

Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira

Buracos Negros

Laurindo Sobrinho

9 de Setembro de 2004



A velocidade de escape

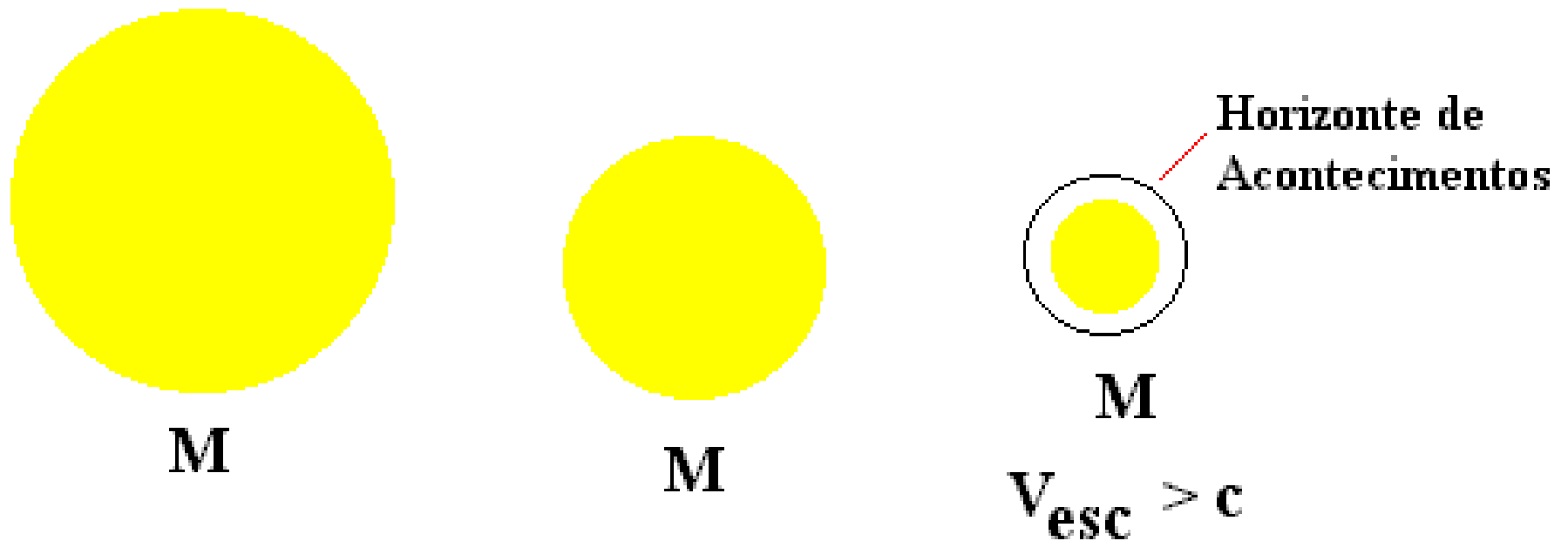
É a velocidade que um corpo deve atingir para que possa escapar à atracção gravítica de um planeta (ou estrela, ...).

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

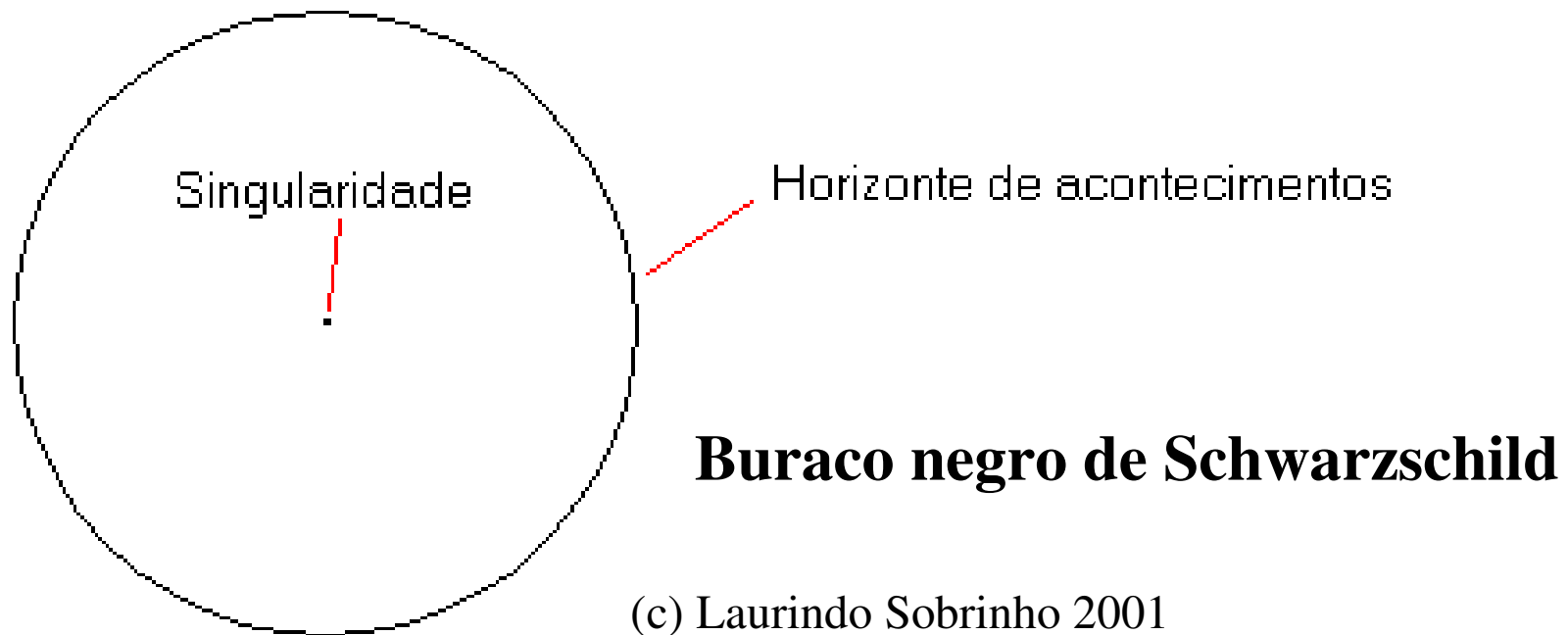
A Velocidade de escape depende da massa do planeta e do respectivo raio e **será tanto maior quanto maior for a massa e menor for o raio.**



(c) Laurindo Sobrinho 2004

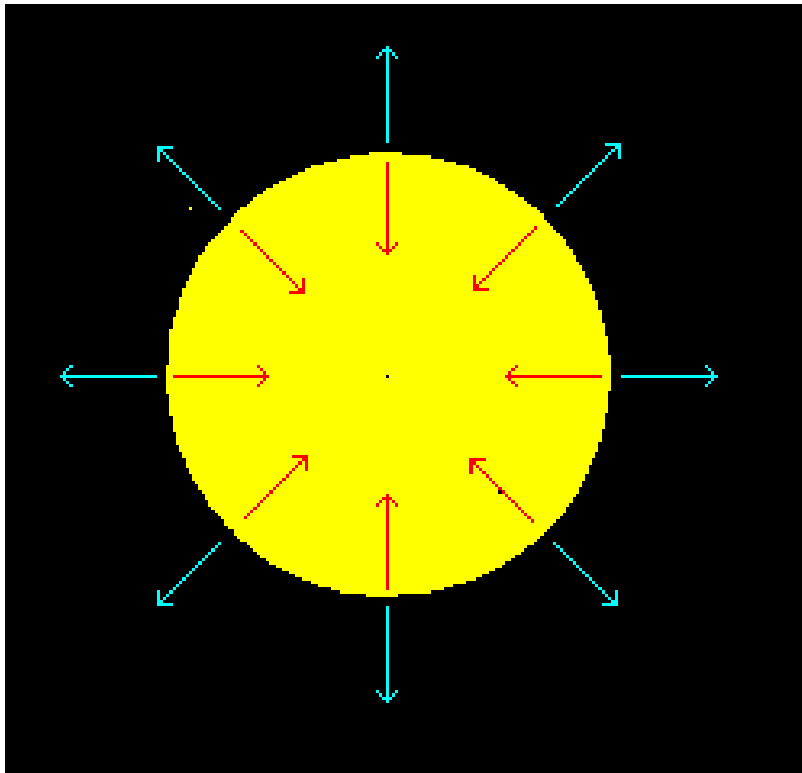
Reduzindo o volume de uma estrela, mantendo a sua massa, a respectiva velocidade de escape aumenta. Haverá um ponto no qual a **velocidade de escape iguala a velocidade da luz**. A partir desse ponto a luz da estrela já não pode escapar. Formou-se então um **horizonte de acontecimentos**.

Uma vez formado o horizonte de acontecimentos o colapso total é inevitável e a estrela é reduzida a um **volume zero** a que chamamos **singularidade**. Nesse ponto deixam de ser aplicáveis as **Leis da Física**.



Os buracos negros são objectos previstos pela Física!

Formação de buracos negros por colapso gravitacional



(c) Laurindo Sobrinho 2001

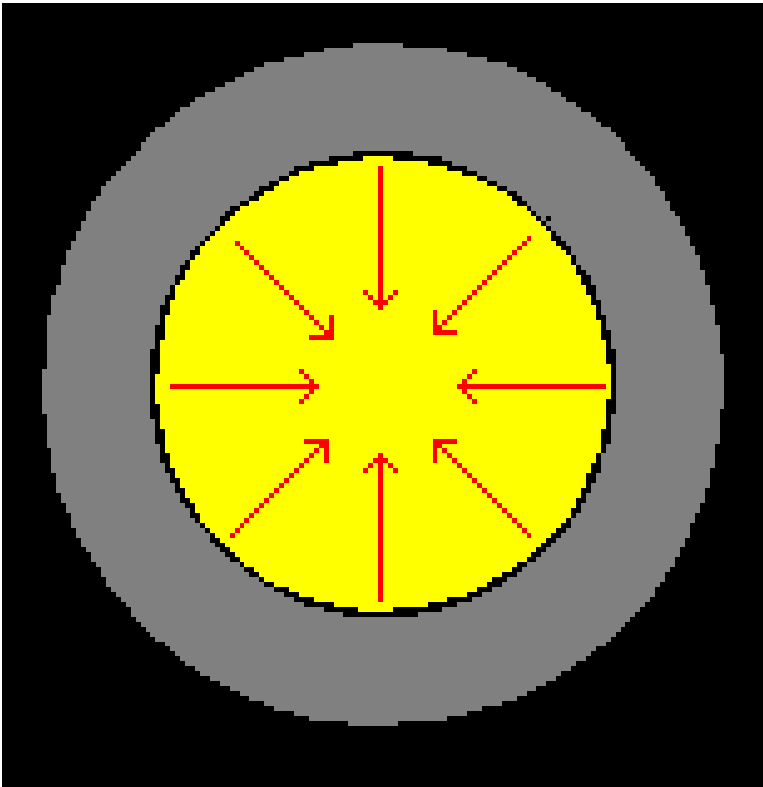
Numa estrela actuam dois tipos de forças:

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).

Se uma estrela tiver uma massa inicial superior a cerca de 50 massas solares então ela acabará explodindo como uma **supernova** deixando um núcleo rico em ferro. Nesse núcleo já não ocorrem reacções nucleares. Então passa a existir apenas uma força: a força de gravidade.



