

**Grupo de Astronomia
da
Universidade da Madeira**

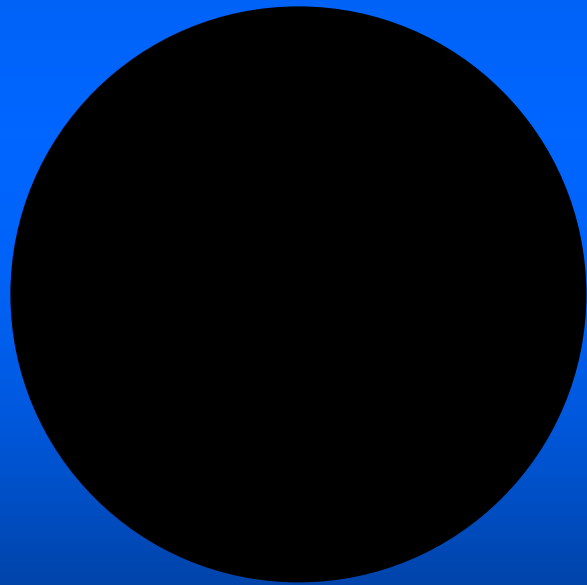
Buracos Negros

Laurindo Sobrinho

II Semana da Astronomia

19 de Julho de 2002

Buracos Negros



Os buracos negros são simultaneamente os objectos mais **simples** e mais **exóticos** que existem.



A velocidade de escape

É a velocidade que um corpo deve atingir para que possa escapar à atracção gravítica de um planeta (ou estrela, ...).

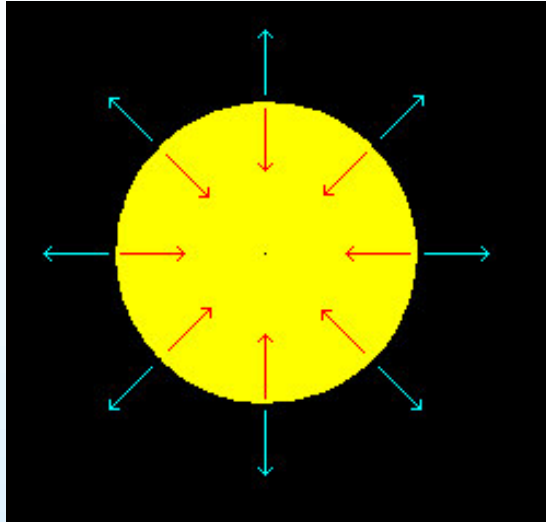
No caso da Terra a velocidade de escape é de **11.2 Km/s**. Se um corpo for lançado da superfície com velocidade inferior a 11.2km/s acaba regressando à superfície.

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

onde G é a constante de gravitação Universal

A Velocidade de escape depende da massa do planeta e do respectivo raio e **será tanto maior quanto maior for a massa e menor for o raio.**

Formação de buracos negros por colapso gravitacional

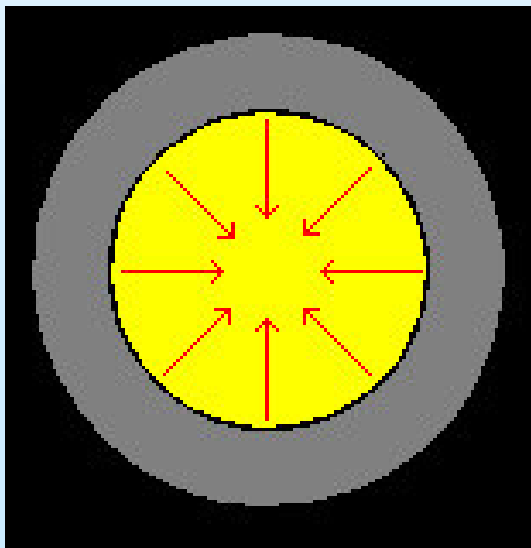


Numa estrela actuam dois tipos de forças:

a força gravítica (aponta para o centro)

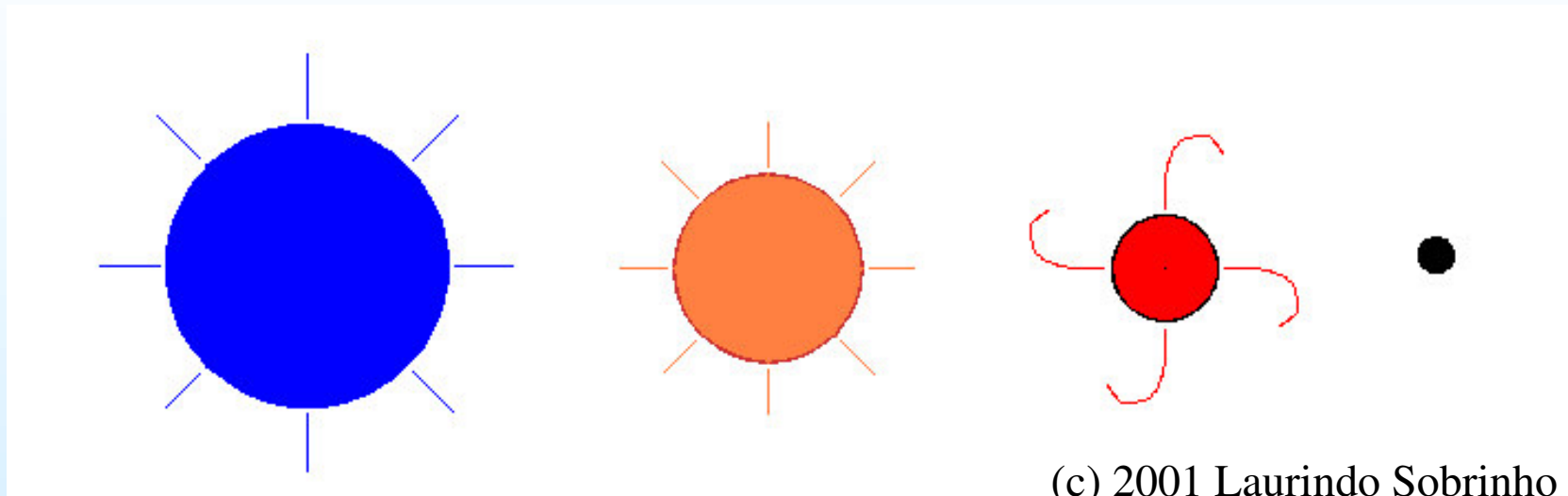
a pressão exercida pela energia libertada pelas reacções nucleares que ocorrem no seu interior (aponta para o exterior)

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.**

À medida que se dá o colapso o raio da estrela vai diminuindo mas a sua massa continua a ser praticamente a mesma. Isto significa que **a velocidade de escape da superfície da estrela aumenta.**

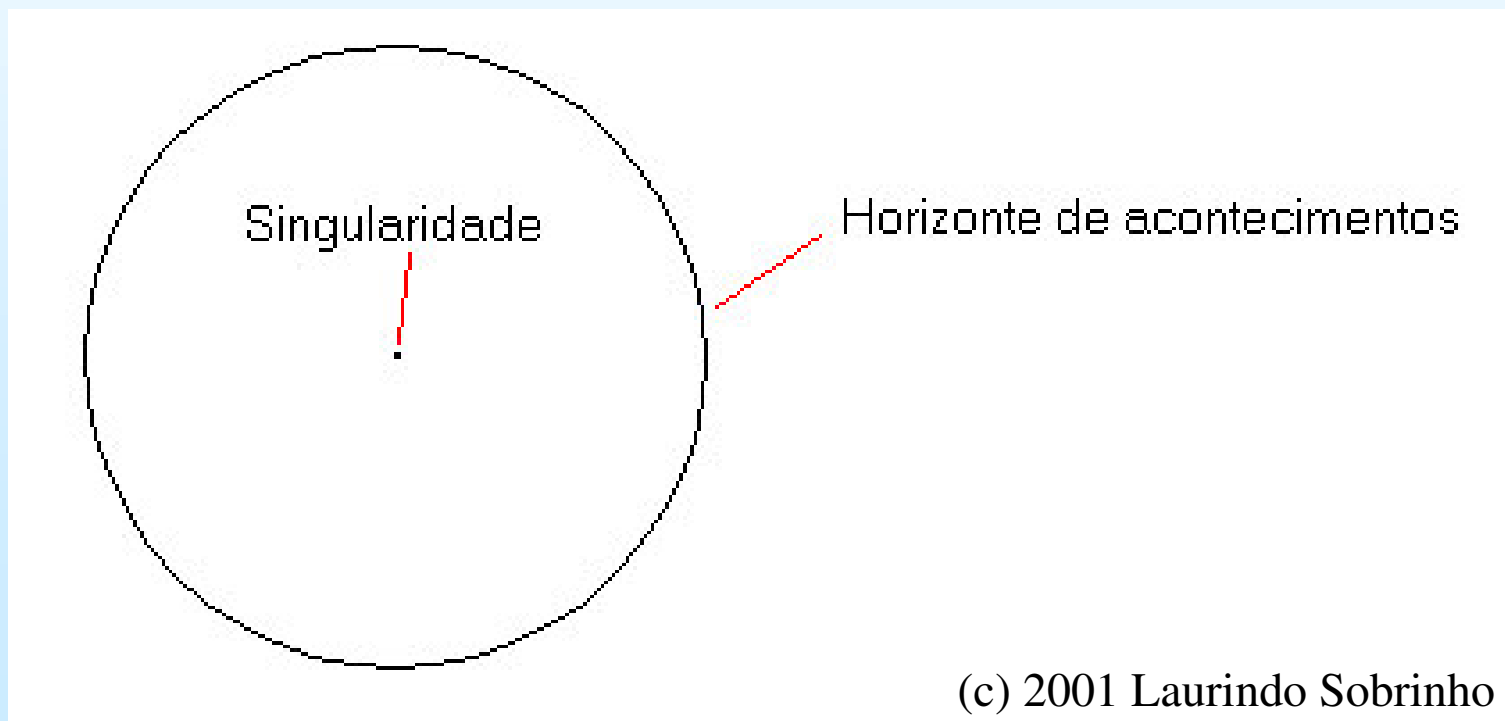


A velocidade da luz no vácuo é $C = 300\,000\text{ Km/s}$ não sendo possível a qualquer corpo atingir velocidades superiores a este valor.

Quando a velocidade de escape for superior à velocidade da luz já nada pode escapar da superfície da estrela (nem mesmo a sua própria luz). Formou-se assim um **Buraco Negro.**

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**. Após o colapso toda a massa da estrela fica concentrada num único ponto chamado **singularidade**.



