

**Grupo de Astronomia  
da  
Universidade da Madeira**

# **●s Buracos Negros**

**Laurindo Sobrinho**

**Semana da Astronomia  
24 de Julho de 2001**

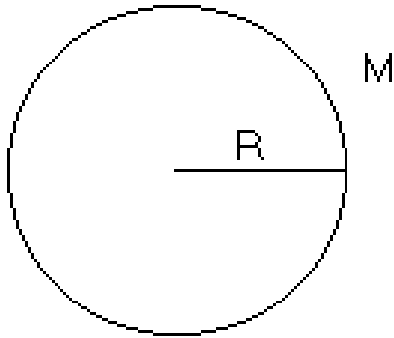
# A velocidade de escape e as estrelas invisíveis

**Velocidade de escape** – velocidade que um corpo deve atingir para que possa escapar à atracção gravítica de um planeta (ou estrela, ...).



**No caso da Terra a velocidade de escape é de 11.2 Km/s.** Se um corpo for lançado da superfície com velocidade inferior a 11.2km/s acaba regressando à superfície.

A Velocidade de escape depende da massa do planeta e do respectivo raio.



$$V_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

onde G é a constante de gravitação universal

$$G = 6.672 * 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

A velocidade de escape será tanto maior quanto maior for a massa e menor for o raio.

<b>Objecto</b>	<b>Massa (Kg)</b>	<b>Raio (Km)</b>	<b>Vesc(Km/s)</b>
Terra	$5.97 \cdot 10^{24}$	6378	11.2
Lua	$7.35 \cdot 10^{22}$	1738	2.4
XYZ	$4.84 \cdot 10^{35}$	318900	450000

A velocidade da luz no vácuo é  $C = 300000 \text{ Km/s}$ .

Verifica-se que  $V_{esc}(\text{XYZ})$  é maior que  $C$ . Logo a luz não pode escapar de XYZ. Logo XYZ é um objecto (planeta, estrela,...) invisível!!!

Foi com base nesta ideia que o inglês John Michell (1783) e o francês Pierre Laplace (1795) introduziram a ideia de 'estrela invisível'.

No seu livro “ Exposição do sistema do mundo “, editado em 1795, Laplace escreveu:

"Uma estrela luminosa, da mesma densidade da Terra, cujo diâmetro fosse 250 vezes maior do que o do Sol, não deixaria, em consequência da sua atracção, nenhum dos seus raios de luz chegar até nós. É assim possível que os maiores corpos do Universo, por essa razão, sejam invisíveis."

Esta ideia de estrela invisível não corresponde à definição actual de buraco-negro.

Na altura julgava-se que o facto da luz não escapar não significava que nenhum outro objecto o poderia fazer – bastava ter uma velocidade superior à da luz. Hoje sabemos que nenhum objecto pode viajar (no vácuo) mais rápido do que a luz.

Além disso ignorava-se que um objecto (como XYZ) deforma o espaço e o tempo na sua vizinhança de modo que não se podem aplicar as mesmas leis da mecânica como se aplicam, por exemplo, no Sistema Solar.

Para descrever rigorosamente um buraco negro há que recorrer à **Teoria da Relatividade Geral** (desenvolvida por Einstein no início do século XX).

Os buracos negros são soluções possíveis para as equações de Einstein. No entanto, são objectos de tal forma exóticos que, na falta de qualquer evidência da sua existência, a ideia foi deixada de lado ao longo de muitas décadas.

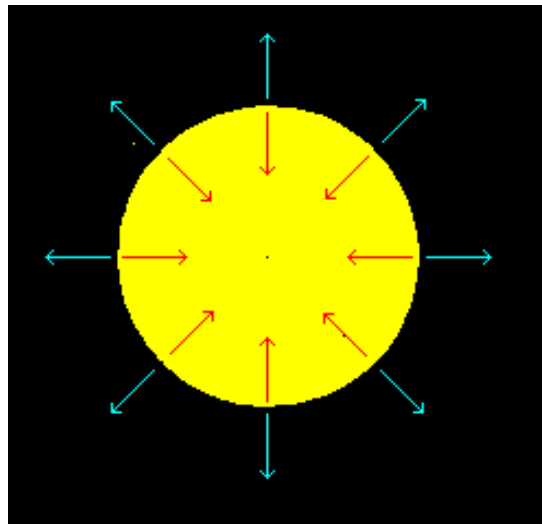
Apenas a descoberta de objectos exóticos como as anãs brancas e as estrelas de neutrões veio reavivar (a partir dos anos 60) o entusiasmo e o interesse pelo estudo dos buracos negros.

# Formação de buracos negros por colapso gravitacional

Numa estrela actuam dois tipos de forças:

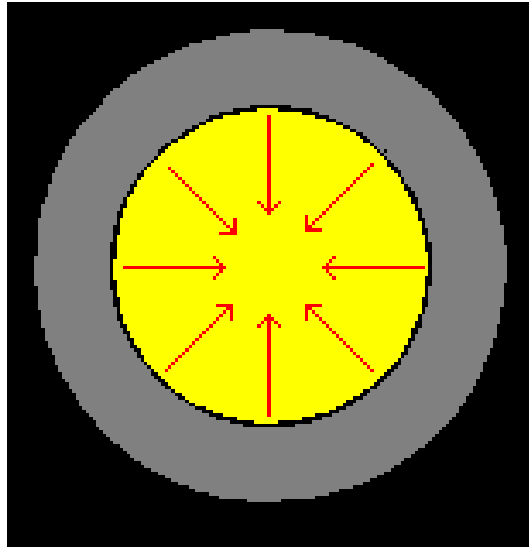
 a força gravítica (aponta para o centro)

 a pressão exercida pela energia libertada pelas reacções nucleares que ocorrem no seu interior (aponta para o exterior)



Estas forças equilibram-se mutuamente possibilitando à estrela uma vida muito longa (pode ir até aos milhares de milhões de anos).

No entanto é chegada uma altura em que cessam as reacções nucleares. A partir desse momento temos apenas a acção da força gravítica ████████. A estrela começa a colapsar.



O que se passa a seguir depende da massa da estrela (nessa fase):

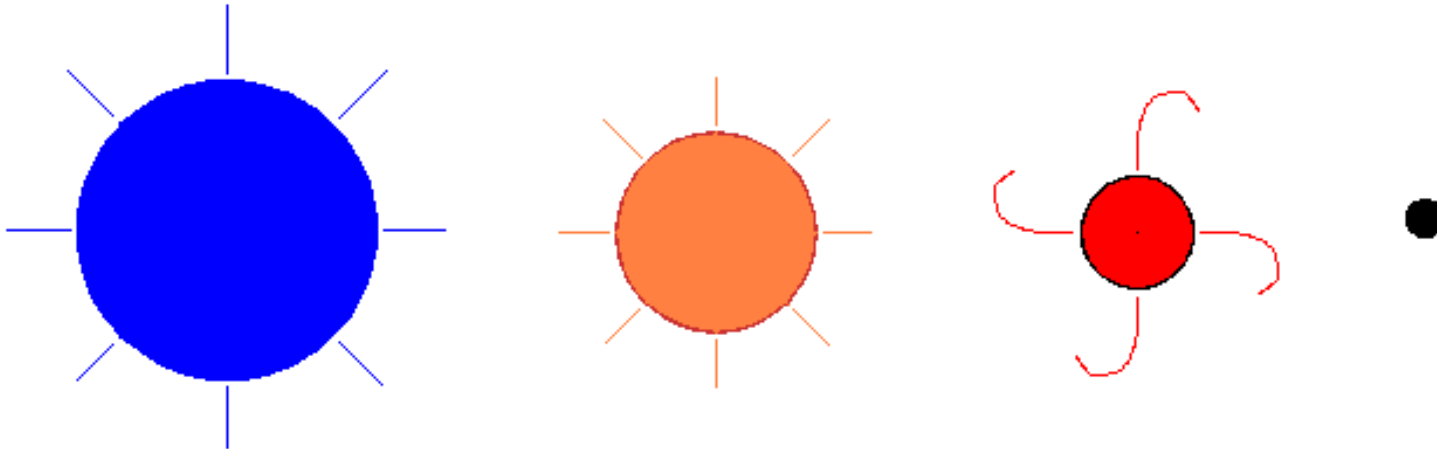
até 1.5 massas solares	anã branca
de 1.5 a 3.0 massas solares	estrela de neutrões
<b>mais de 3.0 massas solares</b>	buraco negro

**Quando a massa excede 3 massas solares nada pode deter o colapso. O colapso continua até que toda a massa da estrela esteja concentrada num ponto !?**



# Horizonte de Acontecimentos

À medida que se dá o colapso o raio da estrela vai diminuindo mas a sua massa continua a ser a mesma. Isto significa que a velocidade de escape da superfície da estrela aumenta. Quando a velocidade de escape iguala a velocidade da luz a estrela deixa de ser visível.



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

O raio para o qual a velocidade de escape iguala a velocidade da luz chama-se **raio de Schwarzschild**. A superfície esférica definida por este raio chama-se **horizonte de acontecimentos**.

Só se podem ver acontecimentos exteriores ao horizonte de acontecimentos. Nada do que se passa lá dentro pode ser visto do lado de fora. No entanto o colapso continua no interior.

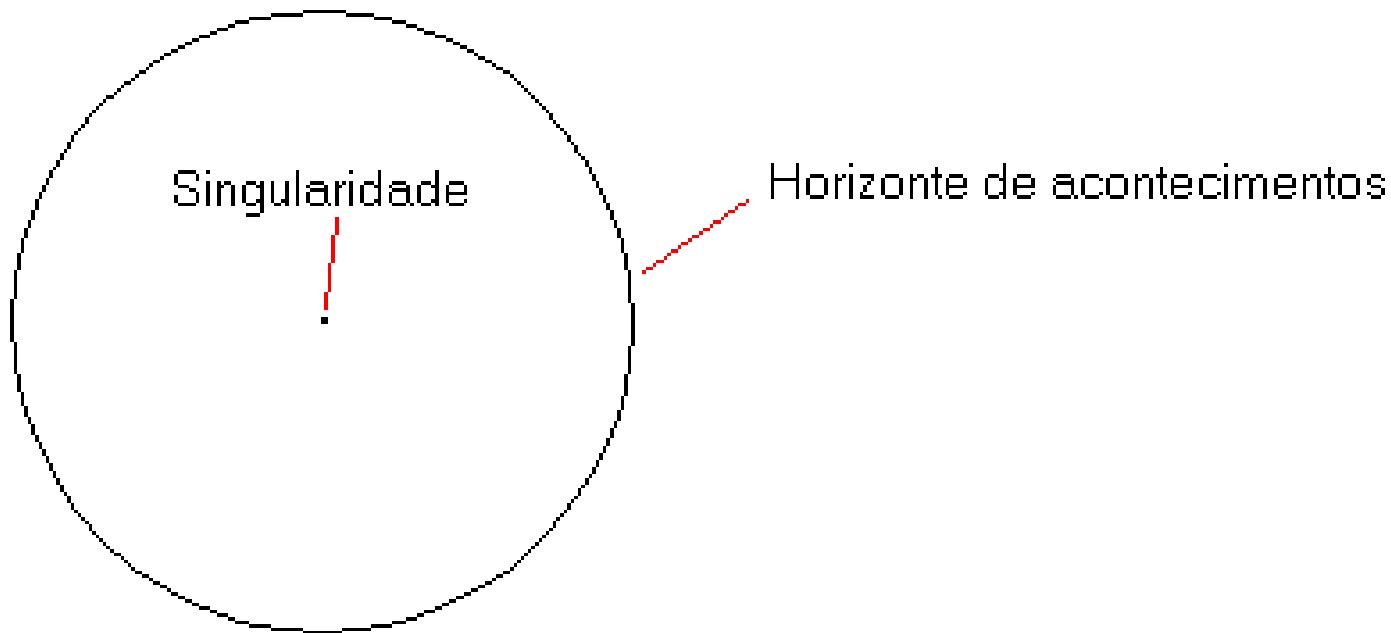
Sobre o horizonte de acontecimentos ficam os últimos fótons de luz que tentaram escapar da estrela.

Alguns exemplos de raios de Schwarzschild:

estrela com 3 massas solares	9 Km
Sol	3 Km
Terra	9 mm

# Singularidade

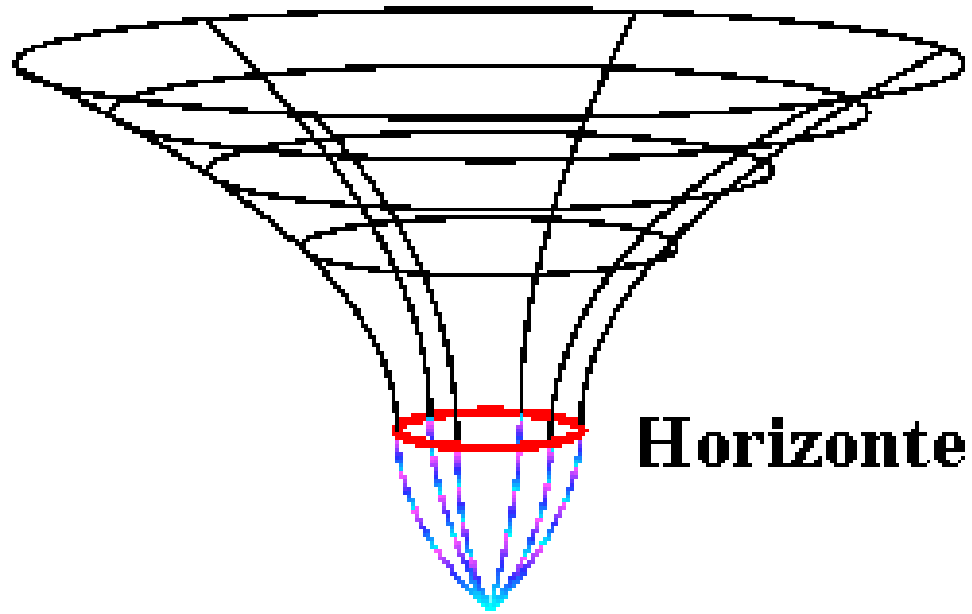
Após o colapso toda a massa da estrela fica concentrada num único ponto. A esse ponto chama-se **singularidade**. Aqui não sabemos muito bem como aplicar as leis da física (ou mesmo se são aplicáveis) pois não sabemos bem qual o estado em que a matéria fica a este nível.



Segundo a Teoria da Relatividade Geral de Einstein (por várias vezes testada com êxito) uma massa tão compacta como um **buraco negro modifica o espaço e o tempo à sua volta.**



O espaço deixa de ser plano e sofre uma certa deformação. Essa deformação começa do lado de fora do horizonte e continua, cada vez mais acentuadamente, no seu interior. O declive da curvatura do espaço fica cada vez mais acentuado até que se torna infinito. Nesse momento perdemos a nossa capacidade de determinar o futuro. Dizemos que estamos perante uma **singularidade**.



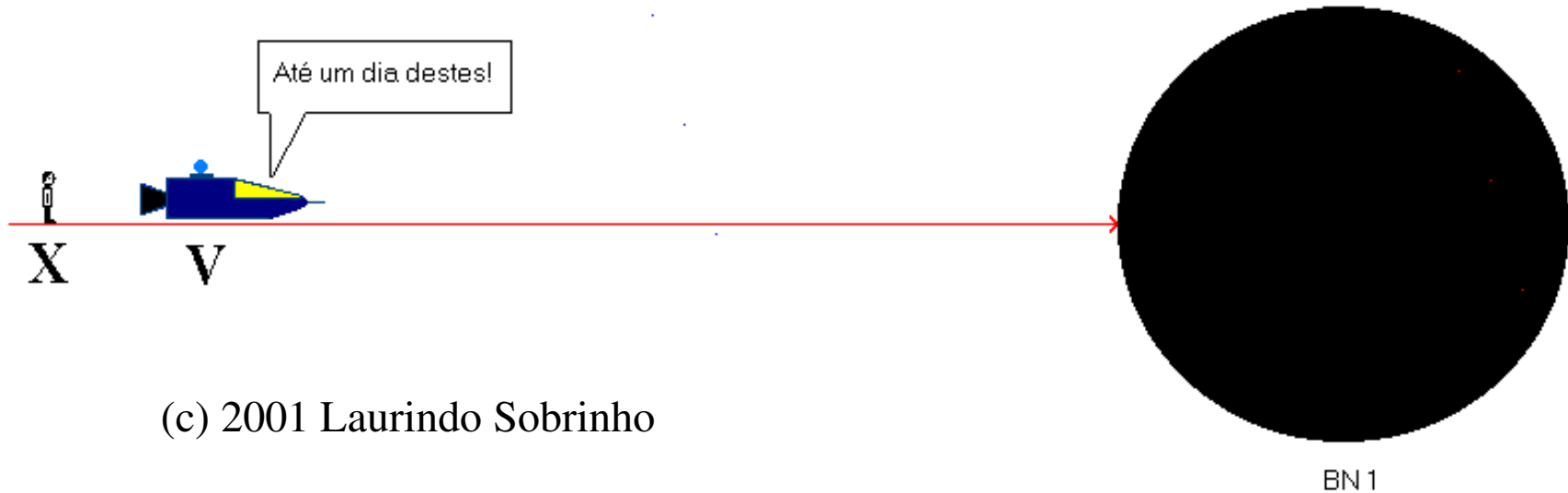
**Horizonte**

**Singularidade**

[http://casa.colorado.edu/~ajsh/geombig\\_gif.html](http://casa.colorado.edu/~ajsh/geombig_gif.html)

Esta singularidade não afecta os observadores externos. Eles estão protegidos pelo horizonte de acontecimentos.

# Viagem ao lado de lá do horizonte



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

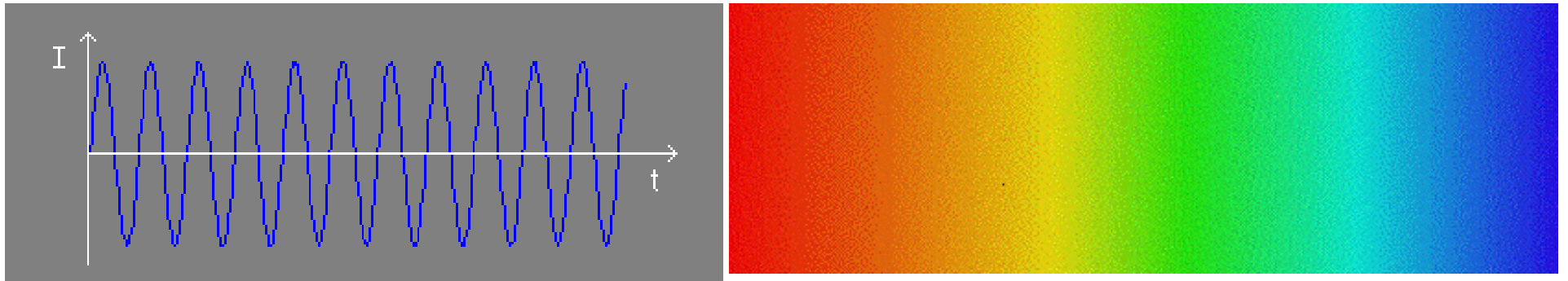
Os dois observadores sincronizam os respectivos relógios e despedem-se (até um dia destes...). Vamos relatar a viagem do ponto de vista de cada um dos observadores.