Se a massa desse núcleo for aproximadamente 1.5 massas solares então forma-se uma **estrela de neutrões**. Mas se a massa for um pouco maior então o colapso é mesmo inevitável e esse núcleo restante da estrela irá originar um **buraco negro**.

(c) Laurindo Sobrinho 2001

Classificação de Buracos Negros quanto à Massa

Subestelar – Massas a partir da *massa de Planck* 10^{-8} kg
(0.00000001 kg)

Estes buracos negros apenas se podem ter formado nos instantes iniciais do Universo.

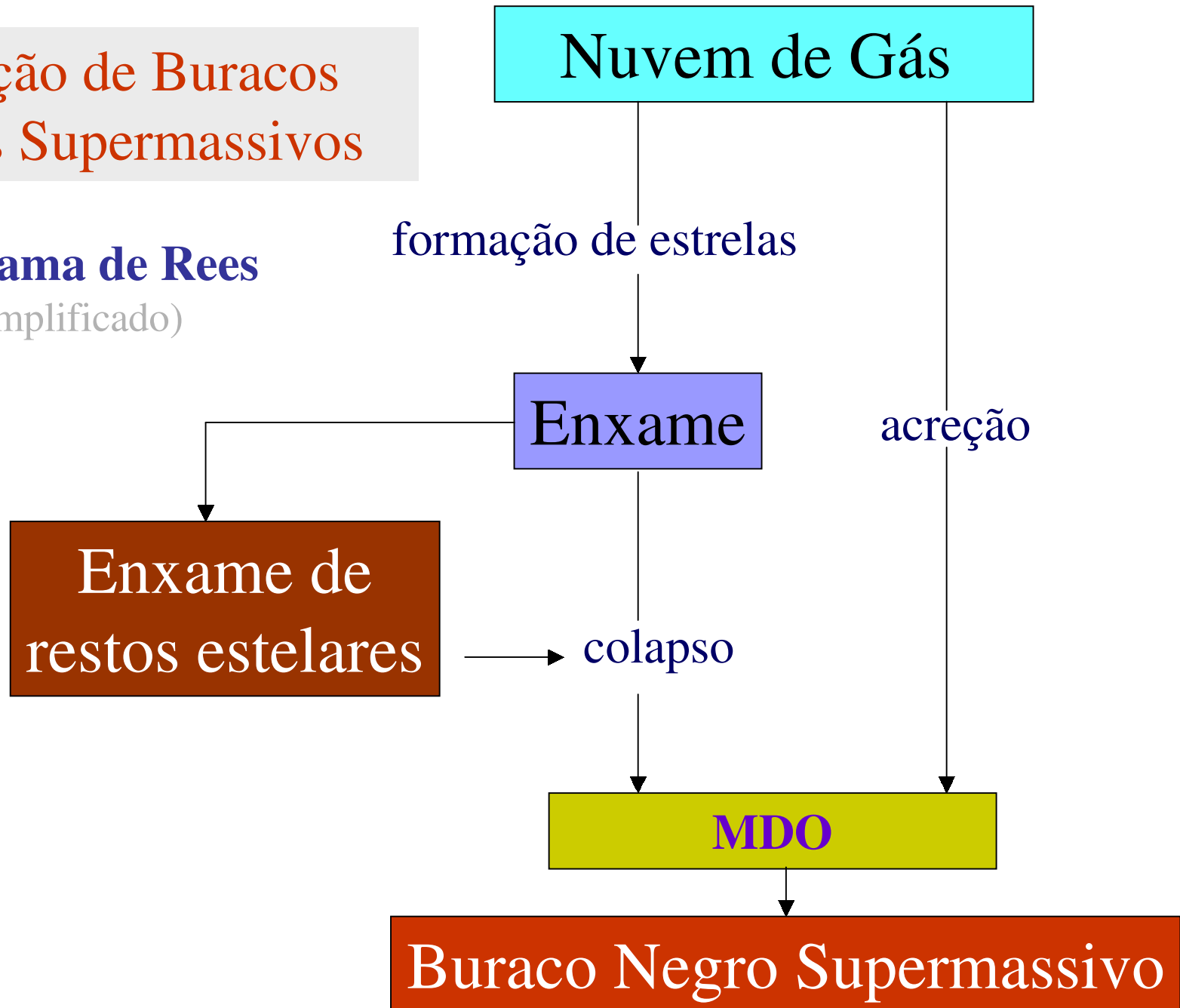
Estelares – Massas entre $1.4M_{\odot}$ e $100M_{\odot}$
Formam-se a partir do colapso de estrelas com mais de $40M_{\odot}$.


Intermédios - Massas entre $10^3 M_{\odot}$ e $10^5 M_{\odot}$
Formam-se no centro de algumas galáxias e enxames fechados.

Supermassivos – Massas entre $10^6 M_{\odot}$ e $10^{10} M_{\odot}$
Formam-se no centro de galáxias.

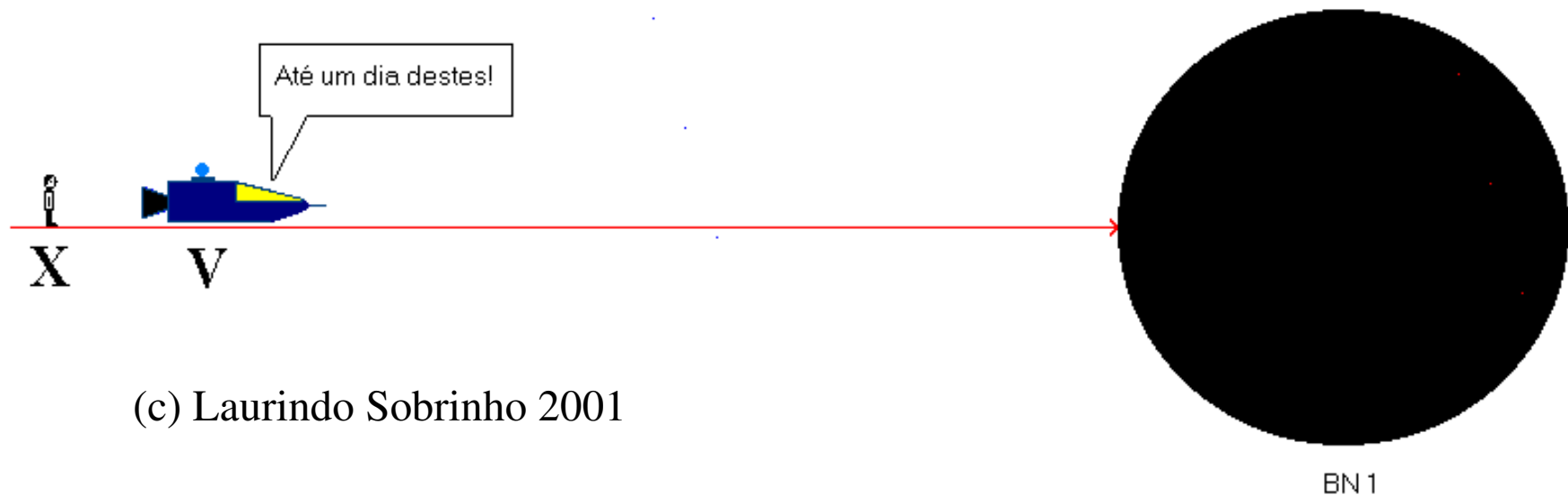
Formação de Buracos Negros Supermassivos

Diagrama de Rees (simplificado)





Viagem a um
buraco negro
de Schwarzschild



(c) Laurindo Sobrinho 2001

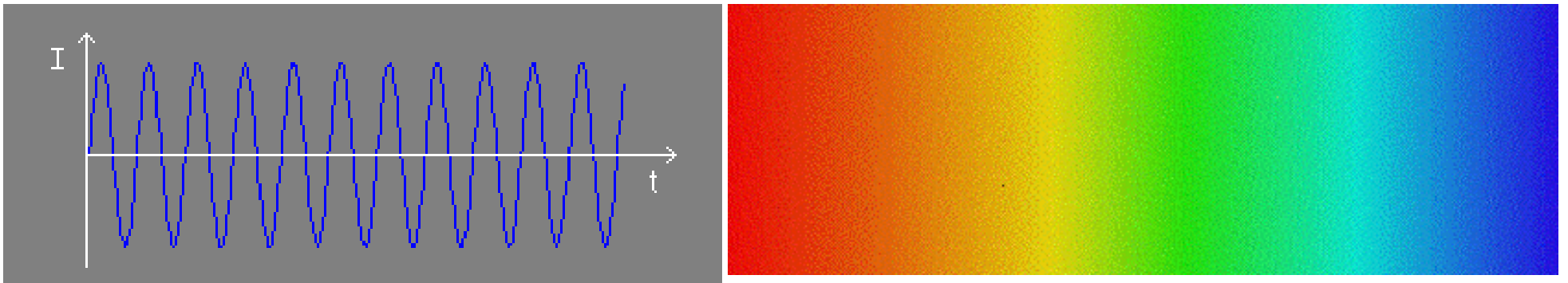
Os dois observadores sincronizam os respectivos relógios e despedem-se.

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

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

O que é um raio de luz azul ?

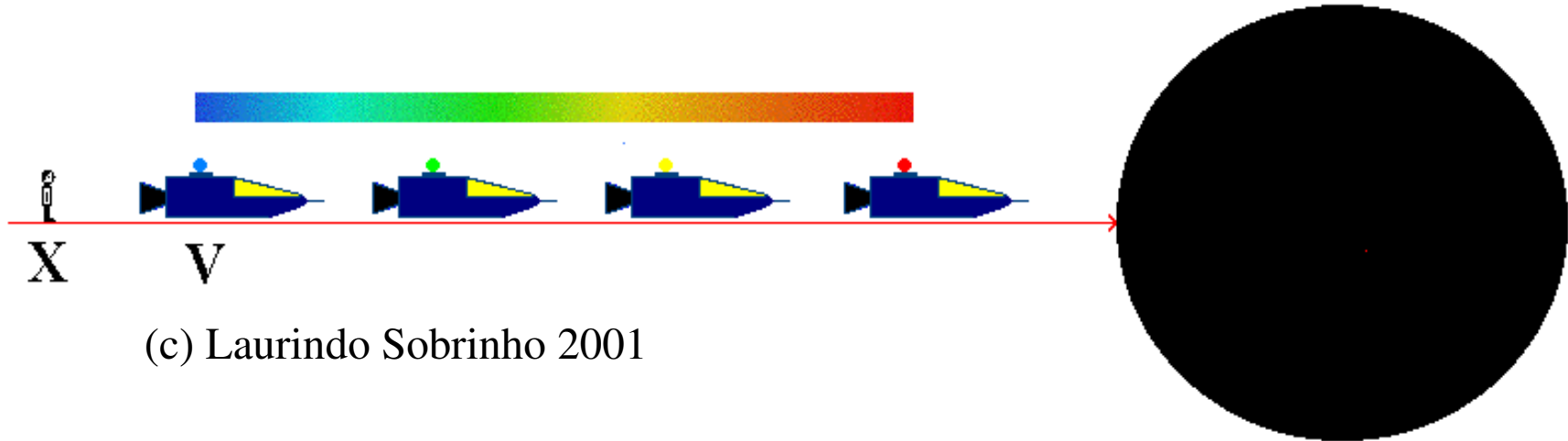
É uma onda electromagnética que efectua **667 000 000 000 000** oscilações por segundo.