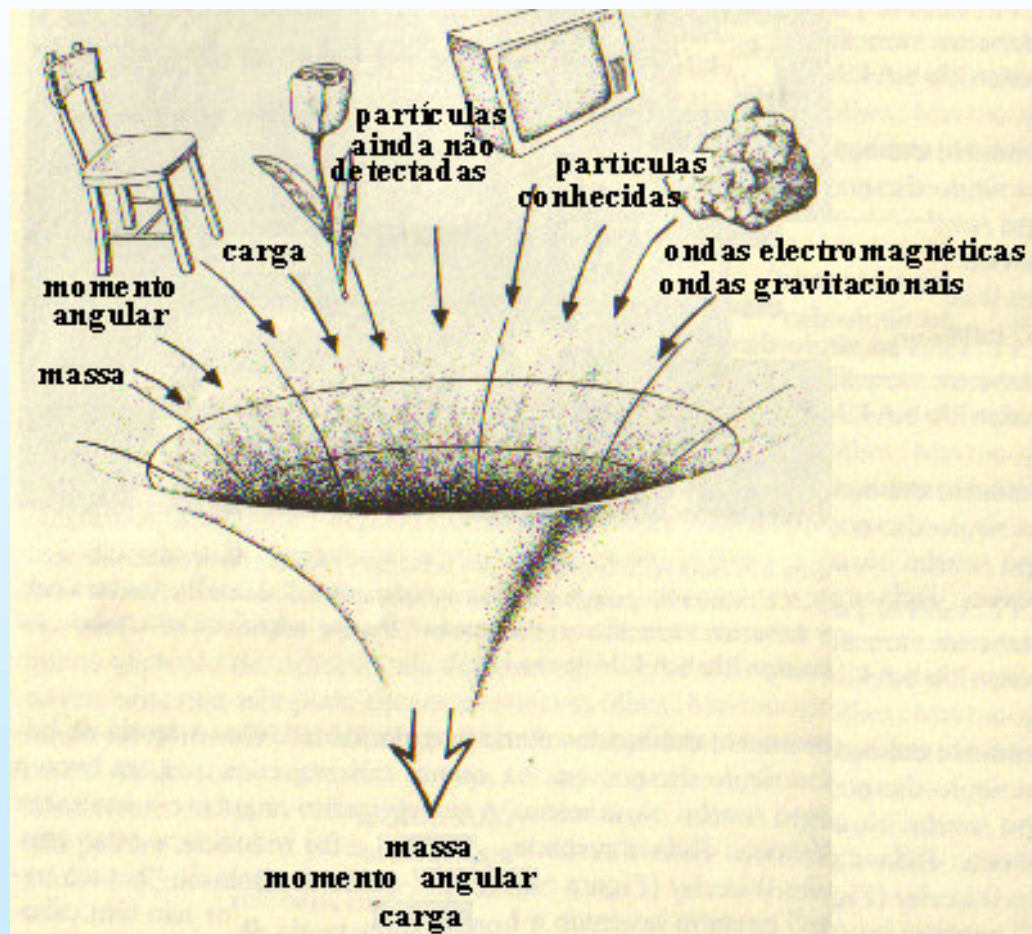
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

Nem sempre o colapso de uma estrela leva à formação de um buraco negro.
Tudo 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
mais de 3.0 massas solares	buraco negro



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.



$m_1 \ \epsilon_1 \ L_1$



$m_2 \ \epsilon_2 \ L_2$

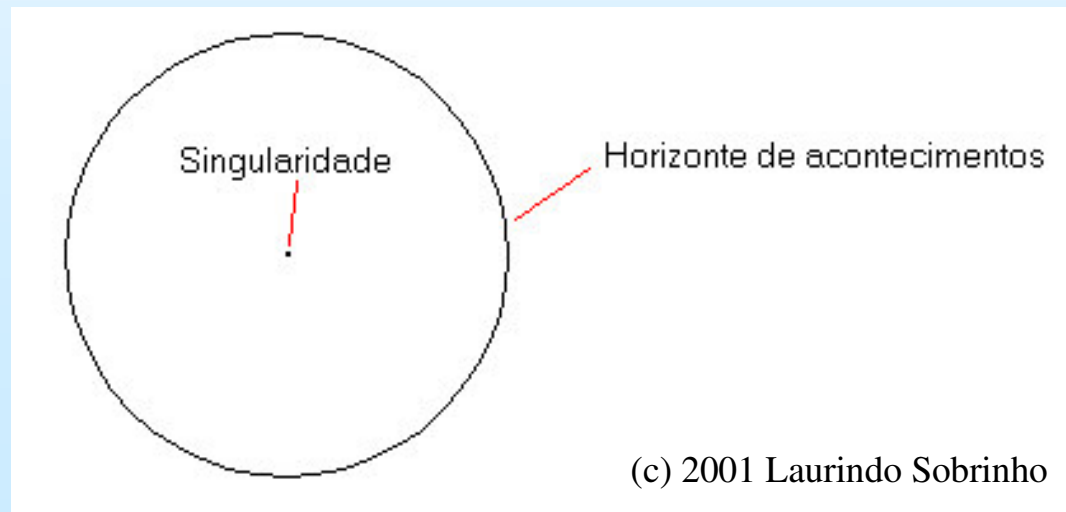
Se $m_1 = m_2$, $\epsilon_1 = \epsilon_2$ e $L_1 = L_2$ então os dois buracos negros são iguais

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:

$$R_s = 2m$$

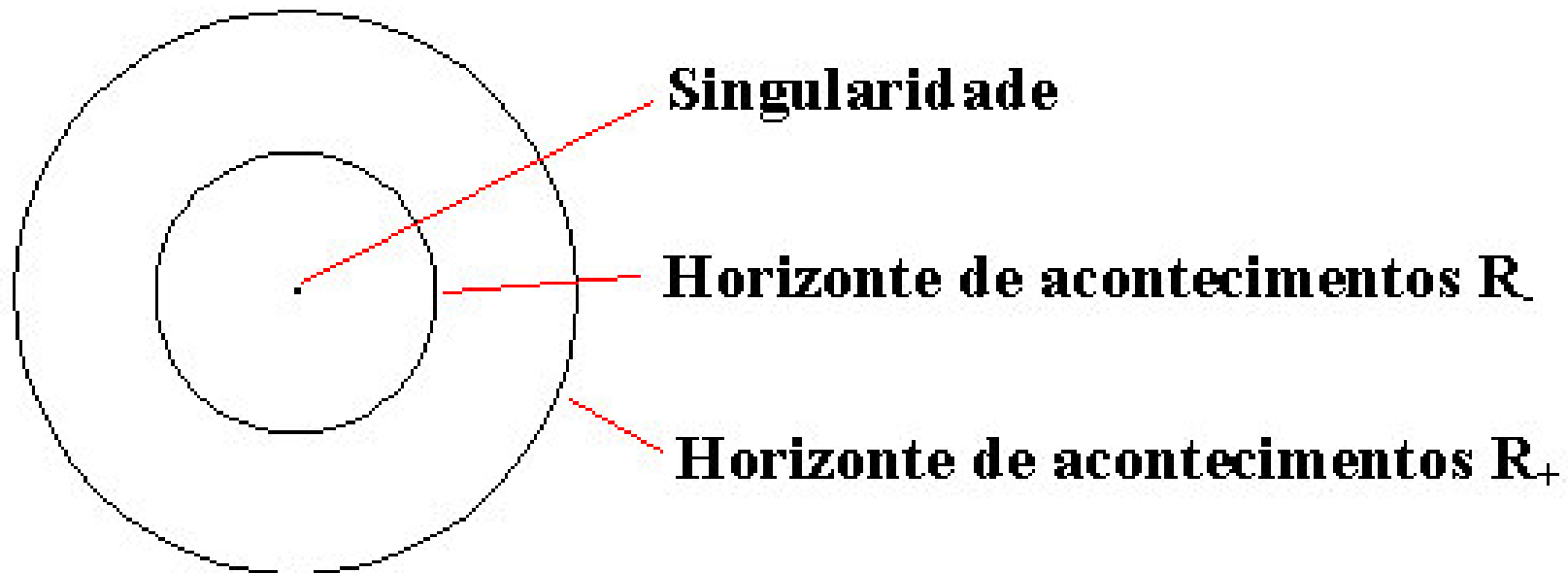
(aqui m é o valor da massa M do buraco negro escrita em unidades relativistas)



Buracos negros de Reissner-Nordstrom

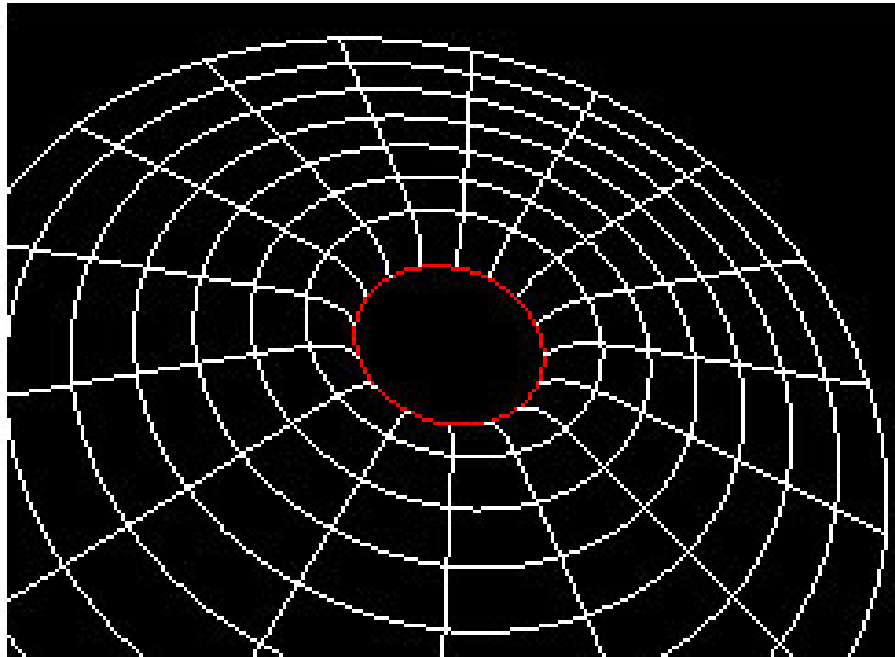
Os buracos negros de Reissner-Nordström distinguem-se dos de Schwarzschild por possuírem uma **carga eléctrica ϵ** . À volta destes buracos negros existe, além de um campo gravítico, um campo eléctrico.

