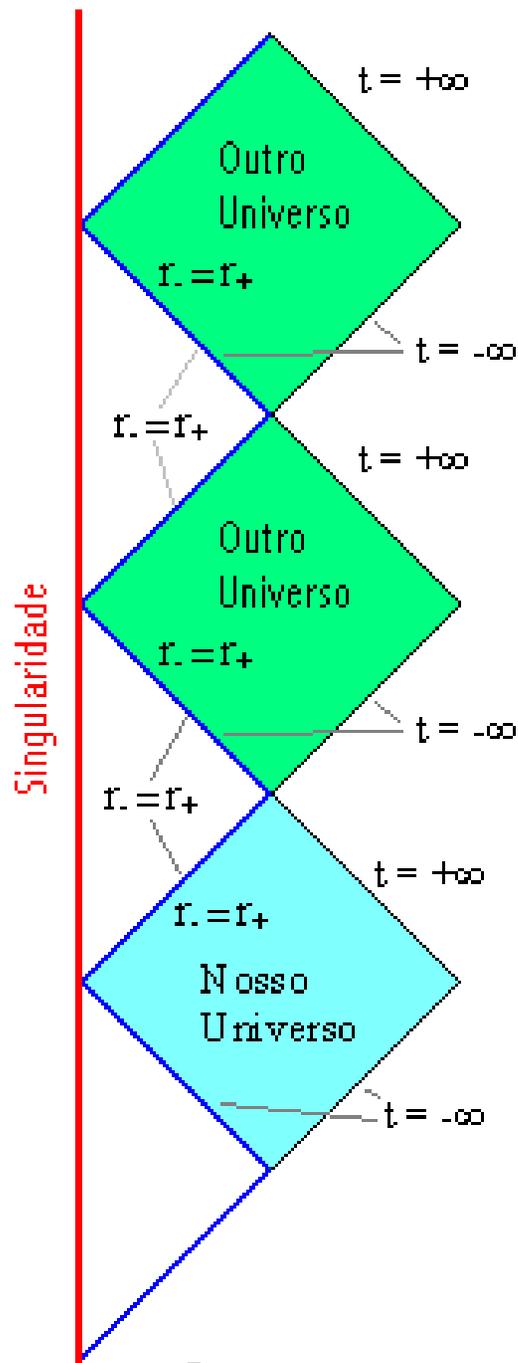
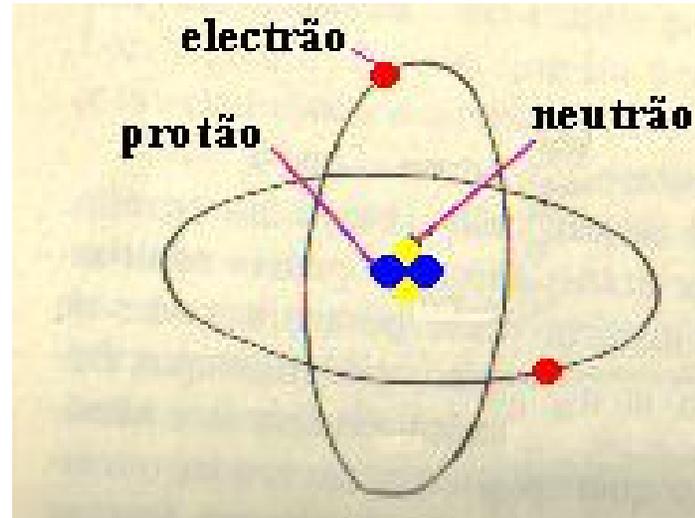


Diagrama de Penrose para um buraco negro de **Reissner-Nordström extremo** (carga eléctrica máxima)

A matéria é formada por **átomos** os quais por sua vez são constituídos por: protões, electrões e neutrões.



Partícula	Carga
Protão	+e
Electrão	-e
Neutrão	0

Nos átomos temos que:

$$\mathbf{N^{\circ} \text{ PROT\u00d3ES} = N^{\circ} \text{ ELECTR\u00d3ES}}$$

A carga eléctrica de um átomo é **ZERO**. Como a matéria é feita de átomos, salvo pequenas oscilações momentâneas, a carga eléctrica de uma certa quantidade de matéria é igual a ZERO.

Conclusão: **É pouco provável que existam buracos negros de Reissner-Nordström**

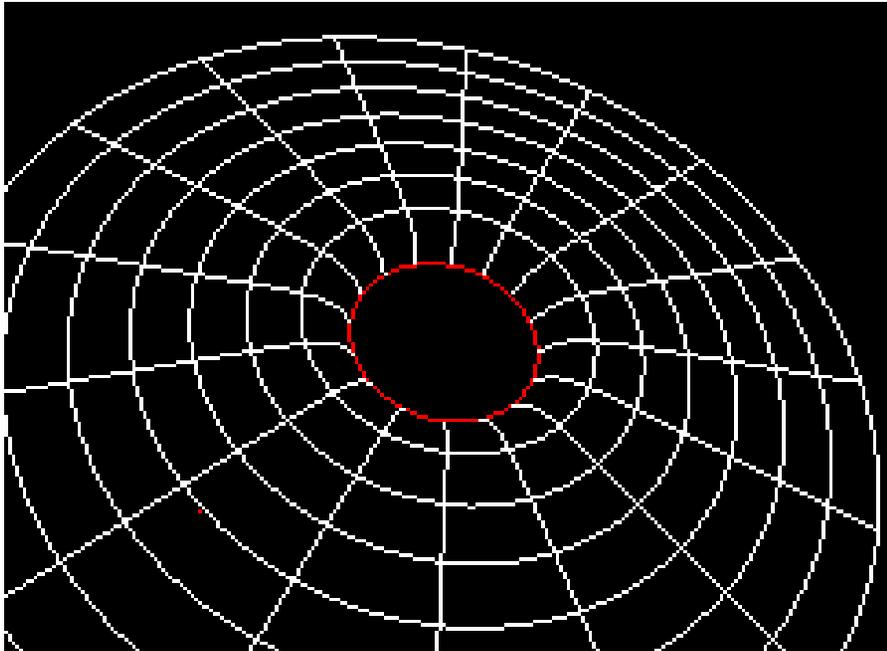


Viagem a um buraco negro de Kerr

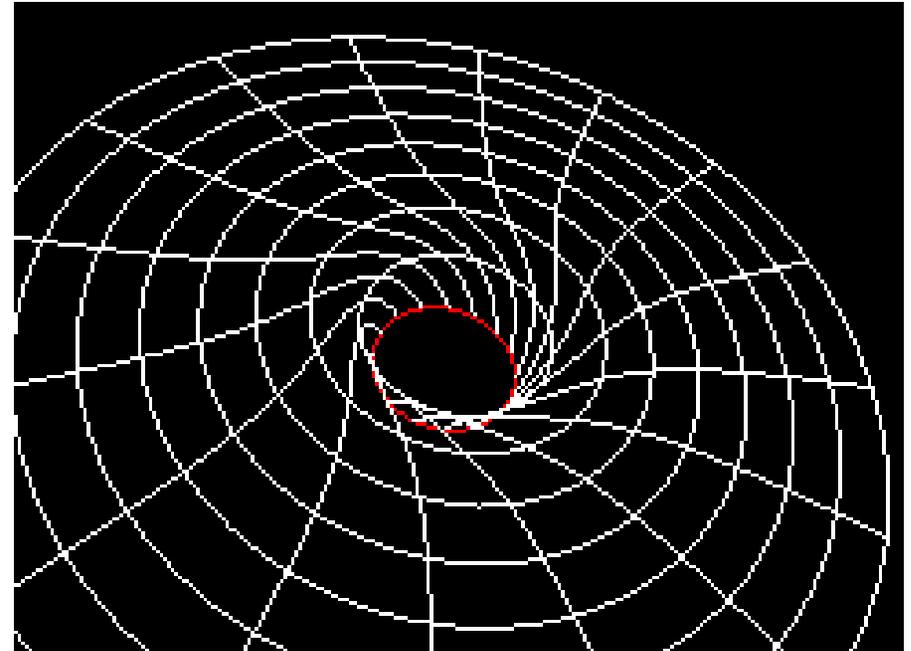
A. Hobart, CXC

<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap030601.html>

O colapso gravitacional de uma objecto em rotação origina um buraco negro com rotação - **buraco negro de Kerr**. Do lado de fora do horizonte de acontecimentos o **espaço-tempo é deformado e arrastado** em torno do buraco negro.



