

Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira

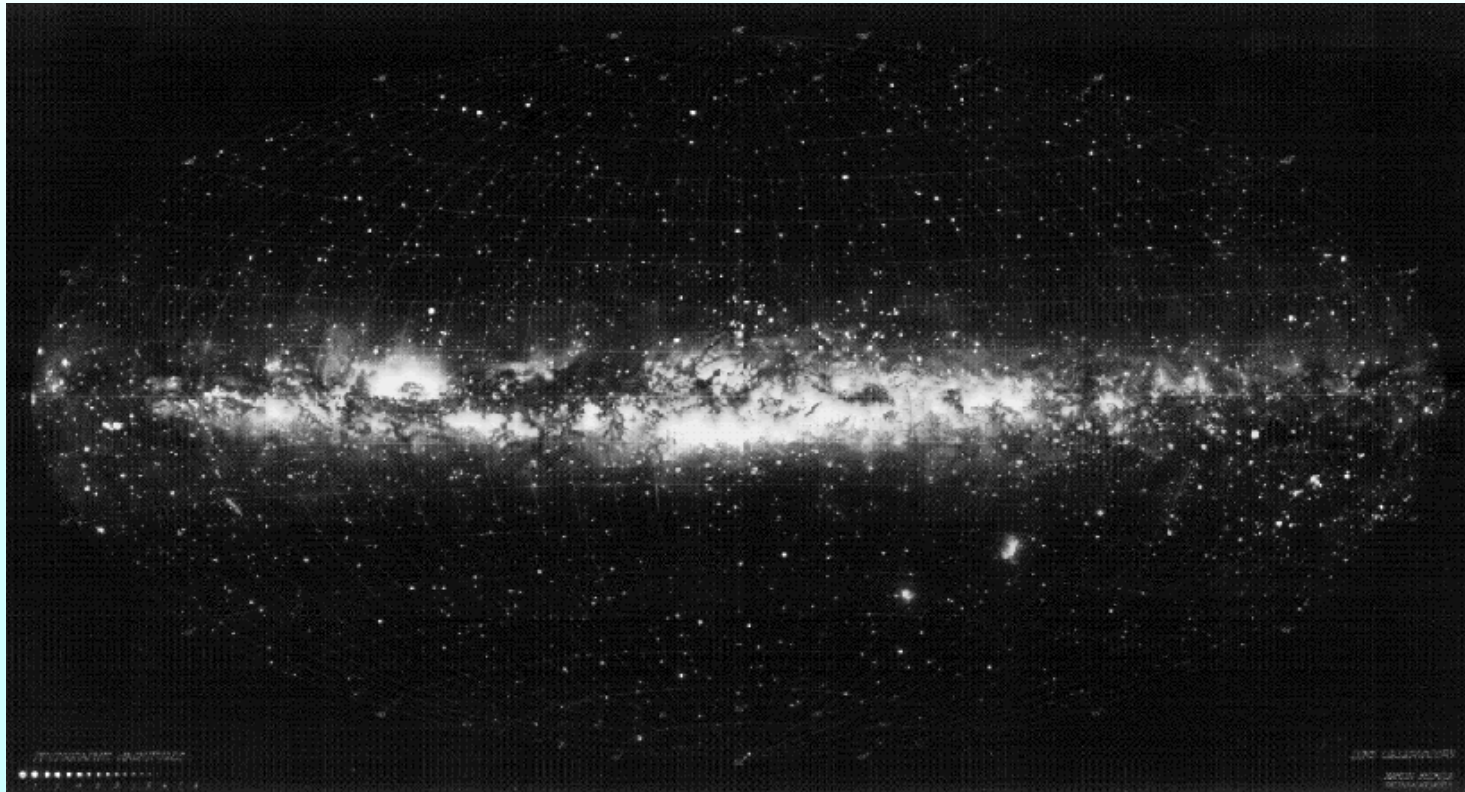
O Buraco Negro
no centro da
Nossa Galáxia

Laurindo Sobrinho

III Semana da Astronomia

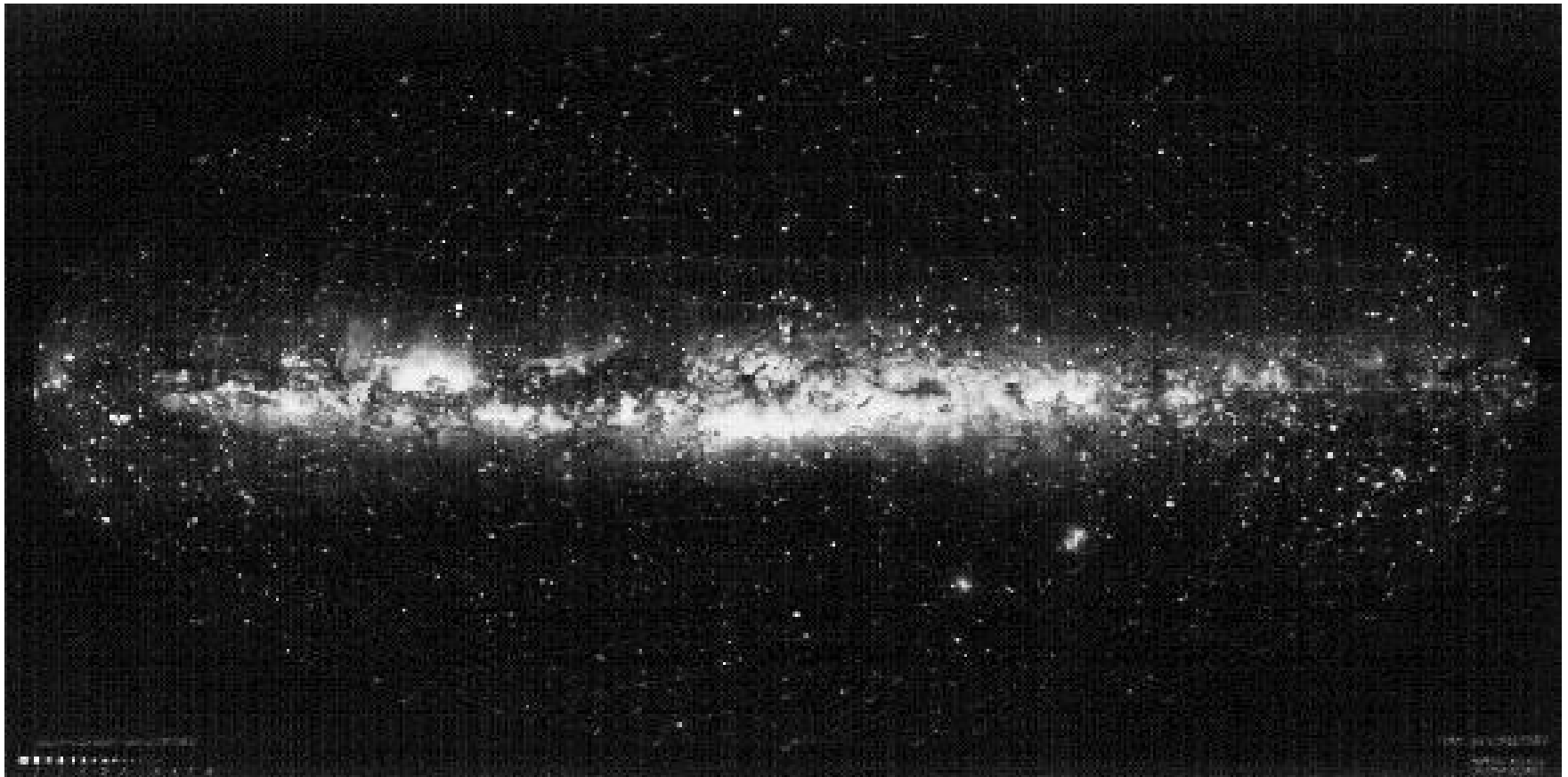
15 de Julho de 2003

A Nossa Galáxia



(c) Lund Observatory

Se olharmos para o Céu numa noite de Verão limpa e escura veremos uma espécie de nuvem que se estende na direcção Norte-Sul. Ao longo da história atribuíram-se vários nomes a esta mancha nebulosa, entre os quais aquele que ainda hoje utilizamos : **Via Láctea**



(c) Lund Observatory

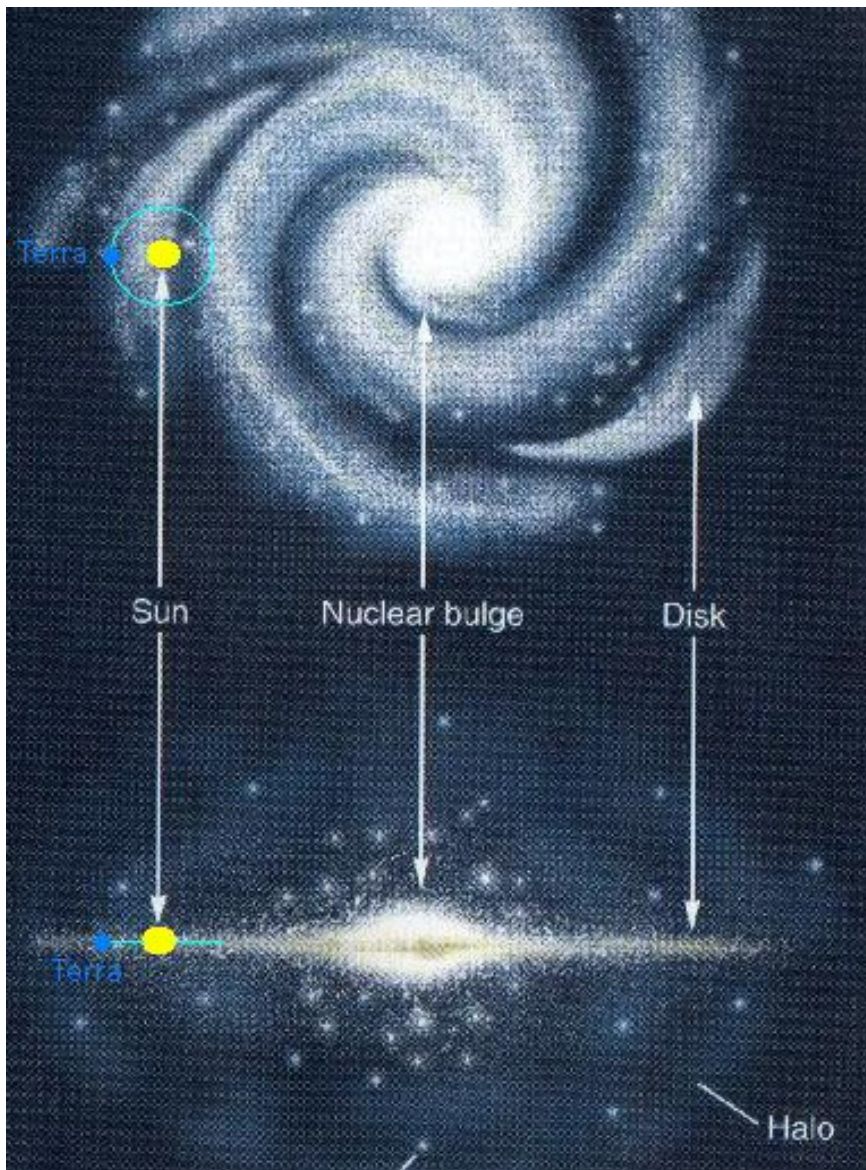


Região central da Via Láctea

Com a chegada do Telescópio foi possível observar mais de perto a **Via Láctea** e verificar que aquilo que inicialmente parecia uma nuvem era na realidade uma grande concentração de **estrelas distantes**.

O Sistema Solar faz parte de uma galáxia, do tipo espiral, que comporta 200 000 milhões de estrelas.

200 000 000 000 estrelas



Nos meses de **Verão** a posição da Terra é tal que podemos olhar em direcção às regiões mais centrais da galáxia. Como essas regiões estão bastante distantes o que vemos é uma espécie de nebulosidade: a **Via Láctea**.

Nos meses de **Inverno** olhar o Céu nocturno equivale a olhar para os bordos da galáxia e por isso não vemos nada comparável à Via Láctea (embora continuem a ser visíveis milhares e milhares de estrelas).

Qual o nome da nossa galáxia ?

Normalmente é utilizado um dos seguintes nomes:

Nossa Galáxia

Galáxia

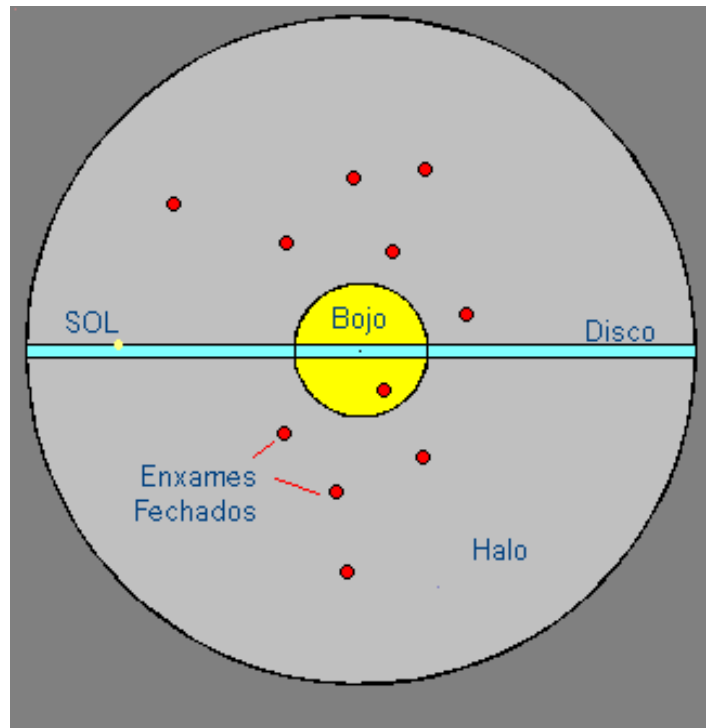
Galáxia da Via Láctea

Via Láctea

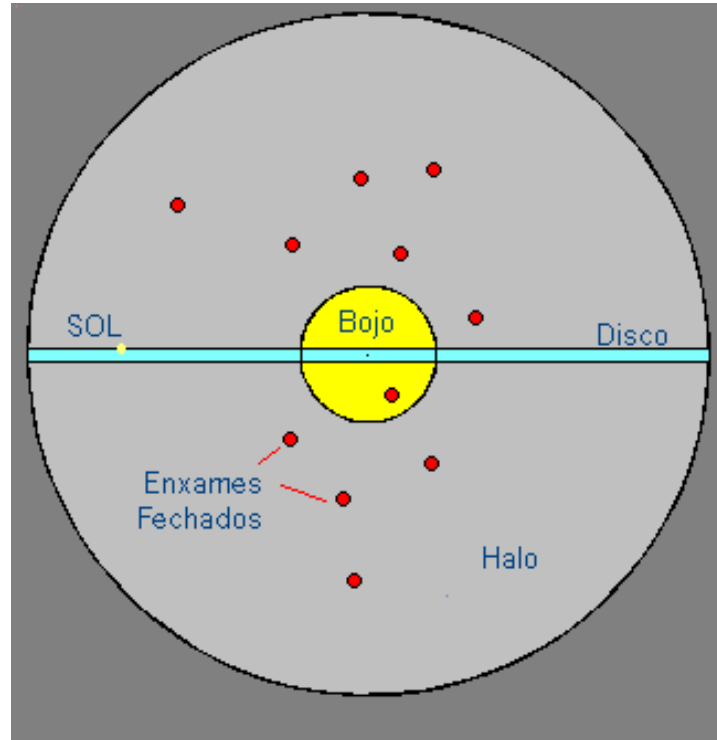
Estrutura e dimensões da Galáxia

A Nossa Galáxia é composta por:

- uma **zona central** aproximadamente esférica, com cerca de 3250 anos luz de raio, a que damos o nome de **bojo** (ou bolbo).



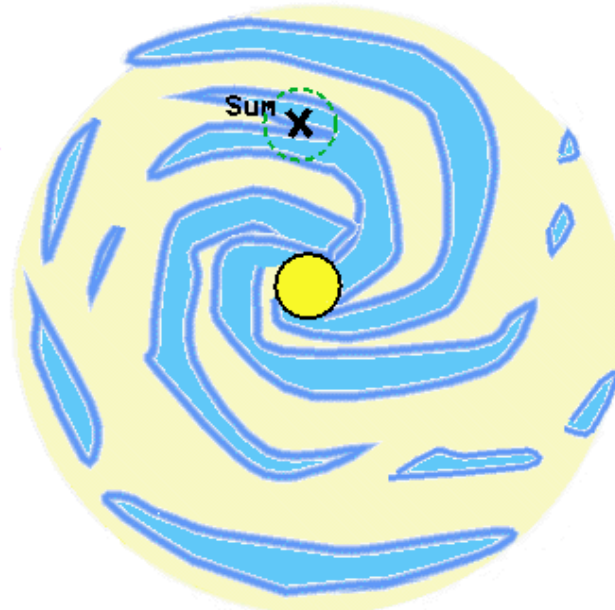
(c) 2001 Laurindo Sobrinho



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

- um **disco** que se estende desde o centro até aos 50 000 anos luz e tem uma espessura (média) de 1000 anos luz. O plano equatorial do disco é chamado **plano galáctico**.
- um **halo** de forma esférica, com um raio de 50 000 anos luz, que envolve toda a Galáxia.

Posição do Sol na Galáxia



<http://www.astronomynotes.com/ismnotes/s4.htm>

Contrariamente ao que se julgava o Sol não está no centro da Galáxia. Situa-se a cerca de 25 000 anos luz do centro e 20 anos luz acima do plano galáctico. Descreve órbitas circulares em torno do centro da Galáxia. Cada órbita tem uma duração de 220 milhões de anos e é feita à velocidade de 250 Km/s. Desde que o Sol se formou como estrela já completou cerca de 20 voltas à Galáxia.

As Vizinhanças da Galáxia

A Nossa Galáxia faz parte de um grupo de cerca de 20 galáxias chamado **Grupo Local**. Duas das galáxias mais próximas são a **Grande Nuvem de Magalhães** (a 160 000 anos luz) e a **Pequena Nuvem de Magalhães** (a 210 000 anos luz). São duas galáxias irregulares, satélites da Nossa Galáxia.



Grande Nuvem de Magalhães

Pequena Nuvem de Magalhães

A dois milhões de anos luz fica a grande **galáxia de Andrómeda** (M31). Embora um pouco maior, é muito semelhante à Nossa Galáxia. **É o objecto mais distante ainda visível a olho nu!**

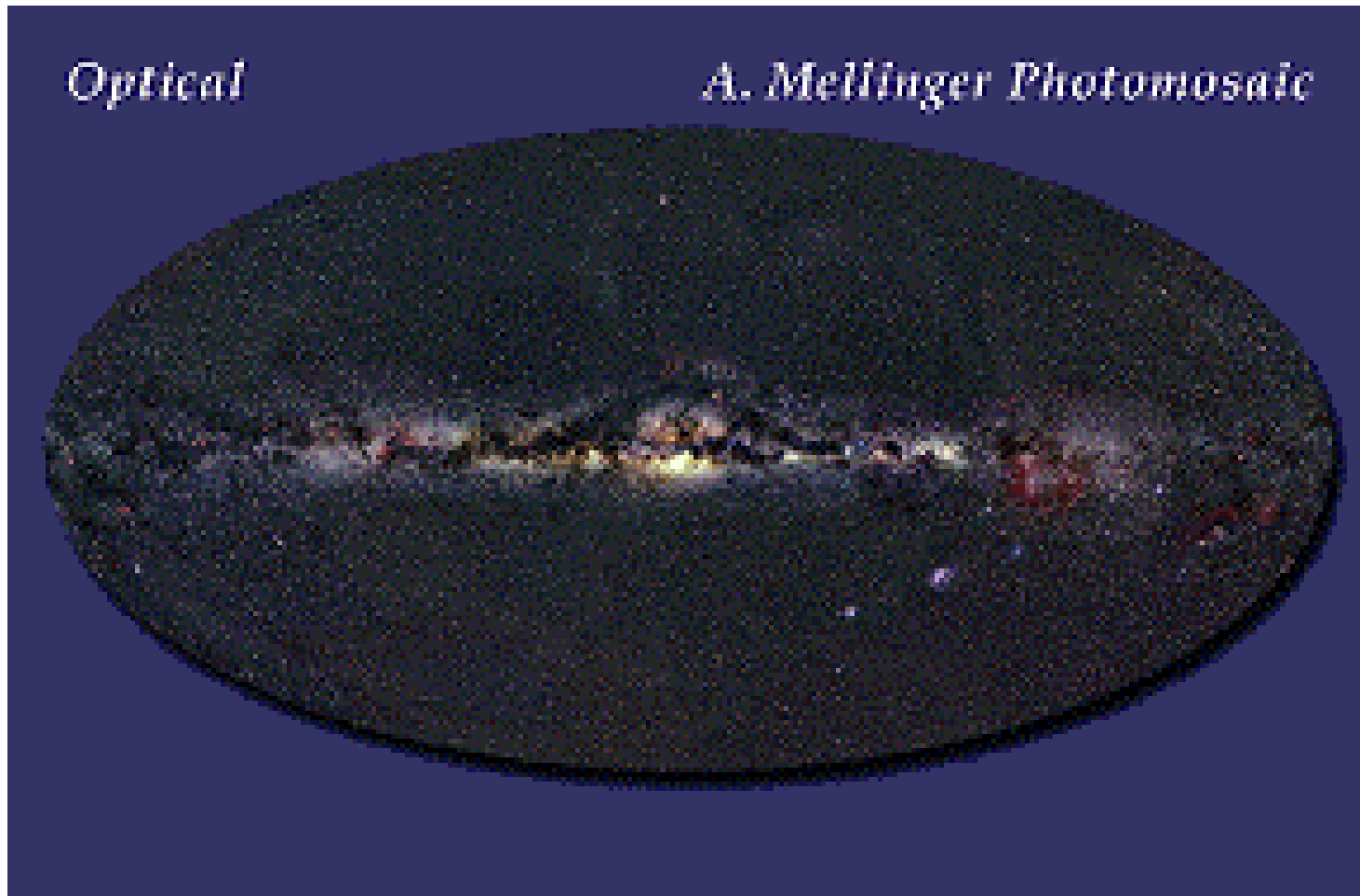


http://www.obspm.fr/messier/more/m031_image.html

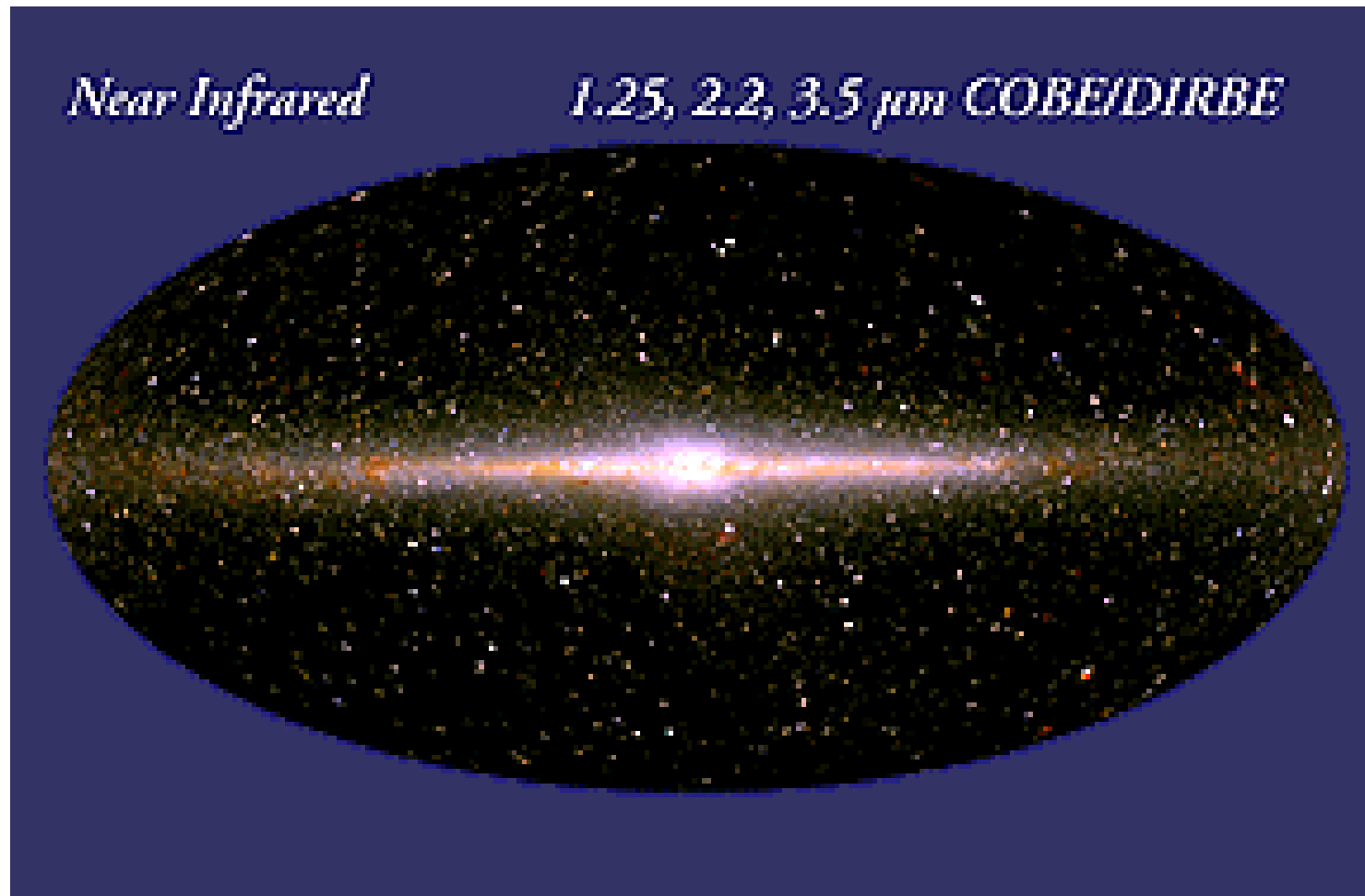


O centro da Galáxia

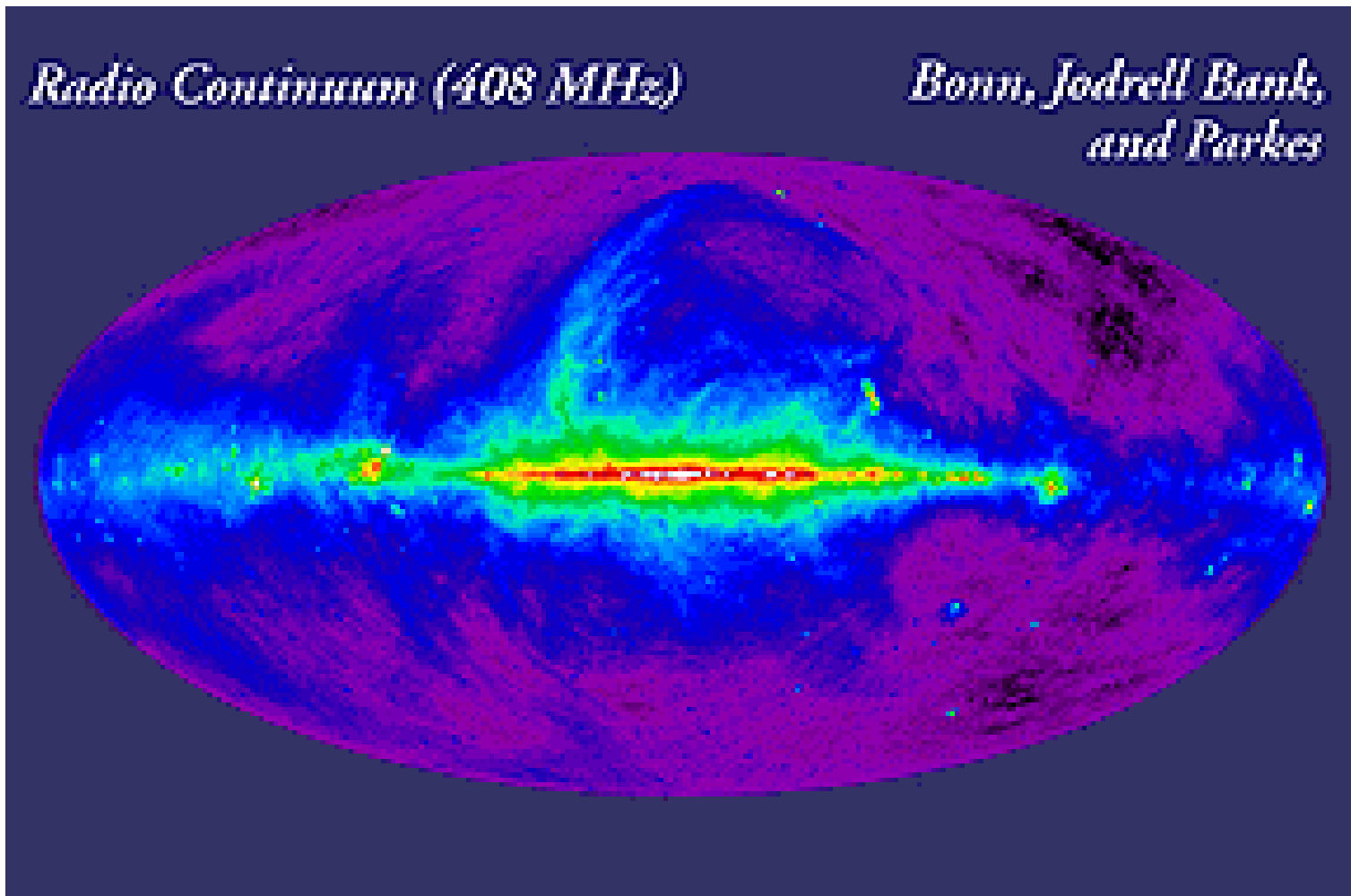
Visível – O gás e as poeiras existentes no meio interestelar absorvem a maior parte da luz visível proveniente das estrelas distantes. Não se pode observar o centro da Galáxia a partir do óptico.

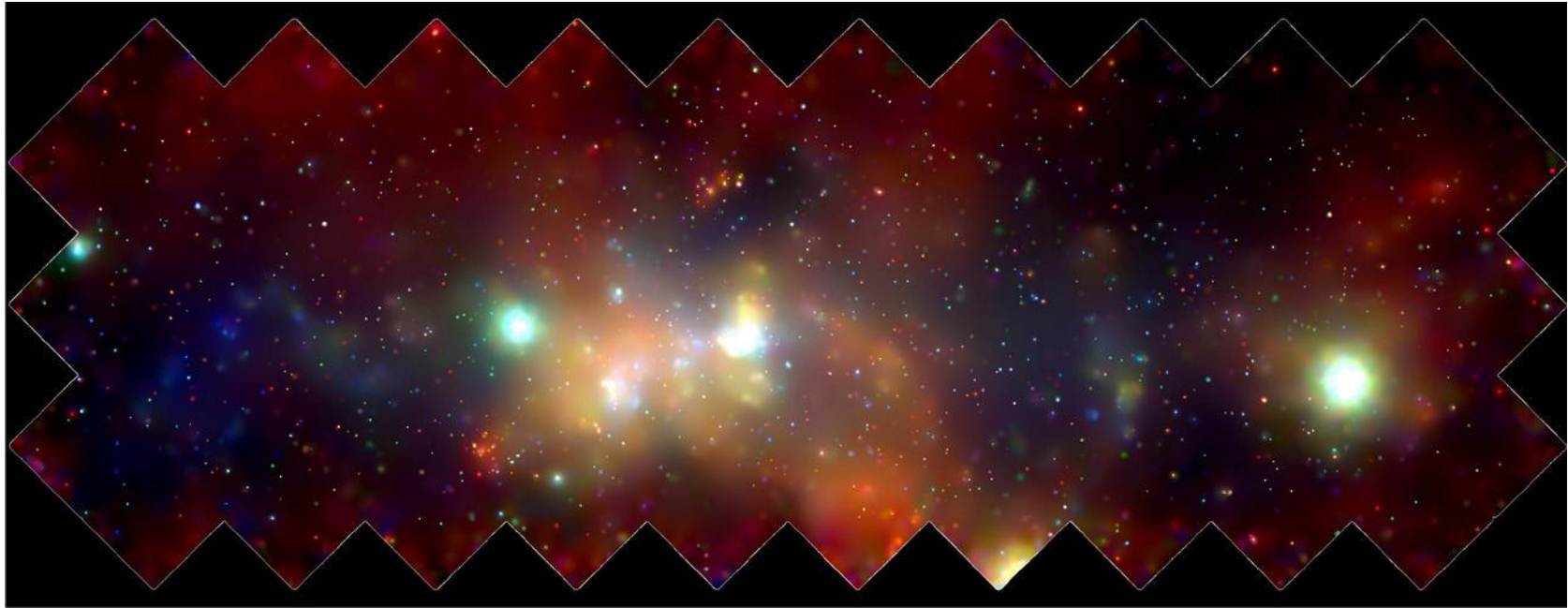


Infravermelho próximo – A emissão nesta banda deve-se sobretudo a estrelas K de pequena massa situadas no disco e no bolbo galáctico. Neste caso não existe um obscurecimento significativo como acontecia no óptico.

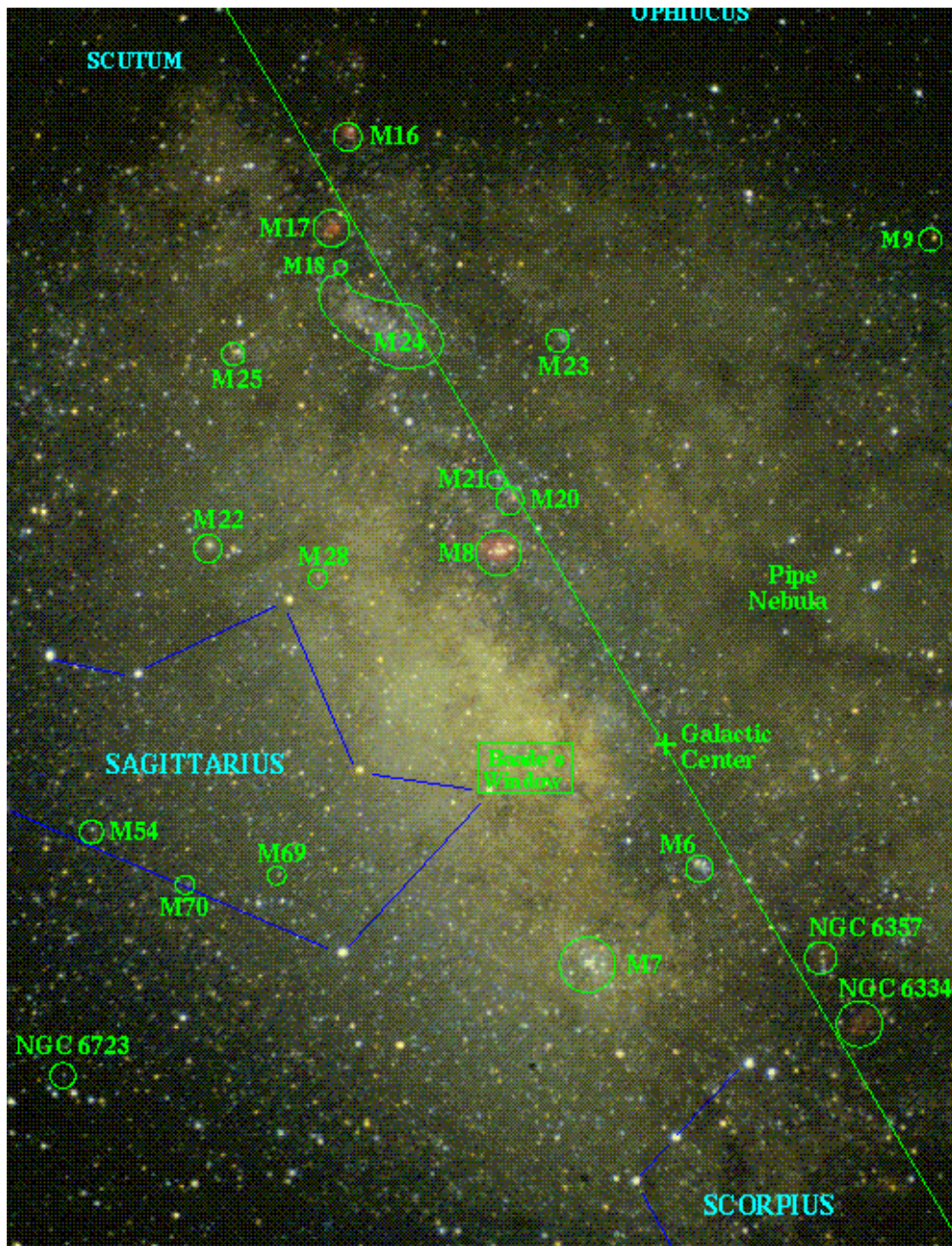


Rádio (408Mhz) – Neste caso a maior parte da emissão resulta da dispersão de electrões livres no plasma interestelar ou da aceleração de elctrões por campos magnéticos fortes.

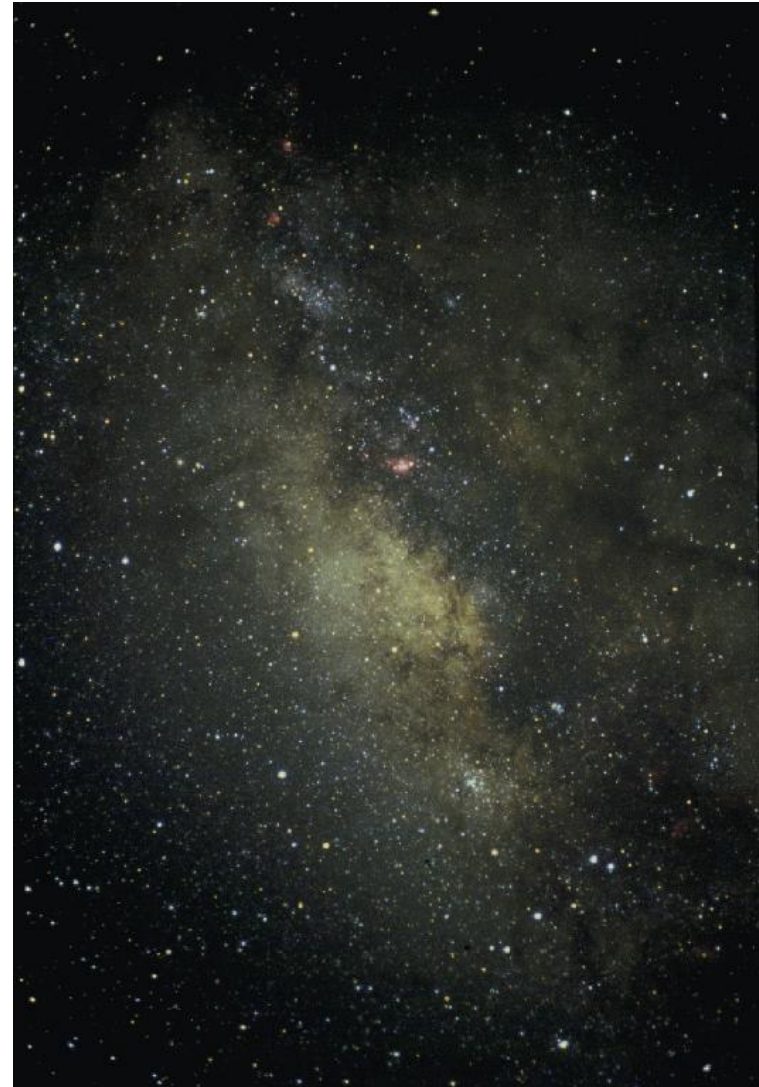
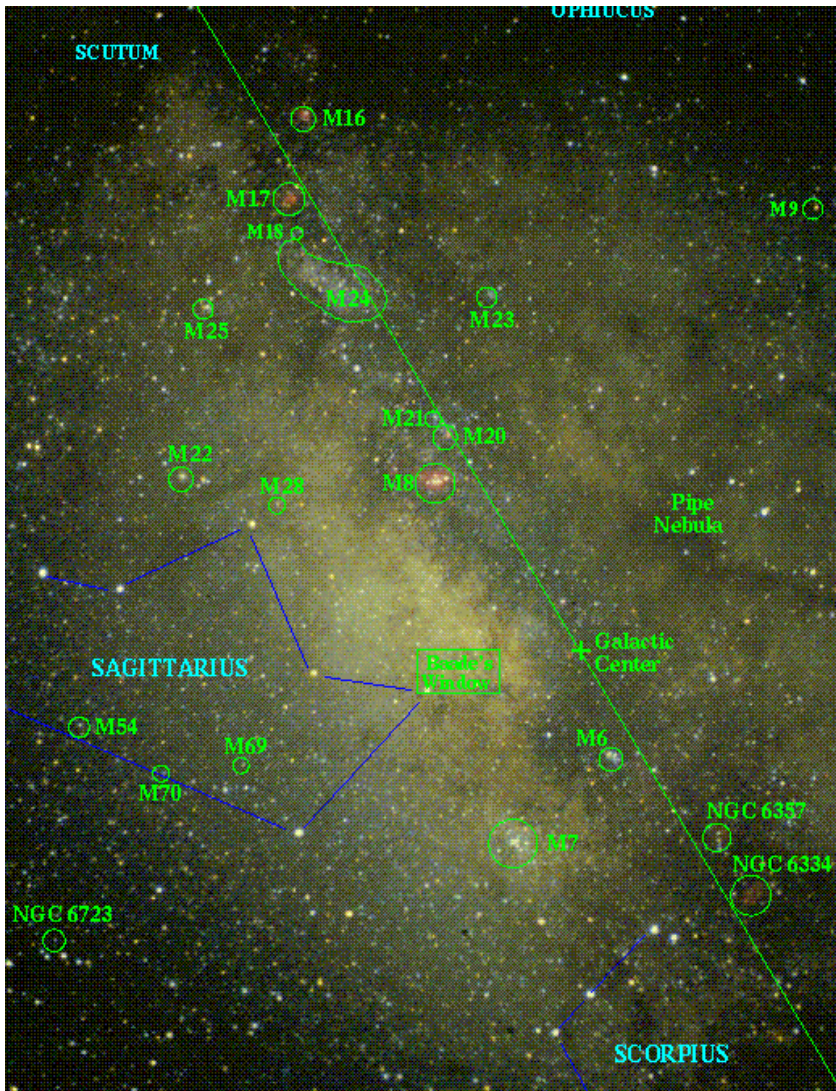




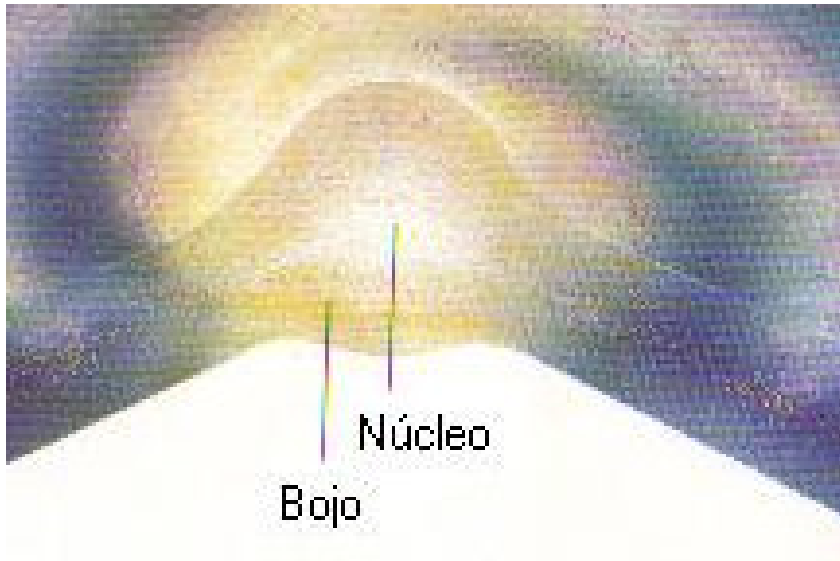
Mosaico de imagens da região central da Galáxia em raios X obtidas pelo *Chandra* (900x400 anos luz). O centro coincide com a mancha branca do centro da imagem.



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



Região Central da Via Láctea



A parte central da Galáxia, ou seja, o **bojo** tem uma forma mais ou menos esférica e um raio de cerca 3250 anos luz. A parte mais interior do bojo, com cerca de 325 anos luz de raio chama-se **núcleo**.

As estrelas do bojo são bastante antigas contrariamente ao que acontece com as do núcleo. A densidade estelar do núcleo é cerca de um milhão de vezes superior àquela que se verifica nas vizinhanças do Sol.

Imagem rádio (comprimento de onda de 1m) obtida pelo VLA. O quadrado (cujos lados correspondem a **250 anos luz**) indica a região central onde se situa o **complexo Sgr A**. Neste comprimento de onda não se podem observar as inúmeras estrelas existentes na região.

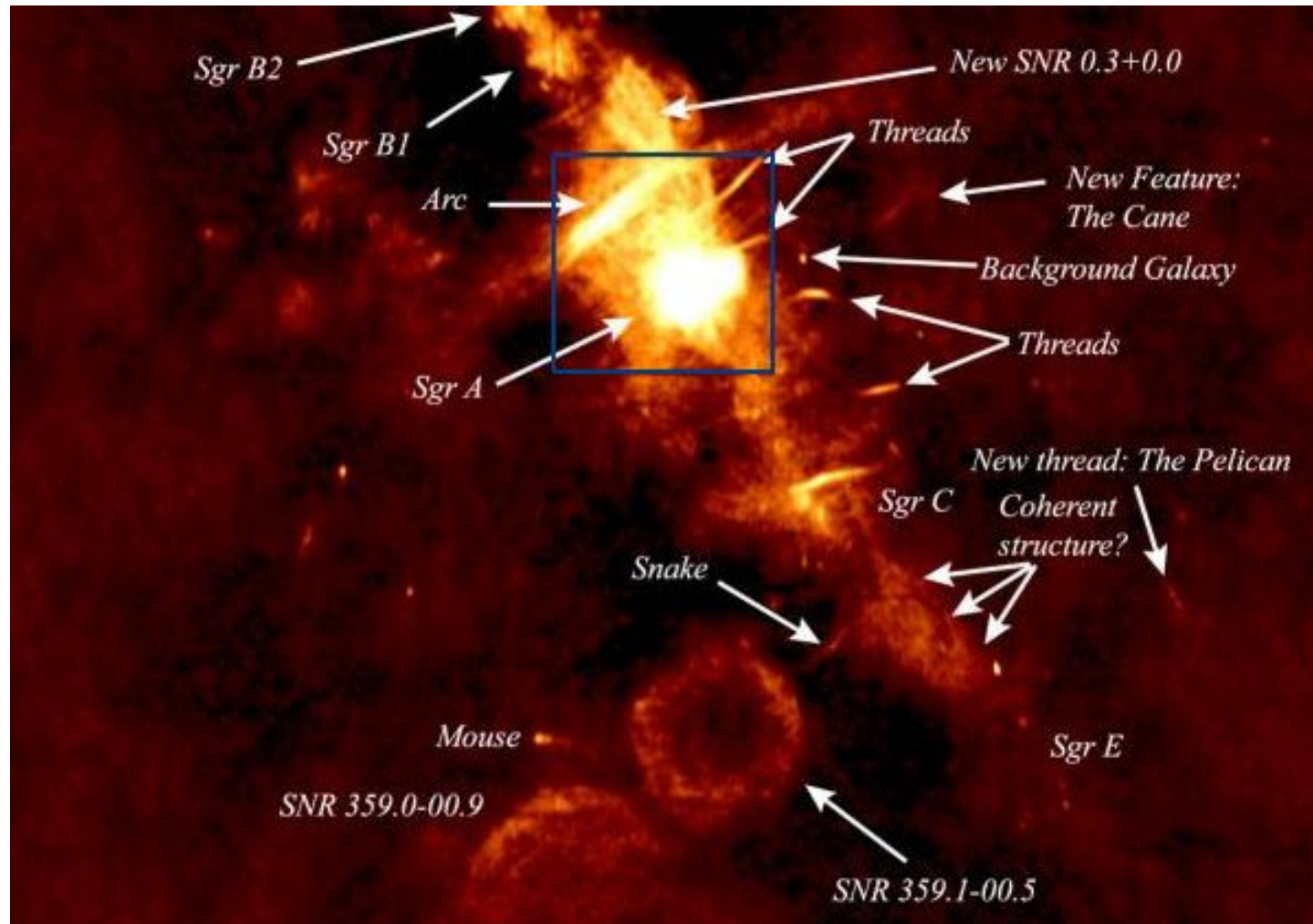


Imagem rádio do centro galáctico mostrando a localização de Sgr A e Sgr B

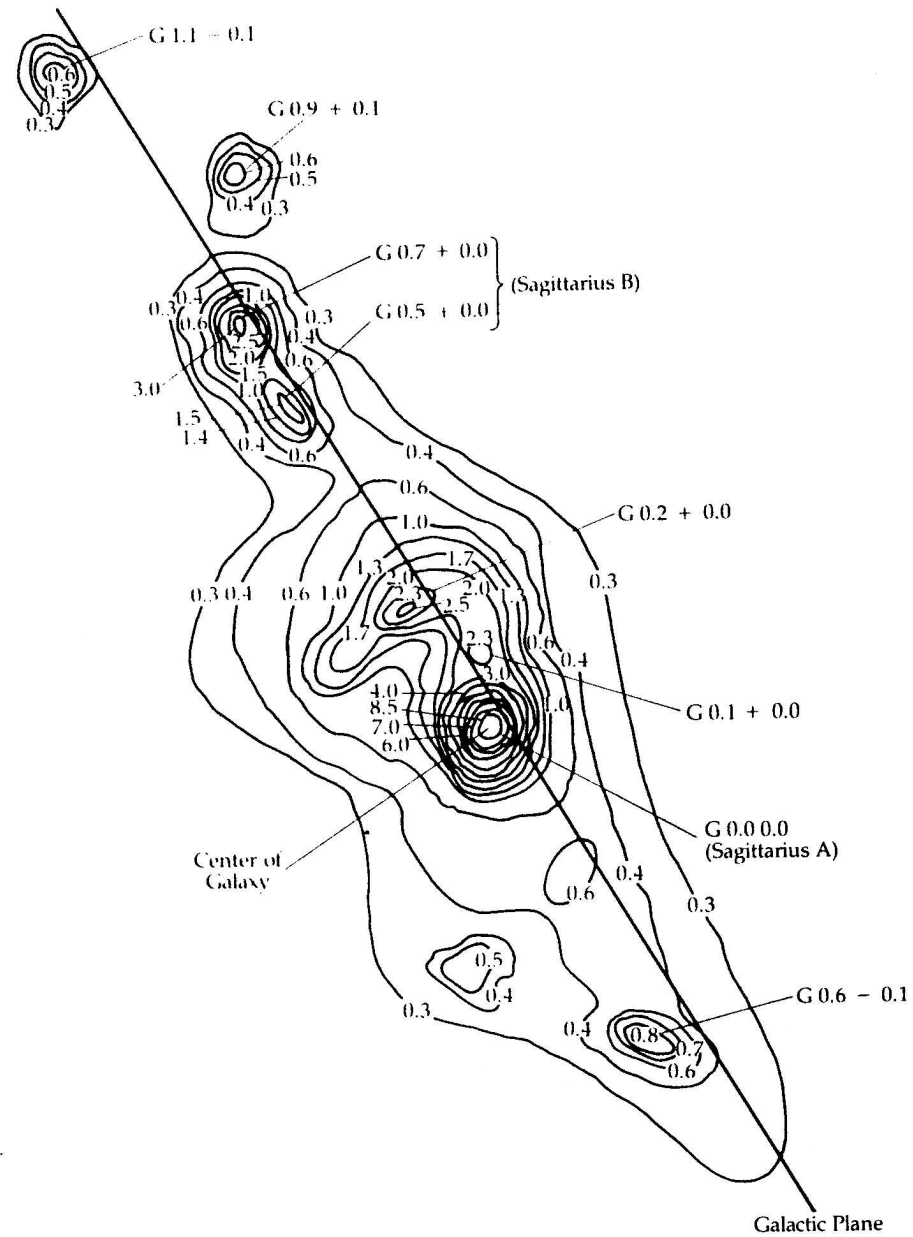


FIGURE 20-9 Radio map of the overall galactic center region; the two main regions are Sgr A and Sgr B. The observations were made at a wavelength of 3.75 cm. Most of this emission is thermal. (Adapted from a diagram by D. Downes, A. Maxwell, and M. L. Meeks)

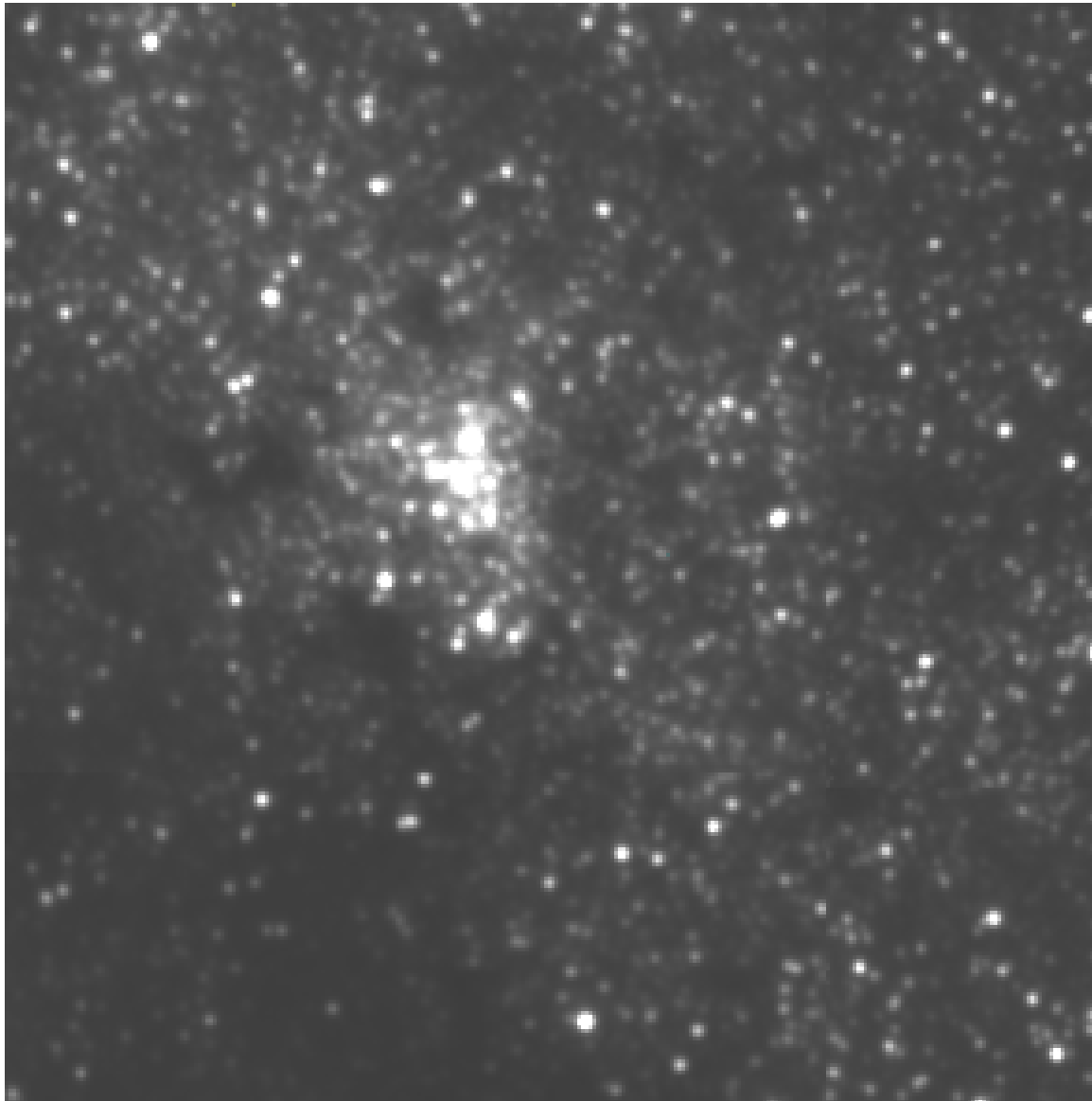
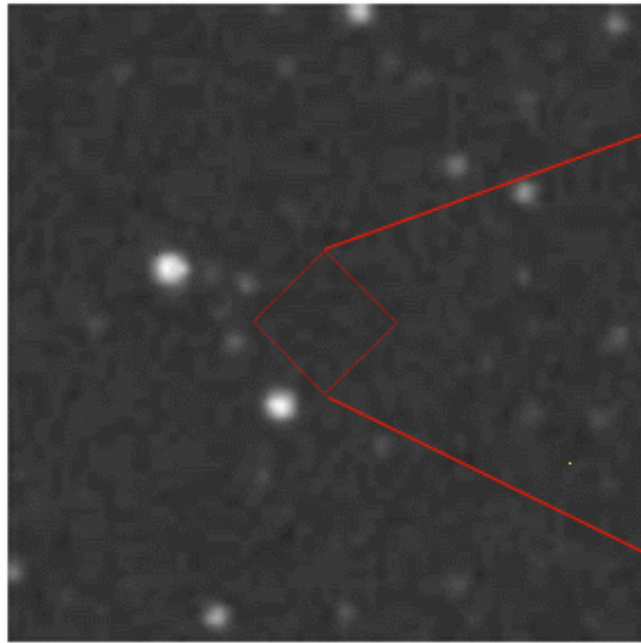
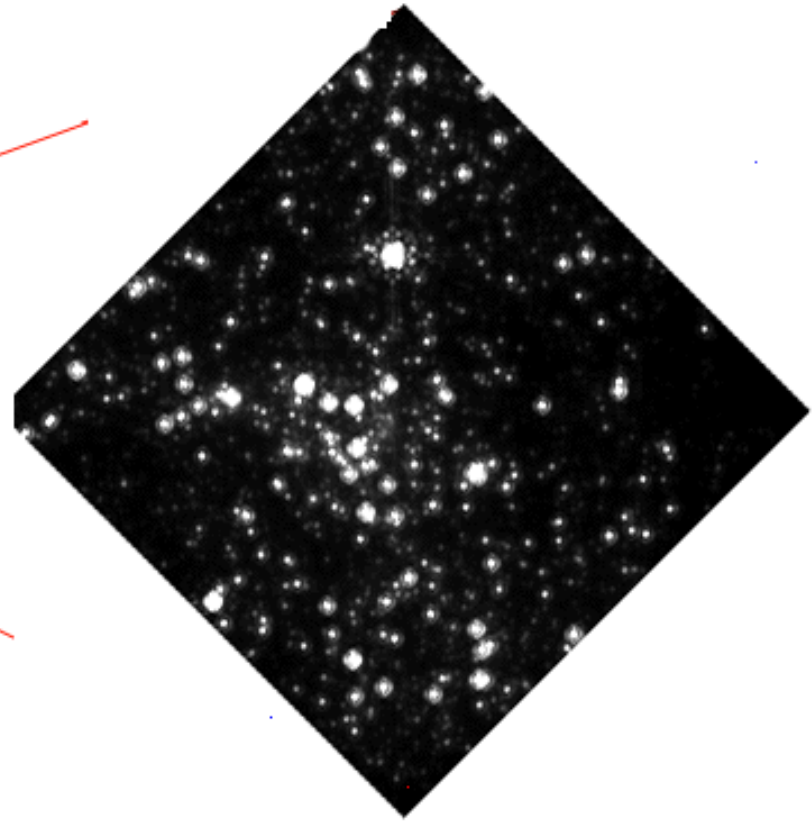


Imagem da região central da Galáxia (16x16 anos luz) obtida no **Infravermelho** revela a presença de um enxame de estrelas.



Visible Light

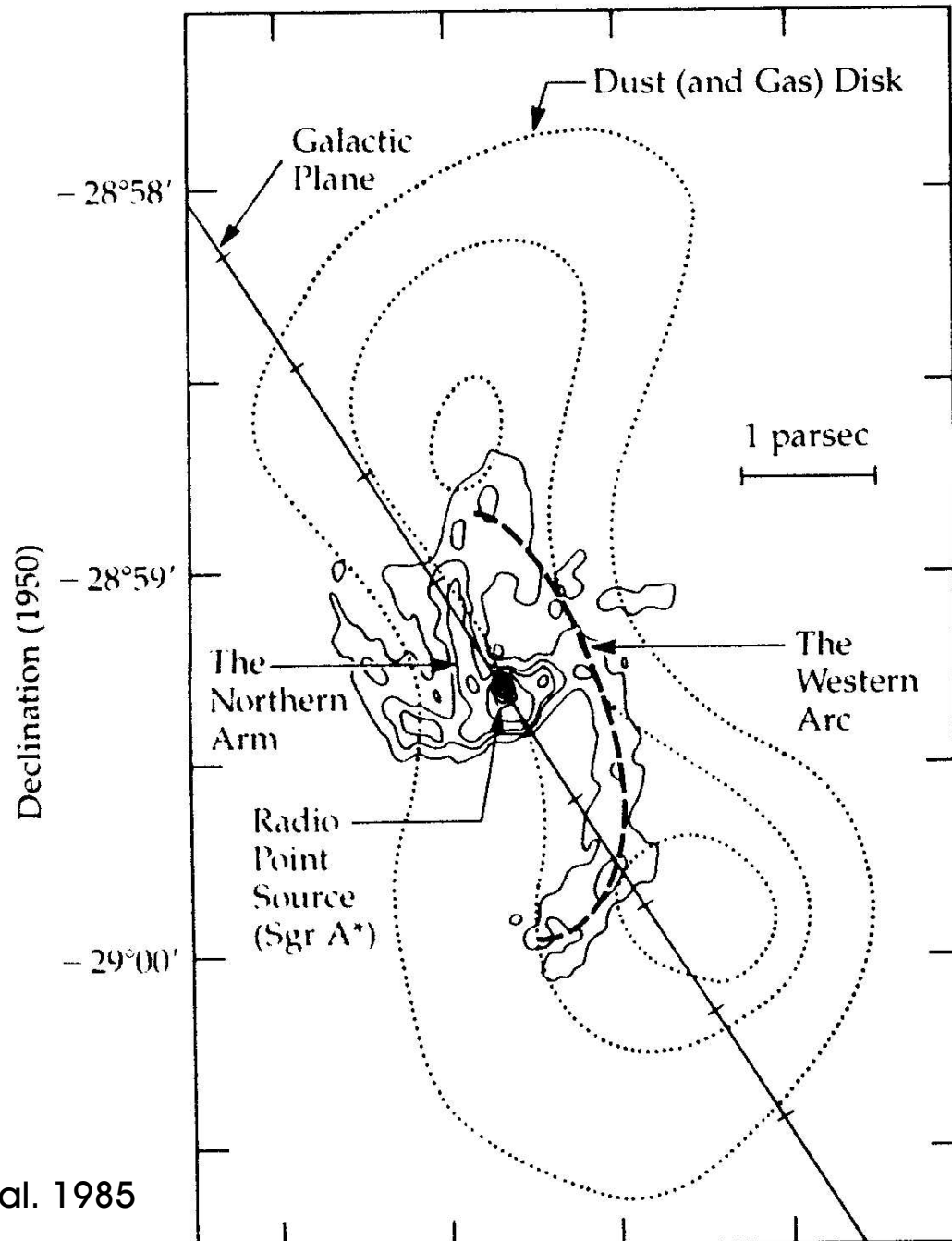


Infrared Light

Imagem de Infravermelho dos 30 anos luz centrais onde se destaca a presença de:

- um **disco** (anel) de gás
- a **fonte rádio Sgr A***
- uma **estrutura espiral** em torno de Sgr A*
- um **arco de gás** ionizado chamado **Arco Oeste**

Crawford et al. 1985



Anel de gás molecular e poeiras centrado em Sgr A*.

O anel estende-se entre os 6 e os 30 anos luz do centro.

Na zona interior do disco a densidade do gás é cerca de 10 vezes inferior à do próprio disco.

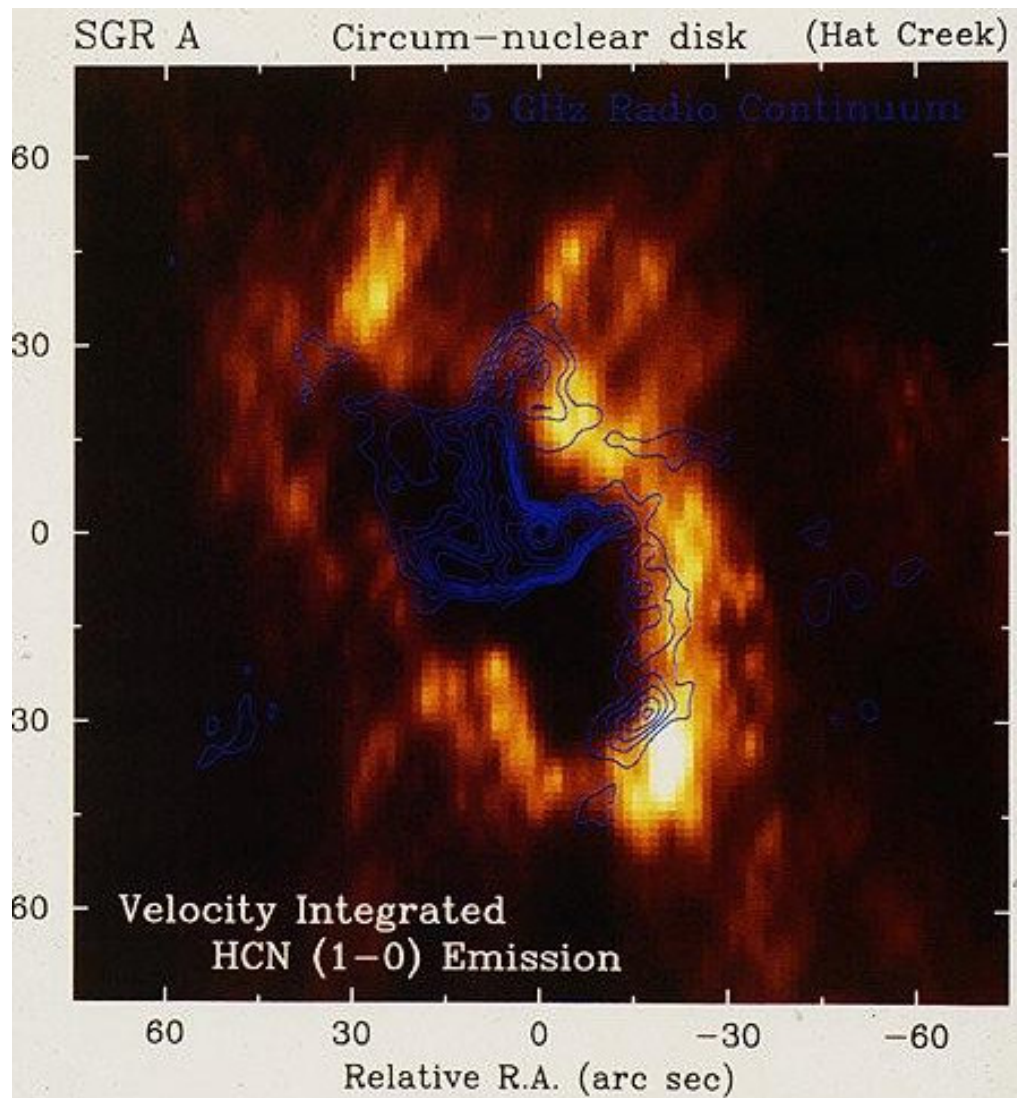
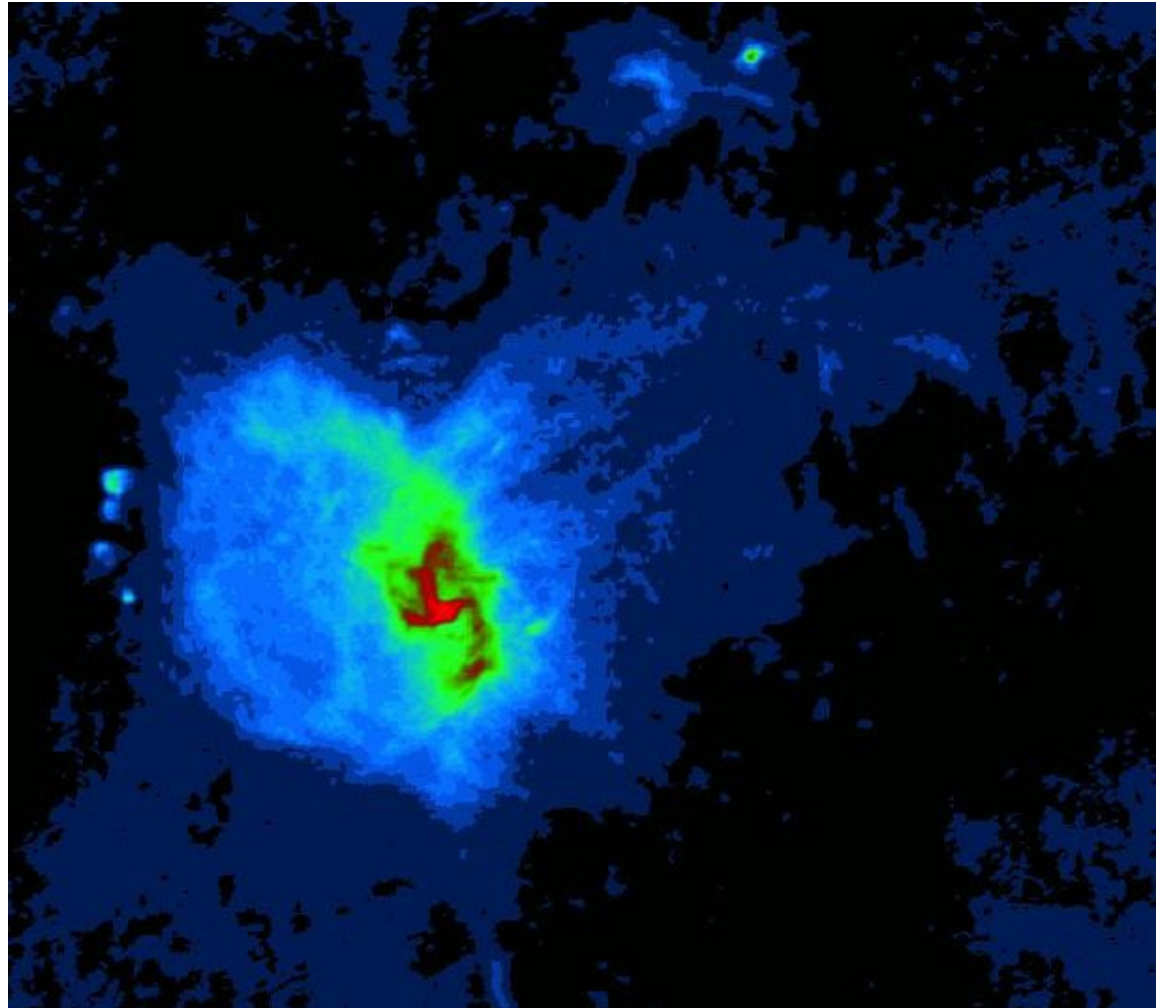


Imagem rádio dos 10 anos luz centrais

Sgr A Este (azul e verde): Restos de uma hipernova que teve lugar apenas há algumas dezenas de milhares de anos.

Sgr A Oeste (vermelho): Estrutura mini-espiral de gás e poeiras ionizados pelas estrelas vizinhas.

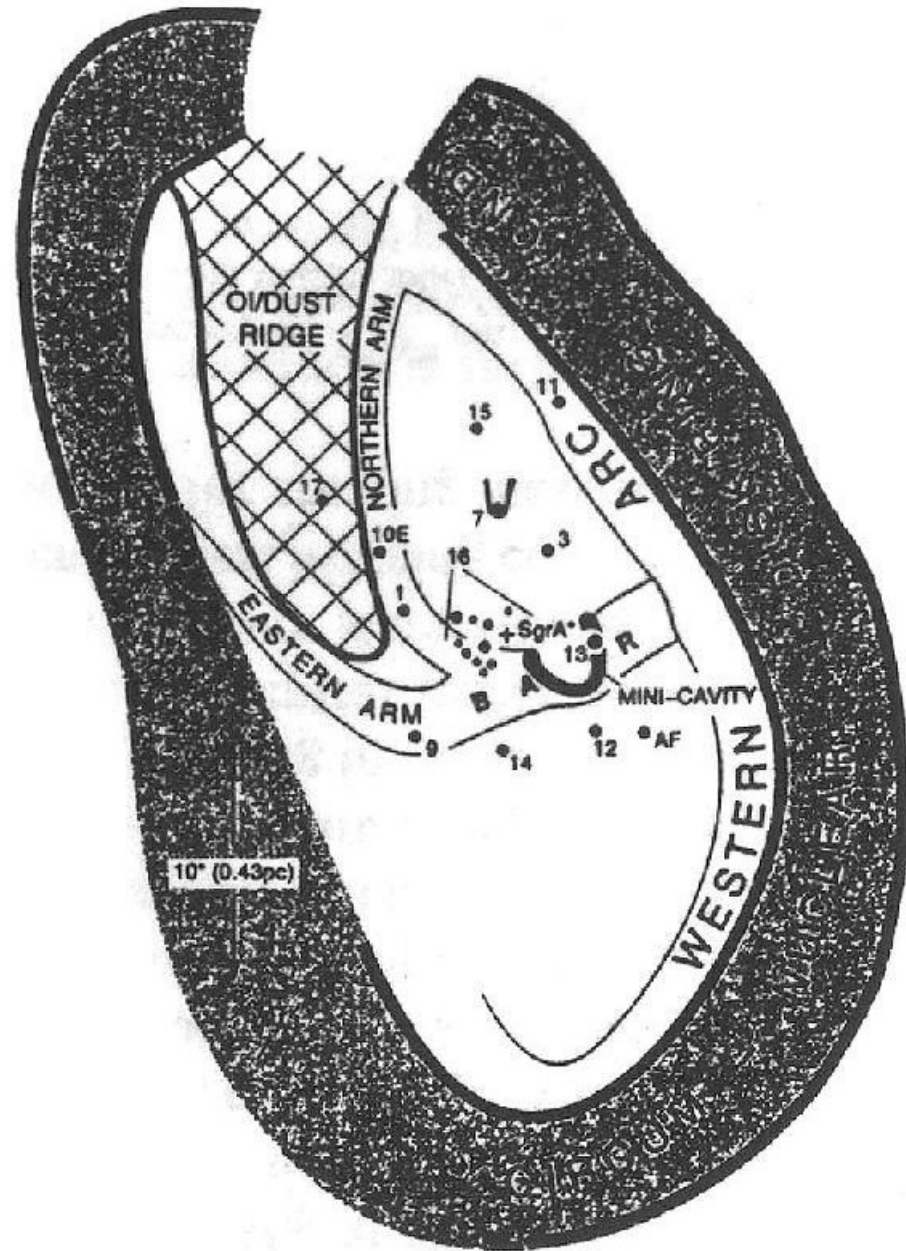
Sgr A *: Forte fonte rádio compacta localizada na intersecção dos braços de Sgr A Oeste.



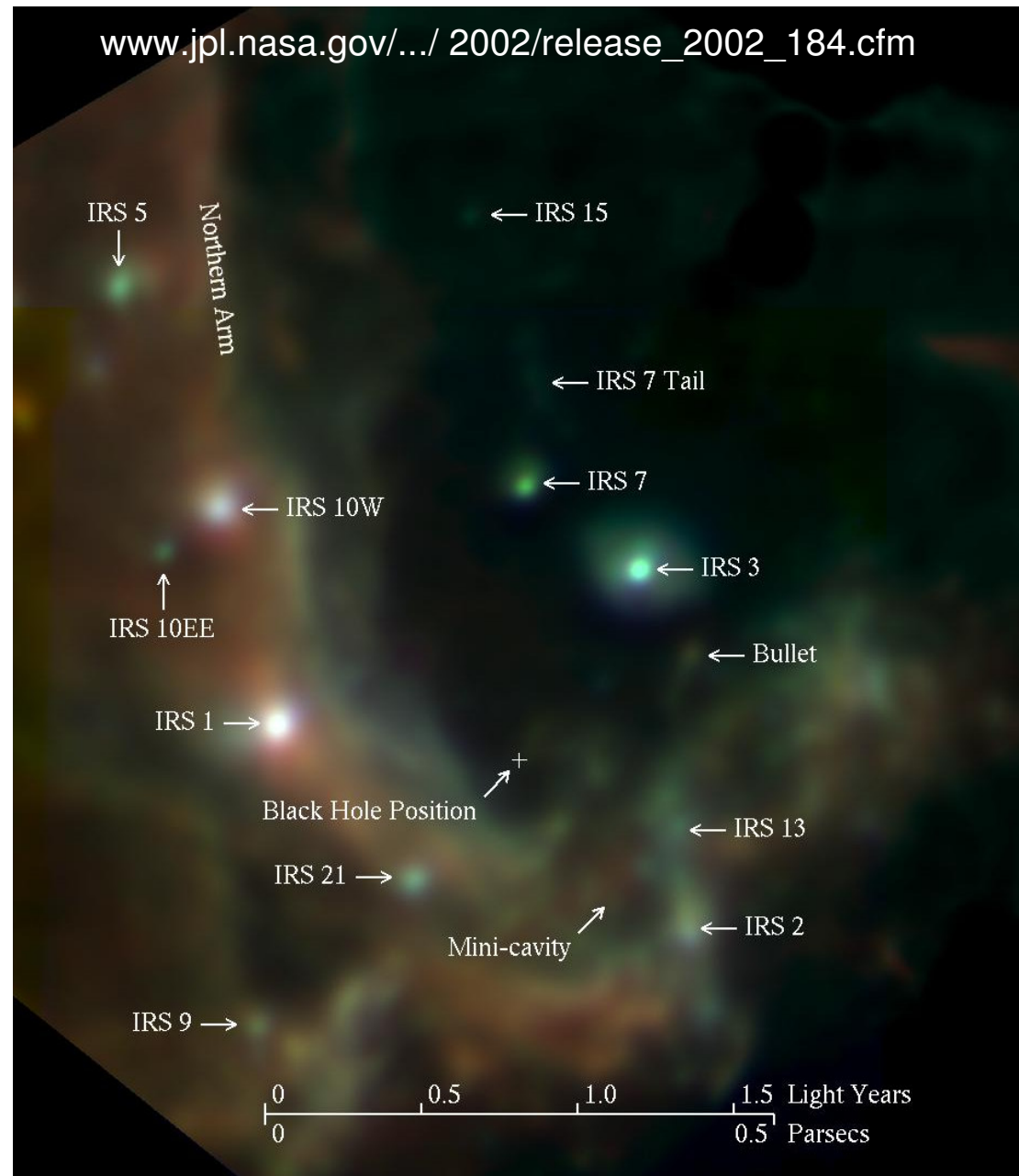
Neste esquema os números indicam estrelas (observadas como fontes de infravermelho).

Na junção dos braços Norte e Este existe uma zona, designada por **mini-cavidade**, onde não há emissão rádio.

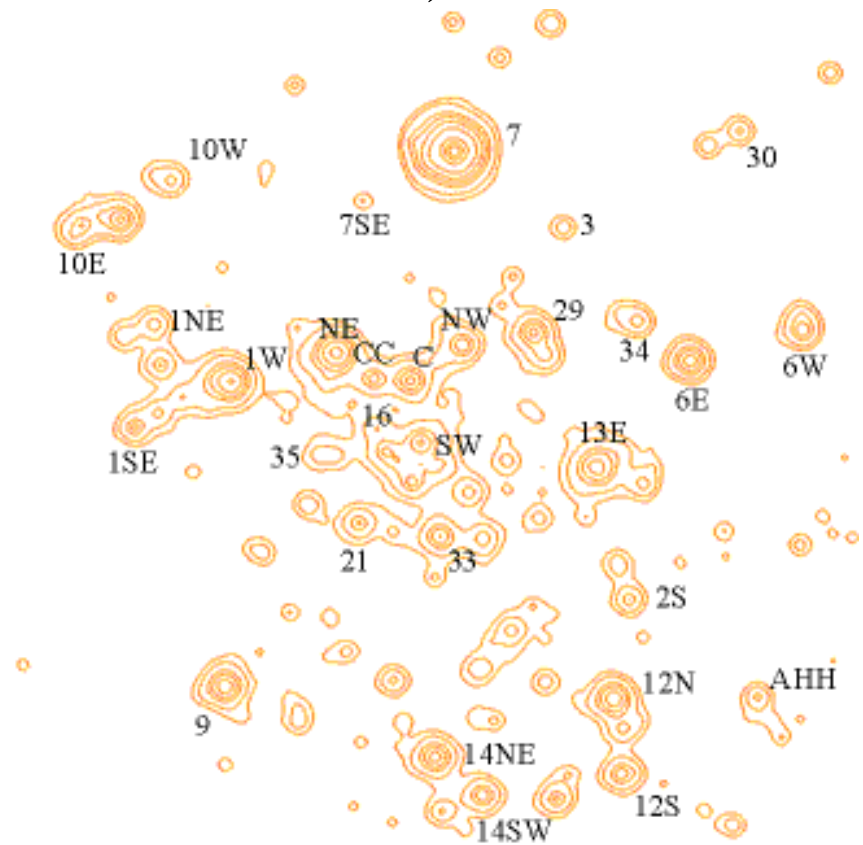
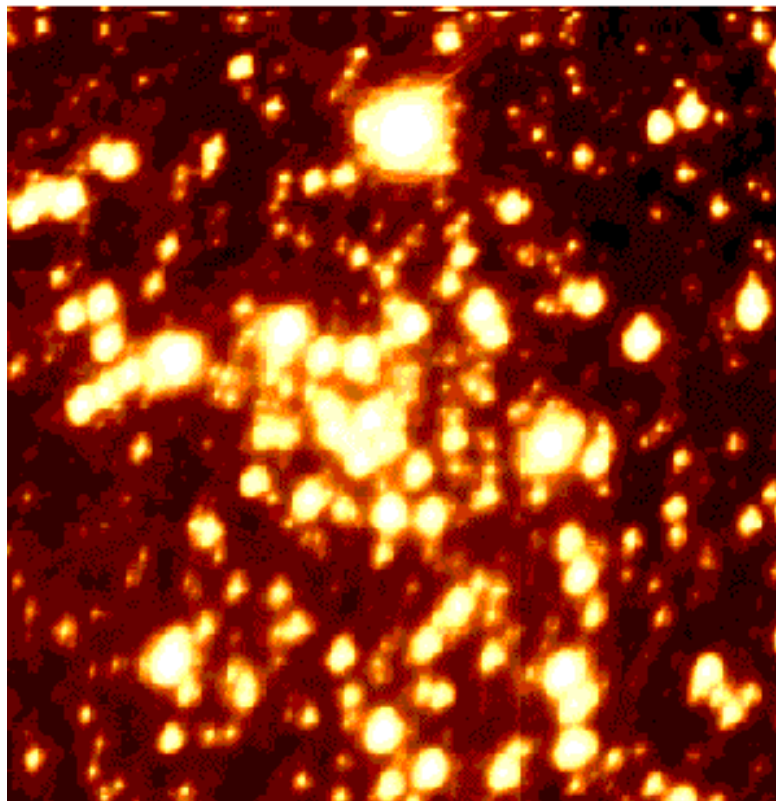
Muito perto de Sgr A* existe um enxame estelar designado por **IRS16**



Região do **Braço Norte** da mini espiral. Nota-se a existência de várias estrelas identificadas como fontes de infravermelho. É também indicada a posição da **mini cavidade** e de uma estrutura que se desloca com uma velocidade entre 400 e 1000 km/s designada por **“Bala”**

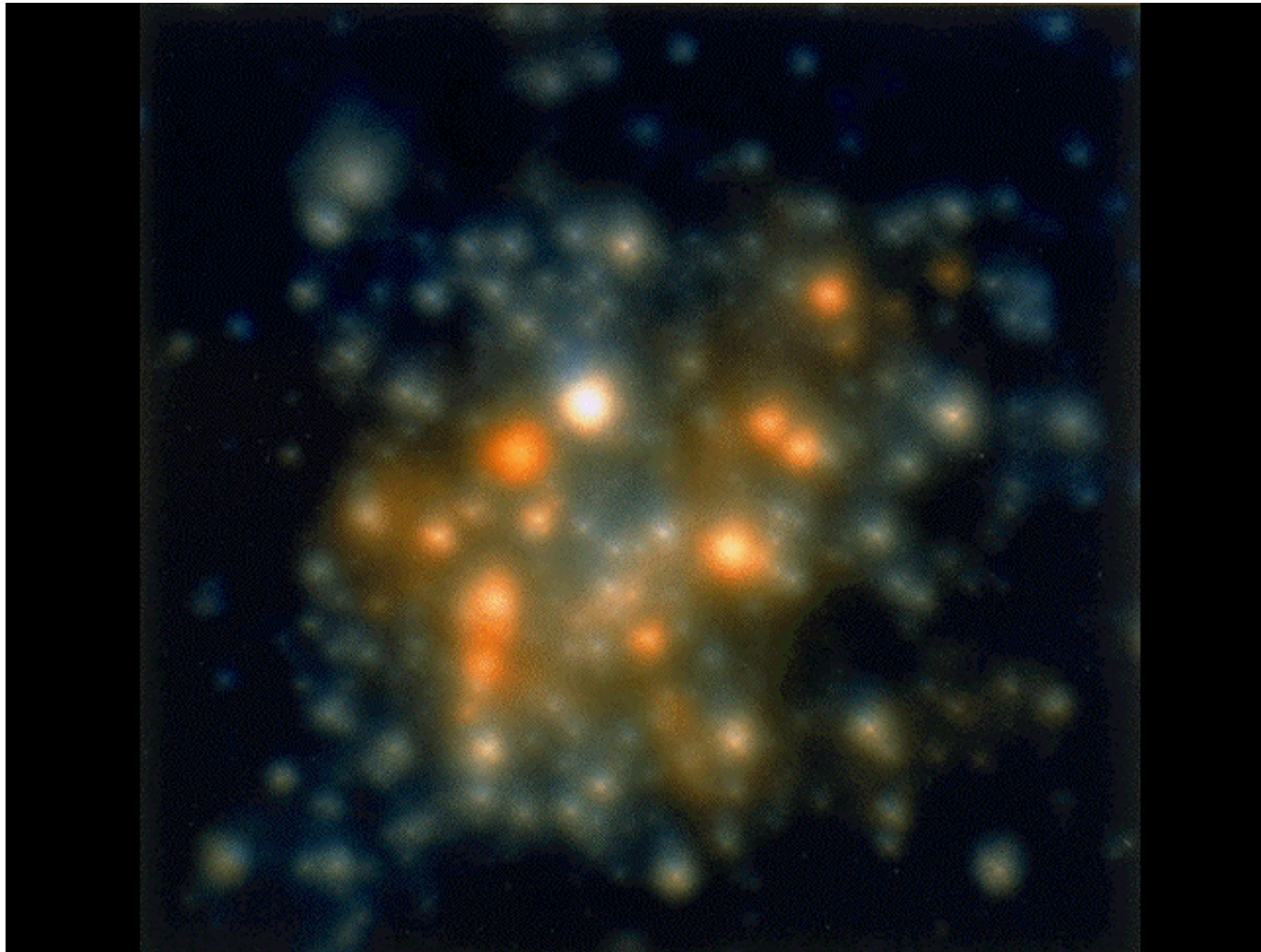


Enxame IRS16 situado nas proximidades do centro da Galáxia. É também visível na imagem a estrela **IRS7** que é uma gigante vermelha (não pertencente a IRS16). Sgr A* que não é uma fonte infravermelha muito forte não aparece na imagem (localiza-se um pouco acima de SW).

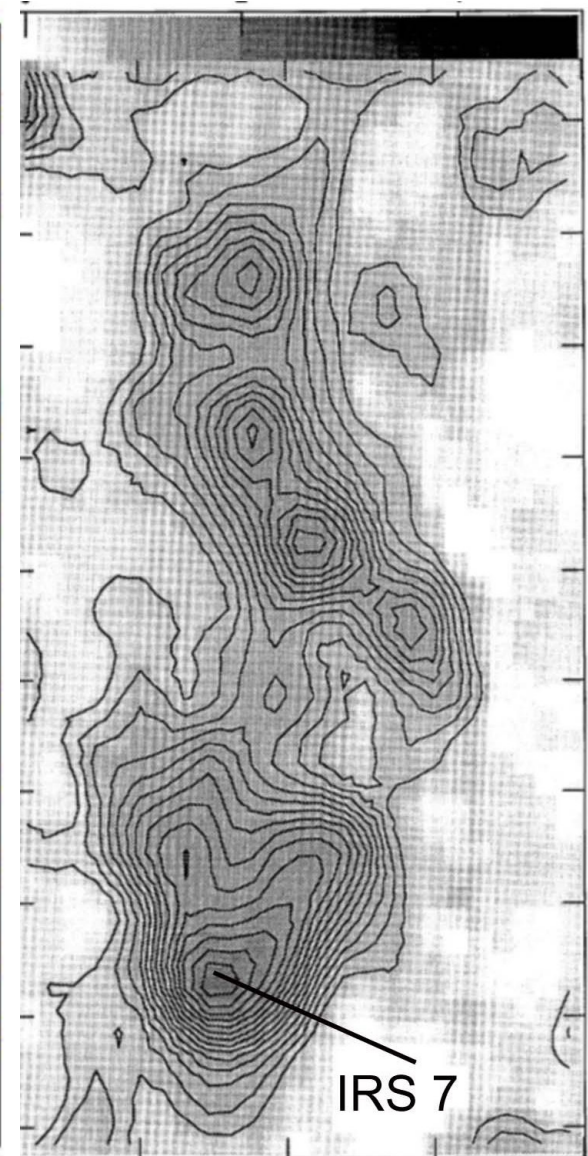
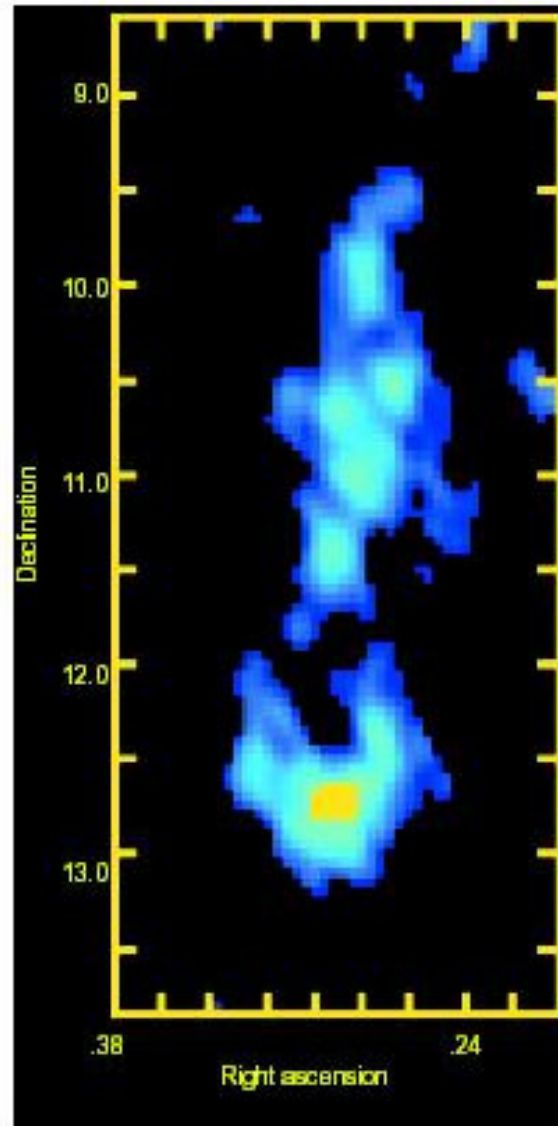


10"=0.4pc

IRS16 é um enxame de estrelas supergigantes (com mais de 30 massas solares) bastante jovens (menos de 10 milhões de anos).



IRS7 é uma estrela supergigante vermelha a 1 ano luz do centro. Esta estrela apresenta uma cauda de gás resultante da radiação e ventos estelares provenientes de **IRS 16**



Buracos Negros





A velocidade de escape

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

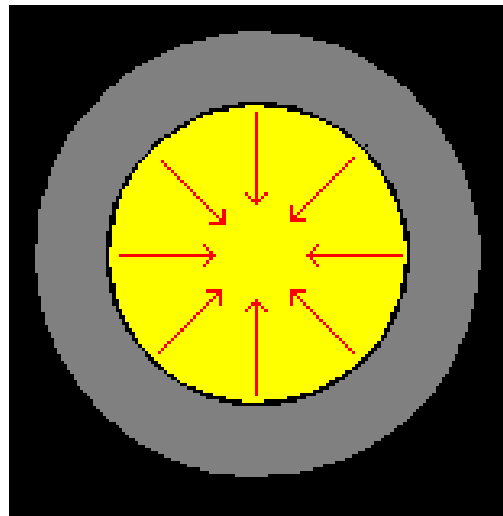
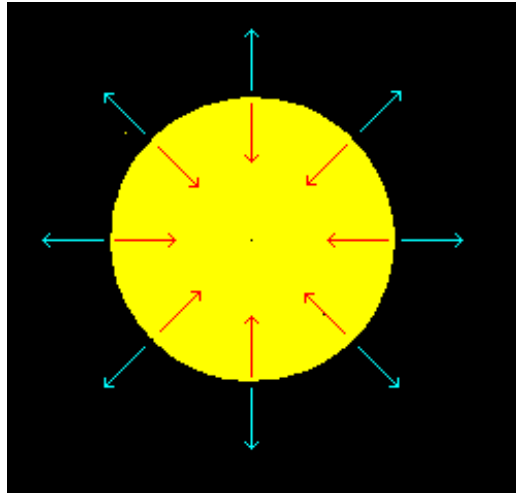
No caso da Terra a velocidade de escape é de 11.2 Km/s. Se um corpo for lançado da superfície com velocidade inferior a 11.2km/s acaba regressando à superfície.

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

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



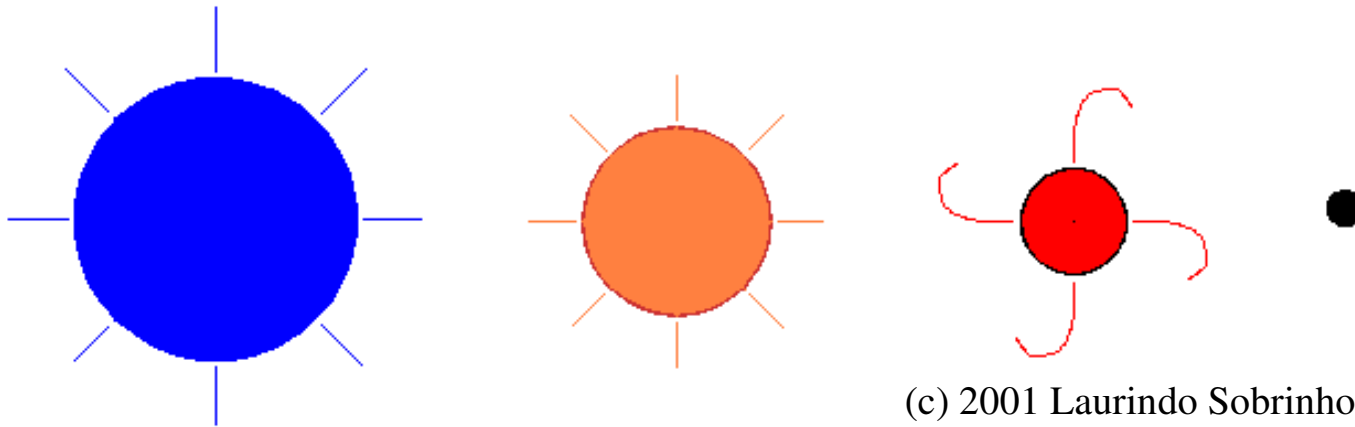
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

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).

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.**

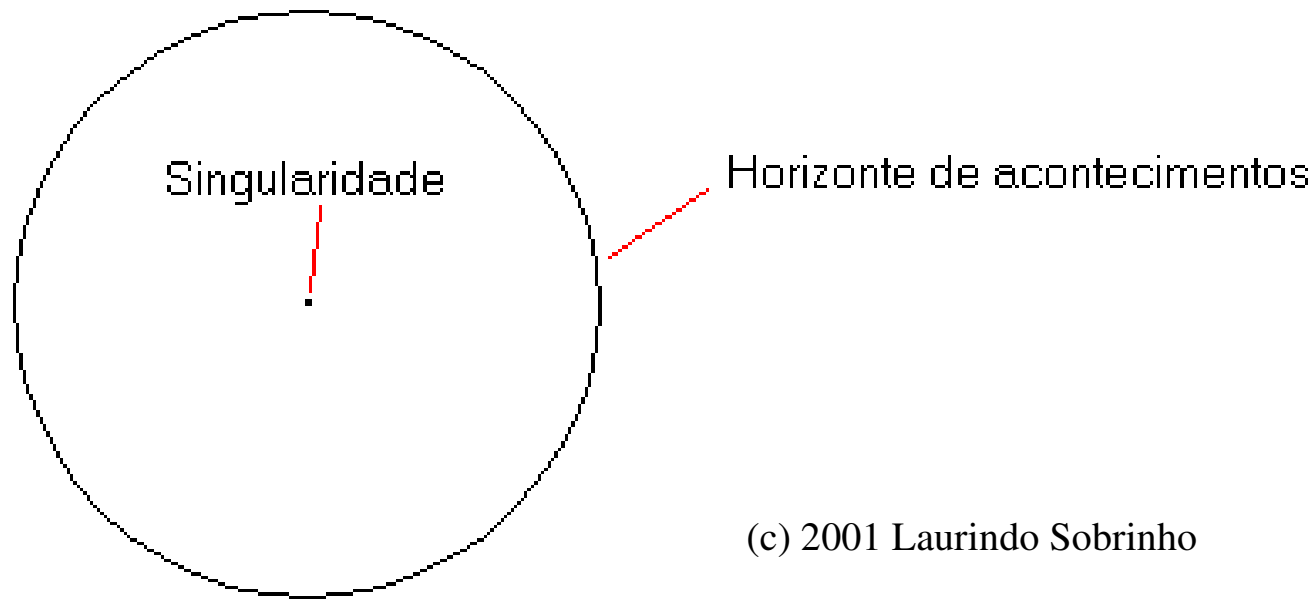


A **velocidade da luz no vácuo é $C = 300\ 000\ \text{Km/s}$** não sendo possível a qualquer corpo atingir velocidades superiores a este valor.

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.**

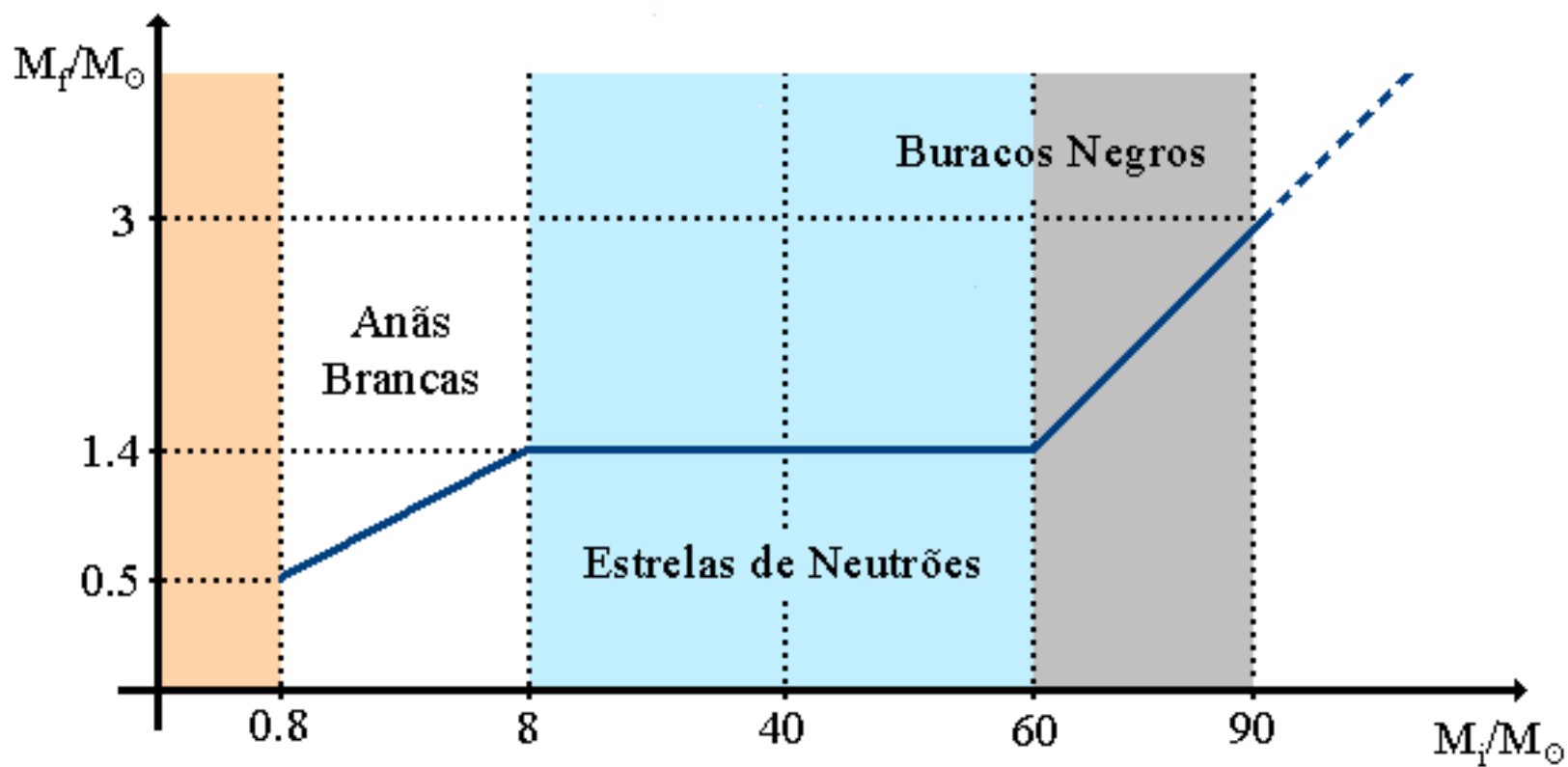
O raio para o qual a velocidade de escape iguala a velocidade da luz chama-se **raio de Schwarzschild**. A superfície esférica definida por este raio chama-se **horizonte de acontecimentos**.

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**.



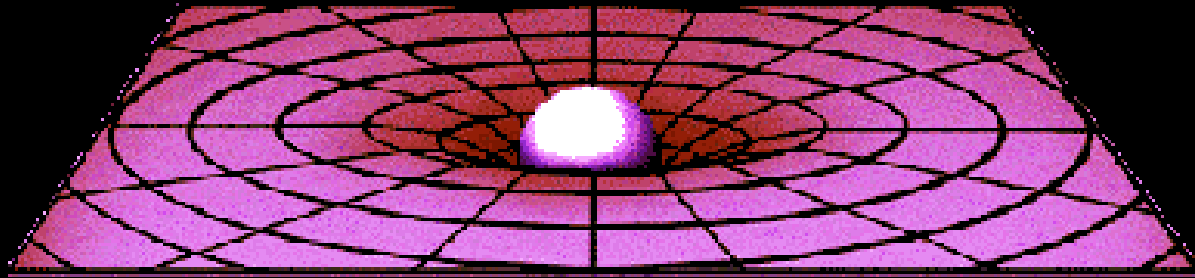
(c) 2001 Laurindo Sobrinho

Nem sempre o colapso de uma estrela leva à formação de um buraco negro. Tudo depende da massa inicial da estrela!



(c) 2003 Laurindo Sobrinho

Segundo a Teoria da Relatividade Geral de Einstein uma massa tão compacta como um **buraco negro modifica o espaço e o tempo à sua volta.**



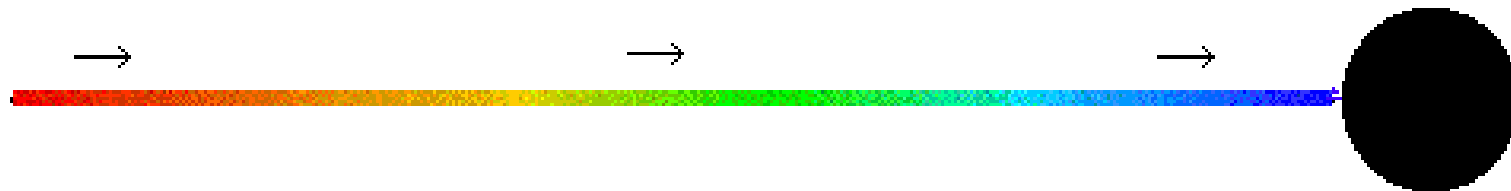
Curvatura do espaço causada por um objecto (de grande massa)

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

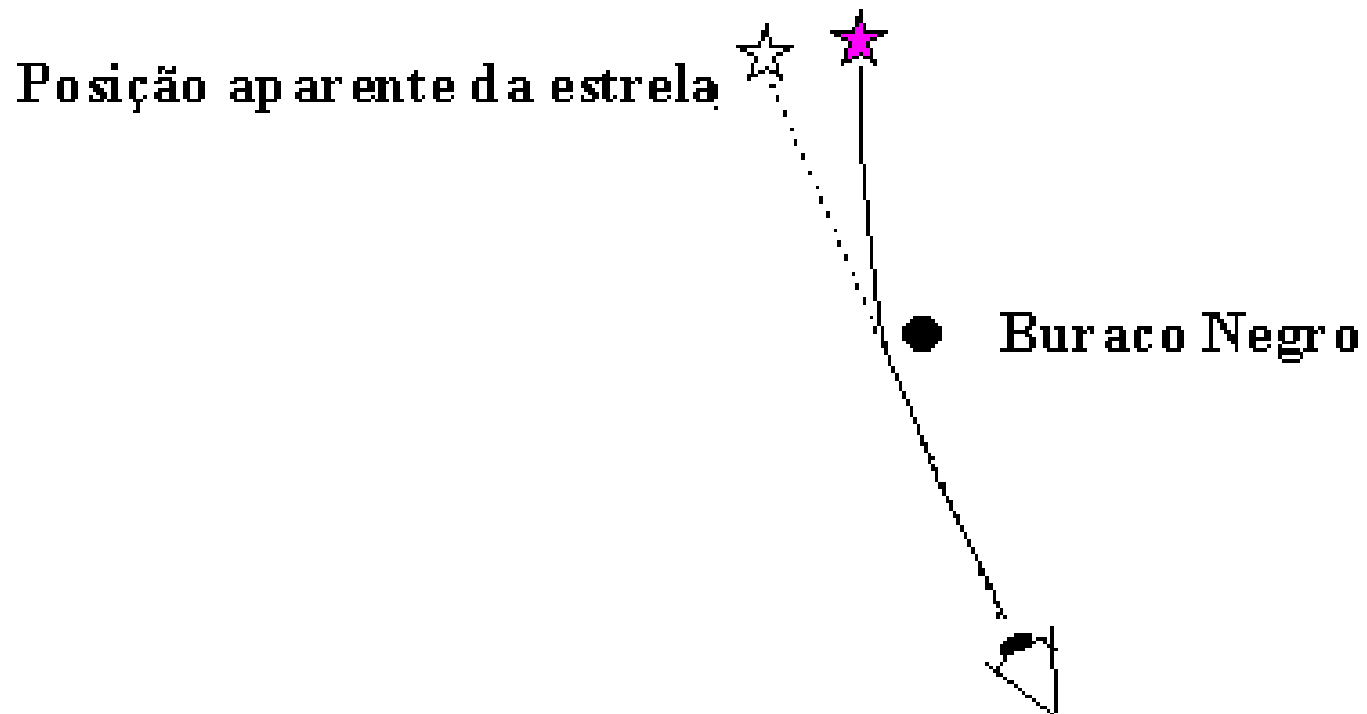
Os buracos negros afectam os raios de luz

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

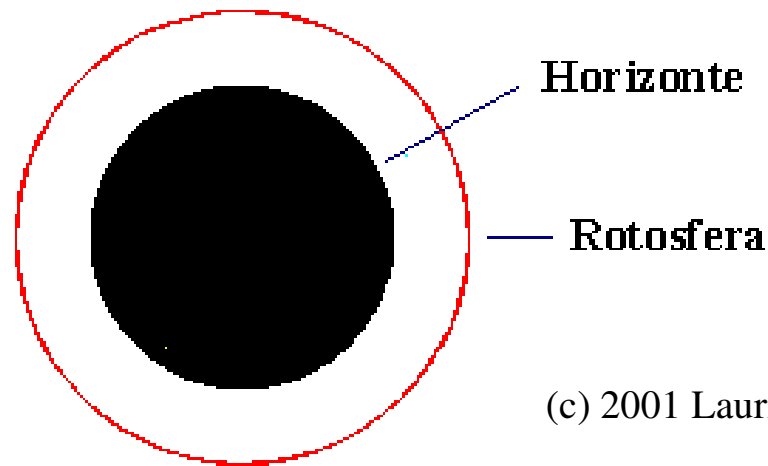
Uma nave pode ser acelerada ou desacelerada por acção da gravidade. A luz não. A **velocidade de propagação** da luz no vazio é sempre a mesma. O que a gravidade afecta é a **velocidade de oscilação** da onda electromagnética, ou seja, a frequência da onda.



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

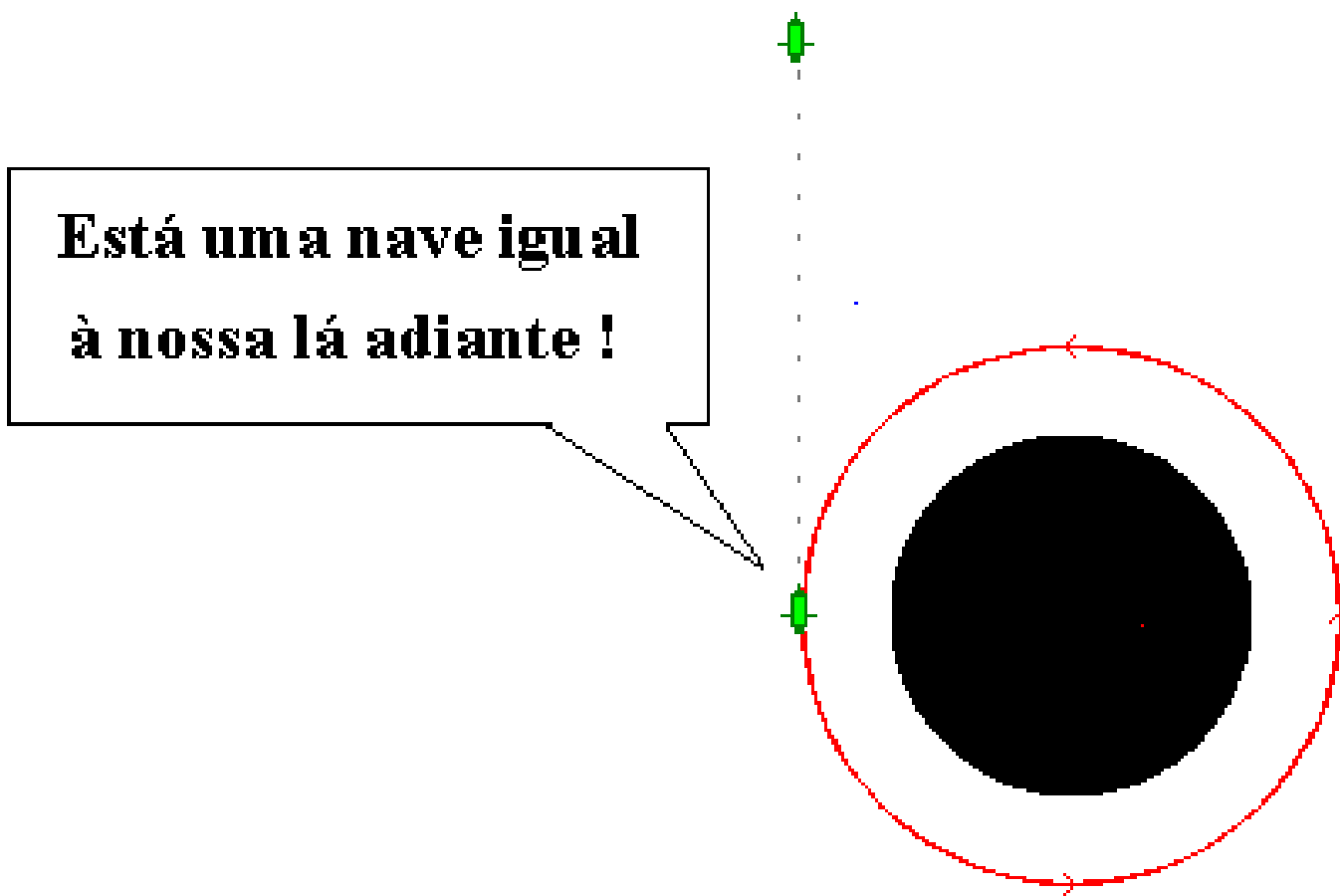


Se um raio de luz for emitido perpendicularmente ao horizonte de acontecimentos a uma distância de exactamente 1.5 raios de Schwarzschild ($1.5 R_s$) então esse raio de luz irá descrever uma órbita circular.



(c) 2001 Laurindo Sobrinho

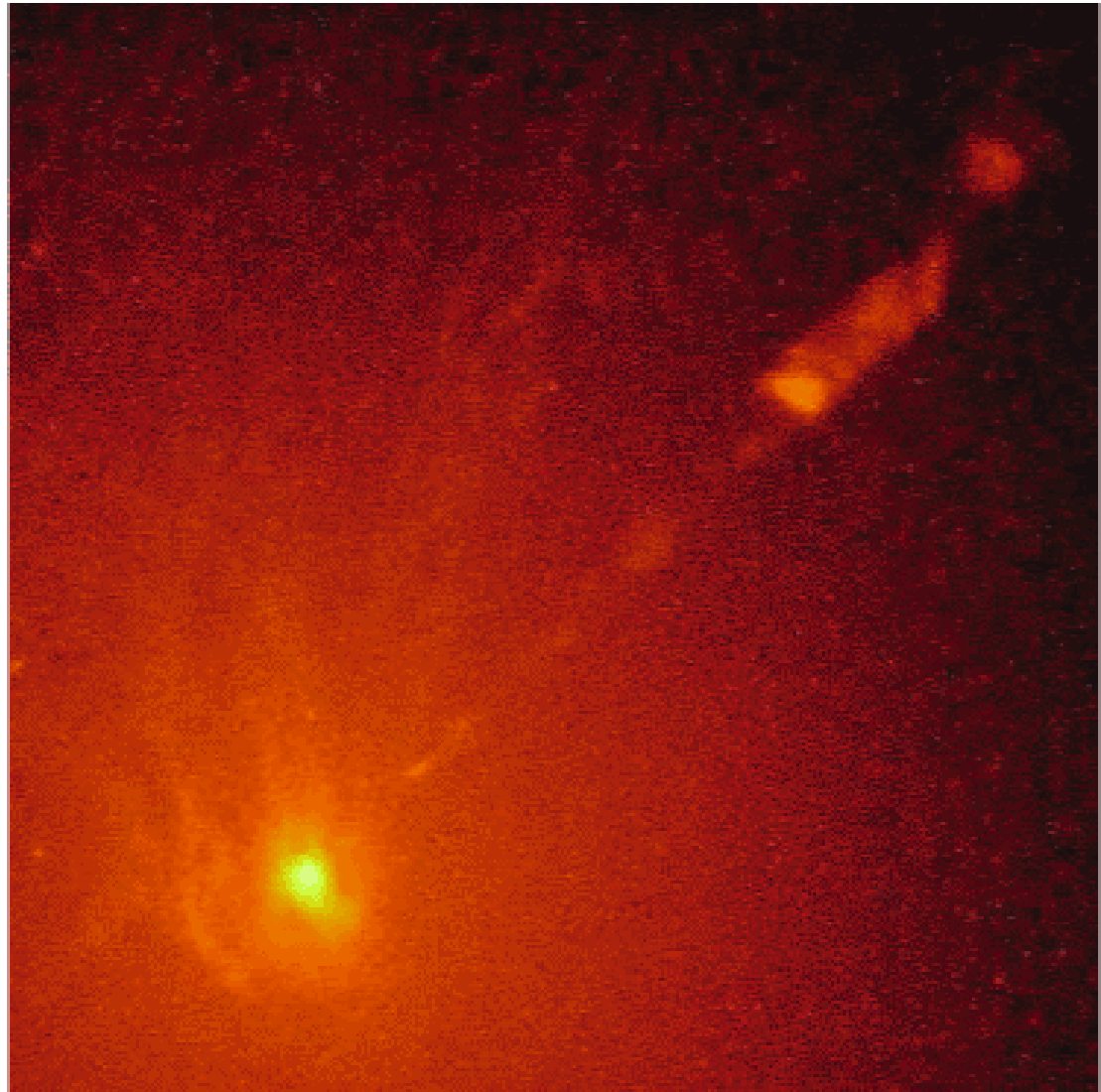
Esta é a única órbita circular possível para os raios de luz. É uma órbita **instável**. Qualquer perturbação levará o raio de luz a escapar ou a cair para o buraco negro. A superfície esférica de raio $1.5 R_s$ chama-se **ROTOSFERA**.



Buracos Negros Supermassivos

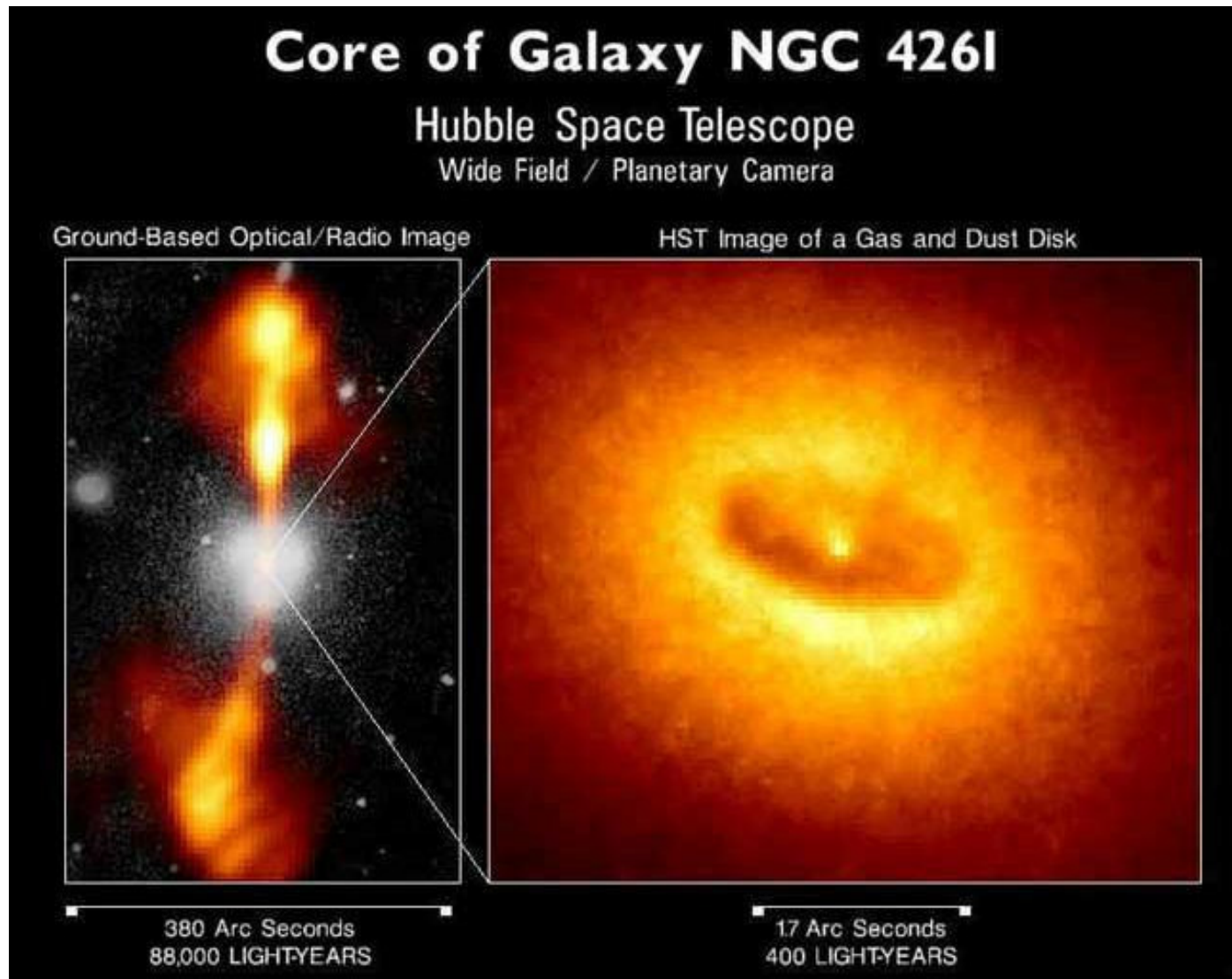
Muitas
galáxias
apresentam
núcleos
ativos

AGN –
Active
Galactic
Nuclei



http://nssdc.gsfc.nasa.gov/image/astro/hst_blkhole.jpg

Muitas vezes são observáveis **jactos** a saírem dos AGNs

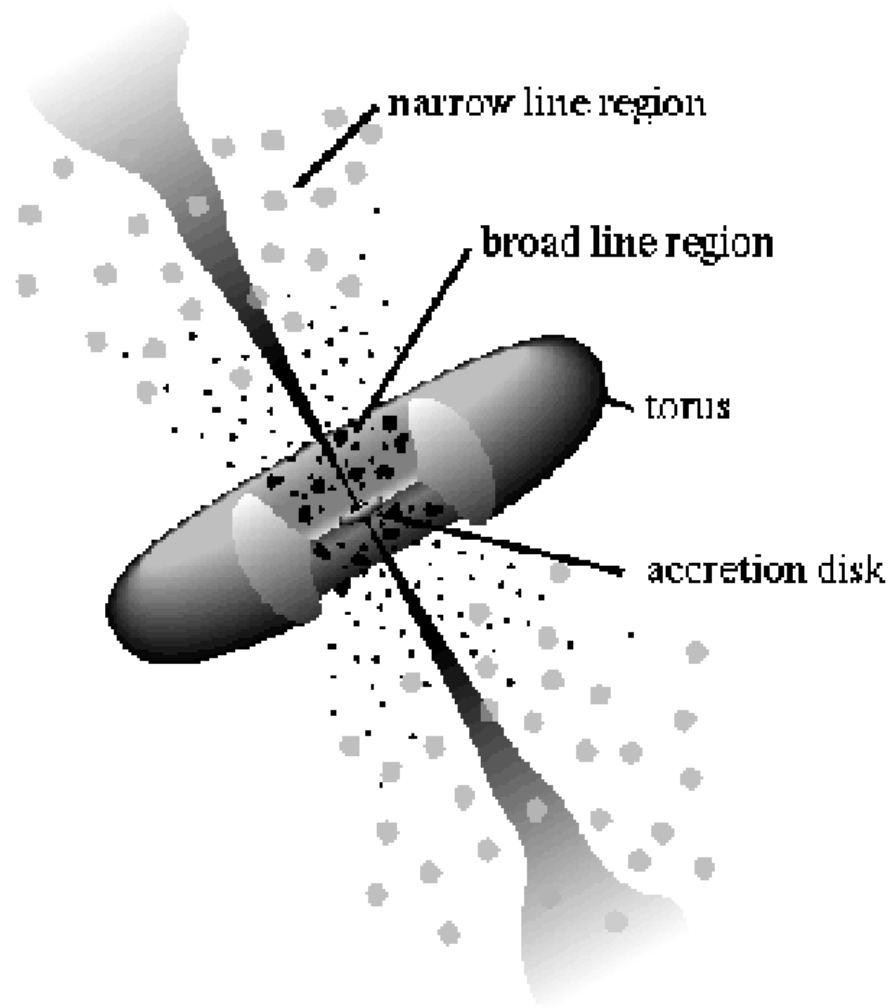


Os AGNs apresentam tipicamente luminosidades 10 000 superiores à de uma galáxia normal concentradas numa região central muito pequena.

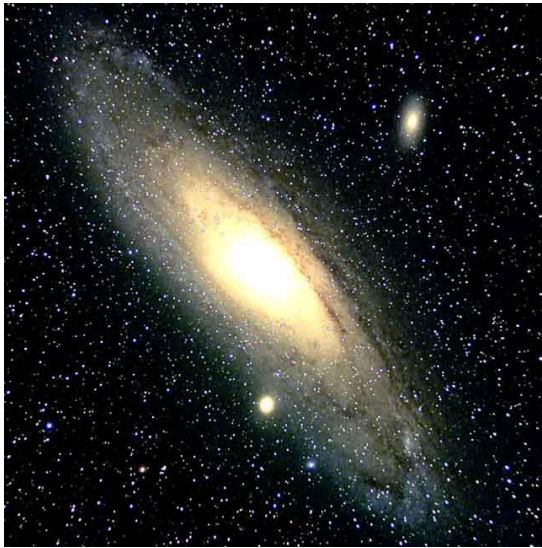
De onde vem a energia emitida por um núcleo galáctico activo ?

A resposta poderá passar pela presença de um **buraco negro supermassivo** no centro da galáxia.





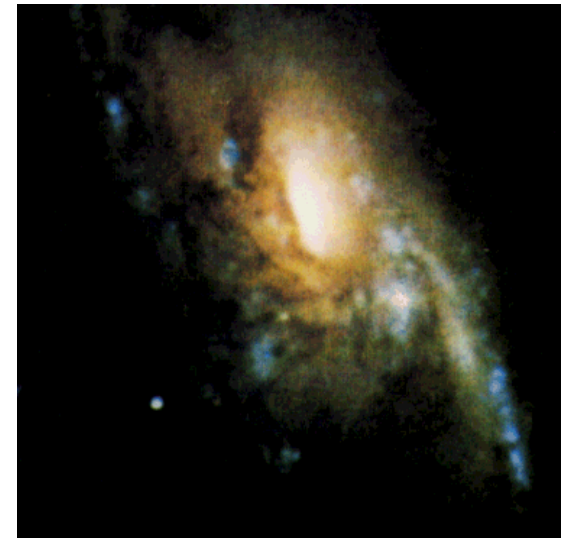
Detectaram-se candidatos a buraco negro supermassivo no centro de muitas galáxias (incluindo também muitas com núcleo pouco activo)



M31 (Andromeda)



NGC3115



NGC4258

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.

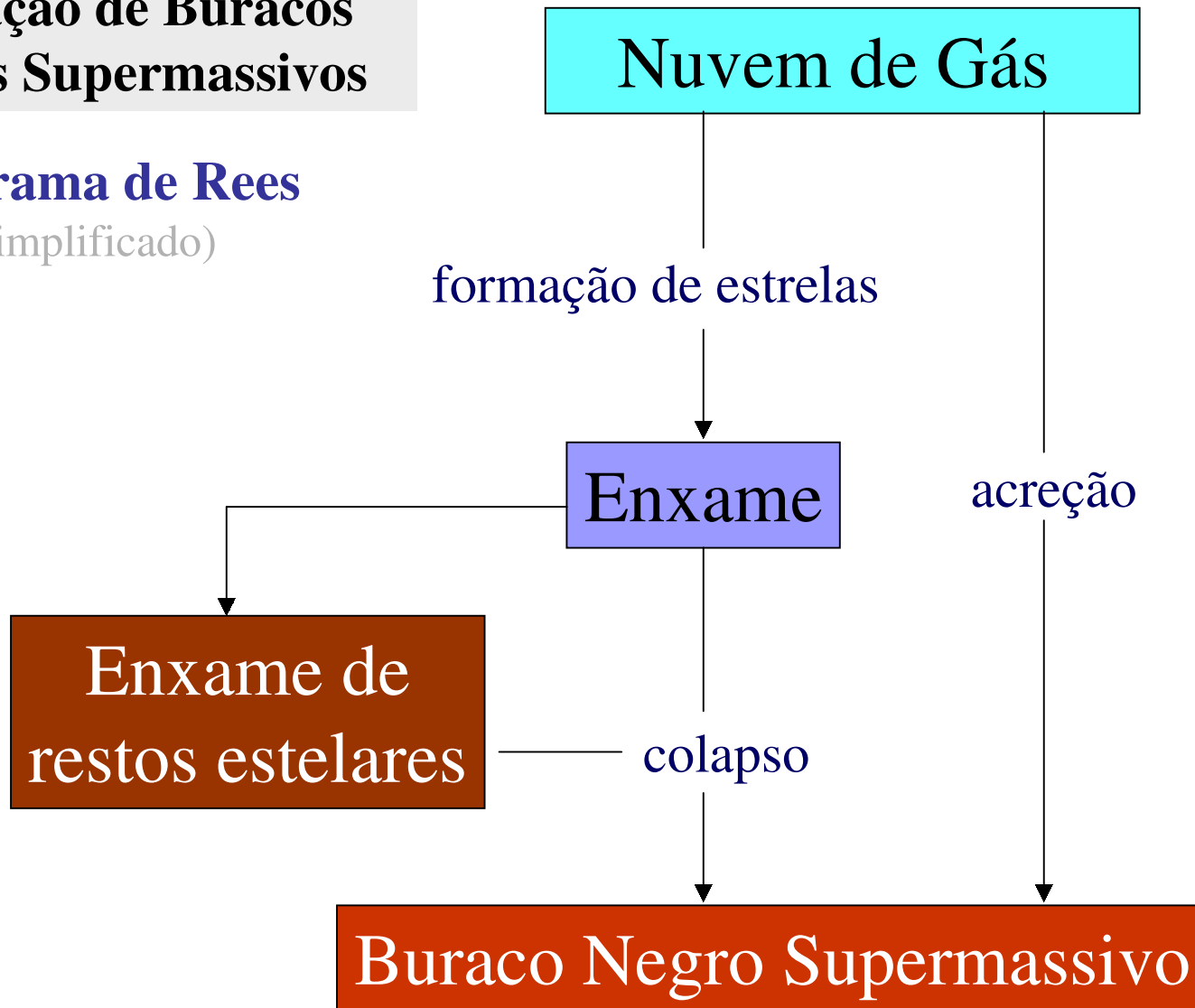
Estelares – Massas entre $1.4M_{\odot}$ e $100M_{\odot}$
Formam-se a partir do colapso de estrelas com mais de $40M_{\odot}$.

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)



Relação Massa / Luminosidade

Se o valor de M/L aumentar em direcção ao centro atingindo valores superiores aos permitidos para um enxame de estrelas velhas ($M/L > 10$) então existe no centro da galáxia um *objecto escuro massivo*:

MDO – Massive Dark Object

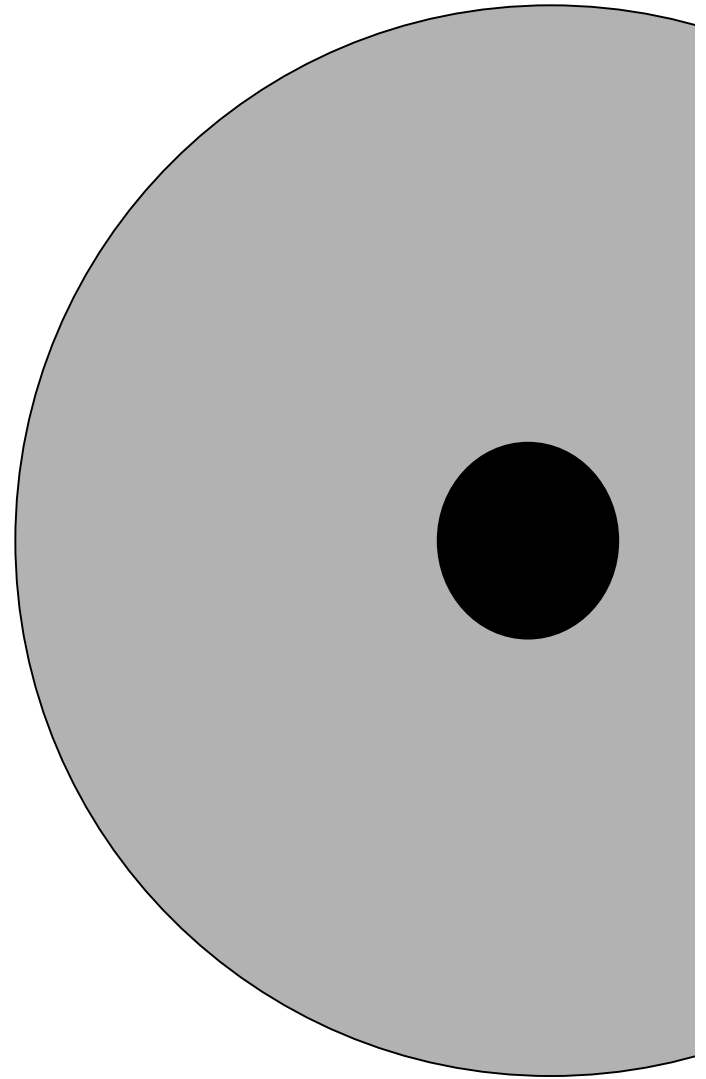
O MDO pode ser um **enxame** de

- estrelas de massa pequena (anãs **vermelhas** e **castanhas**)
- anãs brancas
- estrelas de nêutrons ou buracos negros de massa estelar

Matéria Escura do halo galáctico

Buraco negro supermassivo

Para assegurar que um **MDO** é um
(candidato a) Buraco Negro
Supermassivo é preciso medir
velocidades orbitais a apenas alguns
raios de Schwarzschild do centro.

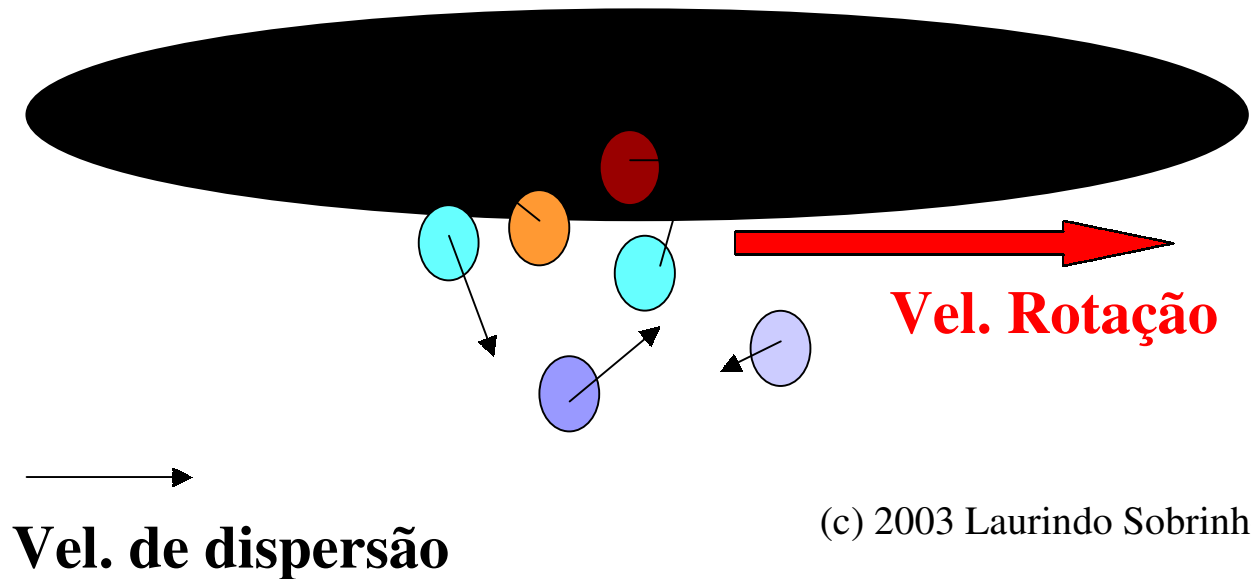


Pesquisa de Buracos Negros Supermassivos

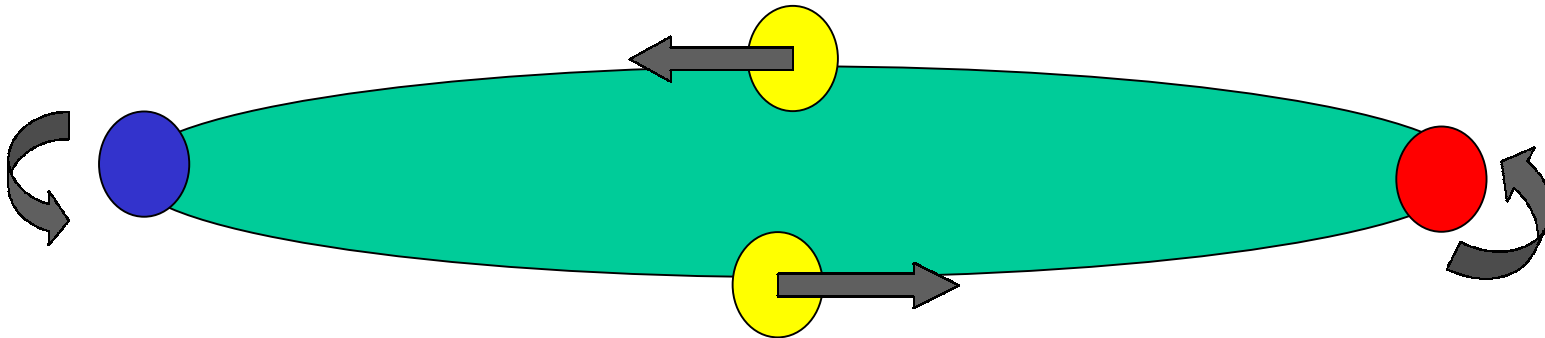
- Dinâmica do gás
- Dinâmica estelar

A pesquisa por dinâmica do gás é menos segura pois o gás não responde apenas à força de gravidade (por exemplo, a presença de um campo magnético pode alterar o comportamento do gás).

As estrelas rodam em torno do centro da galáxia com uma determinada **velocidade de rotação**. Além disso apresentam também **velocidades de dispersão** como se fossem moléculas de um gás!



A medição das velocidades do gás ou das estrelas pode ser feita recorrendo ao **Efeito de Doopler**.

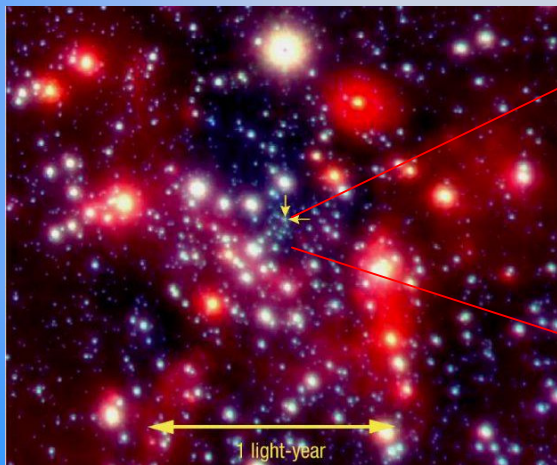


(c) 2003 Laurindo Sobrinho

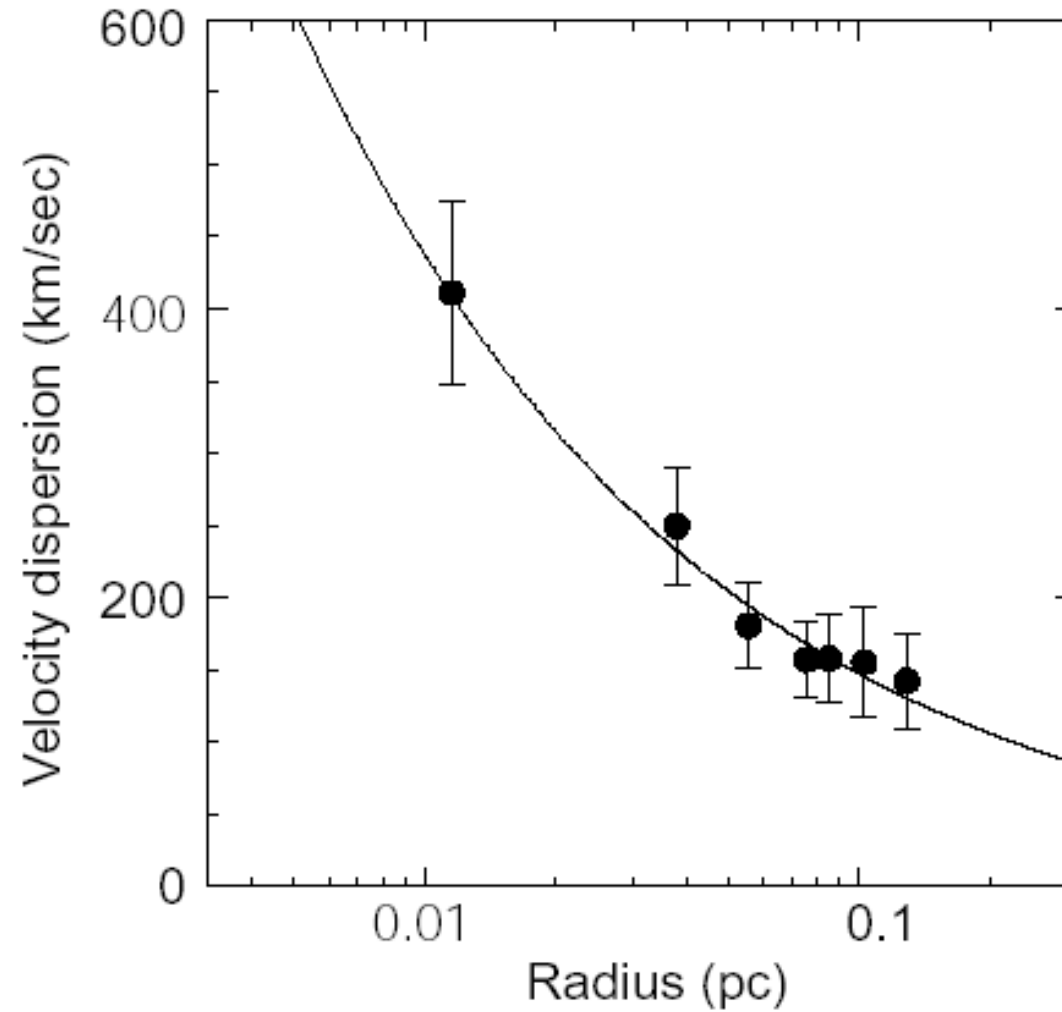
A luz de uma fonte luminosa em aproximação é desviada para o **azul**.

Se a fonte luminosa se afastar então a luz é desviada para o **vermelho**.

○ Buraco Negro no centro da Nossa Galáxia



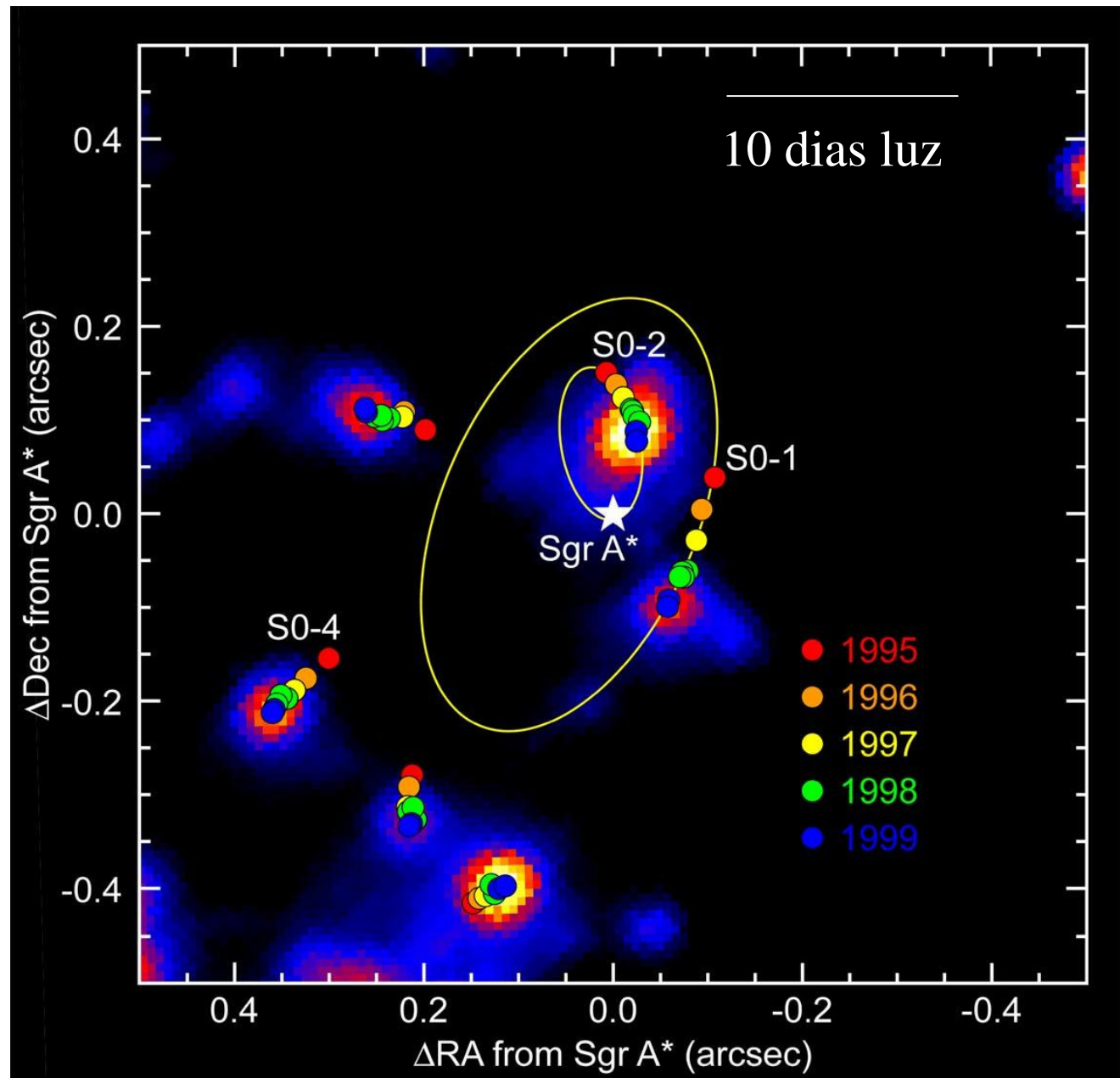
Variação da Velocidade de dispersão com a aproximação ao centro da Galáxia.



Ghez et al. 1999

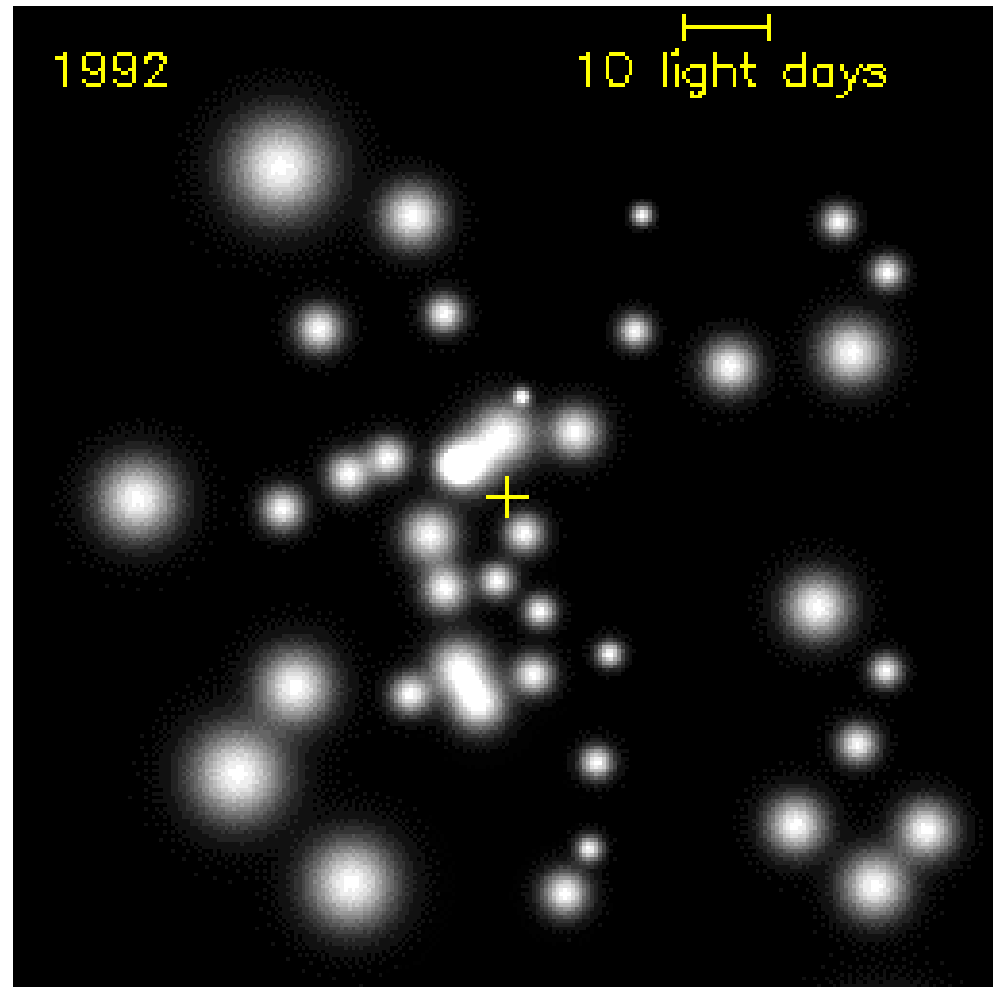
Movimento de algumas estrelas em torno de **Sgr A***.

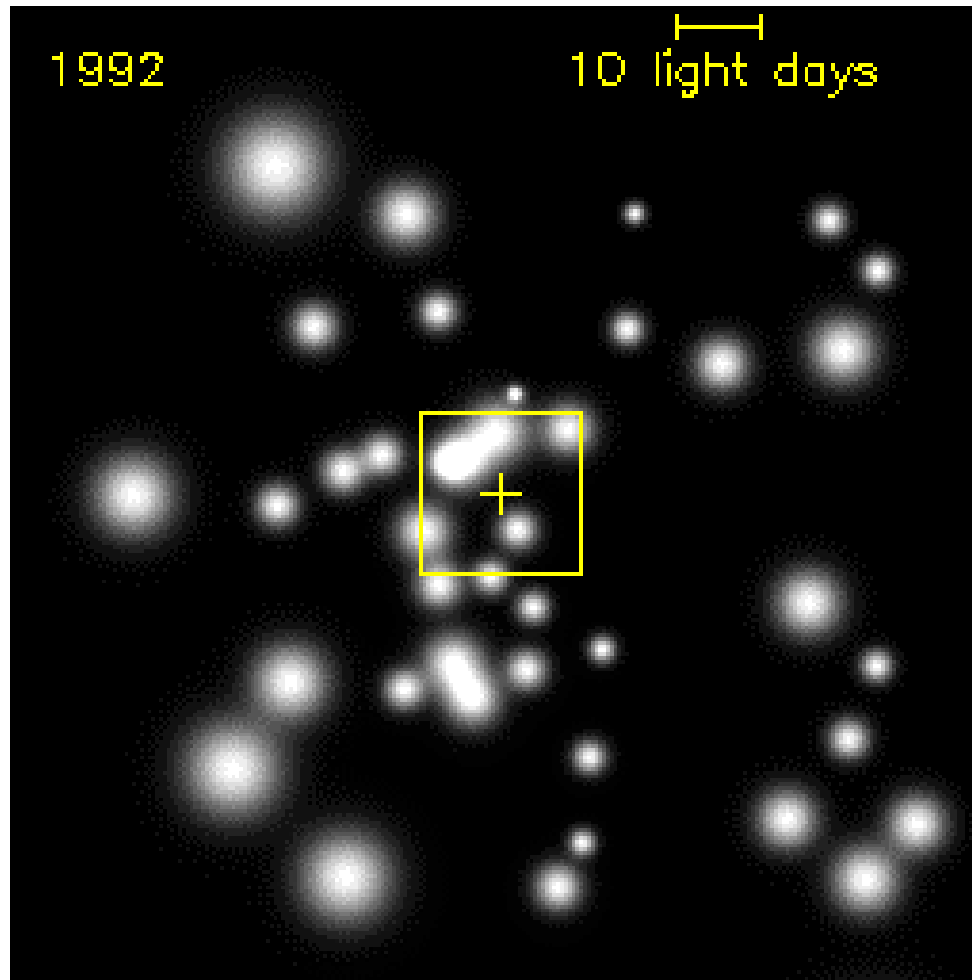
SO-1 tem um período orbital de 63 anos e **SO-2** de 17 anos.



Ghez et al. 2000

Estrelas
movimentando-se
com velocidades da
ordem dos **1000 km/s**
a apenas alguns dias luz
do centro.
O movimento de
Sgr A* é, nesta escala,
imperceptível.

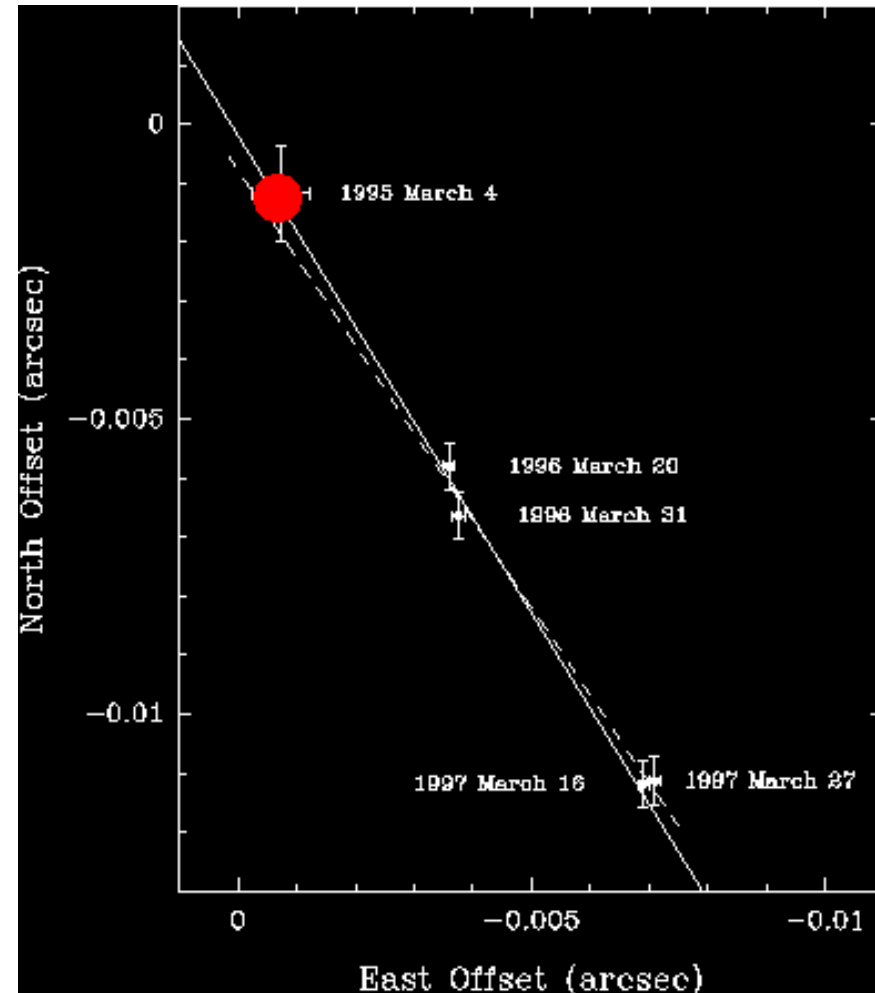




Dados os valores das velocidades das estrelas a massa existente no centro deve ser da ordem dos **dois milhões de massas solares!**

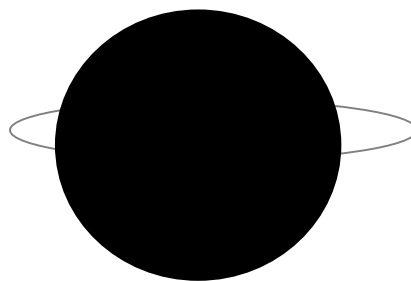
Se a massa associada a Sgr *A for $2.6 \times 10^6 M_{\odot}$ então esta fonte rádio deve estar praticamente imóvel devido à sua enorme **inércia**.

Movimento de Sgr A*
entre Março de 95 e
Março de 97
(distância da ordem do
raio do Sistema Solar)

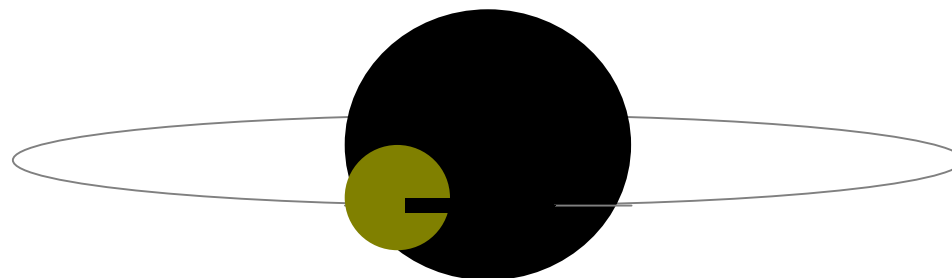


Podemos pensar em duas hipóteses:

1-Ou a massa de Sgr A* é da ordem das $2.6 \times 10^6 M_{\odot}$ fazendo deste um forte candidato a buraco negro supermassivo.



2-Ou a massa de Sgr A* é pequena e nesse caso ele deve orbitar em torno de um objecto de $2.6 \times 10^6 M_{\odot}$ objecto esse candidato a buraco negro supermassivo.



Raio

Sabendo a massa do buraco negro podemos determinar o respectivo *Raio de Schwarzschild*:

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

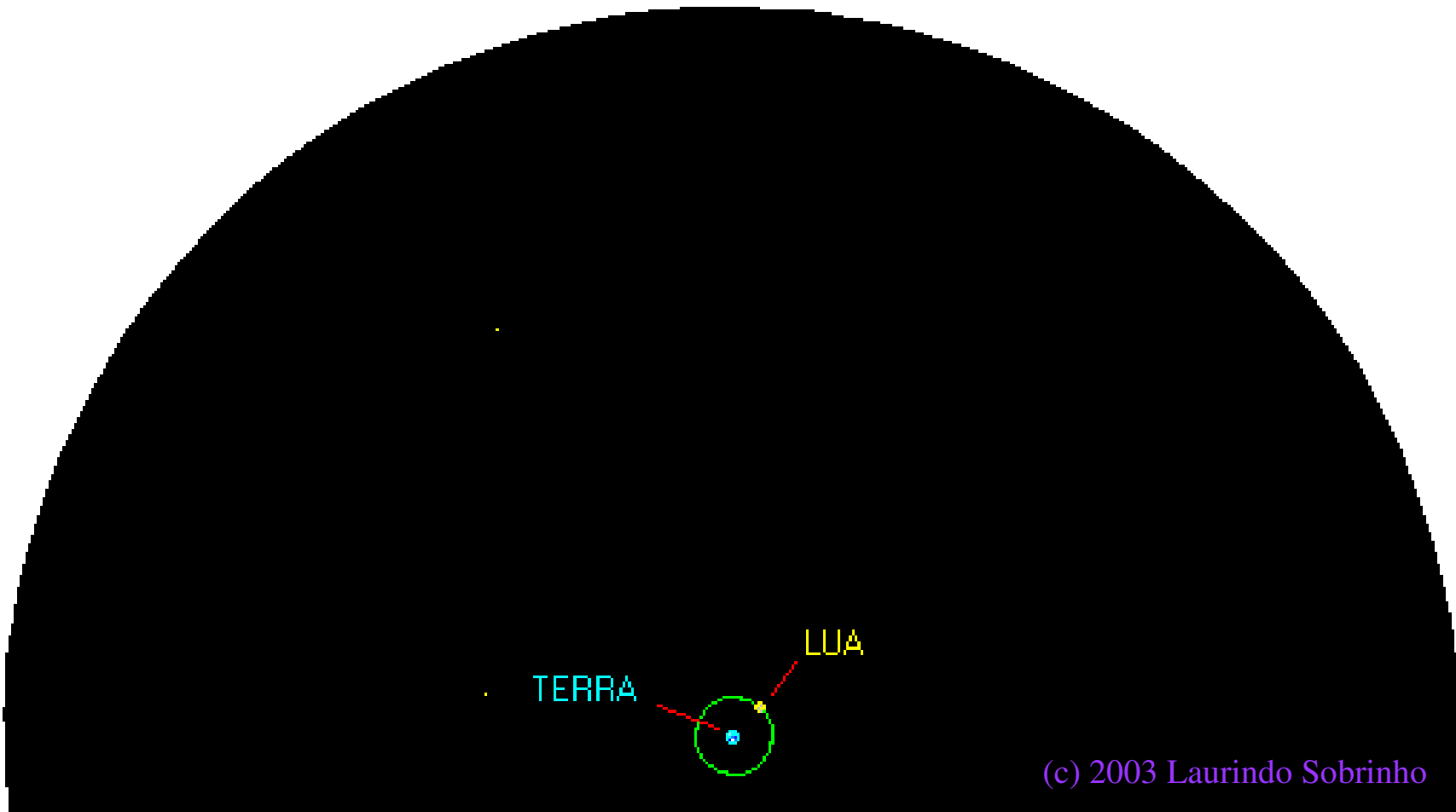
$c \approx 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ → Velocidade da luz (no vácuo)

$G \approx 6.7 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$ → Constante de Gravitação Universal

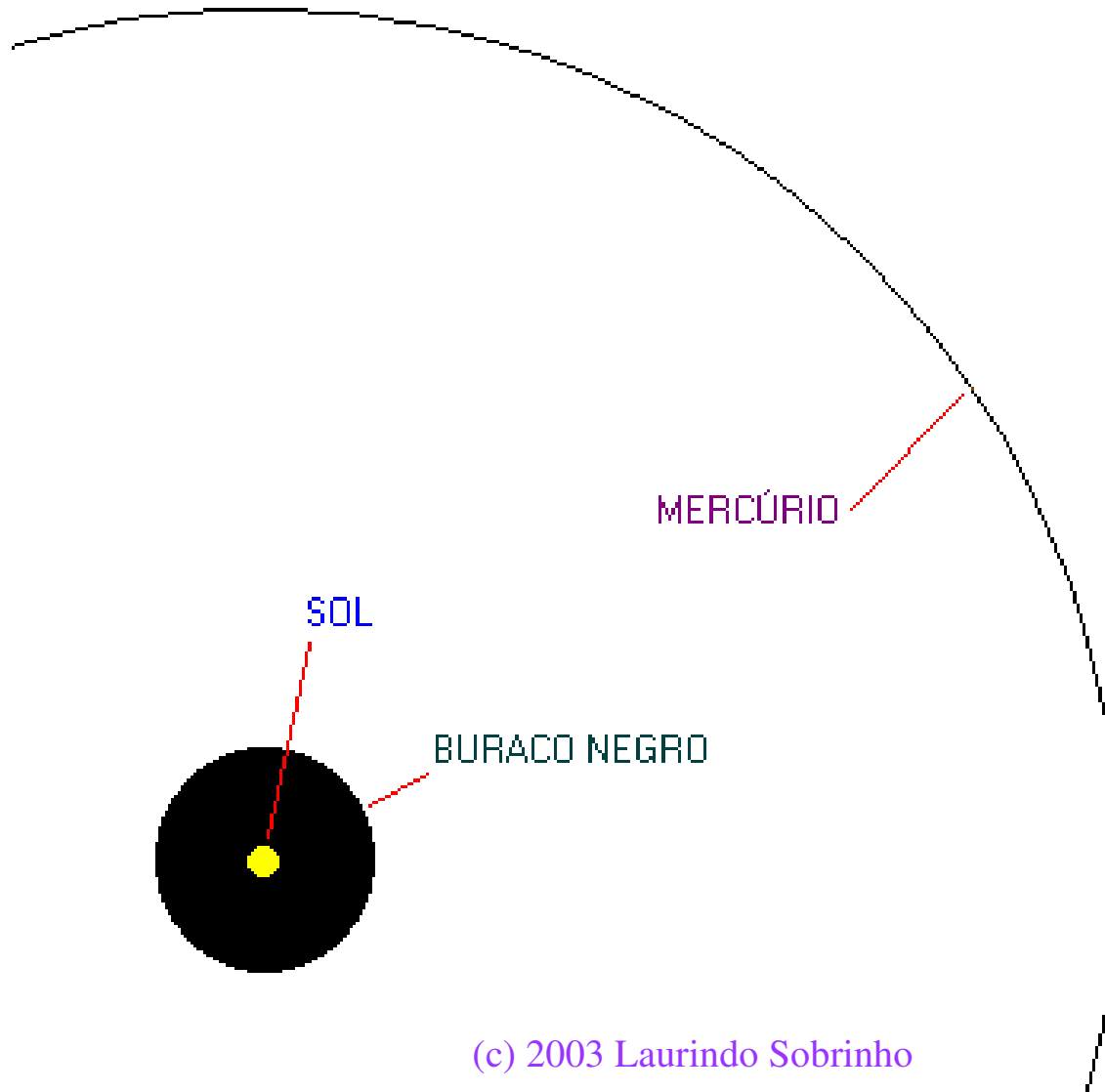
$$R_s = 7.68 \times 10^9 \text{ m}$$

7 680 000 000 m

Este valor corresponde a cerca de 19 vezes a distância
da Terra à Lua



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.

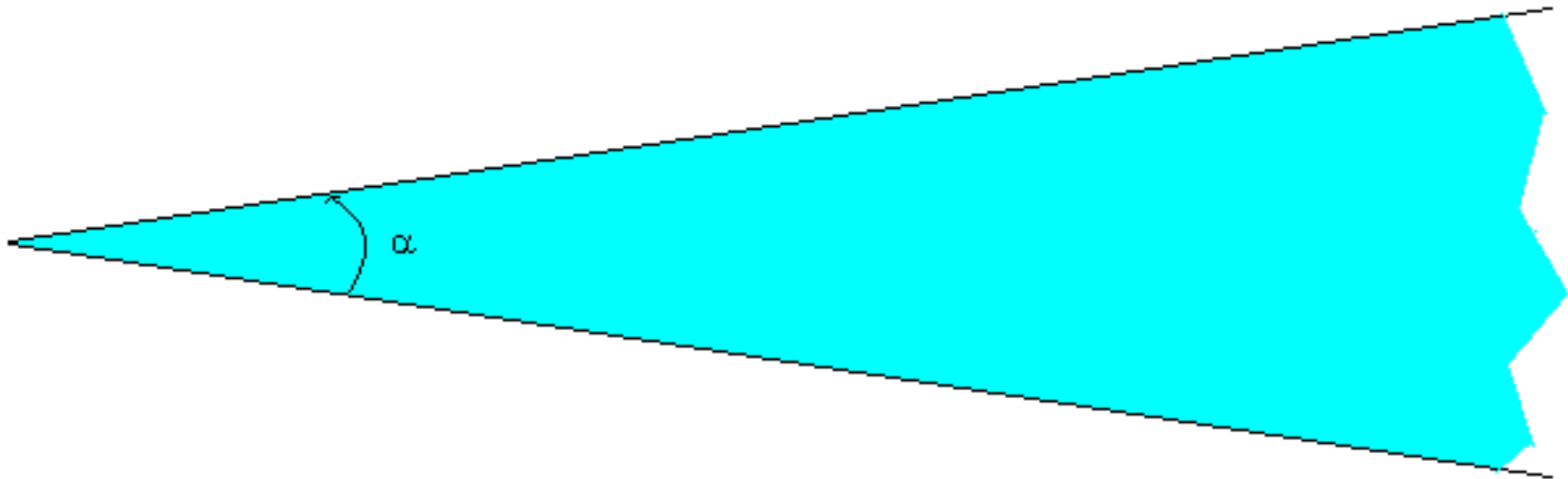
A **Terra** fica a cerca de 19 Raios de Schwarzschild do centro.

A observação é limitada pela **resolução** do equipamento.

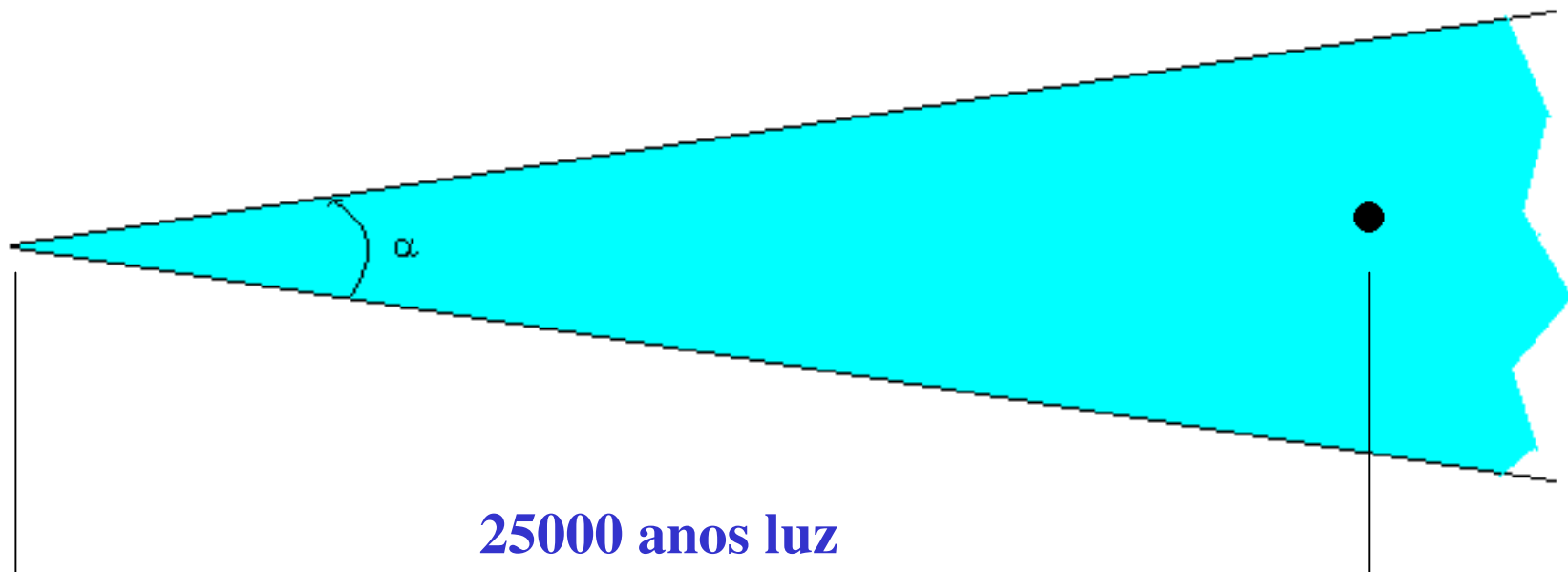
As melhores resoluções atingidas (VLBI) correspondem a **$5 \times 10^{-5}''$**

$$1^\circ = 60' \quad 1' = 60'' \quad 1^\circ = 3600''$$

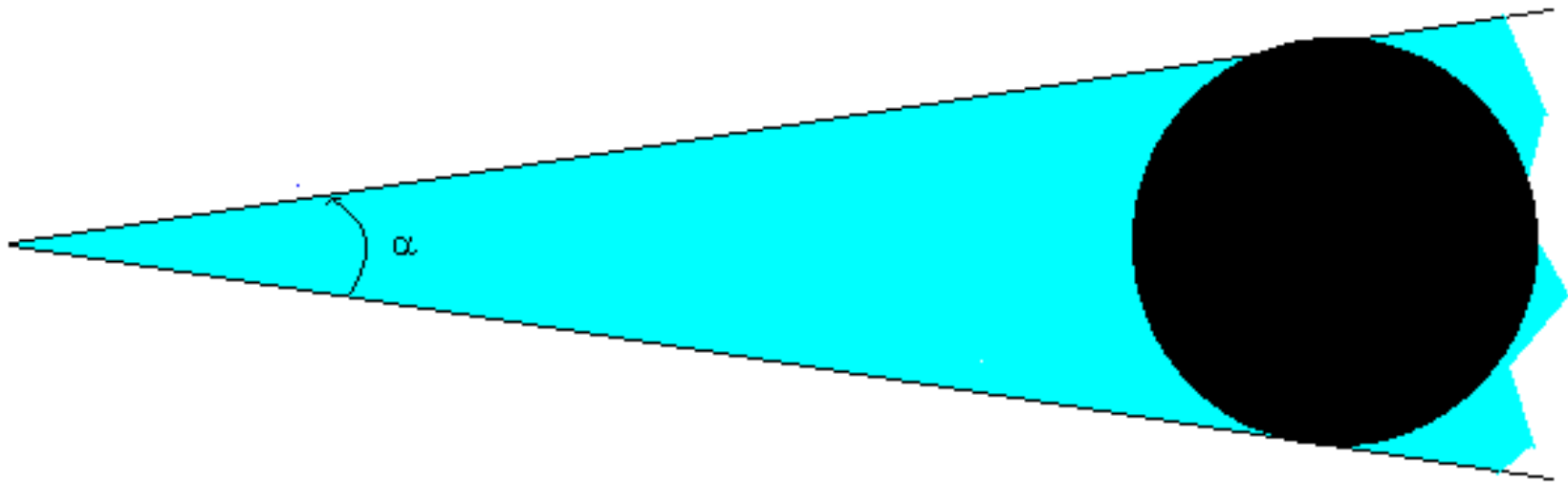
$$5 \times 10^{-5}'' = 0.00001''$$



A resolução de $5 \times 10^{-5}''$ à distância do centro da Galáxia (25000 anos luz) corresponde aproximadamente a **8 Raios de Schwarzschild!!!**

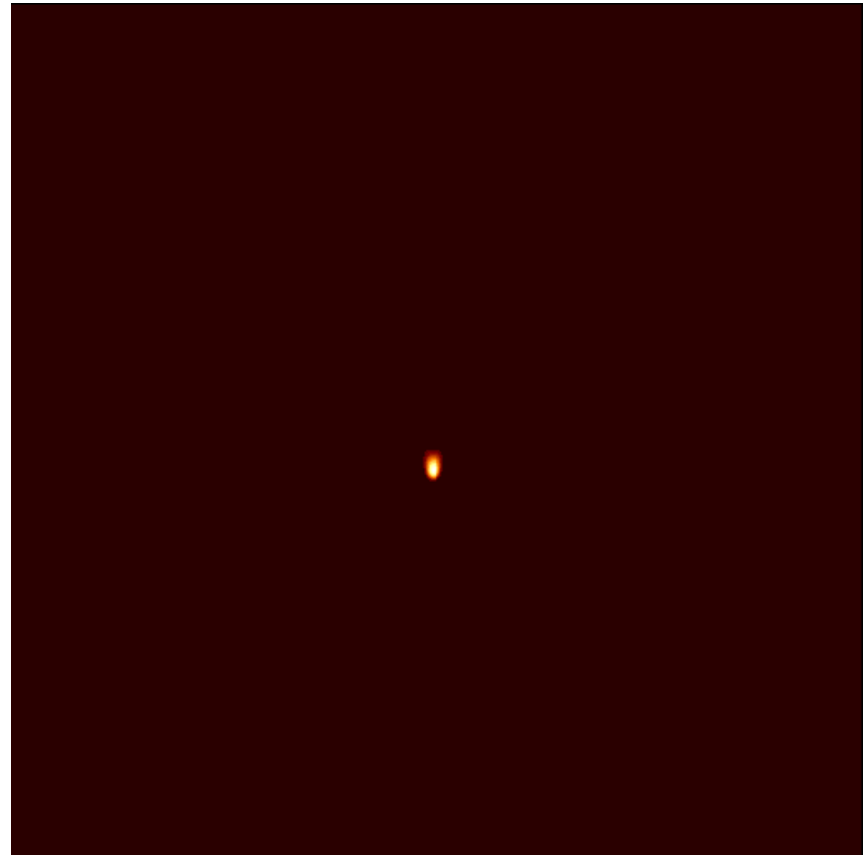


Para ser possível resolver o buraco negro este teria
de estar a apenas 3000 anos luz de distância.
(cerca de 8 vezes mais próximo)



Ao diminuir o comprimento de onda de observação, ou seja, ao aumentar a frequência, é possível aumentar a resolução das imagens obtidas.

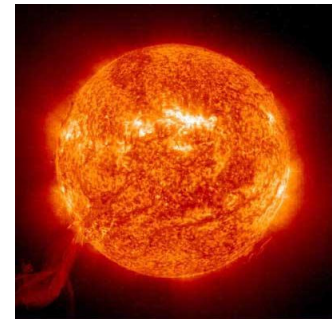
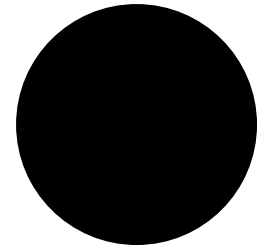
A animação simula a dimensão de Sgr A* quando vamos dos 5Ghz aos 43GHz.

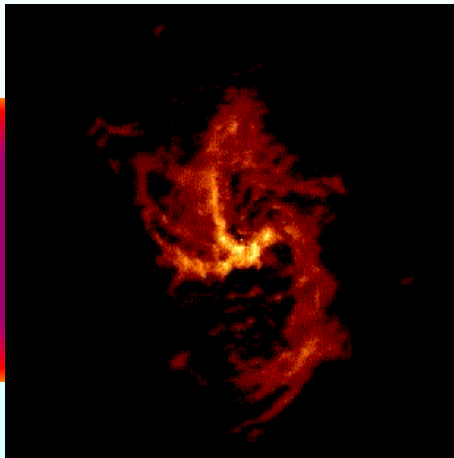


Se existir mesmo um buraco negro de 2.6 milhões de massas solares no centro da Nossa Galáxia qual a sua influência sobre nós?

Em termos de atracção gravítica o Sol é cerca de 10000000000000 (10^{12}) vezes mais influente.

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





Fim

Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira - 2003

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