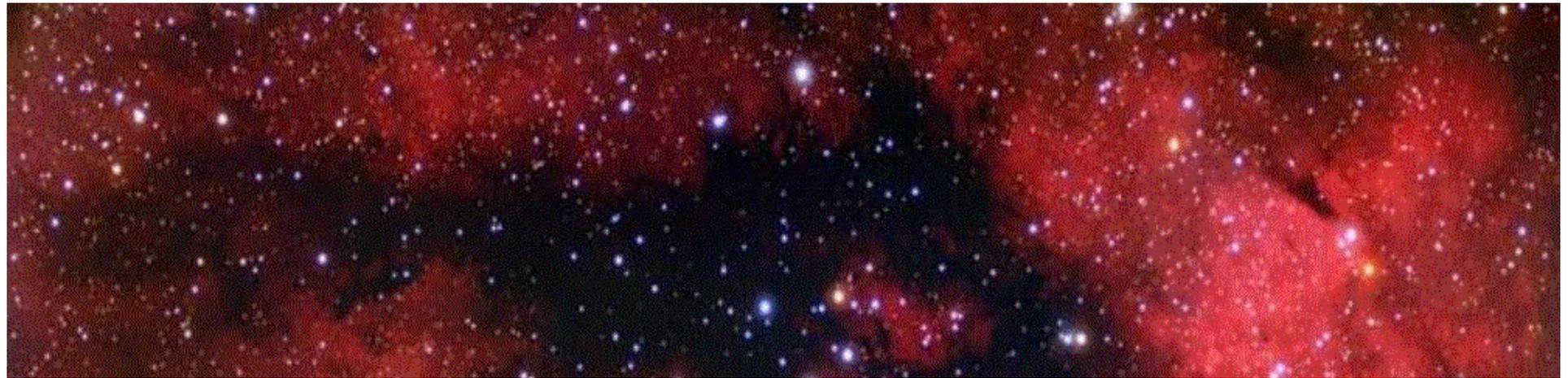


**Grupo de Astronomia
da
Universidade da Madeira**

Buracos Negros

Laurindo Sobrinho

17 Março 2004



Das estrelas "invisíveis" aos Buracos Negros



Velocidade de Escape:

Velocidade que um corpo deve atingir para que possa escapar à atracção gravítica de um planeta ou estrela ficando em repouso no infinito.

$$E_{m_{\text{superfície}}} = E_{m_{\infty}}$$
$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM_{\text{Terra}}m}{r_{\text{Terra}}} = 0 + 0$$

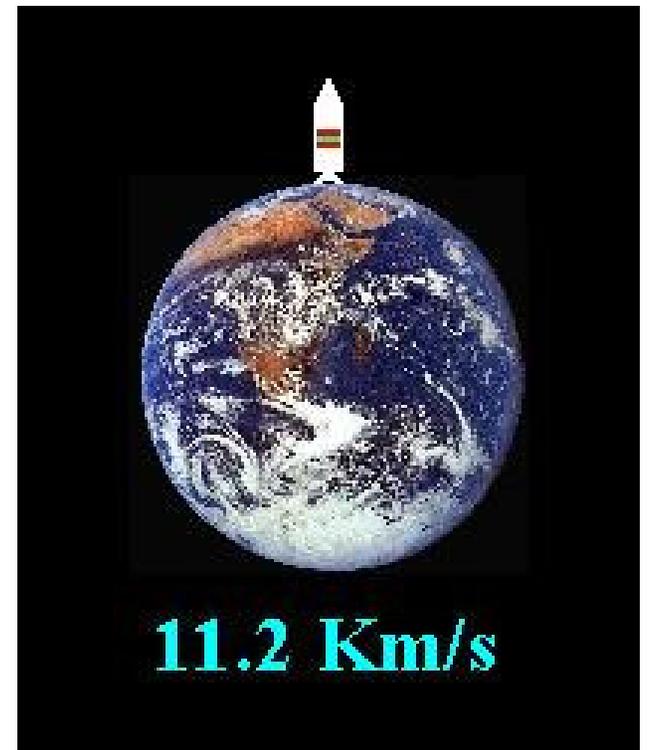
onde **G** é a constante de Gravitação Universal

$$v = \sqrt{\frac{2GM_{\text{Terra}}}{r_{\text{Terra}}}}$$

$$G = 6.6742 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$$

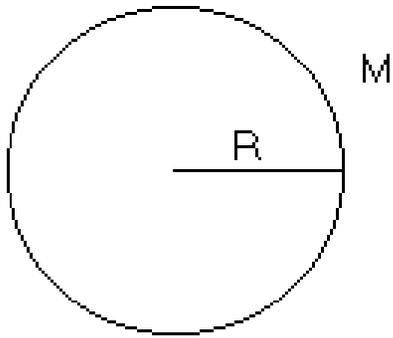
$$M_{\text{Terra}} \approx 6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$R_{\text{Terra}} \approx 6.7 \times 10^6 \text{ m}$$



No caso da Terra a velocidade de escape é de 11.2 Km/s.

A Velocidade de escape de uma estrela (ou planeta) depende da respectiva massa M e raio R .



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

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

Lua:

$$M_{\text{Lua}} \approx 7.4 \times 10^{22} \text{ kg}$$

$$R_{\text{Lua}} \approx 1.7 \times 10^6 \text{ m}$$

$$v_{\text{esc}} \approx 2.4 \text{ km/s}$$

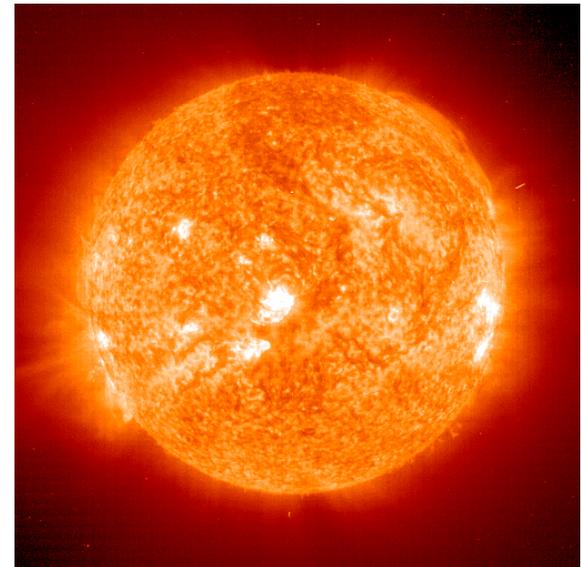


Sol:

$$M_{\text{Sol}} \approx 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$$

$$R_{\text{Sol}} \approx 7.0 \times 10^8 \text{ m}$$

$$v_{\text{esc}} \approx 617 \text{ km/s}$$



$$M_{XYZ} = 5 \times 10^{35} \text{ kg} \approx 250000 M_{\odot}$$

$$R_{XYZ} = 350000 \text{ km} = 0.5 R_{\odot}$$

$$v_{\text{esc}}(XYZ) \approx 437000 \text{ km/s}$$



Este valor é superior à velocidade da luz no vácuo:

$$C = 300\,000 \text{ Km/s.}$$

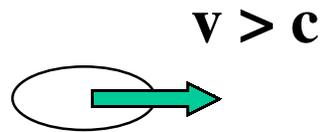
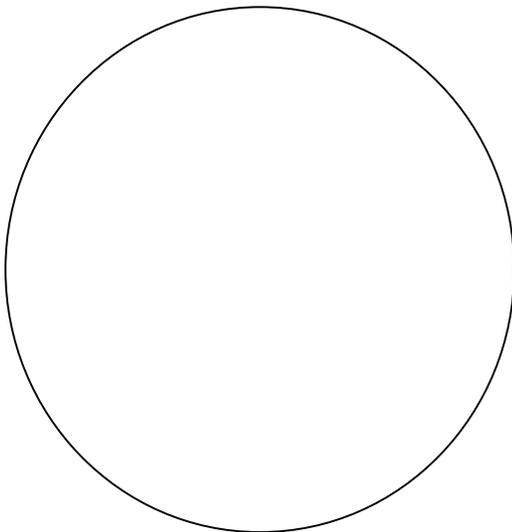
Conclusão: A luz não pode escapar de XYZ pelo que este (a existir) seria um **objecto invisível**.

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

Esta foi uma espectacular previsão de uma das propriedades dos buracos negros: **aprisionar a luz e ser invisível**.

No entanto estas estrelas invisíveis não correspondem à definição actual de buraco negro.

Na altura julgava-se que o facto da luz não poder escapar de uma "estrela invisível" o mesmo não se aplicava aos restantes corpos. Para escaparem esses corpos teriam simplesmente de deslocar-se a velocidades superiores à da luz!



**Hoje sabemos que
nenhum objecto pode
deslocar-se a velocidades
superiores à velocidade
da luz no vazio.**

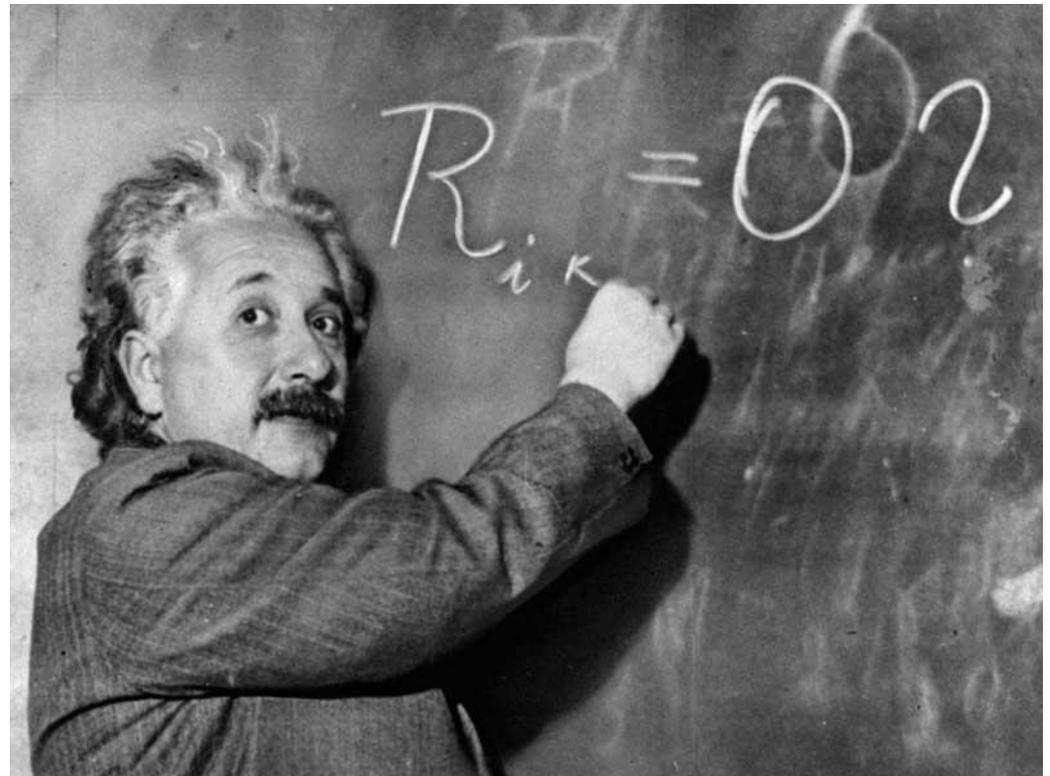
Ignorava-se também que um objecto como as referidas estrelas invisíveis **deforma o espaço e o tempo** na sua vizinhança e, por isso, nessa região não se pode continuar a aplicar a Mecânica Newtoniana.



A nossa estrela invisível **XYZ** tinha uma massa 250 000 vezes superior à do Sol armazenada numa região cujo raio era igual a metade do raio do Sol.

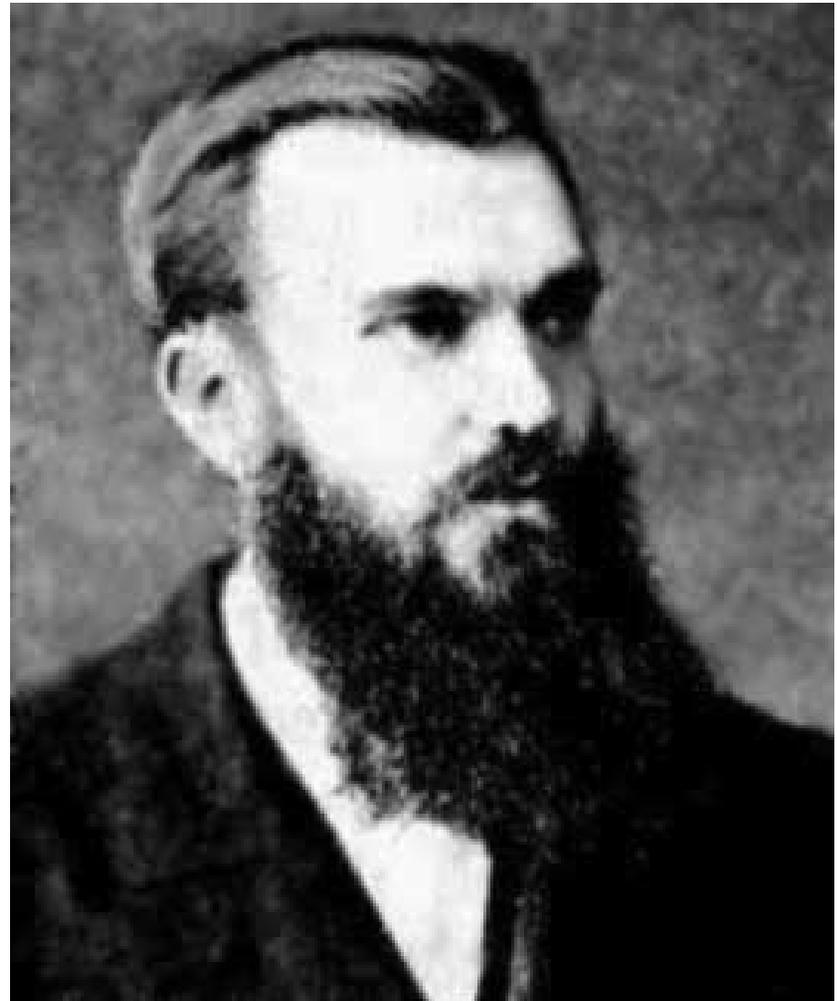
Para descrever a influência de uma grande concentração de massa nas propriedades do espaço e do tempo circundantes era necessária uma nova teoria.

Esta, actualmente designada por *Teoria da Relatividade Geral* foi apresentada por **Albert Einstein** em 1915



Já em 1876 **William Clifford** havia sugerido que o **movimento da matéria** poderia dever-se a mudanças na **geometria do espaço**.

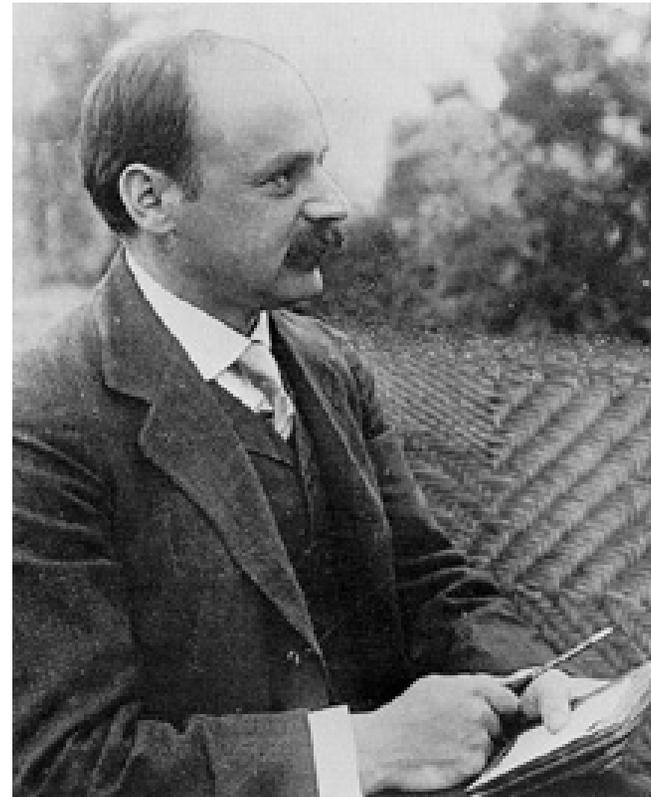
William Clifford faleceu na **Madeira**, para onde se havia deslocado por motivos de doença, em 1879.



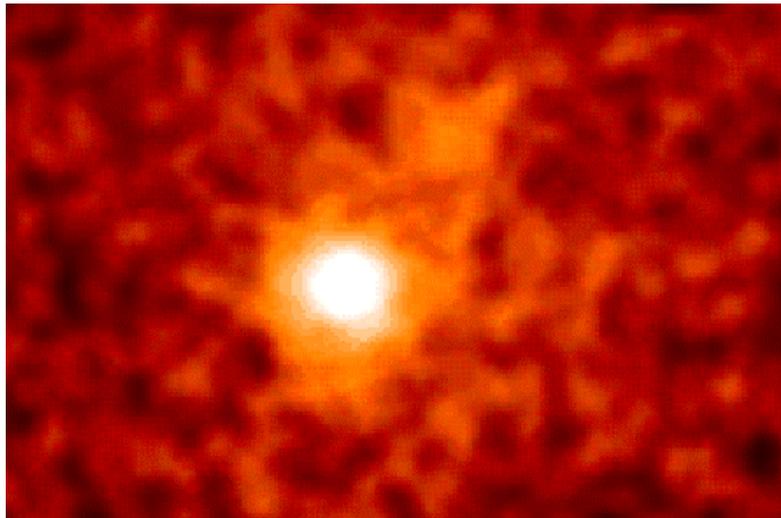
Pouco tempo após a publicação da Teoria da Relatividade Geral, Karl **Schwarzschild** chegou à solução para o campo em torno de uma massa com simetria esférica.

A solução de Schwarzschild podia aplicar-se a estrelas como o nosso **Sol**, **estrelas gigantes**, **estrelas anãs**, **planetas**, ou qualquer outro corpo com simetria esférica.

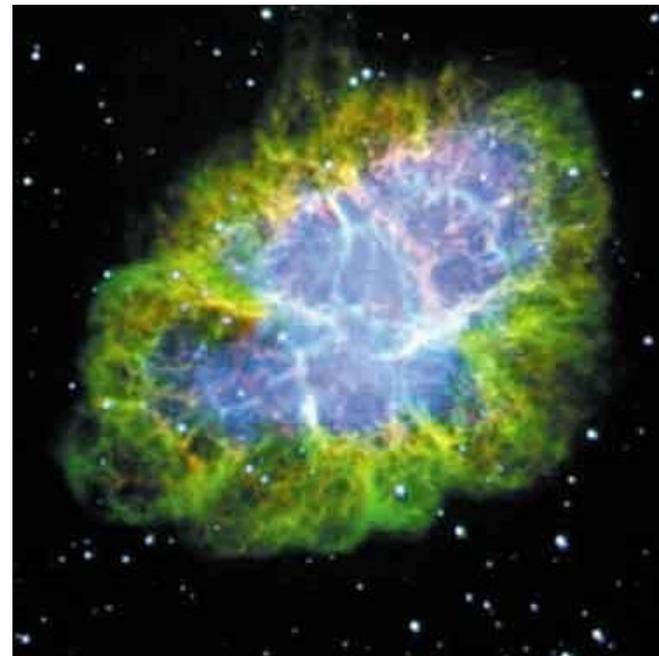
O que não ficou imediatamente evidente é que a solução de Schwarzschild escondia também a descrição de um objecto bem mais exótico: o **buraco negro**.



Os buracos negros eram objectos de tal forma fora do comum que, na falta de qualquer evidência da sua existência, o seu estudo não foi muito motivador ao longo de muitos anos. Apenas a descoberta de outros *objectos exóticos* como os **quasares** (1963) e as **estrelas de neutrões** (1967) veio reavivar o entusiasmo e interesse pelo estudo dos buracos negros.



Quasar 3c279

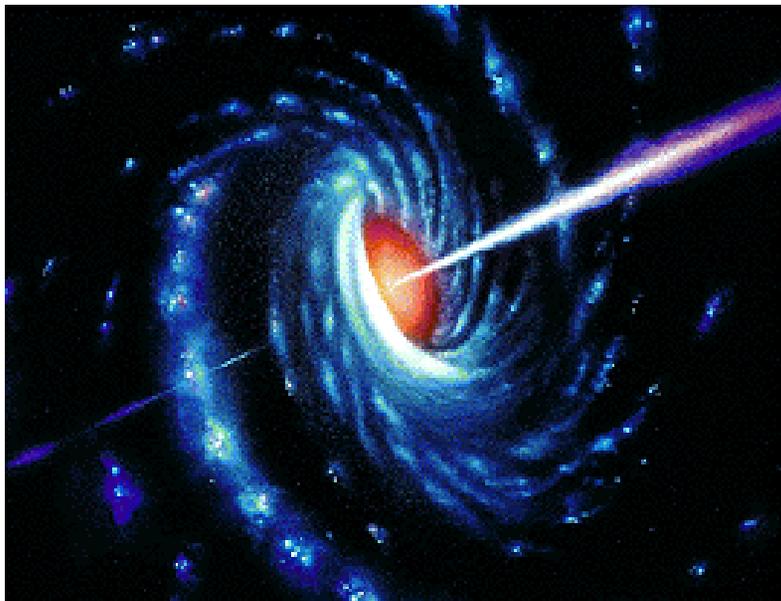


Nebulosa do Caranguejo em cujo centro existe uma **estrela de neutrões**

Nos últimos anos foram identificados vários candidatos a buraco negro (desde os de massa estelar aos supermassivos).

Foram também alcançados importantes resultados teóricos . Um deles aponta para a emissão de radiação por buracos negros designada por **Radiação de Hawking**.

Estudam-se actualmente buracos negros nas mais variadas escalas em termos de massa, tempo, espaço,...



Núcleos galácticos activos (AGNs)

Quasares

Explosões de raios gama (GRBs)

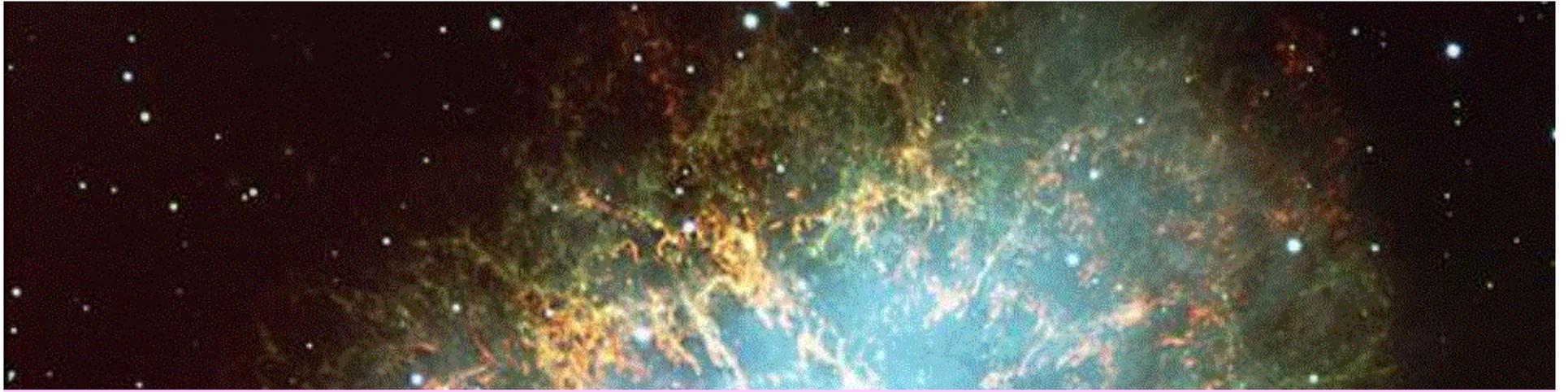
Jactos

Lentes gravitacionais

Matéria Escura

Buracos de Verme

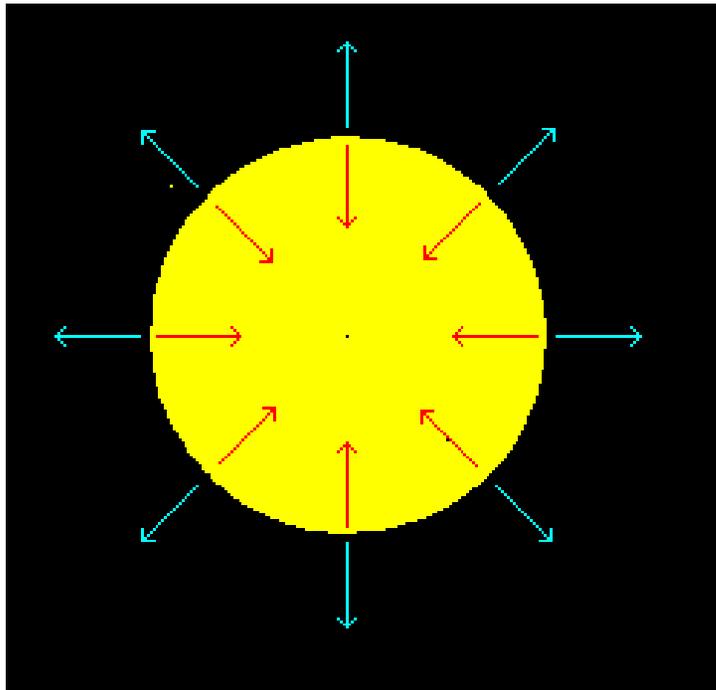
.....



Formação de Buracos Negros



Formação de Buracos Negros de Massa estelar



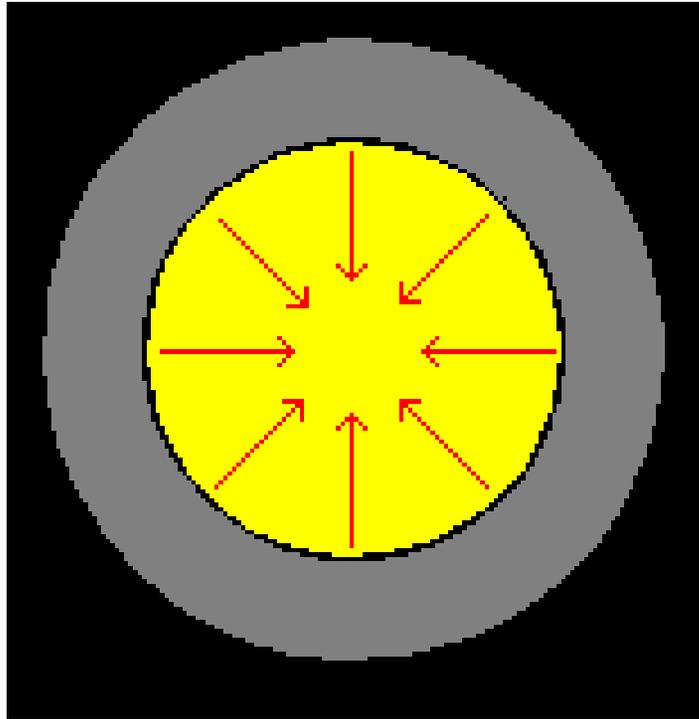
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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).