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

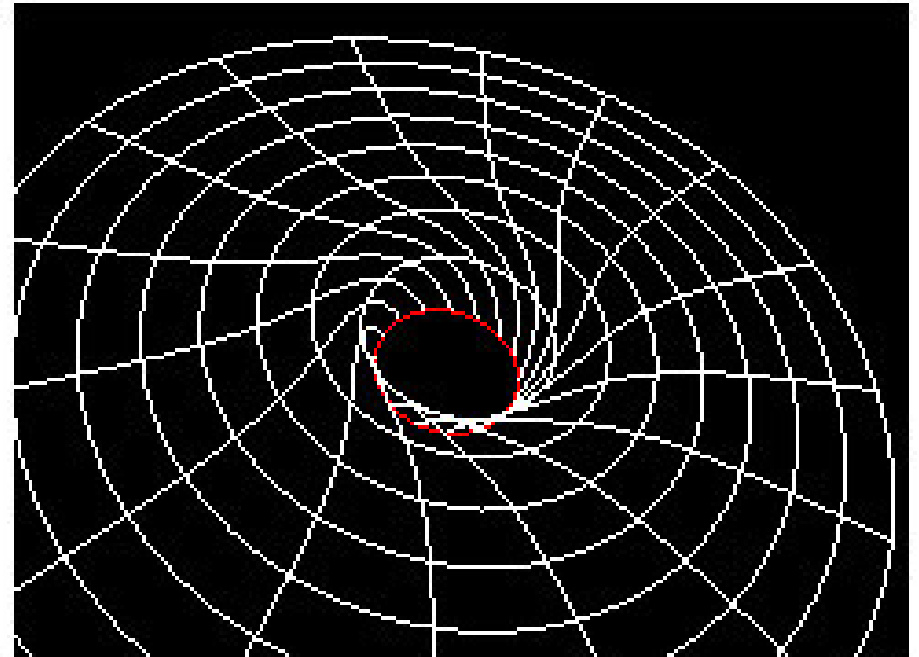


Buracos negros de Kerr

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

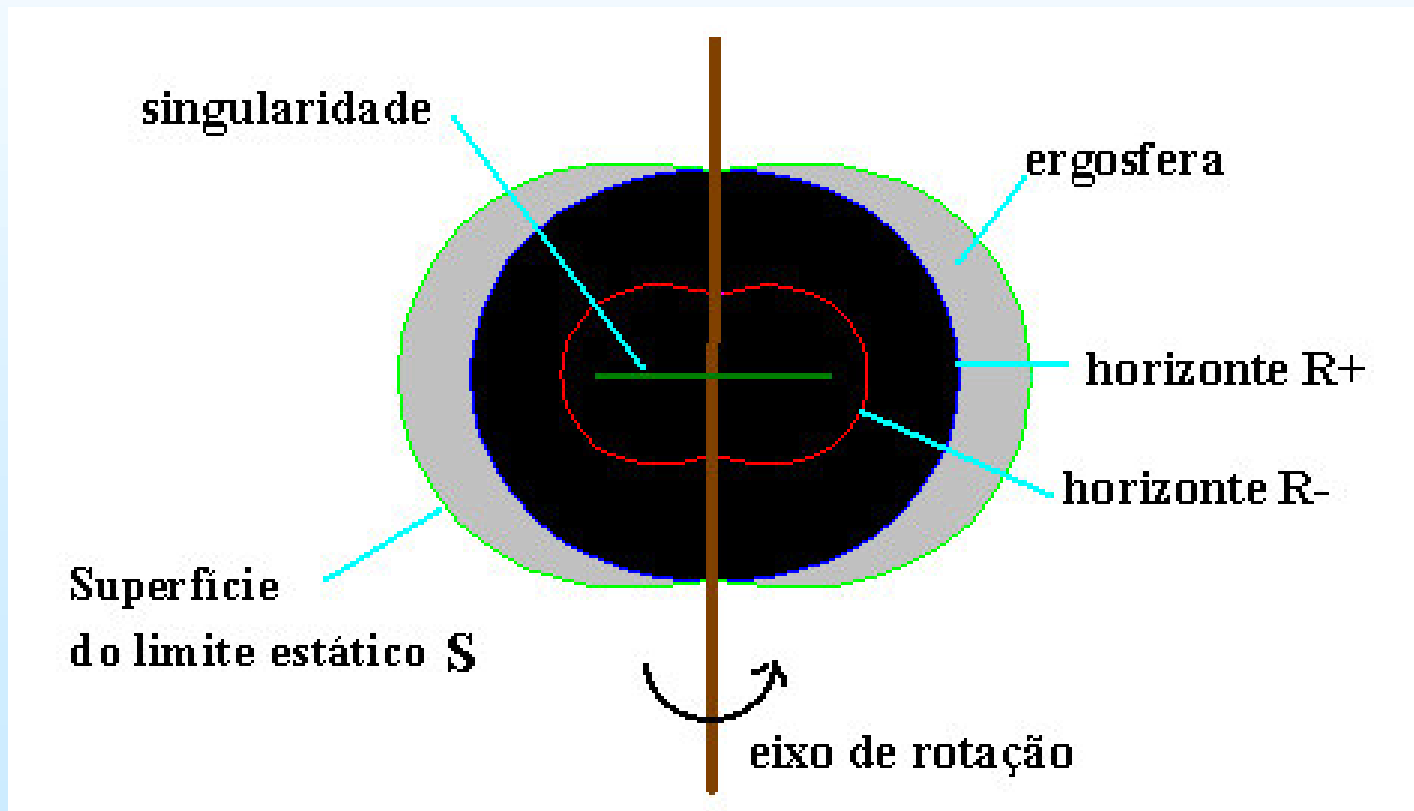


Com rotação

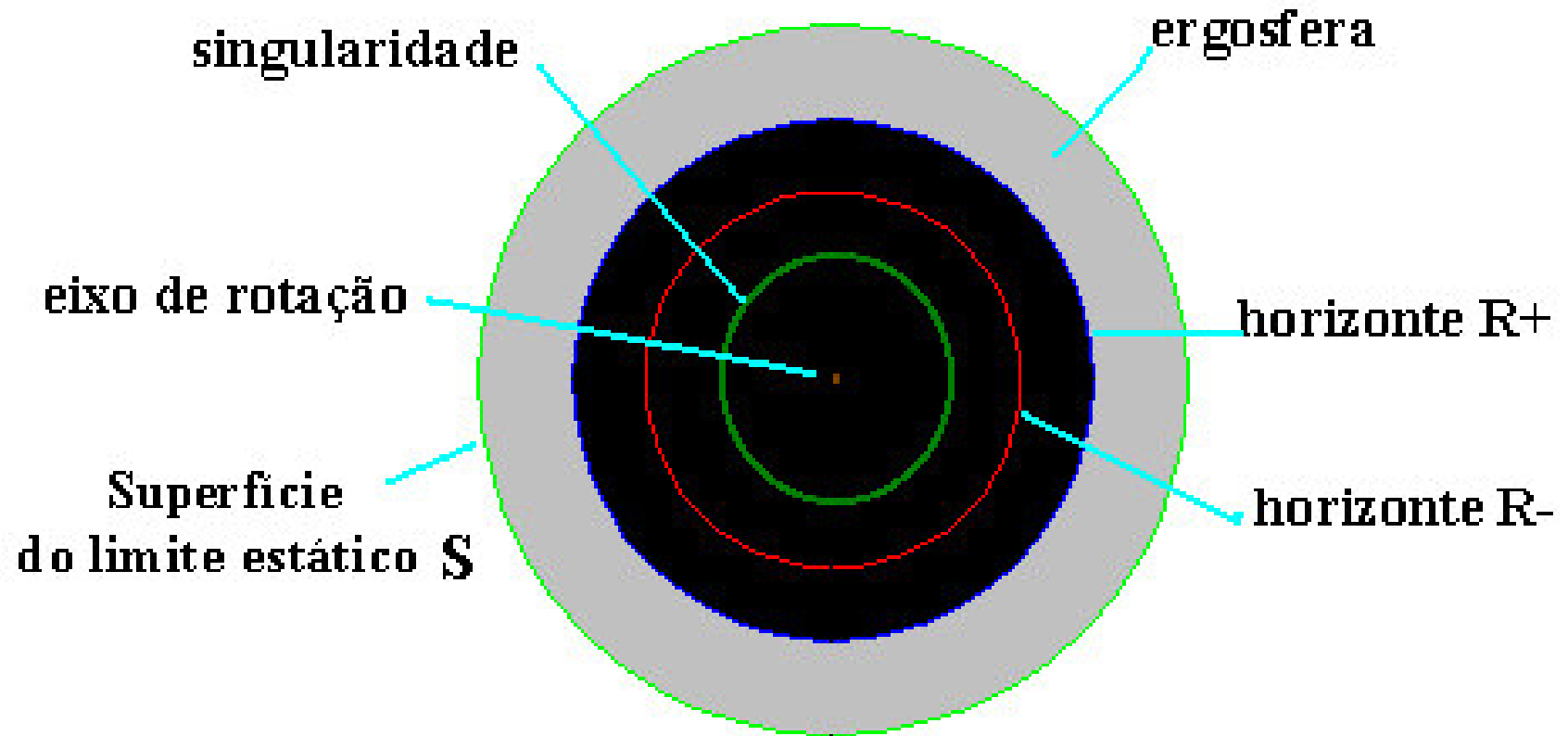
<http://www.astro.ku.dk/~cramer/RelViz/text/exhib4/exhib4.html>

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



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

Radiação de Hawking



No início dos anos setenta o físico britânico Stephen Hawking demonstrou que os buracos negros também emitem radiação. Essa radiação é actualmente designada por 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.

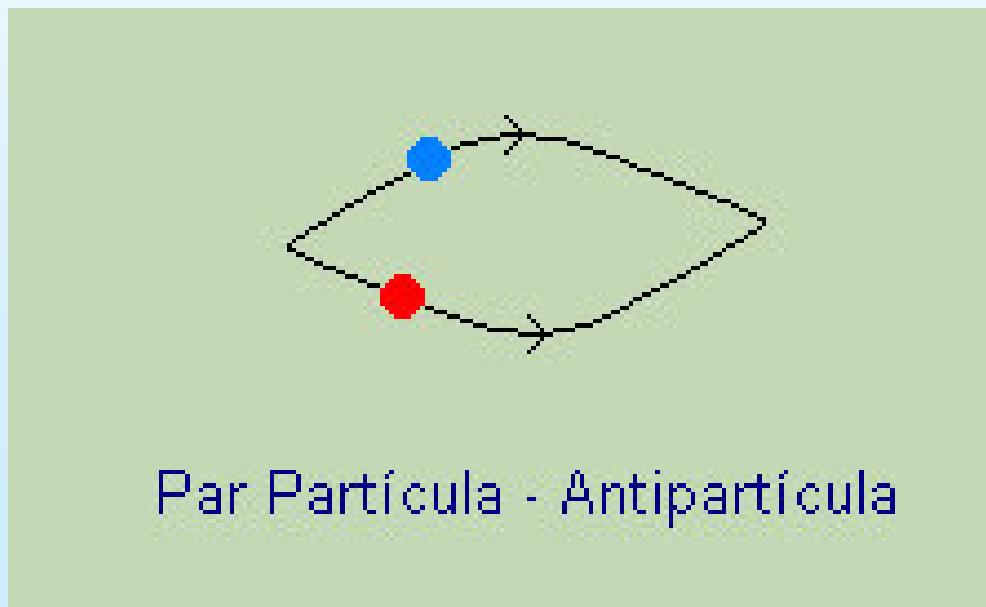
O vácuo não pode ser completamente vazio.

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.

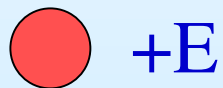
O que são essas flutuações ?

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



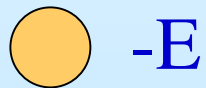
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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**.