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



Espectro electromagnético



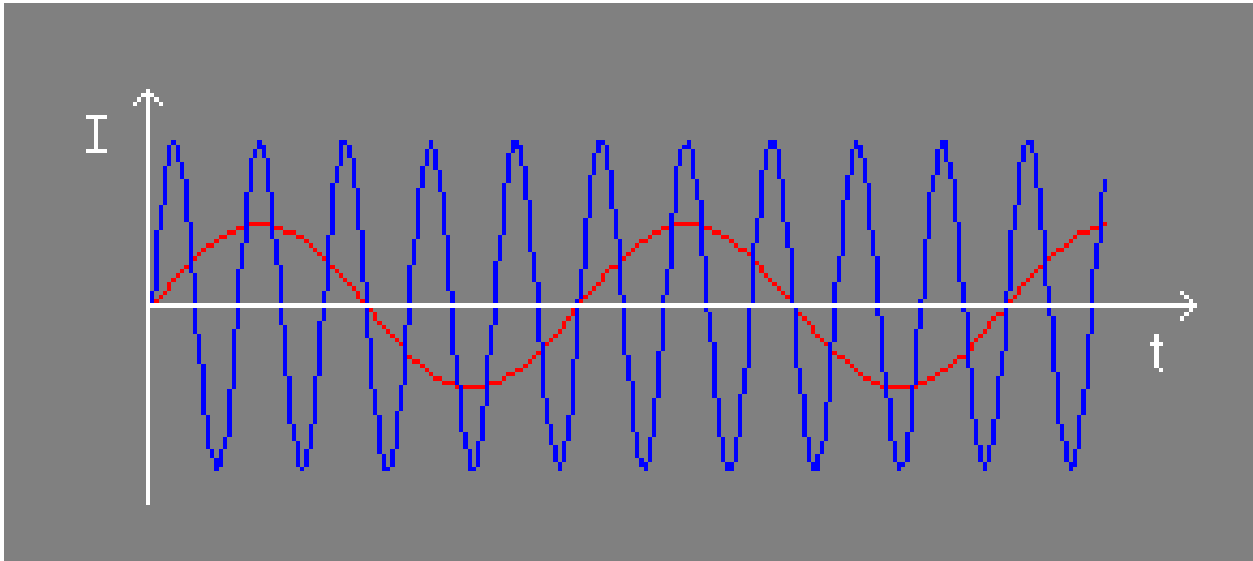
(c) Laurindo Sobrinho 2001

Este fenómeno chama-se

Desvio para o vermelho (RedShift)

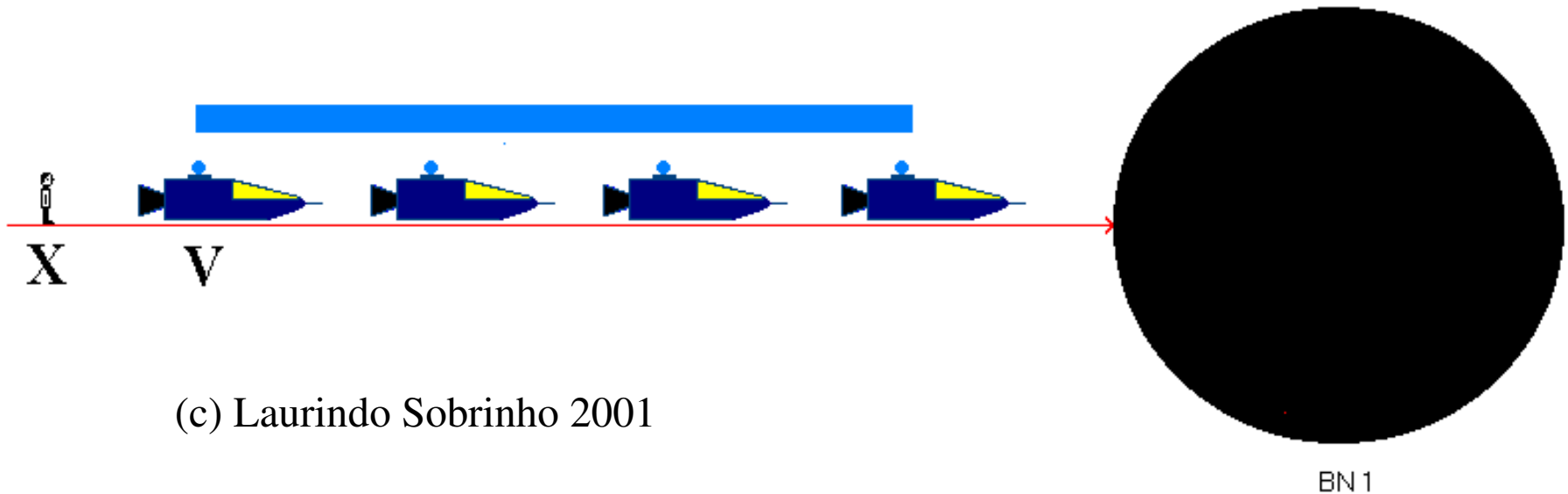
(de origem gravitacional).

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



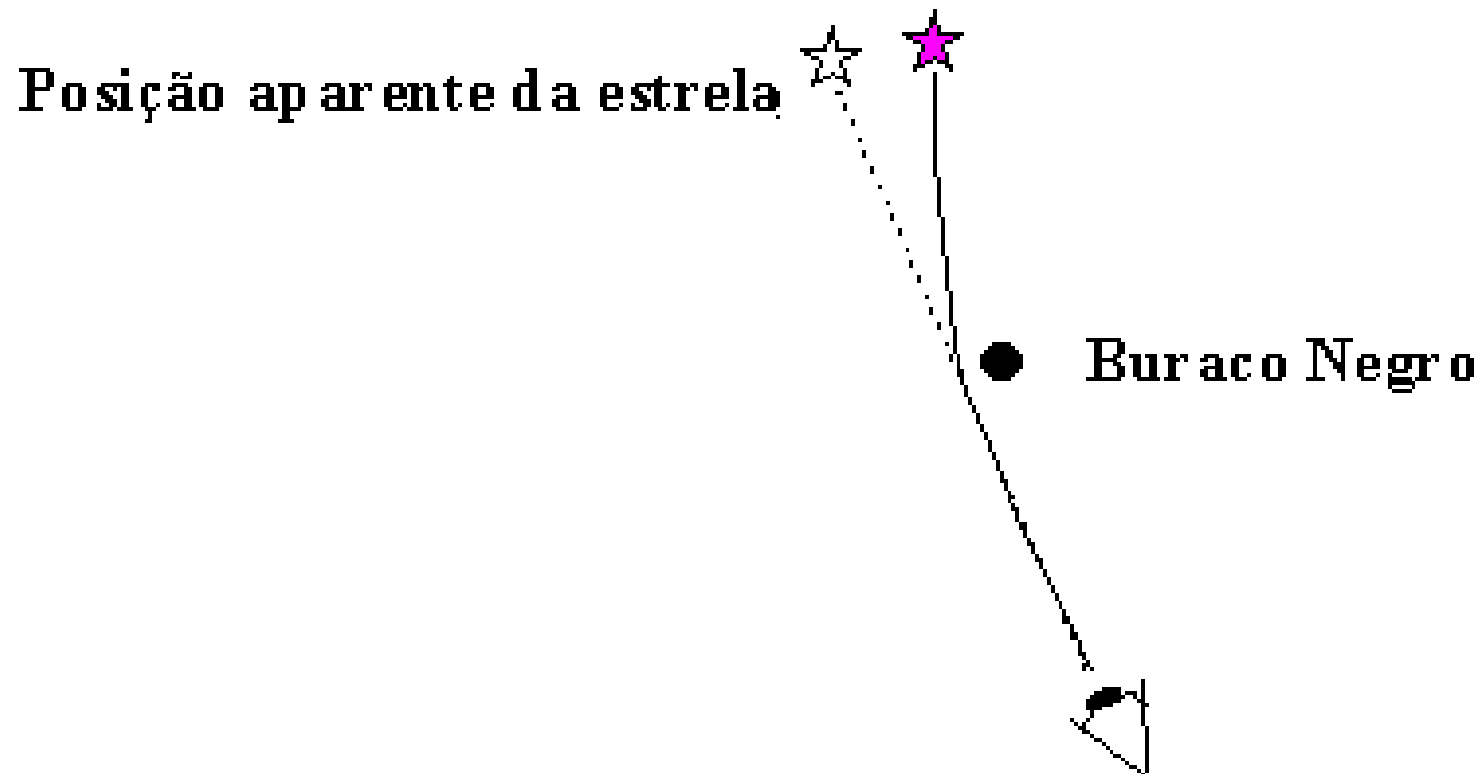
Do ponto de vista do observador X a nave **nunca** chega ao **horizonte**. No entanto como a luz que vem da nave é cada vez menos intensa esta acaba por ser indetectável. Haverá um ponto em que essa radiação será confundível com a radiação de fundo.