Sem rotação

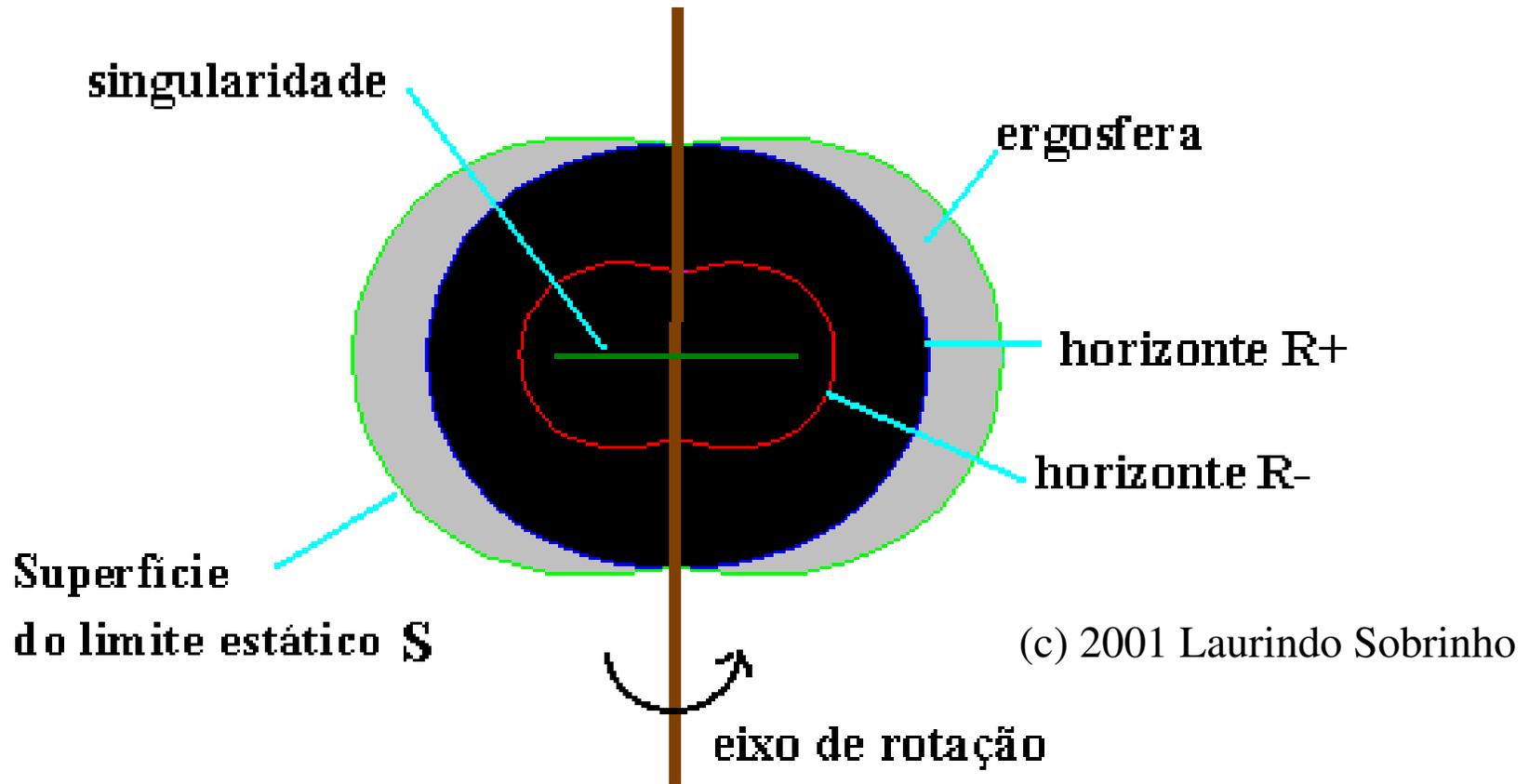


Com rotação

<http://www.astro.ku.dk/~cramer/RelViz/text/exhib4/exhib4.html>

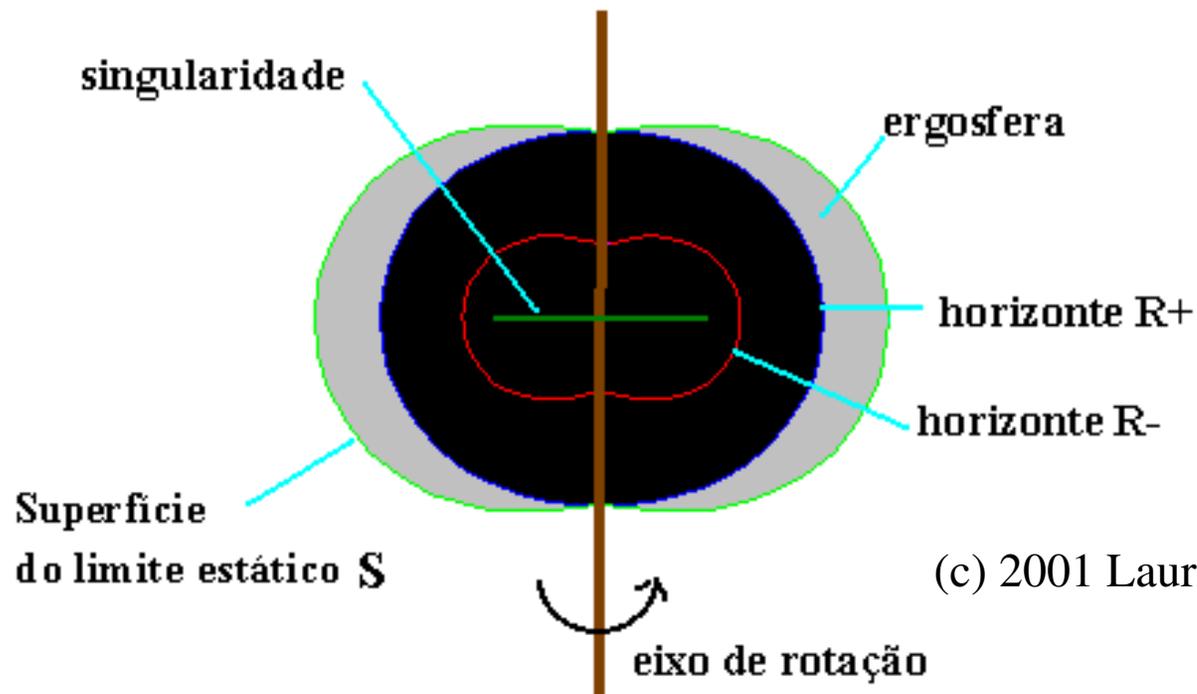
Os **buracos negros de Kerr** não são simetricamente esféricos. São achatados nos pólos devido à rotação. Mas têm **simetria axial** (em relação ao eixo de rotação).

Possuem **dois horizontes de acontecimentos**: R_+ e R_- e uma **singularidade anelar** sobre o plano equatorial.

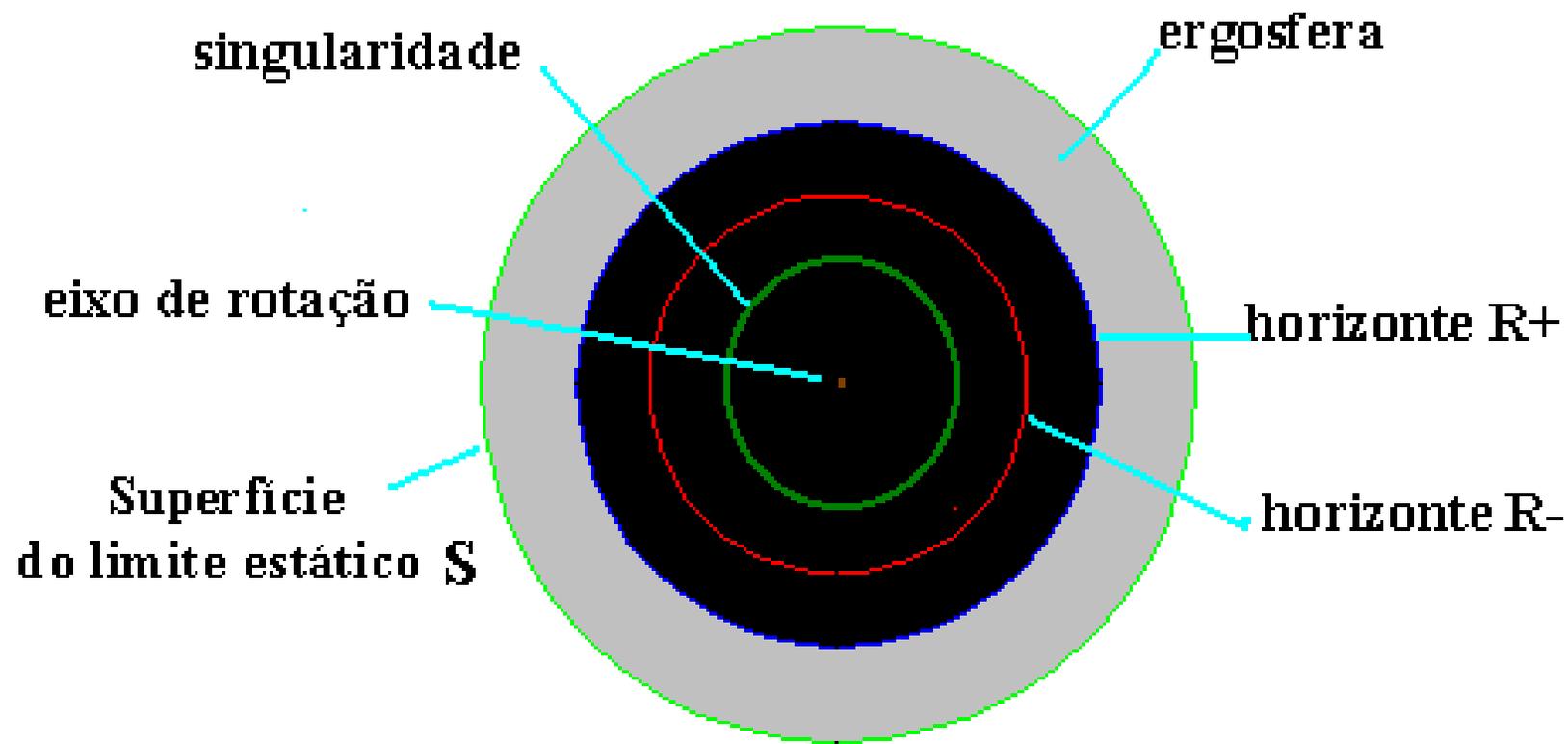


Existe também uma região exterior ao buraco negro chamada **ergosfera**. Embora seja ainda possível escapar da **ergosfera**, dentro desta região todos os corpos são obrigados a rodar no mesmo sentido que o buraco negro.

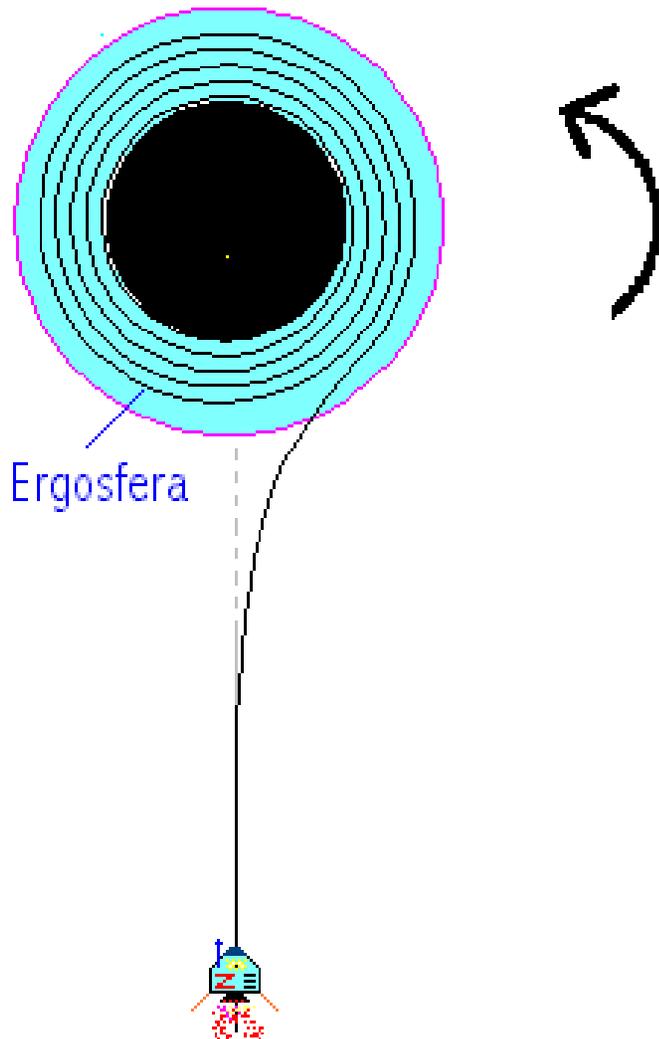
A superfície S que delimita a **ergosfera** chama-se **superfície do limite estático**. É o último local antes do horizonte de acontecimentos onde ainda é possível ficar em repouso.