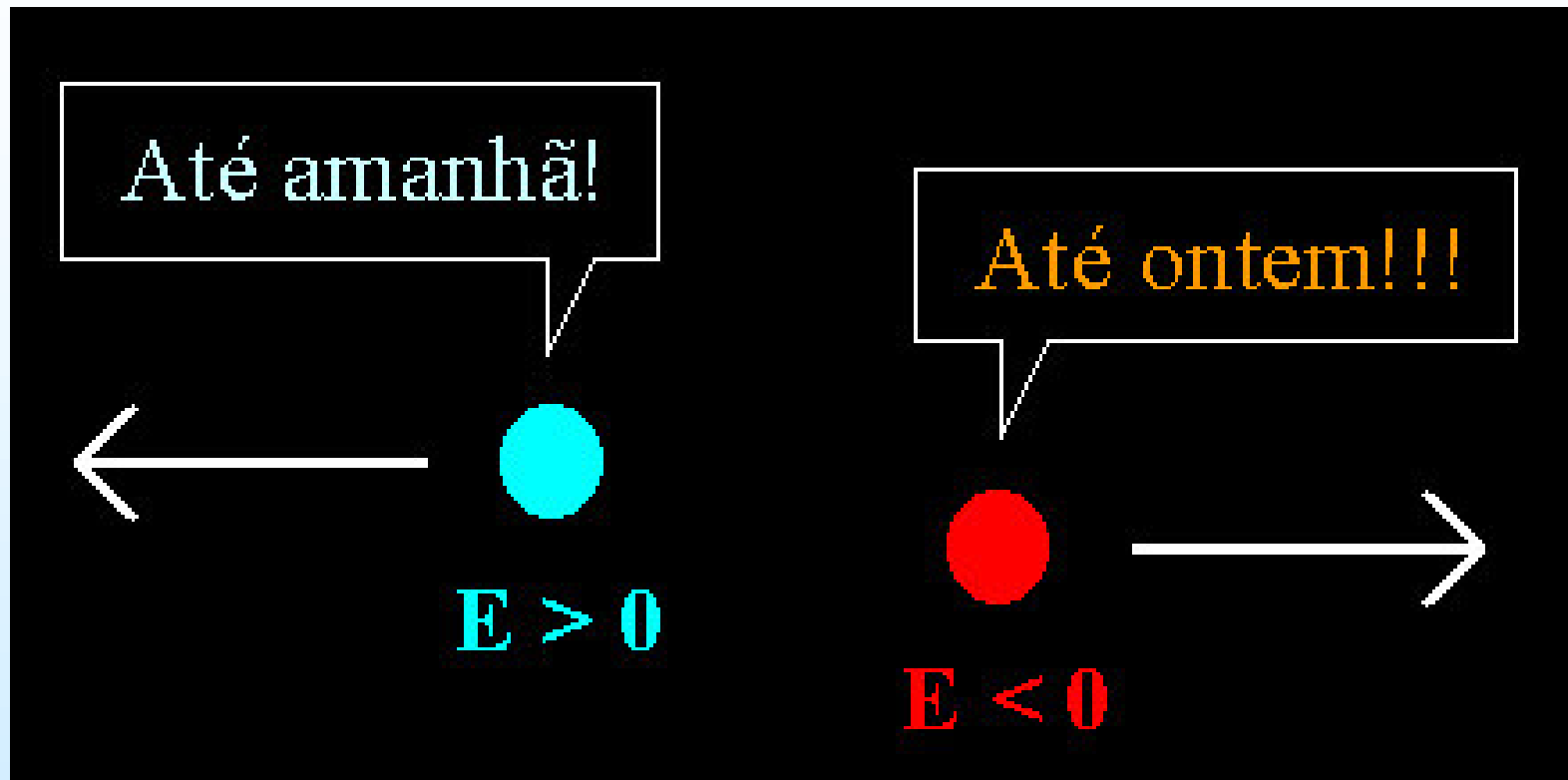
+E

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



-E

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



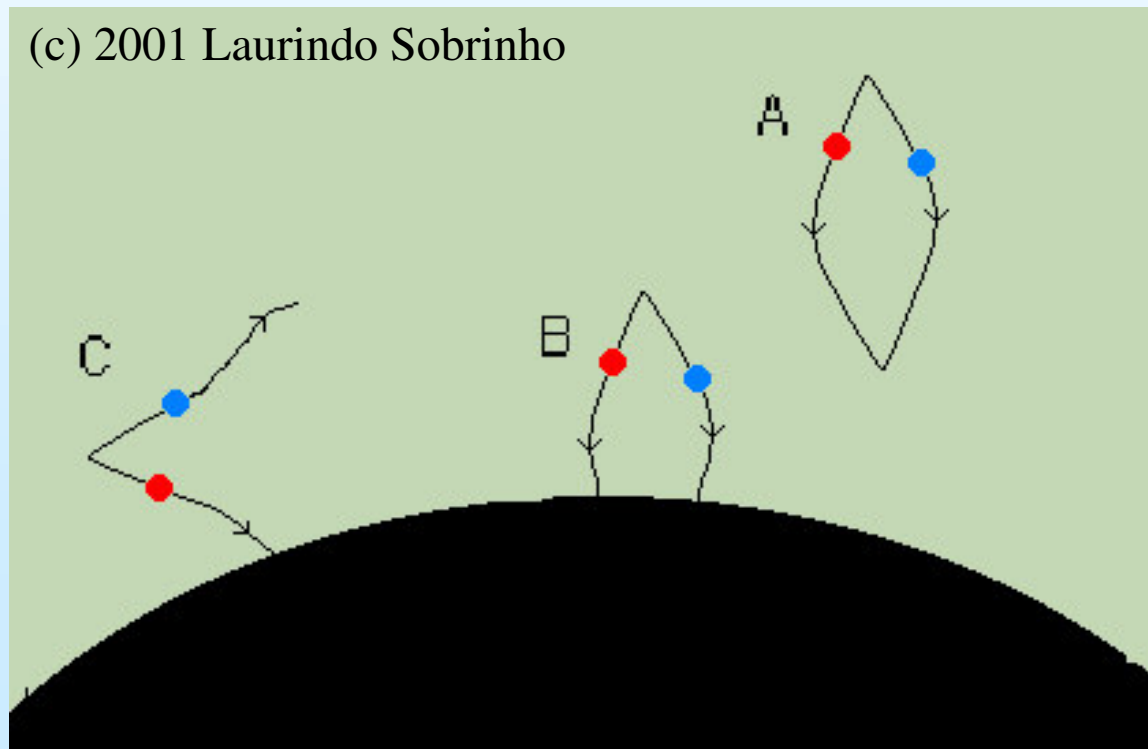
Não podem assim existir (de forma duradoura)
no nosso Universo

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

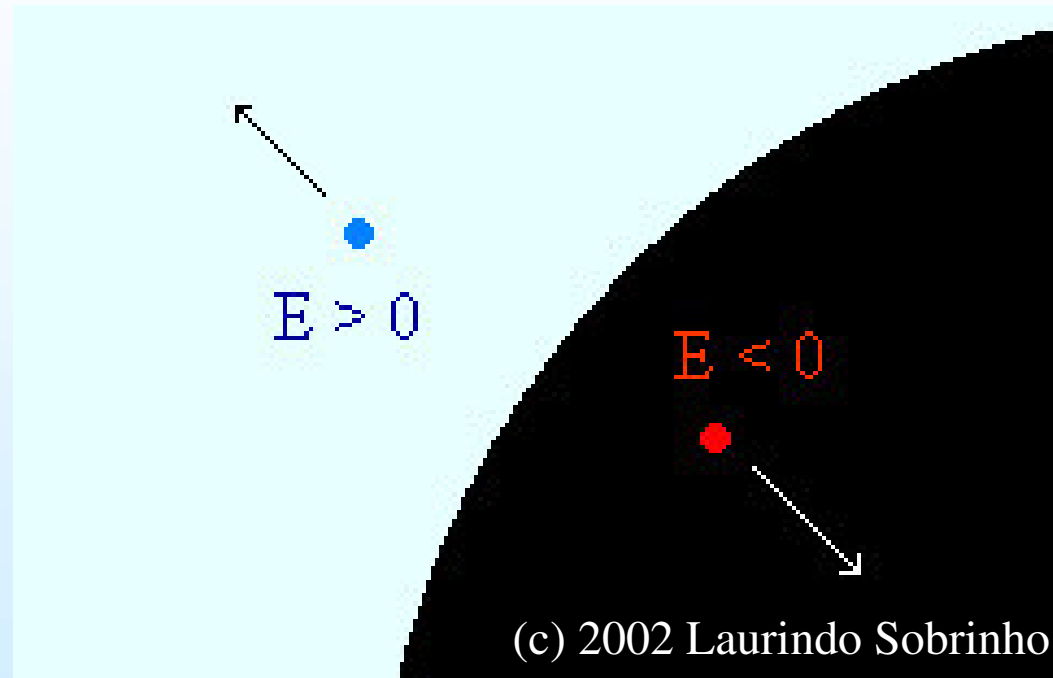
A – O par forma-se e desaparece sem atravessar o horizonte.

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.



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**.

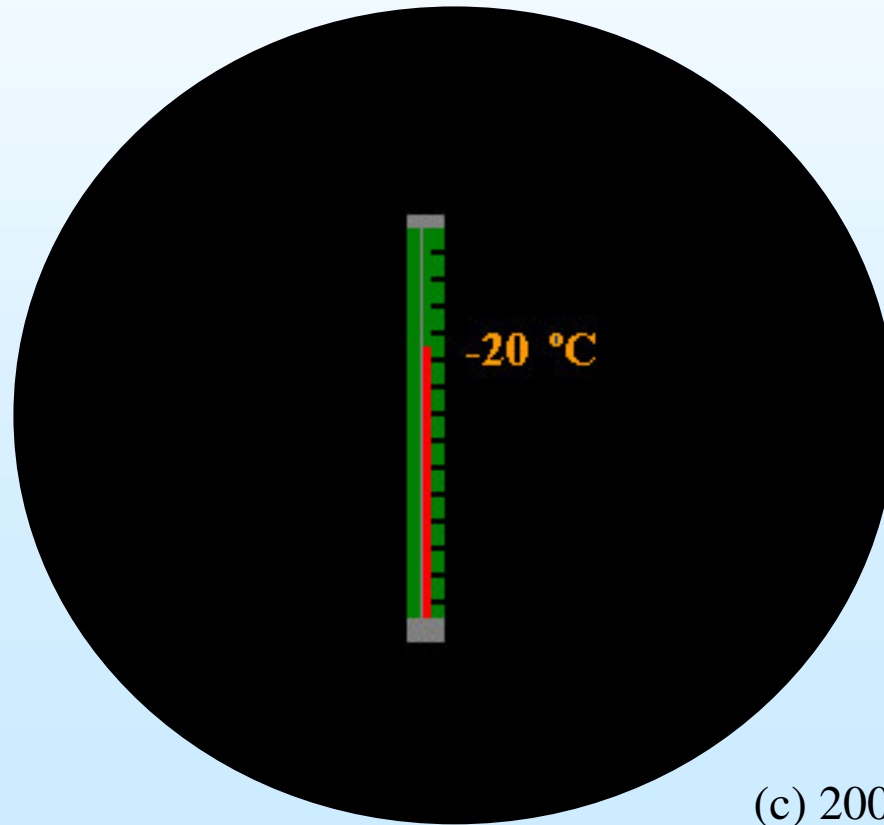
Além de fótons são emitidas também outras partículas. Para um buraco negro com algumas massas solares as taxas de emissão rondam os seguintes valores:

81 % de Neutrinos

17 % de Fótons

2 % de Gravitões

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



(c) 2002 Laurindo Sobrinho

Essa temperatura é dada por:

$$T = 6 * 10^{-8} \frac{M_s}{M_{bn}}$$

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

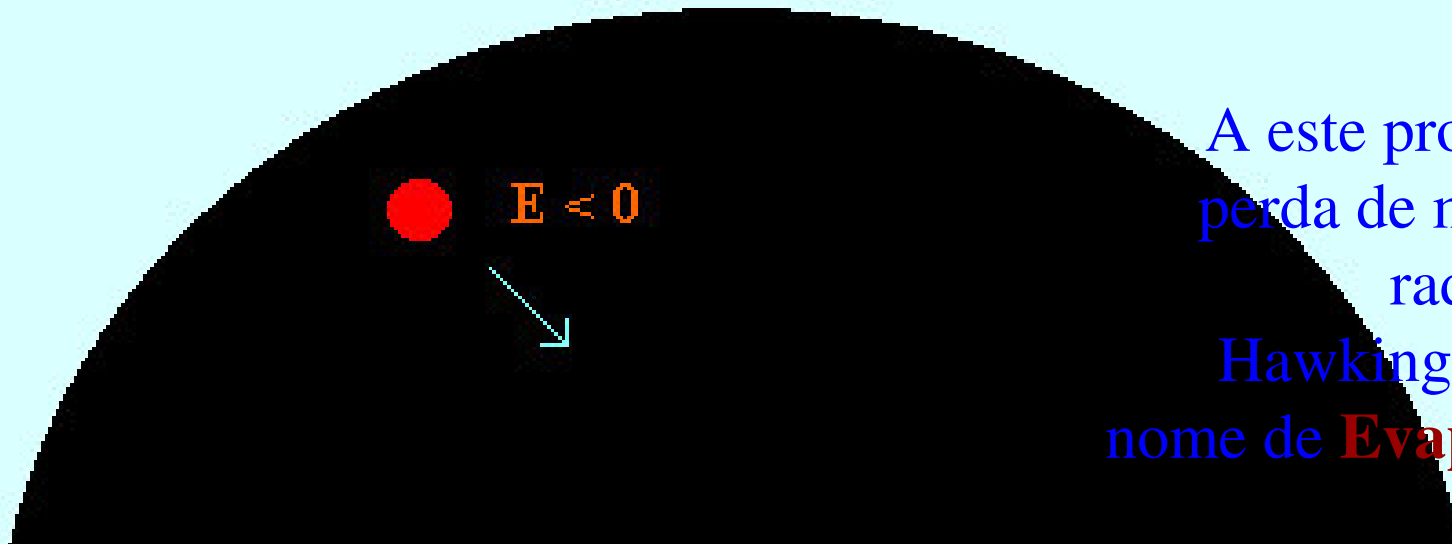
$$T = -273.14999994 \text{ graus Celsius!}$$

O fóton que atravessou o horizonte tem energia negativa e vai fazer com que o valor da energia do buraco negro diminua. Mas energia e massa são no fundo a mesma coisa:

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

Conclusão :

A massa do buraco negro irá diminuir.



A este processo de perda de massa via radiação de Hawking damos o nome de **Evaporação**.

Não existem buracos negros isolados !

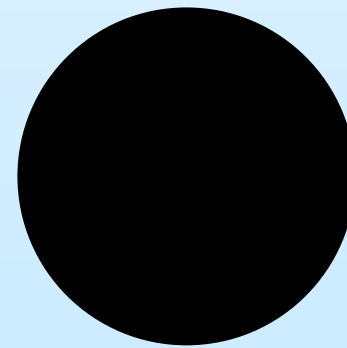
Qualquer buraco negro é no mínimo banhado pela **radiação de fundo** que enche o Universo. No caso de buracos negros de massa estelar o ganho de energia devido à radiação de fundo é muito superior à perda de energia via radiação de Hawking.

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

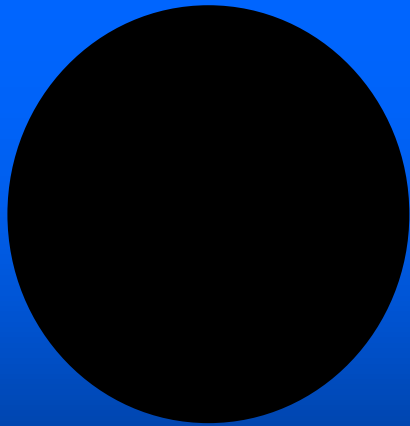
Será que esses buracos negros minúsculos existem ?

Quais as suas dimensões ?

Em que condições se formaram ?



Buracos Negros de Massa Subestelar



0.01 massas solares ?

No Universo actual só se podem formar buracos negros com massas superiores a pelo menos 1.5 massas solares.

Será que foi sempre assim?

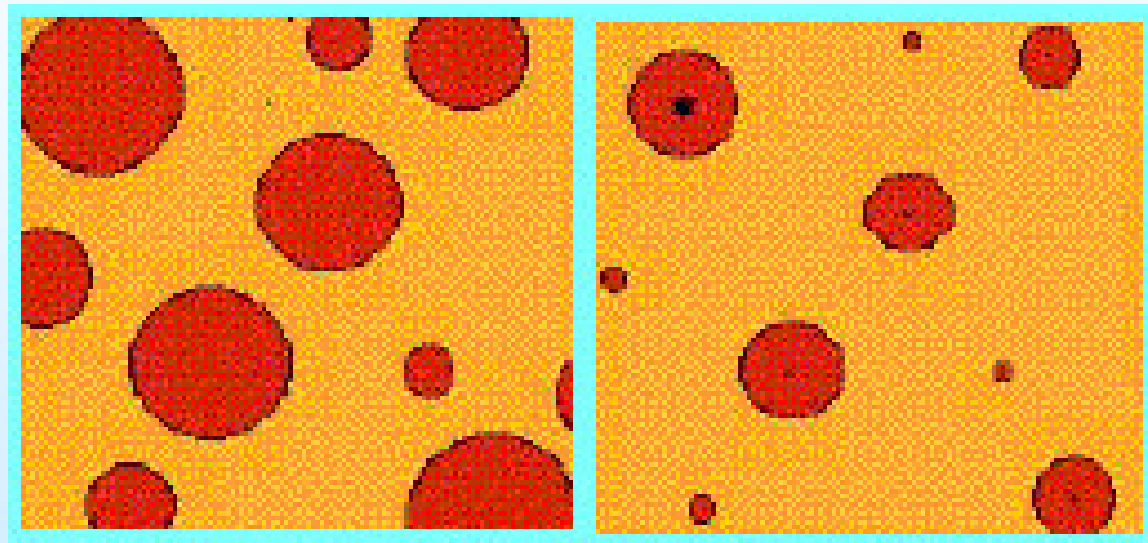
Nos instantes iniciais do Universo, logo após o **Big Bang**, devem ter existido algumas **irregularidades**.

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 acreção de matéria e para os mais pequenos domina a evaporação.

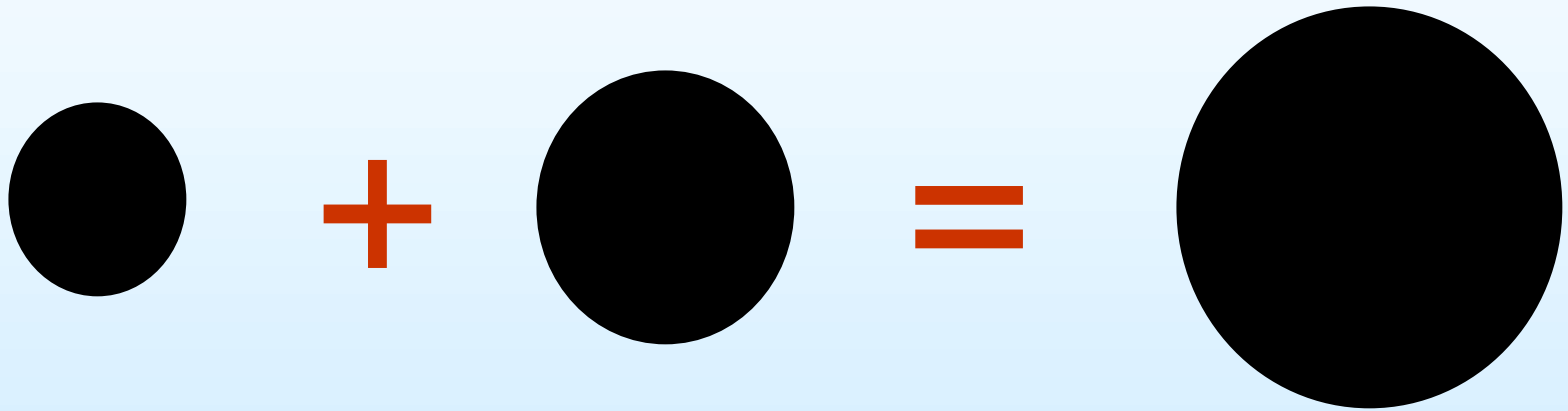
Admitindo que a idade do Universo ronda os 10^{10} anos (**10 000 000 000 anos**) então os buracos negros primordiais com massas inferiores a 10^{15} gramas (**1 000 000 000 000 000 gramas**) já evaporaram completamente.

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.

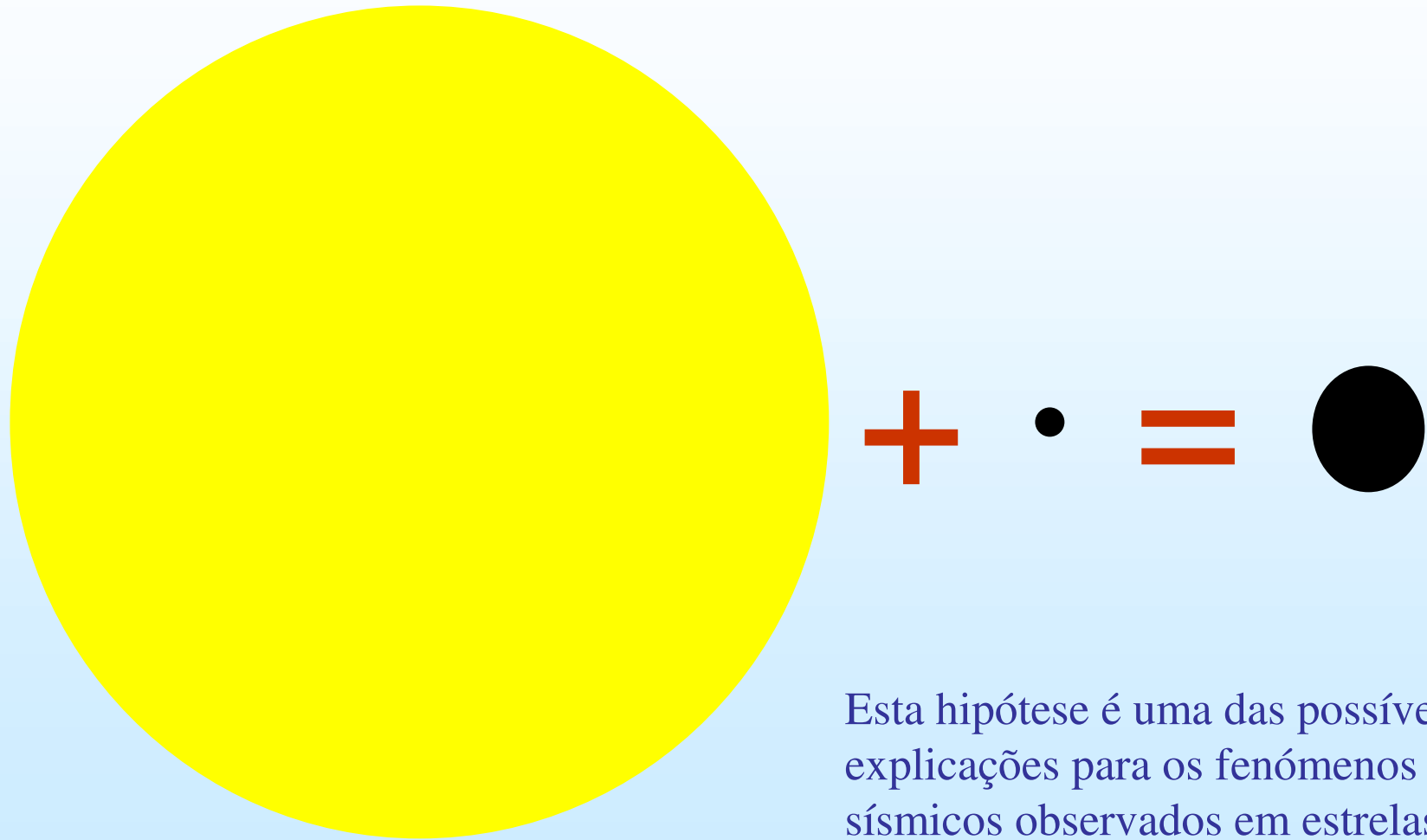
Existem ainda outras possibilidades:

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.