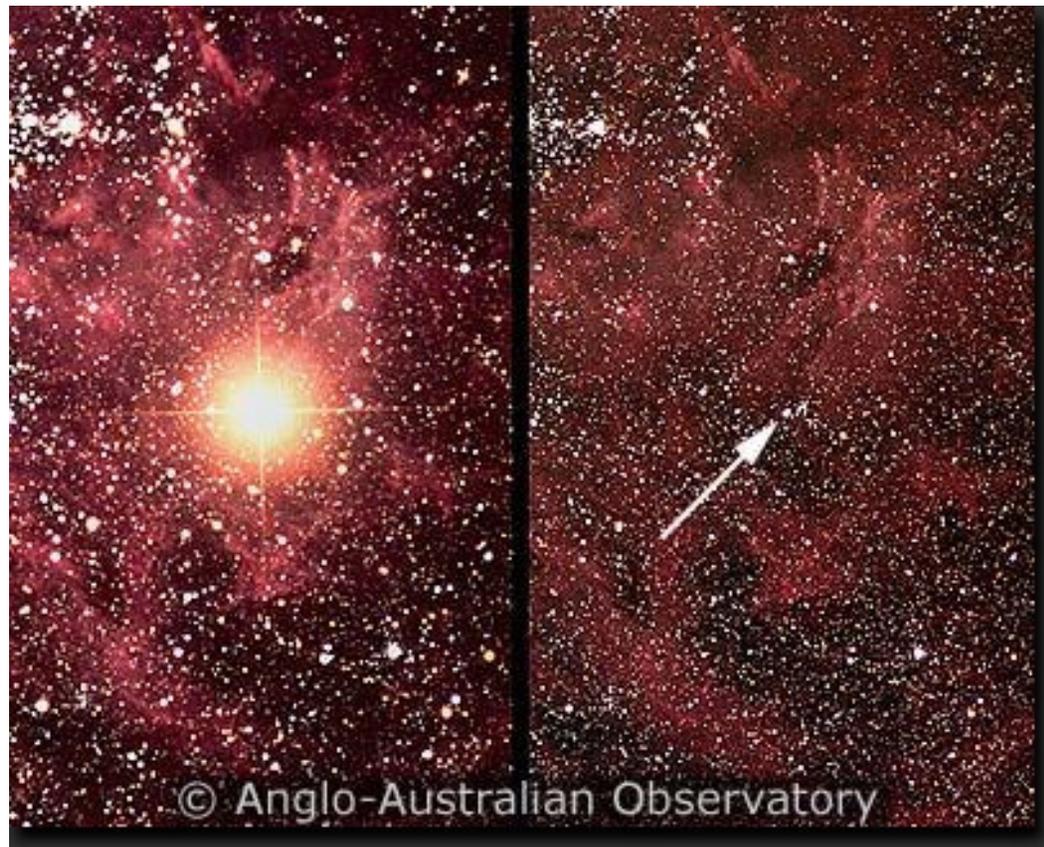
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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 vai acontecer a seguir depende essencialmente da massa da estrela

Estrelas com massas iniciais superiores a 8 massas solares acabam explodindo naquilo a que designamos por **SuperNova**.

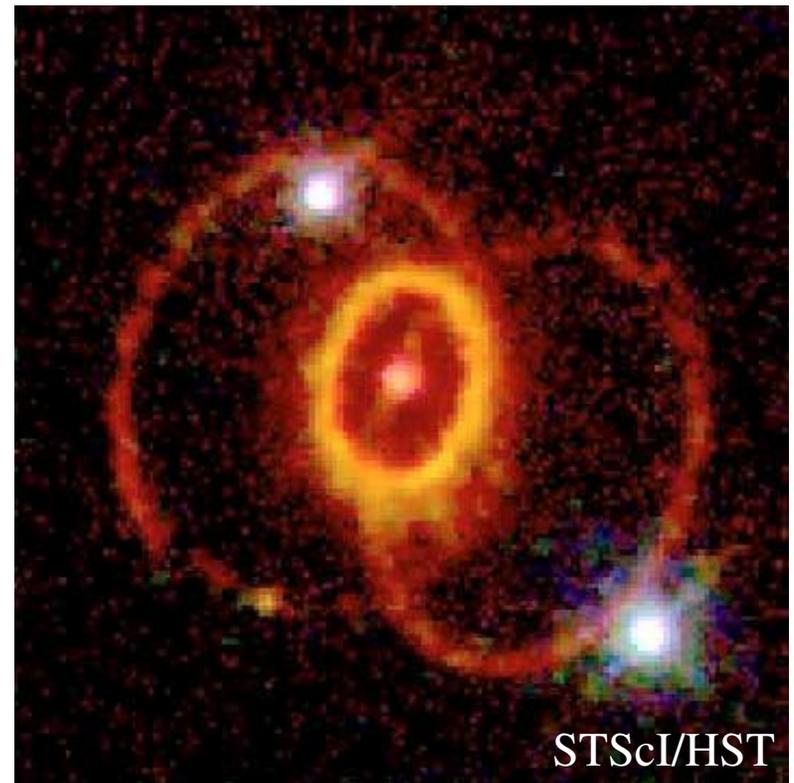


Supernova 1987A observada na Grande Nuvem de Magalhães.

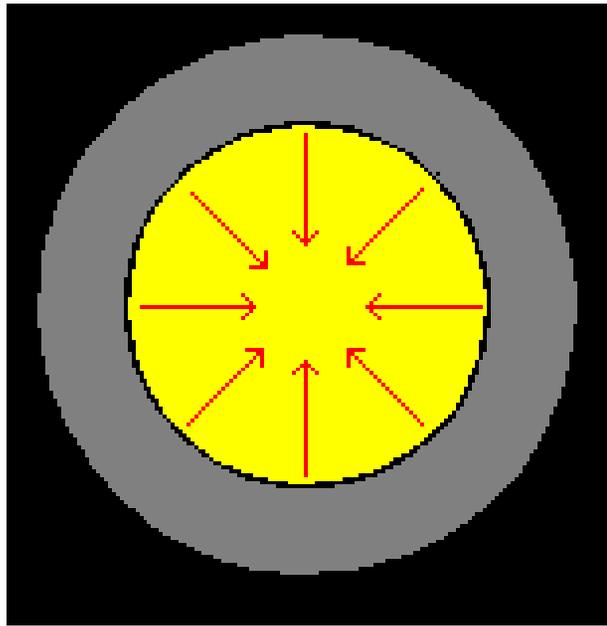
As Supernovas alimentam as nuvens de gás de onde irão nascer novas estrelas!



NGC 1952



1987A



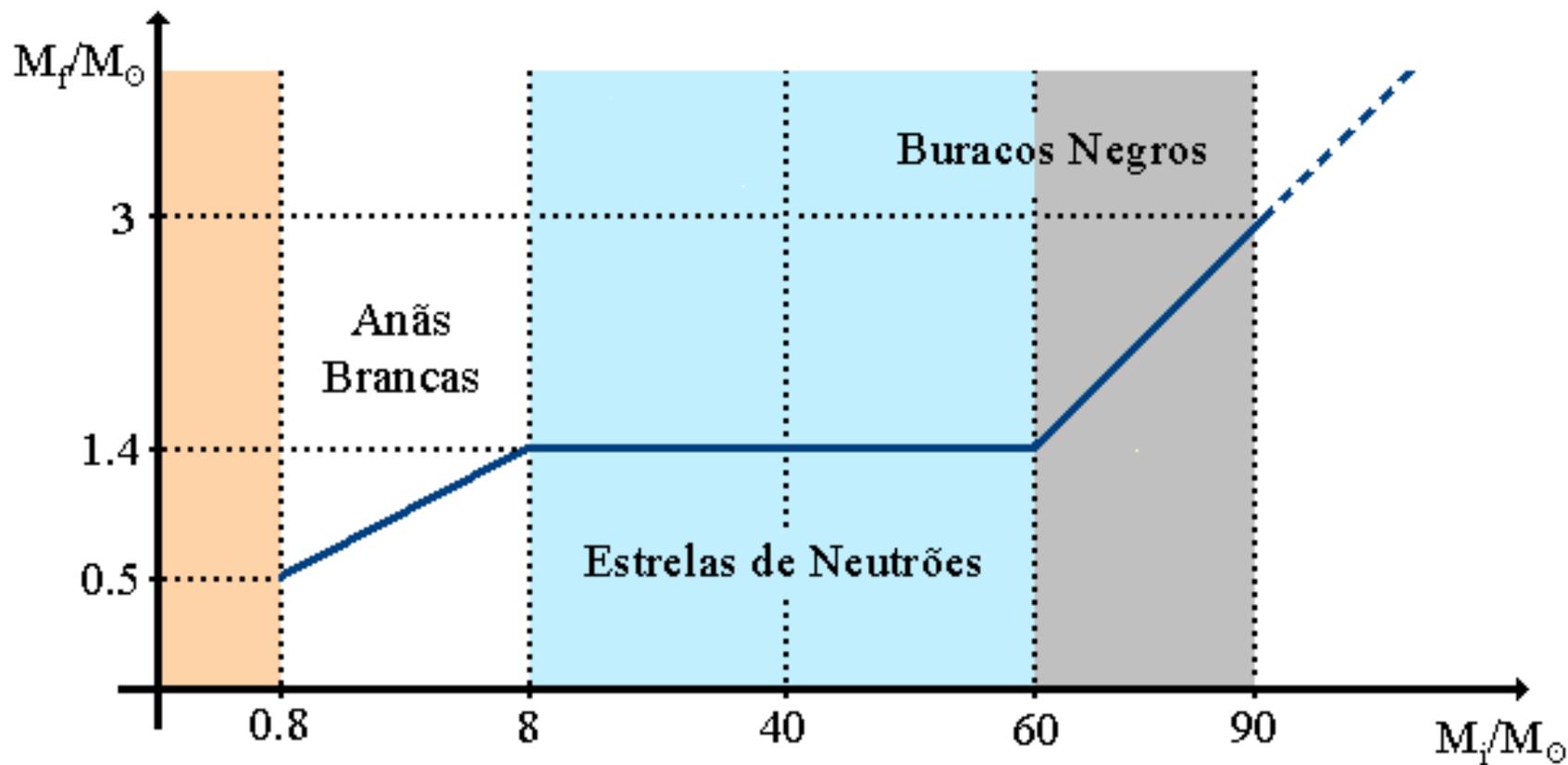
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

O núcleo da estrela que explodiu como Supernova colapsa podendo dar origem a uma

estrela de neutrões.

Se a massa for suficiente então o colapso pode continuar até que se origine um **buraco negro.**

Formação de buracos negros de massa estelar



(c) 2003 Laurindo Sobrinho

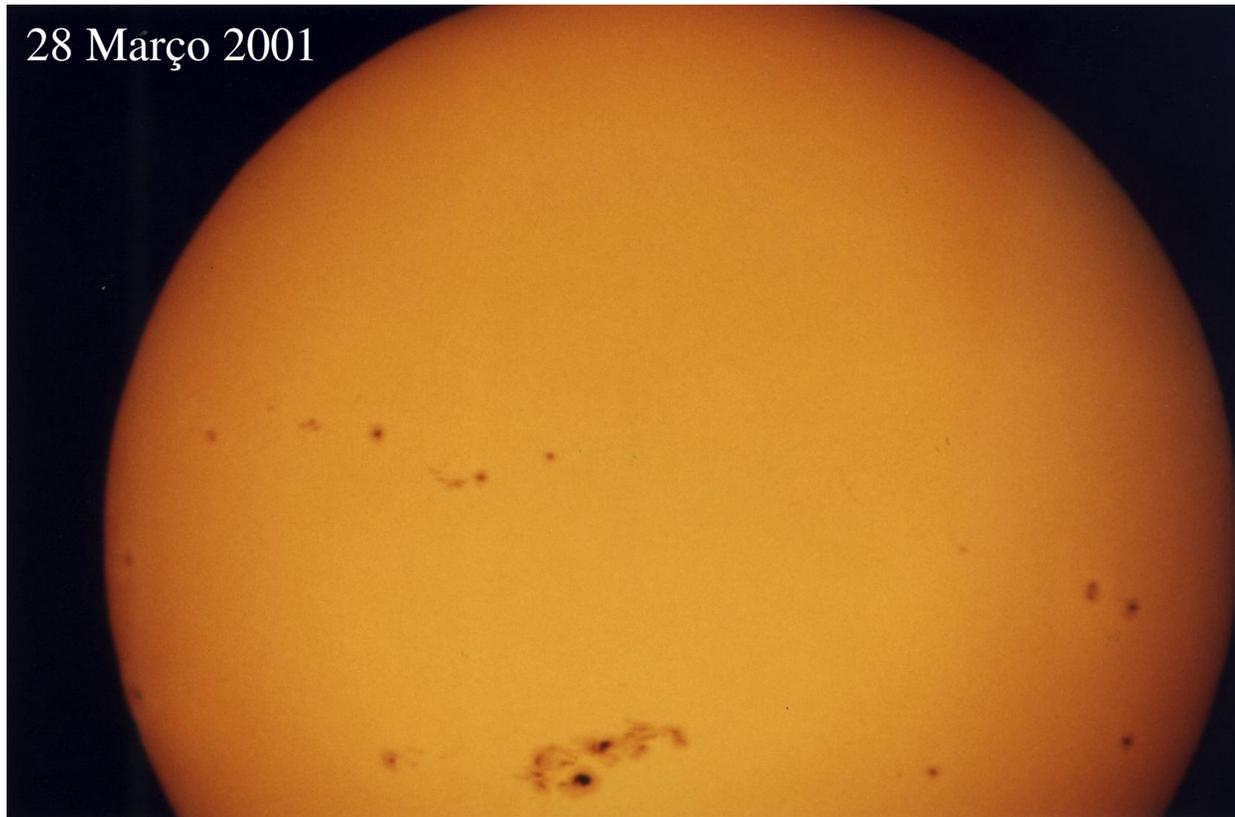
Para que se forme um buraco negro estelar a estrela tem de ter:

Massa inicial superior a $40M_{\odot}$

Massa após a explosão em supernova superior a $3M_{\odot}$

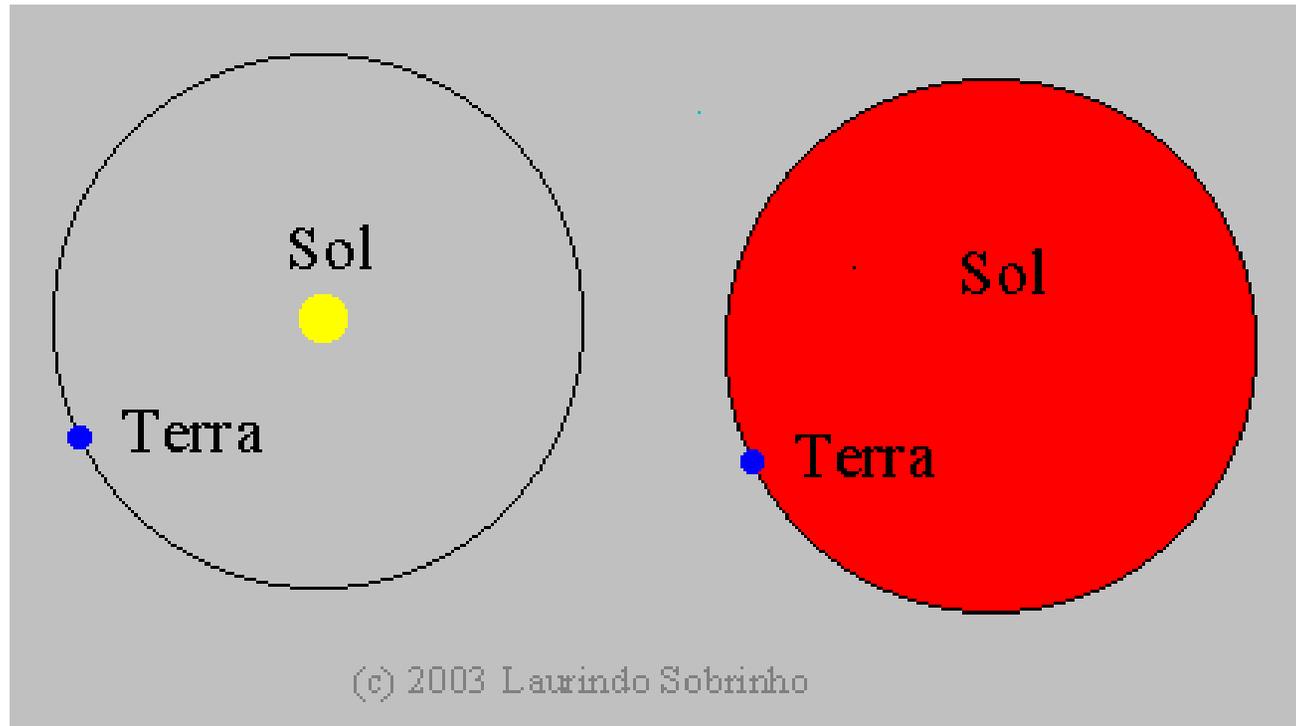
Não é ainda conhecida com rigor a fronteira entre estrelas de neutrões e buracos negros.

O caso do SOL



O Sol existe há cerca de
5000 milhões de anos
e está a meio da sua vida!

Ao acabar o combustível nuclear as camadas mais externas do Sol irão expandir-se passando este para a fase de **Gigante Vermelha!**



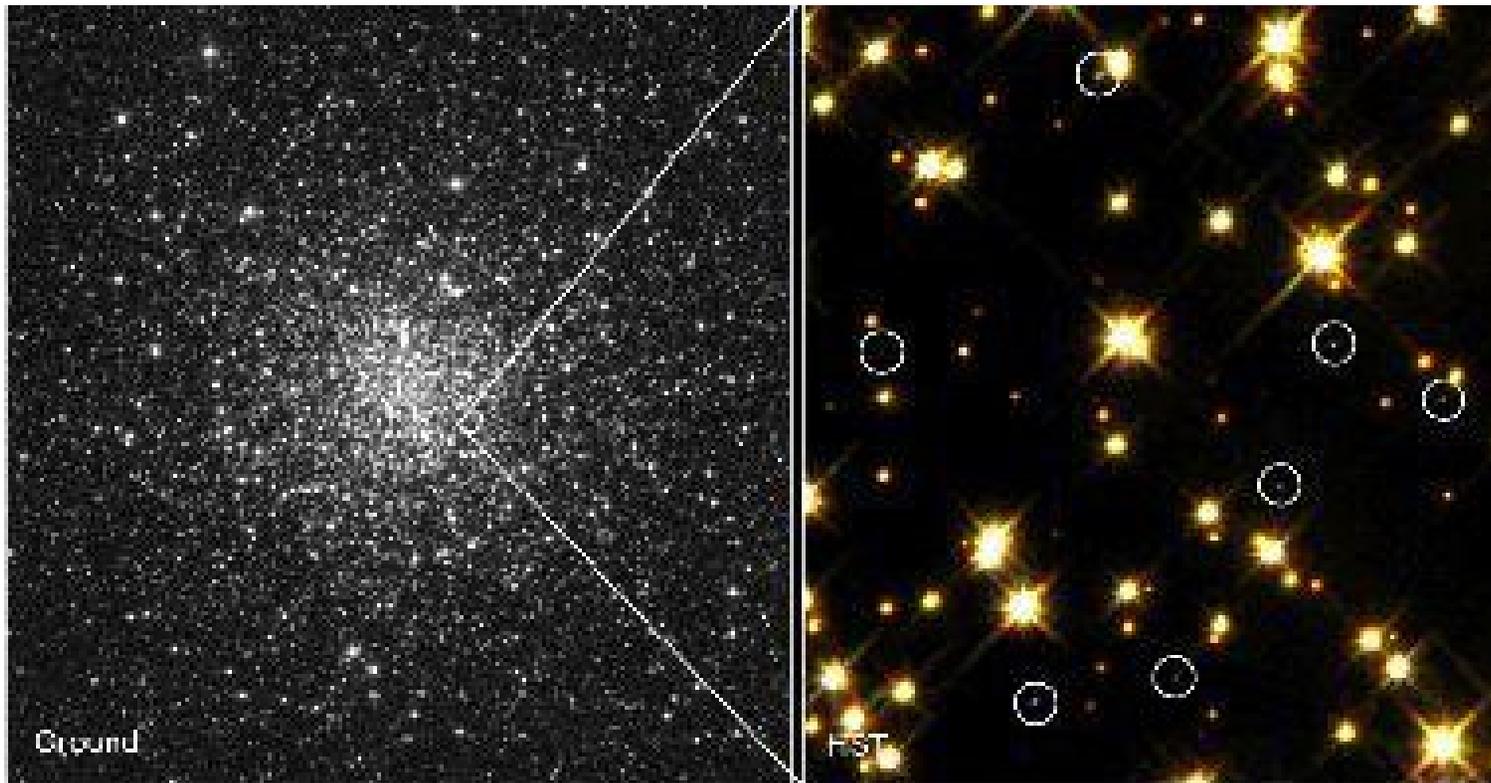
O raio dessa **Gigante Vermelha** será equivalente ao raio da órbita da Terra.

Nesta fase a estrela ejecta bastante matéria para o exterior.
Forma-se uma nebulosa planetária!



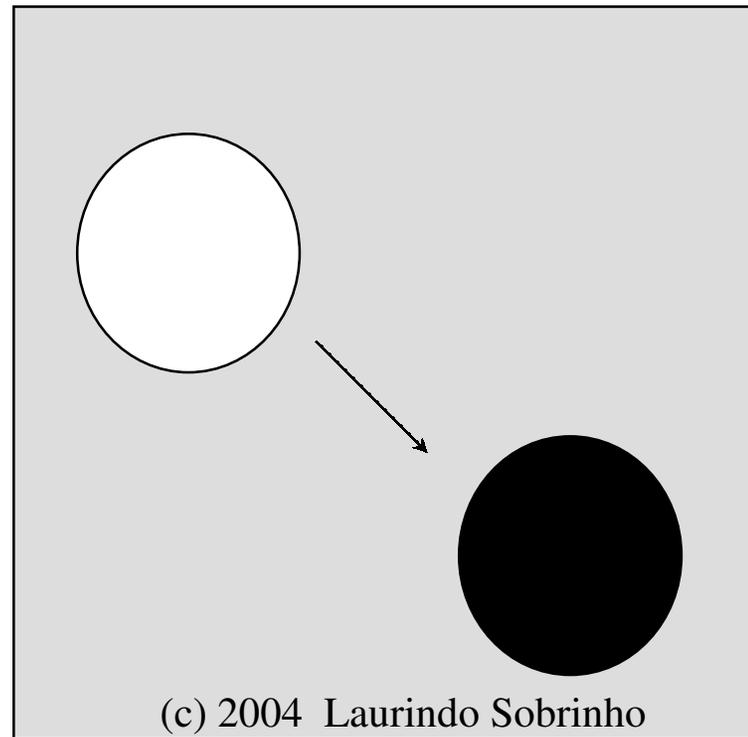
M57 – Nebulosa do Anel.

No centro da Nebulosa Planetária o núcleo restante da estrela colapsa originando uma **Anã Branca** (e não um buraco negro)



(Anãs Brancas no enxame fechado M4)

A **Anã Branca** vai arrefecendo aos poucos até se tornar numa **Anã preta**.



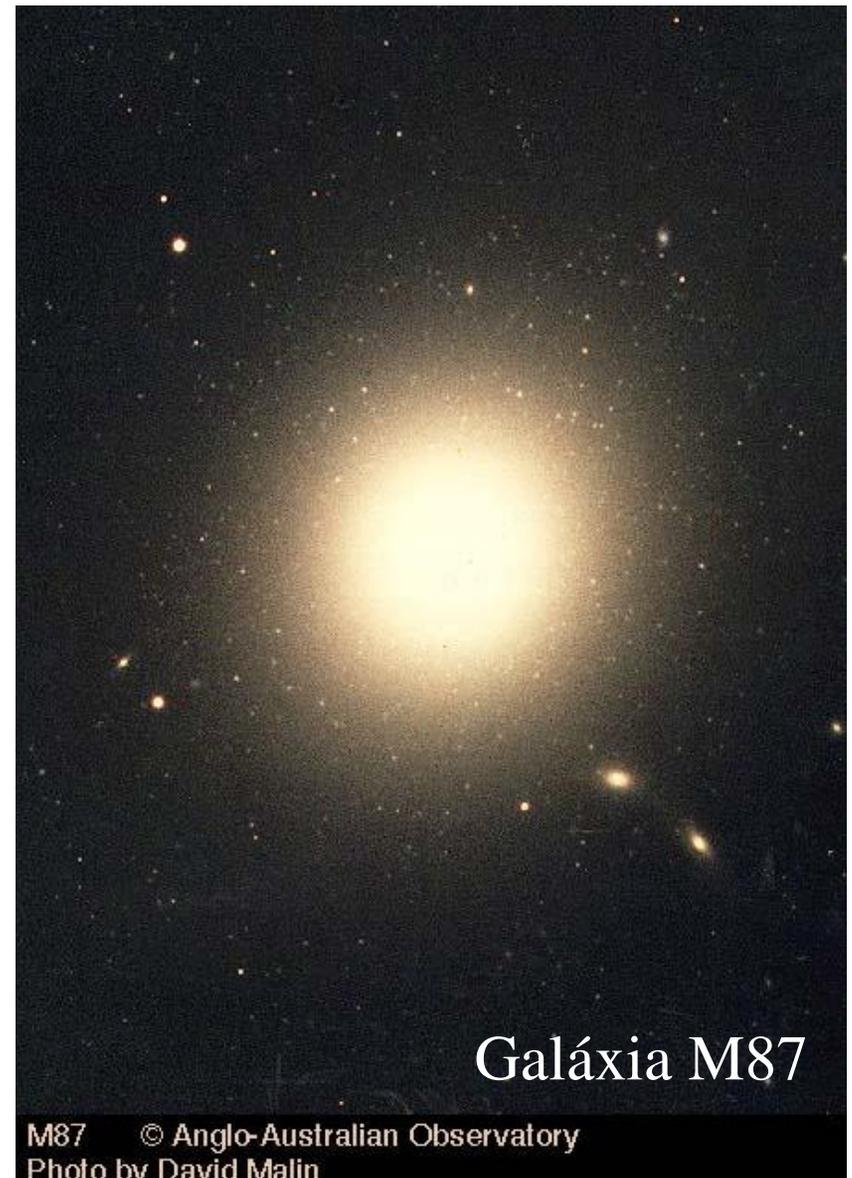
Isto é o que vai acontecer ao **Sol** (mas só daqui a 5000 milhões de anos). É também o destino de todas as estrelas que tenham massas iniciais inferiores a **8 massas solares**.