(c) 2001 Laurindo Sobrinho



(c) 2001 Laurindo Sobrinho



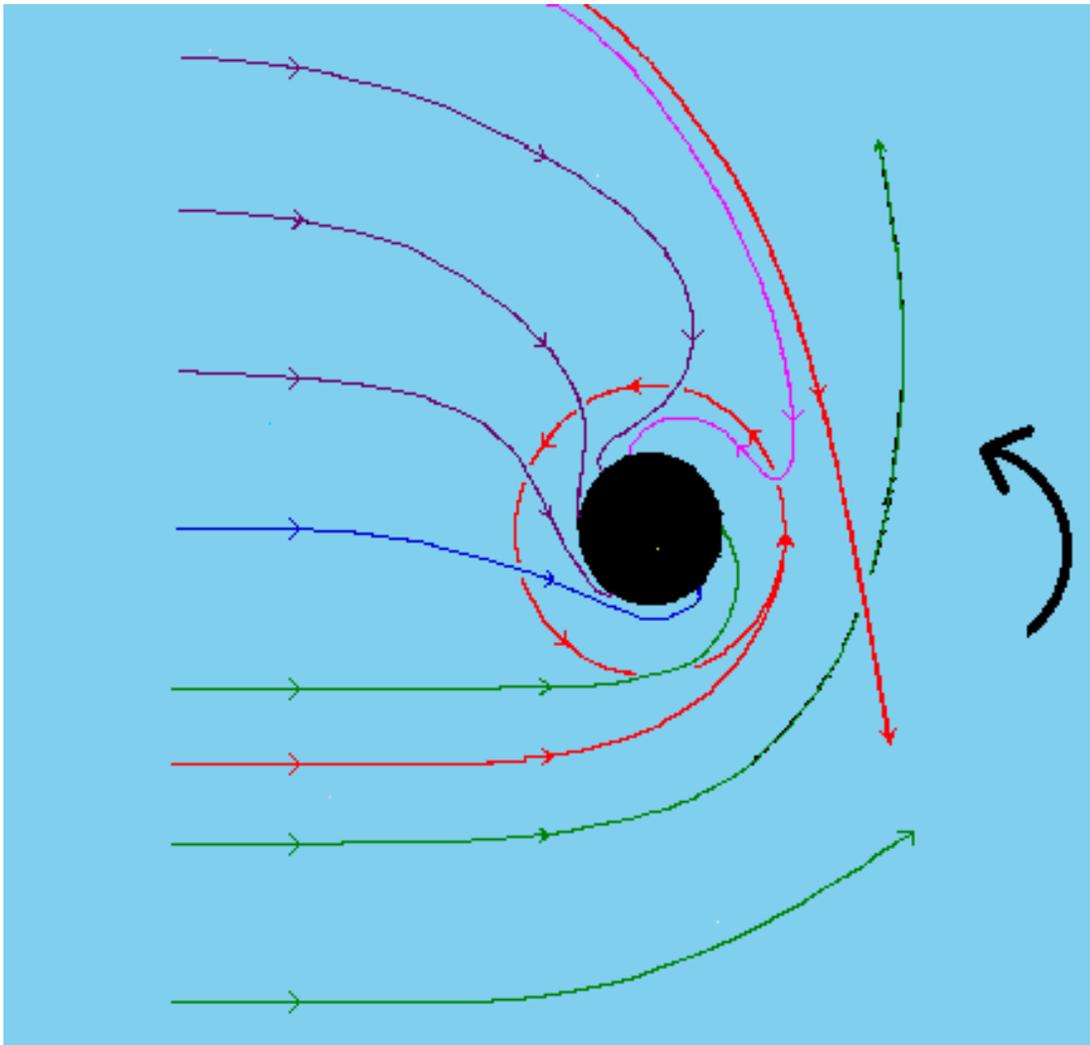
© Laurindo Sobrinho 2004

Uma nave seguindo inicialmente uma geodésica radial acaba, com a aproximação ao buraco negro de Kerr, por ser desviada na direcção da rotação do mesmo. Depois de entrar na **Ergosfera** a nave descreve um **movimento em espiral** em torno do horizonte de acontecimentos atingindo este apenas no futuro infinito.

Como no caso do buraco negro de Schwarzschild temos:

- **desvio para o vermelho**
- **dilatação do tempo**
- **esparquetificação**

Comportamento da luz na vizinhança de um buraco negro em rotação



Os raios de luz que se aproximam do buraco negro de forma a acompanharem o sentido de rotação deste, conseguem escapar mais facilmente à captura.

Um raio que incida frontalmente é desviado (arrastado) no sentido da rotação do buraco negro e não consegue escapar.

www.engr.mun.ca/~ggeorge/astron/blackholes.html

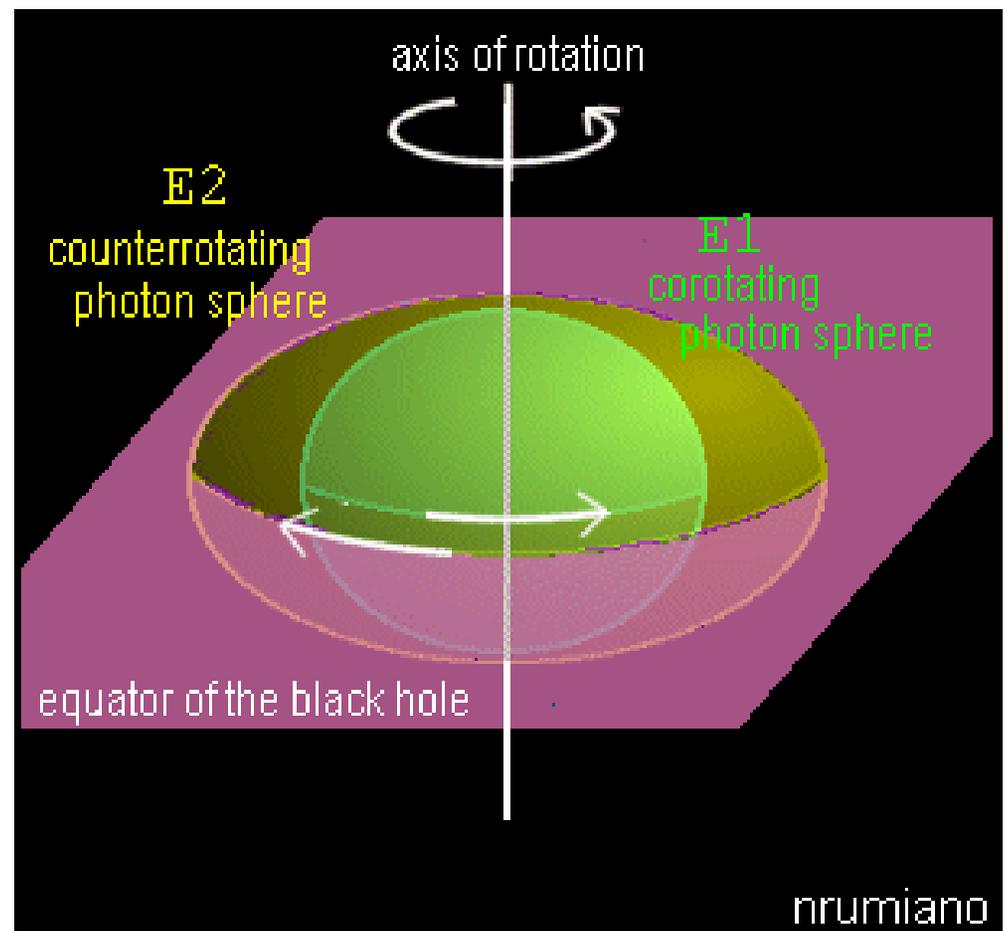


Devido à rotação a imagem do buraco negro fica distorcida

Num buraco negro de Kerr existem duas **superfícies elipsoidais** (semelhantes à Rotosfera) onde os fótons orbitam em torno do buraco negro.

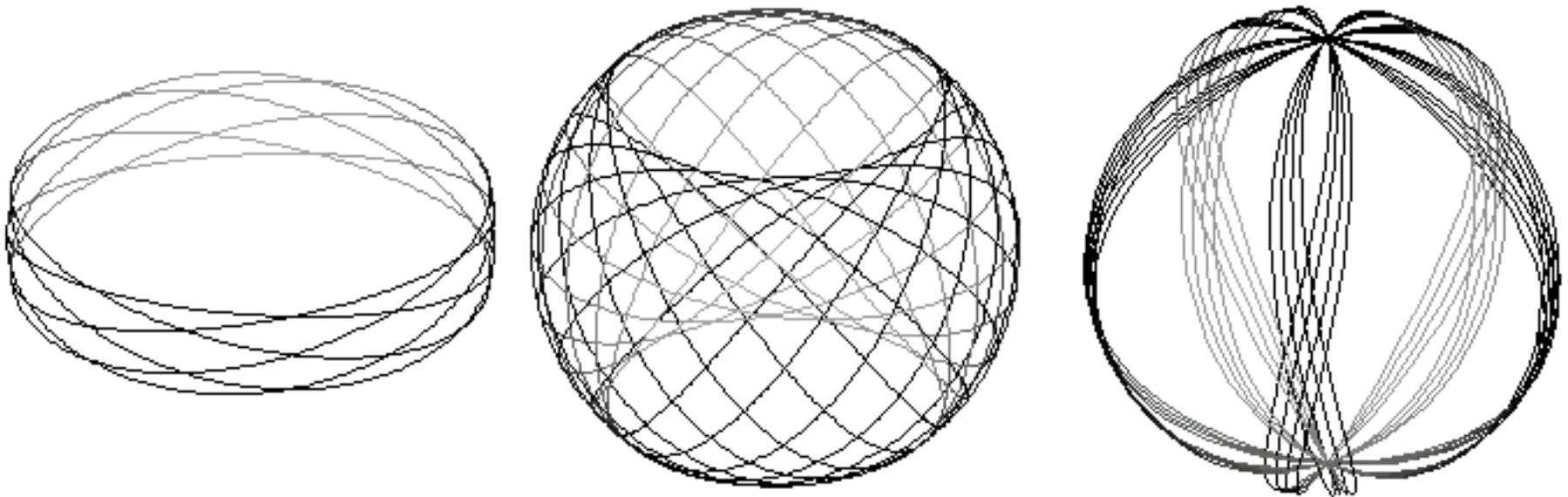
E1 - mais interna - fótons deslocam-se no **mesmo sentido** da rotação do buraco negro

E2 - mais externa - fótons deslocam-se no **sentido contrário** ao da rotação do buraco negro



Os dois elipsoides tocam-se nos pólos. Quanto maior a velocidade de rotação do buraco negro mais afastadas ficam os dois elipsoides.

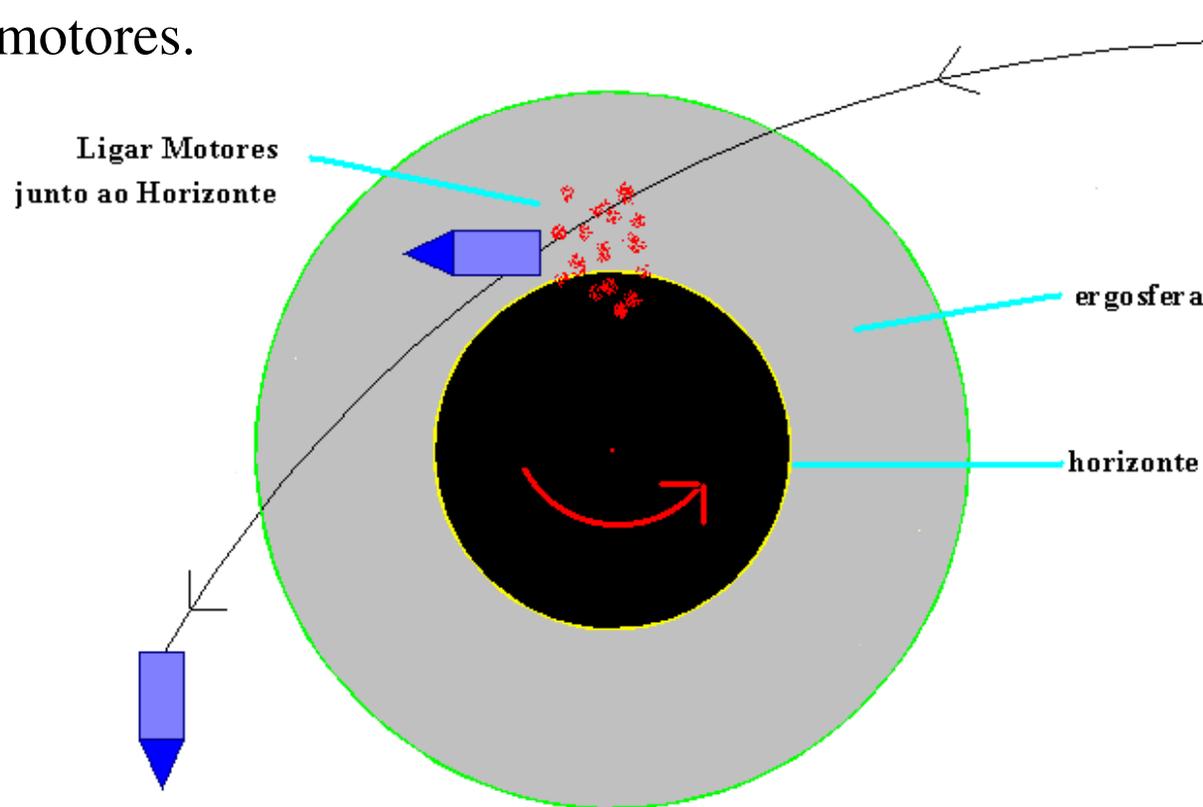
Entre os dois elipsoides **E1** e **E2** fica um mar de fótons que orbita em torno do buraco negro.