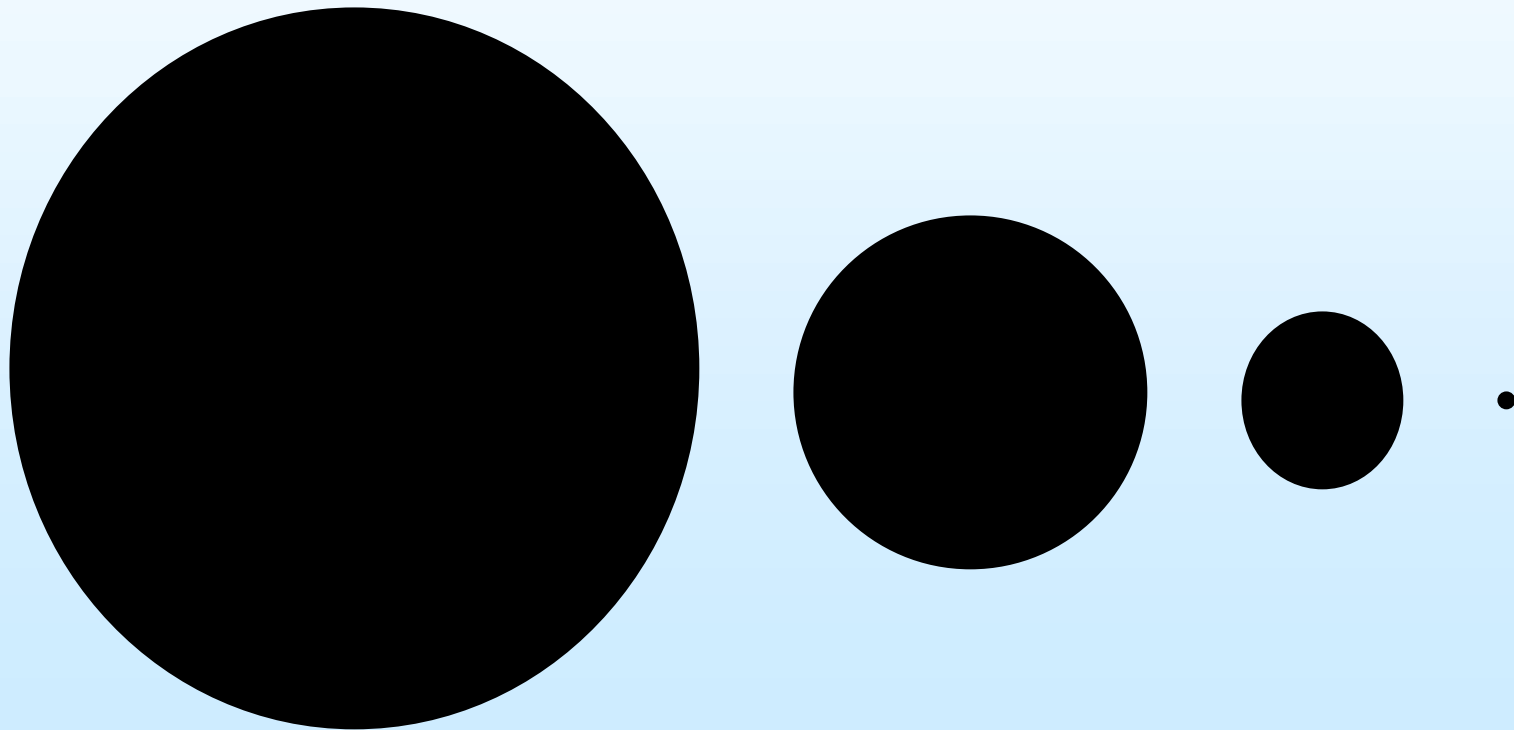
Se um buraco negro primordial se alojar no centro de uma estrela acaba por engolir toda a matéria da mesma em alguns milhões de anos.



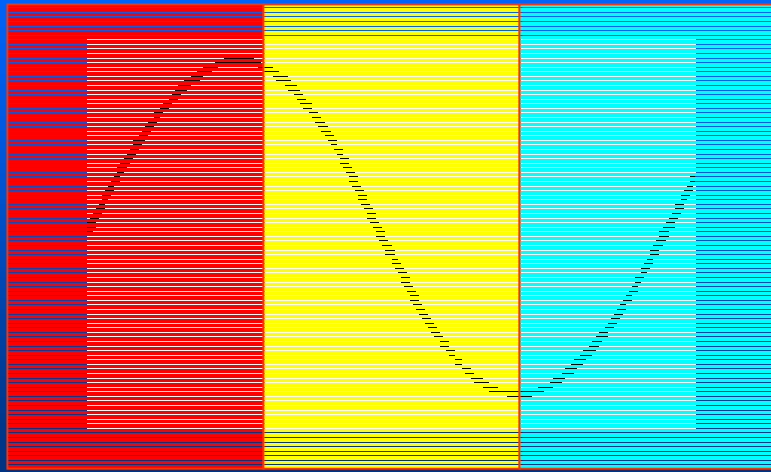
Esta hipótese é uma das possíveis explicações para os fenómenos sísmicos observados em estrelas de neutrões.

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.

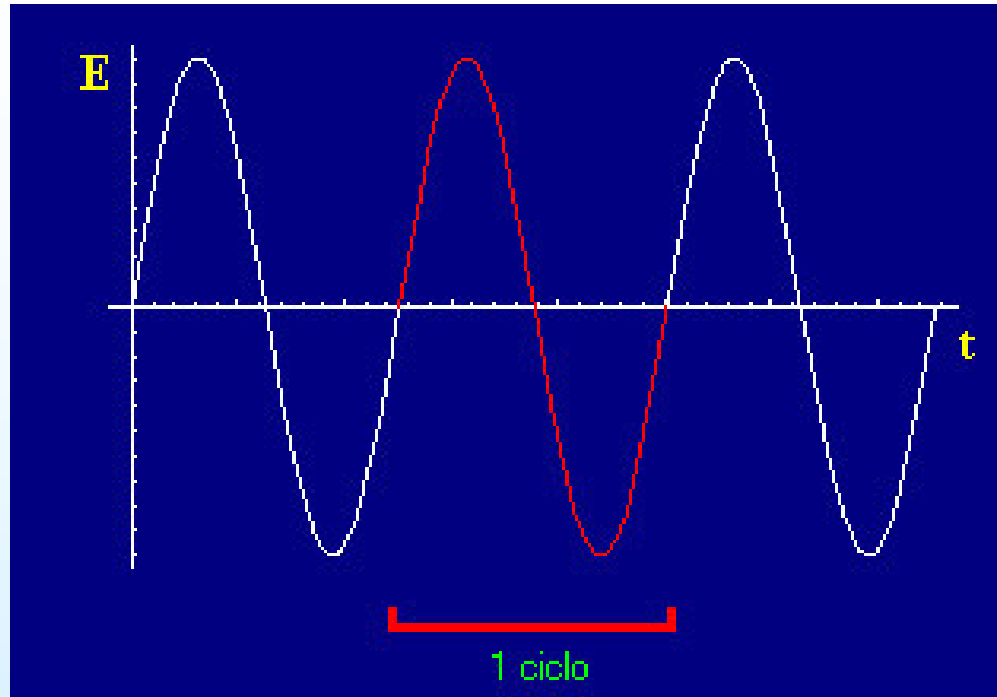


Buracos Negros e o Espectro Electromagnético



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.