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



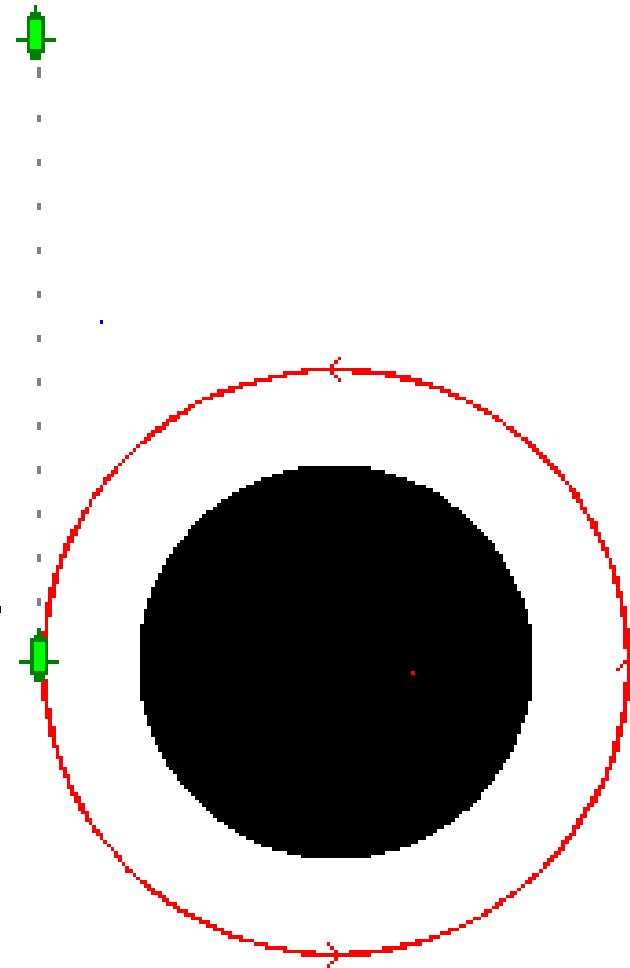
(c) Laurindo Sobrinho 2001

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



Órbitas Circulares para os raios de luz

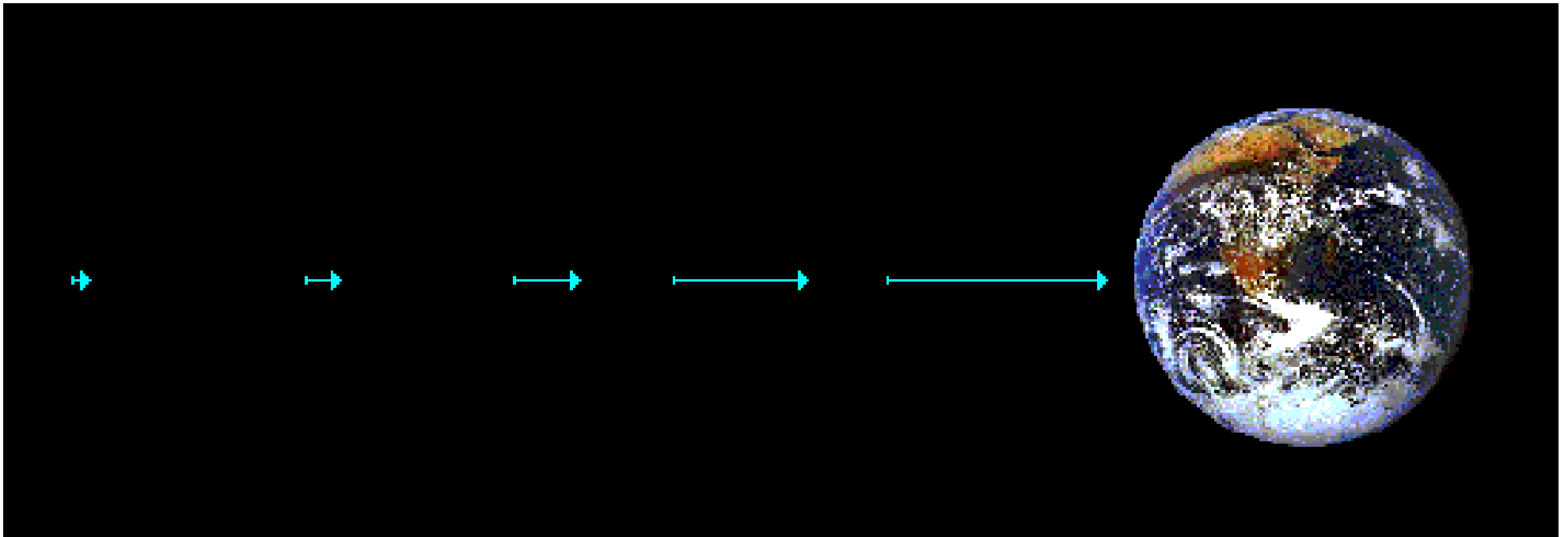
**Está uma nave igual
à nossa lá adiante !**



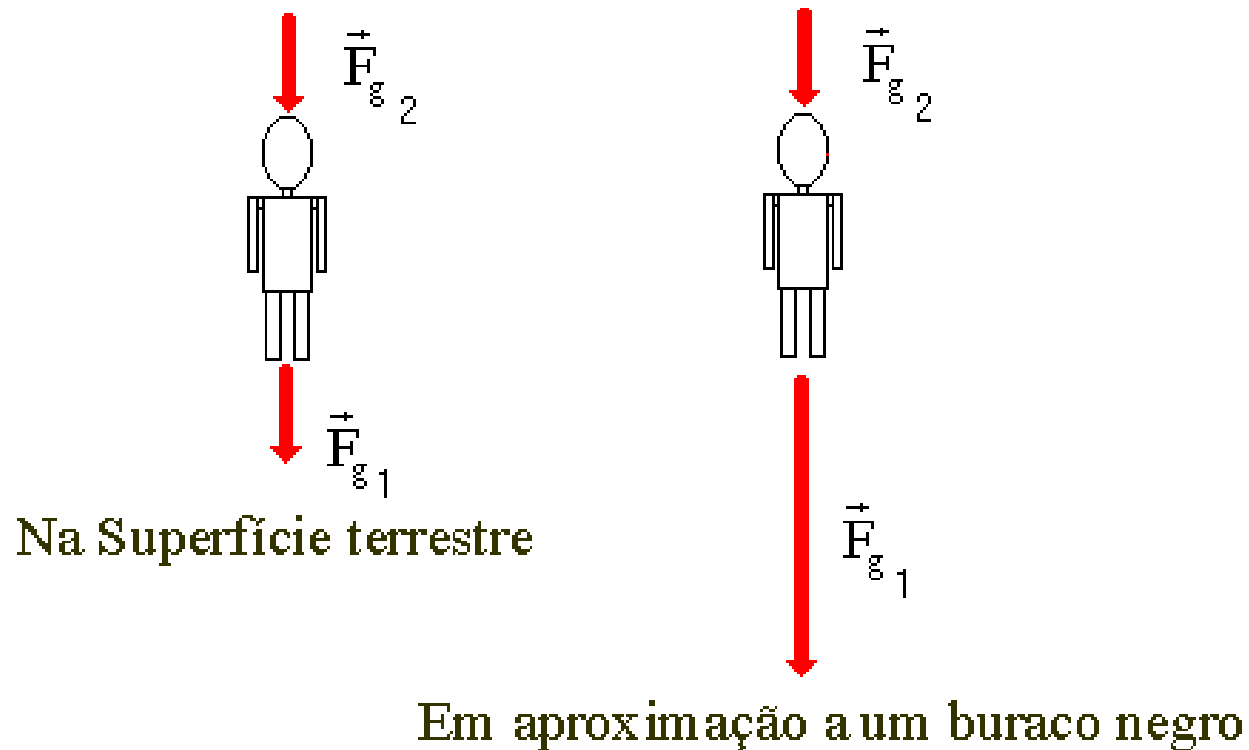
(c) Laurindo Sobrinho 2001

Forças de maré

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



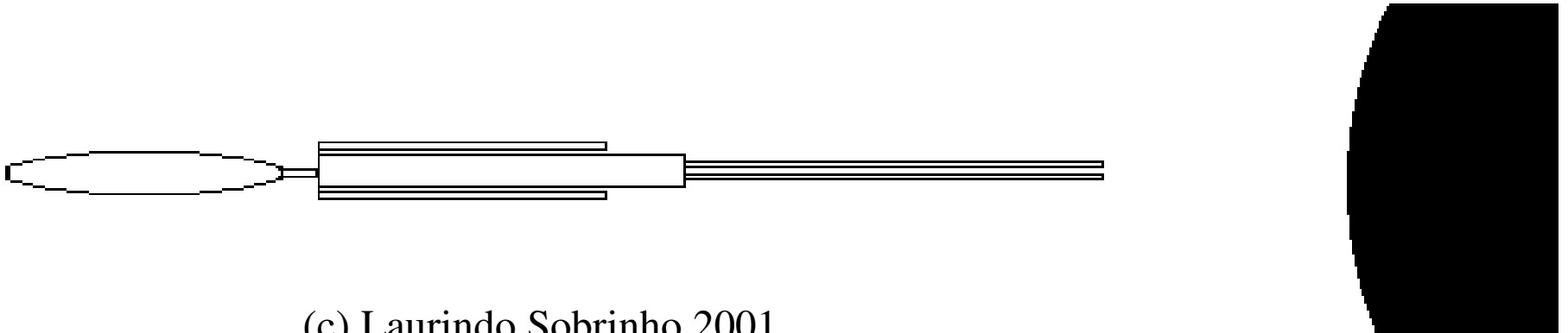
(c) Laurindo Sobrinho 2001



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

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

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



(c) Laurindo Sobrinho 2001

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

Evitando a Singularidade

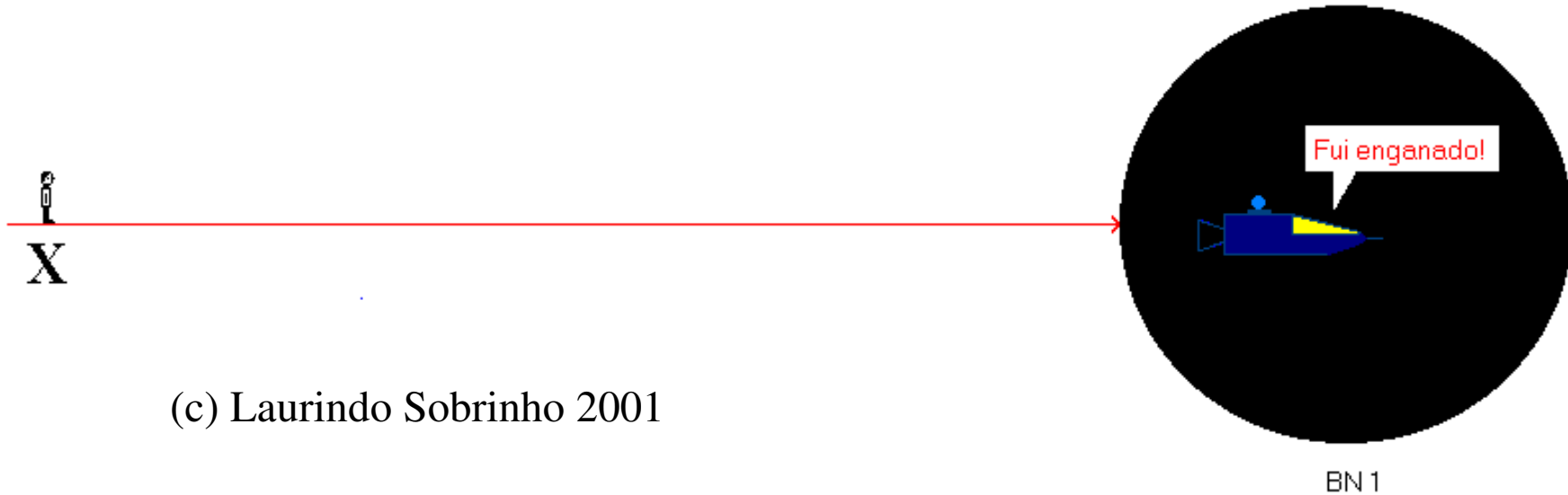
Uma vez ultrapassado o **horizonte de acontecimentos** será possível evitar a **singularidade** ?

NÃO !!!