<http://www.physics.nus.edu.sg/~phyteoe/kerr/table.html>

Buracos Negros como Fontes de Energia

Um foguetão entra na **ergosfera** de um buraco de Kerr acompanhando o movimento de rotação deste. Quando estiver relativamente próximo do **horizonte** são ligados os motores. O foguetão sai da **ergosfera** com uma velocidade muito superior à que teria apenas com o impulso dos motores.

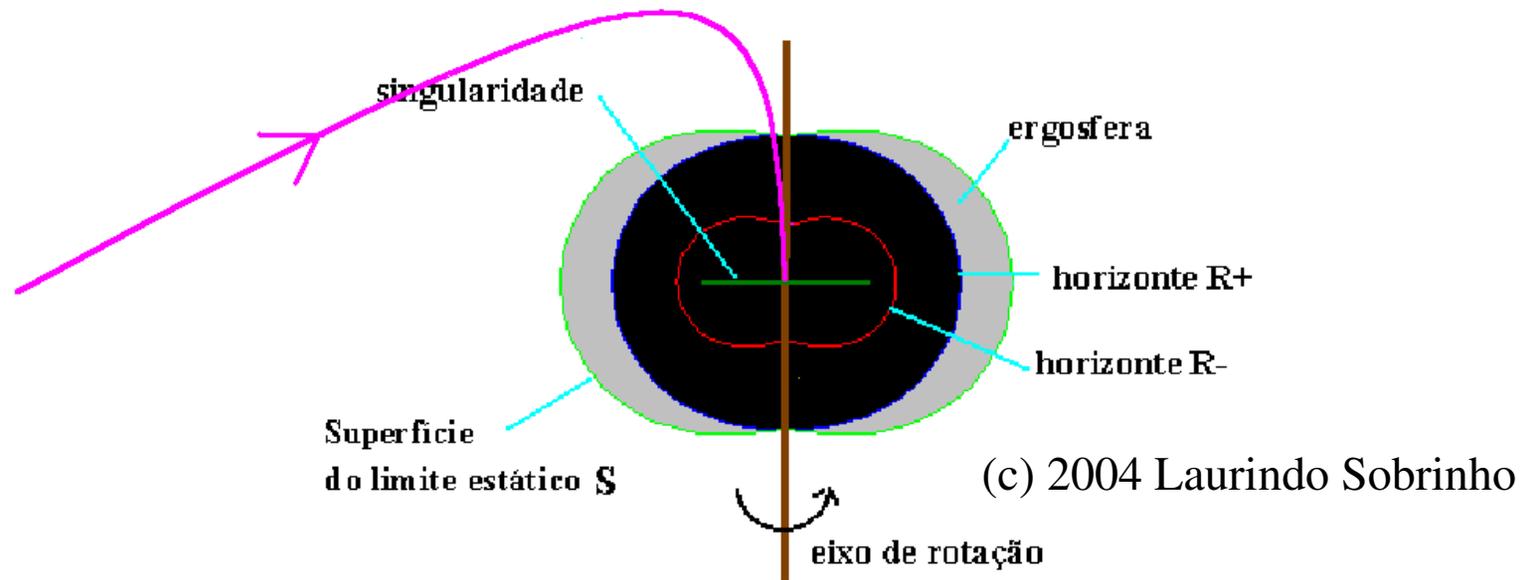


A energia adicional foi retirada à energia rotacional do buraco negro. A velocidade de rotação do buraco negro diminui. Este processo de extração de energia poderá ser aplicado até que o buraco perca toda a sua rotação.

(c) 2001 Laurindo Sobrinho

(Plano equatorial)

Num **buraco negro de Kerr** a **singularidade** é do tipo **temporal**, como no buraco negro de Reissner-Nordström e não do tipo espacial como acontecia no caso do buraco negro de Schwarzschild. Isto significa que a singularidade de um buraco negro de Kerr **pode ser evitada**.



Para evitar a singularidade há que **evitar** viajar sobre o **plano equatorial**. Provavelmente o mais seguro será entrar no buraco negro pelo eixo de rotação (perpendicular ao plano equatorial)

Diagrama de Penrose para um buraco negro de Kerr

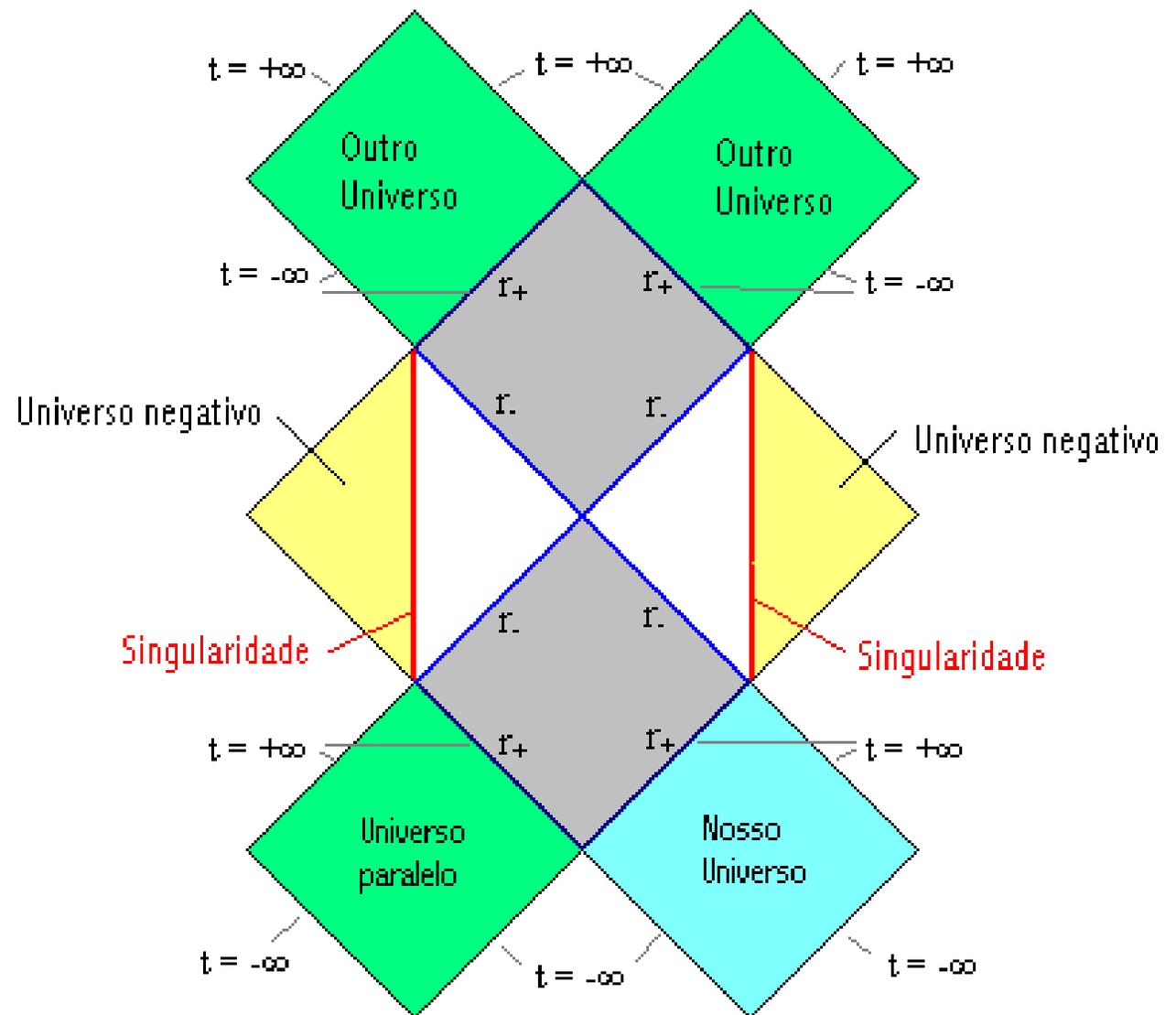
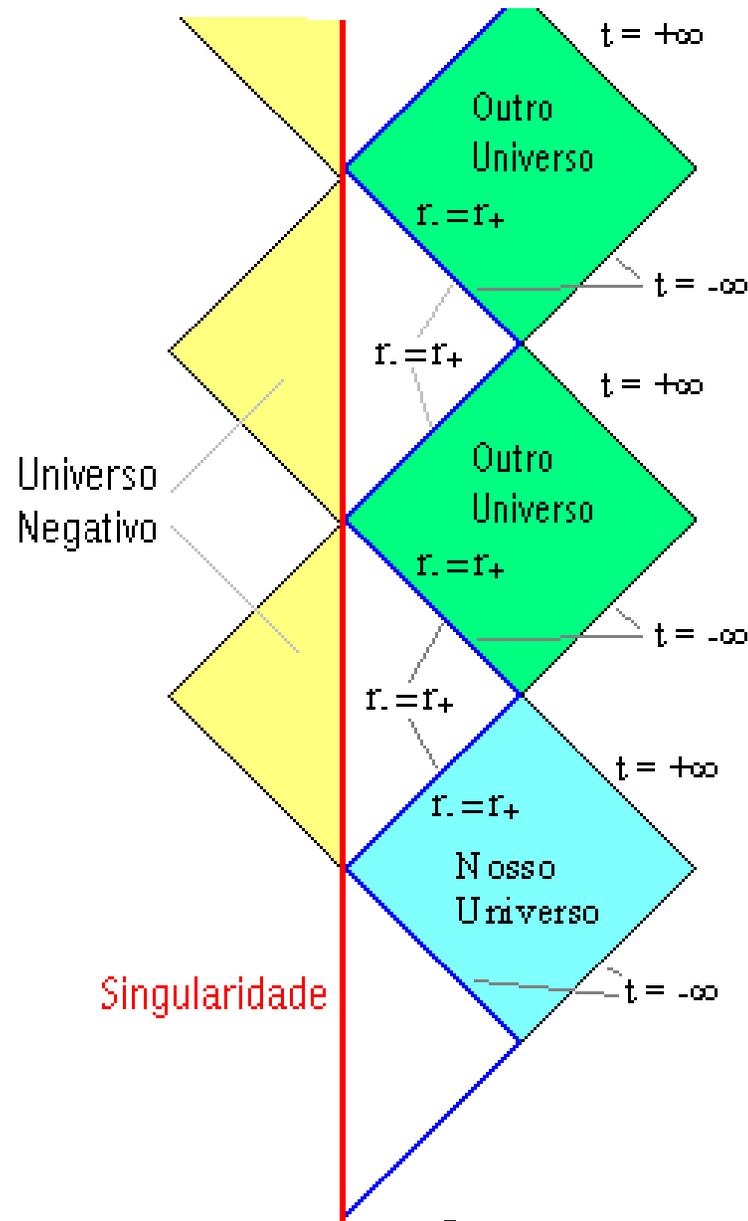


Diagrama
de Penrose
para um
**buraco
negro de
Kerr
máximo**
($a = m$)