**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 ?

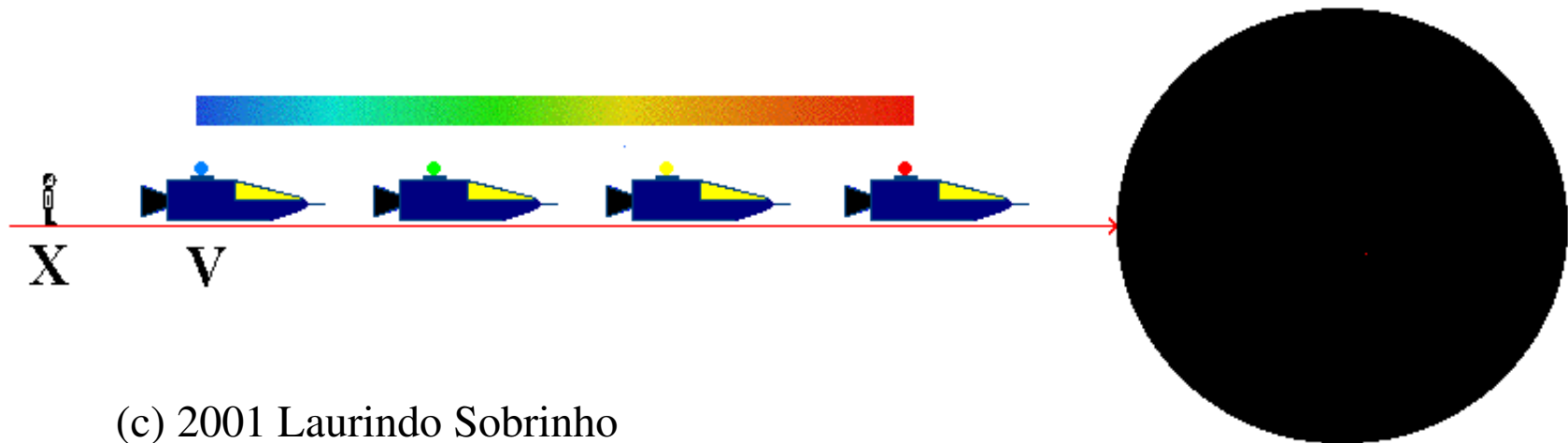
É uma onda electromagnética que efectua 667 000 000 000 000 oscilações por segundo.



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



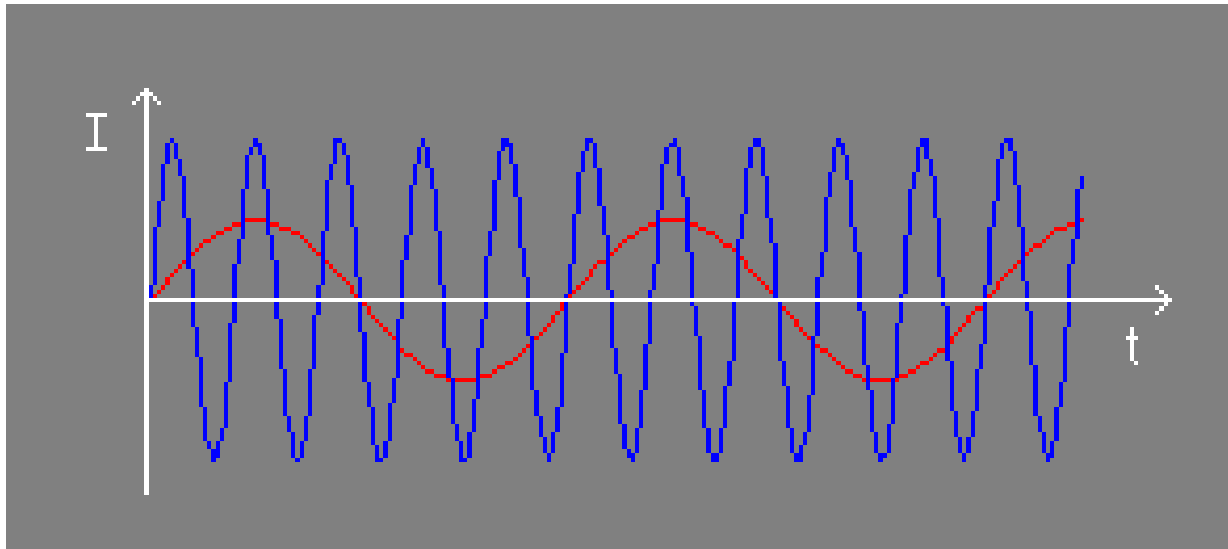
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

BN1

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

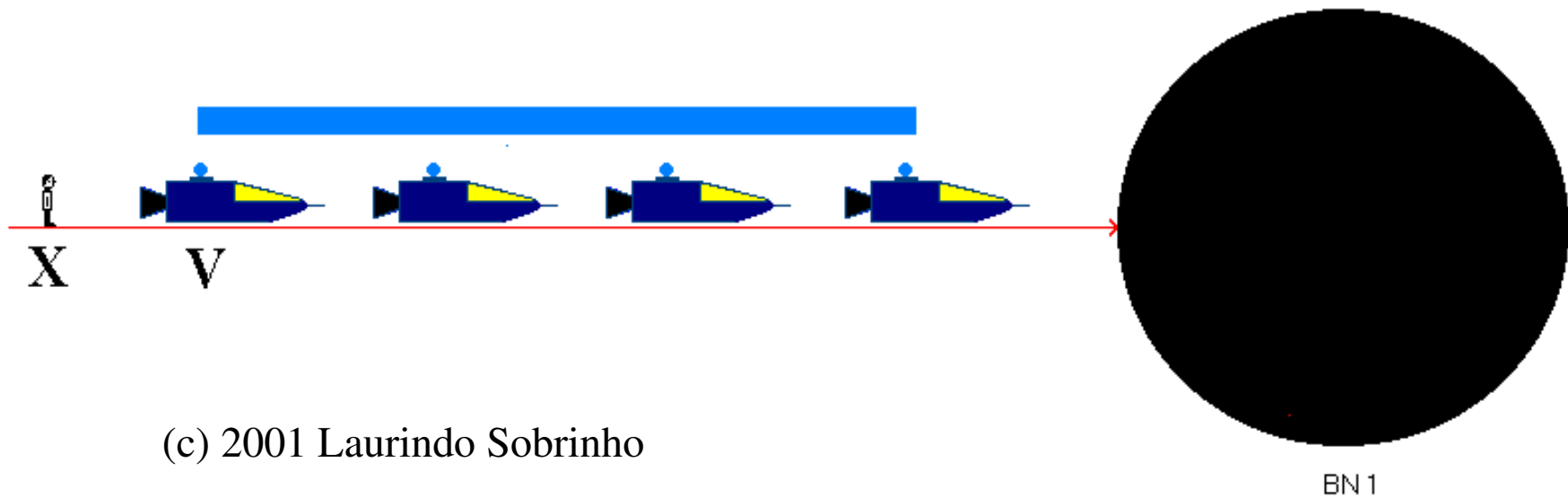


Depois do vermelho a luz deixa de ser visível mas continua a ser detectável no domínio dos raios infra-vermelhos e depois como uma micro onda ou onda de rádio. Além disso a radiação é cada vez menos intensa.

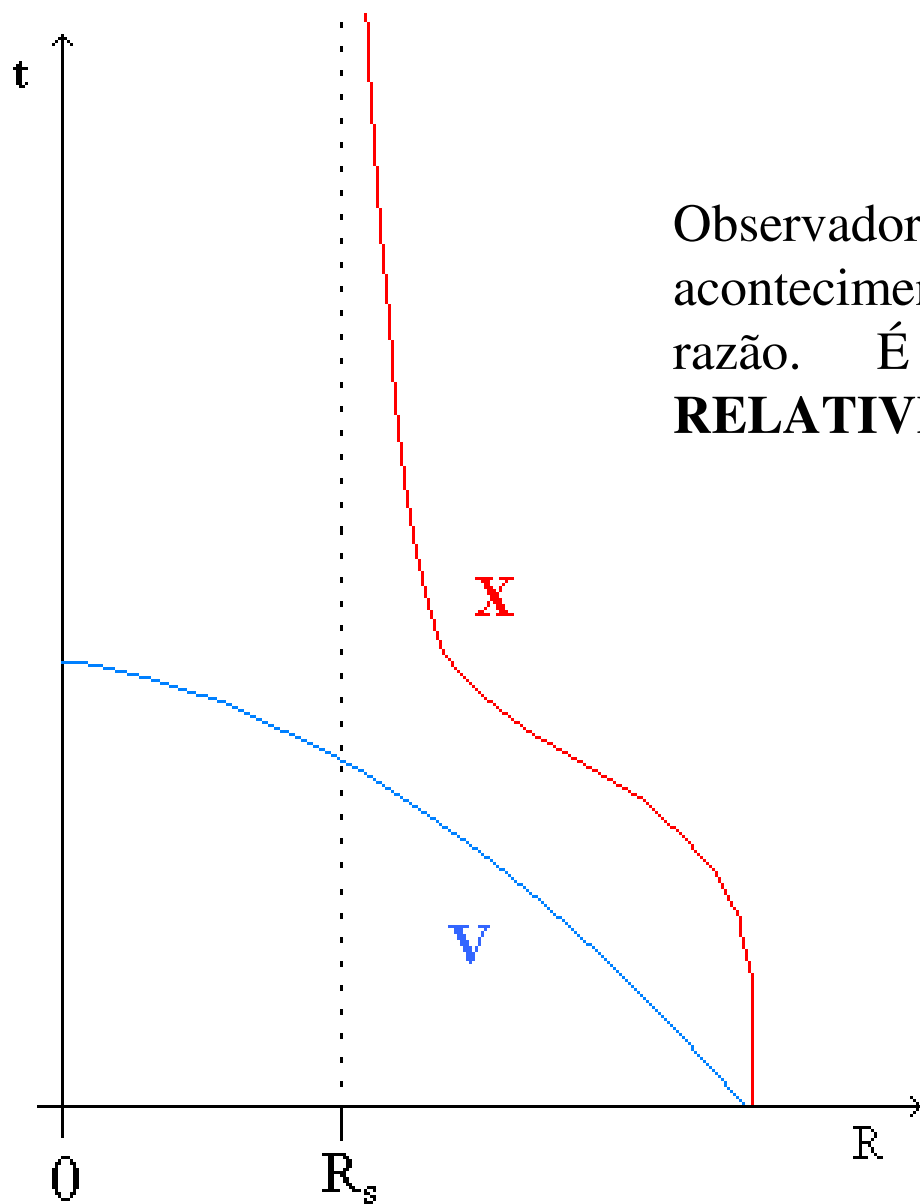


Do ponto de vista do observador  $X$  a nave **nunca** chega ao horizonte. No entanto como a luz que vem da nave é cada vez menos intensa esta acaba por ser indetectável. Haverá um ponto em que essa radiação será confundível com a radiação de fundo.

**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.



(c) 2001 Laurindo Sobrinho



Observadores diferentes podem ver o mesmo acontecimento de forma diferentes. Ambos têm razão. É aqui que entra a palavra **RELATIVIDADE**.

(c) 2001 Laurindo Sobrinho

# Evitando a Singularidade

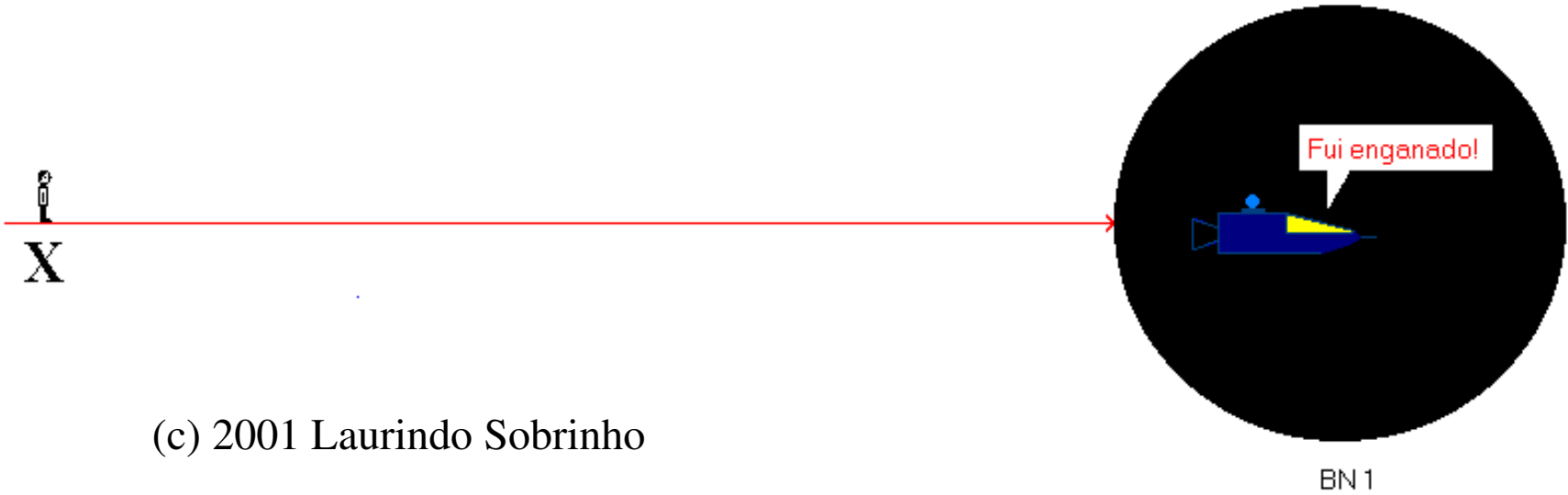
Uma vez ultrapassada o horizonte de acontecimentos será possível evitar a singularidade ?

**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.



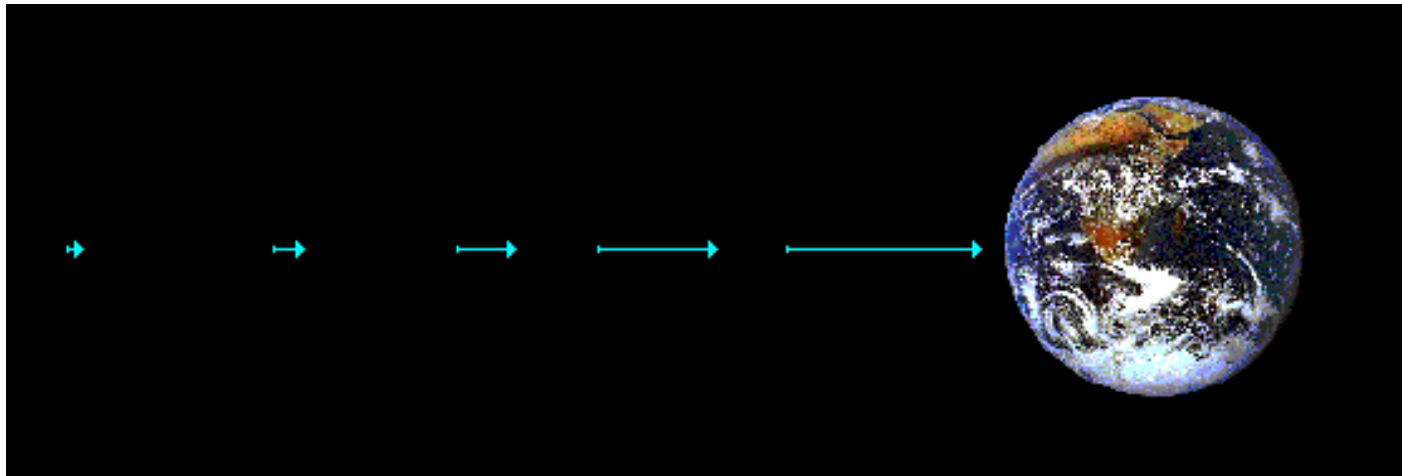
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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

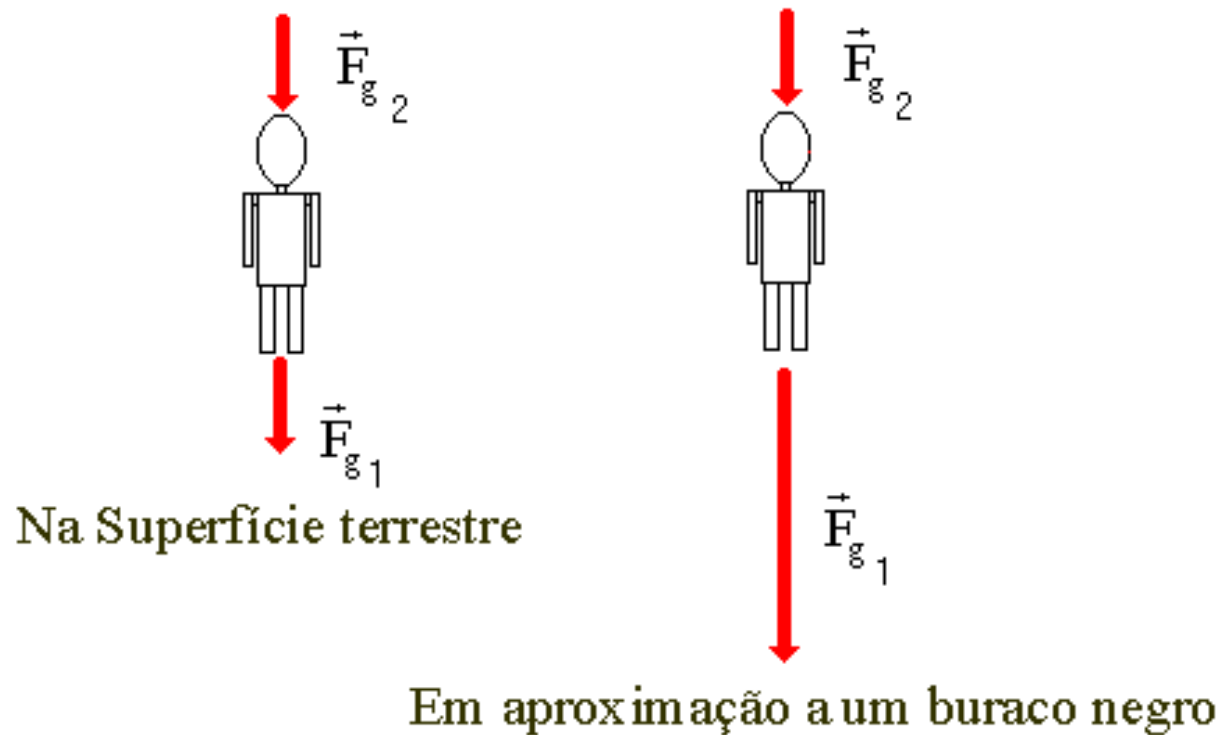
**No interior do buraco negro não é possível estar em repouso num ponto do espaço!**

# 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.

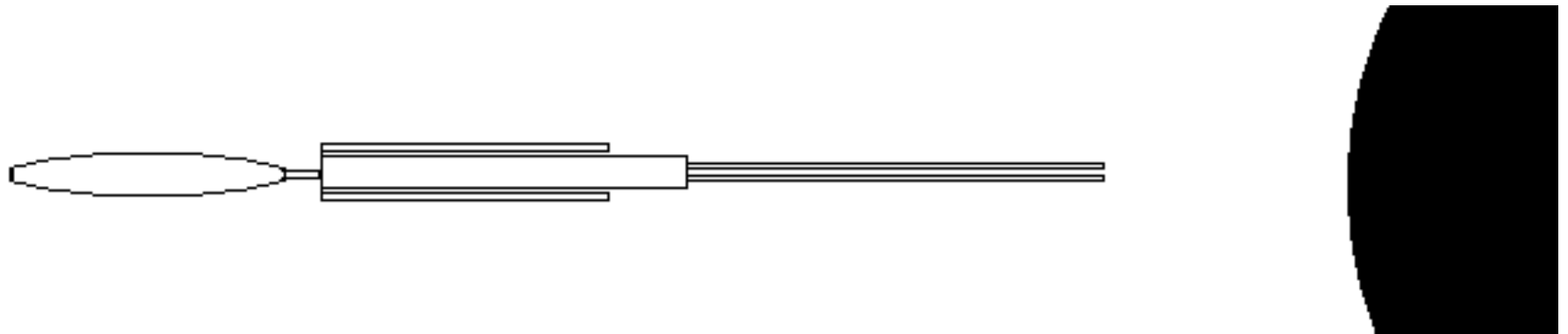


Isto significa que a força da gravidade que actua ao nível dos nossos pés é superior aquela que actua ao nível da nossa cabeça. O efeito não é muito significativo se estivermos sujeitos a um campo gravítico como o da Terra. As duas forças praticamente são iguais.