O Sol não irá dar origem a um buraco negro!

Buracos Negros Supermassivos

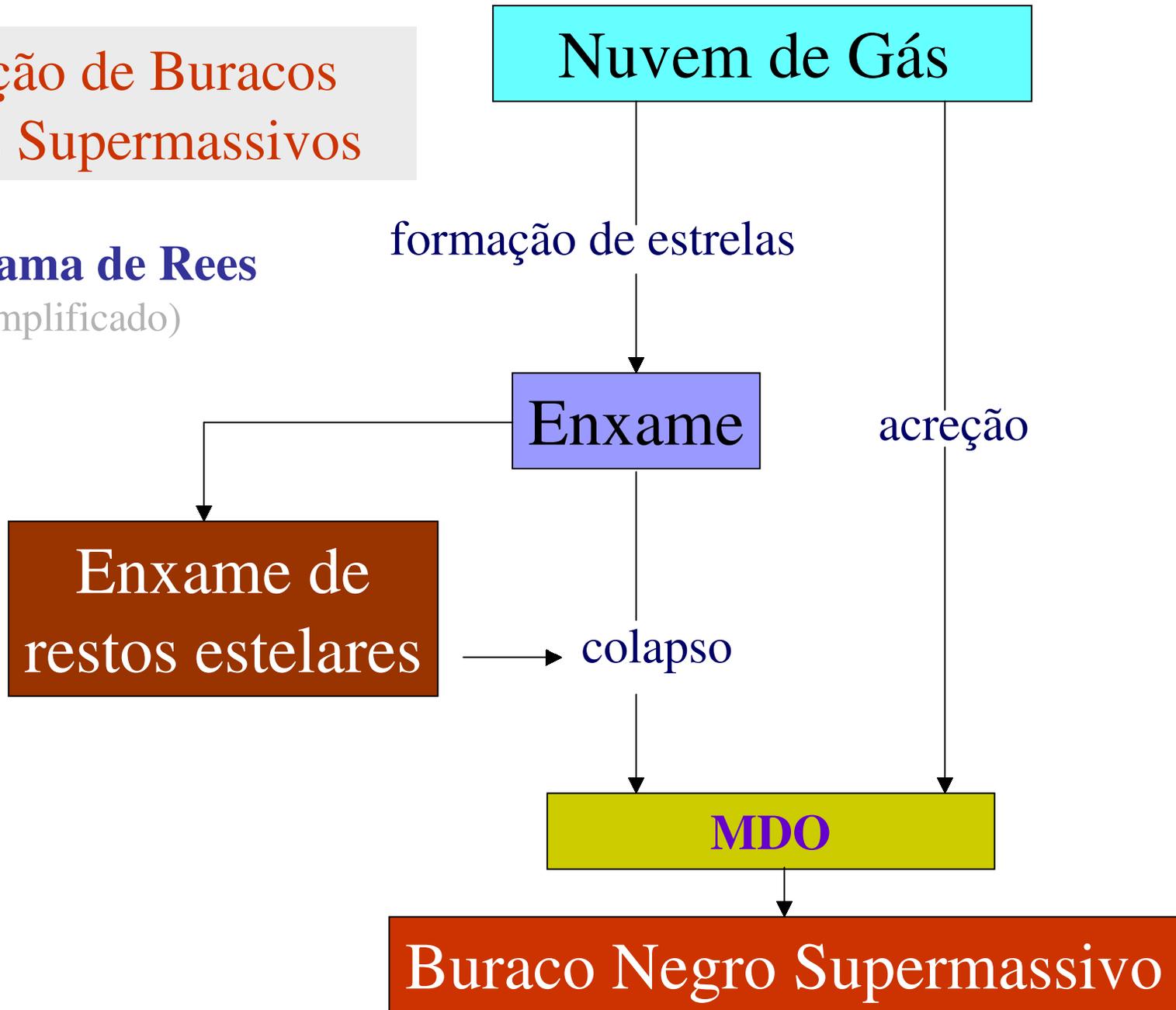
Existem evidências observacionais que apontam para a presença de buracos negros supermassivos (massa igual ou superior a 1 milhão de massas solares) no centro de algumas galáxias.

Como se terão formado estes buracos negros?



Formação de Buracos Negros Supermassivos

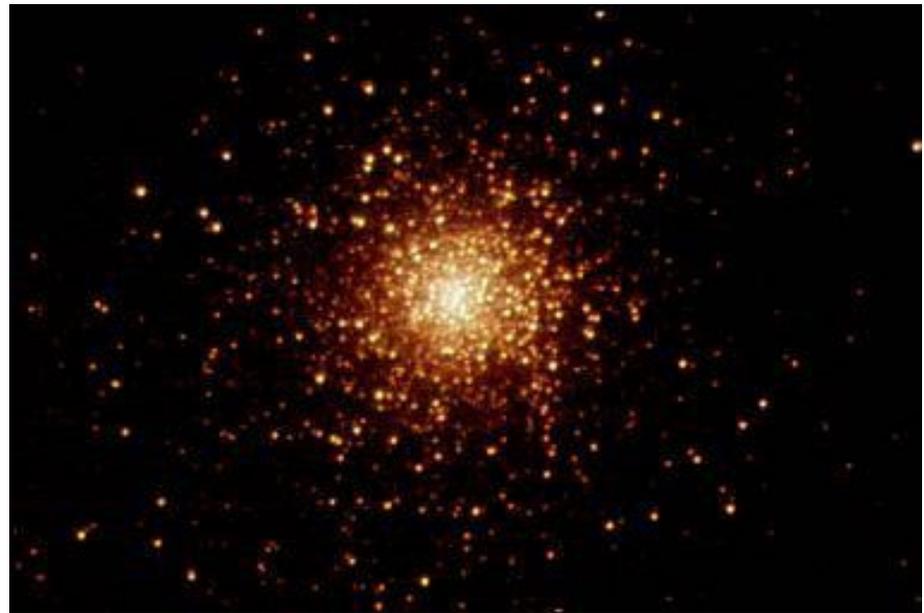
Diagrama de Rees (simplificado)



Formação de buracos negros de massa intermédia

Buracos com massas entre as 1000 e 100 000 M_{\odot}

São conhecidos ainda muito poucos candidatos deste tipo de buraco negro. Aqueles que se conhecem situam-se no centro de enxames fechados ou de galáxias. Poderão ter origem semelhante à dos supermassivos mas também podem ter-se originado a partir de buracos negros de massa estelar.



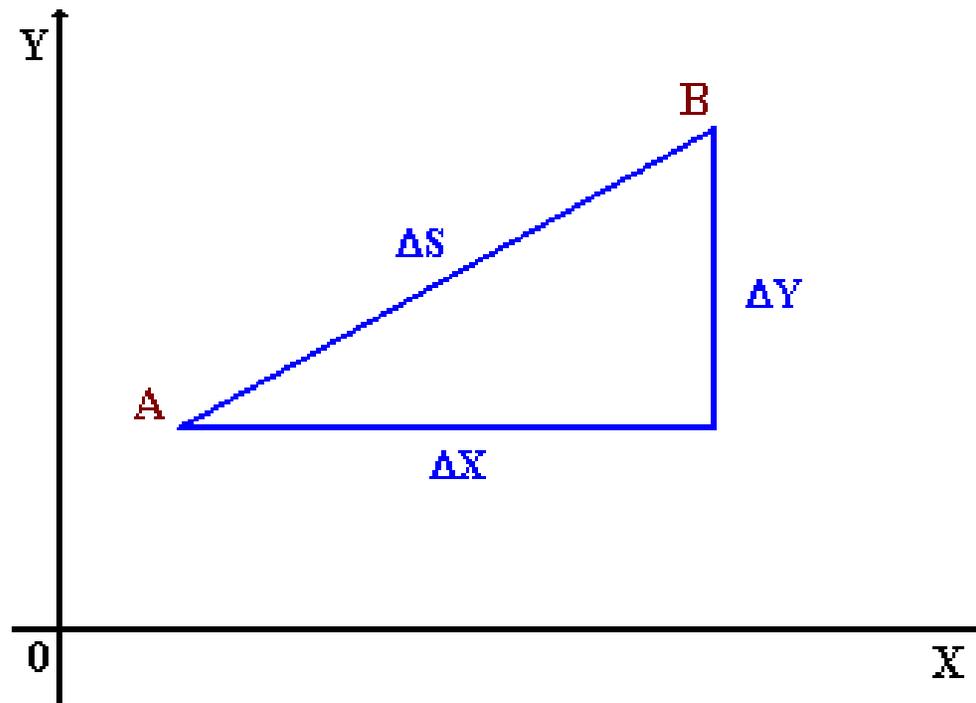
Enxame fechado M15



Propriedades dos
Buracos Negros

The image features a central pink rectangular banner with the text "Propriedades dos Buracos Negros" in a blue serif font. The banner is set against a background of a starry night sky with various nebulae and star clusters. The top portion of the background shows a dark blue and purple nebula with scattered bright stars. The bottom portion shows a more colorful nebula with green, yellow, and blue hues, also containing many stars.

Para calcular a distância entre 2 pontos num plano podemos recorrer ao **Teorema de Pitágoras**



$$\Delta S^2 = \Delta X^2 + \Delta Y^2$$

Para calcular distâncias no **espaço-tempo de Shwarzschild** 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:

$$r = 0$$

$$r = 2m$$

$$m = \frac{GM}{c^2} \quad (\text{m tem as dimensões de uma distância})$$

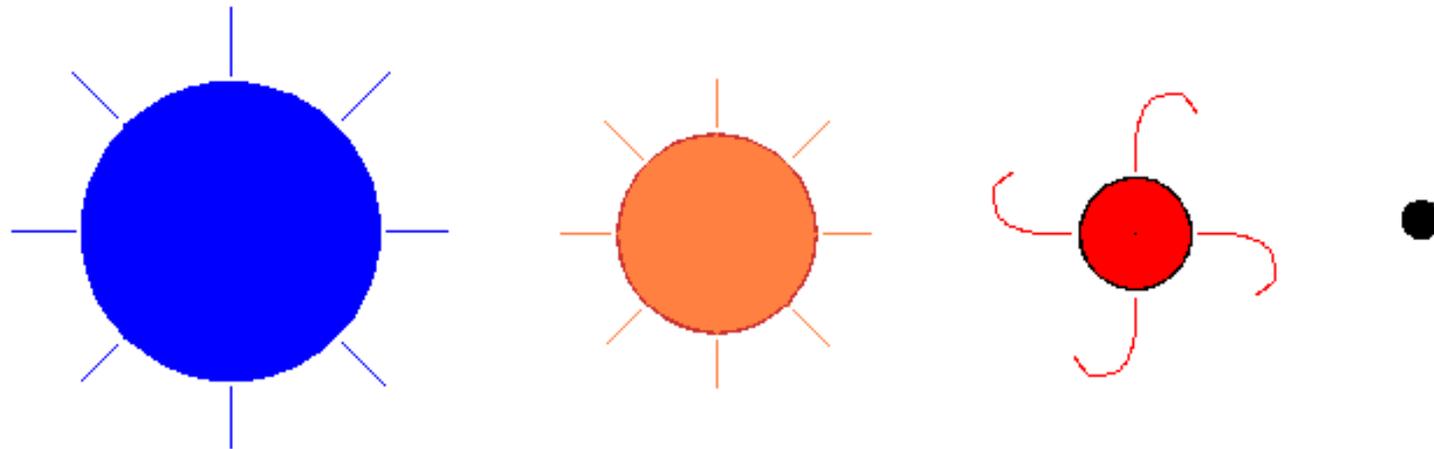
	Raio (km)	2m(km)	Raio/(2m)
Terra	6738	0.009	750 000
Sol	700 000	3	233 000

No caso de uma estrela como o Sol ou de um planeta como a Terra o raio $r=2m$ fica bem "guardado" no interior dos mesmos.

Quando se dá a formação de um buraco negro o raio da estrela diminui até atingir **$r=2m$** . É exactamente neste ponto que a velocidade de escape iguala a velocidade da luz.

A partir daqui um observador externo deixa de ver o que se passa na estrela.

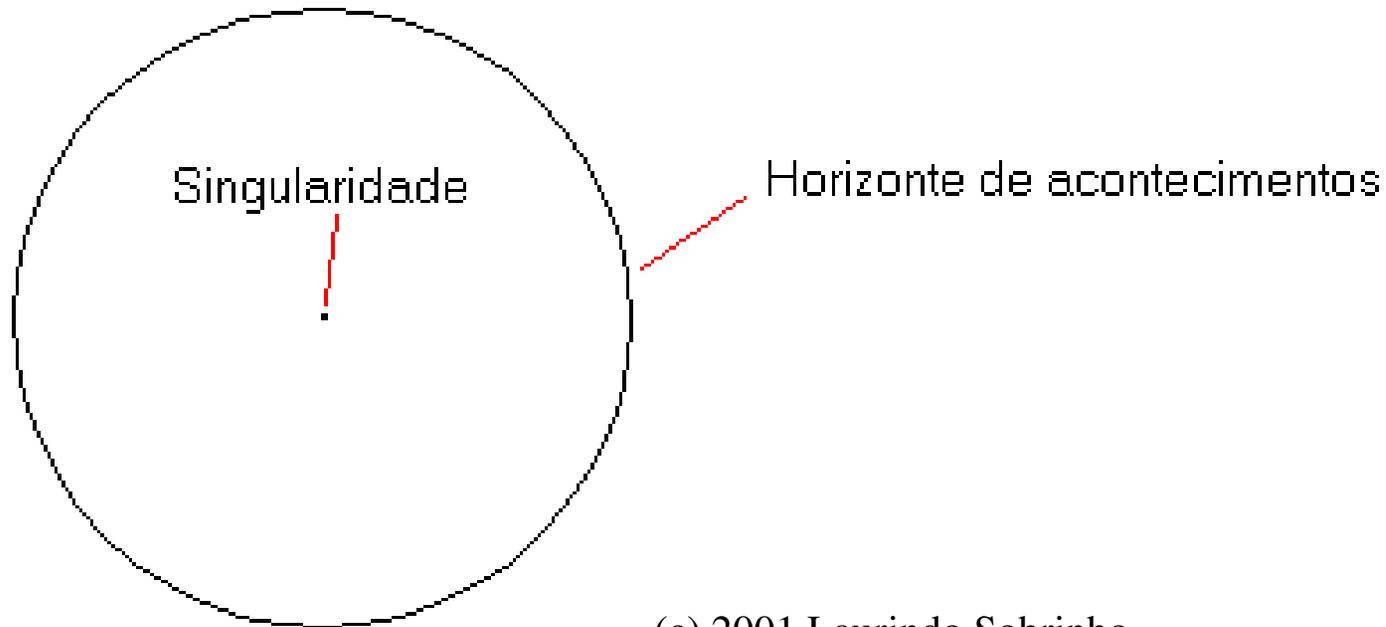
A superfície esférica $r=2m$ chama-se **horizonte de acontecimentos**.



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

Mesmo depois de se ter formado o **horizonte de acontecimentos** o colapso avança do lado de lá até que se atinge um **volume zero!!!**

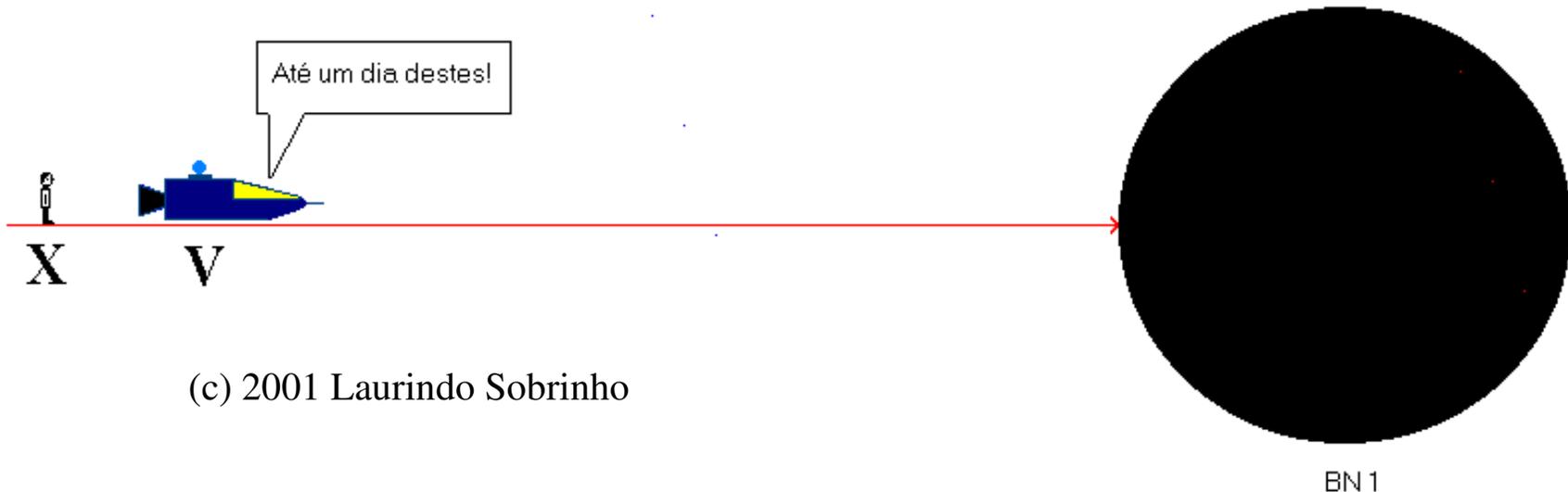
O ponto $r=0$ chama-se **singularidade** do buraco negro. Nesse ponto deixam de ser aplicáveis as Leis da Física.



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

Estrutura de um buraco negro de Schwarzschild

Viagem ao lado de lá do horizonte



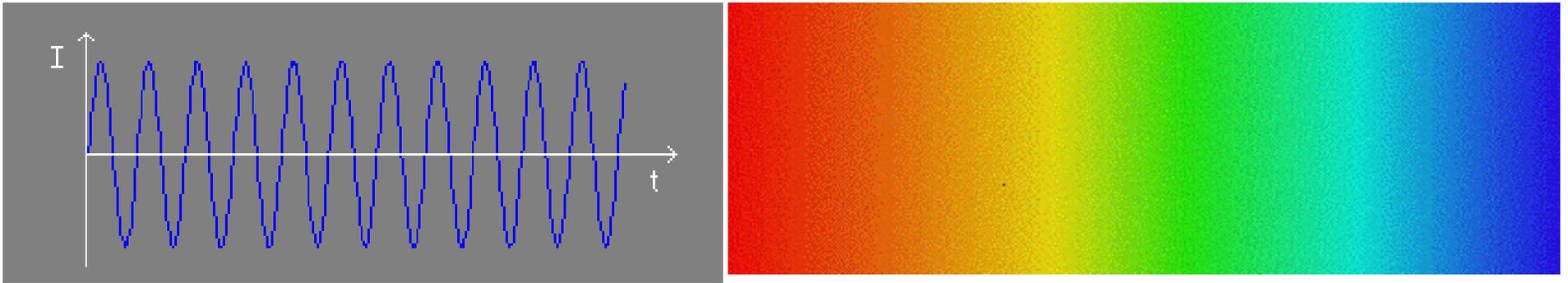
Os dois observadores sincronizam os respectivos relógios e despedem-se (até um dia destes...). Vamos relatar a viagem do ponto de vista de cada um dos observadores.

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 ?

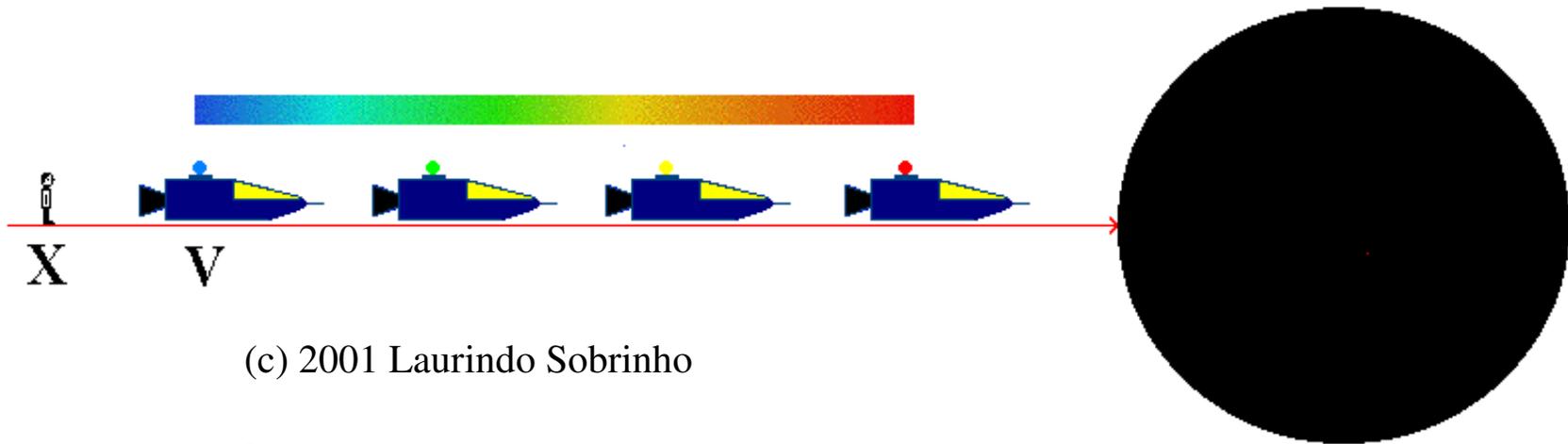
É uma onda electromagnética que efectua **667 000 000 000 000** oscilações por segundo.