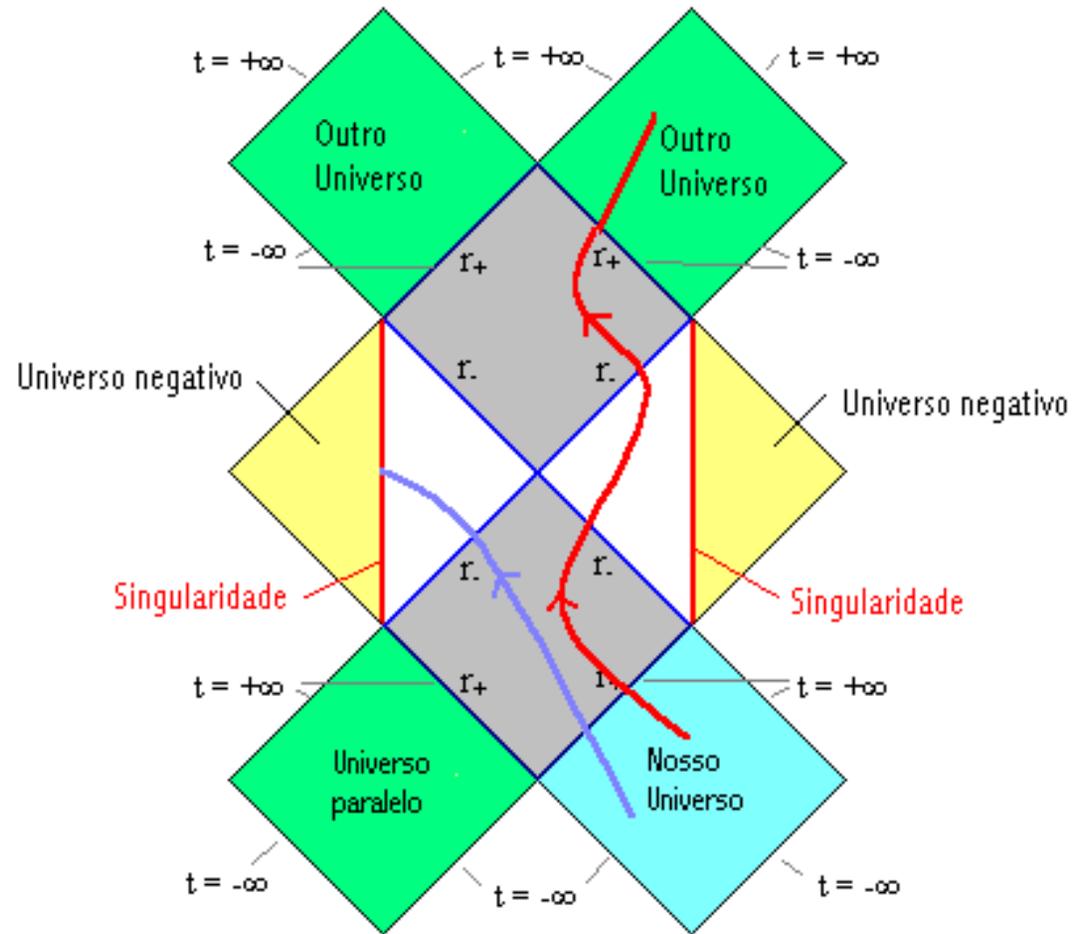


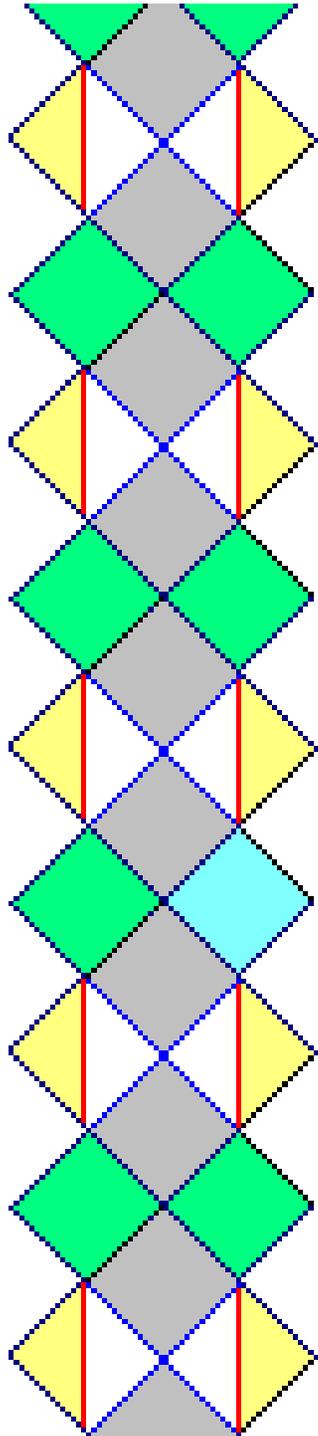
Quando se entra num buraco negro de Kerr temos sempre duas alternativas:

1- Ir de encontro à singularidade

2- Visitar outros Universos

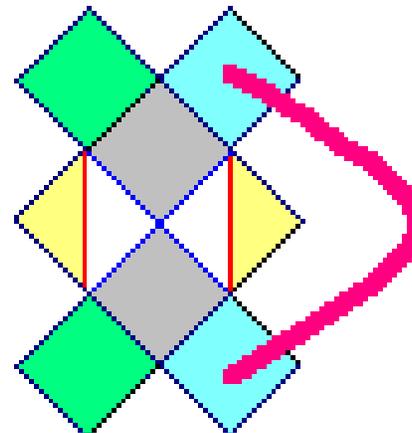
(RECOMENDADO)





A solução de Kerr pode ser estendida infinitas vezes para o passado bem como para o futuro, dando assim acesso a uma infinidade de outros Universos.

Esses outros Universos podem ser **Universos Paralelos** ou mesmo o **Nosso Universo** num determinado momento do **passado**

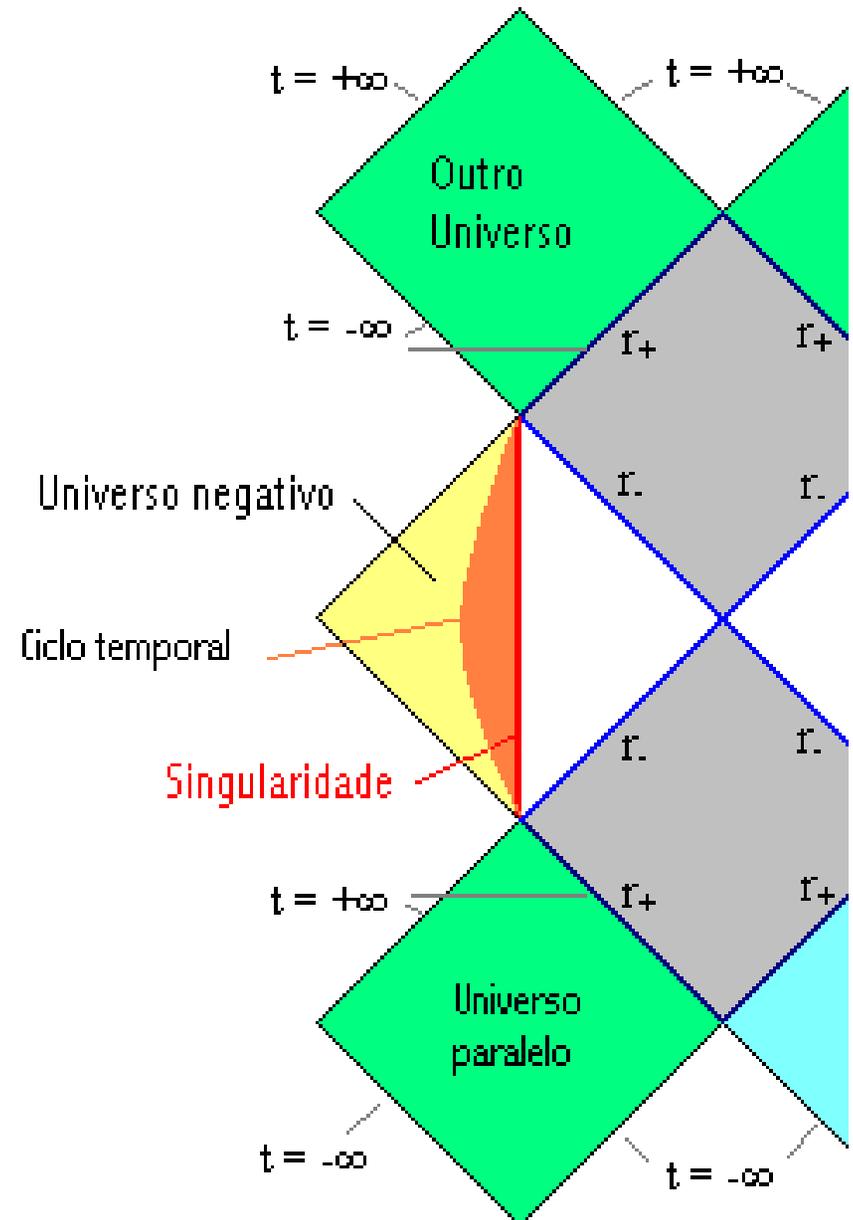


Mesmo
Universo

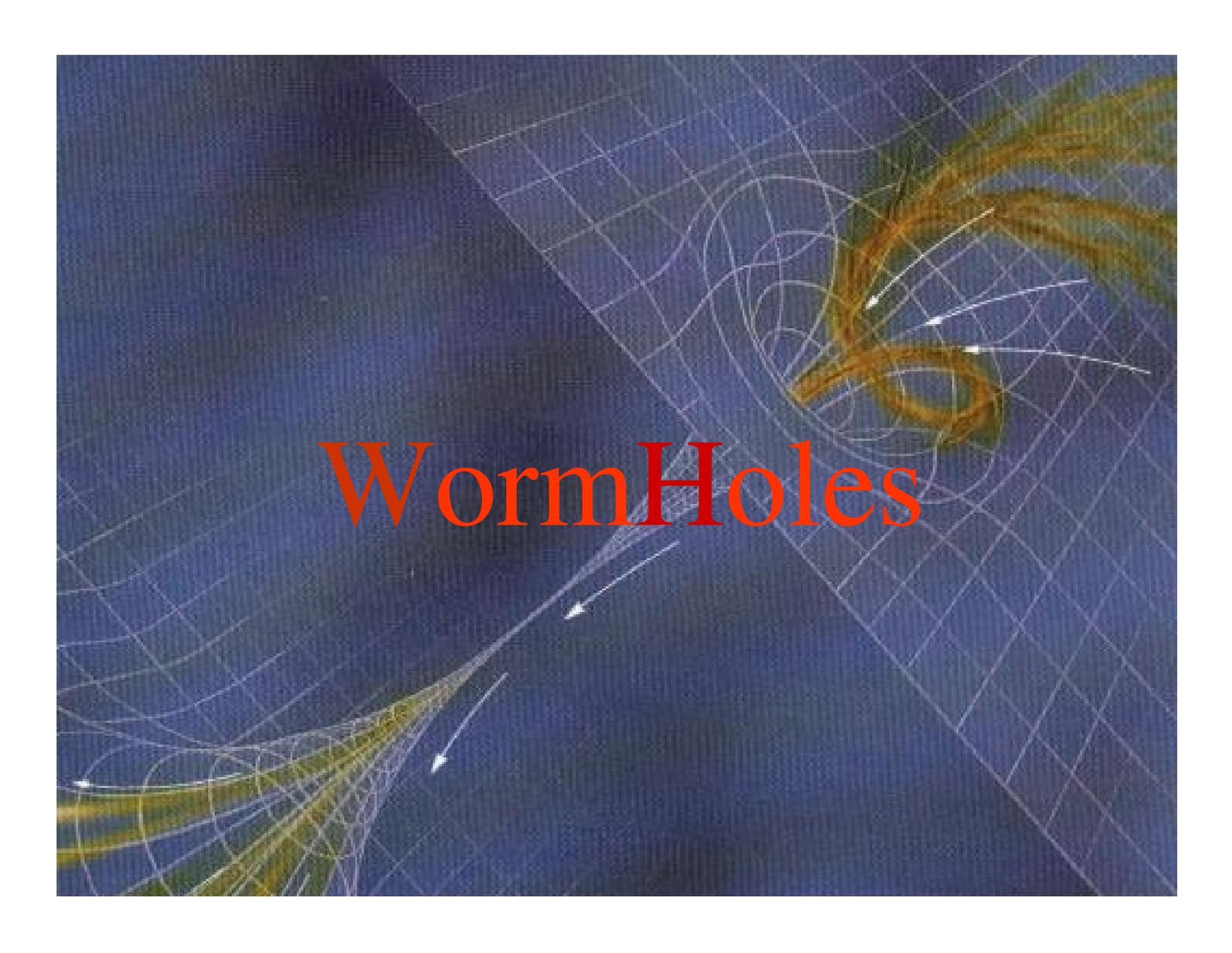
Do lado de lá da singularidade de um buraco negro de Kerr temos acesso a uma zona muito peculiar - **Universo Negativo**:

- **objectos com raios negativos**
- **massa negativa**
- **energia negativa**
- **gravidade repulsiva**

Nesta região, dentro da singularidade, existe uma área designada por **ciclo temporal** onde a **fronteira entre passado e futuro perde o sentido**.