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

Se, por outro lado, estivermos sujeitos a um campo gravítico, como aquele que existe nas imediações de um buraco negro, há uma grande diferença entre as duas forças. A diferença entre as duas forças chama-se força de **maré**. Seríamos alvo de um processo de esticamento chamado ‘ **esparguetificação** ‘.



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

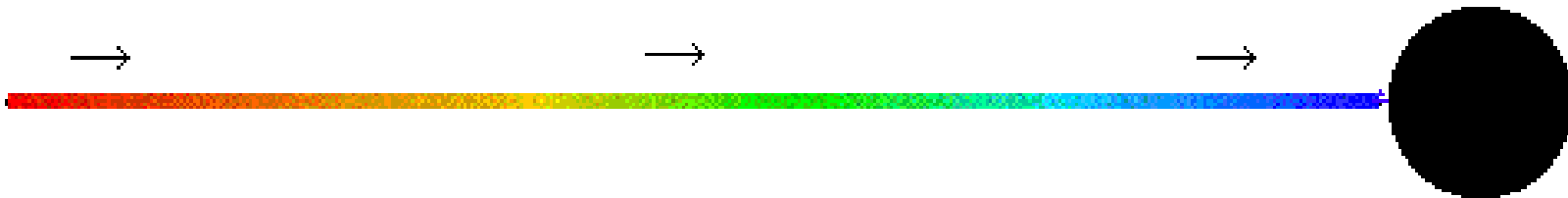
No caso dos buracos negros mais pequenos a ‘**espaguetificação**’ começa ainda do lado de fora do horizonte. Se fosse esse o caso do exemplo anterior o nosso voluntário estaria feito num esparguete antes de ter atingido o horizonte.



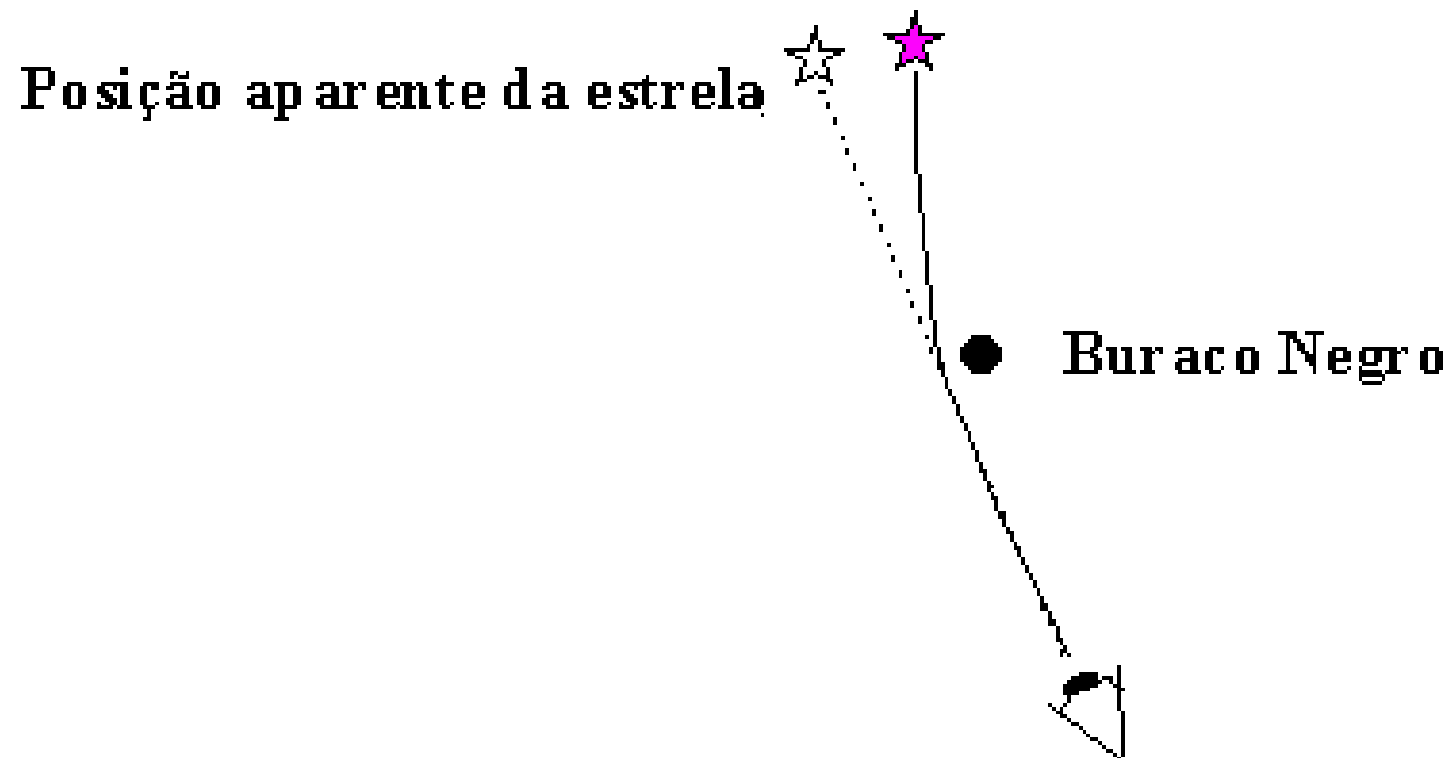
# Os buracos negros afectam os raios de luz

A força da gravidade afecta a luz mas não da mesma forma que afecta os outros corpos.

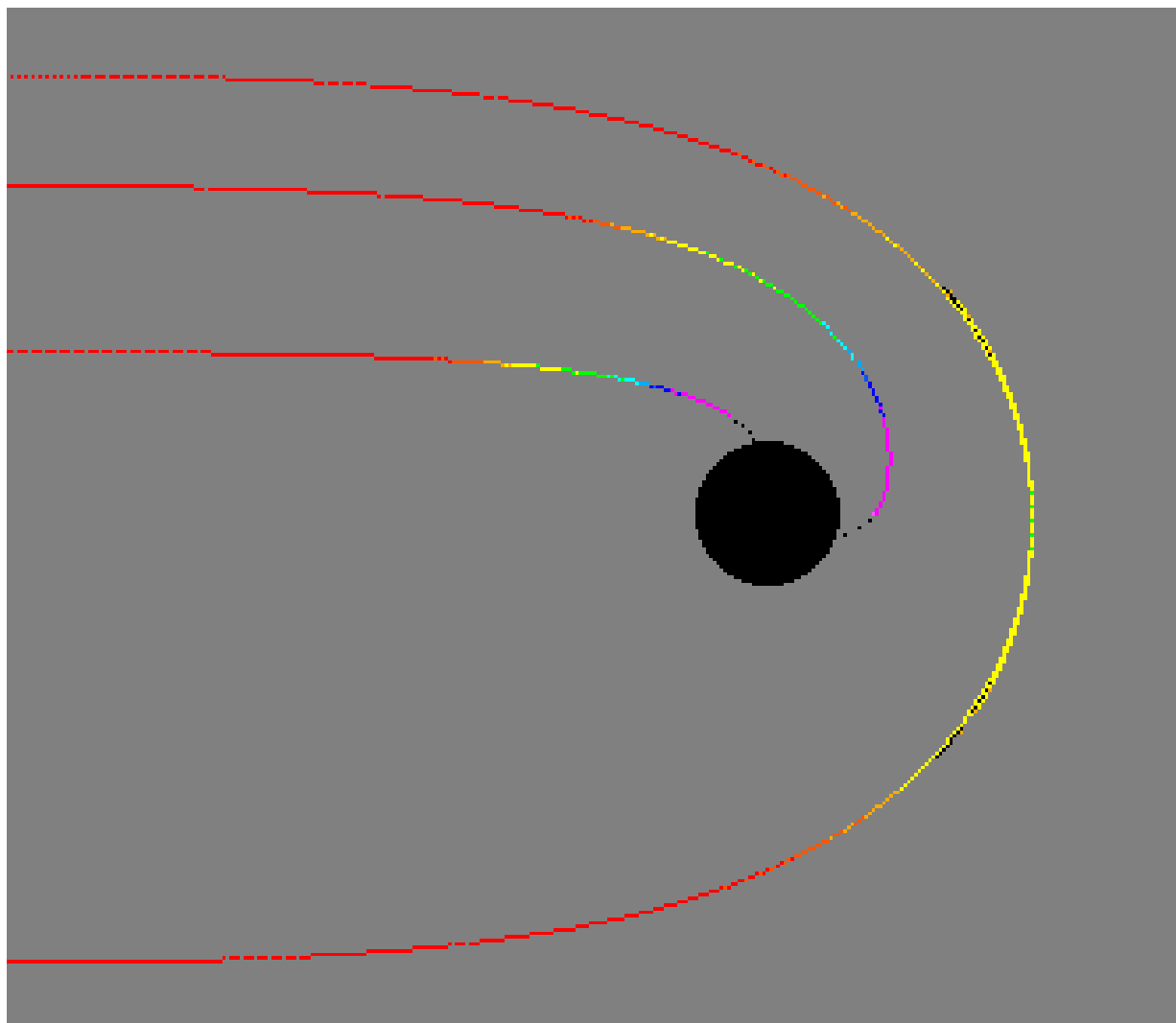
Uma nave pode ser acelerada ou desacelerada por acção da gravidade. A luz não. A **velocidade de propagação** da luz no vazio é sempre a mesma. O que a gravidade afecta é a **velocidade de oscilação** da onda electromagnética, ou seja, a frequência da onda.



Além de afectar a frequência dos raios de luz a gravidade desvia-os das suas trajectórias:



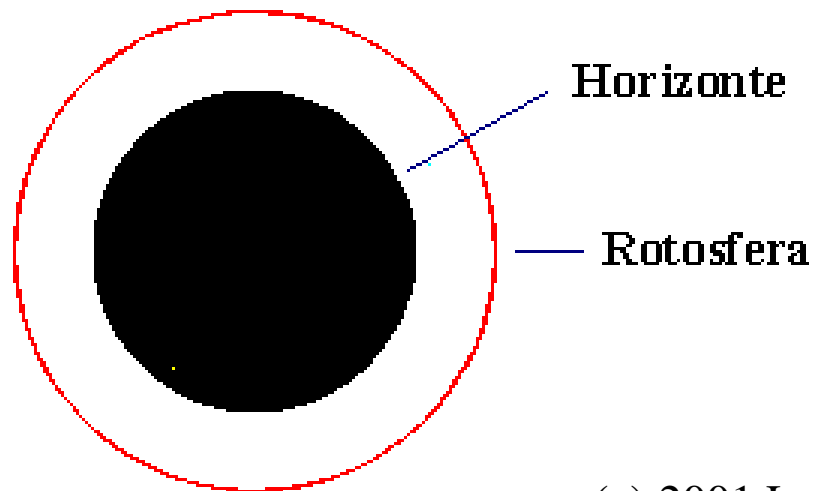
(adaptado de <http://www.astro.ku.dk/~cramer/RelViz/text/exhib3/exhib3.html>)



Estes efeitos só são largamente significativos a distâncias relativamente pequenas do horizonte.

# Os raios de luz também andam às voltas

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.

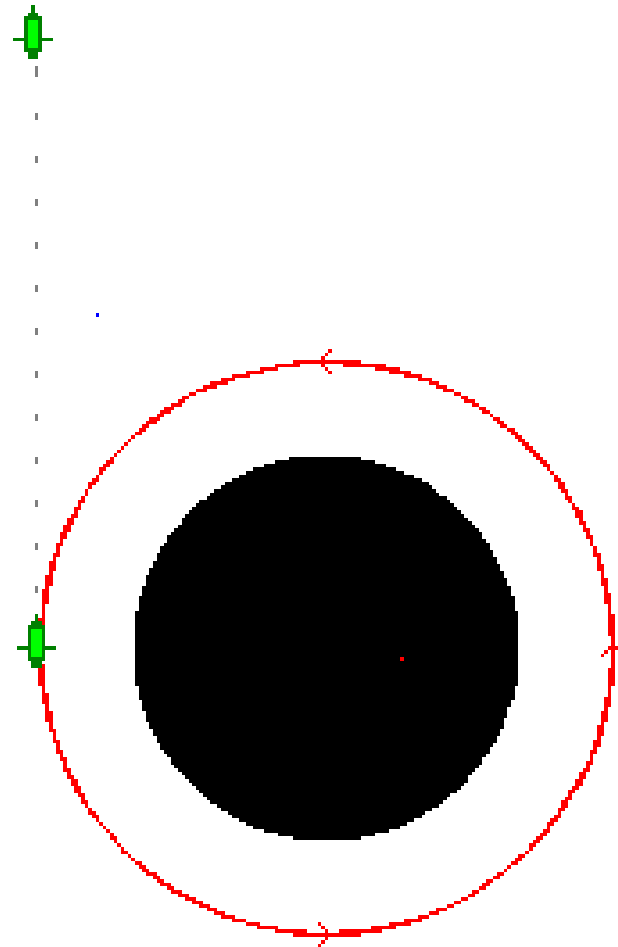


(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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**.

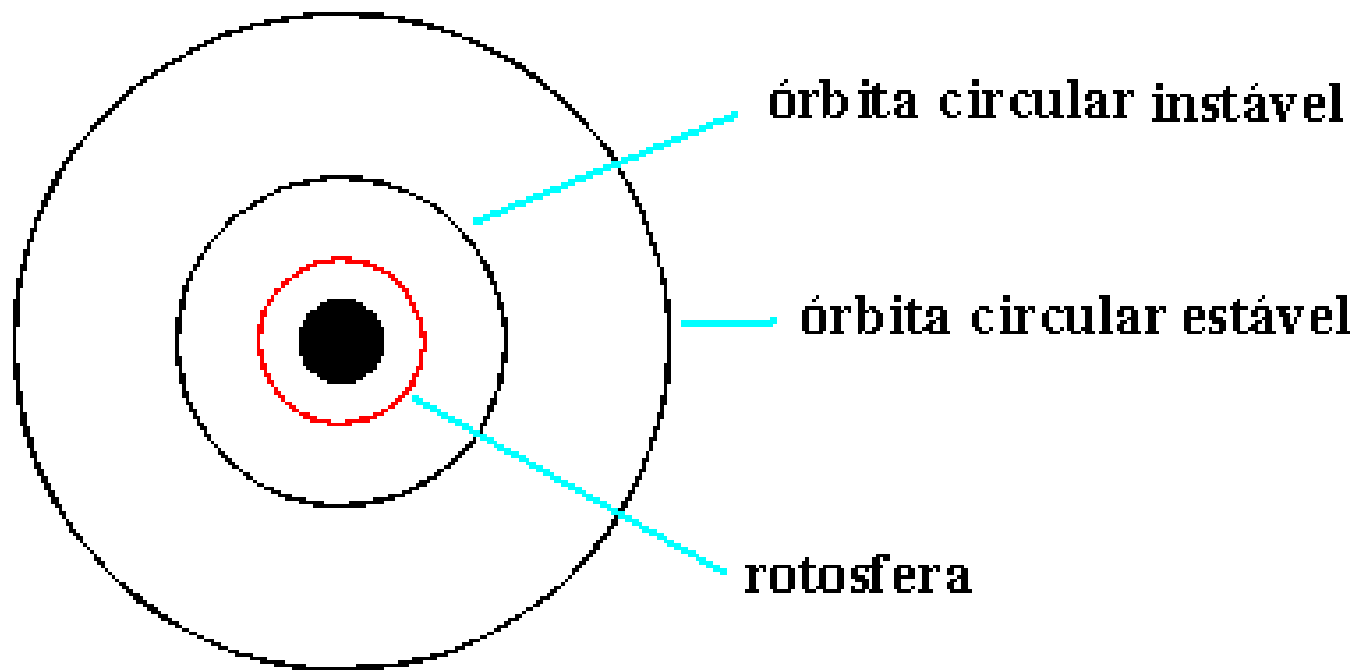
**Está uma nave igual  
à nossa lá adiante !**



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

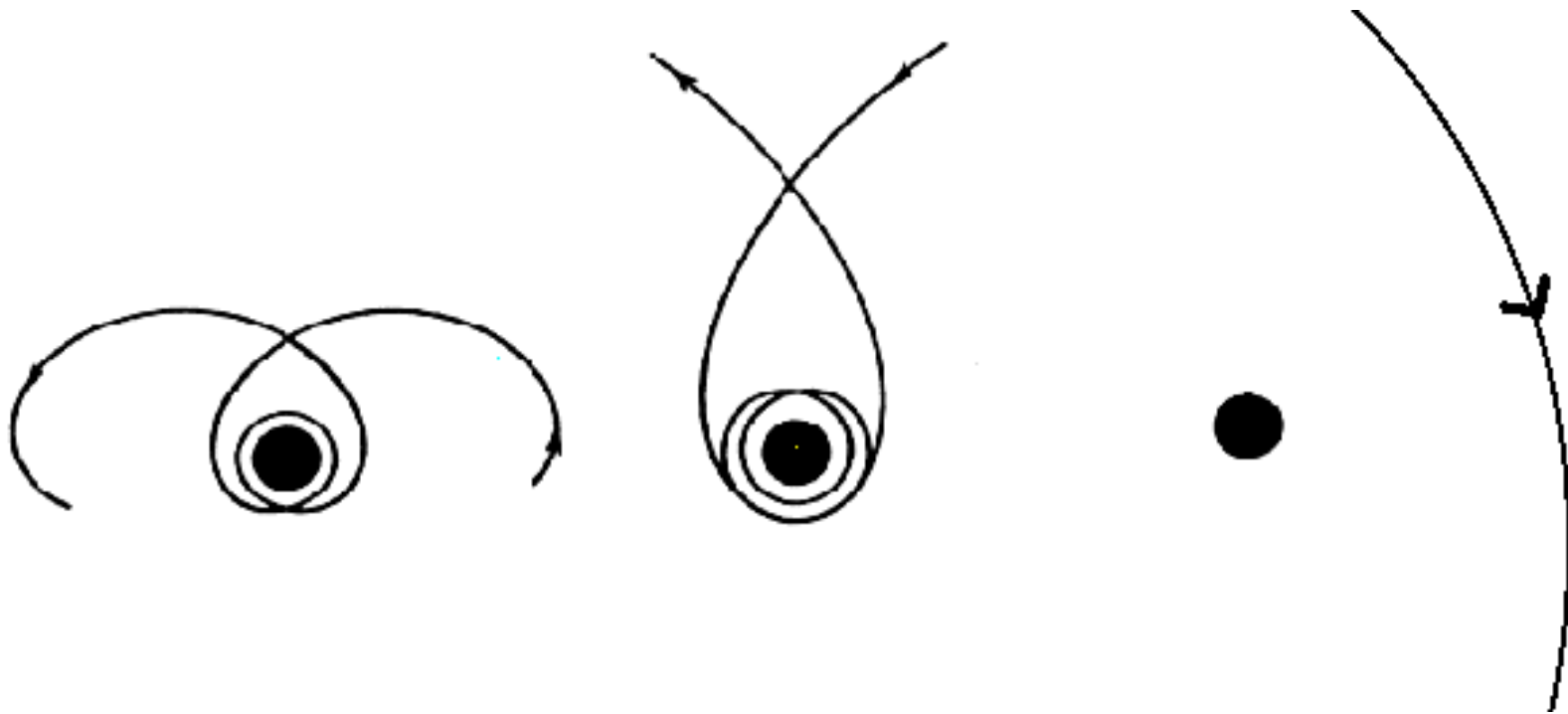
# Trajectórias para corpos nas proximidades de um buraco negro