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

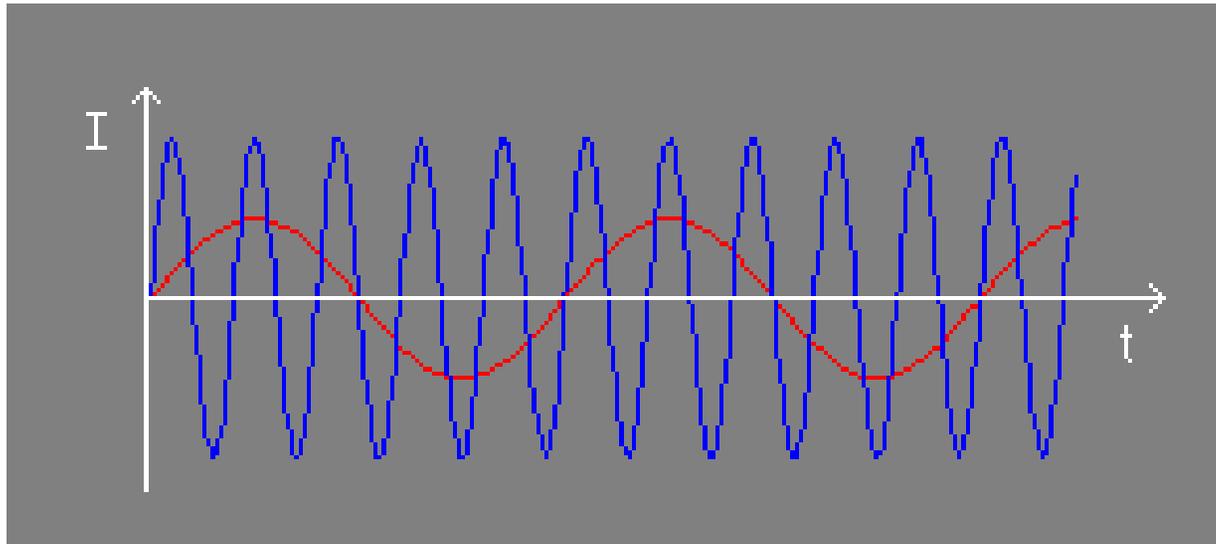


(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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

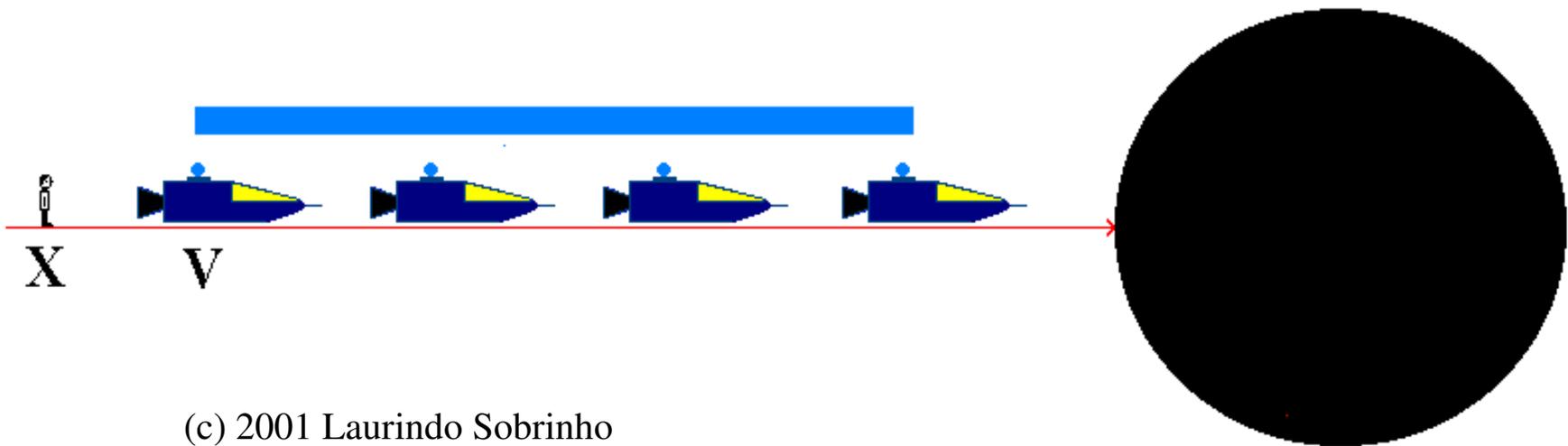
BN1

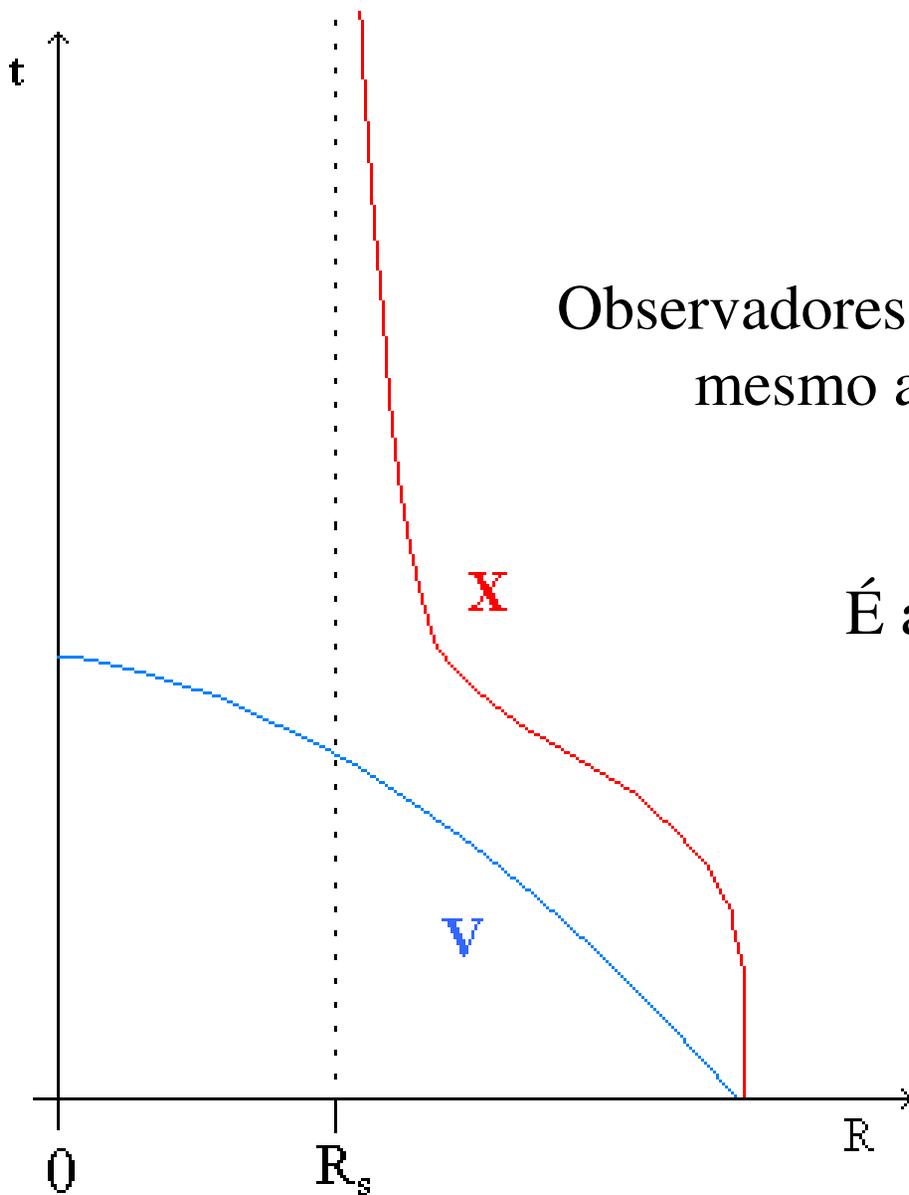
Depois do vermelho a luz deixa de ser visível mas continua a ser detectável no domínio dos raios infra-vermelhos e depois como onda de rádio. Além disso a radiação é cada vez menos intensa.



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 a partir do qual 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.

Evitando a Singularidade

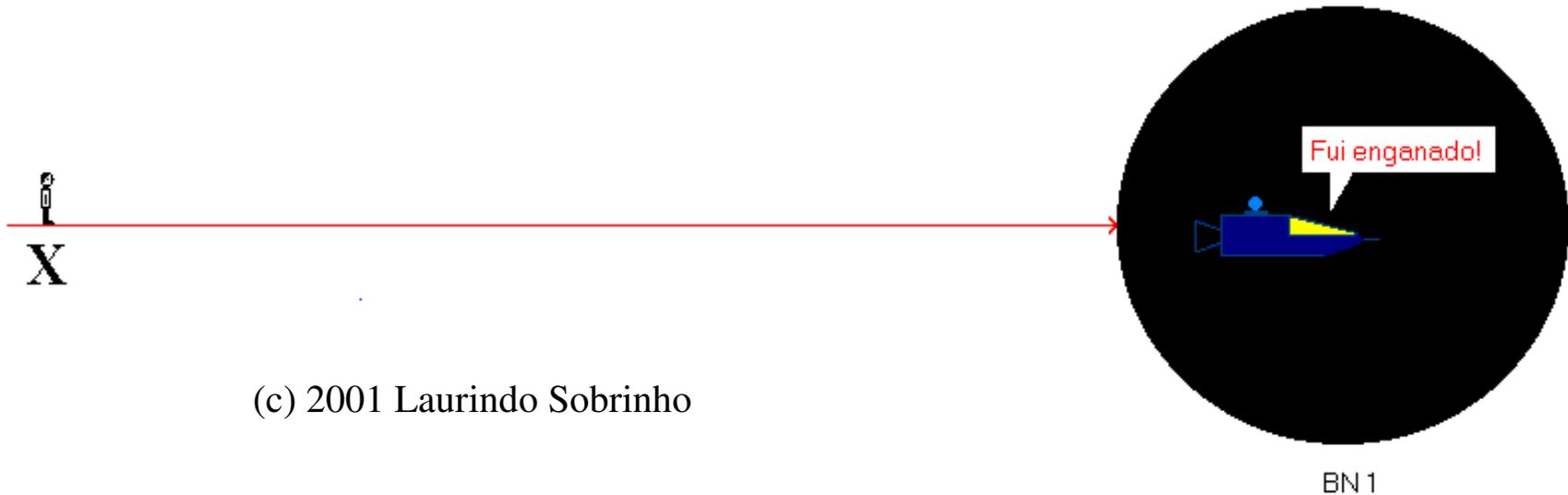
Uma vez ultrapassado o **horizonte de acontecimentos** será possível evitar a **singularidade** ?

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.

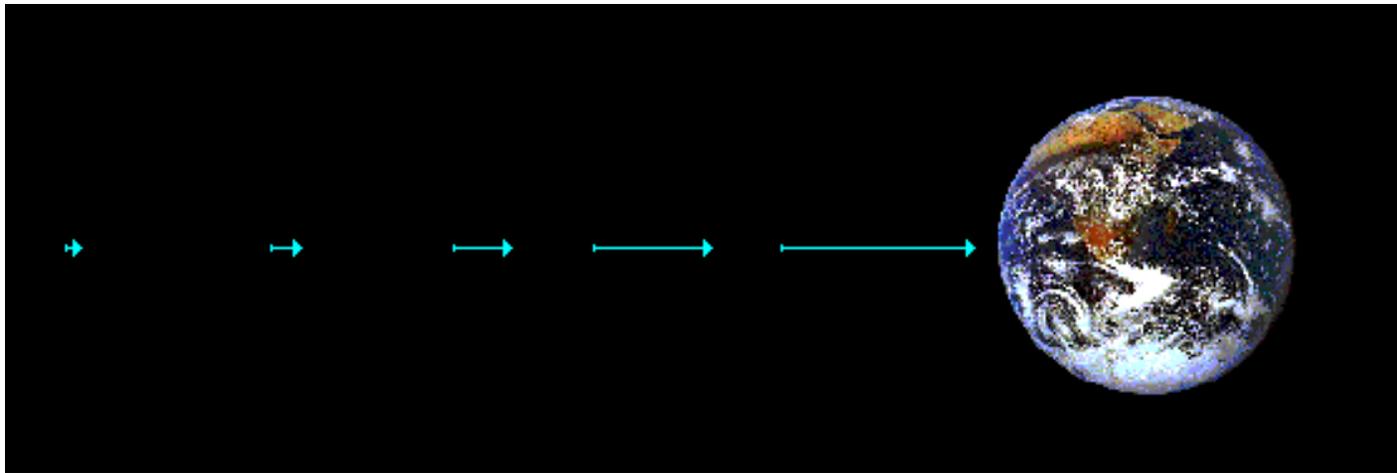


Esta parte final da viagem é super rápida
(menos de 10 segundos).

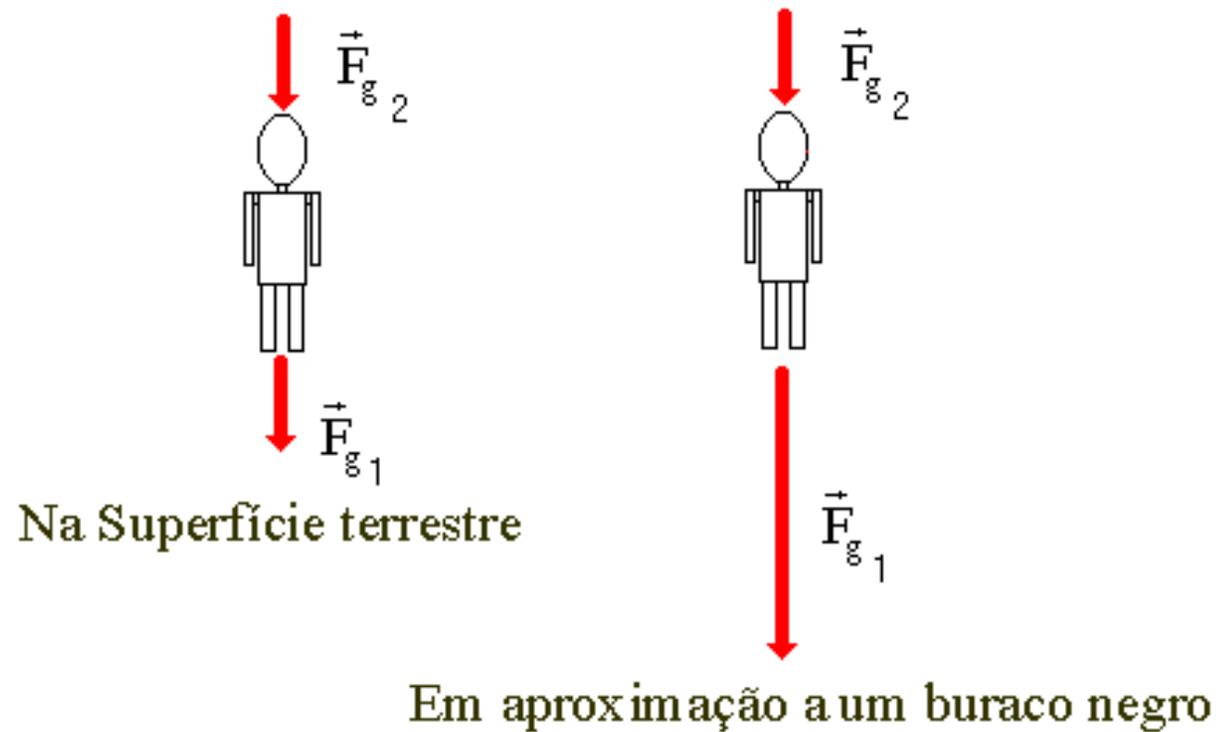
**No interior do buraco negro espaço e tempo trocam de
papeis não sendo, por isso, possível estar em repouso num
ponto do espaço!**

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.

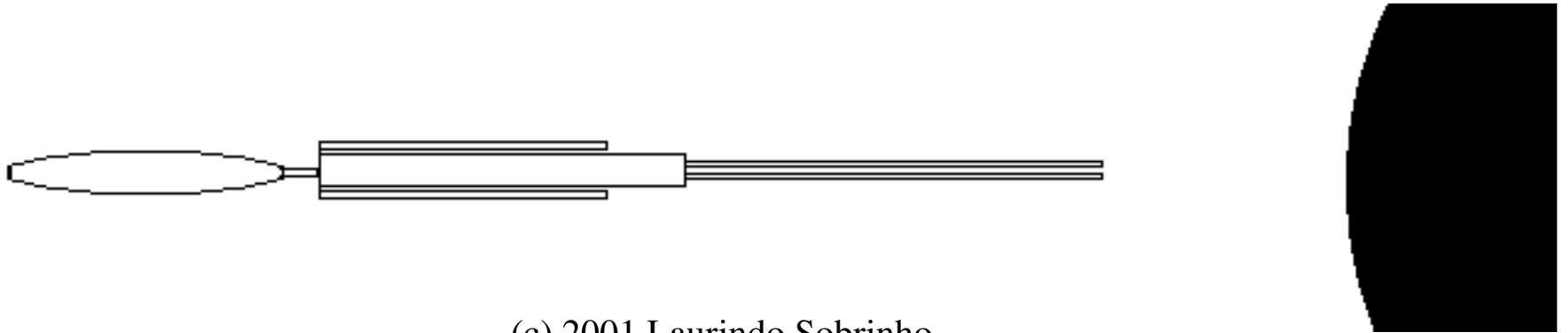


Isto significa que a força da gravidade que actua ao nível dos nossos pés é superior aquela que actua ao nível da nossa cabeça. O efeito não é muito significativo se estivermos sujeitos a um campo gravítico como o da Terra. As duas forças praticamente são iguais.



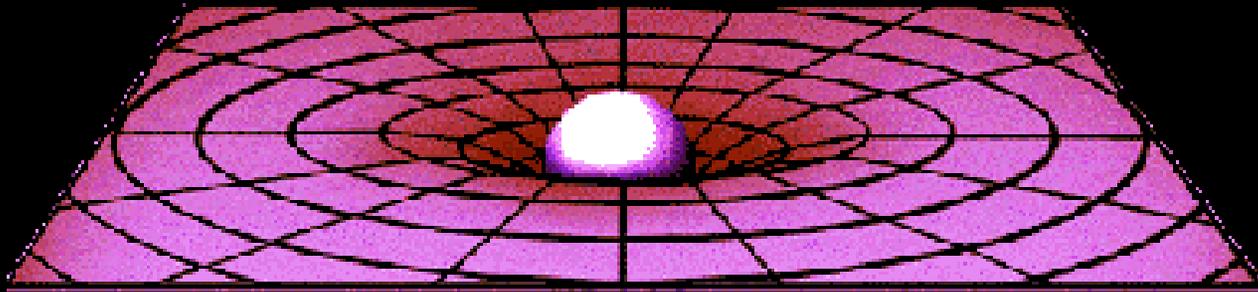
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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 ‘ **espaguetificação** ‘.



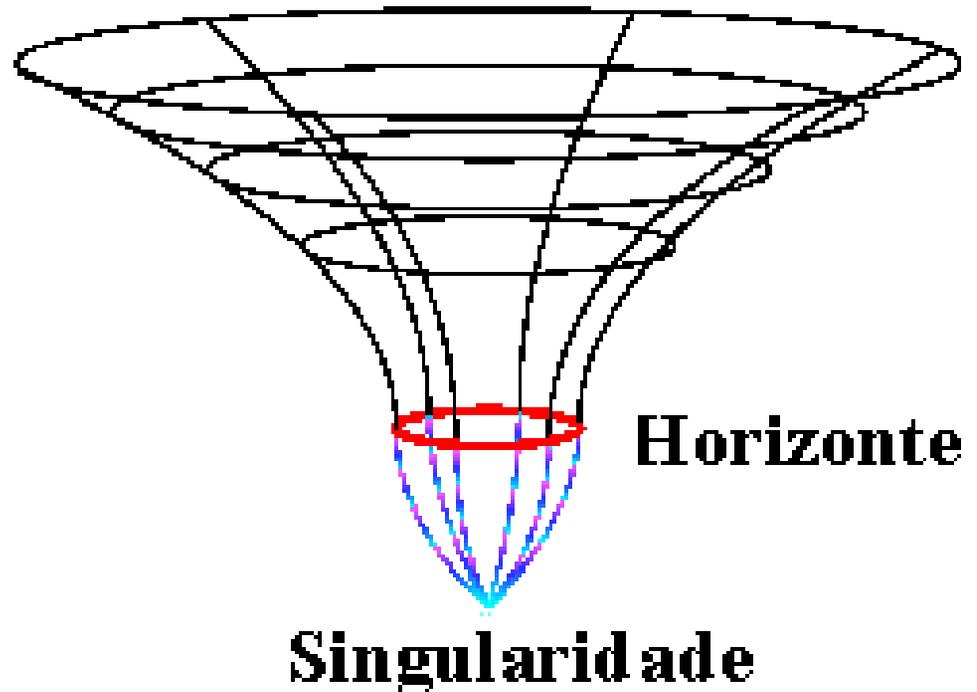
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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 'espaguete' antes de ter atingido o horizonte.

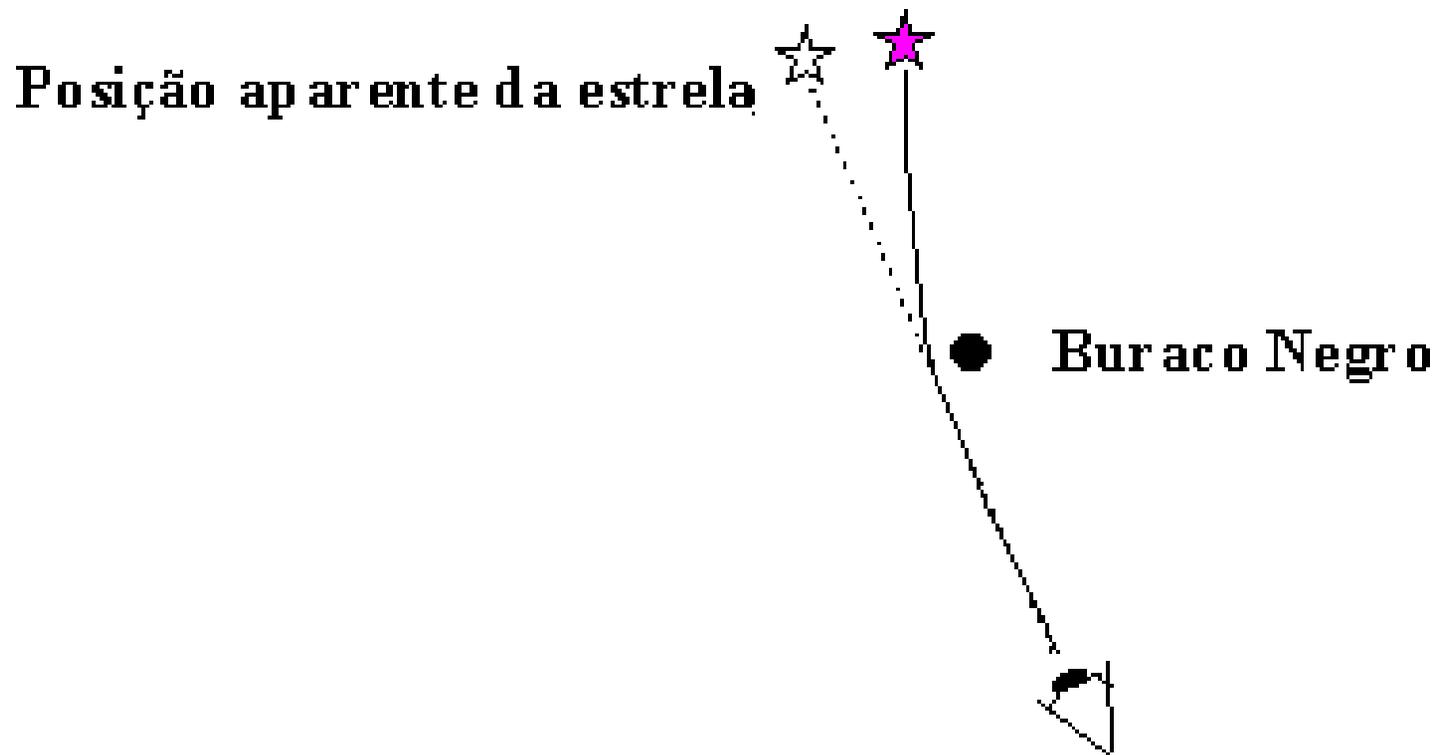


Curvatura do espaço causada por um objecto (de grande massa)

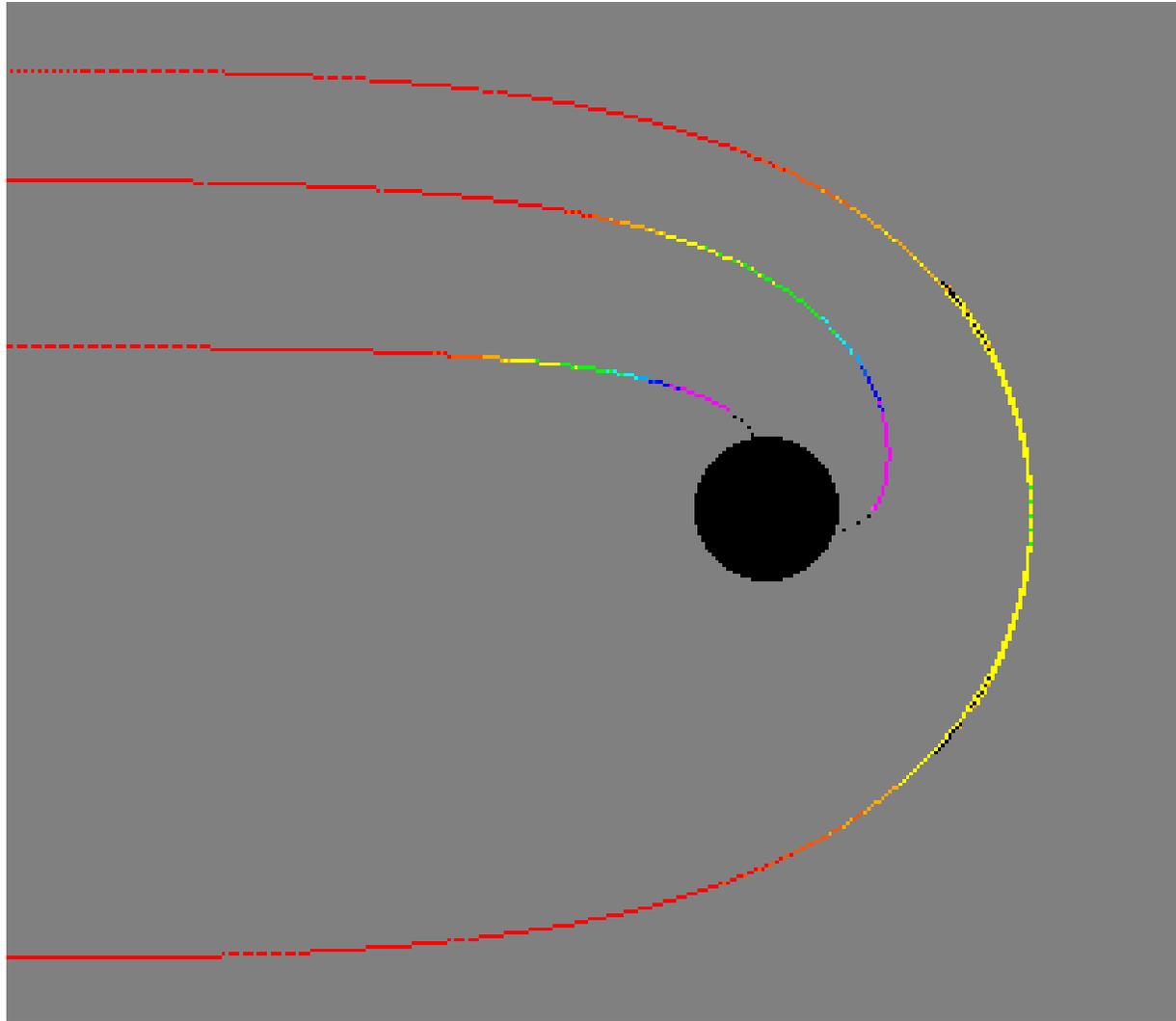
Os corpos deformam o espaço à sua volta. No caso de um buraco negro forma-se um **horizonte de acontecimentos** que encerra uma **singularidade** (ponto onde a curvatura do espaço é extrema).