WormHoles

A 3D visualization of a wormhole in spacetime. The background is a dark blue grid representing spacetime. A bright, glowing yellow-green structure, representing the wormhole, is shown as a bridge connecting two distant regions of the grid. The grid lines are distorted and curved around the wormhole, illustrating the warping of spacetime. The text "WormHoles" is overlaid in a large, red, serif font in the center of the image.

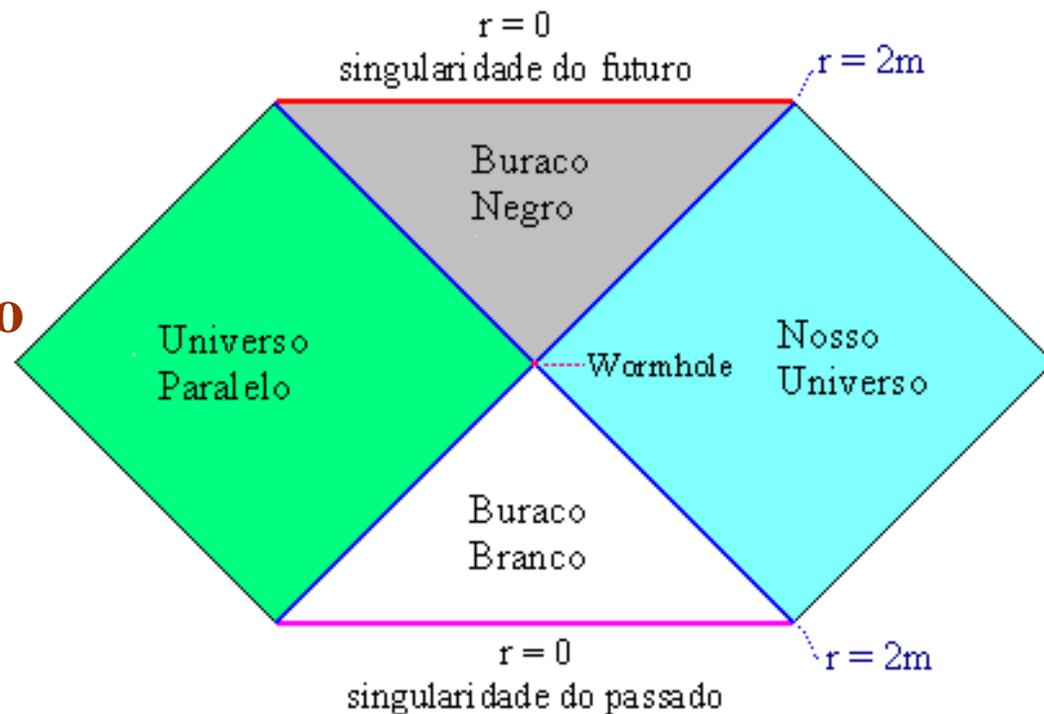
A solução de Schwarzschild consiste:

1 buraco negro

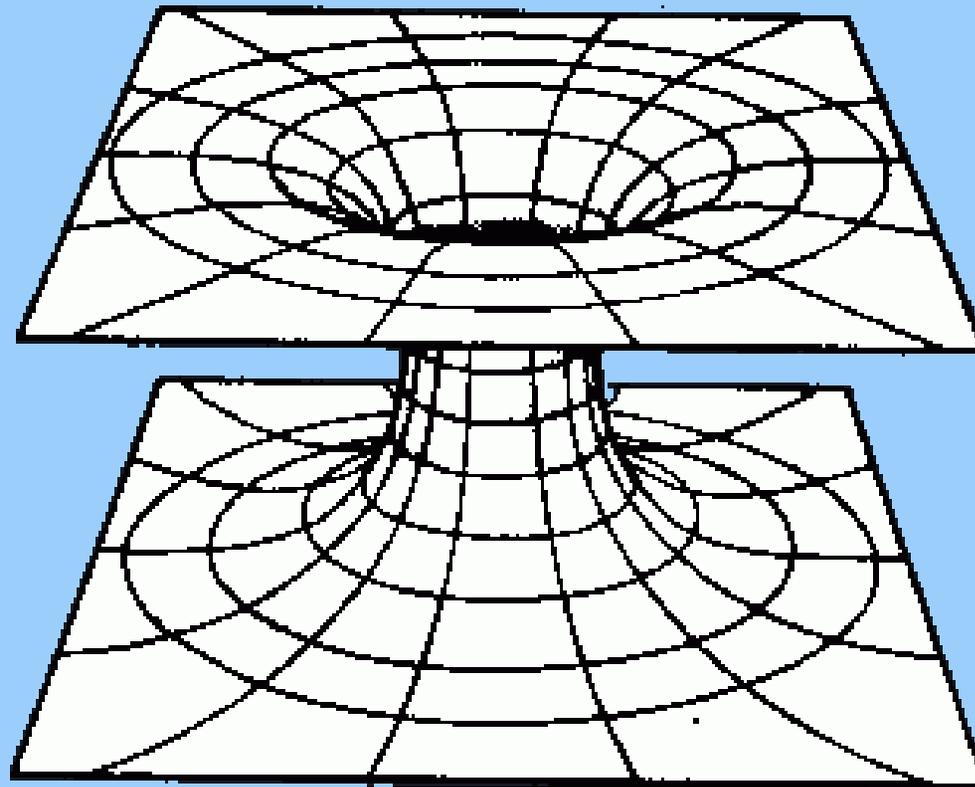
1 buraco branco

2 Universos

1 wormhole ligando os dois Universos

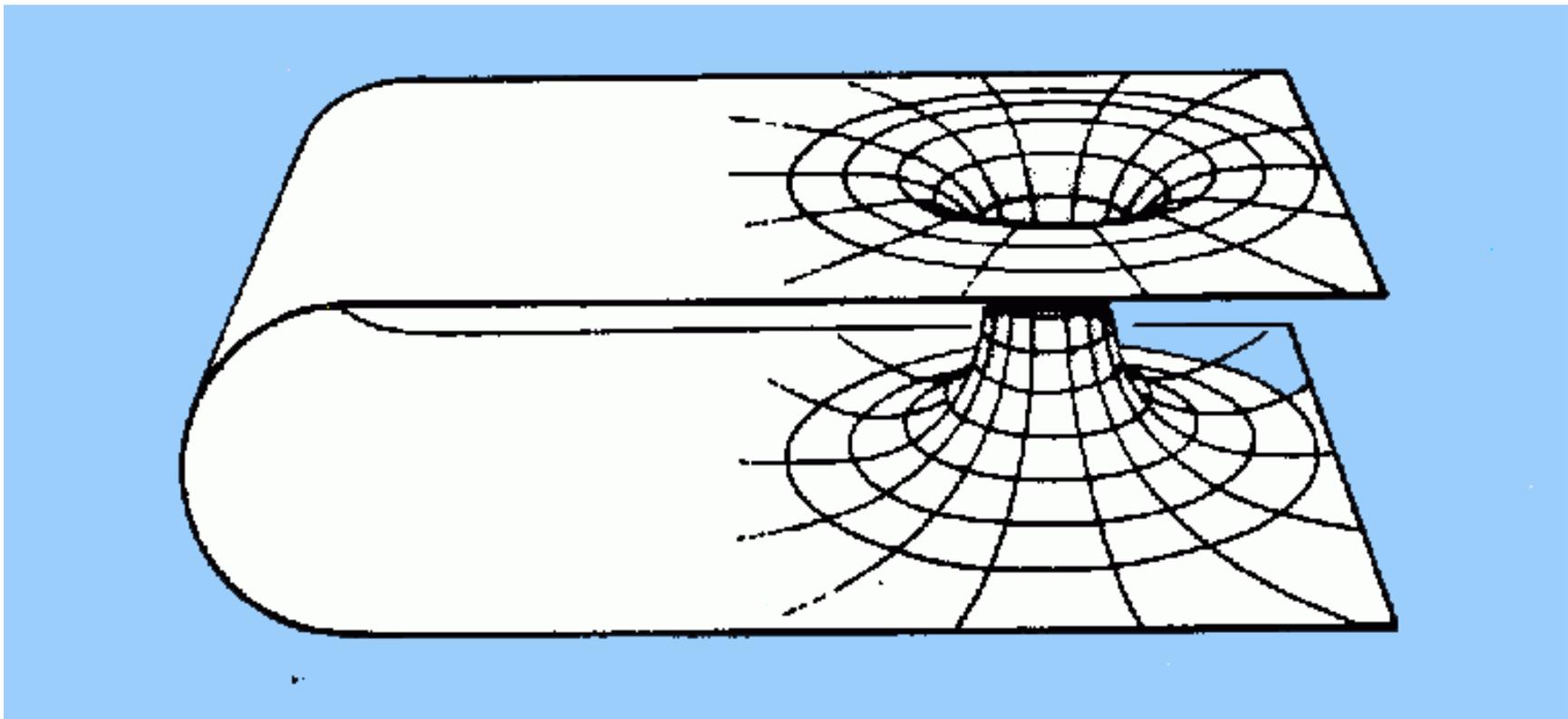


O **WormHole** (buraco de verme) ligando dois Universos diferentes é também conhecido por **Ponte de Einstein-Rosen**



John Gribbin 1992 - *Unveiling the Edge of Time: **Black Holes**, **White Holes**, **Wormholes***