Existem duas órbitas circulares



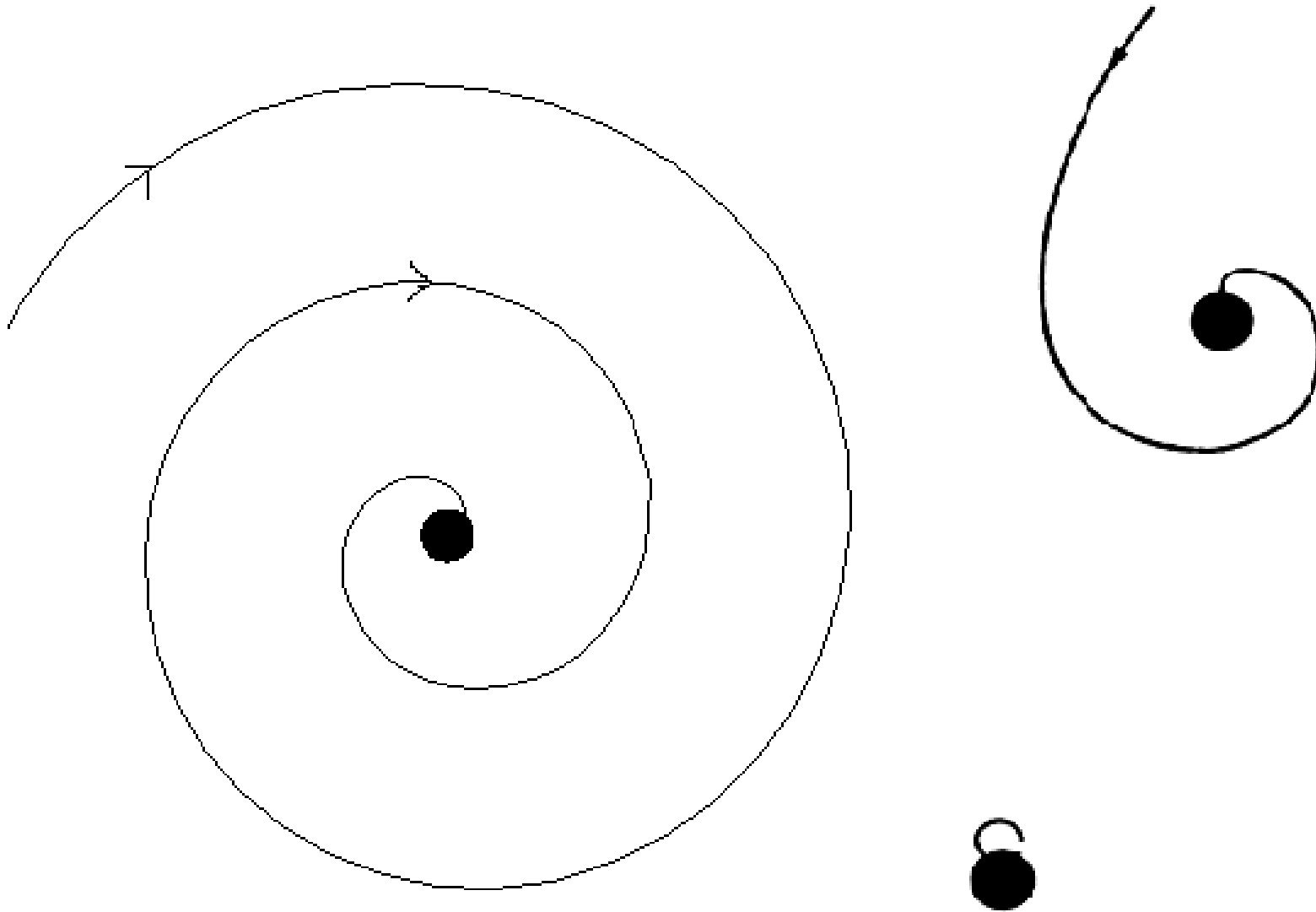
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

Exemplos de órbitas em que a partícula se aproxima do buraco negro e escapa sem ser capturada por este:



(S. Chandrasekhar, *The Mathematical Theory of Black Holes*, 1983, Clarendon Press)

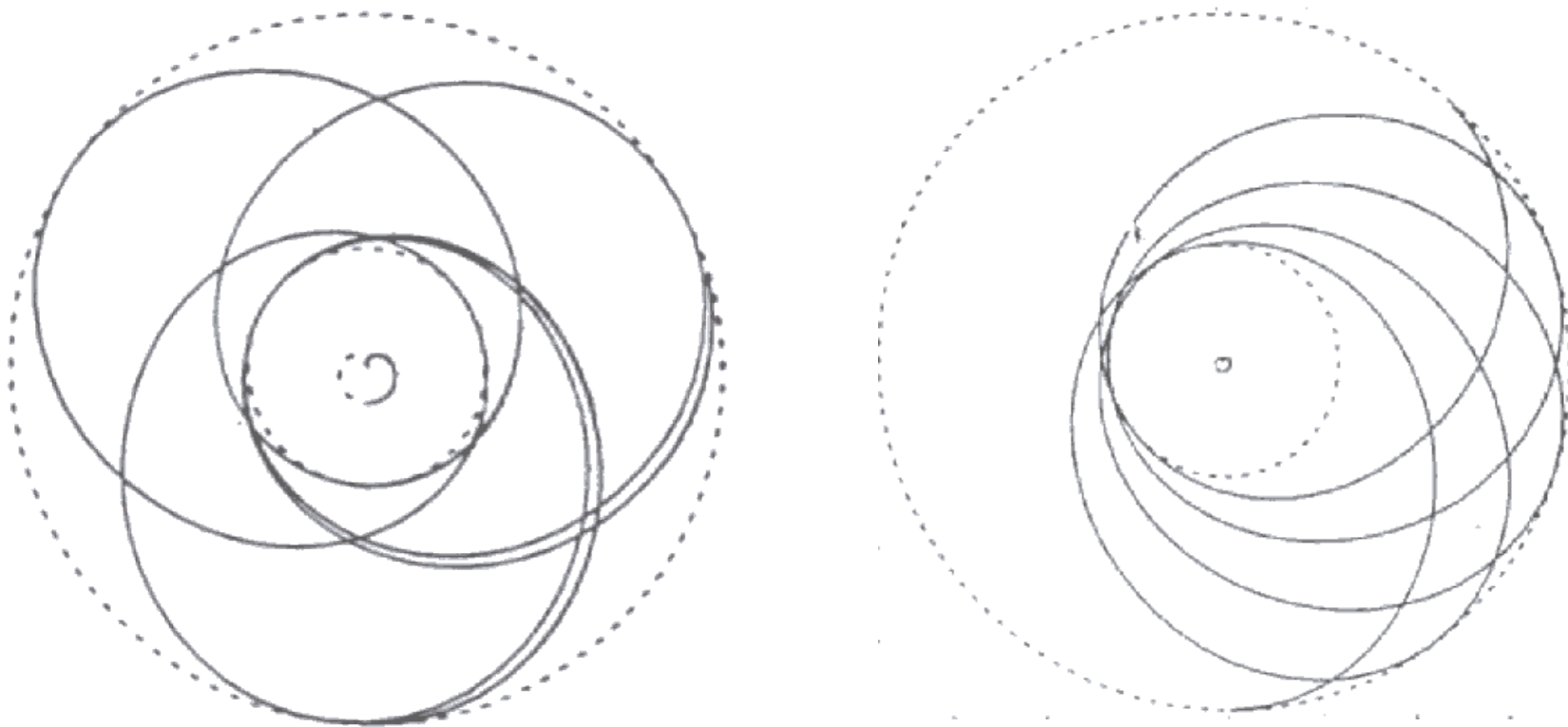
Exemplos de órbitas em que a partícula se aproxima do buraco negro acabando por ser capturada por este:



(S. Chandrasekhar, *The Mathematical Theory of Black Holes*, 1983, Clarendon Press)



Exemplos de órbitas em que a partícula anda em torno do buraco negro sem ser capturada e sem escapar para longe:



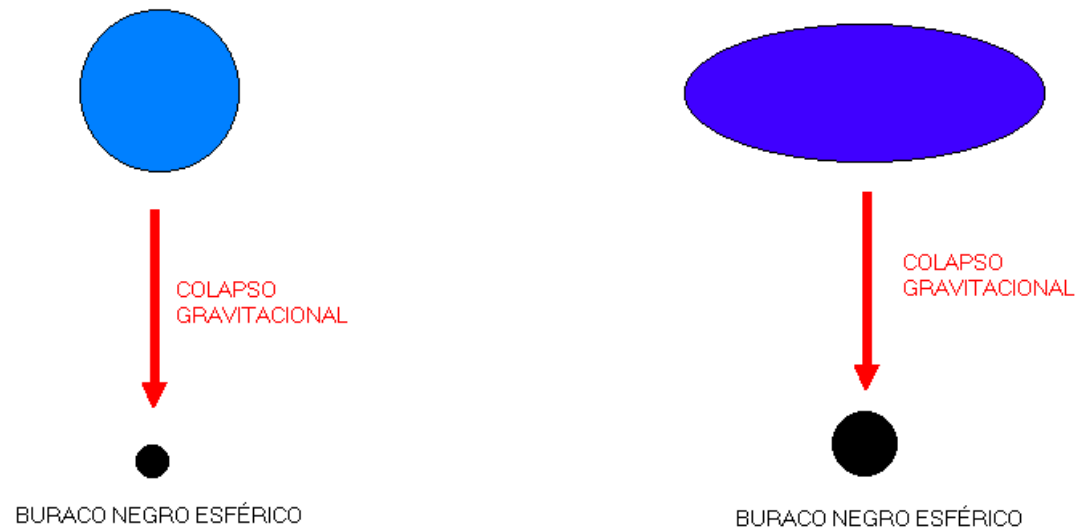
(S. Chandrasekhar, *The Mathematical Theory of Black Holes*, 1983, Clarendon Press)

# Massa, Carga eléctrica e Momento angular

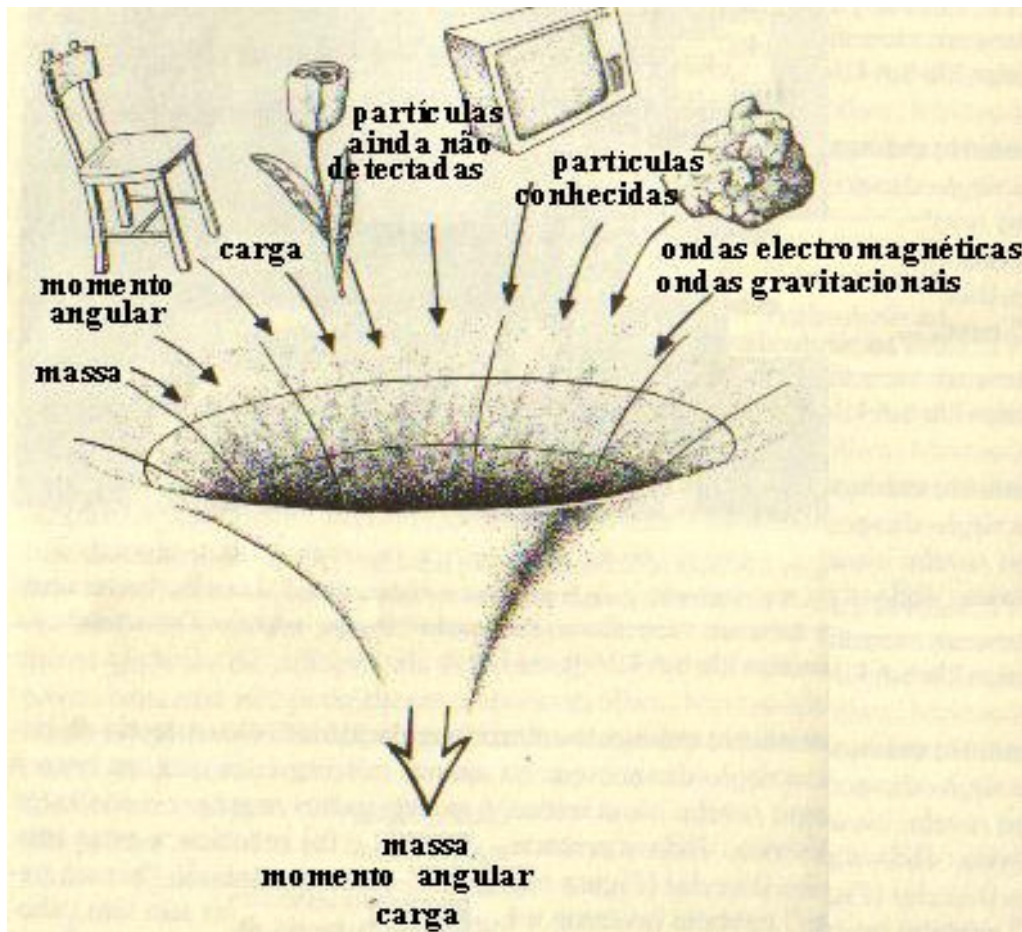
O colapso de uma estrela, supostamente esférica, origina um buraco negro com simetria esférica.

**Se a estrela inicial não tiver simetria esférica qual será a forma do buraco negro ?**

A resposta é : será novamente um buraco negro com simetria esférica.



Qualquer informação acerca da forma ou do tipo de objecto que deu origem ao buraco negro desaparece para sempre. Olhando para um buraco negro não sabemos dizer se ele resultou do colapso de uma estrela ou de uma nuvem de gás. Não sabemos nada sobre o tipo de matéria que lhe deu origem.



Qual é então a informação que é retida no processo de formação dos buracos negros?

**Massa  $m$**

**Carga eléctrica  $\epsilon$**

**Momento angular**

$$\mathbf{L} = m \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{r}$$

adaptado de Kitty Ferguson, "*Prisões de Luz*", Ed. Bizâncio 2000 - cortesia de John Wheeler.

## O que é que acontece ao resto?

É simplesmente engolido pelo buraco negro ou radiado para longe sob a forma de energia. É o que acontece, por exemplo, com o campo magnético da estrela.

Assim existem apenas **4 tipos de buracos negros**:

<b>m</b>	<b>Schwarzschild</b>
<b>m, <math>\epsilon</math></b>	<b>Reissner-Nordstrom</b>
<b>m, L</b>	<b>Kerr</b>
<b>m, <math>\epsilon</math>, L</b>	<b>Kerr-Newmann</b>

Se dois buracos negros têm os mesmos valores de  $m$ ,  $\epsilon$ , e  $L$  então são iguais.



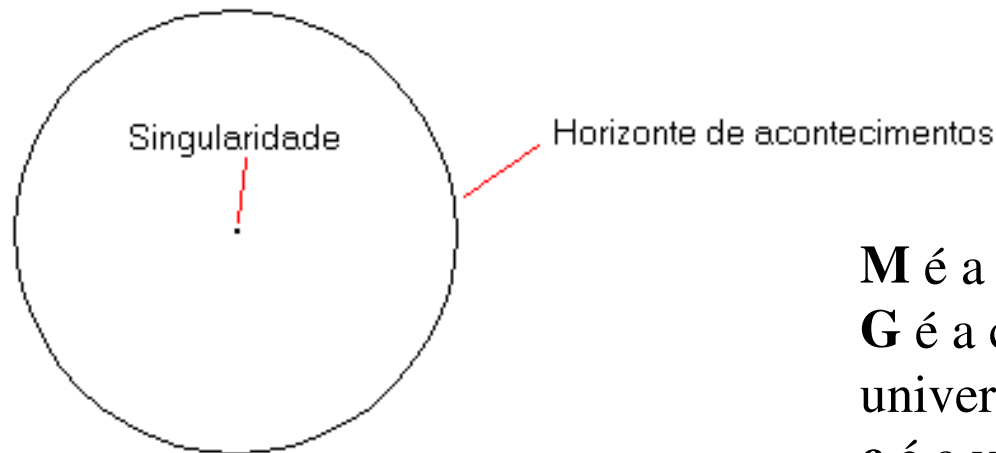
Se  $m_1 = m_2$ ,  $\epsilon_1 = \epsilon_2$  e  $L_1 = L_2$  então os dois buracos negros são iguais

# Buracos negros de Schwarzschild

São aqueles de que temos vindo a falar. São caracterizados por uma massa  $m$  (e nada mais). O raio do horizonte de acontecimentos é dado em função dessa massa  $m$  como sendo:

$$R_s = 2m$$

(aqui  $m$  é o valor da massa  $M$  do buraco negro escrita em coordenadas relativistas)