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

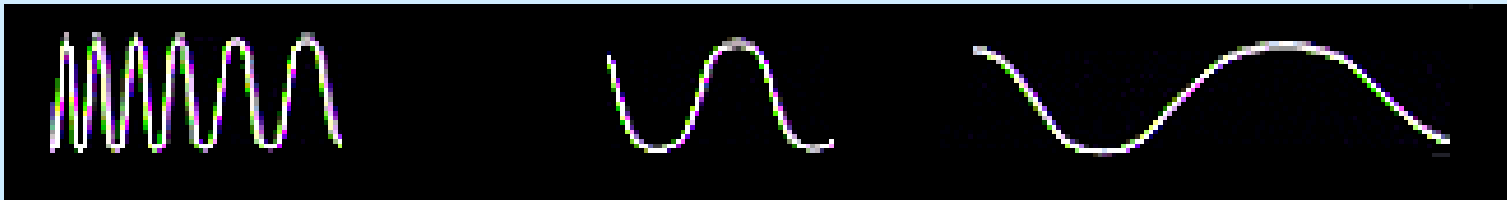
Frequências mais altas

λ mais baixos

Menos energético

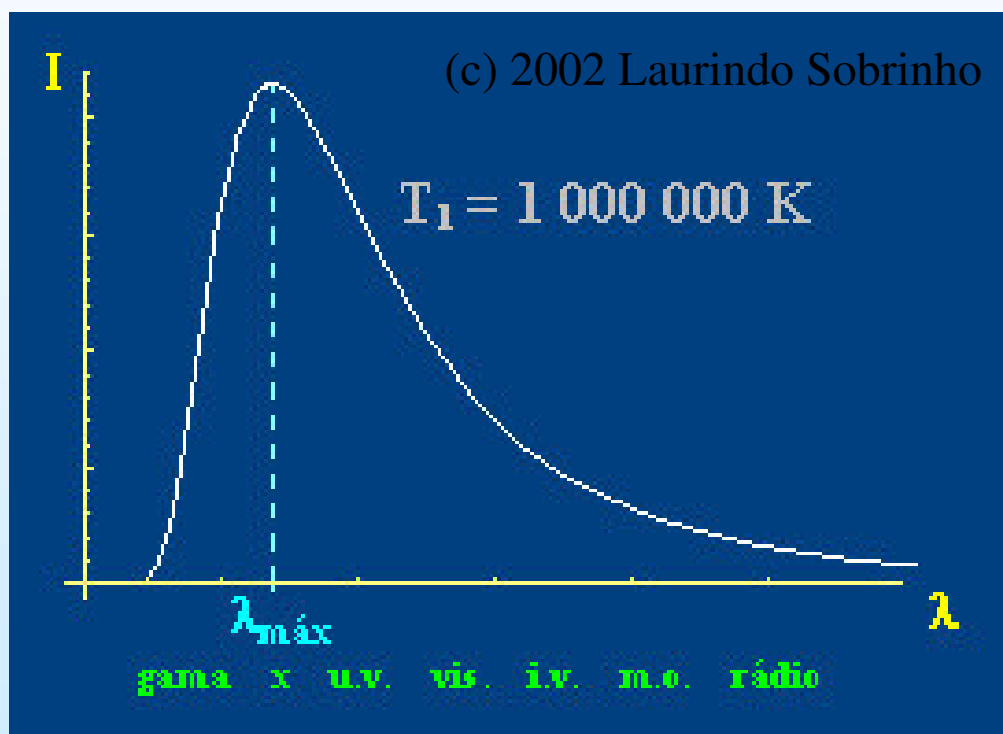
Frequências mais baixas

λ mais altos

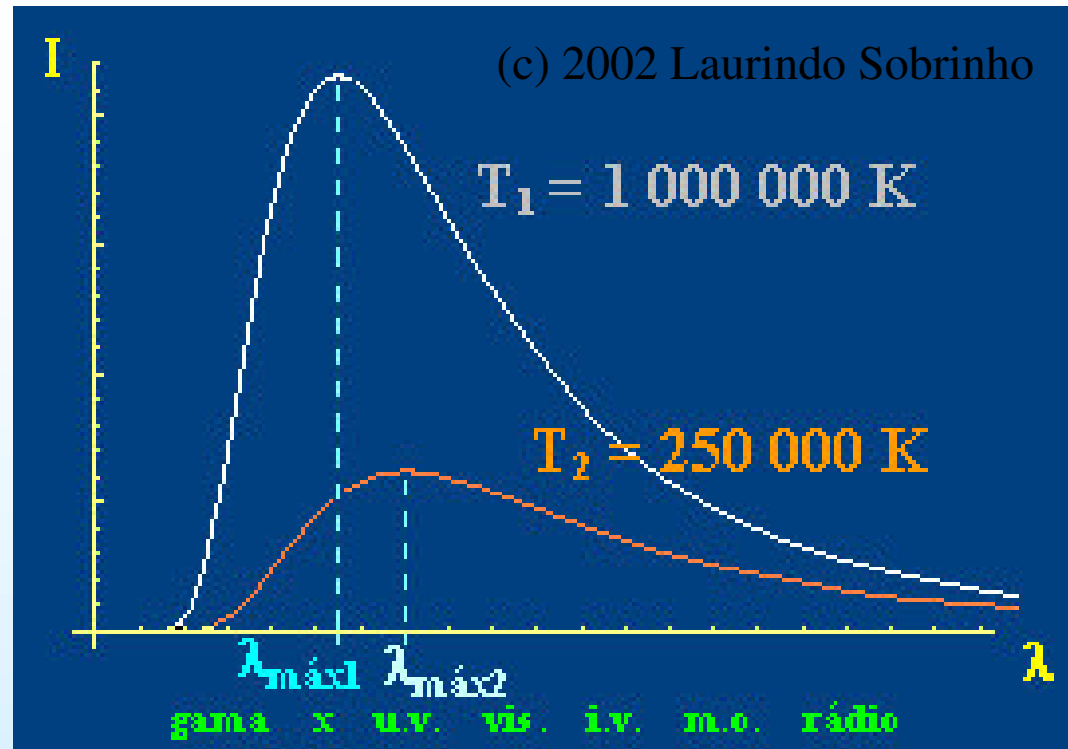


Espectro de emissão de um buraco negro

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



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



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**

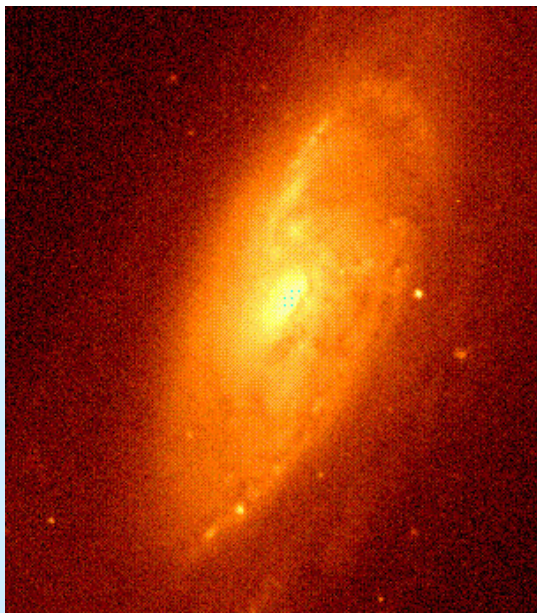
Buracos Negros Supermassivos

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

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

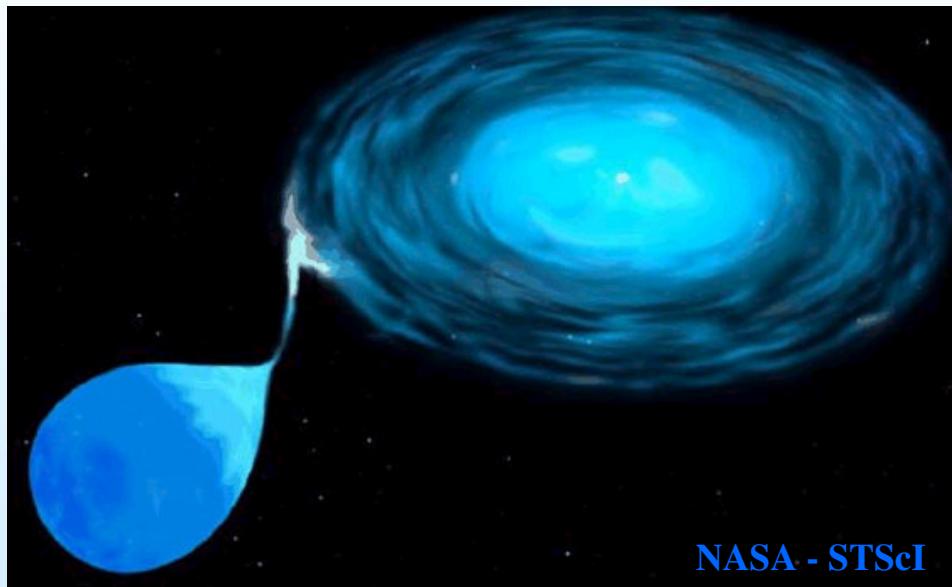
$$T = 0.000\,000\,000\,000\,06 \text{ Kelvin}$$

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



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.



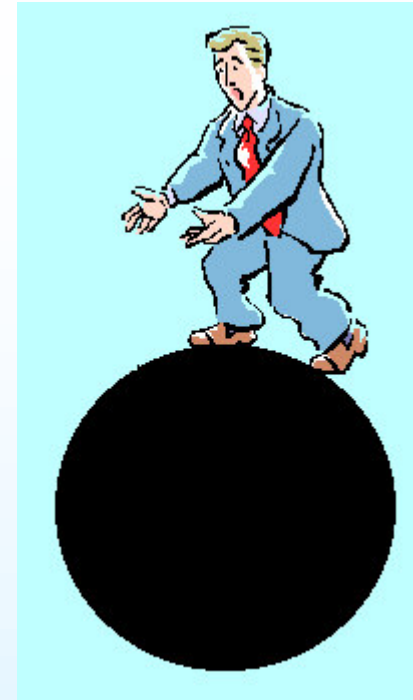
Buracos Negros Rádio de massa subestelar

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

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

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

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



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.

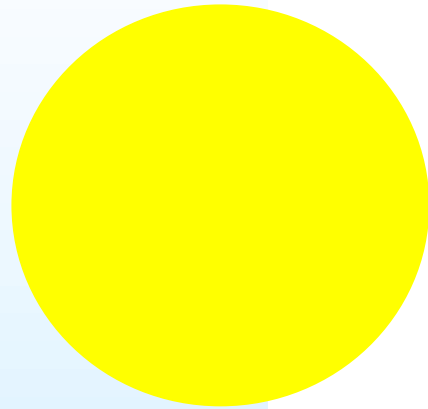
Buracos Negros Visíveis

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

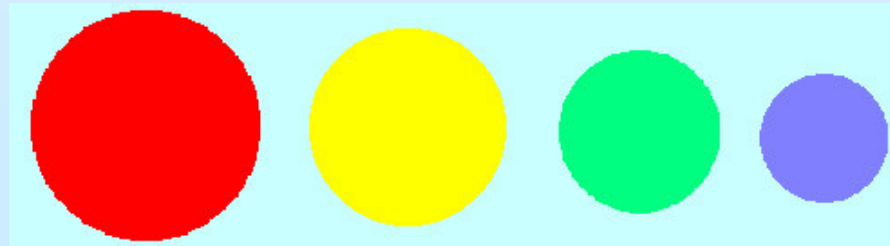
$$R = 38 \text{ nanómetros} = 0.000\,000\,38 \text{ metros}$$

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

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



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. Embora emitam na região do visível a quantidade de luz emitida é tão pequena que não se podem ver a olho nu....



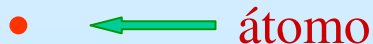
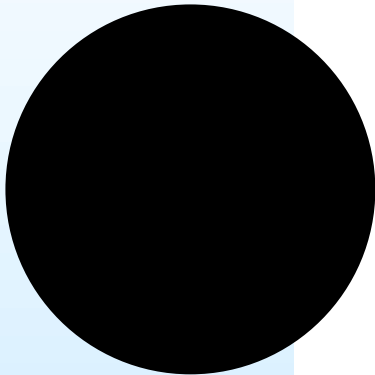
Buracos Negros ultravioleta

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

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

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

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



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

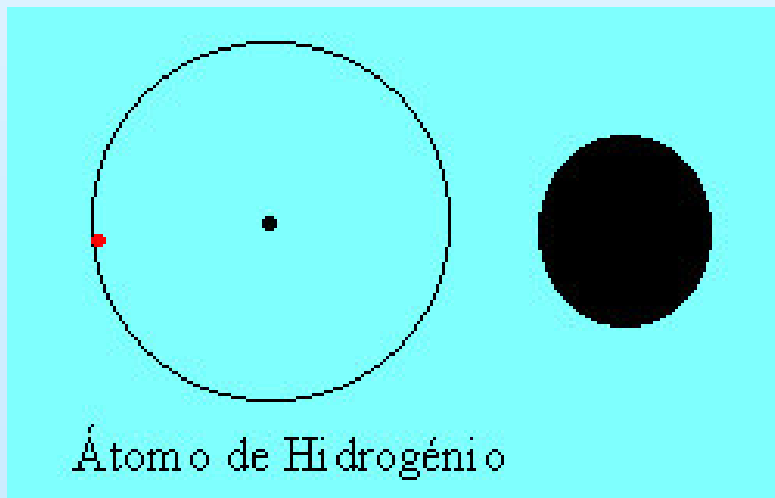
Buracos Negros de Raios X

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

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

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

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



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

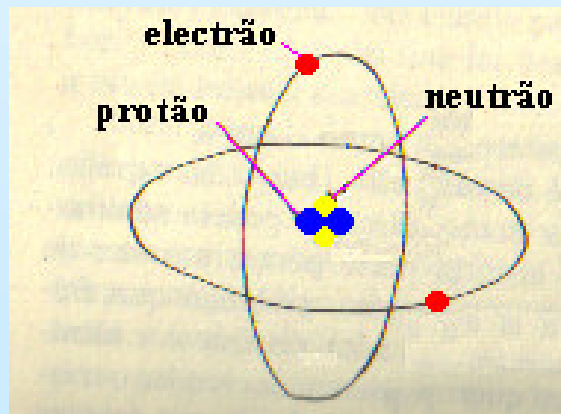
$$M = 4.3 \cdot 10^{13} \text{ Kg} = 43\,000\,000\,000\,000 \text{ Kg}$$