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



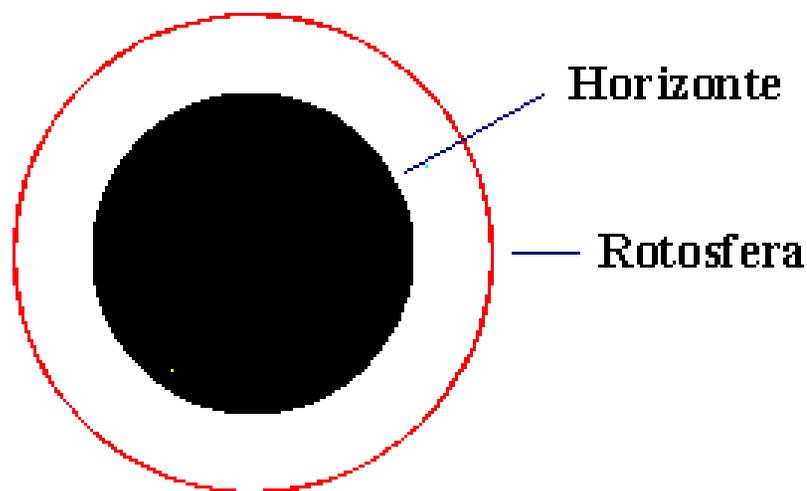
(adaptado de <http://www.astro.ku.dk/~cramer/RelViz/text/exhib3/exhib3.html>)



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

Os raios de luz também andam às voltas

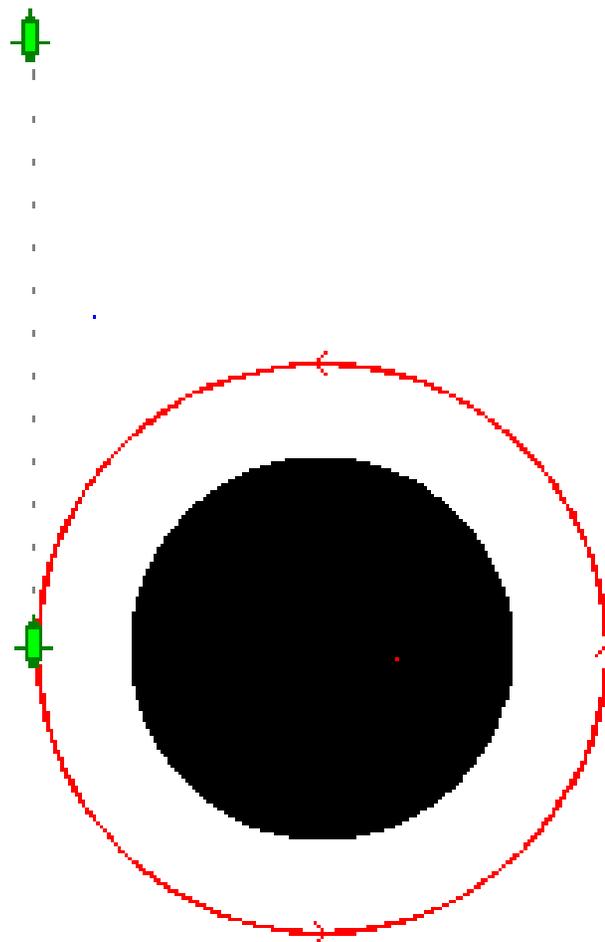
Se um raio de luz for emitido perpendicularmente ao horizonte de acontecimentos a uma distância de exactamente 1.5 raios de Schwarzschild ($1.5R_s$) então esse raio de luz irá descrever uma órbita circular.



(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 $1.5R_s$ chama-se **ROTOSFERA**.

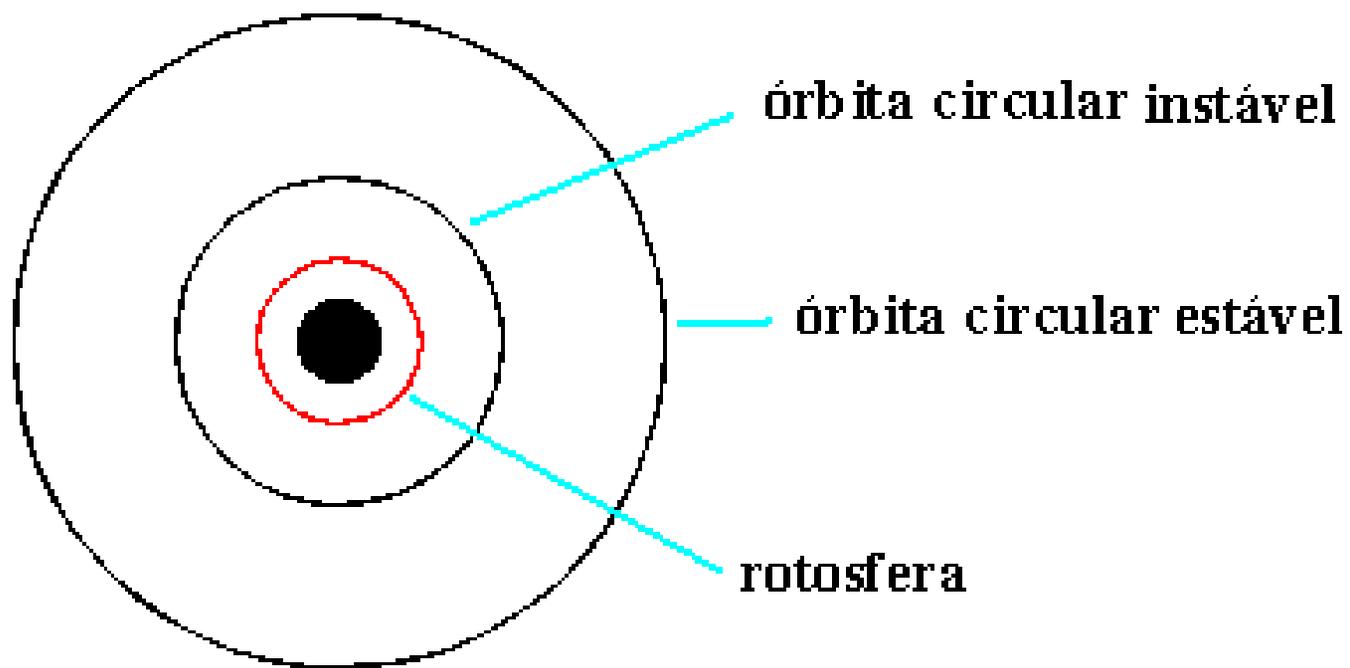
**Está uma nave igual
à nossa lá adiante !**



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

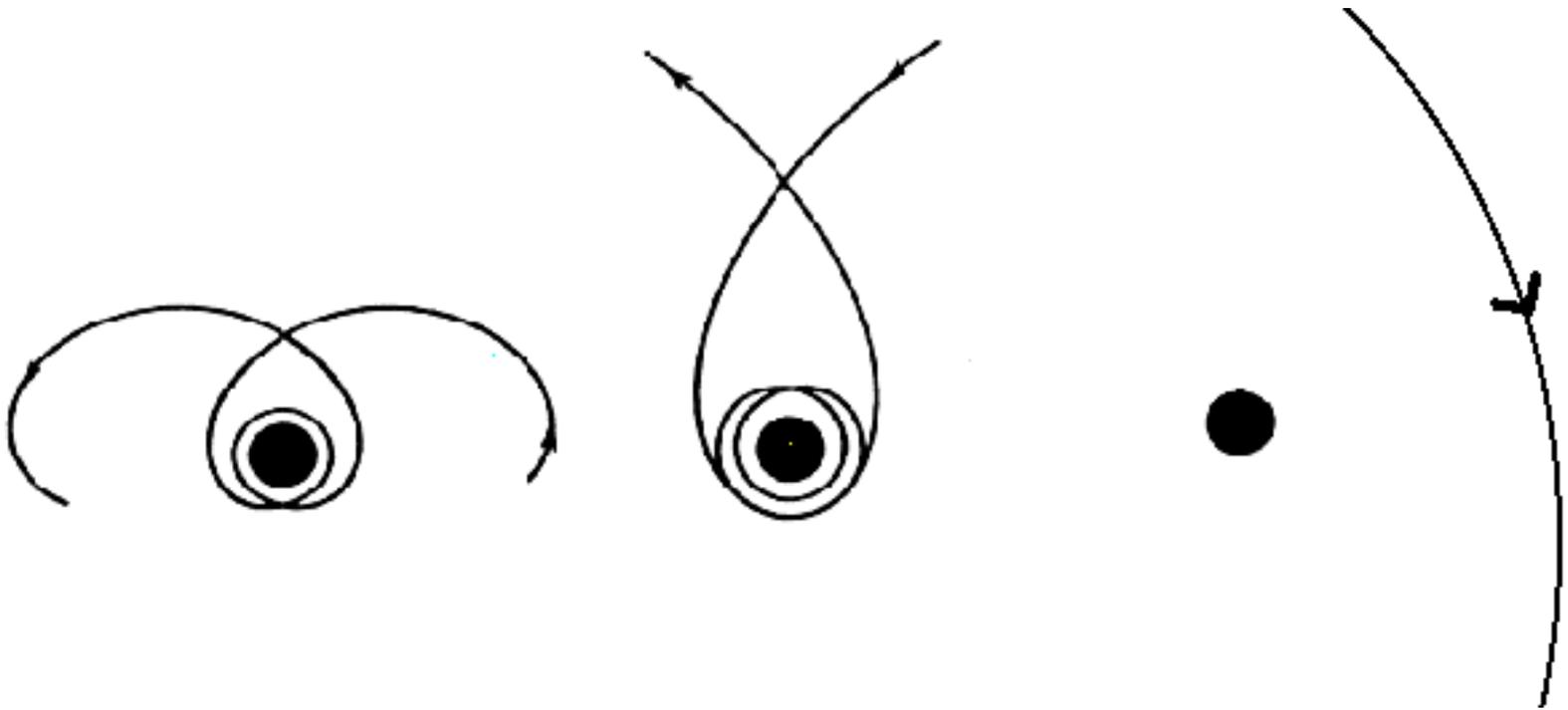
Trajectórias para corpos nas proximidades de um buraco negro

Existem duas órbitas circulares



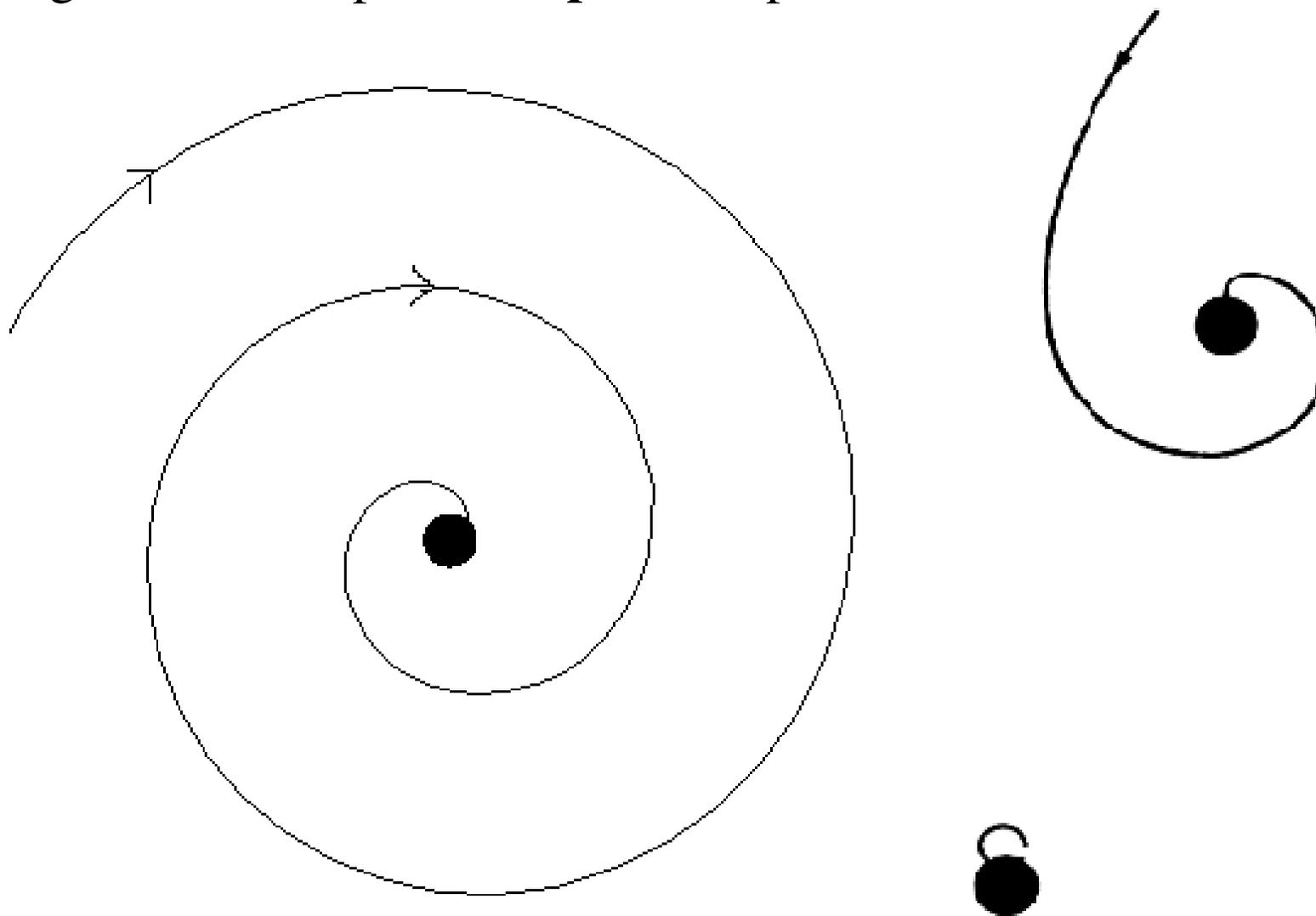
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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:

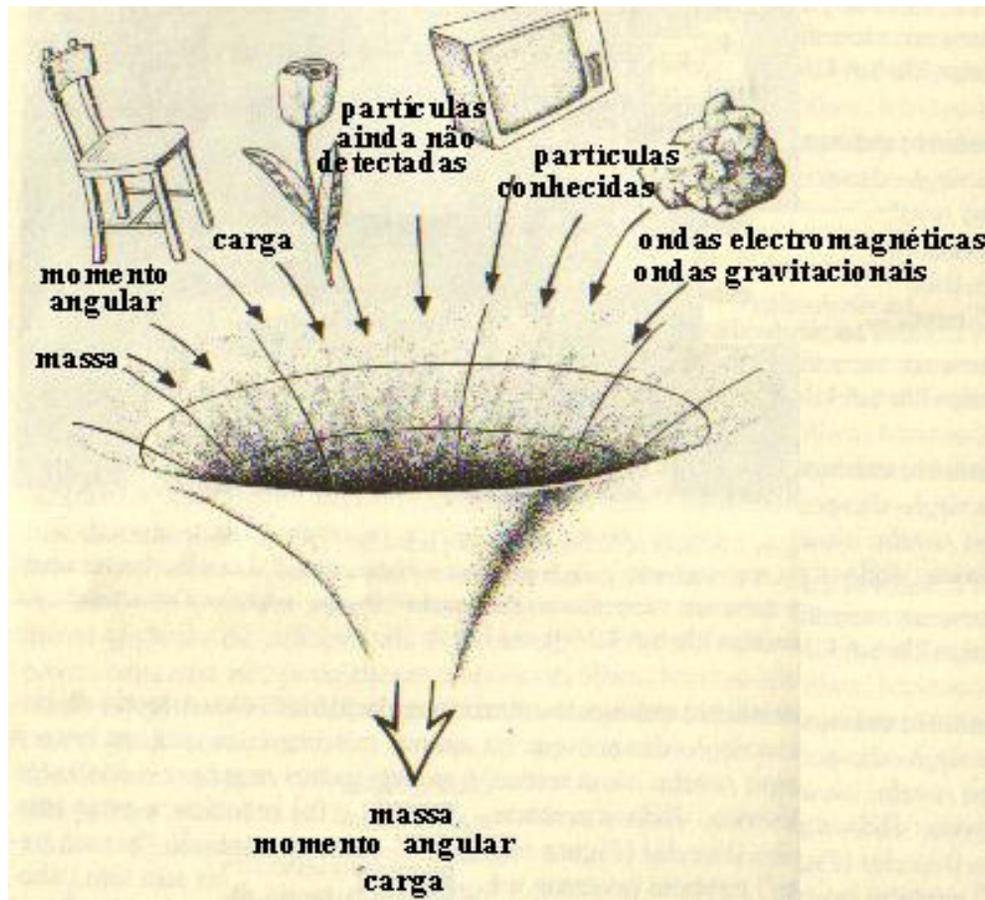


(S. Chandrasekhar, *The Mathematical Theory of Black Holes*, 1983, Clarendon Press)



Outros tipos de Buracos Negros

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 ϵ

Momento angular

$$L = m.v.r$$

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**:

m	Schwarzschild
m, ϵ	Reissner-Nordstrom
m, L	Kerr
m, ϵ, L	Kerr-Newmann

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



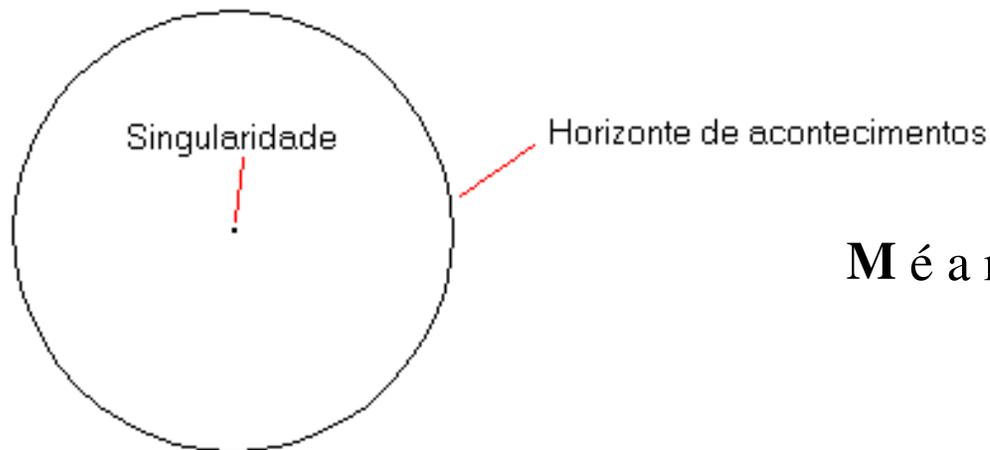
Se $m_1 = m_2$, $\epsilon_1 = \epsilon_2$ e $L_1 = L_2$ então os dois buracos negros são iguais

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

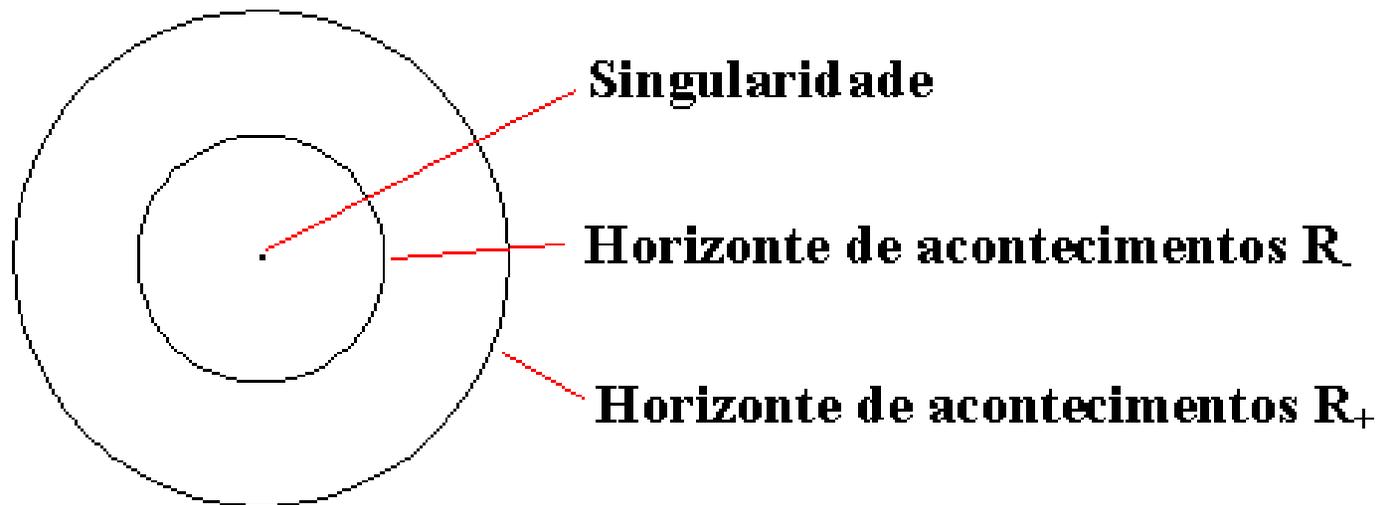
G é a constante de gravitação universal

c é a velocidade da luz

Buracos negros de Reissner-Nordstrom

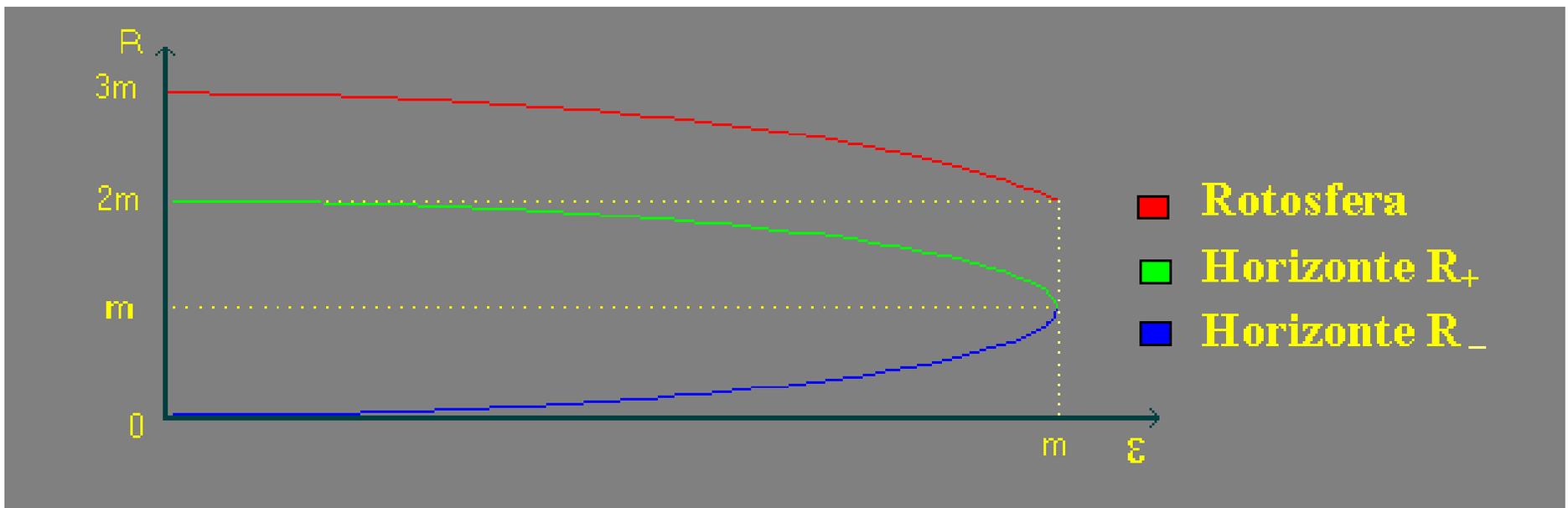
Os buracos negros de Reissner-Nordstrom distinguem-se dos de Schwarzschild por possuírem uma **carga eléctrica ϵ** . À volta destes buracos negros existe, além de um campo gravítico, um campo eléctrico.

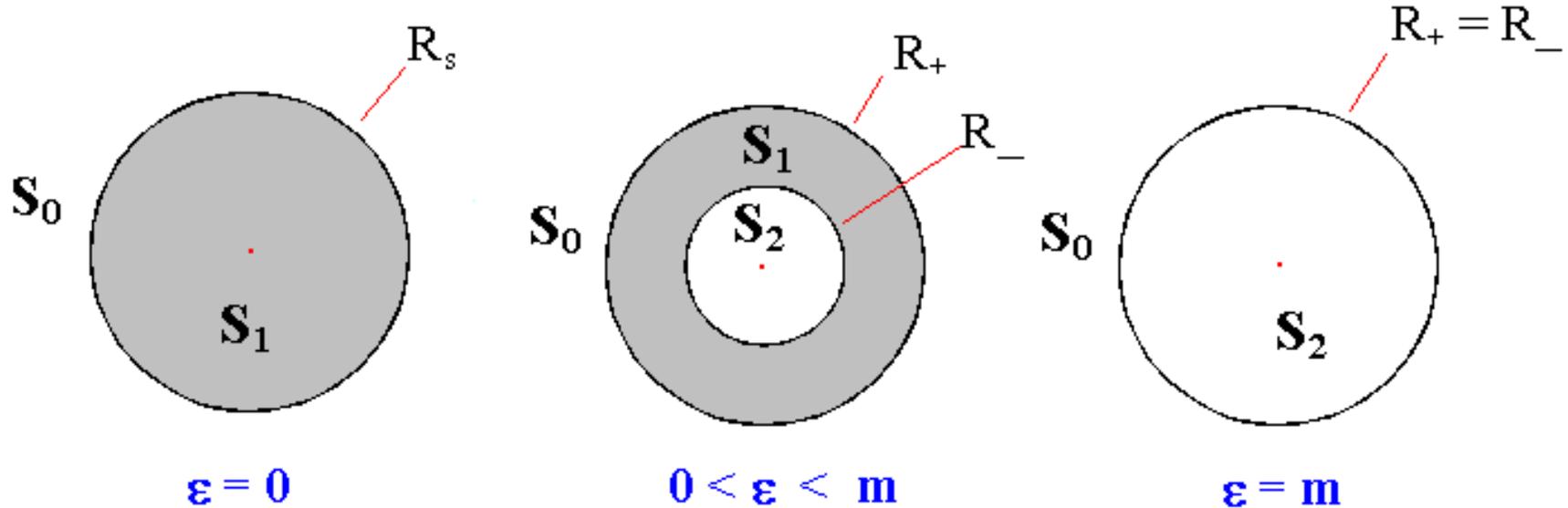
Os buracos negros de Reissner-Nordstrom são simetricamente esféricos e possuem, além de **uma singularidade** pontual, não um mas sim **dois horizontes de acontecimentos**.



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 ($\epsilon=m$).





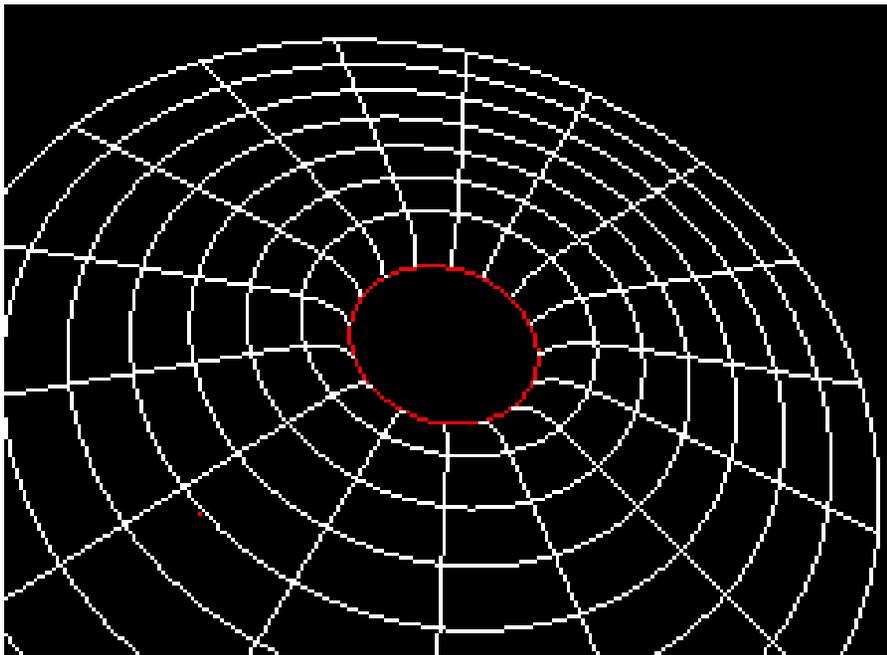
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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.