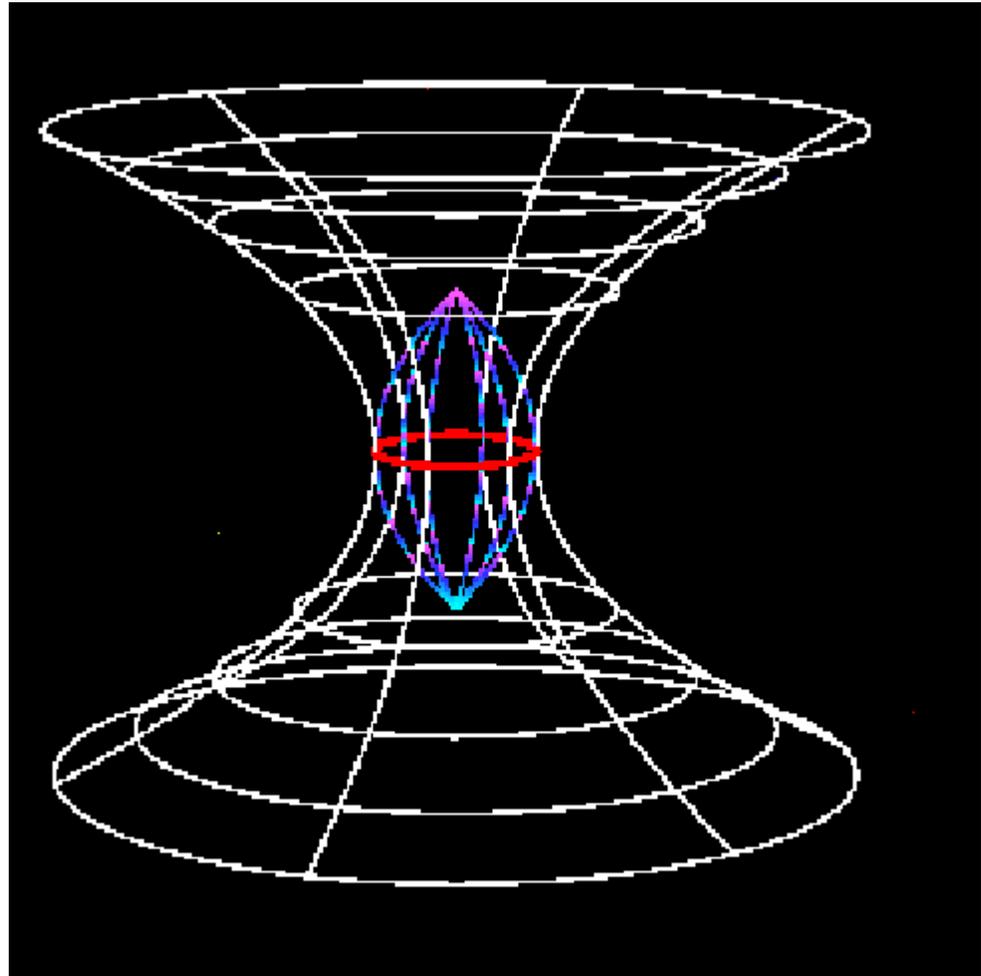
Ponte de Einstein-Rosen ligando duas partes distintas (espaço e tempo) do mesmo Universo



John Gribbin 1992 - *Unveiling the Edge of Time: **Black Holes**, **White Holes**, **Wormholes***

Os wormholes de Schwarzschild existem como soluções exactas das equações de Einstein.

Existem apenas por breves períodos e a viagem deveria ser feita a **velocidades muito superiores à da luz.**

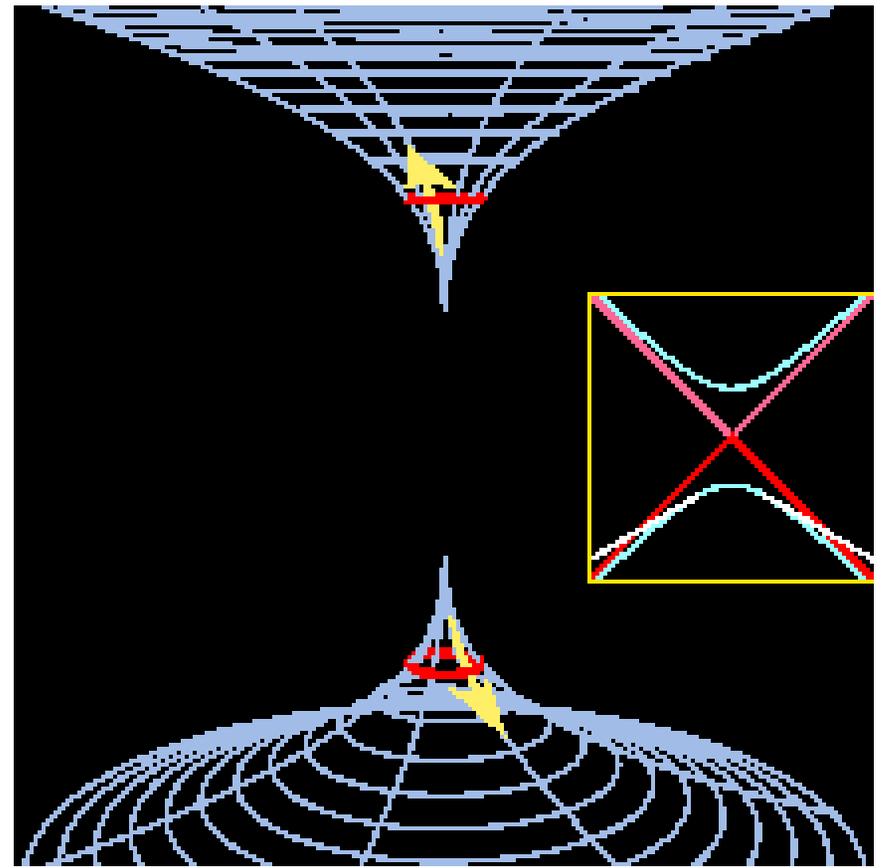
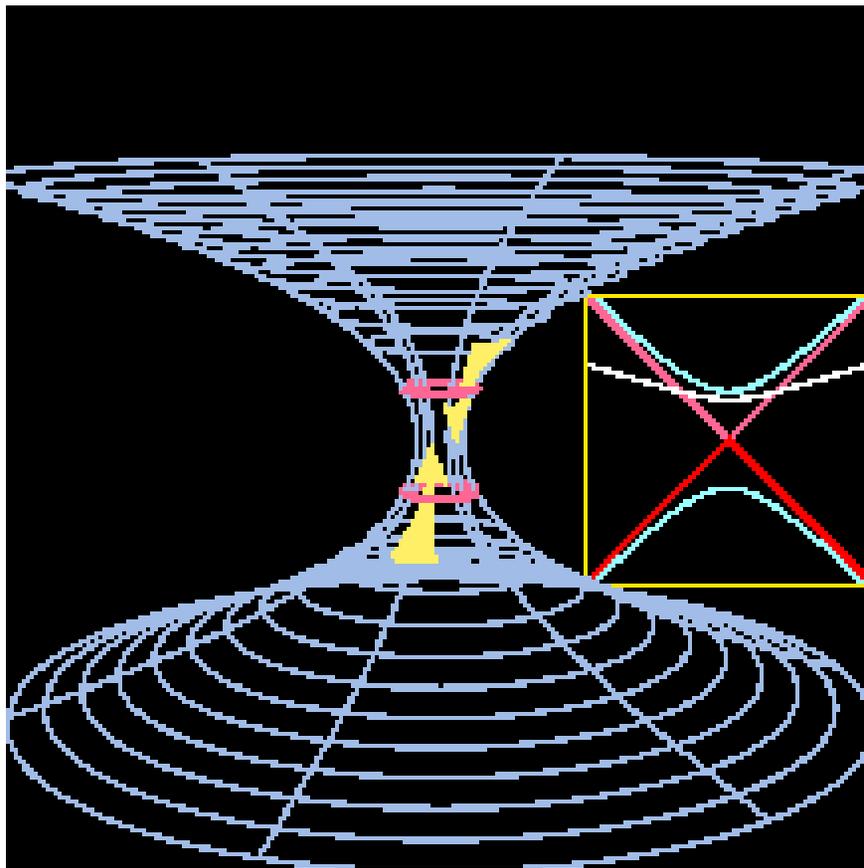


<http://casa.colorado.edu/~ajsh/schww.html>

Quanto maior o buraco negro mais fácil seria a travessia.

Continuaria a existir contudo um problema:
atravessar o horizonte existente do outro lado!

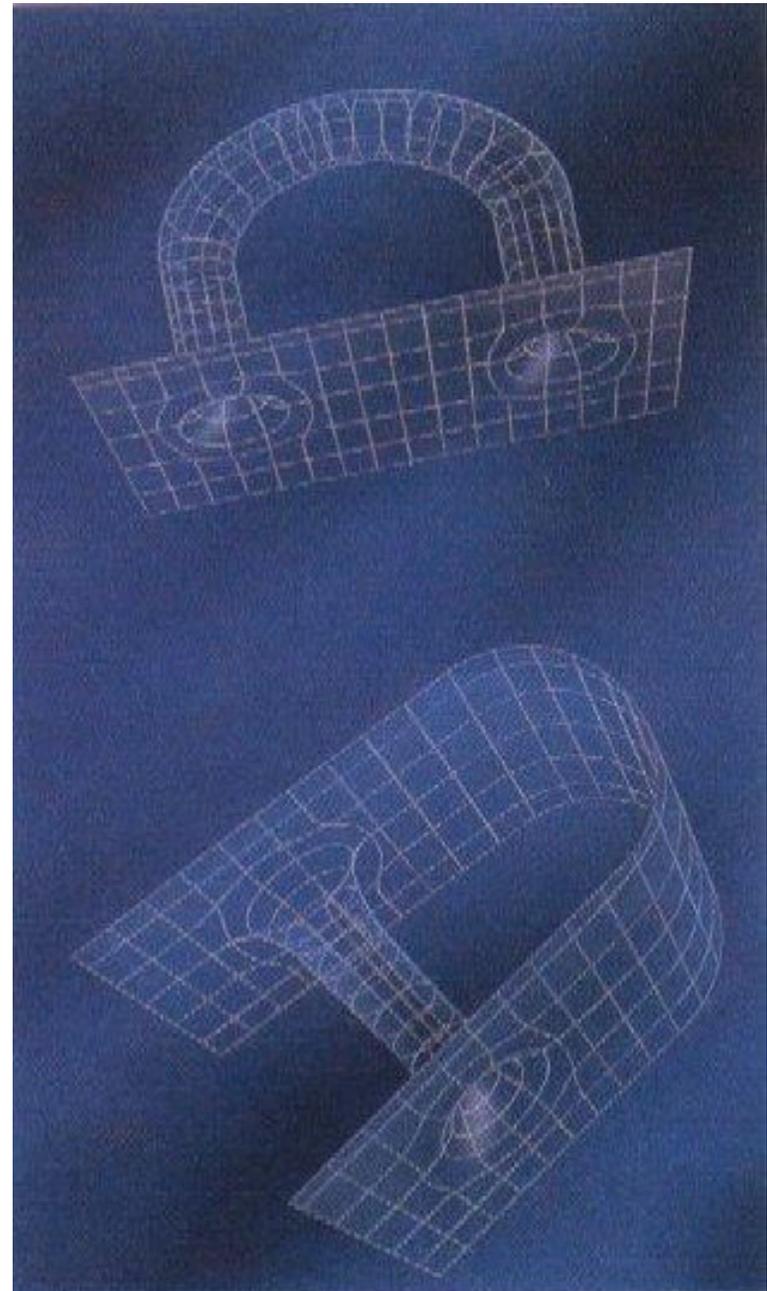
Os wormholes de Schwarzschild são dinâmicos e instáveis.
O wormhole abre e fecha continuamente e por isso esmagaria qualquer viajante