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

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

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



(c) Laurindo Sobrinho 2001

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

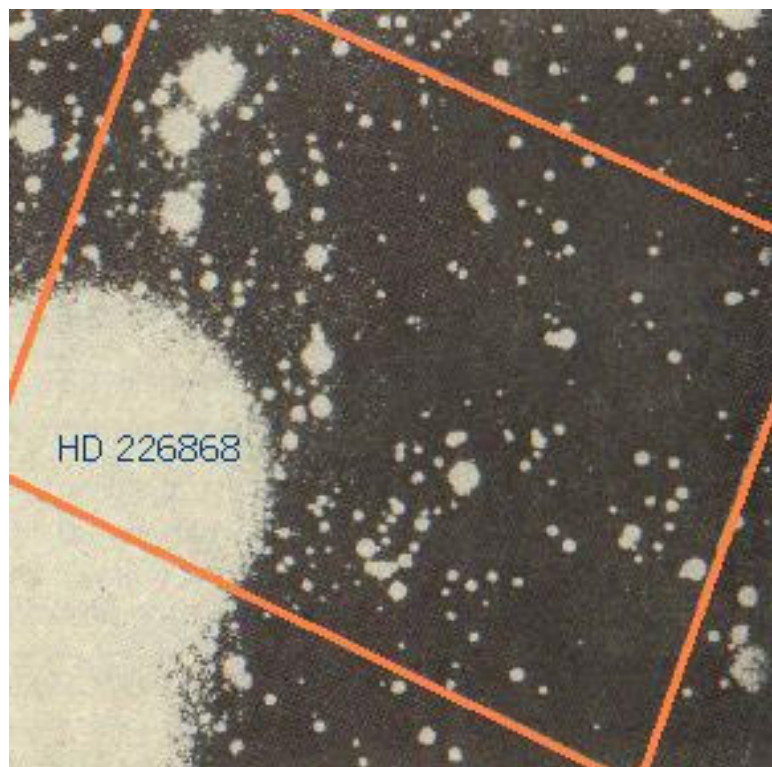
**No interior do buraco negro espaço e tempo trocam de
papeis não sendo, por isso, possível estar em repouso num
ponto do espaço!**

Cygnus X1

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** de magnitude aparente é 9 (não é visível a olho nu) e com 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.

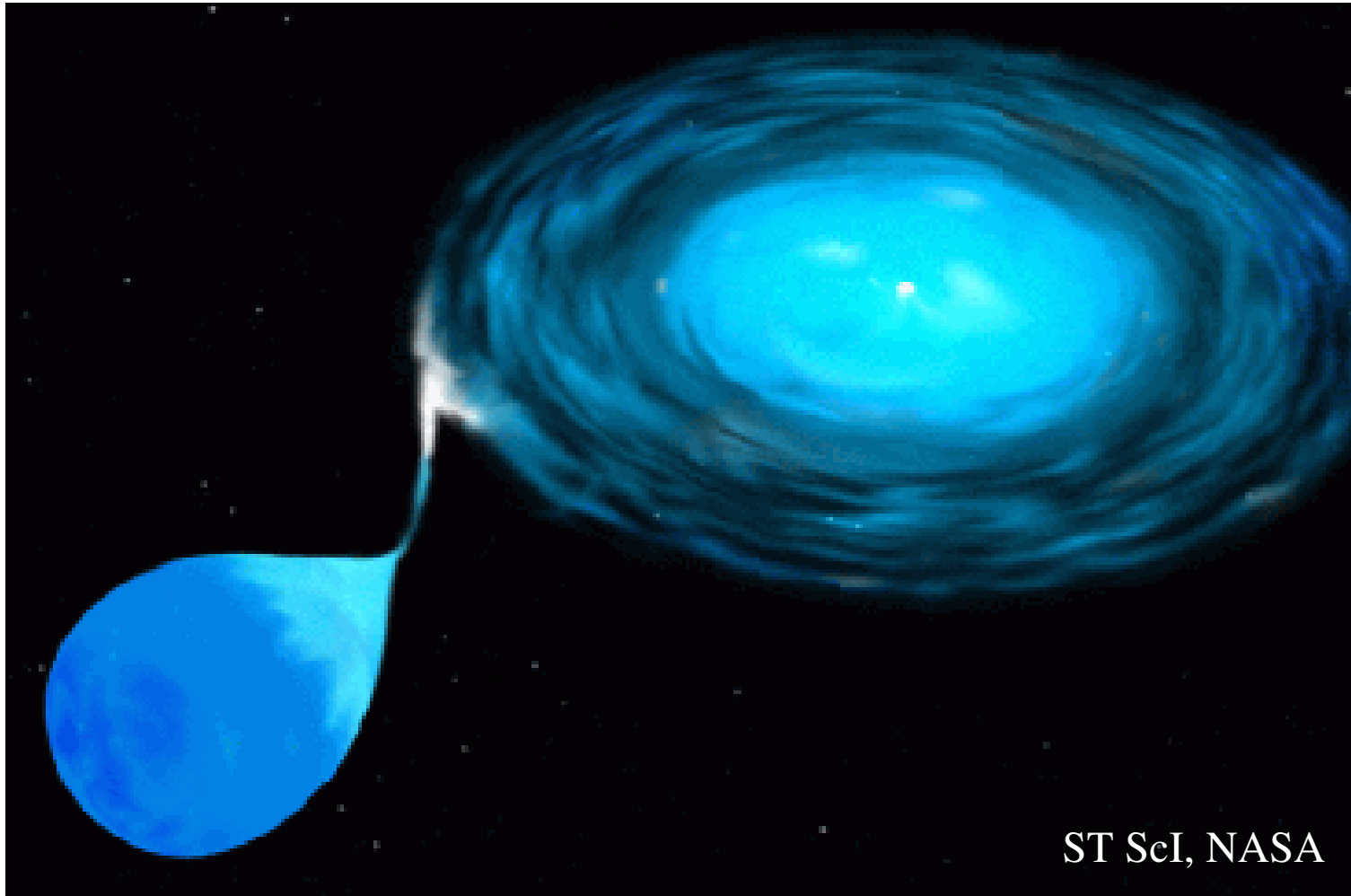


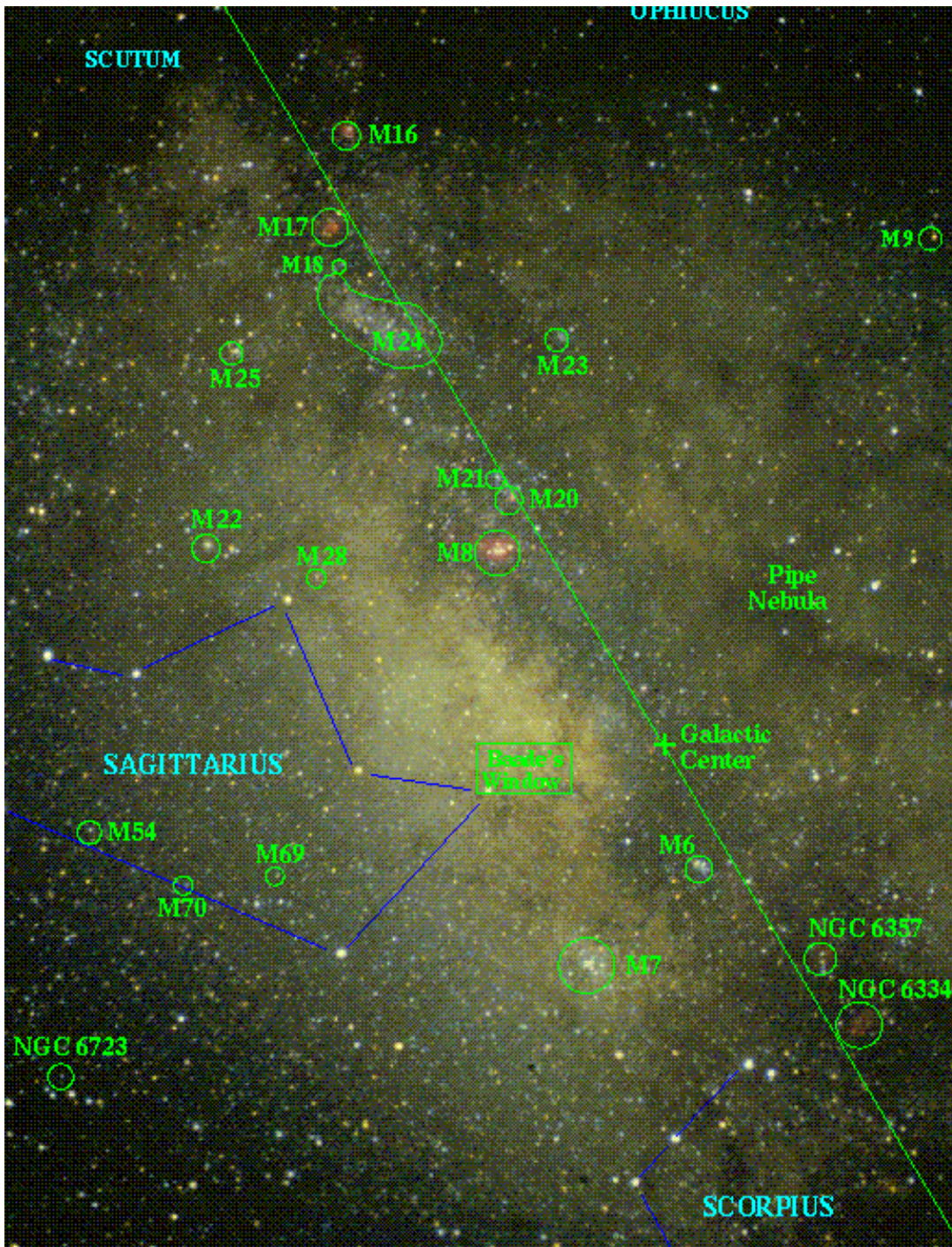
adaptado de Kitty Ferguson, "*Prisões de Luz*", Ed. Bizâncio 2000

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 os valores exactos do ângulo de inclinação do sistema e 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.

Alguma da matéria mais exterior da **gigante azul** acaba por ser capturada pelo **buraco negro** formando-se assim um disco de gás em torno deste. Da fricção entre camadas adjacentes de gás resulta a emissão de radiação, nomeadamente **Raios X**.

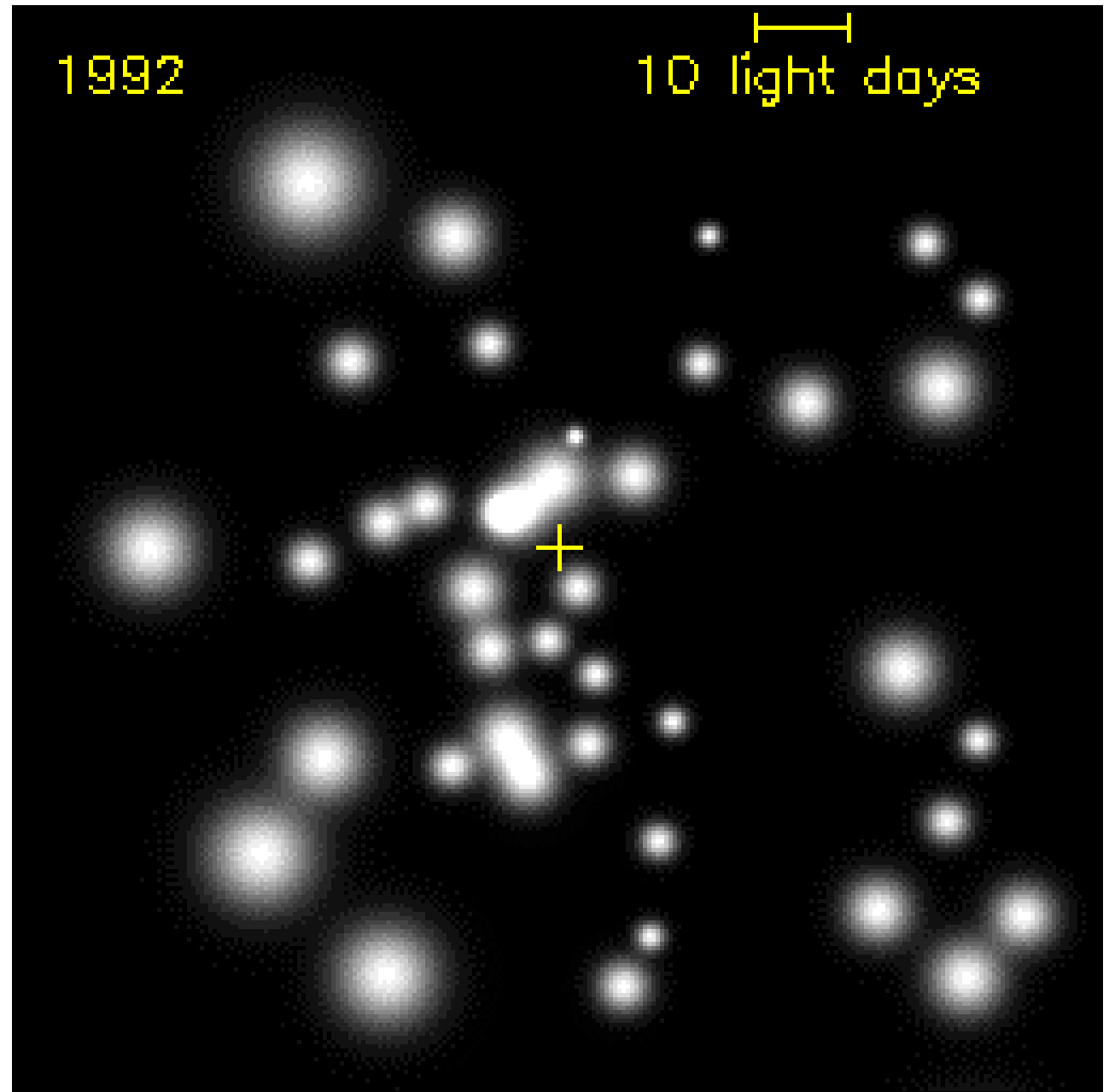




Via Láctea

O centro da Galáxia fica na direcção da constelação de **Sagitário** a cerca de 25 000 anos luz do Sol.

Estrelas
movimentando-se
com velocidades
da ordem dos
1000 km/s
a apenas alguns
dias luz do centro
onde fica a fonte
de rádio **Sgr A***.



Massa

(c) Laurindo Sobrinho 2003

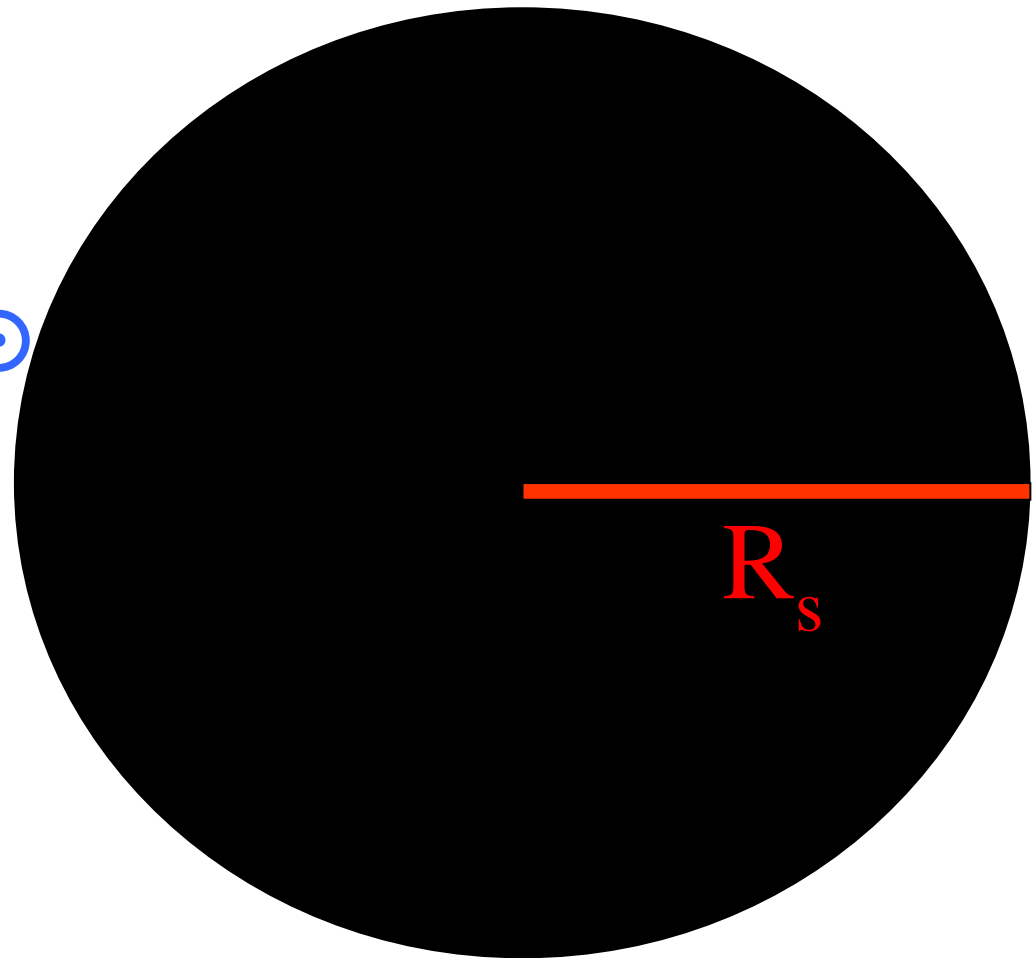
$2.6 \times 10^6 M_{\odot}$

2 600 000 M_{\odot}

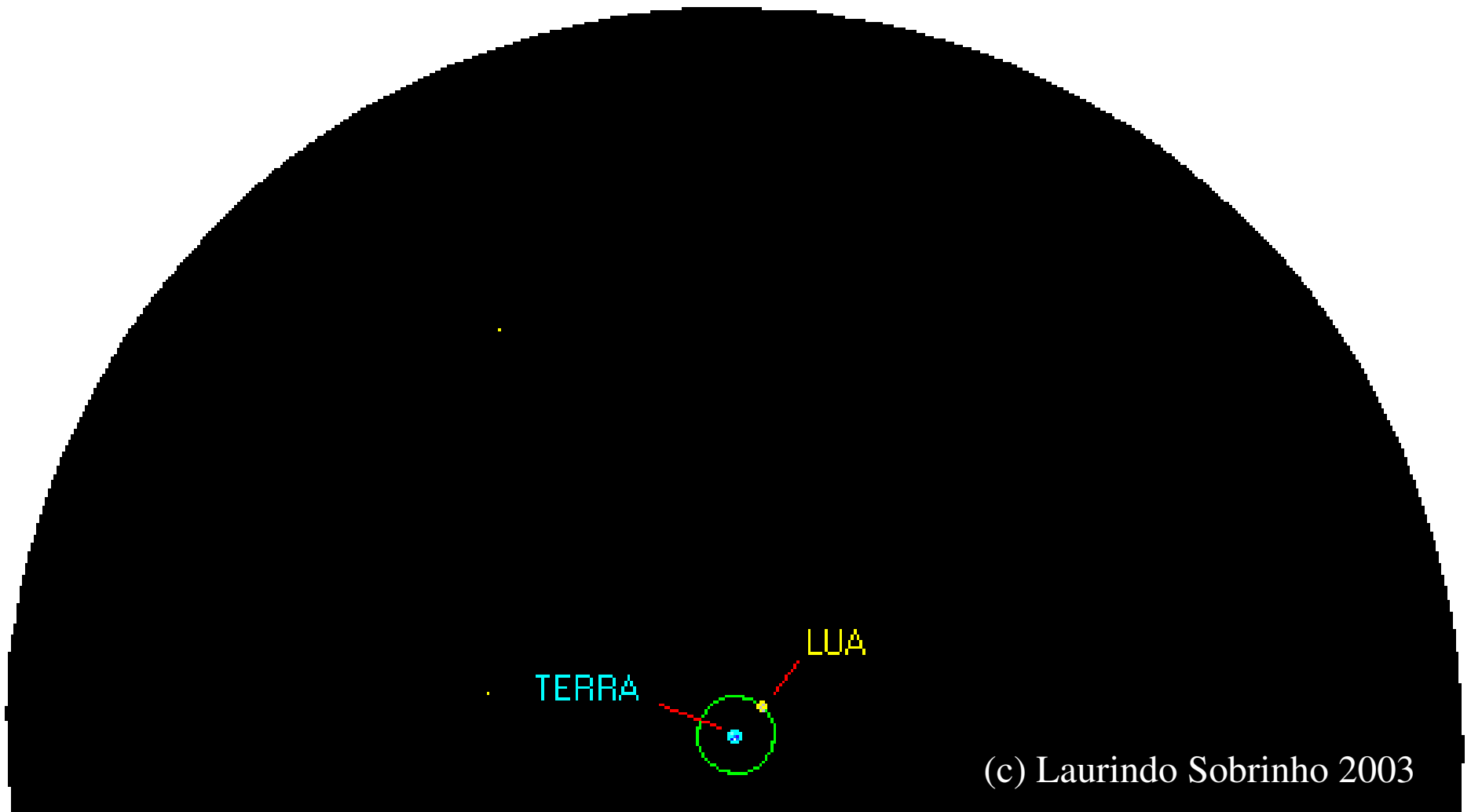
$M_{\odot} \approx 2 \times 10^{30} \text{ kg}$

$5.2 \times 10^{36} \text{ kg}$

5 200 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 kg

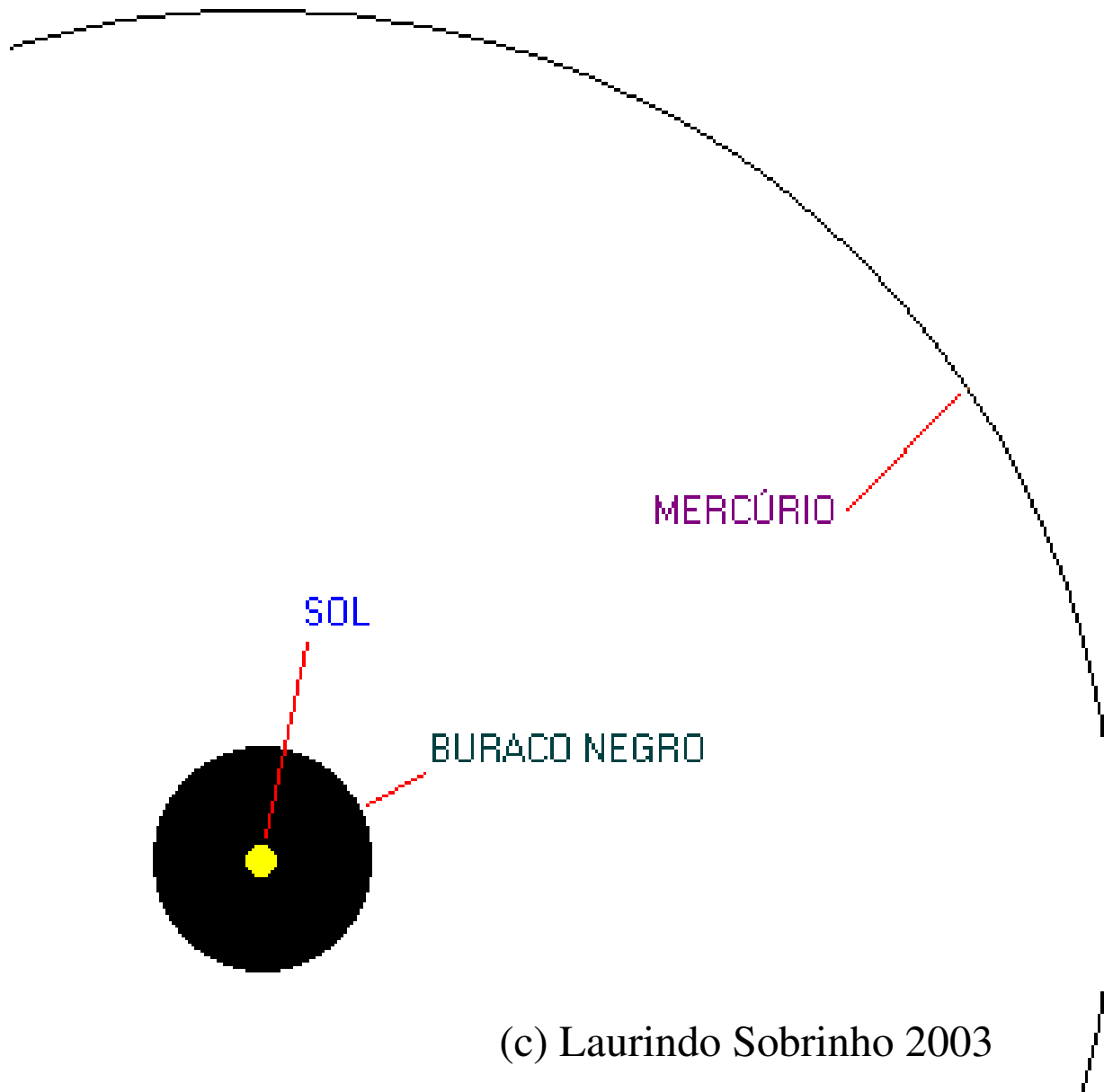


R_s corresponde a cerca de 19 vezes a distância
da Terra à Lua



(c) Laurindo Sobrinho 2003

R_s corresponde a cerca de 11 vezes o raio do **Sol**!

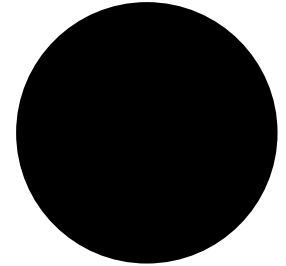


O raio da órbita do planeta **Mercúrio** é aproximadamente 7.5 Raios de Schwarzschild.

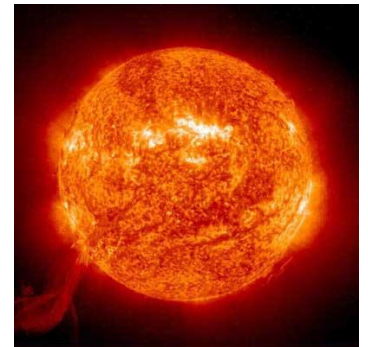
A **Terra** fica a cerca de 19 Raios de Schwarzschild do centro.

(c) Laurindo Sobrinho 2003

Se existir mesmo um buraco negro de 2.6 milhões de massas solares no centro da Nossa Galáxia qual a sua influência sobre nós?



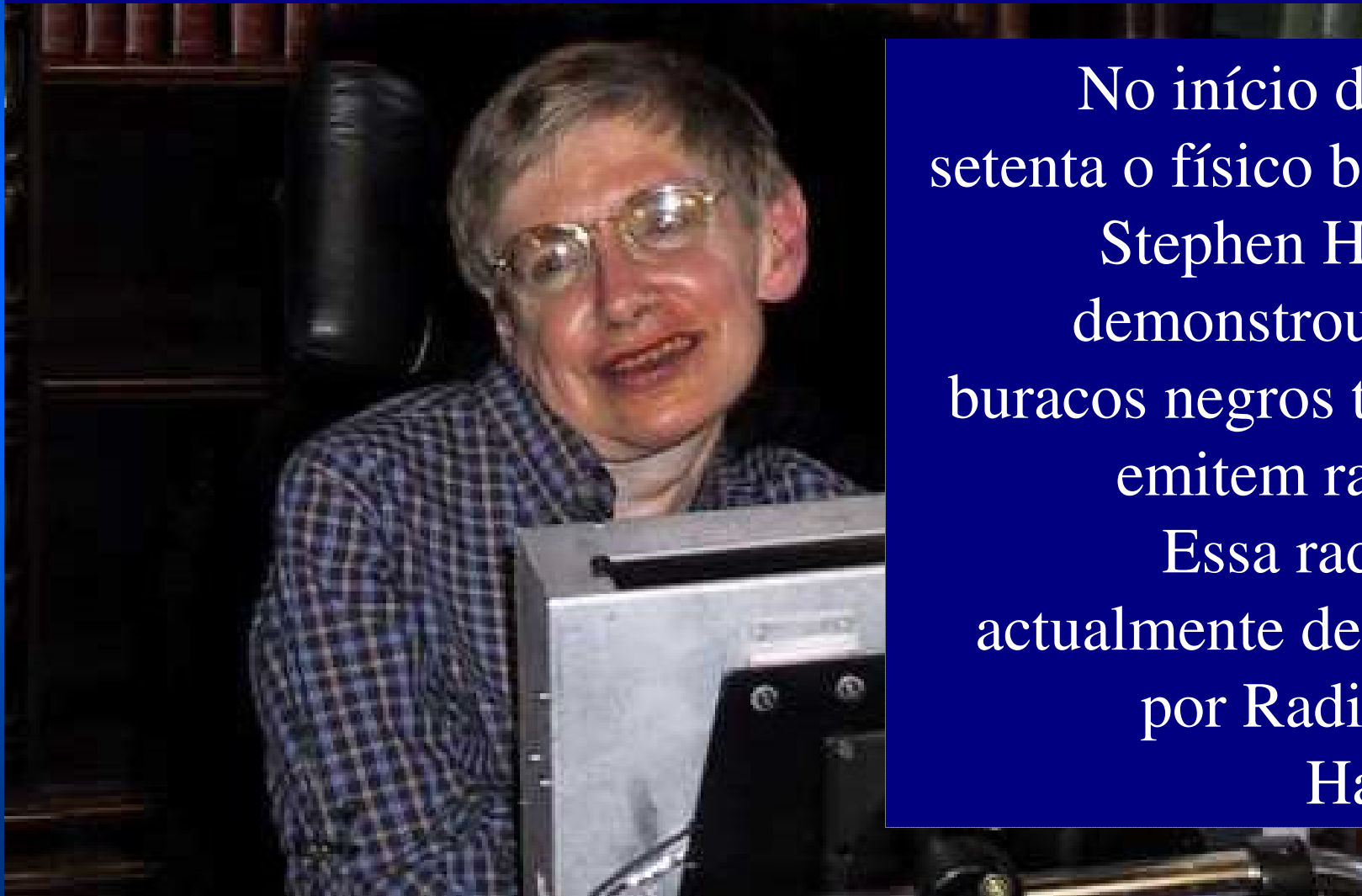
Em termos de atracção gravítica o Sol é cerca de 1 000 000 000 000 (10^{12}) vezes mais influente.



Mas nem ligamos “muito” à força gravítica do Sol porque o que sentimos mesmo é a atracção da Terra!



Radiação de Hawking



No início dos anos setenta o físico britânico Stephen Hawking demonstrou que os buracos negros também emitem radiação.

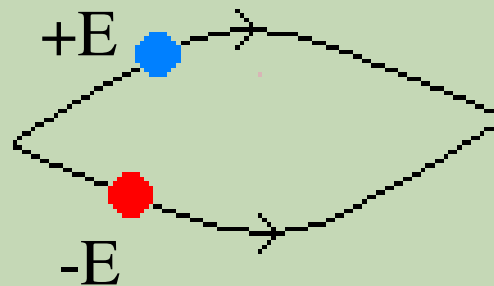
Essa radiação é actualmente designada por Radiação de Hawking.

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.

Cada ponto do espaço tem sempre a si associado uma incerteza mínima. Essa incerteza manifesta-se sob a forma de **pequenas flutuações** no valor do campo.

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**.



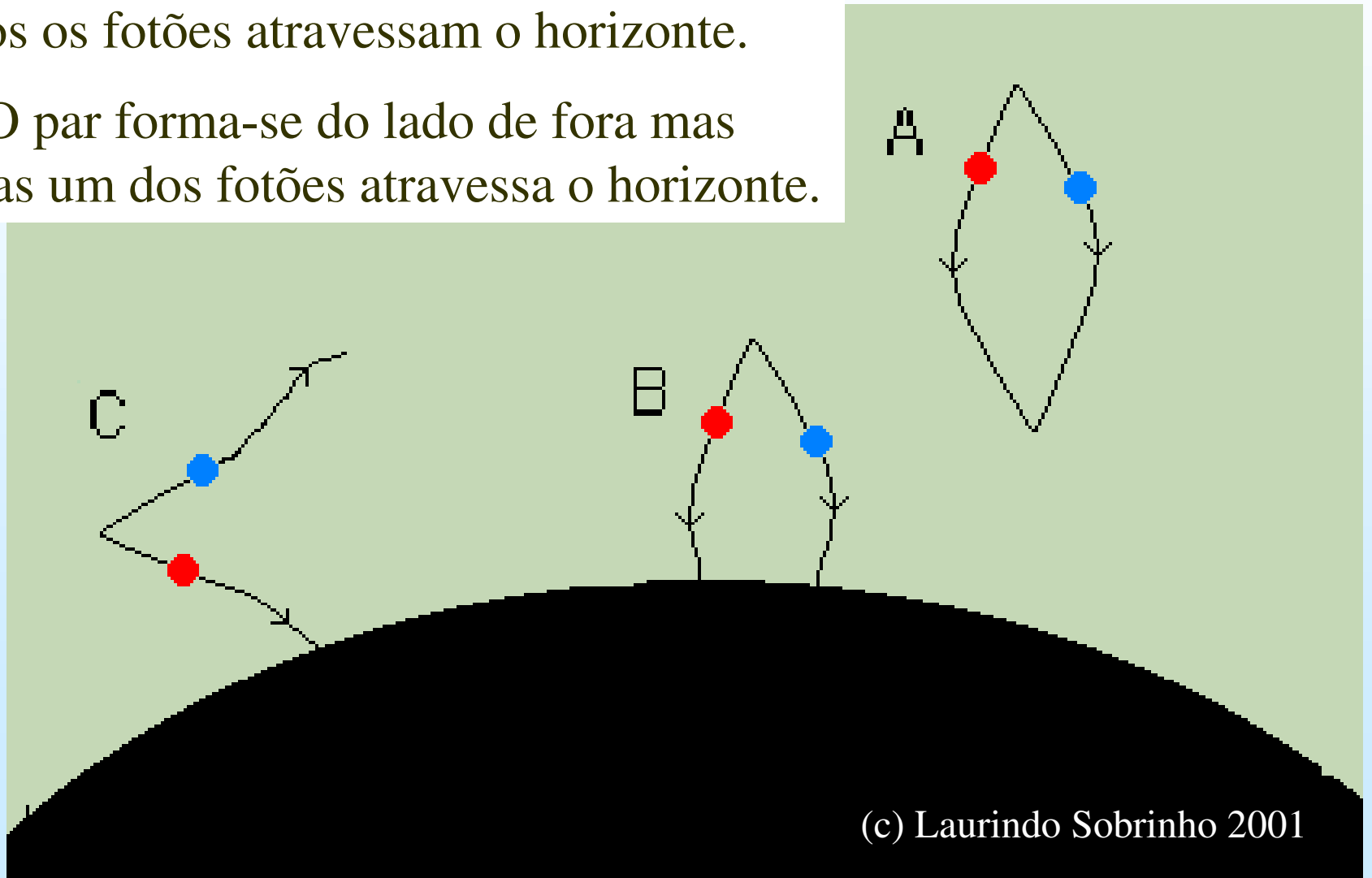
Par Partícula - Antipartícula

(c) Laurindo Sobrinho 2001

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

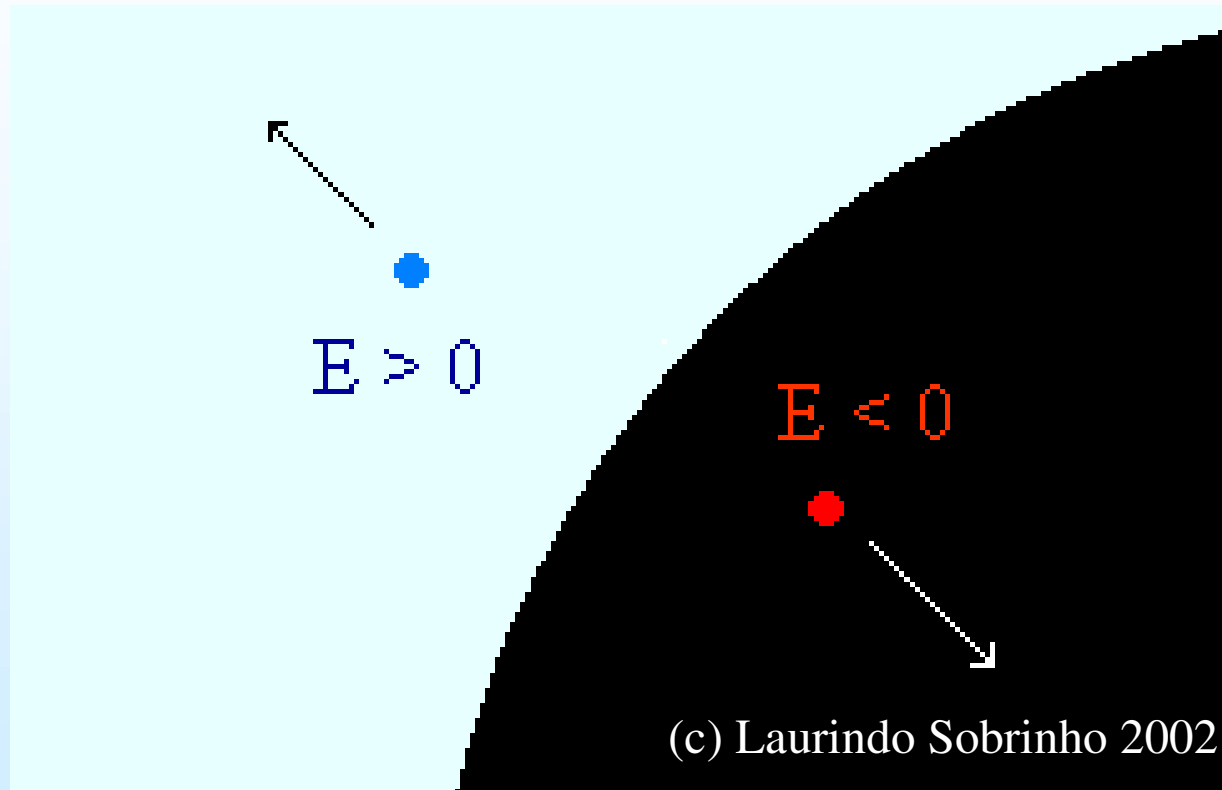
B – O par forma-se do lado de fora e ambos os fótons atravessam o horizonte.

C – O par forma-se do lado de fora mas apenas um dos fótons 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.



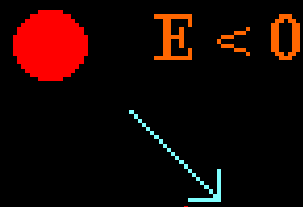
O fóton de energia negativa, uma vez do lado de lá do horizonte de acontecimentos, pode deslocar-se **livremente** até a singularidade.

O fóton que atravessou o horizonte tem **energia negativa** o que 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.**

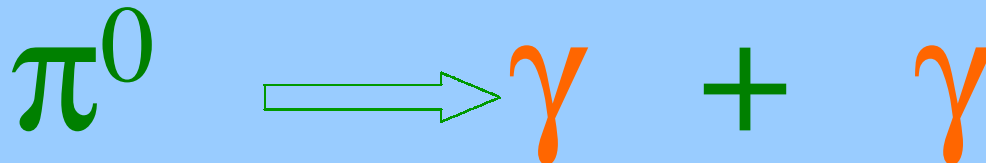
Na Radiação de Hawking são emitidas principalmente :
neutrinos, fótons e gravitões.

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

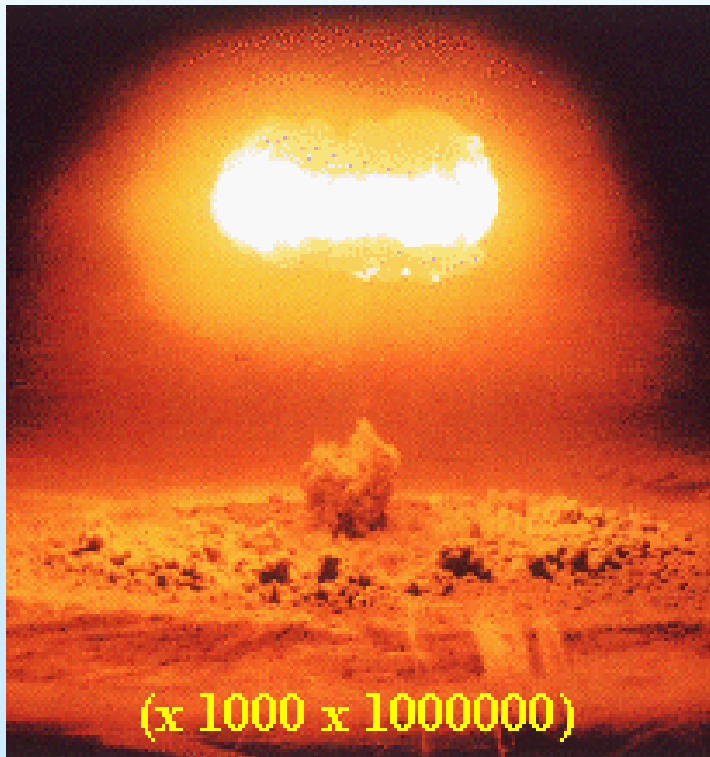
Quando a massa ronda os 10^{11} Kg são emitidos abundantemente **mesões Pi (piões)** : π^+ , π^0 e π^- bem como as respectivas antipartículas.

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



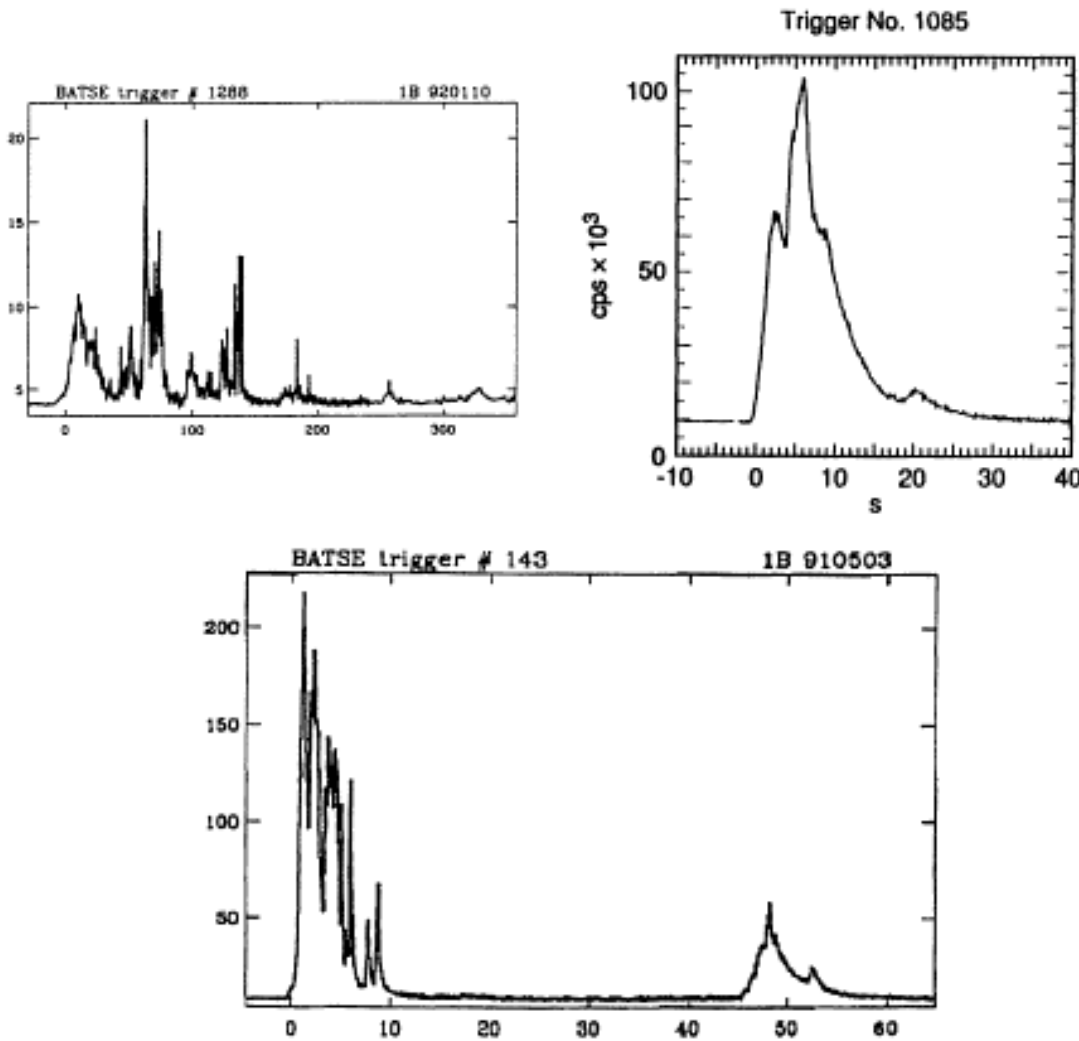
O **mesão π^0** tem um tempo de vida média de apenas $2 \cdot 10^{-16}$ s (0.000 000 000 000 000 2 s). Após esse tempo desintegra-se em dois **fotões gama** altamente energéticos.

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**.**



FIM

Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira

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