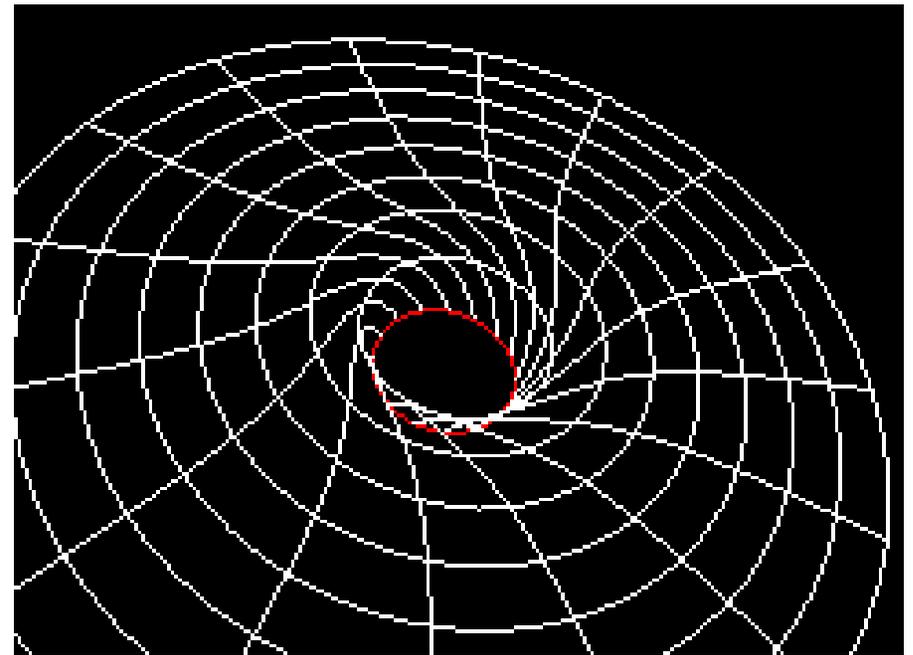
Num buraco negro de Reissner-Nordstrom é possível evitar a singularidade !!!!

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.



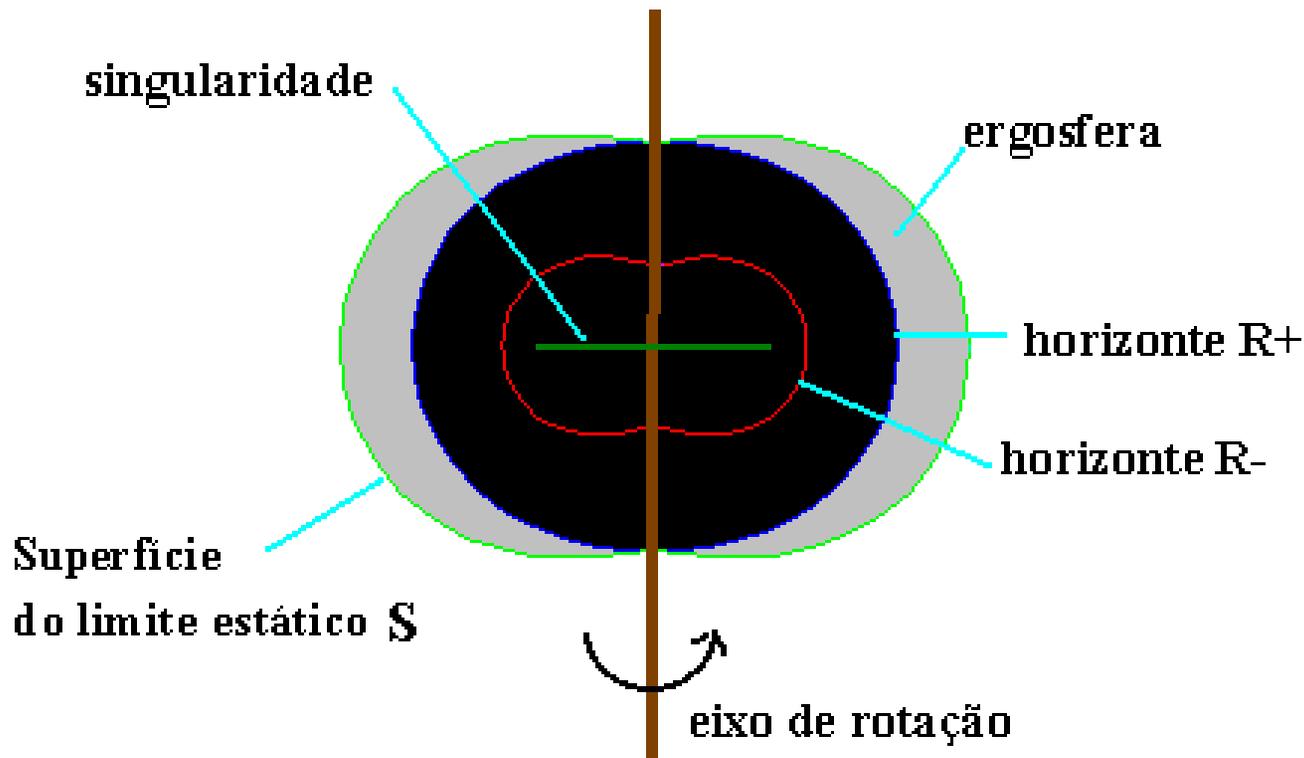
Sem rotação



Com rotação

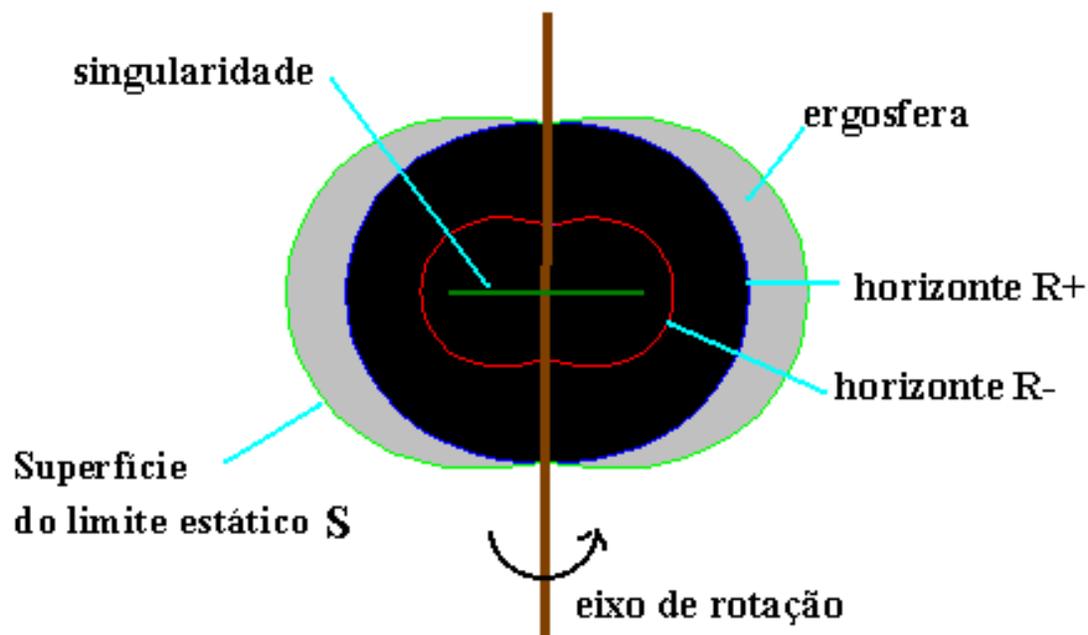
Os buracos de Kerr não são simetricamente esféricos. São achatados nos pólos devido à rotação. Mas têm **simetria axial** (em relação ao eixo de rotação).

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



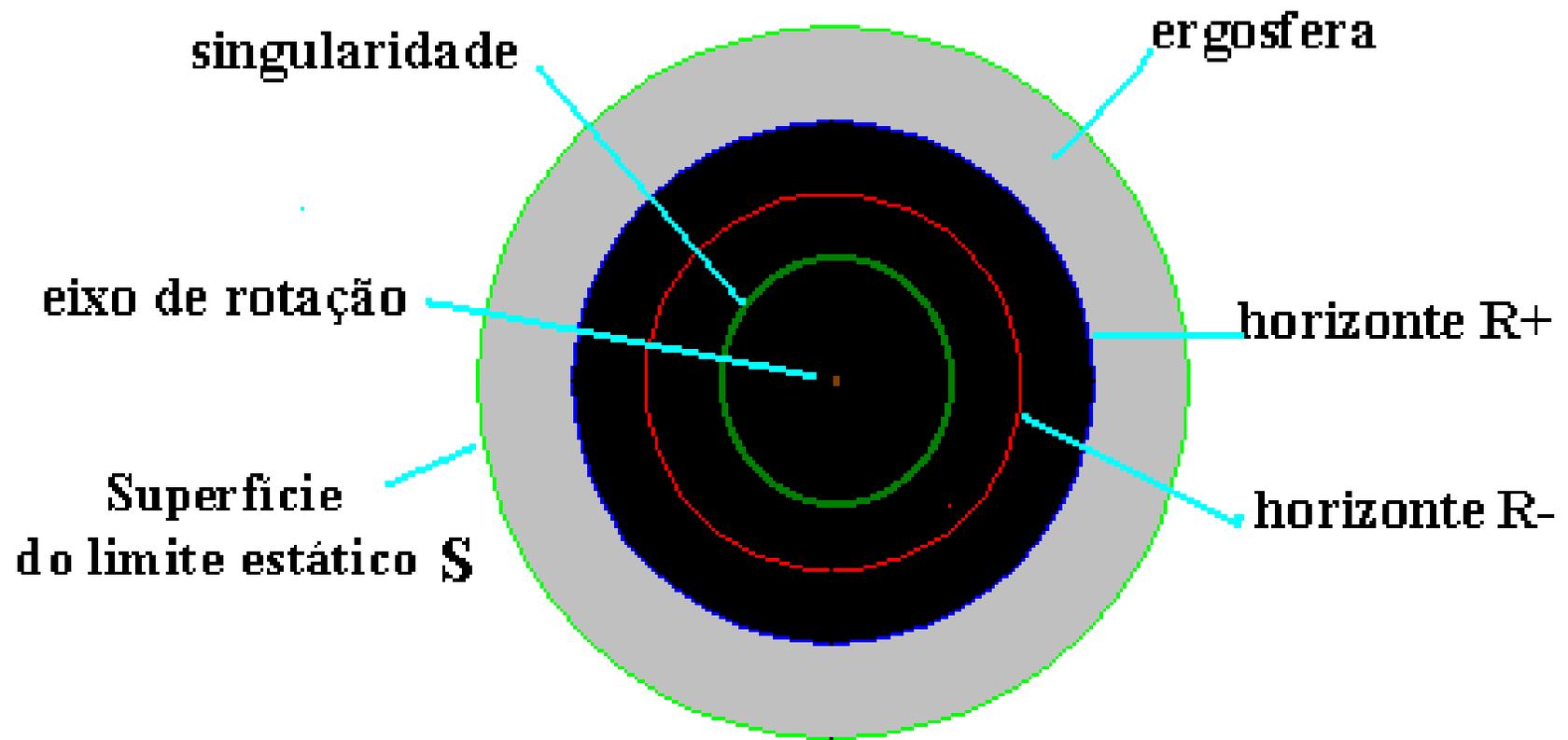
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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.



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

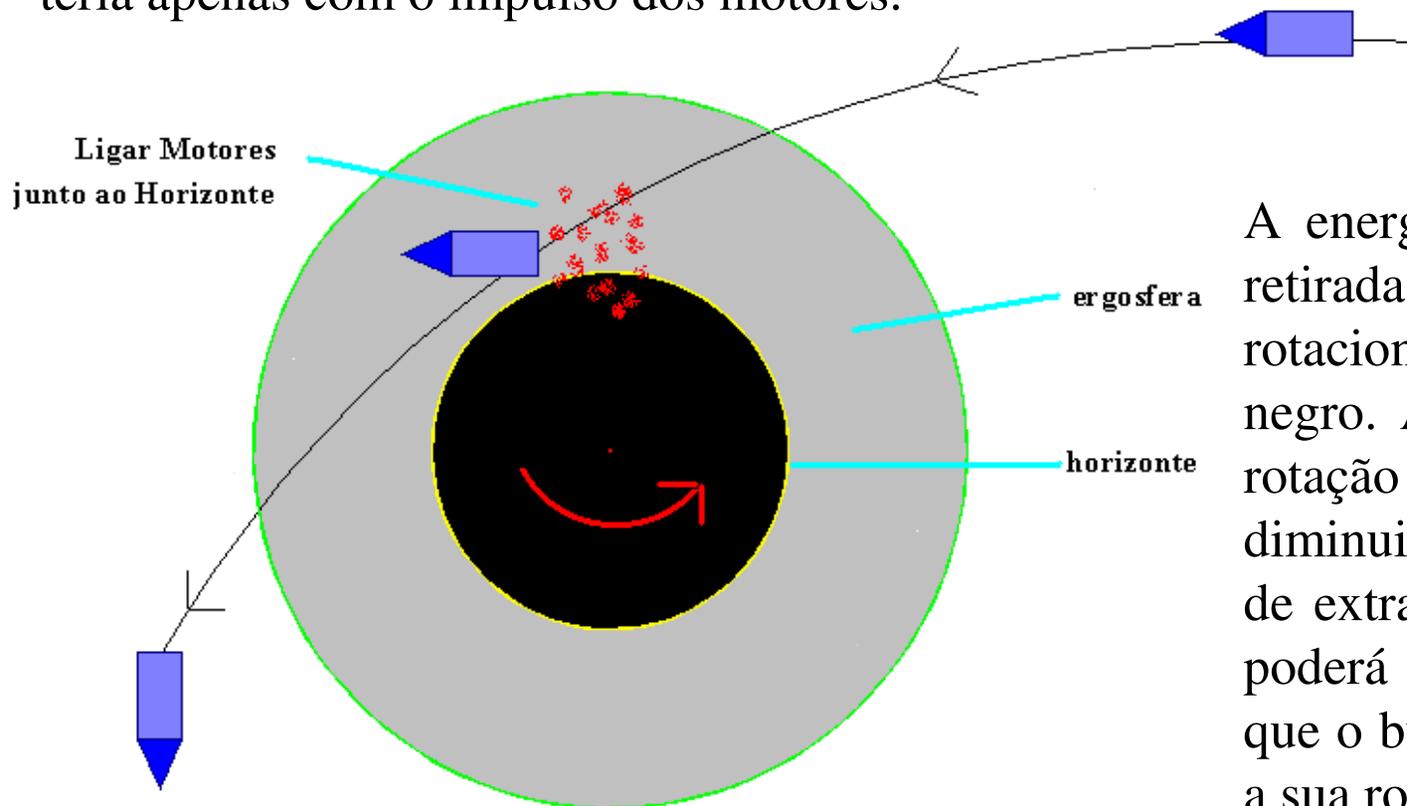
A superfície S que delimita a ergosfera chama-se **superfície do limite estático**. Sobre esta superfície ainda é possível ficar em repouso, mas nunca rodar no sentido contrário ao do buraco negro.



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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.



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.

$$\Delta v \times \Delta x = \frac{h}{2\pi}$$

$$h = 6.62620 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Constante de Planck

O vácuo não pode ser completamente vazio.

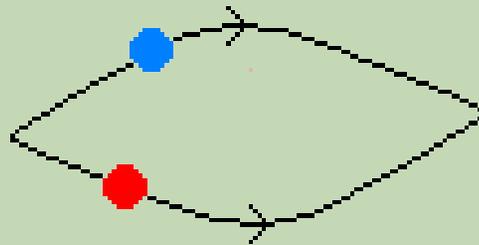
Não podemos fixar todos os campos em zero, numa dada região do espaço, pois isso iria contrariar o **Princípio da Incerteza de Heisenberg**.

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.

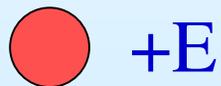
Estes pares não se podem detectar directamente: diz-se que são **virtuais**.



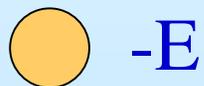
Par Partícula - Antipartícula

(c) 2001 Laurindo Sobrinho

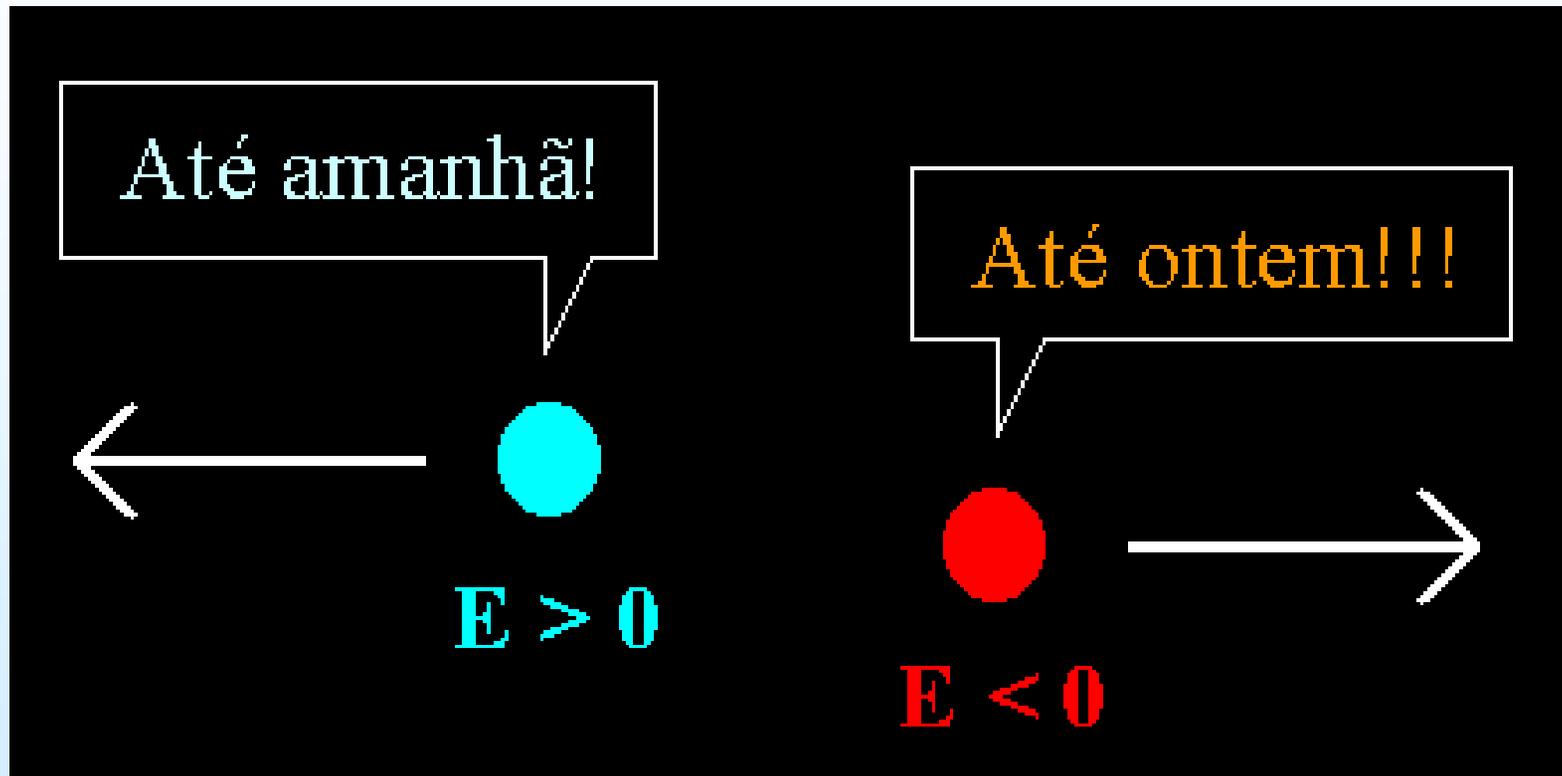
Como os pares aparecem do “nada” então a respectiva energia associada deve ser zero, ou seja, uma das partículas do par deve ter energia negativa.



$$(+E) + (-E) = 0$$



As partículas com energia negativa andam do presente para o passado!

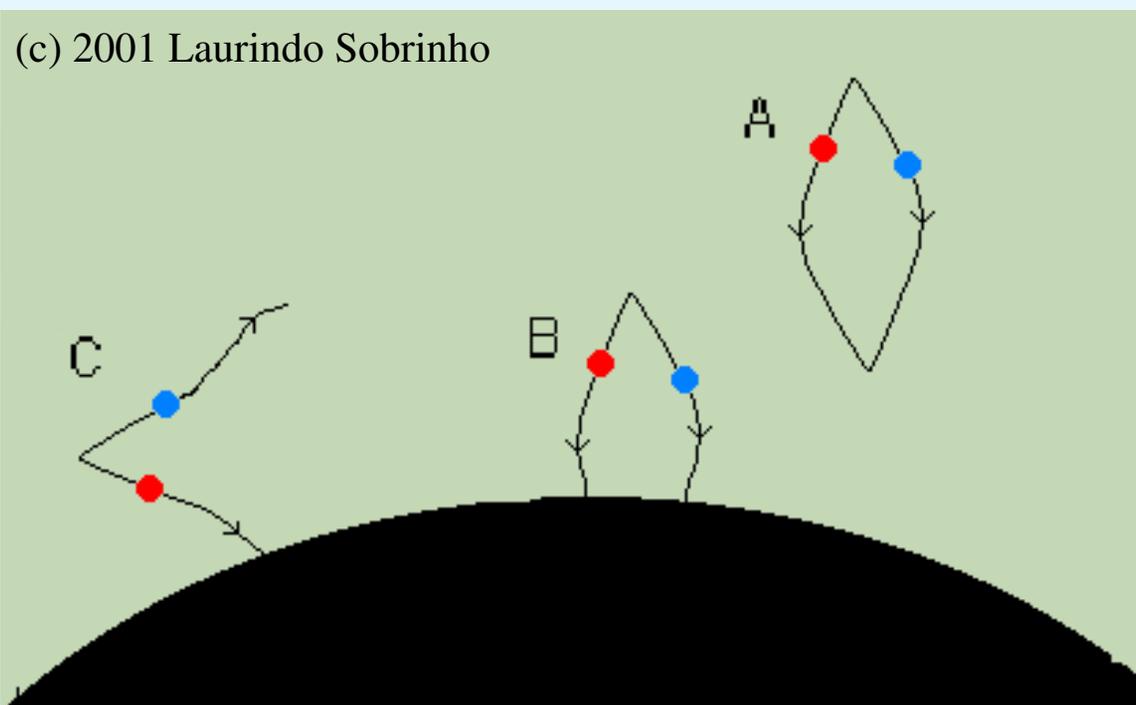


(c) 2002 Laurindo Sobrinho

Não podem assim existir (de forma duradoura)
no nosso Universo.

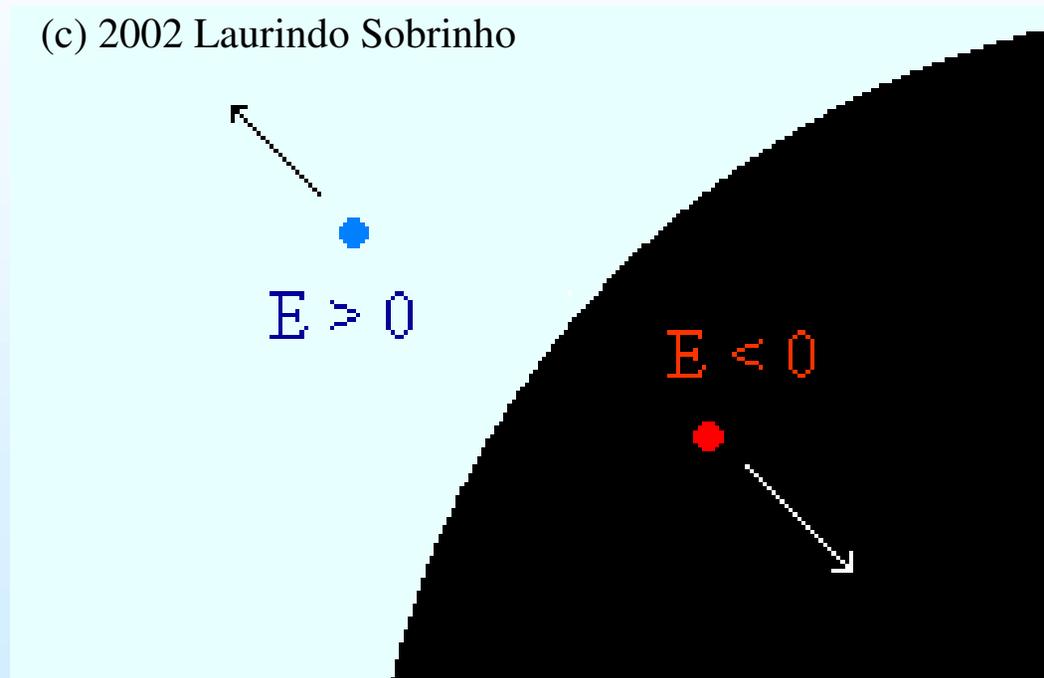
O que é que acontece se um destes pares aparecer junto de um buraco negro ?

- 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.
O fóton que ficou do lado de fora pode escapar para longe.
É um fóton real com energia positiva.

(c) 2002 Laurindo Sobrinho



O fóton de energia negativa, uma vez do lado de lá do horizonte de acontecimentos, pode deslocar-se **livremente** até a singularidade.

O conjunto dos fótons reais que escapam das imediações do horizonte de acontecimentos formam a componente electromagnética da **Radiação de Hawking**.

Além de fótons são emitidas também outras partículas.