<http://casa.colorado.edu/~ajsh/schww.html>

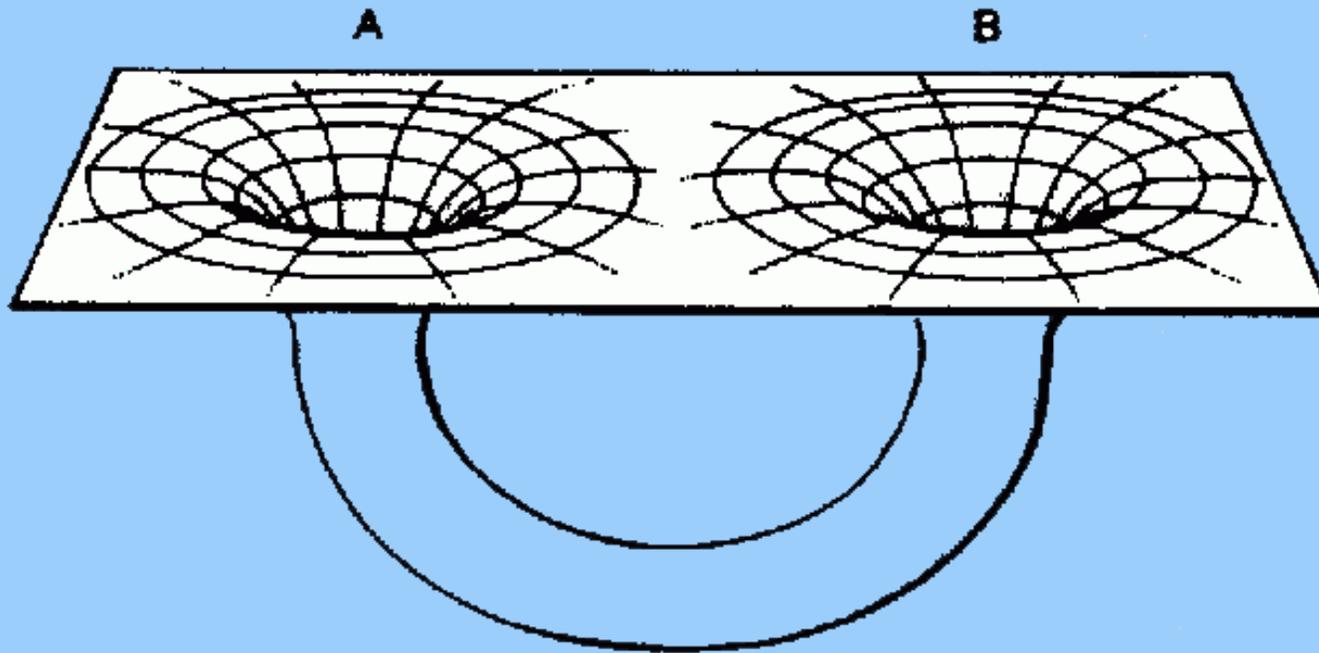
Um buraco negro de **Kerr** poderia como as pontes de Einstein-Rosen levar-nos de um Universo para outro ou ligar partes diferentes do nosso Universo.

Neste caso existe uma vantagem: do lado de lá existe um **buraco branco** pelo que poderíamos sair livremente.



Os **wormholes** não implicam necessariamente a presença de buracos negros.

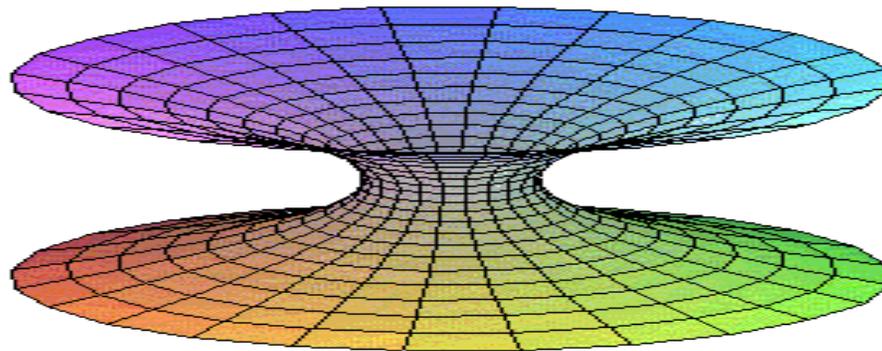
Podem existir como resíduos da evolução do Universo.
São objectos previstos pela teoria da Relatividade Geral !



John Gribbin 1992 - *Unveiling the Edge of Time: Black Holes, White Holes, Wormholes*

Condições a impor na construção de um wormhole "viável" (ver **Contacto** de **Carl Sagan**):

- 1- Forma e tamanho estáticos
- 2- Obedecer às equações da Relatividade Geral
- 3- Ter a forma de um vidro de relógio
- 4- Não ter horizontes de acontecimentos
- 5- Aceleração e forças de maré suportáveis
- 6- Tempo de atravessamento inferior a 1 ano
- 7- Matéria e energia envolvidos razoáveis
- 8- Estável ao ser atravessado
- 9- Não deverá levar muito tempo a construir

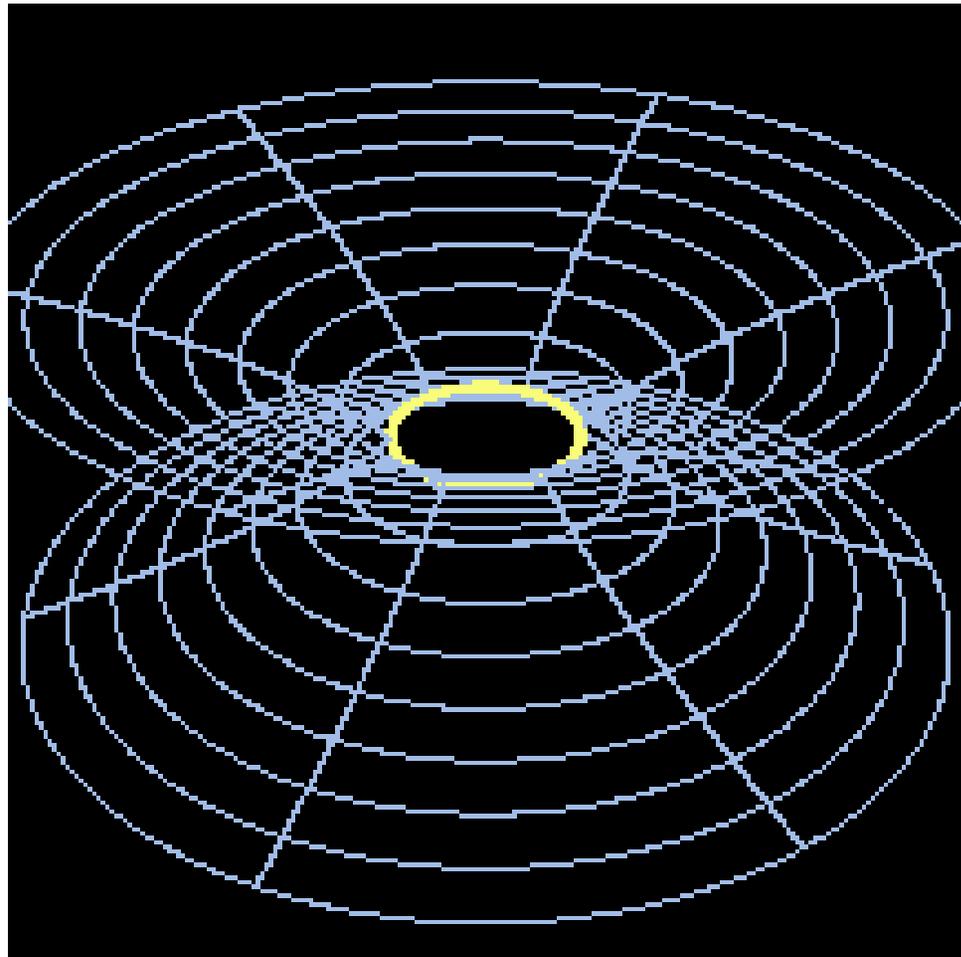


[http://www.oal.ul.pt/
observatorio/vol6/n8
/image1.gif](http://www.oal.ul.pt/observatorio/vol6/n8/image1.gif)

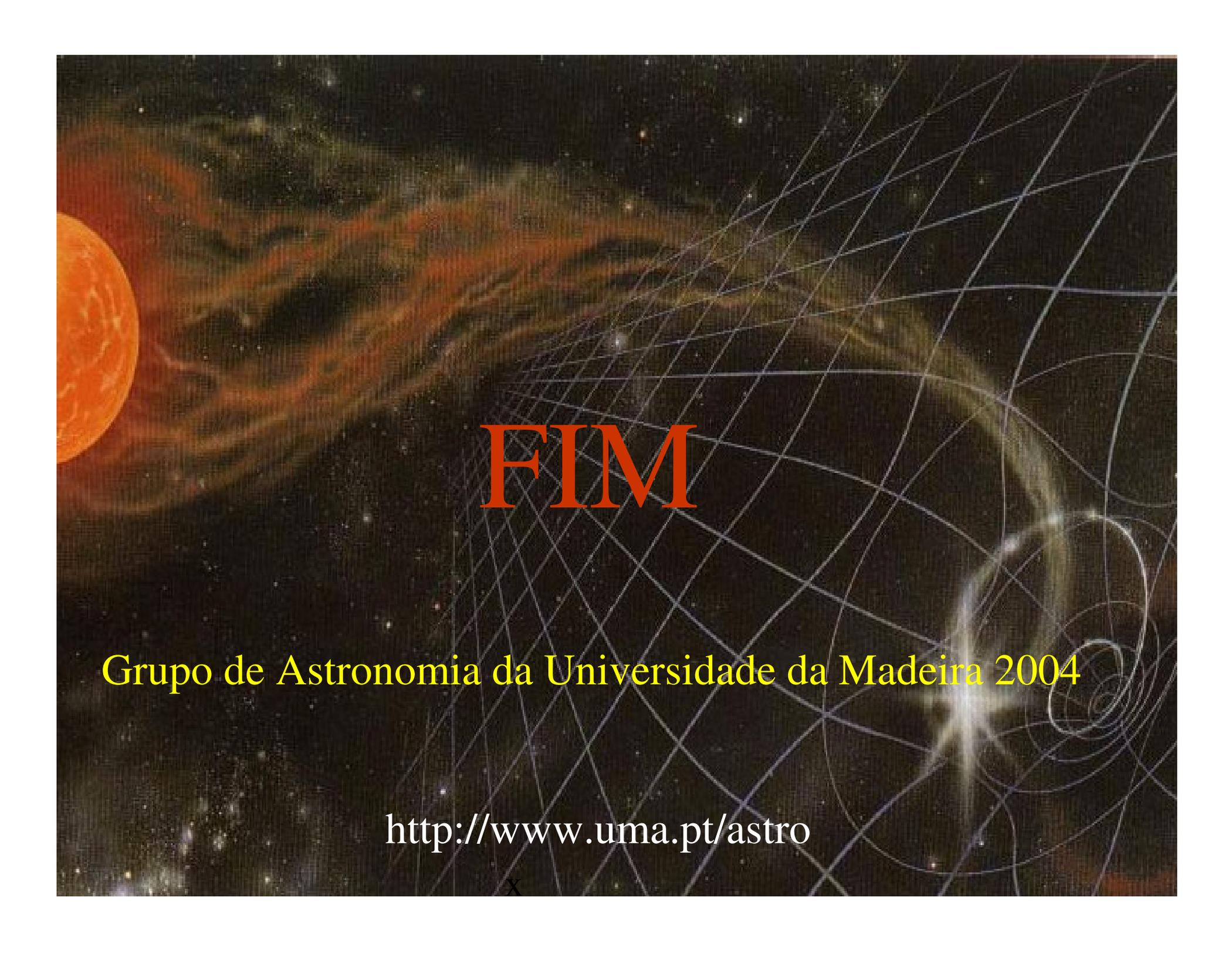
Problema na construção do wormhole: tipo de material

O wormhole teria de ser feito de matéria exótica:

energia negativa
massa negativa
anti-matéria
antigravidade



<http://casa.colorado.edu/~ajsh/schww.html>



FIM

Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira 2004

<http://www.uma.pt/astro>