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

$M$  é a massa do buraco negro em Kg

$G$  é a constante de gravitação universal

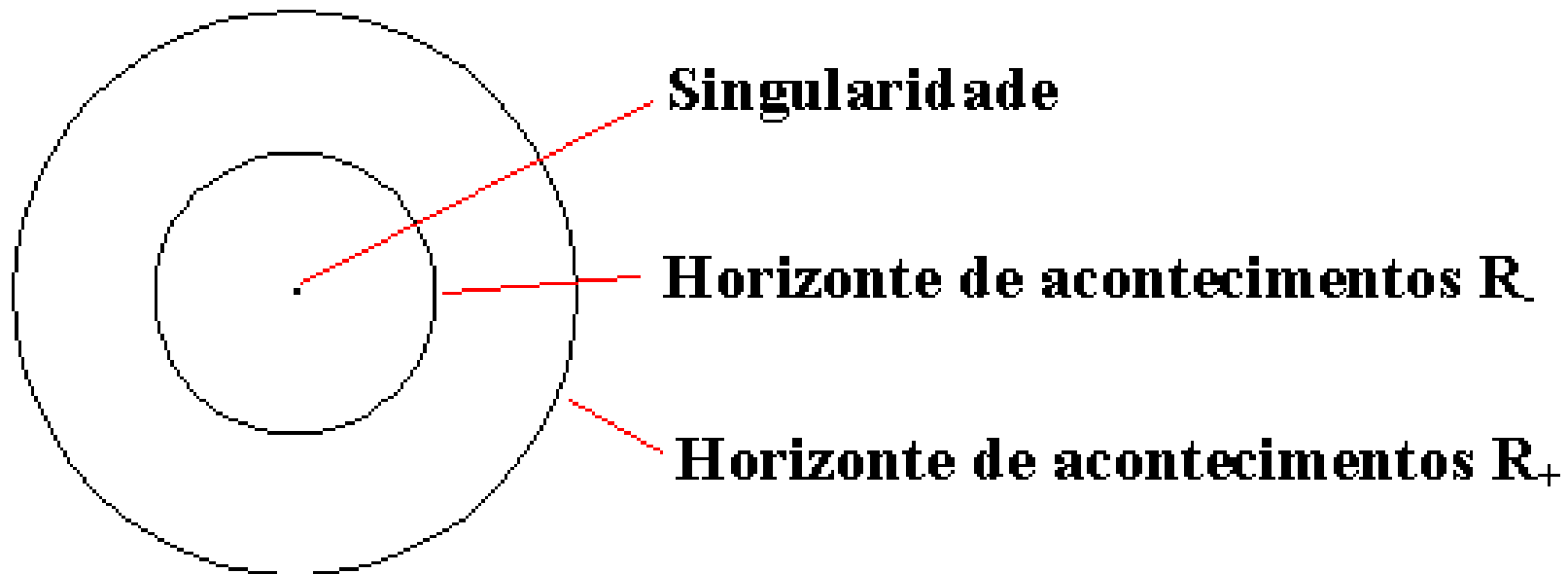
$c$  é a velocidade da luz

(c) 2001 Laurindo Sobrinho

# Buracos negros de Reissner-Nordstrom

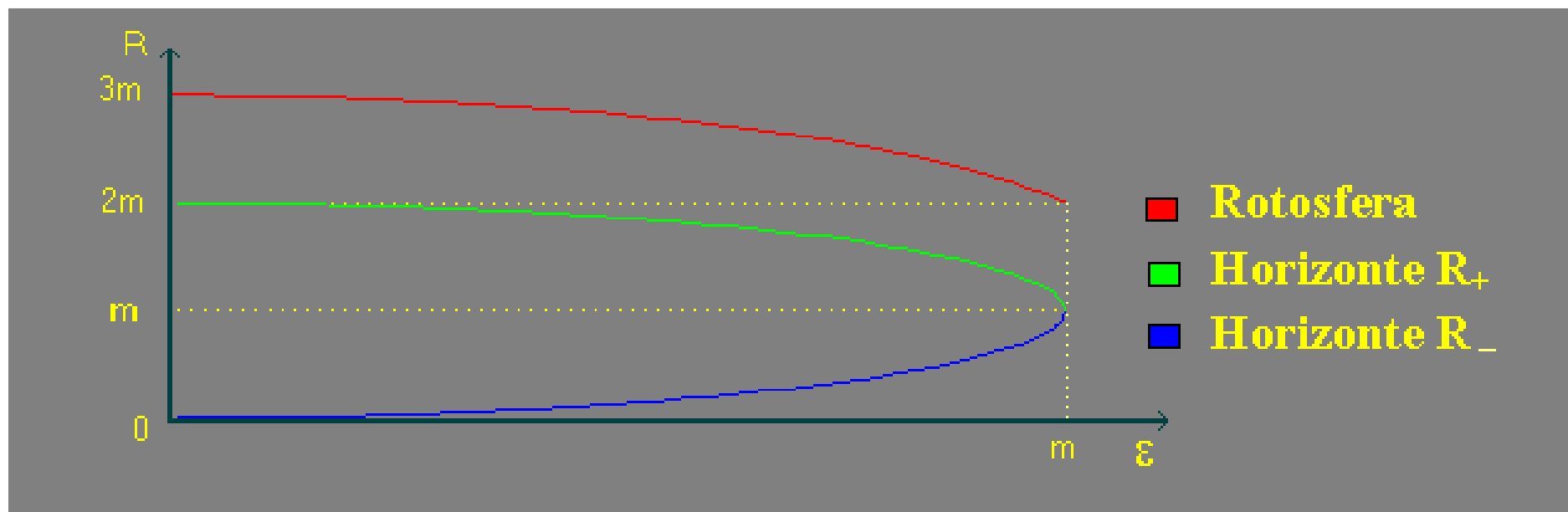
Os buracos negros de Reissner-Nordstrom distinguem-se dos de Schwarzschild por possuírem uma carga eléctrica  $\epsilon$ . À volta destes buracos negros existe, além de um campo gravítico, um campo eléctrico.

Os buracos negros de Reissner-Nordstrom são simetricamente esféricos e possuem, além de uma singularidade pontual, não um mas sim dois horizontes de acontecimentos.

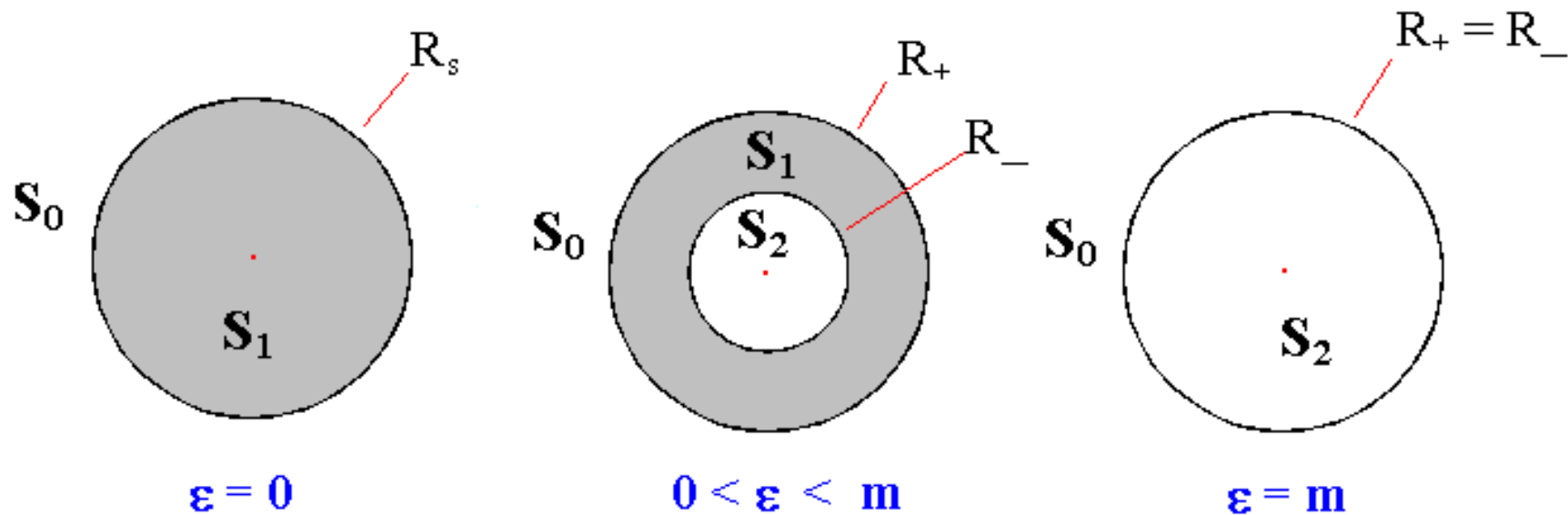


O horizonte mais externo ( $R_+$ ) é análogo ao horizonte presente nos buracos negros de Schwarzschild. O seu raio varia entre  $2m$  ( $\epsilon=0$ ) e  $m$  ( $\epsilon=m$ ).

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



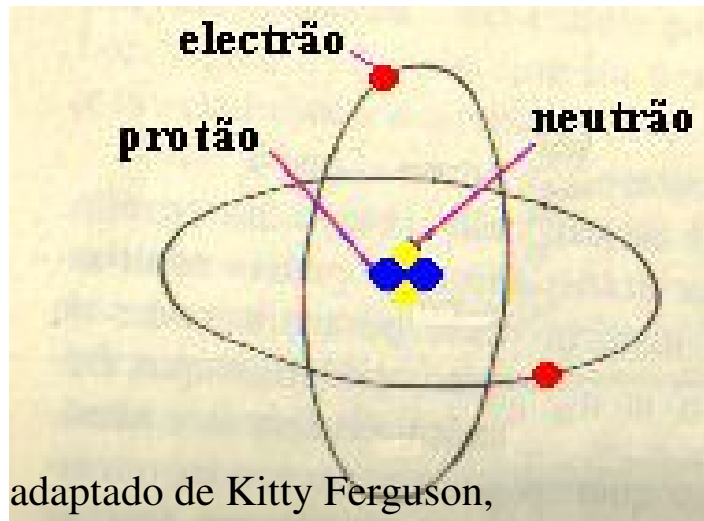
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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 !!!!**



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



adaptado de Kitty Ferguson,  
"Prisões de Luz", Ed. Bizâncio 2000

Partícula	Carga
Protão	+e
Electrão	-e
Neutrão	0

Nos átomos temos que:

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

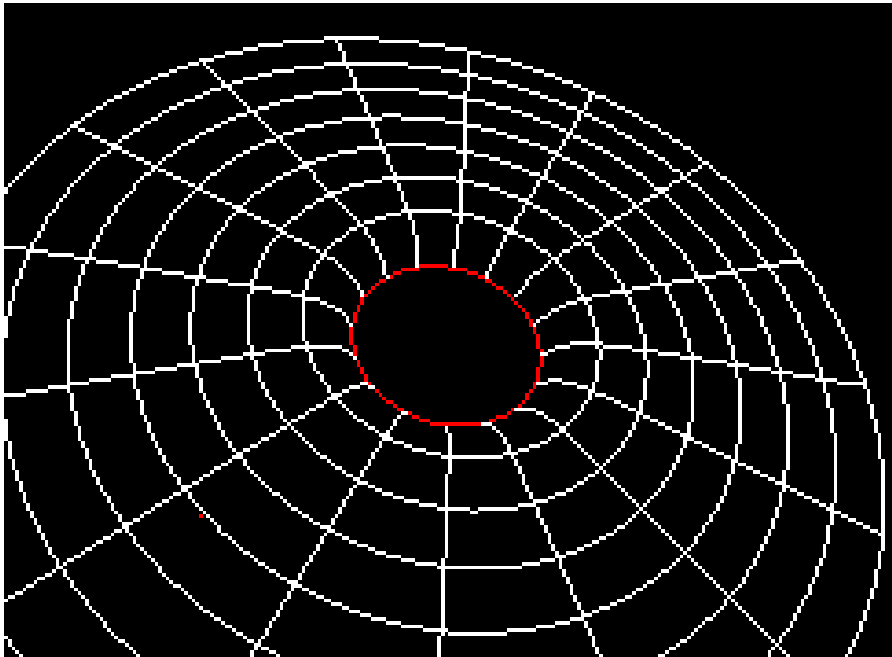
Logo a carga eléctrica de um átomo é **ZERO**

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

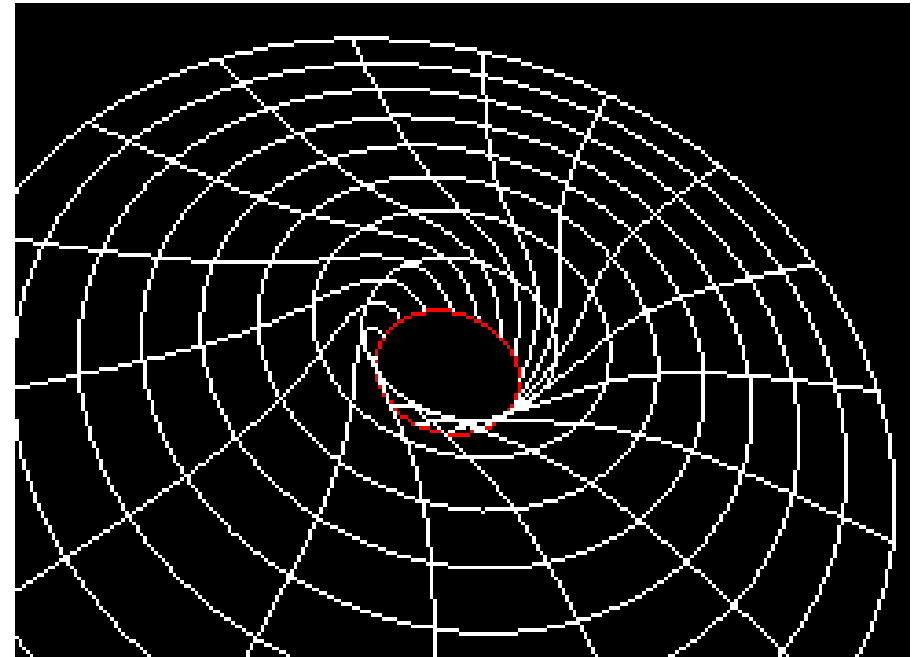
**Conclusão: É pouco provável que existam buracos negros de Reissner-Nordstrom.**

# Buracos negros de Kerr

O colapso gravitacional de uma estrela em rotação origina um buraco negro com rotação (buraco negro de Kerr). Do lado de fora do horizonte de acontecimentos o espaço é arrastado em torno do buraco negro.



Sem rotação

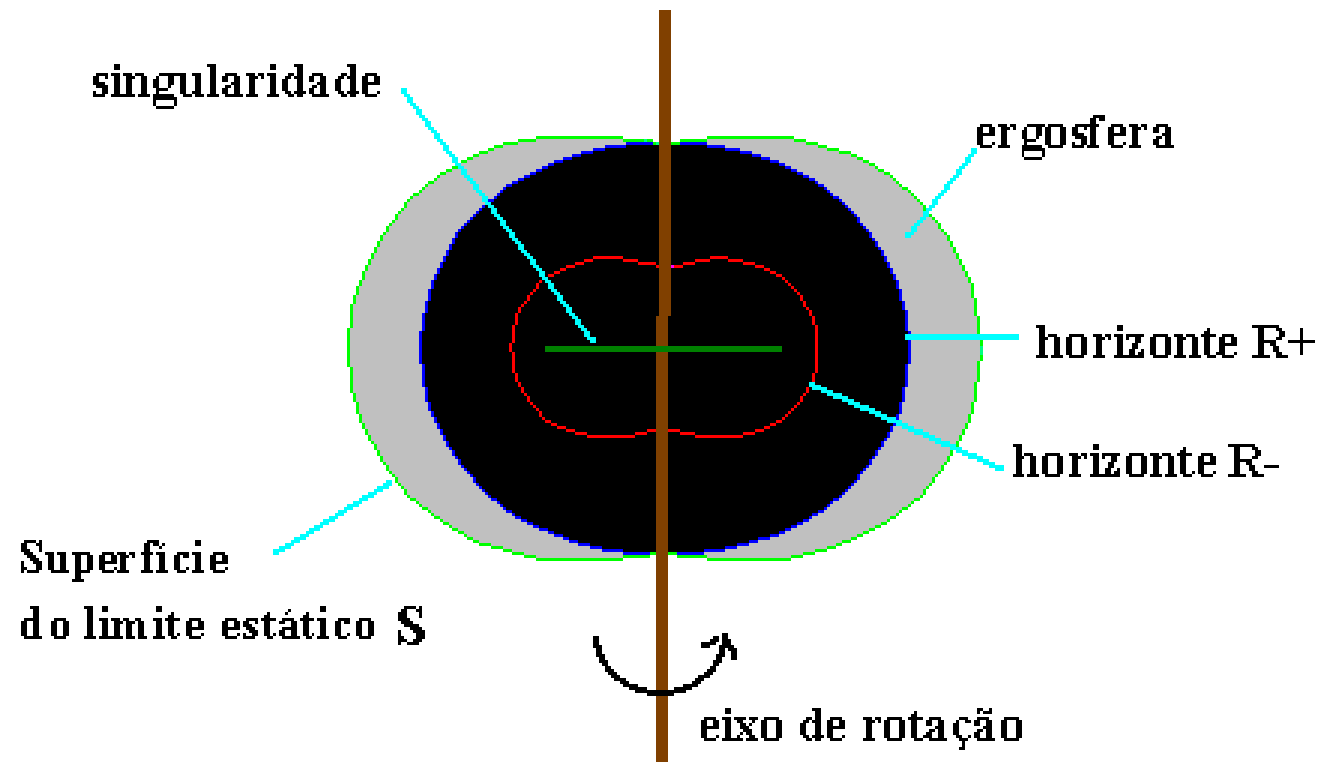


Com rotação

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

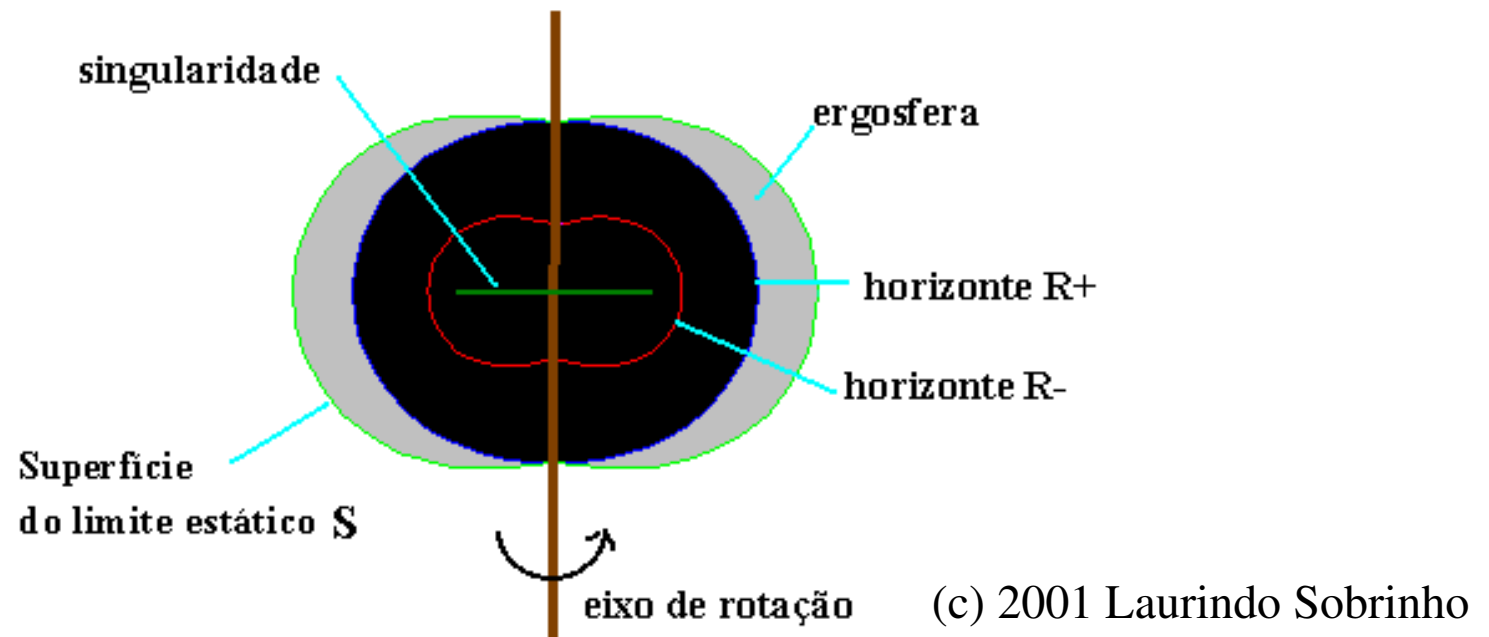
Os buracos de Kerr não são simetricamente esféricos. São achatados nos pólos devido à rotação. Mas têm simetria axial (em relação ao eixo de rotação).

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

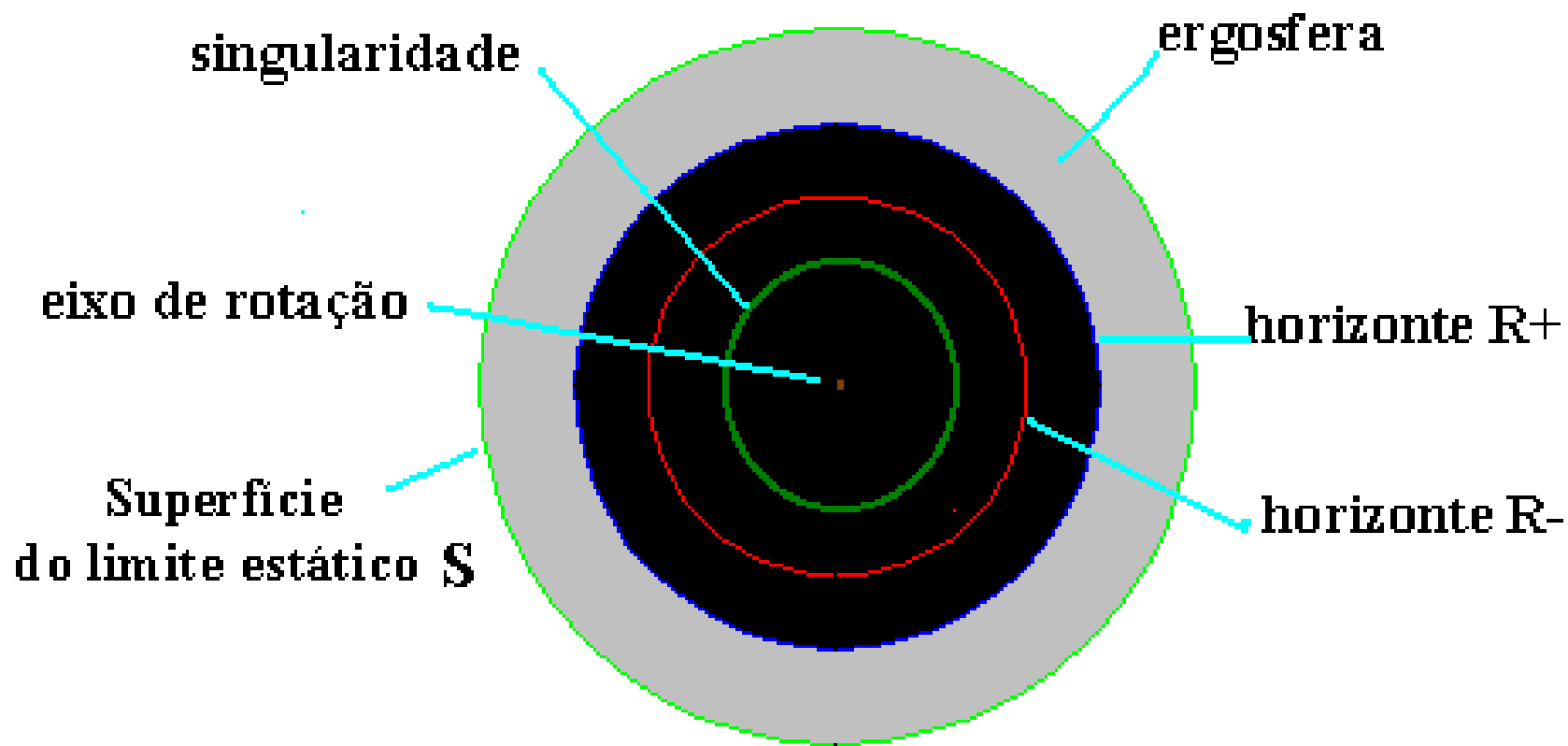


(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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 ergosfera é mais alargada nas regiões equatoriais e desaparece sobre os pólos.

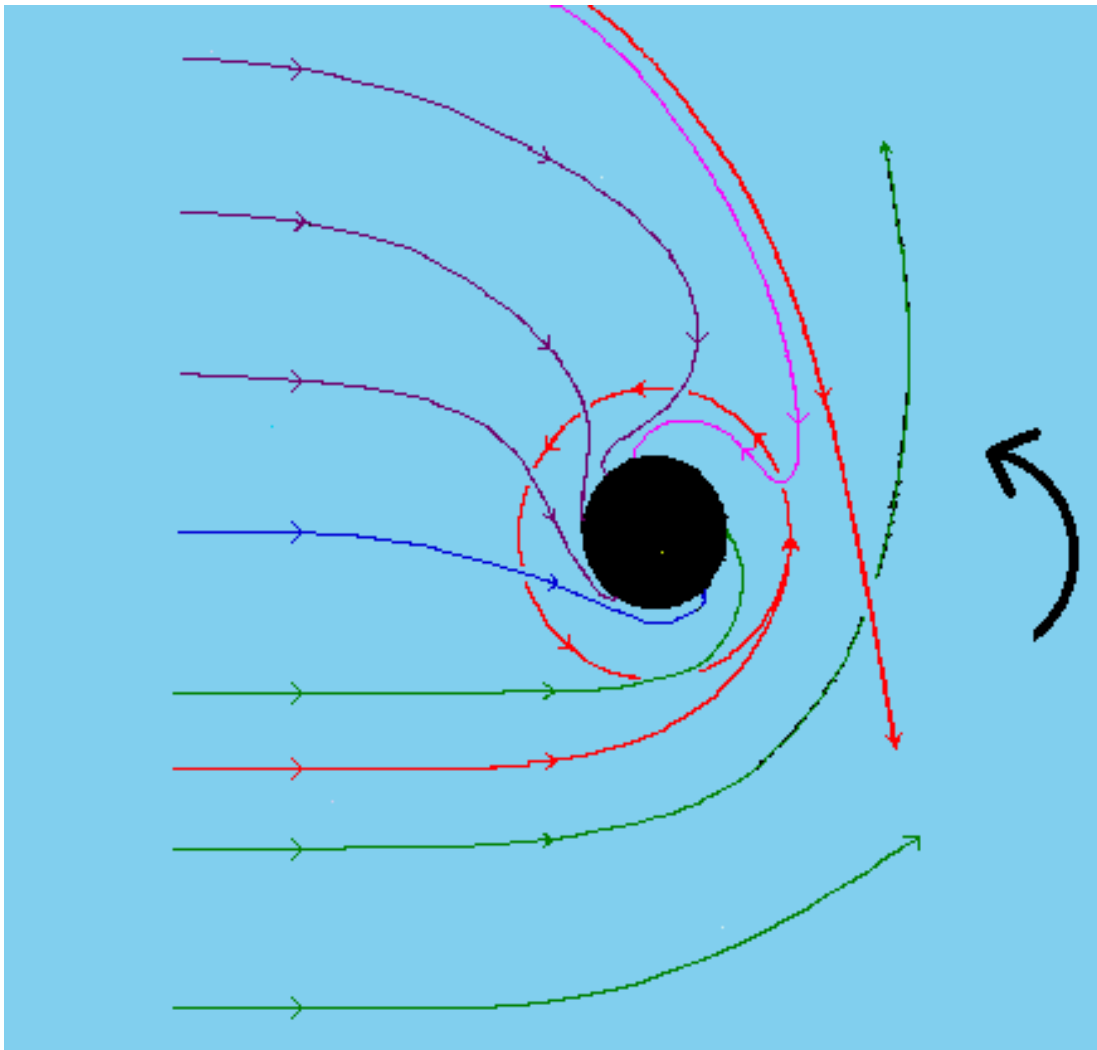


A superfície S que delimita a ergosfera chama-se **superfície do limite estático**. Sobre esta superfície ainda é possível ficar em repouso, mas nunca rodar no sentido contrário ao do buraco negro.

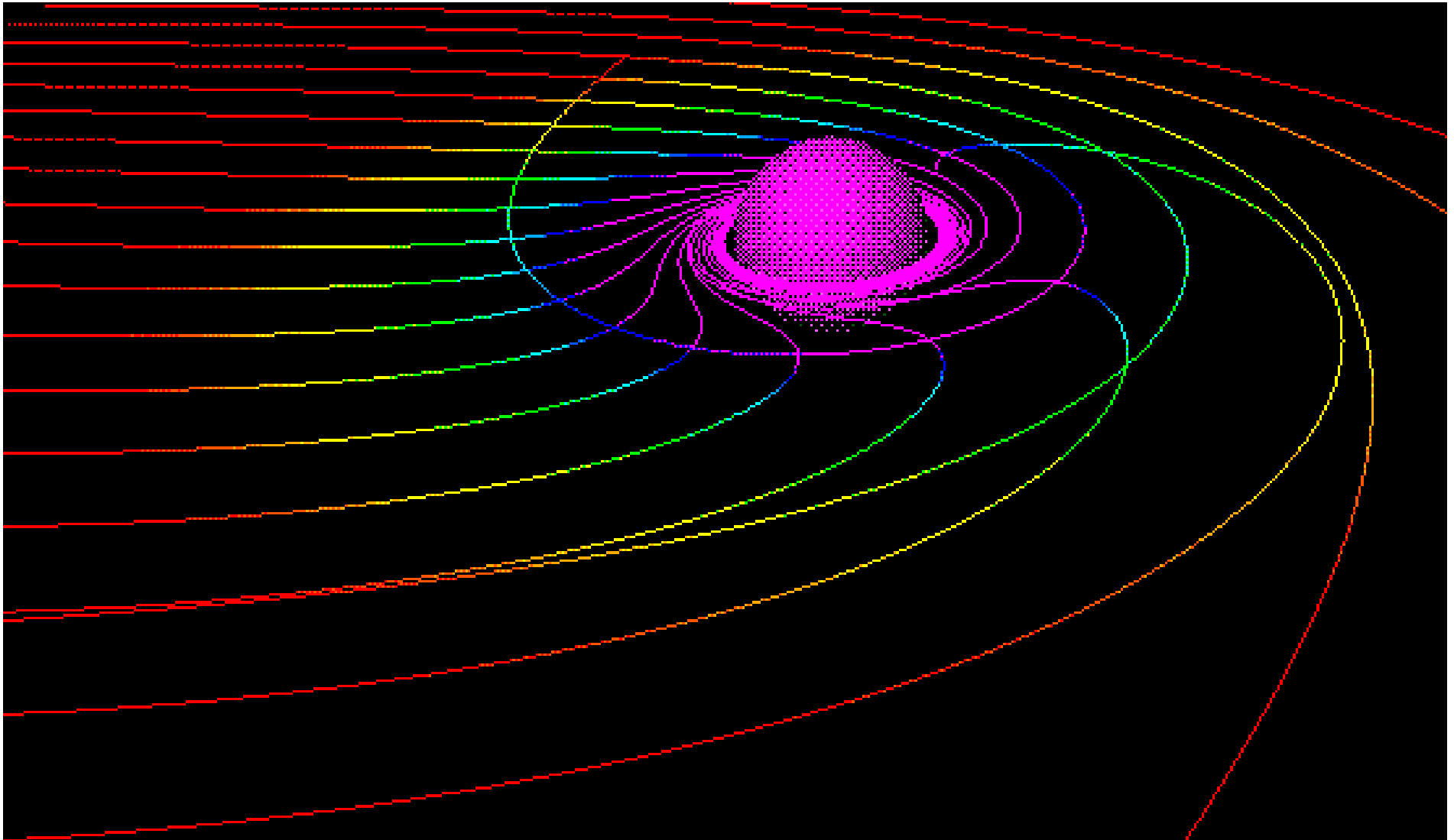


(c) 2001 Laurindo Sobrinho

## Comportamento da luz nas vizinhanças de um buraco negro em rotação



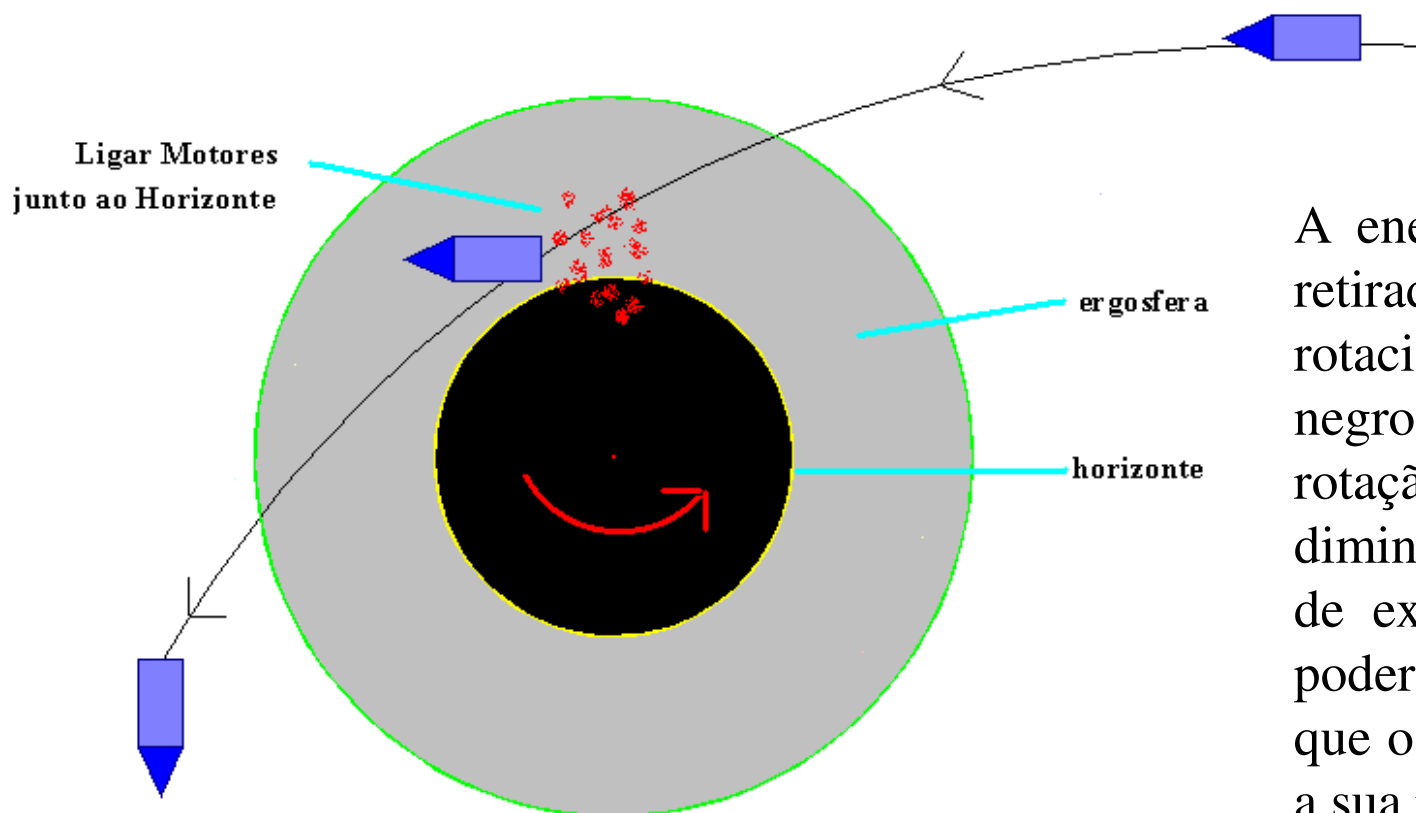
Os raios de luz que se aproximam do buraco negro de forma a acompanharem o sentido de rotação deste, conseguem escapar mais facilmente à captura. Os raios de luz que avançam no sentido contrário ao da rotação do buraco negro muito mais dificilmente escapam à captura. Um raio que incida frontalmente é desviado (arrastado) no sentido da rotação do buraco negro e não consegue escapar.



<http://www.astro.ku.dk/~cramer/RelViz/text/exhib3/exhib3.html>

# Buracos Negros como Fontes de Energia

Um foguetão entra na ergosfera de um buraco de Kerr (suficientemente grande para que o foguetão não se desintegre) 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.

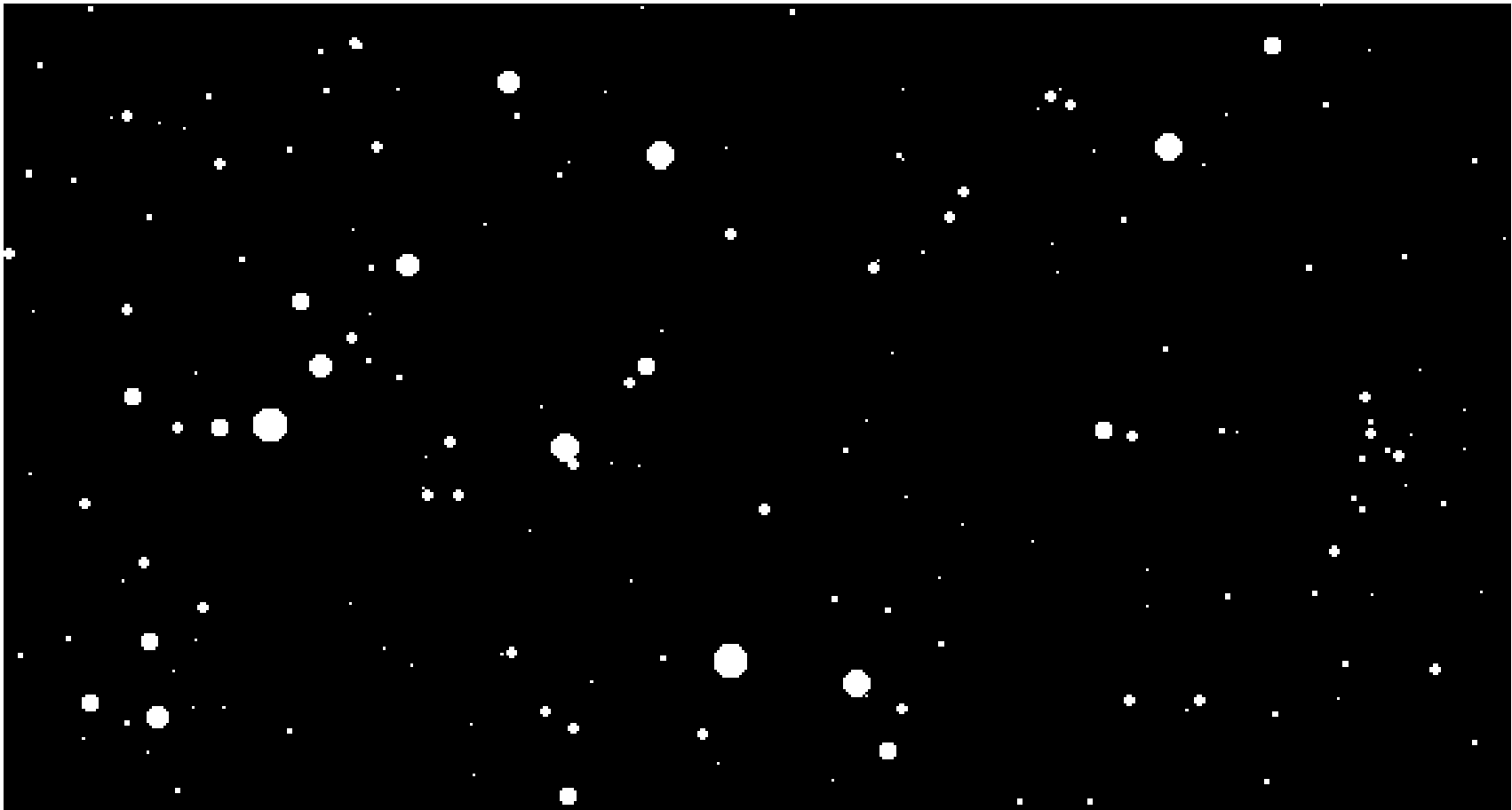
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

(Plano equatorial)



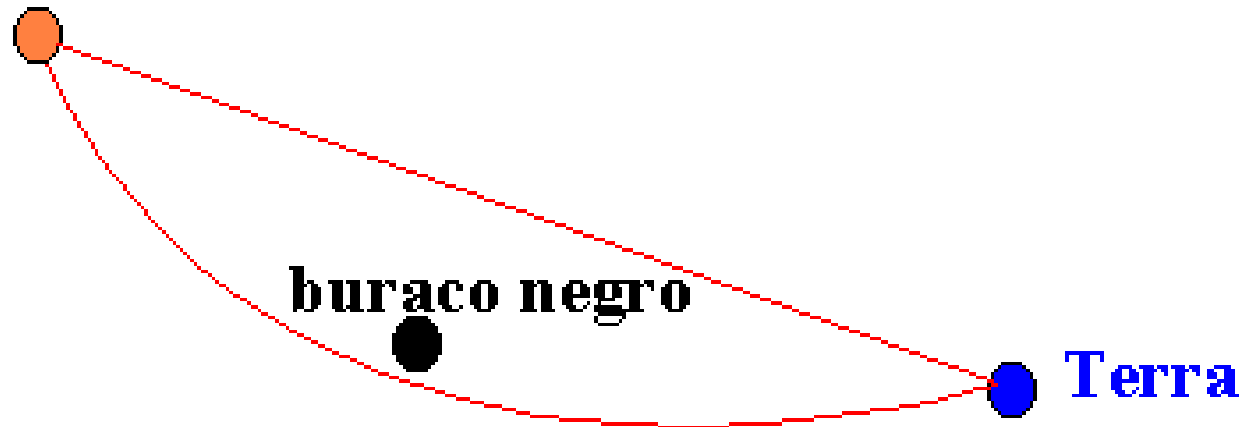
# Observando buracos negros

Um buraco negro deve surgir como um círculo escuro sob um fundo salpicado de estrelas. Como os buracos negros têm dimensões relativamente pequenas não se podem detectar por este processo. Não é fácil de ver um objecto de 10 Km situado a dezenas de anos luz, ainda mais com a agravante de esse objecto ser invisível.



Comparando o desvio de um raio de luz por um buraco negro com um raio de luz que nos chegue directamente da estrela podemos não só detectar o buraco negro como avaliar a sua massa. No entanto os 3 intervenientes devem estar localizados no espaço de uma forma muito especial (o que é pouco provável).

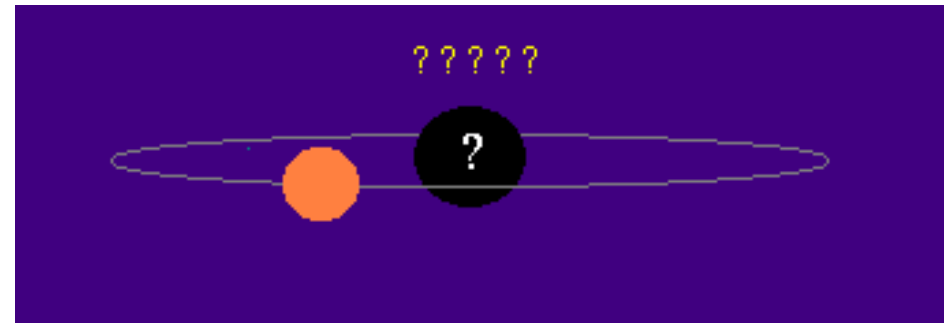
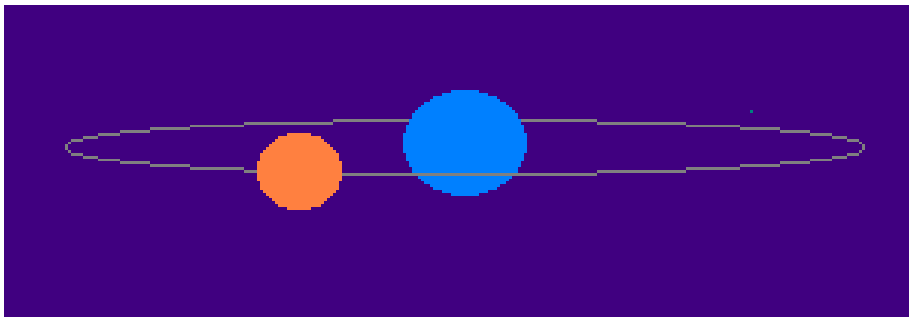
**estrela distante**



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

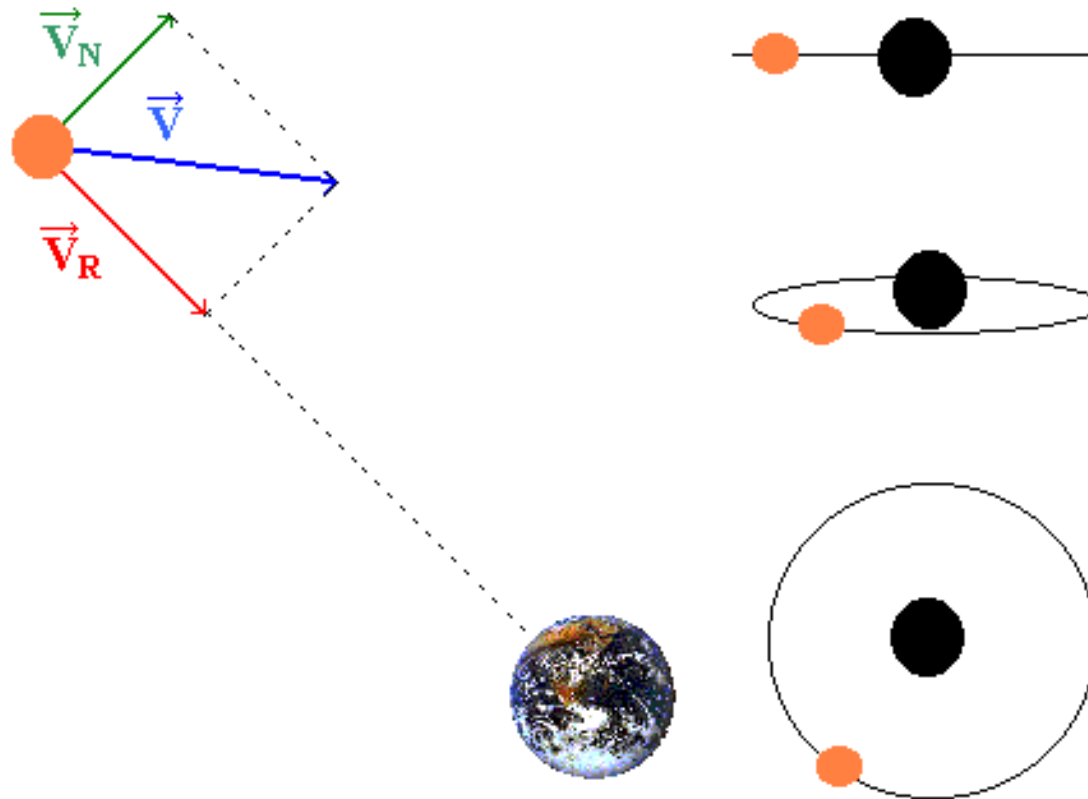
# Buracos negros em sistemas binários

Muitas estrelas aparecem em sistemas binários onde uma das estrelas orbita em torno da outra ( ou mais rigorosamente ambas as estrelas orbitam em torno do centro de massa do sistema). É possível detectar este tipo de movimento em muitos sistemas binários da nossa Galáxia.



Nalguns casos é detectável apenas uma das estrelas embora o seu movimento, com oscilações regulares, indique que deve estar acompanhada. **A componente “invisível” do sistema pode ser um buraco negro!** Mas também pode ser uma anã branca, uma estrela de neutrões ou simplesmente uma estrela pouco luminosa.

Para ter a certeza de que é um buraco negro é preciso determinar a **massa** dessa estrela “invisível”. Para isso é preciso determinar a massa da componente luminosa do sistema bem como a respectiva velocidade orbital.



Podemos medir, com bastante rigor, a componente radial da velocidade orbital da estrela. Para saber o valor da velocidade orbital seria necessário saber também o ângulo de inclinação do sistema. Este ângulo é **muito difícil** de determinar.

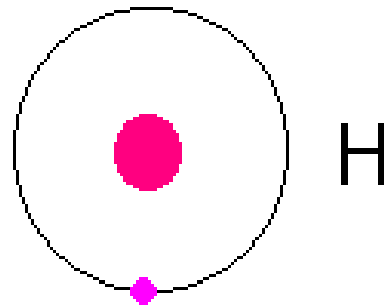
**A partir da velocidade radial podemos ficar a saber um valor mínimo para a massa do objecto “invisível”**

**Se esse valor for superior a **três massas solares** então deve ser um buraco negro, caso contrário, pode ser ou não um buraco negro.**

# Buracos negros mergulhados em nuvens de gás

Se um buraco negro estiver mergulhado numa nuvem de gás, esse mesmo gás será atraído pelo buraco negro.

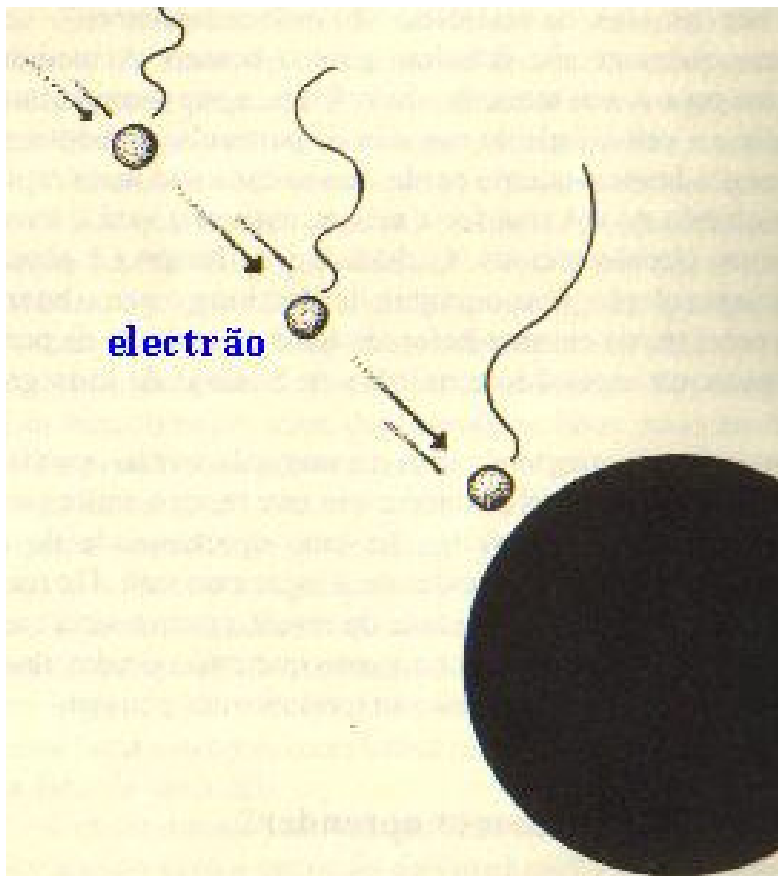
Vamos supor que o gás é o hidrogénio atómico (elemento mais abundante no Universo). À medida que os átomos avançam em direcção ao buraco negro, vão sofrendo ionização, ou seja, separam-se em electrões e protões.



O movimento dos electrões e dos protões é acelerado. Uma carga eléctrica em movimento emite radiação electromagnética.

# Será a magnitude desta radiação suficiente para detectar o buraco negro ?

**SIM...**



No entanto essa radiação seria muito semelhante à de muitas estrelas normais o que dificultaria a detecção. A diferença é que a radiação emitida pelo gás sofre rápidas oscilações (*flashes*) em consequência do seu movimento. Estes *flashes* são muito rápidos (da ordem dos milésimos de segundo). Até a data fracassaram todas as tentativas para detectar buracos negros pela observação destes *flashes*.

adaptado de Kitty Ferguson,  
"Prisões de Luz", Ed. Bizâncio 2000

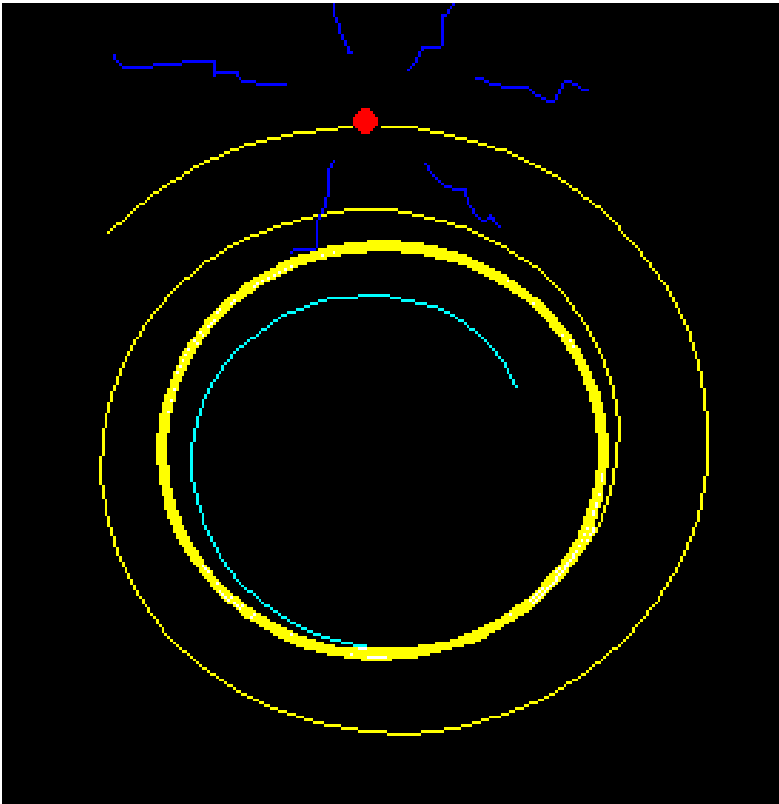
# Acreção de matéria por buracos negros em sistemas binários

Consideremos um sistema binário formado por um buraco negro e uma **gigante vermelha**. O estado de gigante vermelha é uma das etapas finais da vida de uma estrela em que esta se expande alargando o seu raio habitual várias dezenas de vezes. Nestas condições é fácil ao buraco negro roubar alguma da matéria da estrela.





O gás não se limita a cair para o centro. Forma-se um disco de acreção de matéria em volta do buraco negro. Os choques e atritos entre átomos e/ou iões convertem a respectiva energia cinética em radiação.



O gás ao ceder energia vai descrevendo órbitas cada vez mais próximas do buraco negro (movimento em espiral). Ao atingir o limite inferior do disco cai irremediavelmente para o centro.

Nos pontos mais próximos ao buraco negro o gás atinge os 10 milhões de graus e são emitidos **Raios X**. Esta radiação é muito mais forte do que a emitida no caso do buraco negro estar mergulhado numa nuvem de gás.

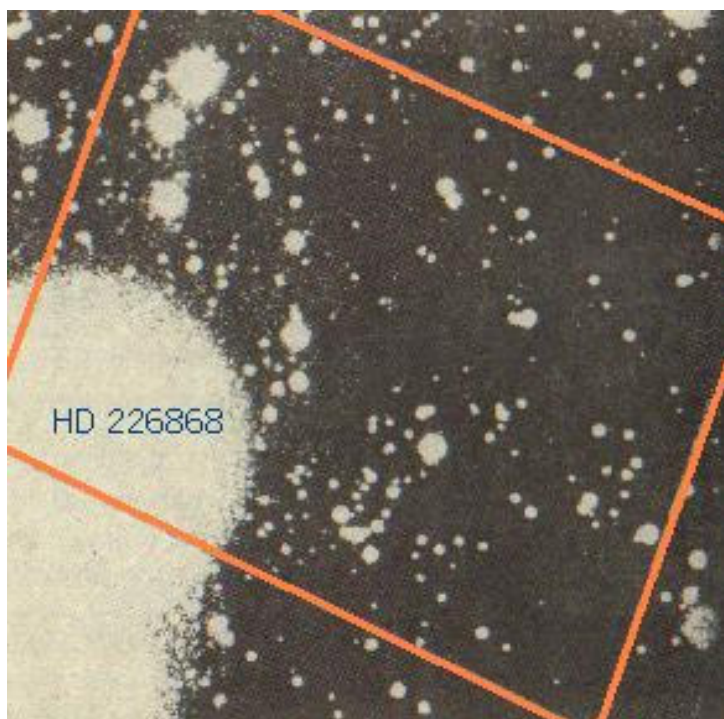
**Uma fonte de Raios X pode ser o indicativo da existência de um buraco negro**

# Cygnus X1

A nossa atmosfera não se deixa atravessar pelos Raios X. Assim a astronomia de raios X só foi possível com a chegada da era espacial a partir dos anos 60. Desde 1964 que **Cyg X1** foi detectada como sendo uma das fontes de raios X mais fortes. Situa-se na constelação do Cisne e está a 6000 anos luz de distância.



Cyg X1 faz parte de um sistema binário composto por uma **gigante azul** designada por **HD 226868** cuja magnitude aparente é 9 (não é visível a olho nu) e deve ter uma massa da ordem das 20 massas solares. Cada revolução em torno do centro de massa do sistema é efectuada em cerca de 5.6 dias.



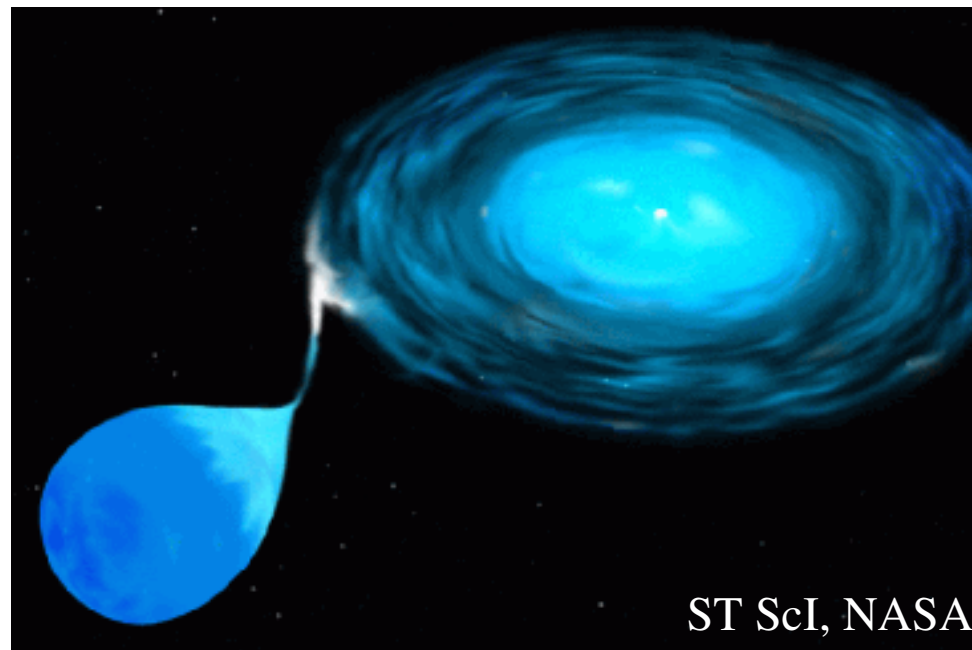
adaptado de Kitty Ferguson, "*Prisões de Luz*", Ed. Bizâncio 2000

O facto da HD 226868 não emitir raios X permite identificar mais facilmente Cyg X1.

A massa de Cyg X1 é no mínimo de 3 massas solares. O seu valor real pode ascender às 20 massas solares. Para sabermos o valor correcto seria necessário saber o ângulo de inclinação do sistema ( o que é muito difícil de determinar). Outro factor que dificulta o cálculo da massa de Cyg X1 é a incerteza associada ao valor da massa da gigante azul. De qualquer forma:

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

Não podemos ter a certeza absoluta porque uma massa igual a 3 massas solares está muito próxima da separação entre buracos negros e estrelas de neutrões.