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



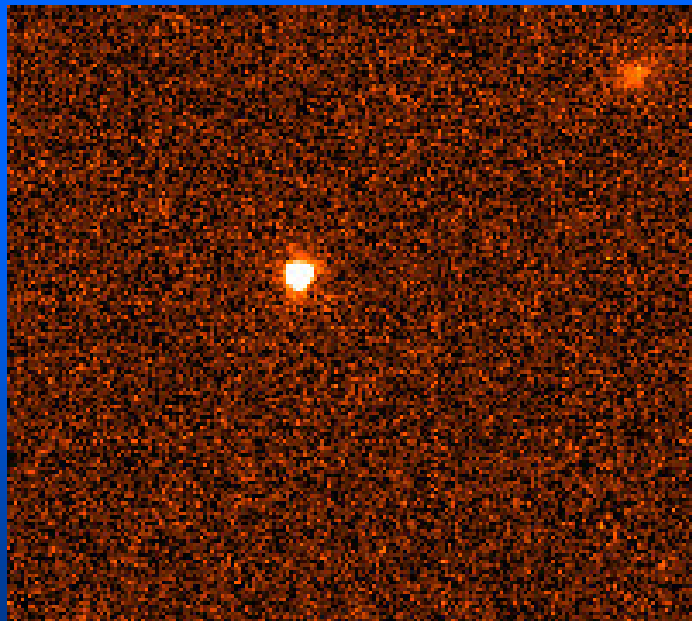
$$T = 2900 \text{ milhões de Kelvin}$$

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



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

Explosão de Buracos Negros



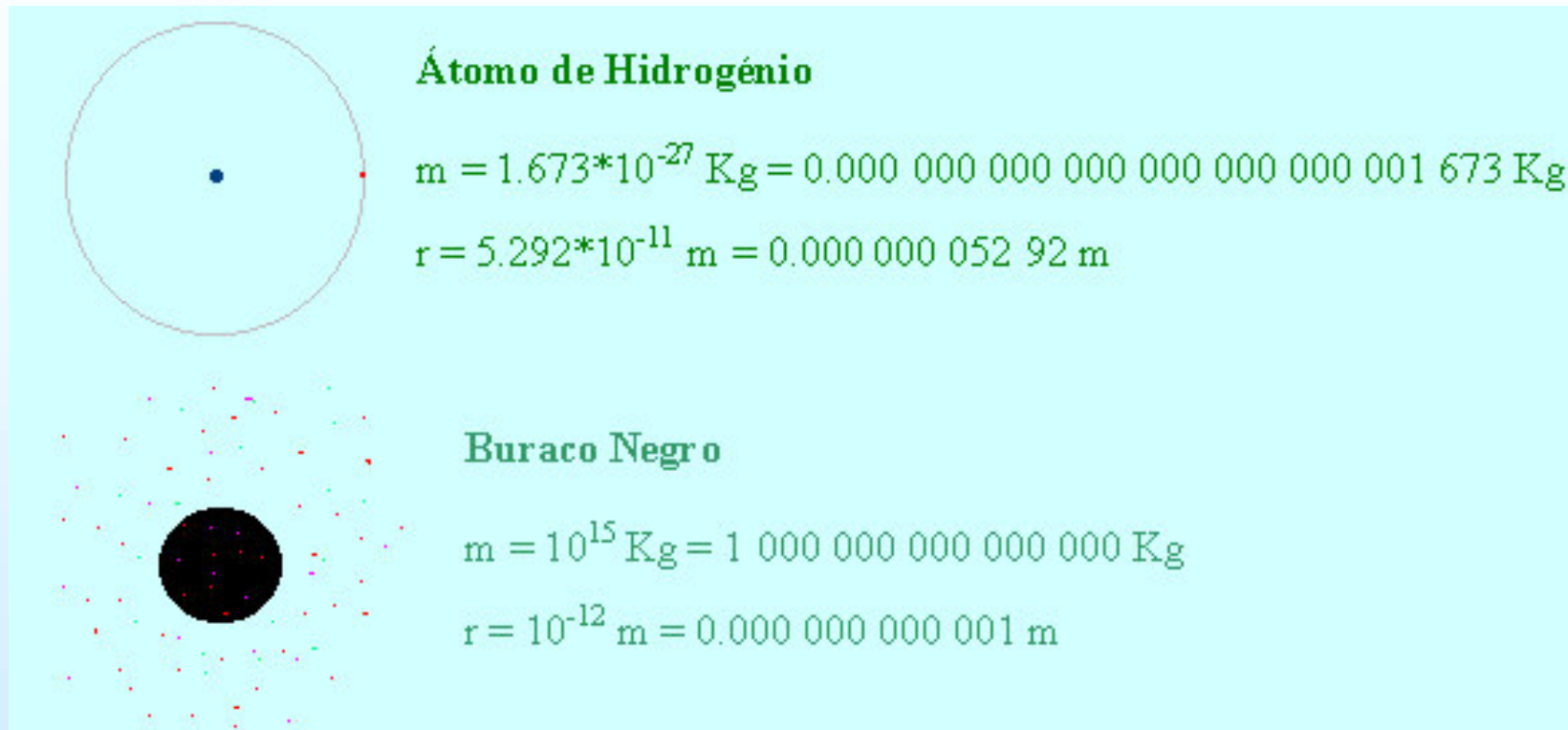
À medida que um buraco negro evapora emite energia cada vez mais intensa. No fim tudo acaba numa forte explosão.....

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	$\ll 1$ milionésimo de segundo
piões	$\ll 1$ milionésimo de segundo
kaões	$\ll 1$ milionésimo de segundo
protões	estável
neutrões	1000 s

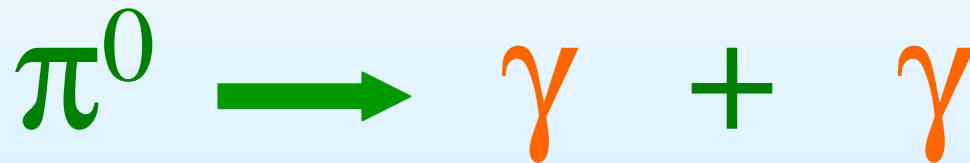
A emissão significativa de **electrões e positrões** (antipartícula do electrão) só ocorre quando o raio do buraco negro é já inferior ao raio de um átomo!



Para que sejam emitidas partículas mais pesadas o raio do buraco negro terá de ser ainda mais pequeno. Protões e neutrões só serão significativamente emitidos quando o raio for inferior ao de um núcleo atómico.

Quando a massa ronda os 10^{12} Kg são emitidos abundantemente **mesões Pi** (**piões**). São assim emitidos 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 :



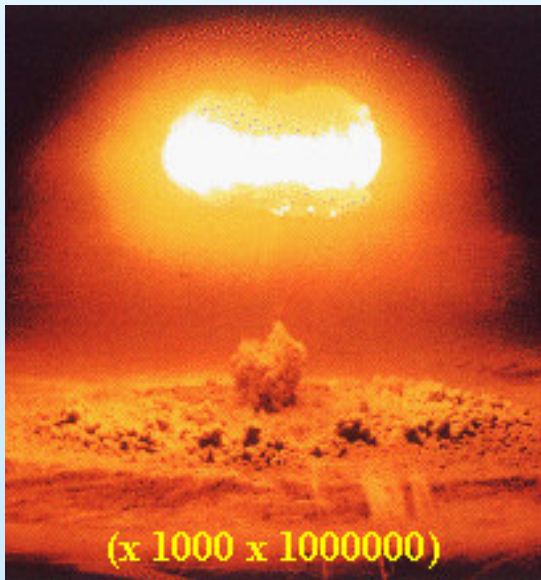
O mesão π^0 tem um tempo de vida média de apenas $2 \cdot 10^{-16}$ s.
(0.000 000 000 000 000 2 s)

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

À medida que a massa do buraco negro vai diminuindo são emitidas partículas mais pesadas : **bariões sigma, bariões lambda ...**

Estas ao se desintegrarem libertam mais **mesões π^0** que por sua vez se desintegram em **raios gama**.

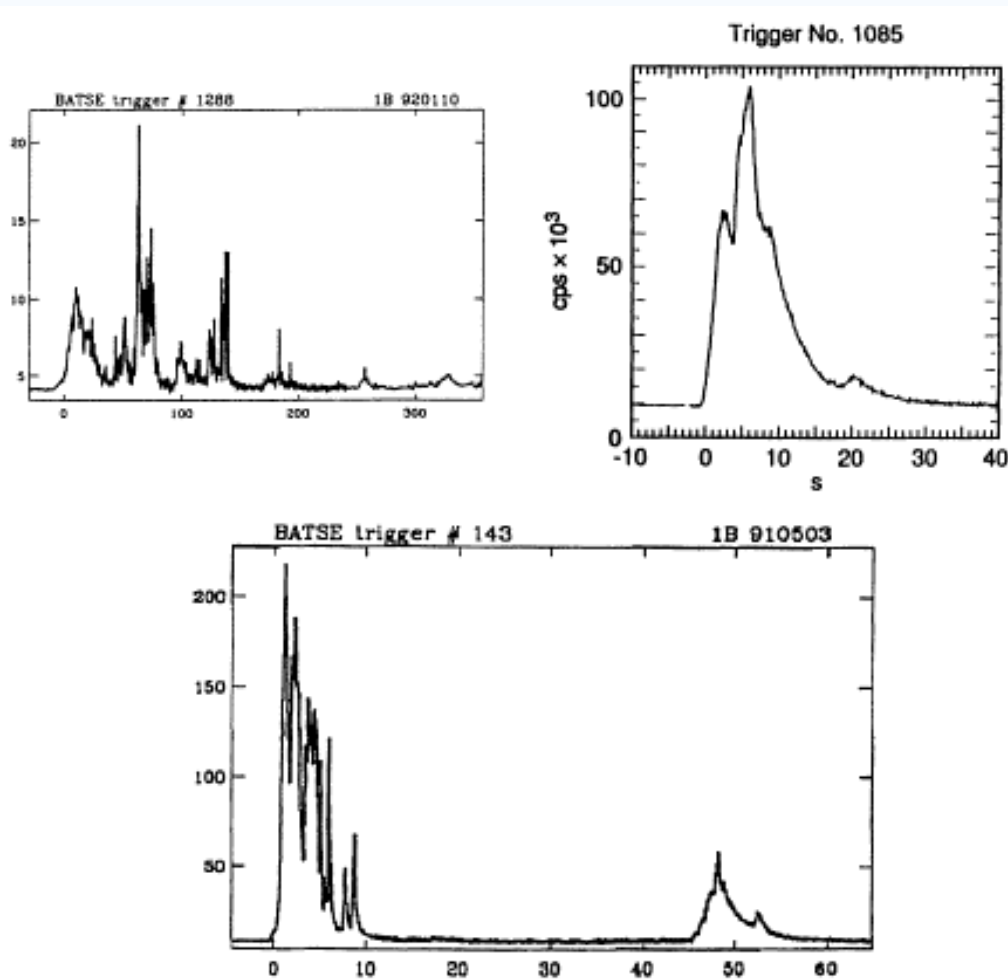
Assiste-se assim a uma espécie de **explosão de raios gama** que pode ser observável a grandes distâncias (!?) apesar de nesta fase o buraco negro ser muito pequeno (muito mais pequeno do que o núcleo de um átomo).



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. Muitos certamente que não estão. O nosso conhecimento tanto em relação aos GRBs como em relação a fase final da evaporação de buracos negros não é ainda suficientemente claro para que se possam tirar conclusões seguras!

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**.**

FIM

Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira 2002

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