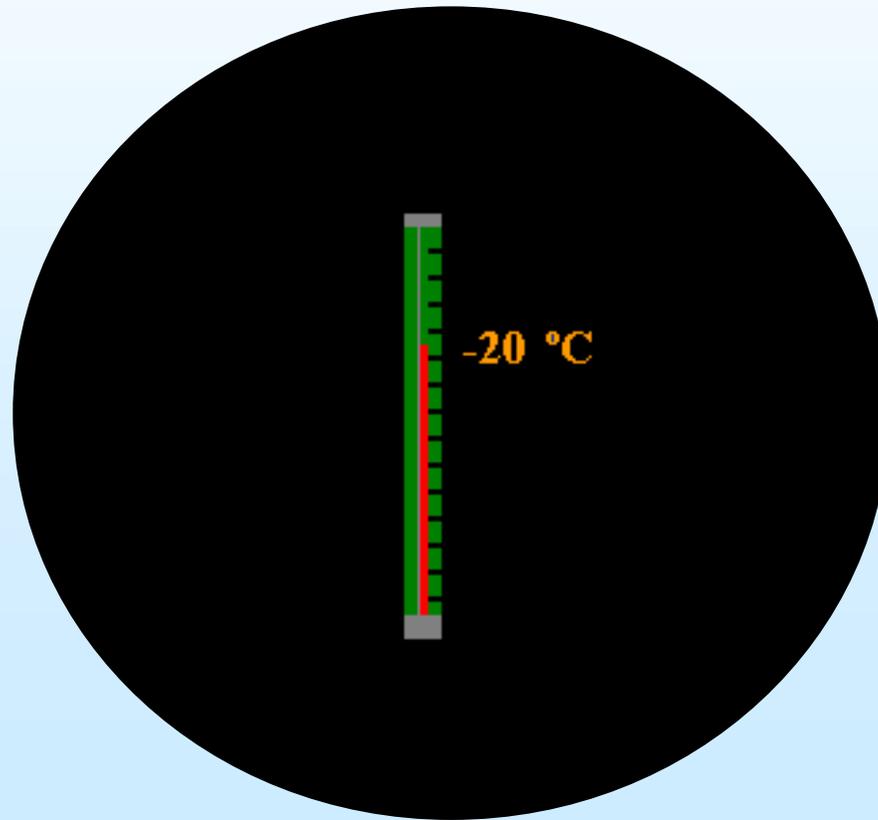
Neutrinos

Gravitões

Leptões

Mesões

Se um buraco negro emite radiação então existe uma **temperatura** associada ao mesmo.



(c) 2002 Laurindo Sobrinho

Essa temperatura é dada por:

$$T = 6 \times 10^{-8} \frac{M_{\odot}}{M_{\text{bn}}}$$

Note-se que

quanto maior a massa do buraco negro menor a sua temperatura!!!

A um buraco negro de uma massa solar corresponde a temperatura:

$$T = 0.00000006 \text{ graus Kelvin}$$

ou seja

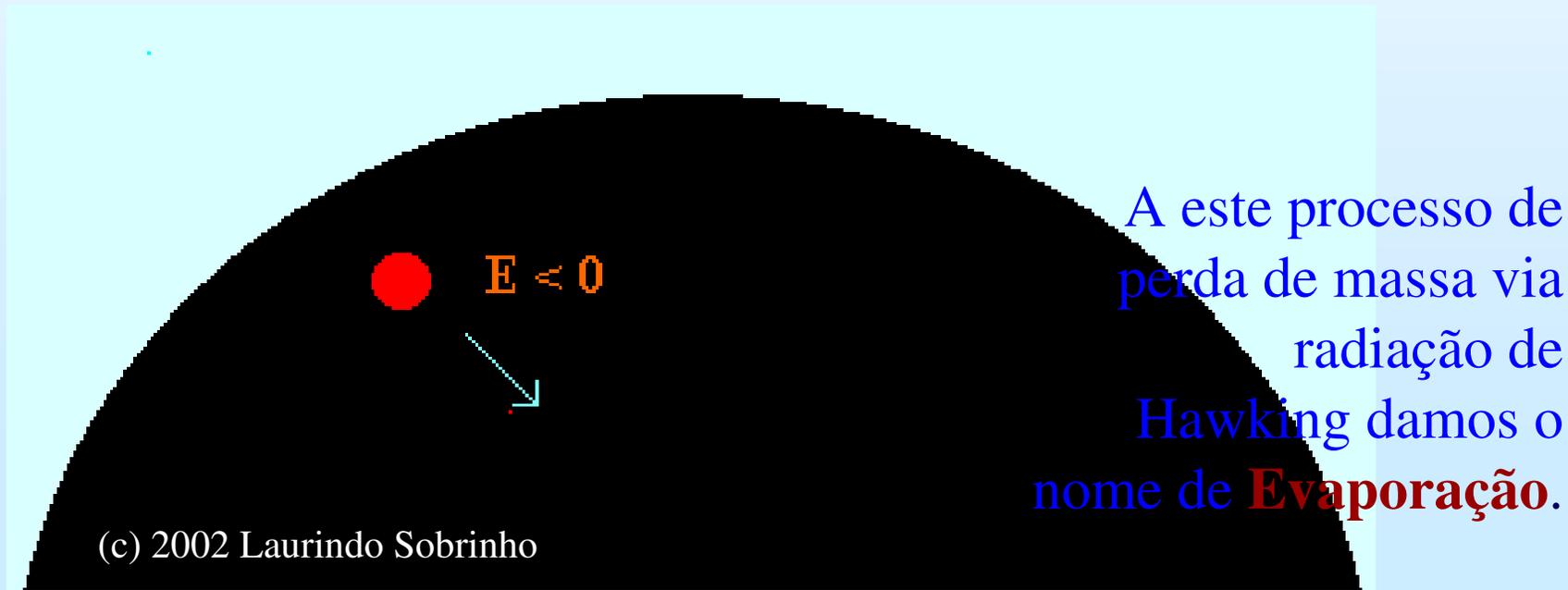
$$T = -273.14999994 \text{ graus Celsius!}$$

O fóton que atravessou o horizonte tem **energia negativa** o que equivale a dizer que a massa associada é também negativa:

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

Conclusão :

A massa do buraco negro irá diminuir.



Não existem buracos negros isolados !

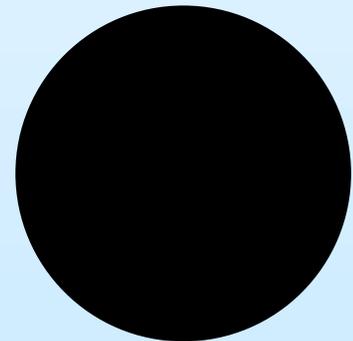
Qualquer buraco negro é no mínimo banhado pela **radiação de fundo** que enche o Universo. No caso de buracos negros de massa estelar o ganho de energia devido à radiação de fundo é muito superior à perda de energia via radiação de Hawking.

A evaporação só ganha relevo para buracos negros de massas muito pequenas.

Será que esses buracos negros minúsculos existem ?

Quais as suas dimensões ?

Em que condições se formaram ?



Buracos negros de massa subestelar

Não se conhece no Universo actual qualquer processo capaz de formar um buraco negro com uma massa inferior à do Sol.

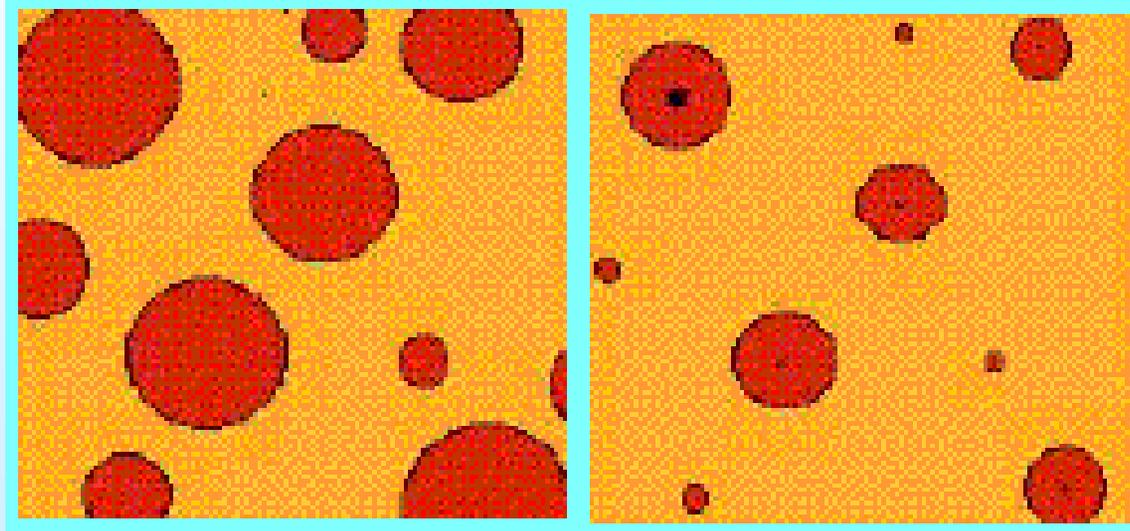
É no entanto possível que nos instantes após o **Big Bang** se tenham formado alguns buracos negros de massa reduzida.

Nos instantes iniciais do Universo, logo após o **Big Bang**,
devem ter existido algumas **irregularidades**.

Se assim não fosse o Universo actual seria uniforme e não
existiriam **galáxias, estrelas, planetas, seres vivos,**



Essas irregularidades manifestavam-se sob a forma de variações de densidade de matéria/energia. Nalgumas regiões a densidade pode ter atingido valores suficientemente elevados para que tenham originado buracos negros por **implosão**.



Estas condições só se podem ter verificado logo após o **Big Bang** e por isso esses buracos negros dizem-se **primordiais**.

Como é que evoluíram estes buracos negros ?

Qualquer buraco negro (primordial ou não) está sujeito aos processos de :

- **Evaporação** (decréscimo de massa).
- **Acreção de matéria** (aumento de massa)

Para os buracos **maiores** domina a **acrecção** de matéria e para os mais **pequenos** domina a **evaporação**.

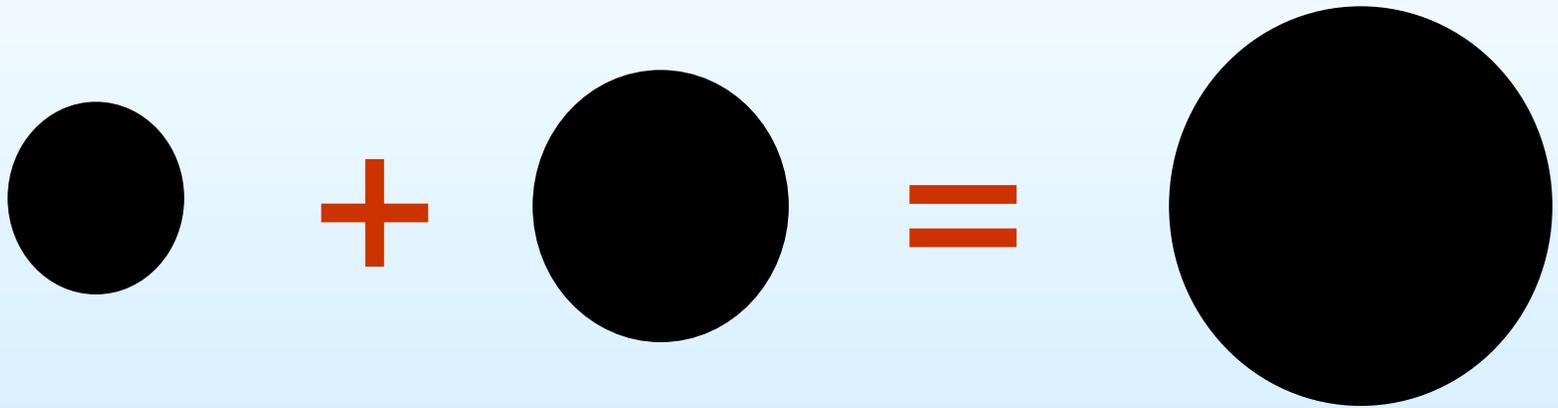
Admitindo que a idade do Universo ronda os 10^{10} anos (**10 000 000 000 anos**) então os buracos negros primordiais com massas inferiores a 10^{15} gramas (**1 000 000 000 000 000 gramas**) já evaporaram completamente.

Os buracos negros primordiais com massas iniciais superiores podem estar actualmente em fases mais ou menos avançadas da respectiva evaporação. Aqueles cujas massas iniciais não excediam muito as 10^{15} gramas estão actualmente a atingir as etapas finais da evaporação.

Estes buracos negros podem ser parte integrante da **matéria escura** que sabemos existir mas que nunca foi detectada directamente.

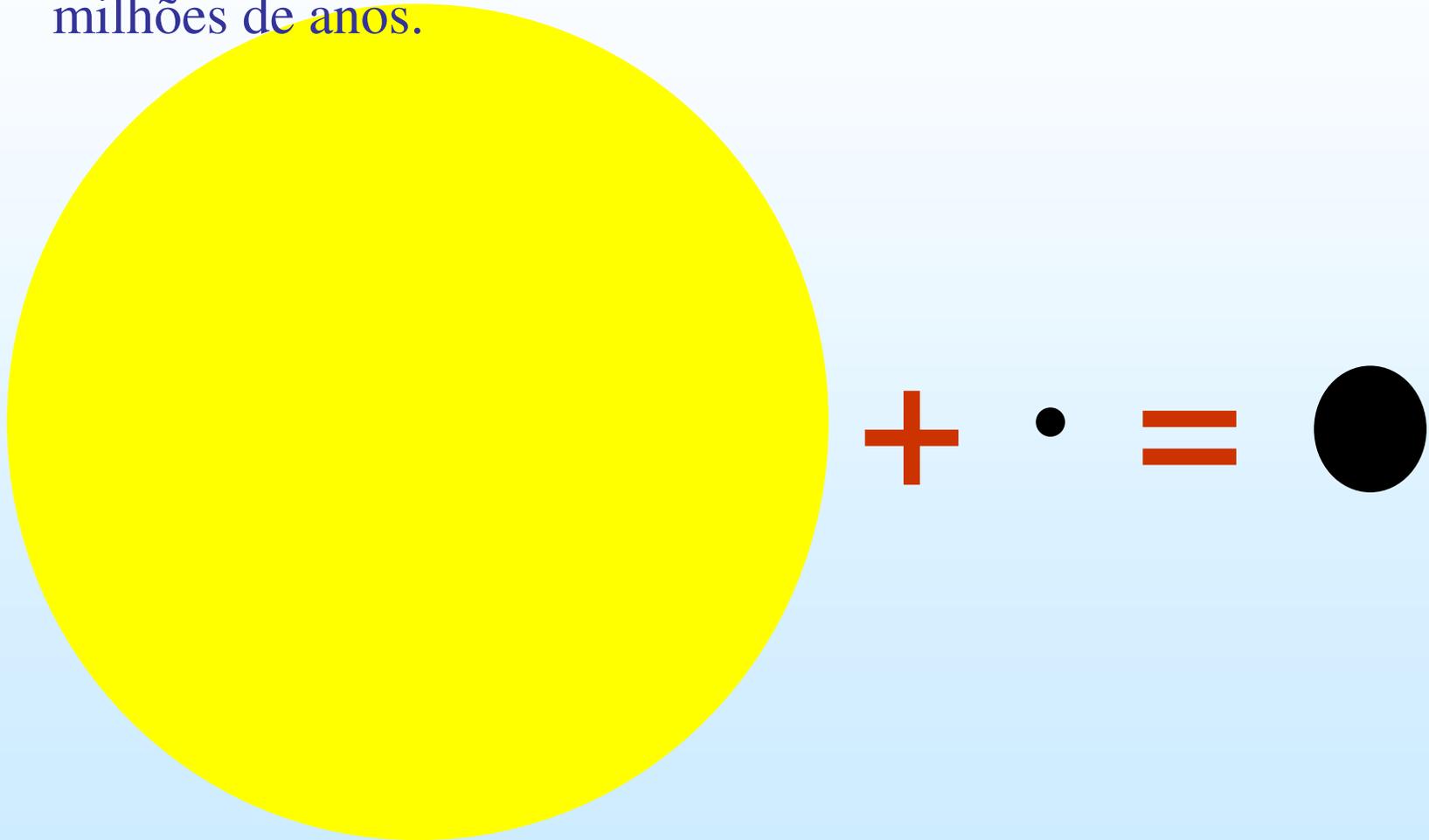
Existem ainda outras possibilidades:

Dois buracos negros **podem juntar-se** formando um novo buraco negro. A massa do buraco negro resultante nunca será inferior à soma das massas dos dois buracos negros iniciais.



Um buraco negro **não pode nunca bifurcar-se** em dois ou mais buracos negros.

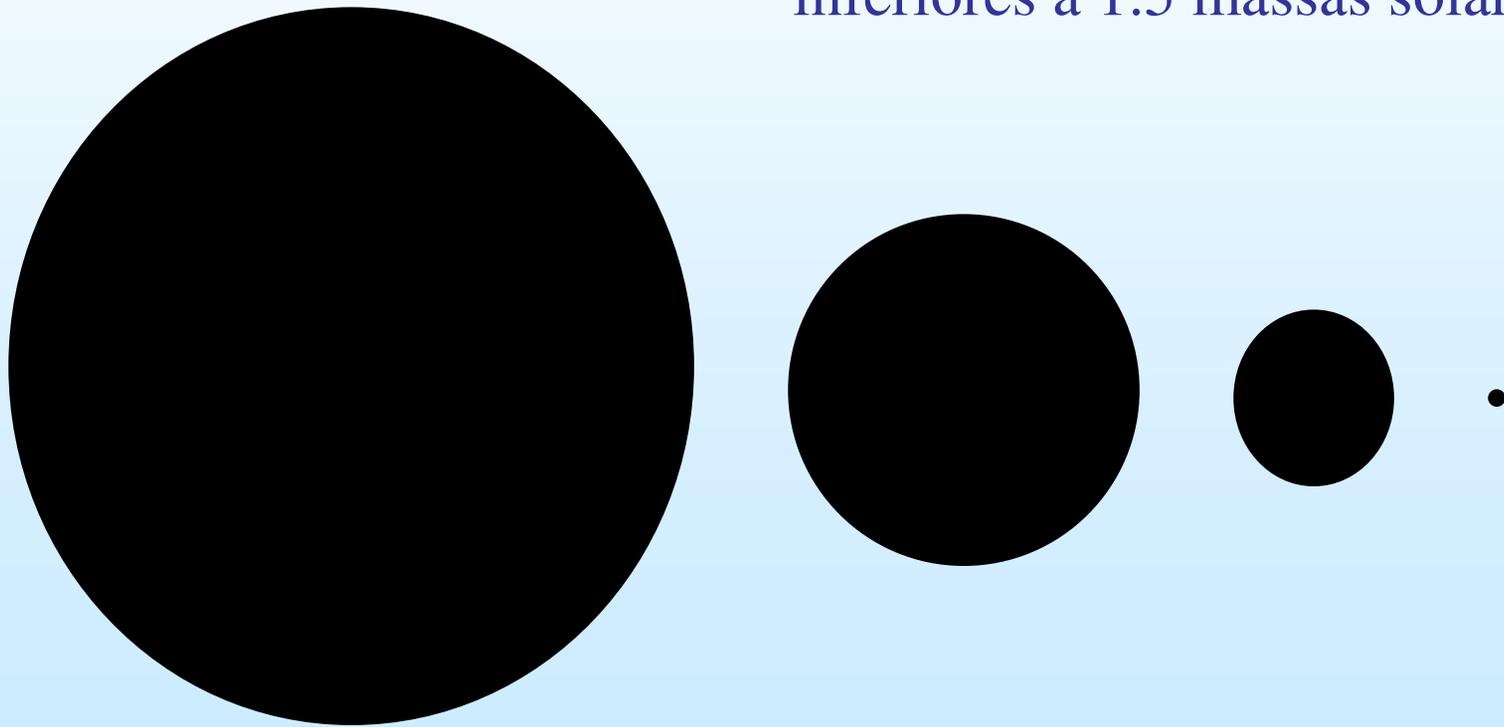
Se um buraco negro primordial se alojar no centro de uma estrela acaba por engolir toda a matéria da mesma em alguns milhões de anos.



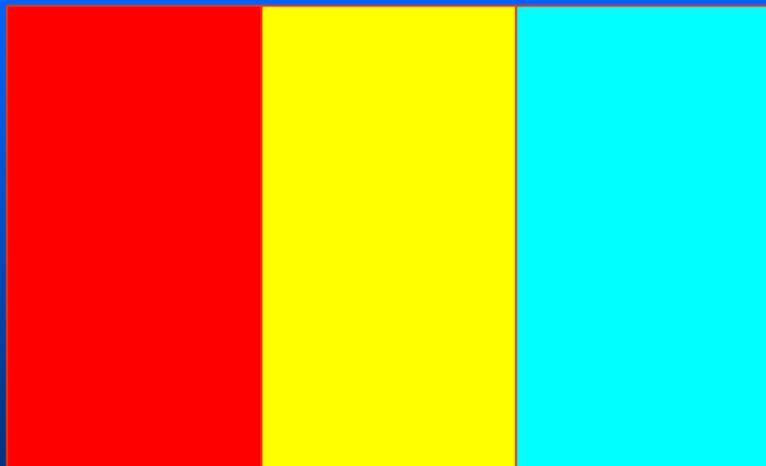
Se a teoria dos buracos negros primordiais estiver correcta então
é de prever a existência de:

buracos negros das mais variadas massas.

Caso contrário os buracos negros não poderão ter massas
inferiores a 1.5 massas solares.



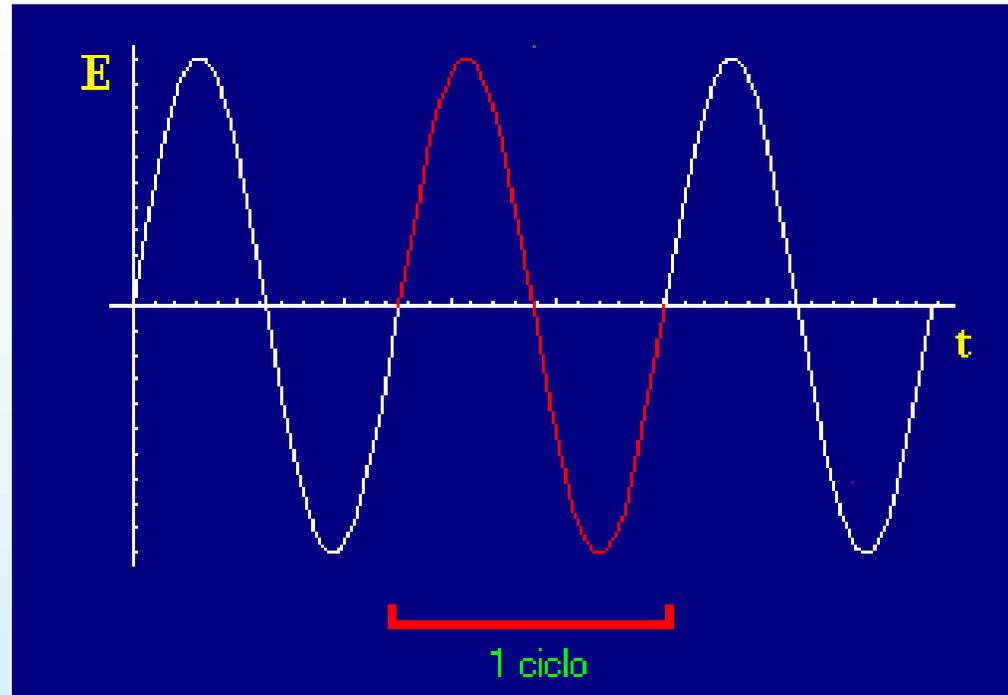
Buracos Negros e o Espectro Electromagnético



Se os buracos negros emitem radiação electromagnética então deve ser possível estabelecer uma relação entre espectro electromagnético e buracos negros.

Ondas electromagnéticas

Uma onda electromagnética consiste na propagação de uma oscilação dos campos eléctrico e magnético.



(c) 2002 Laurindo Sobrinho

A **frequência** da onda corresponde ao número de ciclos executados em cada unidade de tempo (mede-se em Hertz).

O **comprimento de onda λ** é a distância a que a onda se propaga ao fim de um ciclo (mede-se em metro).