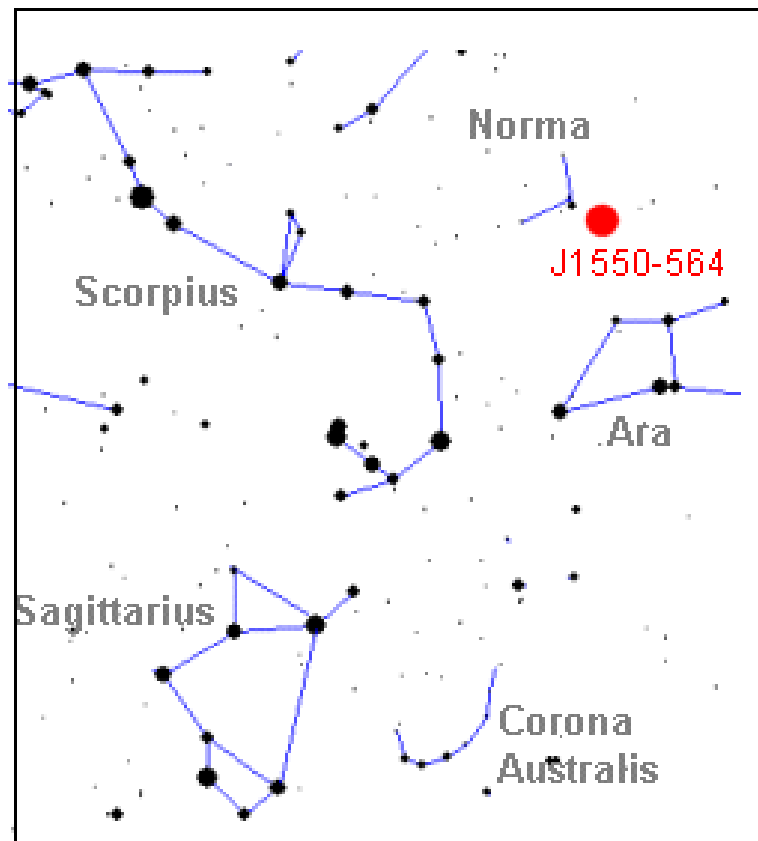
Os sinais de Raios X que nos chegam de Cyg X1 oscilam muito rapidamente o que significa que a fonte emissora deve ter reduzidas dimensões. Estima-se que o raio de Cyg X1 ronde os 15 Km. A radiação é proveniente da região mais interna do disco de acreção (cerca de 100 Km de raio).



[http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/binaries/cygx1\\_artists.html](http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/binaries/cygx1_artists.html)

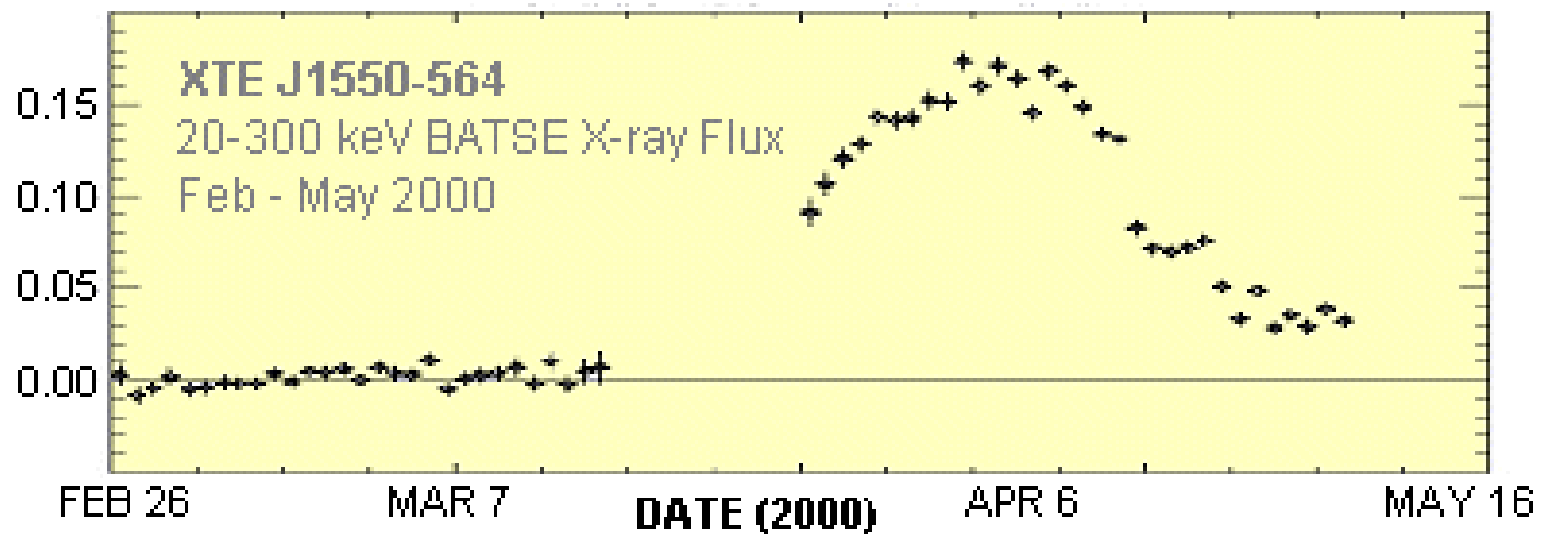
# J1550-564

Esta fonte de raios X está localizada na constelação de Norma a cerca de 10 000 anos luz do Sol. Dificilmente visível da ilha da Madeira.



[http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast15may\\_1m.htm?fp](http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast15may_1m.htm?fp)

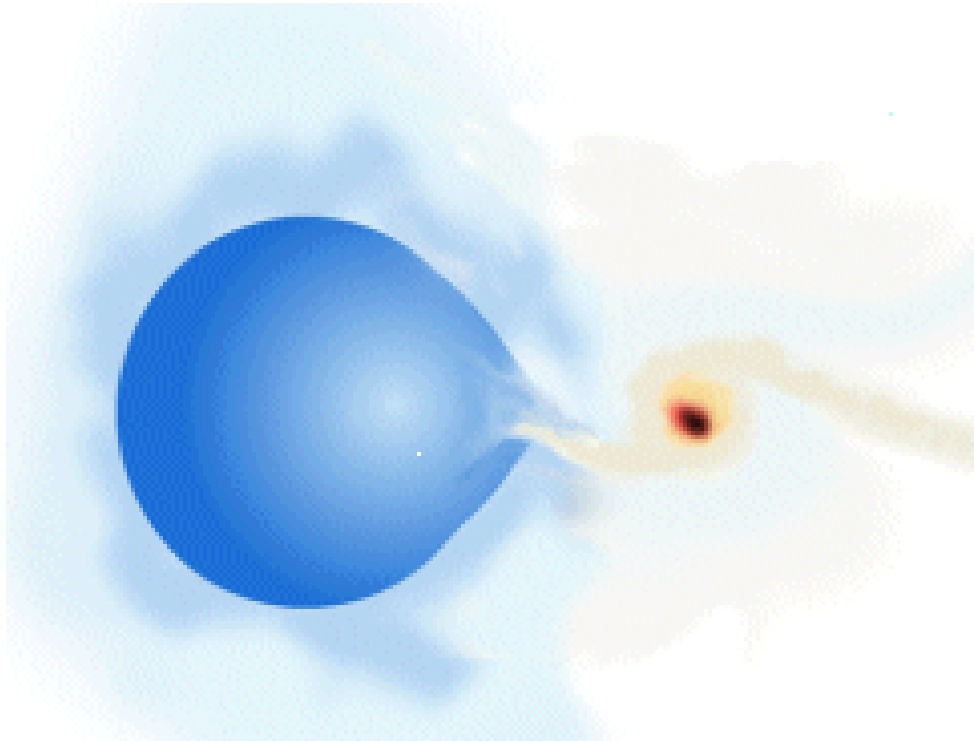
Por volta de 6 de Abril do ano 2000 era um das fontes de raios X mais fortes no céu. Chegou a rivalizar com a Nebulosa do Caranguejo (fonte de raios X mais intensa no espaço). Desde então o seu brilho decresceu acentuadamente até cerca de um décimo do seu valor máximo.



[http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast15may\\_1m.htm?fp](http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast15may_1m.htm?fp)

Não foi a primeira vez que se registou um aumento repentino em J1550-564. O mesmo já havia sido notado em 1998 e 1999. Fora destes períodos o objecto é praticamente indetectável na banda dos raios X.

Julga-se que J1550-564 é um buraco negro, que como Cyg X1, forma um sistema binário com uma outra estrela. Material gasoso dessa estrela é atraído pelo buraco negro, formando-se um disco de acreção em torno deste. As repentinas erupções de raios X podem resultar de vagas de gás a serem consumidas pelo buraco negro.



[http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast15may\\_1m.htm?fp](http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast15may_1m.htm?fp)

Quando a emissão de J1550-564 é máxima o fluxo de raios X oscila, de forma absolutamente aleatória, a cada 3 segundos, em cerca de 50%.



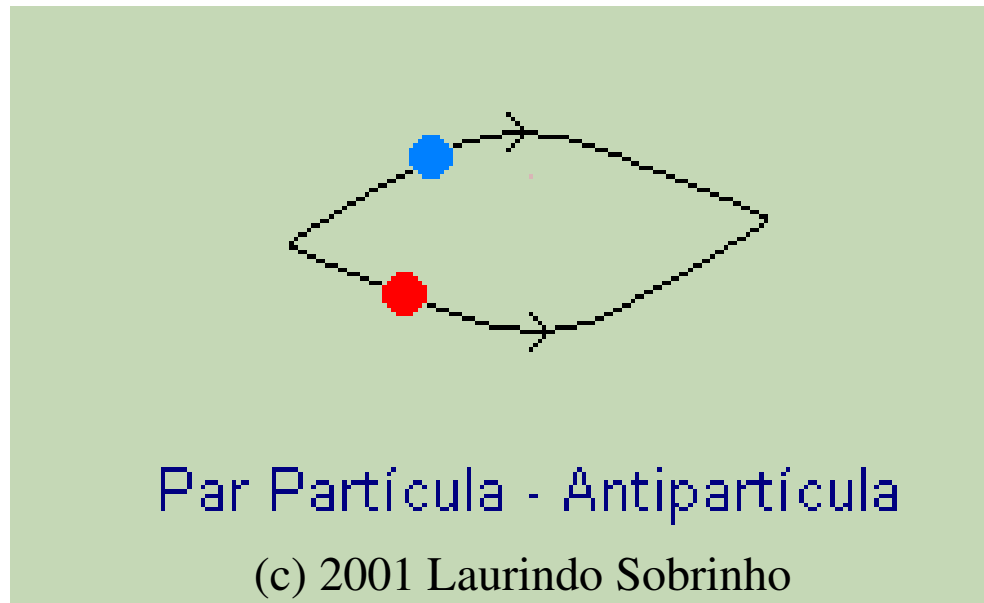
# Radiação de Hawking

**Princípio da Incerteza de Heisenberg** – Não se pode saber com exactidão a posição e velocidade de uma partícula. Quanto maior a certeza em relação à velocidade maior será a incerteza em relação à posição e vice-versa.

O vácuo não pode ser completamente vazio. Não podemos fixar todos os campos em zero, numa dada região do espaço, pois isso iria contrariar o Princípio da Incerteza de Heisenberg. Tem de existir sempre uma incerteza mínima associada. Essa incerteza manifesta-se sob a forma de **pequenas flutuações no valor do campo**.

## O que são essas flutuações ?

Aparecem espontaneamente partículas aos pares. Em cada par existe uma partícula e uma antipartícula. Separam-se por breves instantes e depois voltam a juntar-se aniquilando-se mutuamente.



Como a energia não pode aparecer do nada a energia associada a cada par deve ser zero, ou seja, uma das partículas do par deve ter energia negativa. Estes pares não se podem detectar directamente: diz-se que são virtuais.

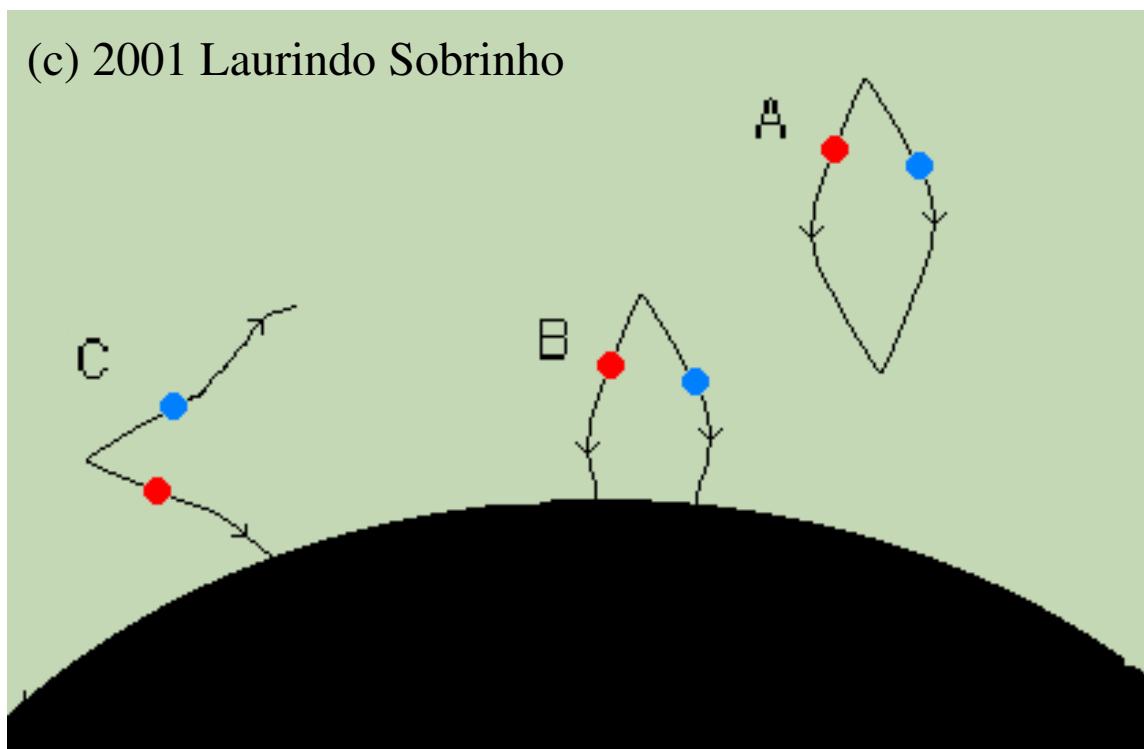
## O que é que acontece se um destes pares aparecer junto de um buraco negro ?

Podem acontecer 3 coisas:

A – O par forma-se e desaparece sem atravessar o horizonte

B – O par forma-se do lado de fora e ambas as partículas atravessam o horizonte

C – O par forma-se do lado de fora mas apenas uma das partículas atravessa o horizonte



O caso C é o mais interessante. A partícula que ficou do lado de fora pode escapar para longe. É uma partícula real com energia positiva.

**A partícula que atravessou o horizonte tem energia negativa e vai fazer com que o valor da energia do buraco negro baixe. Mas energia e massa são no fundo a mesma coisa:**

$$E = m \cdot C^2$$

**Conclusão :**

**A massa do buraco negro irá diminuir.**

Um buraco negro de massa igual a algumas massas solares gera apenas partículas sem massa que escapam à velocidade da luz.

81 % de Neutrinos

**17 % de Fótons**

2 % de Gravitões

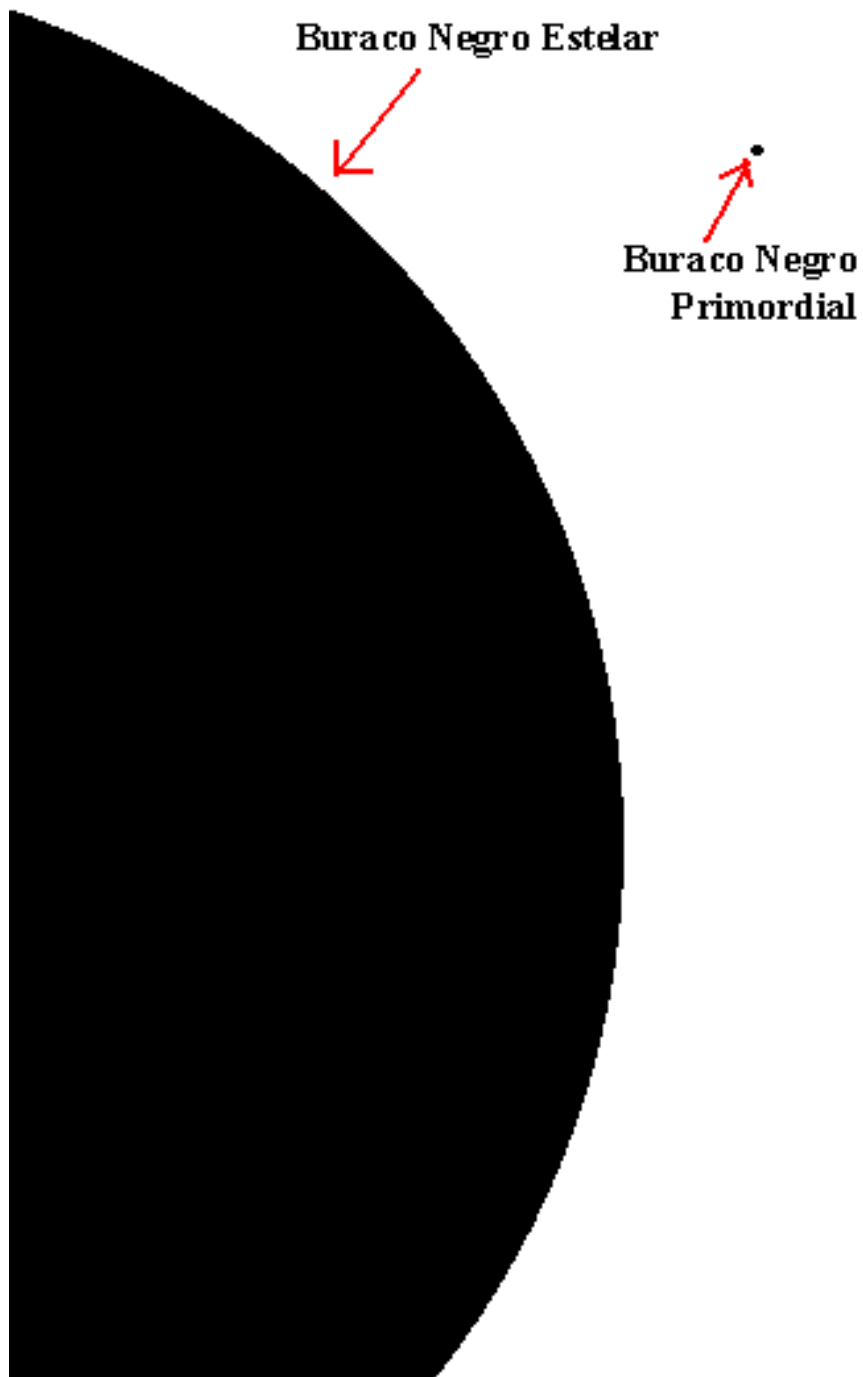
Estas partículas, nomeadamente os fótons, formam uma radiação, chamada **Radiação de Hawking**. É uma radiação de muito baixa energia ( o seu comprimento de onda ronda os 10 Km).

Se um corpo emite radiação então a sua superfície deve estar a uma determinada temperatura. No caso de um buraco negro essa temperatura é muito baixa – apenas alguns milionésimos de grau acima do zero absoluto.

**Zero Absoluto ( Zero graus Kelvin) = - 273.15 graus Celsius**

Esta radiação emitida é **muito** mais baixa do que a radiação de fundo que enche todo o Universo pelo que globalmente a massa do buraco negro aumenta.





## Buracos Negros Primordiais

É possível que no início do Universo, devido às irregularidades existentes se tenham formado alguns buracos negros de massas relativamente baixas : **buracos negros primordiais**.

Um desses buracos negros com uma massa de 1000 milhões de toneladas estaria neste momento na fase final de evaporação. Seria detectável como uma fonte de raios X e raios gama.

Embora as observações efectuadas em raios gama não excluam a hipótese da existência dos buracos negros primordiais, até a data ainda não foi identificado nenhum (?).



[www.ph.ed.ac.uk/nuclear/astro/](http://www.ph.ed.ac.uk/nuclear/astro/)



**FIM**

**Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira**  
[www.uma.pt/Investigacao/Astro/Grupo/index.htm](http://www.uma.pt/Investigacao/Astro/Grupo/index.htm)