Espectro Electromagnético



Mais energético

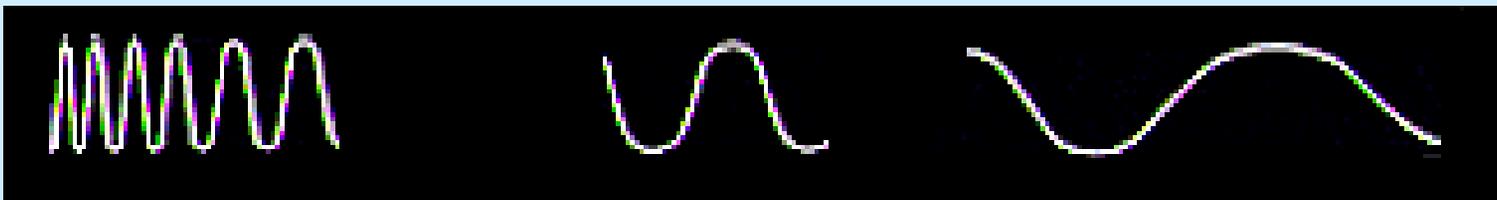
Frequências mais altas

λ mais baixos

Menos energético

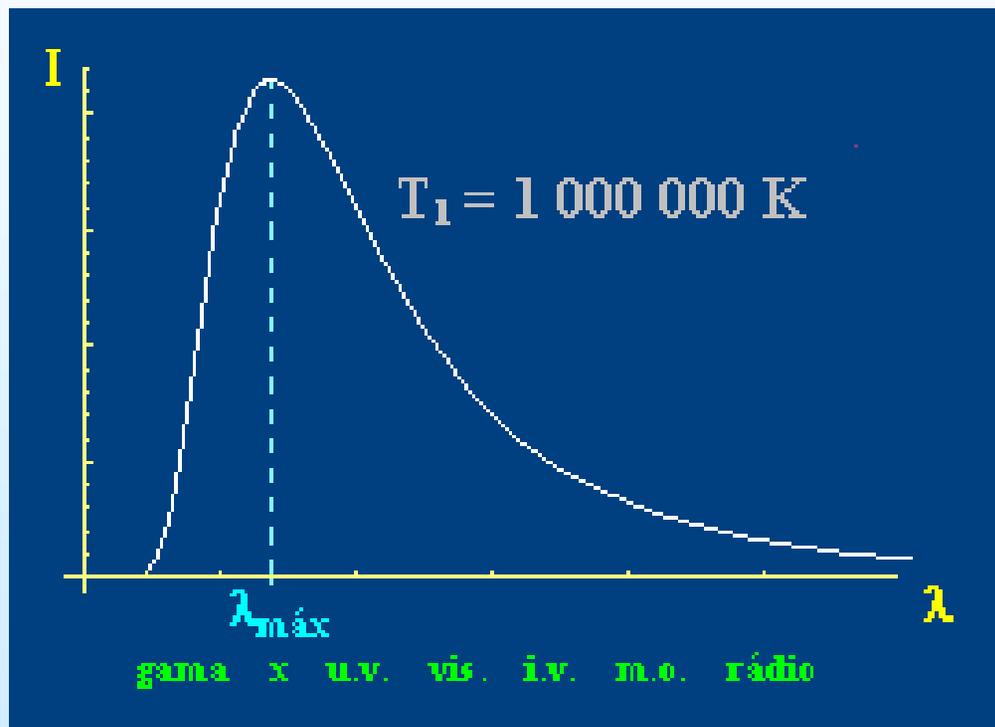
Frequências mais baixas

λ mais altos



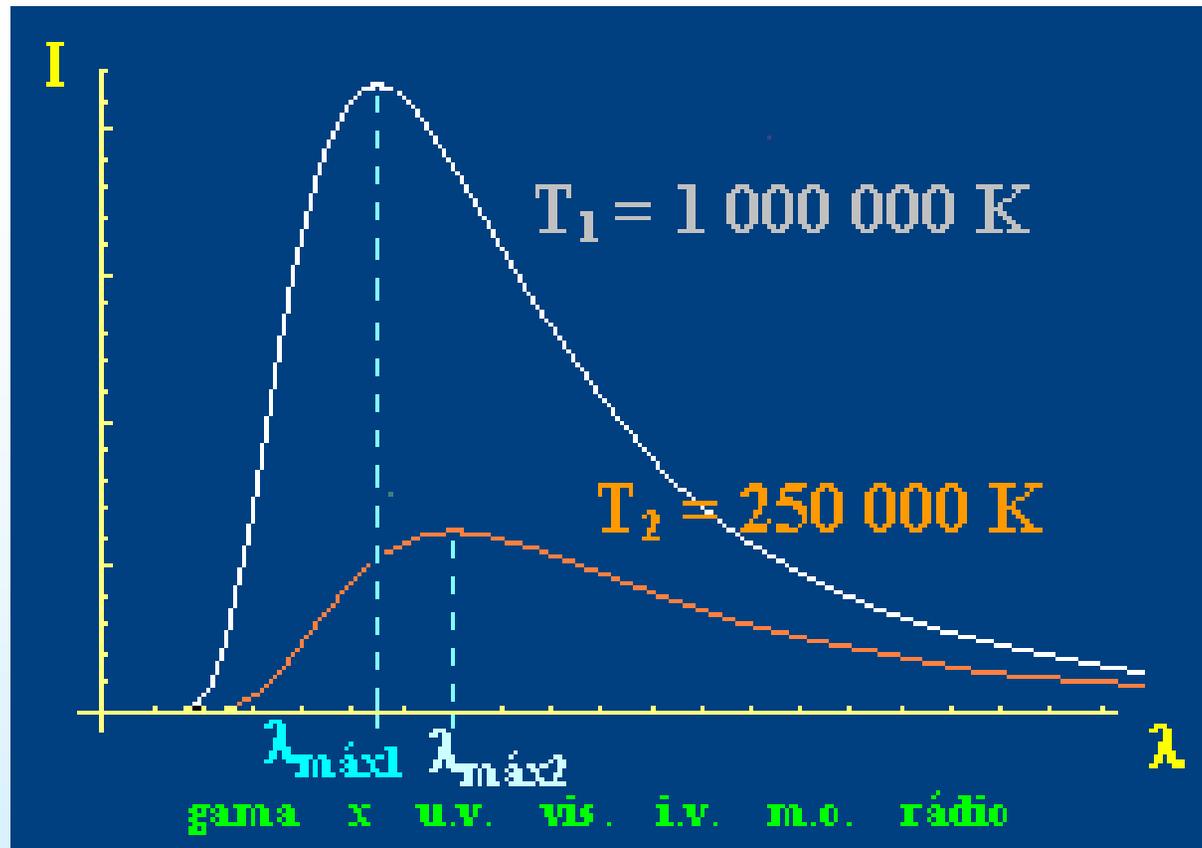
Espectro de emissão de um buraco negro

Um buraco negro emite, via radiação de Hawking, fótons de **todos** os comprimentos de onda.



(c) 2002 Laurindo Sobrinho

Existe um comprimento de onda para o qual a radiação é mais intensa



(c) 2002 Laurindo Sobrinho

Para um buraco negro com uma temperatura mais baixa o valor da intensidade máxima é também mais baixo. Além disso o pico de intensidade ocorre para um comprimento de onda mais alto (fotões menos energéticos)

É possível estabelecer a relação:

comprimento de onda máximo  **buraco negro**

Falaremos então em Buracos Negros:

- **Rádio**
- **Microondas**
- **Infravermelhos**
- **Visíveis**
- **Ultravioletas**
- **Raios X**
- **Raios gama**

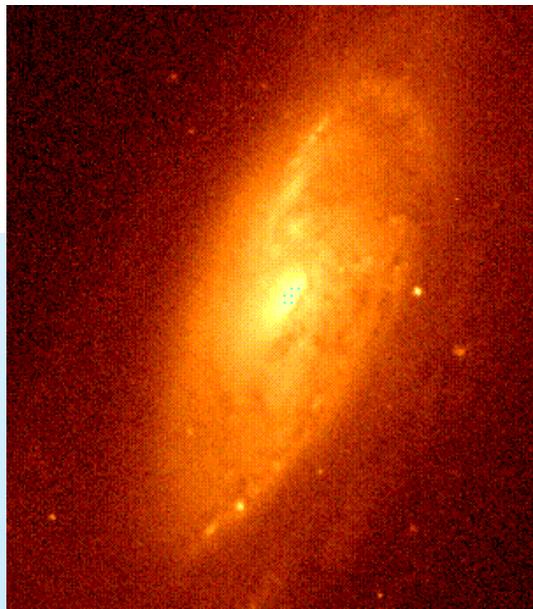
Buracos Negros Supermassivos

$$M = 1000000 M_{\odot}$$

$$R = 3\,053\,080 \text{ Km (} \approx 7 \text{ vezes a distância Terra-Lua)}$$

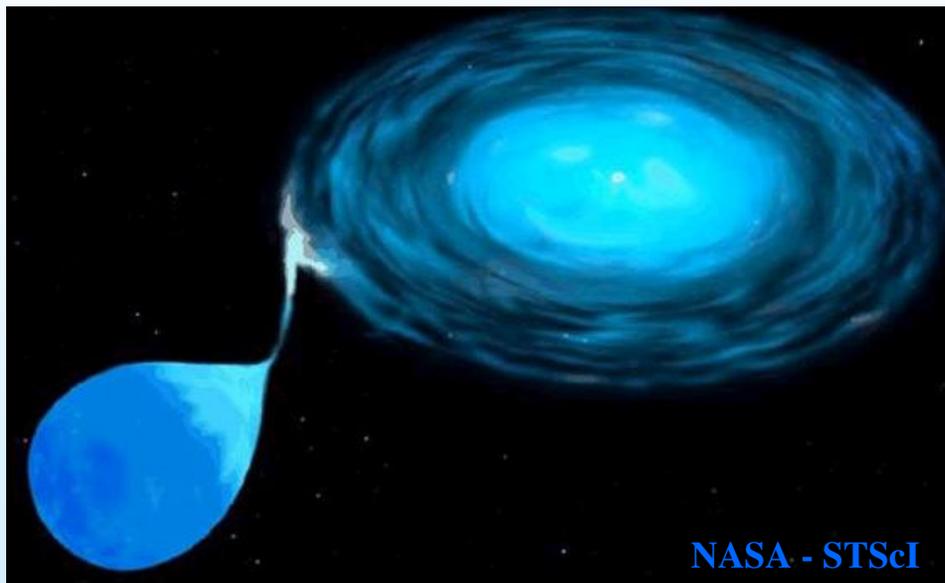
$$T = 0.000\,000\,000\,000\,06 \text{ Kelvin}$$

$$\lambda_{\text{máx}} = 48\,300\,000 \text{ Km}$$



Encontram-se provavelmente no centro de algumas Galáxias como NGC 4258 (figura ao lado). Existem também indícios de que na nossa Galáxia existe um buraco negro deste tipo.

Buracos Negros Estelares



$$M = 2 M_{\odot}$$

$$R = 6.1 \text{ Km}$$

$$T = 0.000\,000\,03 \text{ Kelvin}$$

$$\lambda_{\text{máx}} = 97 \text{ Km}$$

Na Nossa Galáxia podem existir vários buracos negros de massa estelar isolados ou em sistemas binários como o que se mostra na figura. Estes formam-se, como já foi referido anteriormente, a partir do colapso gravitacional de estrelas.



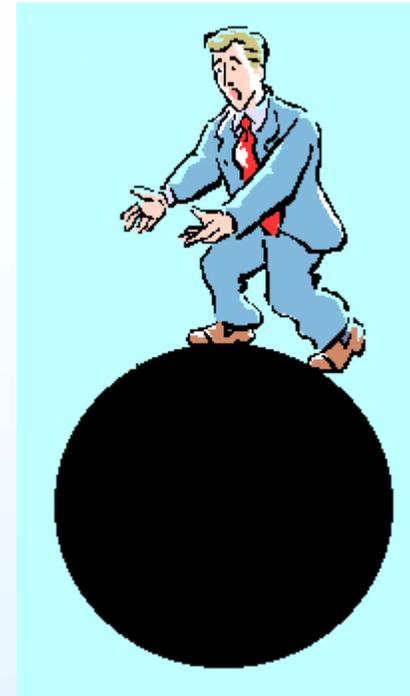
Buracos Negros Rádio de massa subestelar

$$M = 0.0002 M_{\odot}$$

$$R = 63 \text{ cm}$$

$$T = 0.0003 \text{ Kelvin}$$

$$\lambda_{\text{máx.}} = 10 \text{ m}$$



Um buraco negro de 0.0002 massas solares tem a sua emissão máxima para um comprimento de onda de 10 metros : Banda **VHF**. Um buraco negro deste tipo (suficientemente próximo) poderia ser detectado num televisor normal.

Buracos Negros Infravermelhos

$M = 8.51 \cdot 10^{19} \text{ Kg} = 85\,100\,000\,000\,000\,000\,000 \text{ Kg} = 0.001 \text{ massas lunares}$

$R = 126 \text{ nanómetros} = 0.000\,001\,26 \text{ metros}$

$T = 1450 \text{ Kelvin}$

$\lambda_{\text{máx}} = 1 \text{ micrómetro} = 0.000001 \text{ metros}$



Na figura a comparação entre um buraco negro desta dimensão e o vírus do Ébola.

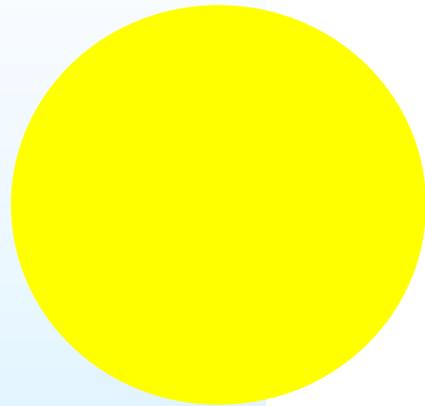
Buracos Negros Visíveis

$$M = 2.6 \cdot 10^{19} \text{ Kg} = 26\,000\,000\,000\,000\,000\,000 \text{ Kg}$$

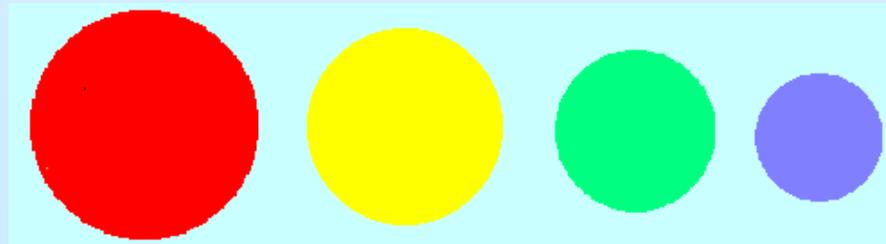
$$R = 38 \text{ nanómetros} = 0.000\,000\,38 \text{ metros}$$

$$T = 4830 \text{ Kelvin}$$

$$\lambda_{\text{máx}} = 0.6 \text{ micrómetro} = 0.0000006 \text{ metros}$$



Os buracos negros visíveis são muito mais pequenos do que a maioria dos vírus e células mas ainda são muito maiores do que os átomos.



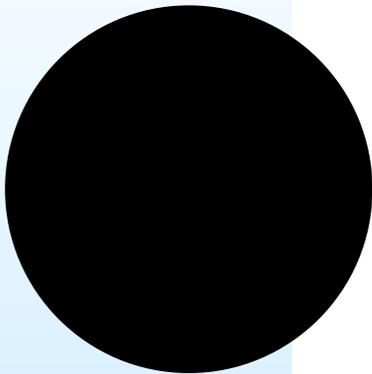
Buracos Negros ultravioleta

$$M = 2 \cdot 10^{18} \text{ Kg} = 2\,000\,000\,000\,000\,000\,000 \text{ Kg}$$

$$R = 3.2 \text{ nanómetros} = 0.000\,000\,032 \text{ metros}$$

$$T = 58\,000 \text{ Kelvin}$$

$$\lambda_{\text{máx}} = 50 \text{ nanómetros} = 0.000\,000\,05 \text{ metros}$$



Os buracos negros ultravioleta têm tamanhos algumas dezenas de vezes superiores aos dos átomos.

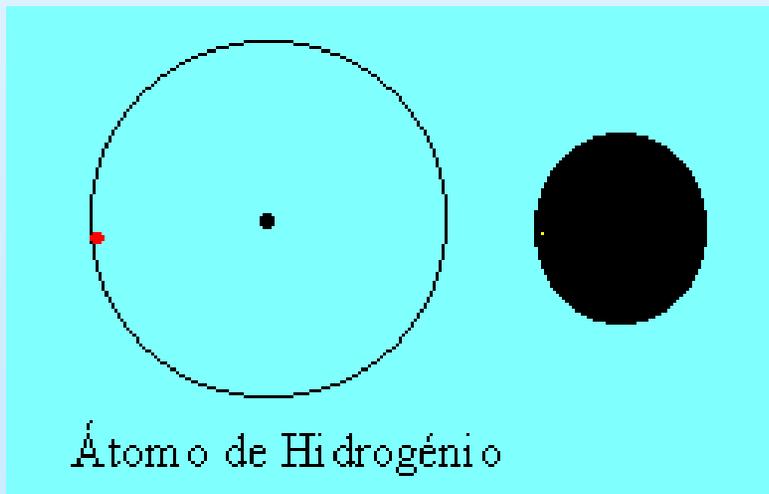
Buracos Negros de Raios X

$$M = 1 \cdot 10^{16} \text{ Kg} = 10\,000\,000\,000\,000\,000 \text{ Kg}$$

$$R = 16 \text{ picómetros} = 0.000\,000\,000\,016 \text{ metros}$$

$$T = 11.5 \text{ milhões de Kelvin}$$

$$\lambda_{\text{máx}} = 250 \text{ picómetros} = 0.000\,000\,000\,250 \text{ metros}$$



Os buracos negros de raios X embora mais pequenos do que os átomos são ainda muito maiores do que os núcleos atômicos.

Buracos Negros de Raios gama

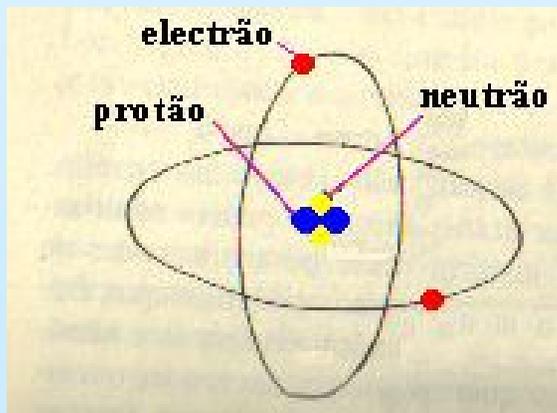
$$M = 4.3 \cdot 10^{13} \text{ Kg} = 43\,000\,000\,000\,000 \text{ Kg}$$

$$R = 6 \text{ Fermi} = 0.000\,000\,000\,000\,006 \text{ metros}$$



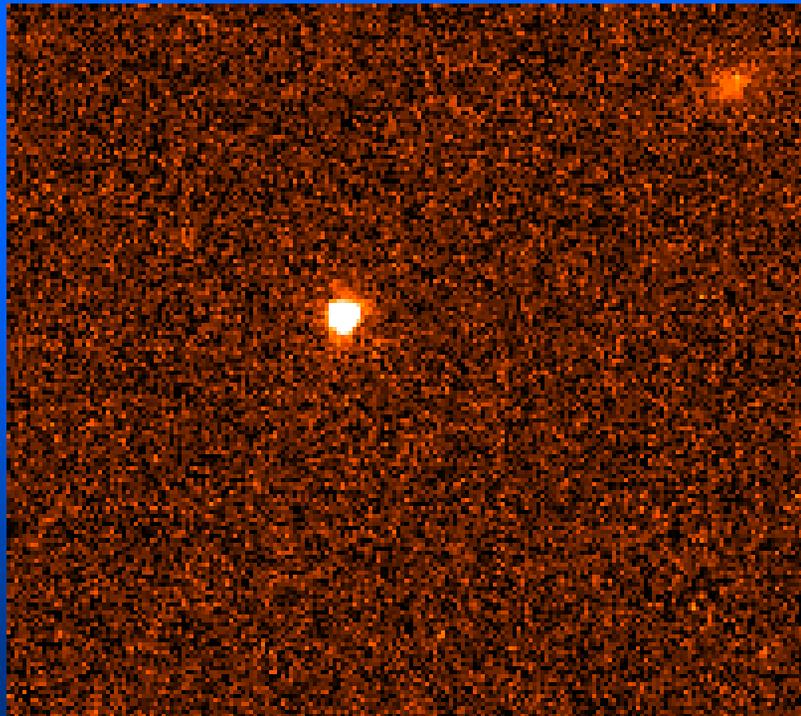
$$T = 2900 \text{ milhões de Kelvin}$$

$$\lambda_{\text{máx}} = 1 \text{ picómetros} = 0.000\,000\,000\,001 \text{ metros}$$



A dimensão deste buraco negro é comparável à de um núcleo atómico

Explosão de Buracos Negros



À medida que um buraco negro evapora emite energia cada vez mais intensa. No fim tudo acaba numa forte **explosão.....**

Na Radiação de Hawking são emitidas principalmente :
neutrinos, fótons e gravitões.

Além destas também podem ser emitidas outras
partículas tais como:

Partículas	Vida média
electrões	estável
muões (leptões mu)	$\ll 1$ milionésimo de segundo
tauões (leptões tau)	$\ll 1$ milionésimo de segundo
piões (mesões pi)	$\ll 1$ milionésimo de segundo

Partícula	Massa do Buraco Negro (kg)
fotão	qualquer
gravitão	qualquer
neutrino ν_e	$\leq 10^{19}$
neutrino ν_μ	$\leq 10^{14}$
electrão	$\leq 10^{14}$
neutrino ν_τ	$\leq 10^{12}$
leptão mu	$\leq 10^{11}$
mesão π	$\leq 10^{11}$
leptão tau	$\leq 10^{10}$

Quando a massa ronda os 10^{11} Kg são emitidos abundantemente **mesões Pi (piões)**. Na realidade são emitidos jactos de **Quarks** e **Gluões** a partir dos quais se formam mesões π^+ , π^0 e π^- bem como as respectivas antipartículas.

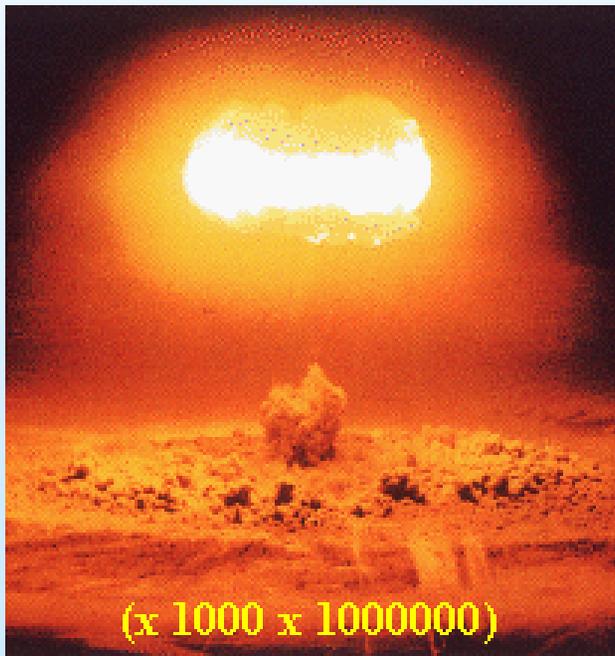
Os mesões Pi são todos bastante instáveis desintegrando-se imediatamente em outras partículas. Merece especial atenção a desintegração do mesão π^0 :



O mesão π^0 tem um tempo de vida média de apenas $2 \cdot 10^{-16}$ s.
(0.000 000 000 000 000 2 s)

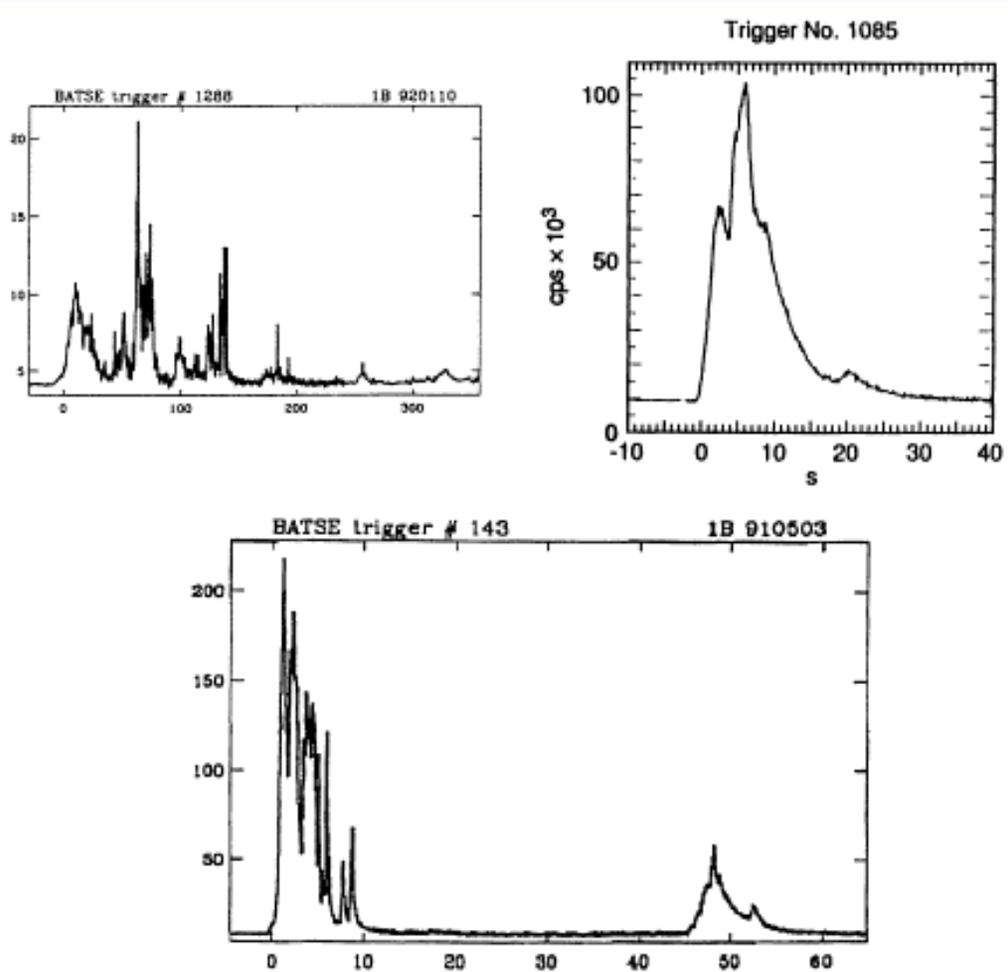
Após esse tempo desintegra-se em dois **fotões gama** altamente energéticos.

À medida que a evaporação avança são emitidos cada vez mais mesões π^0 aumentando assim o fluxo de fótons gama. Assiste-se assim a uma espécie de **explosão de raios gama** que pode ser observável a grandes distâncias (!?) apesar de nesta fase o buraco negro ser muito pequeno (muito mais pequeno do que o núcleo de um átomo).



Um buraco negro de **1 000 000 Kg** evapora em cerca de **1/10 segundos** libertando, essencialmente em raios gama, uma energia equivalente à detonação de **mil milhões de bombas de hidrogénio** de 1 Megatonelada!

Foram observadas nos últimos anos (a partir de satélites) inúmeras explosões de raios gama. Estas são habitualmente designadas por: **GRBs – Gamma Rays Bursts**



Alguns dos GRBs podem estar relacionados com a explosão de buracos negros (embora já se tenha provado que muitos deles têm outras origens)

O que é que fica depois do buraco negro evaporar completamente ?

Uma singularidade nua ?!

Nada (tudo é dissipado em energia) ?

A evaporação cessa ao ser atingida uma massa limite ?

.....

Qual a resposta correcta ?

(Ainda) **NÃO SE SABE !**

Para responder devidamente a esta questão há que saber como combinar **Mecânica Quântica e **gravidade**.**

CONVITE

Venha participar na **Semana da Astronomia**

evento anual realizado pelo Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira no mês de Julho. A semana inclui várias palestras, algumas sessões de observação astronómica e uma **ASTROFESTA**

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

Grupo de Astronomia
Departamento de Matemática e Engenharias
Universidade da Madeira
Campus Universitário da Penteada
9000-390 Funchal

email: astro@uma.pt

Página: <http://www.uma.pt/astro>

(c) 2004 Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira