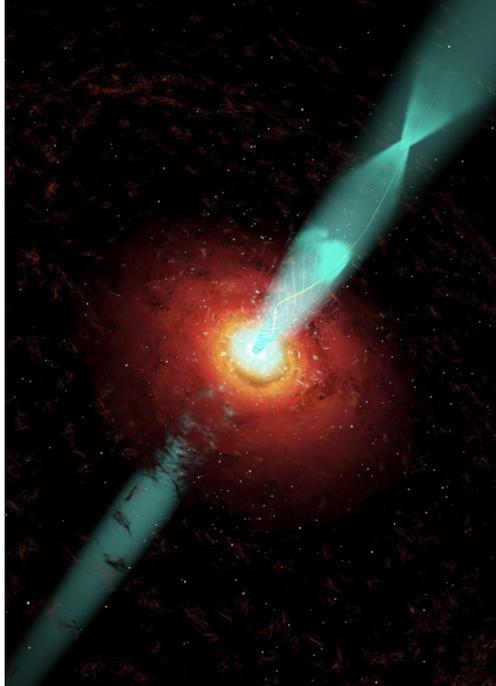
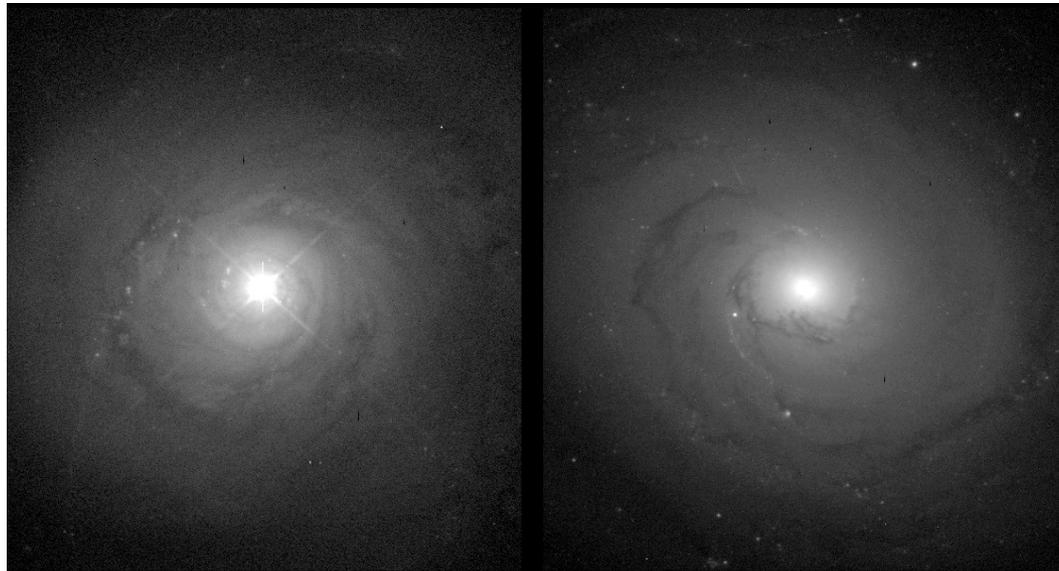


# 13. Os núcleos ativos de galáxias



- Algumas galáxias apresentam um núcleo extraordinariamente luminoso, algumas vezes mais luminoso que o resto da galáxia: são os **núcleos ativos** (NAs, ou AGN em inglês: active galactic nuclei).
- Muitas galáxias apresentam um *starburst* nuclear, algumas vezes muito forte. Mas supõe-se que, nos NAs, a fonte de energia não é a  *fusão nuclear* nas estrelas, mas sim a  *captura de matéria por um buraco negro supermassivo*.
- Muitos NAs convivem com starbursts nucleares.



Comparação entre a galáxia de Seyfert NGC5548 e a galáxia normal NGC3277<sup>2</sup>

# Classificação:

Existe toda uma “fauna” de NAs, muitas vezes definidos em função da técnica observacional com que foram detectados ou das características de seu espectro:

- Galáxias de Seyfert
- Quasares
- Rádio-galáxias
- Liners
- Blazars
- ...

# Classificação: diagramas de diagnóstico

- Linhas de emissão podem ser produzidas por um gás quente, aquecido seja por estrelas jovens (região HII) ou por um NA
- Como distinguir a emissão devido a formação estelar daquela produzida por captura de matéria por um buraco negro?
- Diagramas de diagnóstico:  
BPT: Baldwin, Phillips, Terlevich (1981)  
 $[O III]/H\beta \times [N II]/H\alpha$

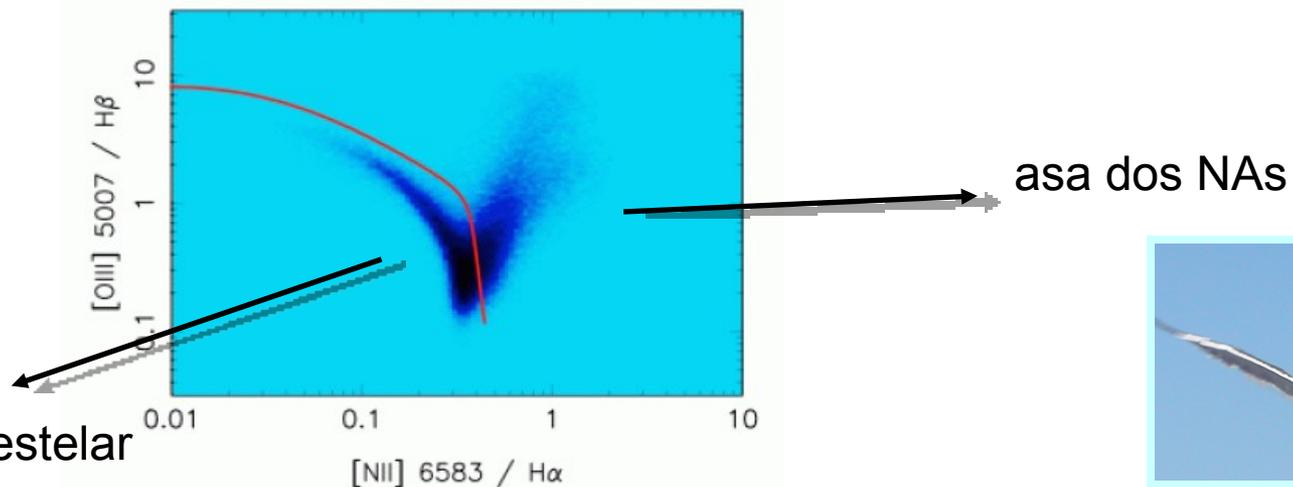
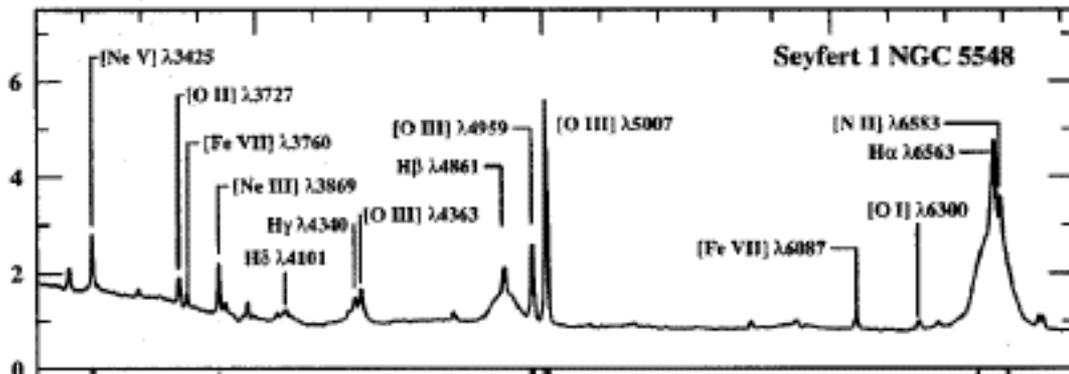


diagrama da gaivota

# Classificação: galáxias de Seyfert

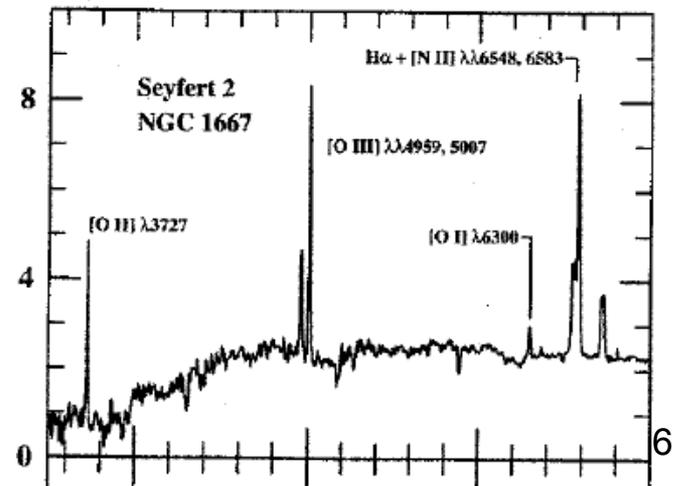
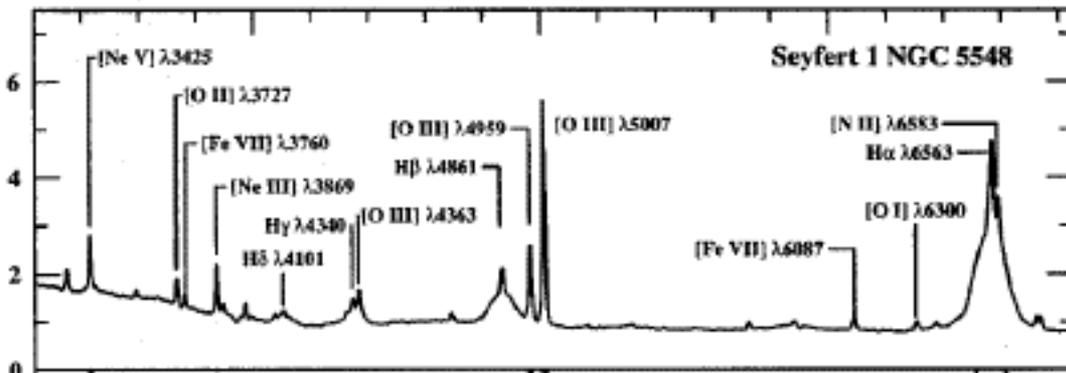
- Seyfert (1943): galáxias onde o núcleo tem um espectro com um contínuo muito azul e linhas de emissão fortes



Carl Seyfert junto ao telescópio de 24 pol. da Vanderbilt University 5

# Classificação: galáxias de Seyfert

- Sey 1: apresentam 2 conjuntos de linhas de emissão superpostos:  
linhas estreitas e linhas largas
- Sey 2: apenas as linhas estreitas são observadas
- As Sey luminosas são, em geral, espirais *early-type* (Sa, Sb)

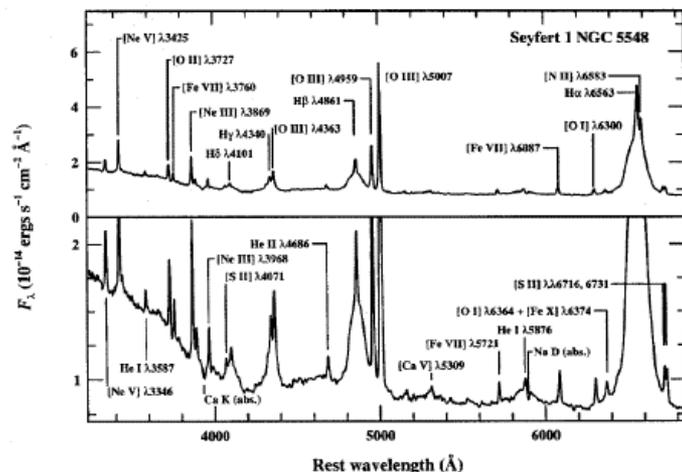


# Classificação: galáxias de Seyfert

- Sey 1: apresentam 2 conjuntos de linhas de emissão superpostos:  
linhas estreitas e linhas largas
- linhas “estritas”: linhas proibidas, produzidas em um gás de baixa densidade  
(densidade eletrônica:  $n_e \sim 10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$ )  
Ex.:  $[\text{Ne V}]\lambda 3425$ ,  $[\text{O II}]\lambda 3727$ ,  $[\text{Fe VII}]\lambda 3760$ ,  $[\text{Ne III}]\lambda 3869$ ,  $[\text{O III}]\lambda\lambda 4363, 4959, 5007$ ,  $[\text{N II}]\lambda 6583$
- linhas “largas”: presentes apenas nas linhas permitidas, indicando que provêm de um gás de alta densidade  
( $n_e > 10^8 \text{ cm}^{-3}$ )  
Ex.:  $H\alpha$ ,  $H\beta$   
-larguras entre 1000 e  $\sim 10.000 \text{ km s}^{-1}$  ( $v \sim c\Delta\lambda/\lambda$ )  
-altamente variáveis no ótico, UV e raios-X  
-Ex.: NGC5548, NGC4151, NGC3783, NGC1566



NGC4151



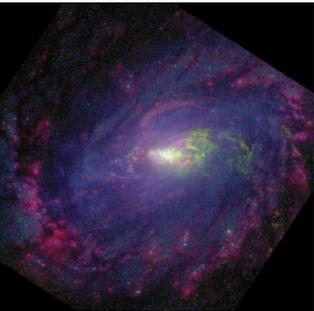
NGC1566

Figura 8.1: Espectro óptico da Seyfert 1 NGC5548. A figura de baixo é uma versão expandida da de cima para mostrar as linhas mais fracas. A largura a meia altura (FWHM) das linhas largas é  $5900 \text{ km s}^{-1}$  e a das linhas estreitas é  $400 \text{ km s}^{-1}$ .

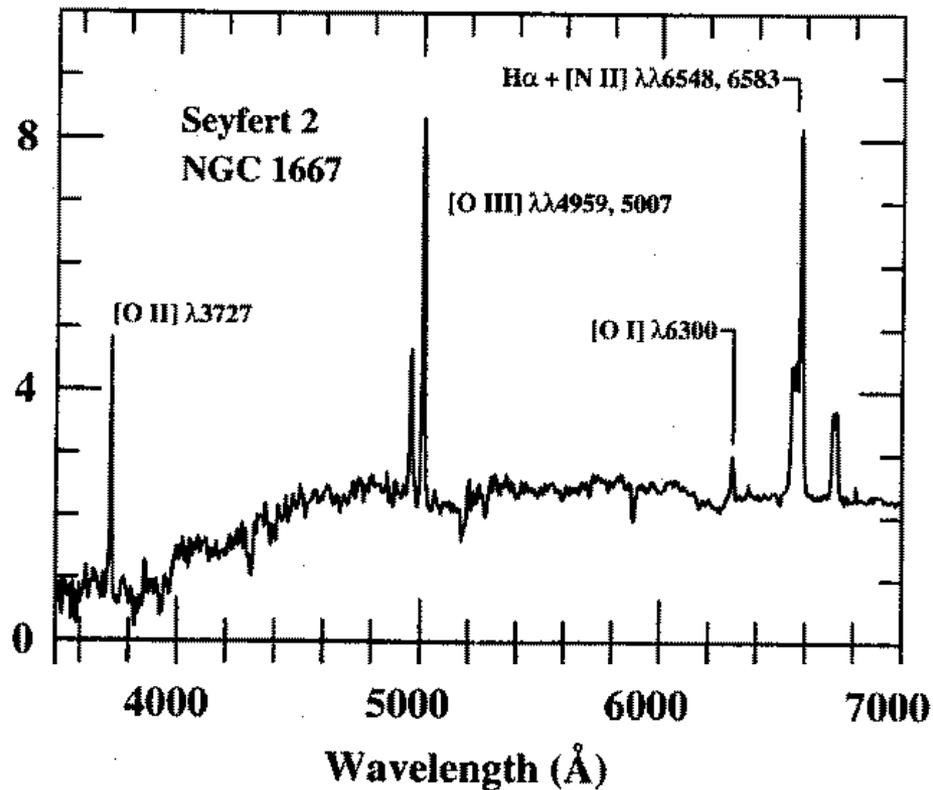
# Classificação: galáxias de Seyfert

Sey 2: apenas as linhas estreitas são observadas

- espectro diferente do de regiões HII
- não variam



NGC1068



NGC1667

# Classificação: quasares

quasares:

- similares às Sey, mas são mais luminosos e distantes
- originalmente QSOs (*quasi stellar objects*) eram objetos muito azuis descobertos ópticamente, enquanto que quasares eram QSOs descobertos por sua emissão rádio forte
- hoje em dia se usa quasar como sinônimo de QSO, independentemente da emissão rádio
- a distinção entre Sey e quasares é essencialmente em luminosidade: Sey são quasares de baixa luminosidade  
 $M_B > -21.5 + 5 \log h$ : Seyferts  
 $M_B < -21.5 + 5 \log h$ : quasares
- ~ 5 - 10% são *radio loud*: forte emissores em rádio
- contínuo óptico muito azul:  
-pode ser aproximada por uma lei de potência,  $f \propto \nu^{-\alpha}$ , com  $\alpha \sim 1$

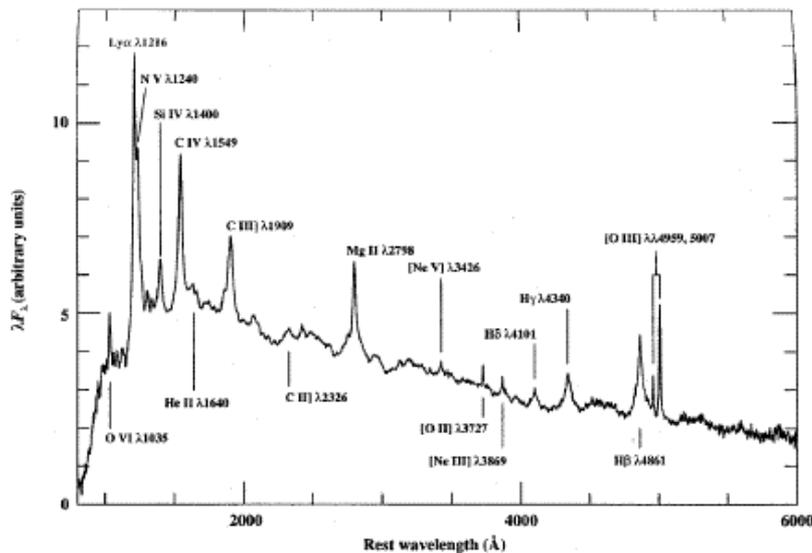


Figura 8.3: Espectro médio dos quasares.



# Classificação: quasares

quasares:

- Eram muito mais comuns no passado
- densidade atual:  $\sim 1$  por  $\text{Gpc}^3$

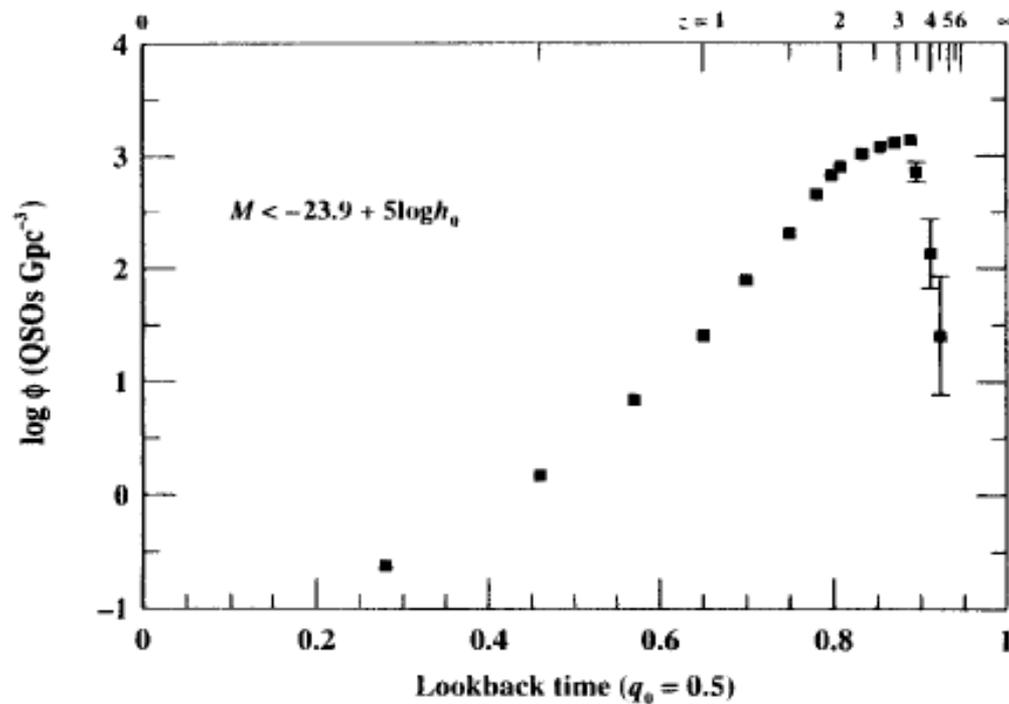
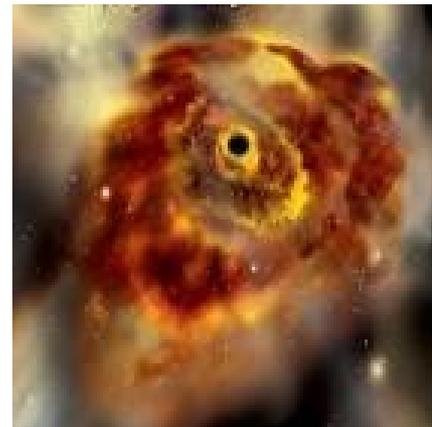
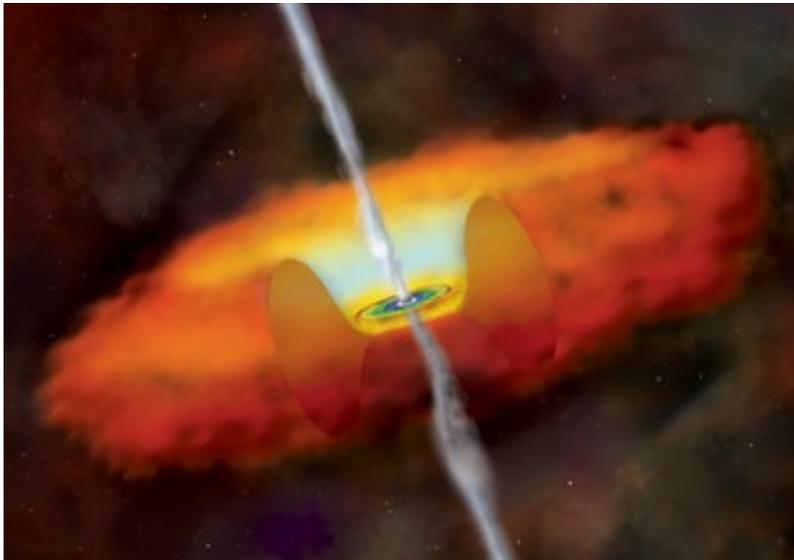
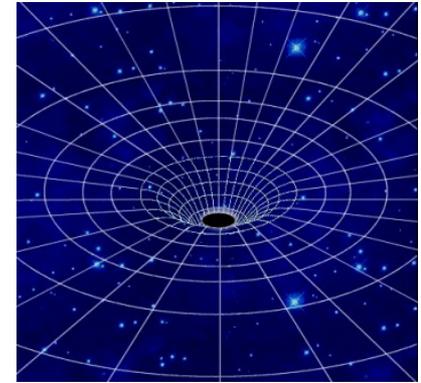


Figura 8.4: Densidade comóvel de quasares.

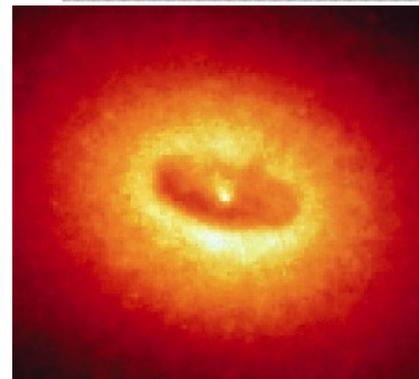
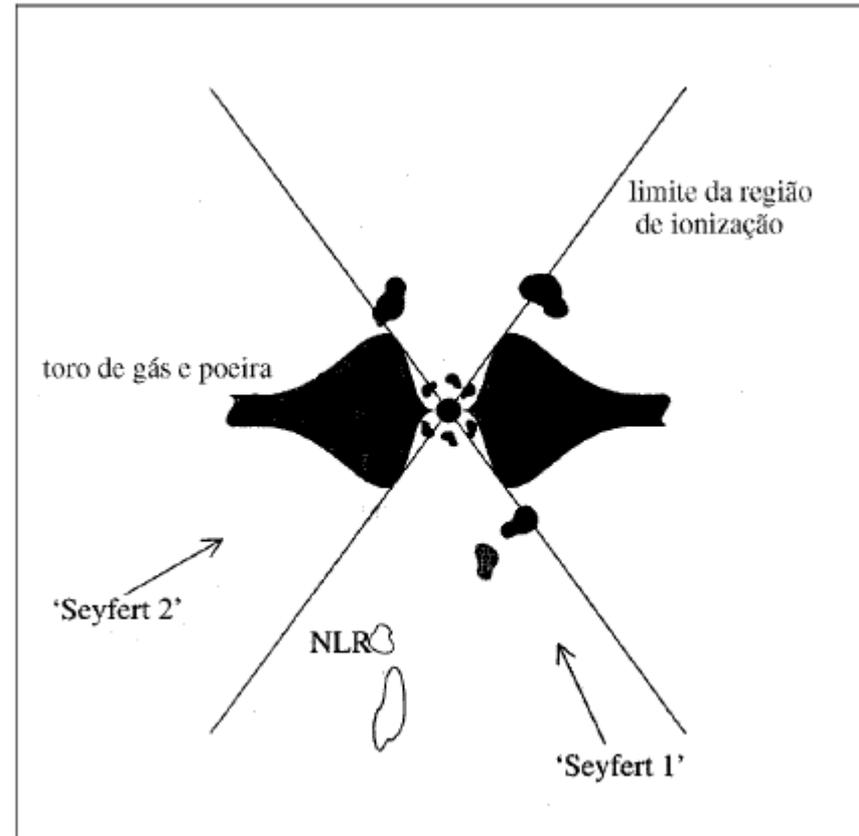
# O modelo unificado

- A fonte de energia é um buraco negro super-massivo
- A matéria se estabelece num disco que espirala para o buraco negro e, nesse processo, se aquece e irradia
- O raio do disco de acreção é de dezenas a centenas de unidades astronômicas
- O BN e o disco de acreção são rodeados por um anel de nuvens moleculares de raio muito maior, dezenas a centenas de pc



# O modelo unificado

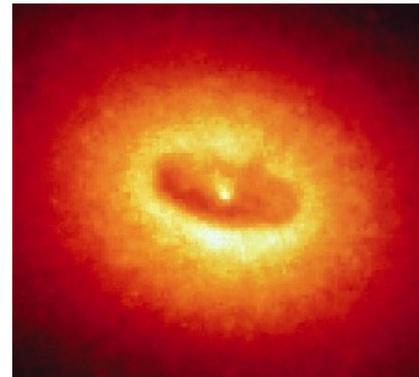
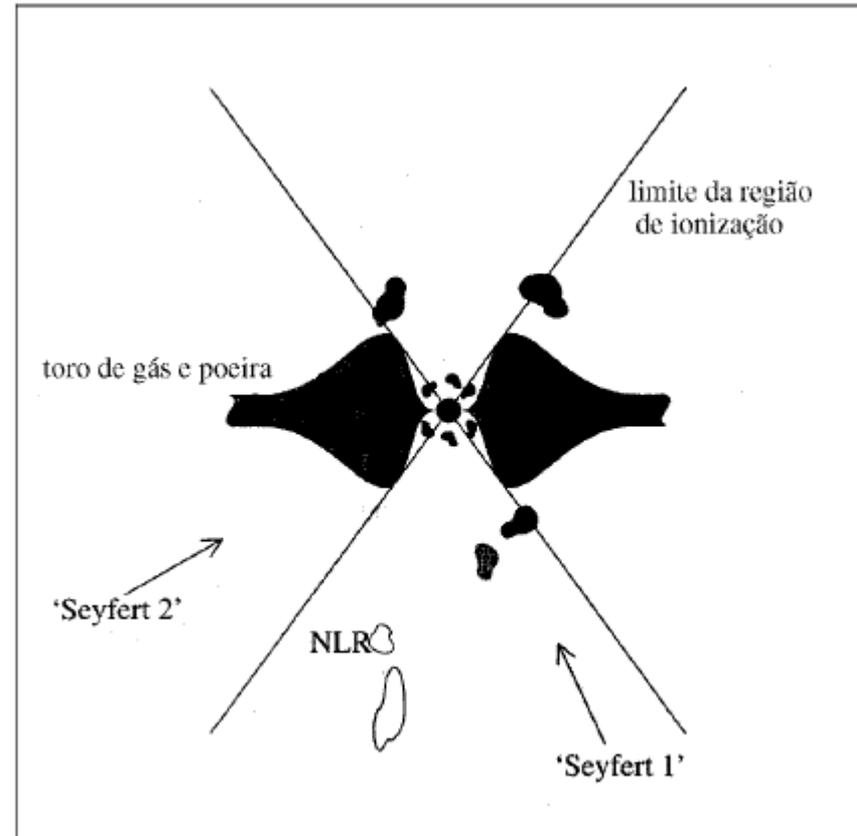
- idéia básica: o tipo do núcleo ativo depende de sua orientação em relação à linha de visada
- Os fótons ionizantes são emitidos por um disco de acreção em torno do buraco negro: é aí a região que produz as linhas largas (BLR- *broad-line region*)
- A BLR está envolvida por um toro de gás e poeira
- a região de linhas estreitas (NLR- *narrow-line region*) é bem mais extensa
- Sey 1: vê-se a BLR
- Sey 2: a BLR está obscurecida pelo toro



Núcleo de NGC4261

# O modelo unificado

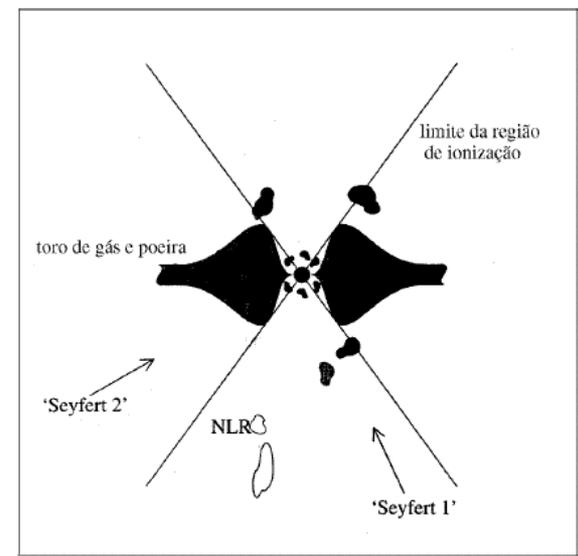
- Sey 1: vê-se a BLR
- Sey 2: a BLR está obscurecida pelo toro
- regiões de formação das linhas:
  - \* região das linhas largas: BLR  
 $n_e > 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 
    - região compacta ( $< 1 \text{ pc}$ ), não resolvida
    - o alargamento das linhas pode ser produzido por efeito Doppler
  - \* região das linhas estreitas: NLR  
 $n_e \sim 10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 
    - região extensa, de centenas de pc a alguns kpc



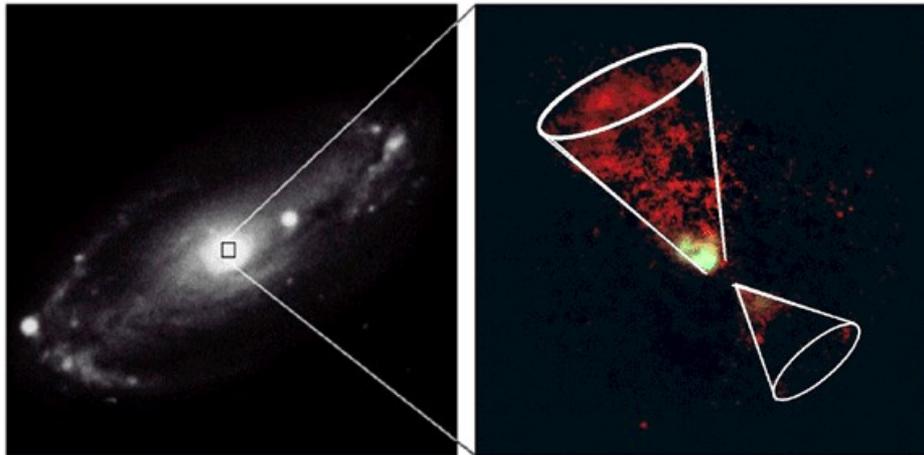
Núcleo de NGC4261

# O modelo unificado

região das linhas estreitas: NLR  
 -região extensa, de centenas de pc a alguns kpc  
*cones de ionização*

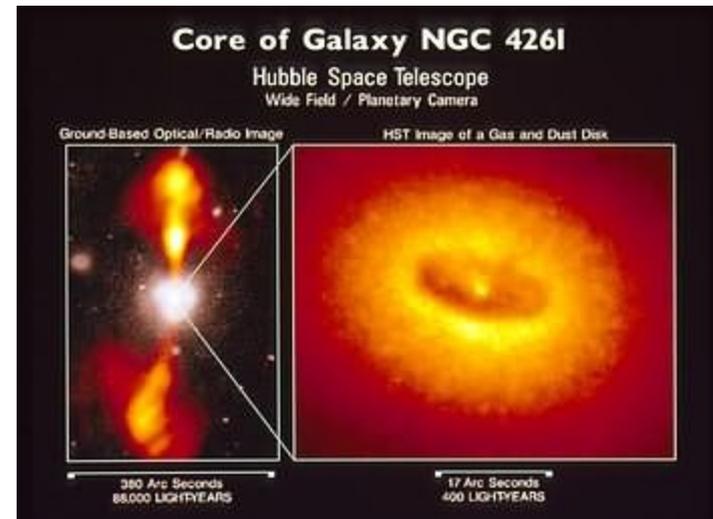


**NGC 5728**  
 Hubble Space Telescope  
 Wide Field / Planetary Camera

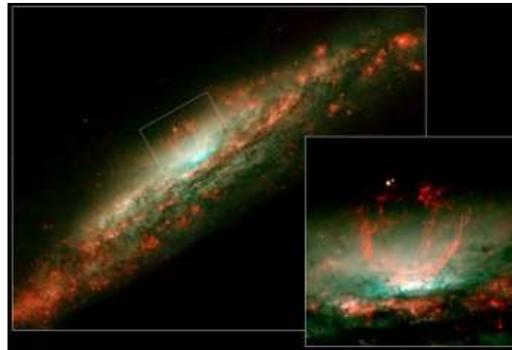


Ground View

HST View



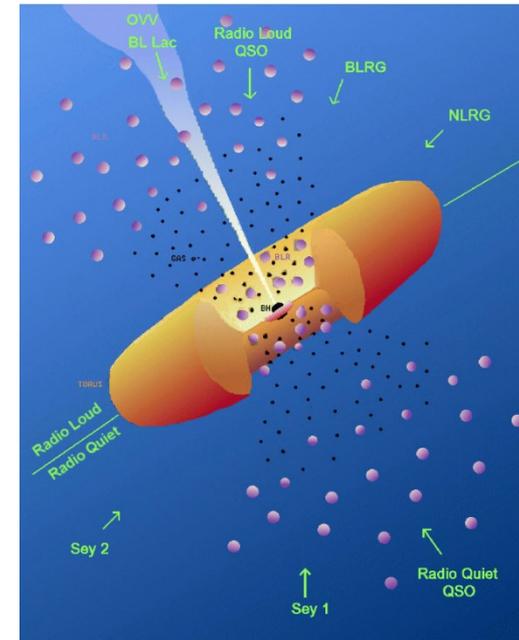
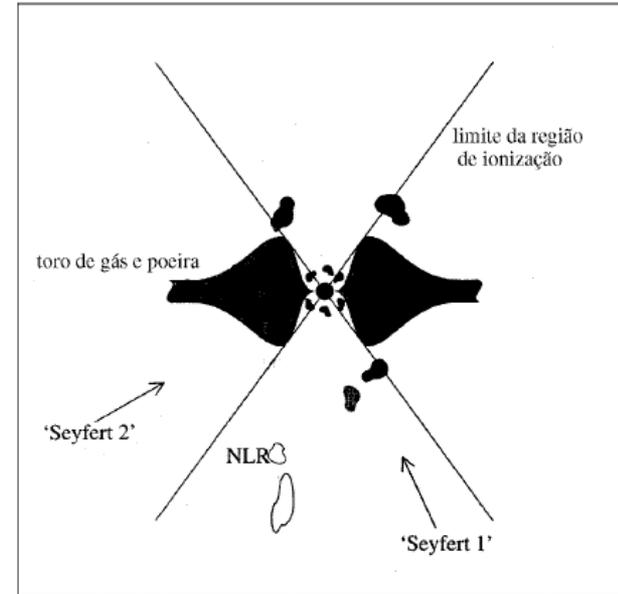
Circinus



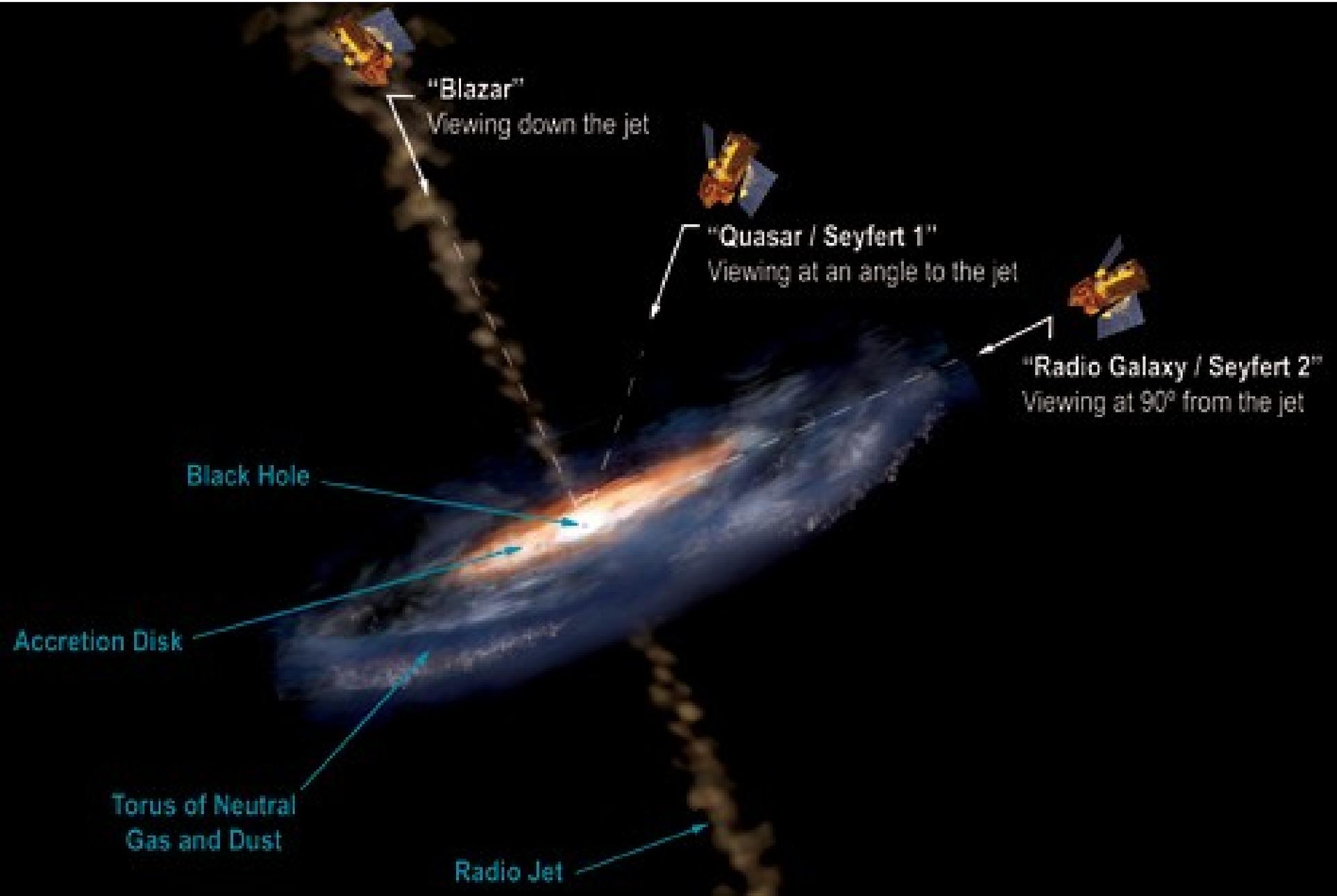
NGC 3079

# O modelo unificado

- Sey 1: vê-se a BLR
- Sey 2: a BLR está obscurecida pelo toro
- evidências a favor do modelo unificado
  - detecção de linhas largas em Sey 2 em luz polarizada (seriam produzidas pela reflexão no toro ou na NLR da radiação produzida pela BLR)
  - detecção de cones de ionização extensos, que corresponderiam a NLR
  - como a NLR é muito extensa, qualquer variabilidade do núcleo afeta fortemente a BLR mas muito fracamente a NLR, explicando porque as Sey 1 apresentam luminosidade variável mas as Sey 2 não



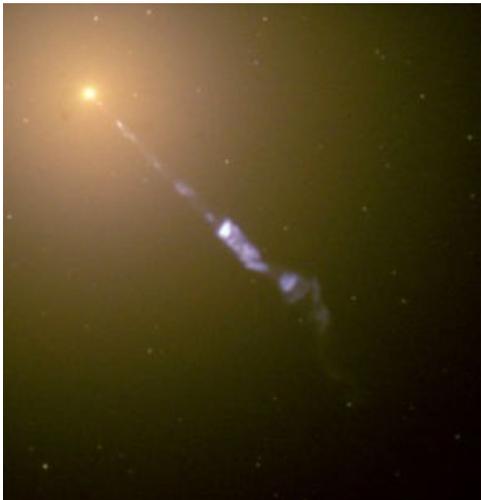
# O modelo unificado



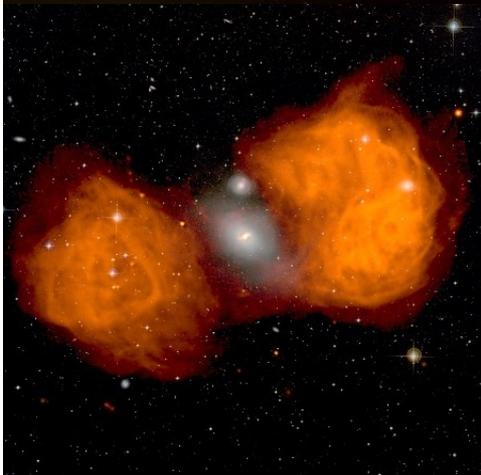
# Classificação: rádio-galáxias

rádio-galáxias: fortes emissoras de ondas de rádio

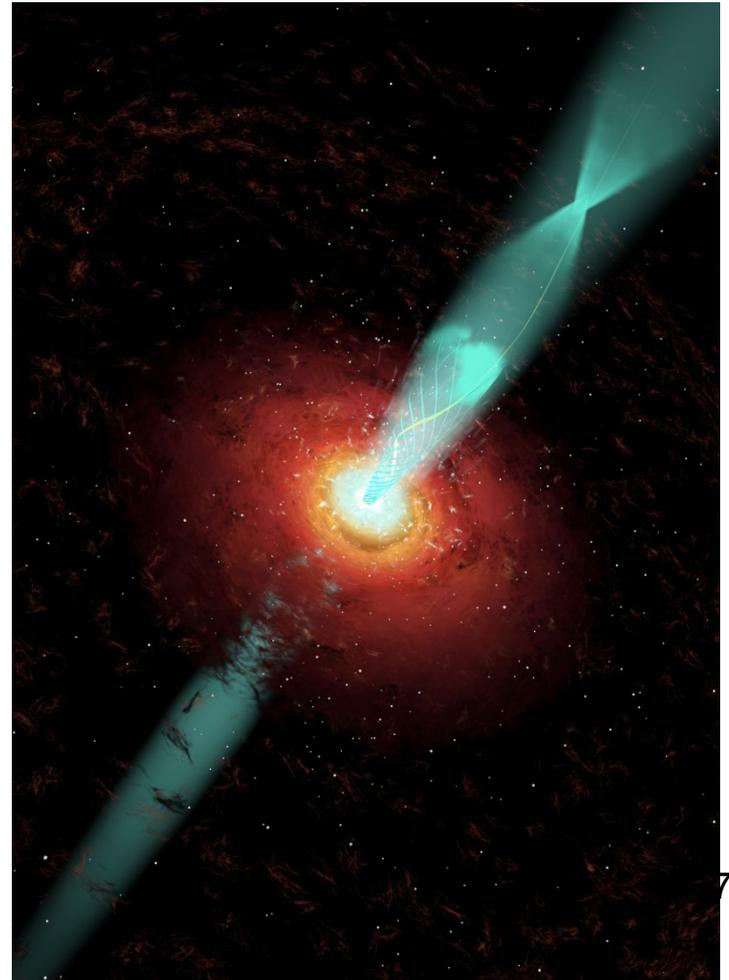
- Espectro óptico parecido com os das Sey 1 e 2
- Frequentemente associadas com jatos ou lóbulos



M87



Fornax A



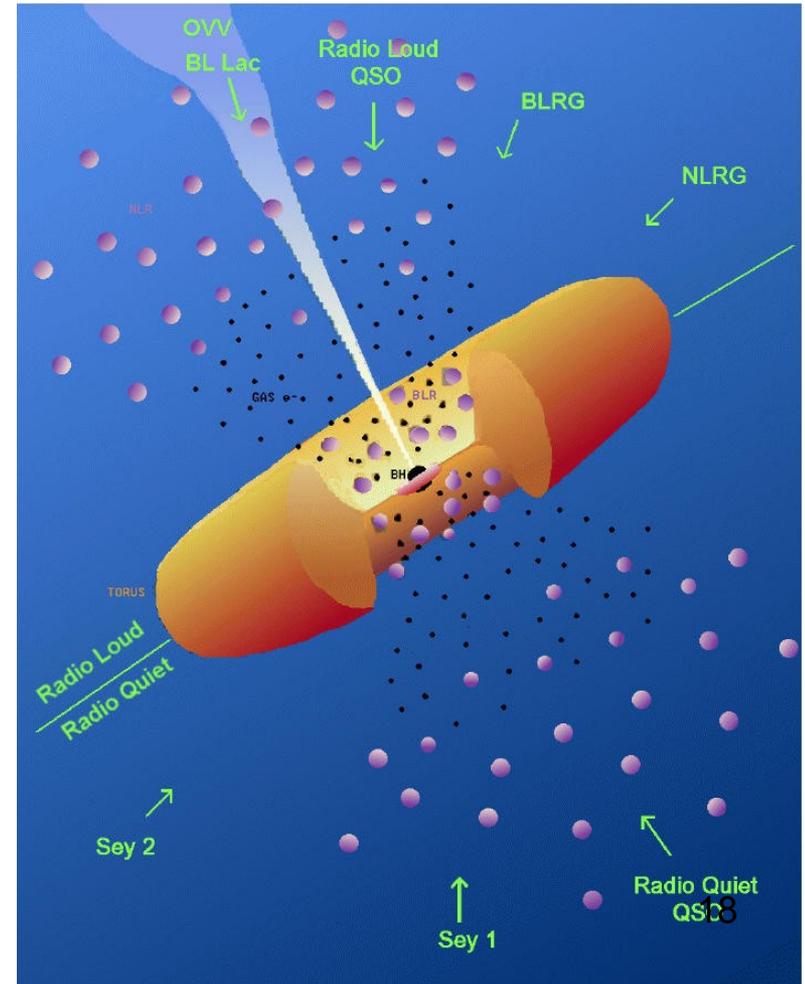
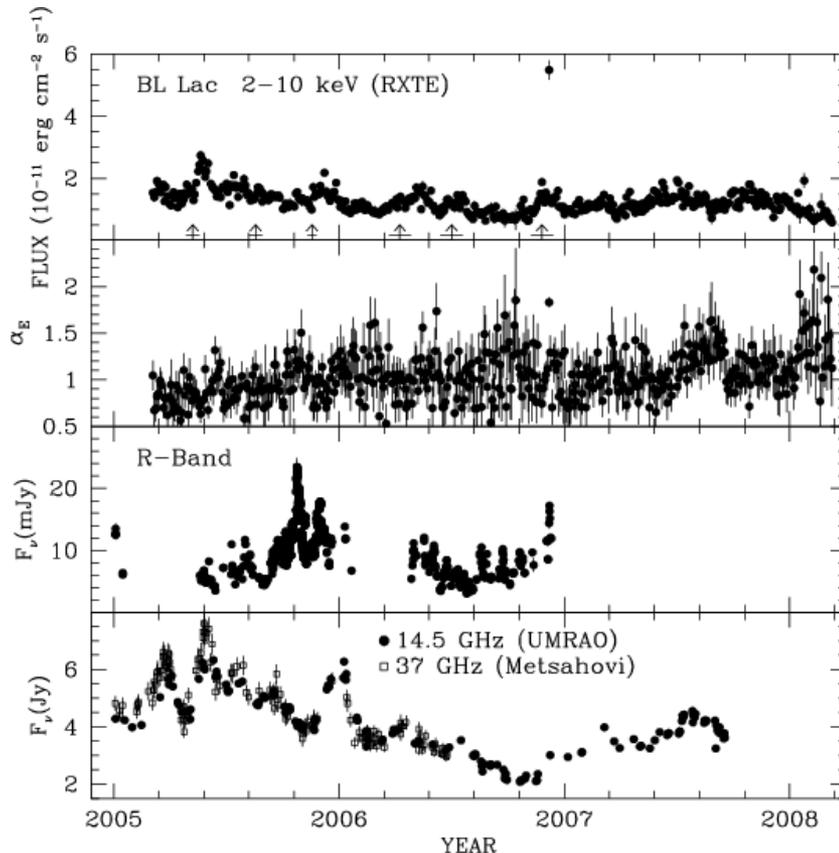
# Classificação: blazar

Blazar: o espectro é “liso”, sem linhas de emissão ou absorção fortes



- são objetos violentamente variáveis (OVV):  $\Delta m > 1$  mag em 1 dia
- apresentam luz altamente polarizada
- Ex.: BL Lacertae

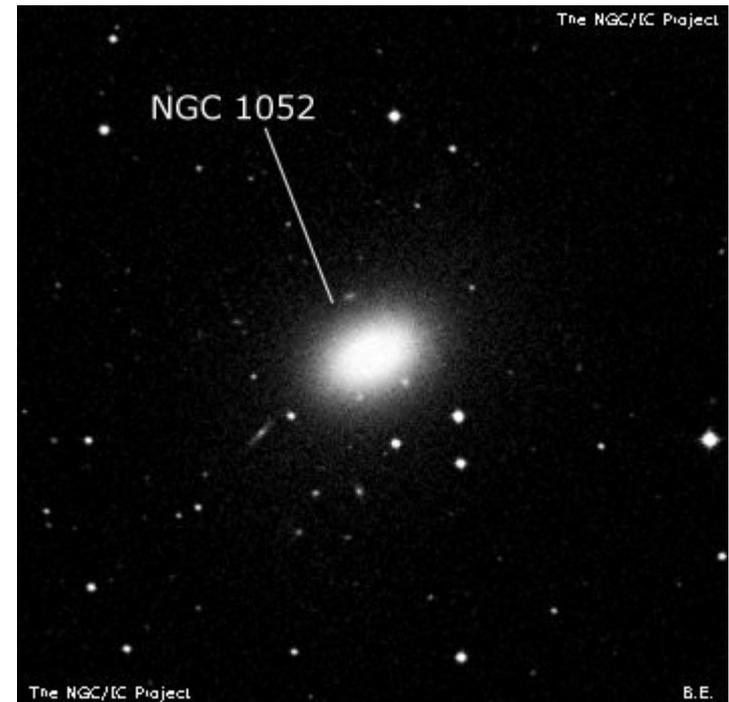
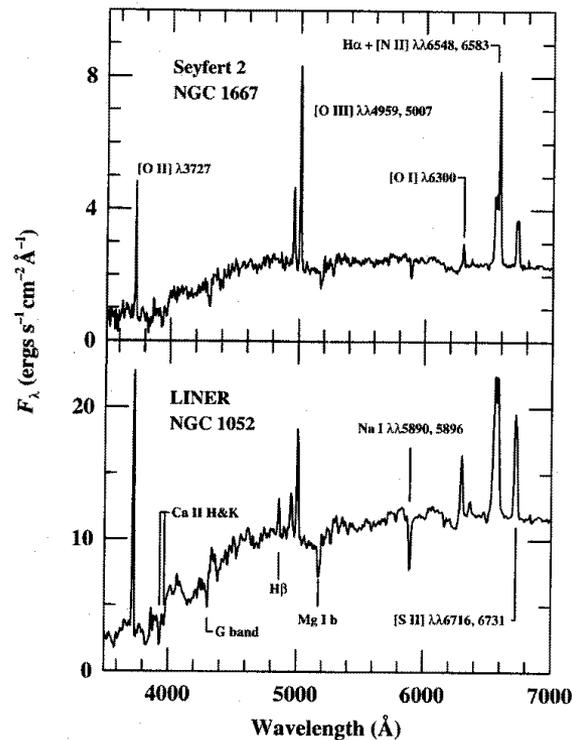
Jato na linha de visada?



# Classificação: liner

Liners: *low ionization nuclear emission line region*

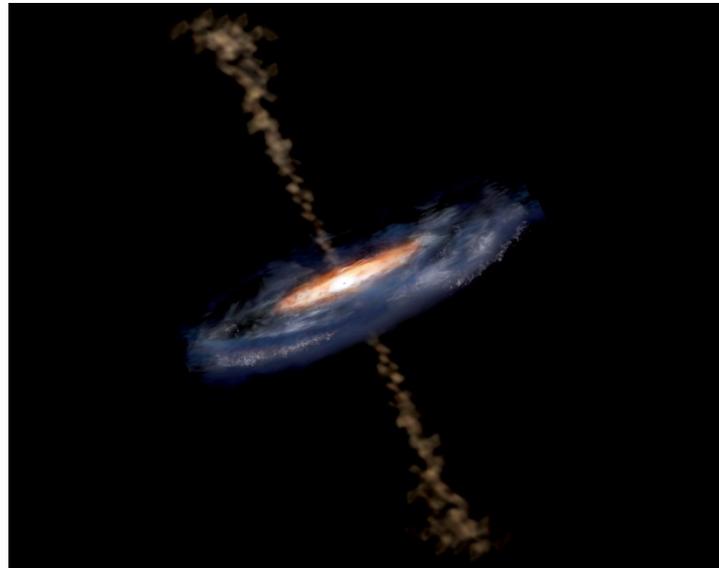
- espectro óptico semelhante ao das Sey 2, mas com linhas de baixa ionização ([O I] $\lambda$ 6300, [N II] $\lambda\lambda$ 6548, 6583) relativamente mais fortes
- Buraco negro com baixa taxa de acreção de matéria?
- NA ou uma população estelar velha (anãs brancas, estrelas centrais de nebulosas planetárias – galáxias aposentadas)?
- Frequentemente encontrados em E ou espirais *early-type*



# A fonte de energia dos núcleos ativos

Woltjer, em 1959, fez uma tentativa de entender as Seyferts:

- O núcleo não é resolvido (“puntual”): deve ser compacto:  $r < 100$  pc
- aproximadamente 1 em cada 100 espirais é Seyfert; se todas as S passam por uma ou várias fases em que são Sey, essa fase deve durar, aproximadamente, 1/100 da idade da galáxia, ou  $\sim 10^{10}$  anos/100 =  $10^8$  anos
- se as linhas largas são produzidas por movimentos de  $\sim 1000$  km s<sup>-1</sup> devido à gravitação, então  $M \sim v^2 r / G = 2 \times 10^{10} M_{\odot} (v / 10^3 \text{ km/s})^2 (r / 100 \text{ pc})$
- se  $r \sim 1$  pc, então  $M \sim 10^8 M_{\odot}$



# A fonte de energia dos núcleos ativos

- problema: como produzir muita energia em um espaço muito pequeno?
  - solução : captura de matéria por um buraco negro (BN) super-massivo
  - modelo: a matéria se acumula em um disco em torno do BN; devido à viscosidade ela espirala para dentro se aproximando do BN, é aquecida e emite radiação  
**(a energia potencial é convertida em radiação)**
- buracos negros (Mitchell 1783, Laplace)
  - se  $GMm/r = \frac{1}{2} m v^2$  e  $v = c$ , então  $r = r_s$ , onde  $r_s = 2GM/c^2$   
é o raio de Schwarzschild
  - este é o mesmo resultado que o que se obtém na teoria da relatividade geral!
- o raio de Schwarzschild é o raio do horizonte de eventos do BN
- órbita estável mais interna em torno de um BN sem rotação:  $r = 3 r_s$
- $r_s (km) = 3 M (M_\odot)$ 
  - $1M_\odot \rightarrow r_s = 3 km \sim 10^{-13} pc$
  - $10^6 M_\odot \rightarrow r_s = 3 \times 10^6 km \sim 10^{-7} pc$  ( $\sim 30$  segundos-luz)

# A fonte de energia dos núcleos ativos

porquê a captura de matéria produz muita energia?

- considere que matéria está caindo, de forma esfericamente simétrica, sobre um corpo de massa  $M$  e raio  $r$
- Vamos definir
  - $dM/dt$  : taxa de acréscimo de massa
  - $\eta$ : eficiência do processo de conversão de energia gravitacional em radiativa

- Nesse caso a luminosidade é:

$$L = \eta \, dM/dt \, c^2$$

- A energia potencial é:

$$U = -G M m / r$$

- $U$  pode ser convertida em radiação :

$$L \approx d|U| / dt = G M (dM/dt) / r = \eta (dM/dt) c^2$$

- Daí vem que a eficiência pode ser escrita como

$$\eta = r_s / 2r$$

- se  $r = 3 r_s$  (órbita estável mais interna em um BN sem rotação ),  $\eta \sim 0.1$   
essa eficiência é altíssima!  
como comparação, a eficiência da fusão do H em He é 0.007

- exemplo - quasar com luminosidade  $L \sim 10^{13} L_\odot$ :

$$L = \eta (dM/dt) c^2$$

ou

$$dM/dt = L / \eta c^2 \sim 7 M_\odot / \text{ano}$$



# A fonte de energia dos núcleos ativos a luminosidade de Eddington

- Luminosidade de Eddington:

- o acréscimo de massa aquece o material, que irradia com luminosidade  $L$
- essa radiação produz uma pressão, que pode interromper o acréscimo de massa

- força que a radiação exerce sobre uma partícula do material:

$$F_{rad} = \sigma_T P_{rad} = \sigma_T L / 4 \pi c r^2 \quad (\sigma_T: \text{seção de choque de Thomson} = 6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2)$$

- força gravitacional sobre essa partícula do material (supondo que é um átomo de H, de massa  $\approx m_p$ ):

$$F_{grav} = G M m_p / r^2$$

- para haver acréscimo de matéria,  $F_{grav} > F_{rad}$ , ou  $L < L_E$ , onde  $L_E$  é a luminosidade de Eddington:

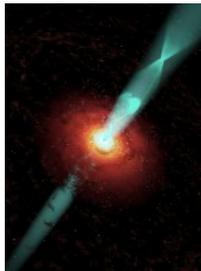
$$L_E = 4 \pi c G M m_p / \sigma_T \approx 1.3 \times 10^{38} (M/M_\odot) \text{ erg/s}$$

- a luminosidade de Eddington, é a máxima luminosidade que um corpo de massa  $M$  pode produzir por acréscimo esfericamente simétrico de matéria

- taxa máxima de acréscimo de matéria:

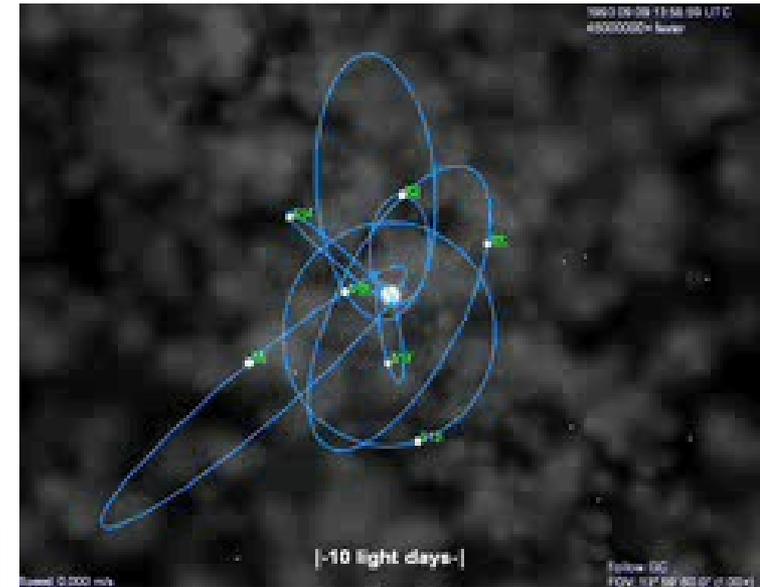
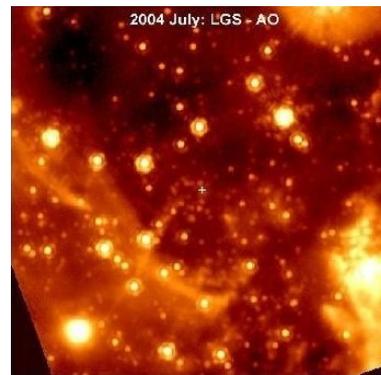
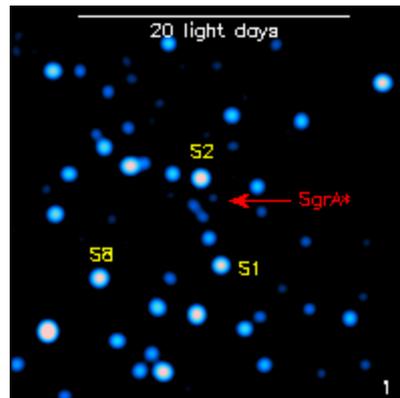
$$(dM / dt)_E = L_E / \eta c^2 \approx 2.4 \times 10^{-8} (M/M_\odot) M_\odot / \text{ano}$$

- mas  $dM/dt$  pode ser muito maior se o acréscimo de matéria não for esfericamente simétrico:  
um exemplo é um disco de acréscimo que emite radiação perpendicularmente ao plano do disco

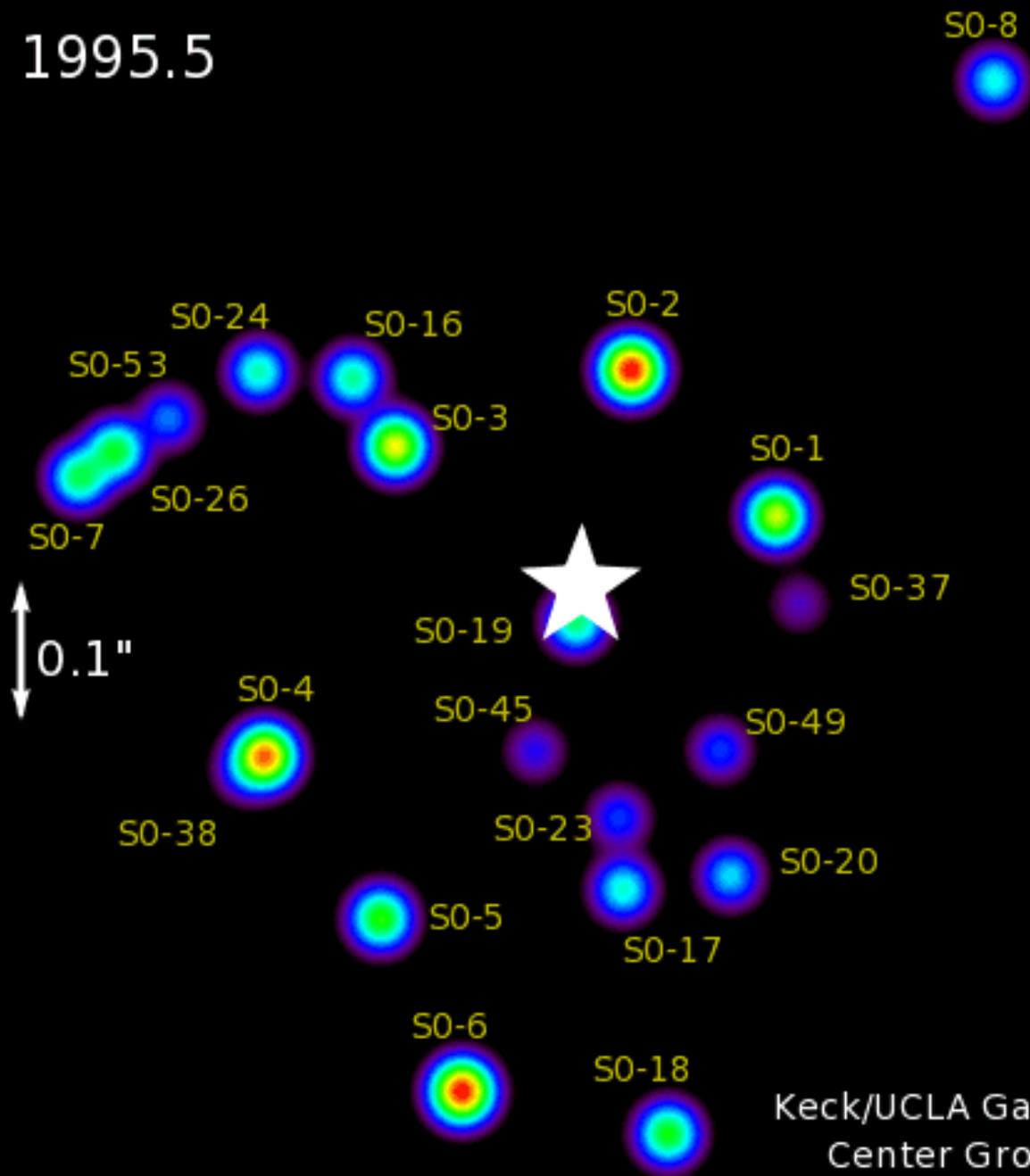


# A fonte de energia dos núcleos ativos: evidências de buraco negros no núcleo das galáxias

- O centro da Via Láctea
  - estudos da cinemática das estrelas no centro da Galáxia
  - aglomerado estelar denso com um buraco negro de *3.6 milhões de massas solares* no centro



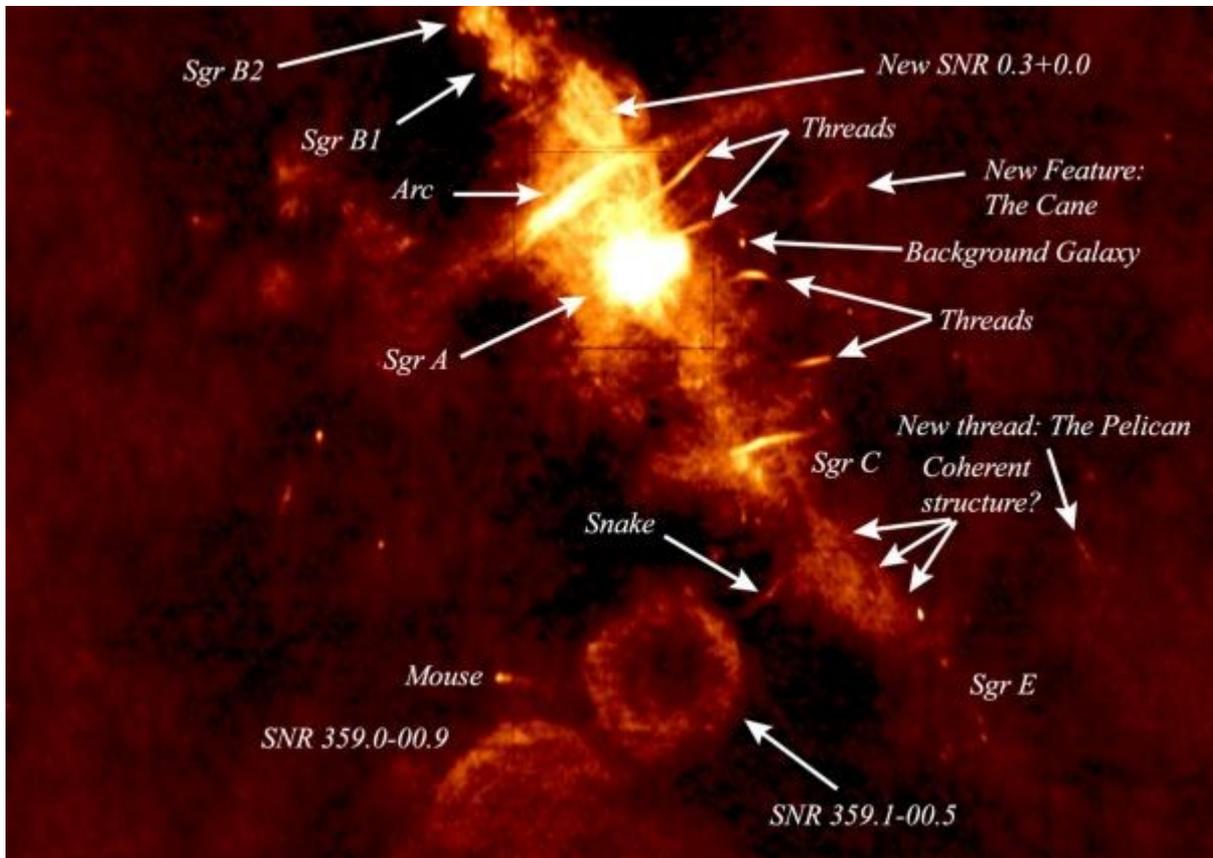
1995.5



Keck/UCLA Galactic Center Group

# A fonte de energia dos núcleos ativos: evidências de buraco negros no núcleo das galáxias

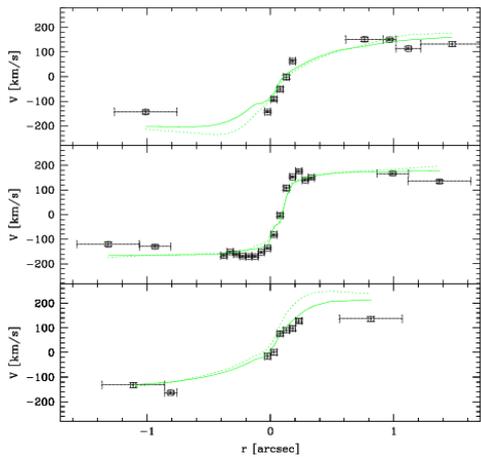
- O centro da Via Láctea
  - estudos da cinemática das estrelas no centro da Galáxia
  - aglomerado estelar denso com um buraco negro de 3.6 milhões de massas solares no centro



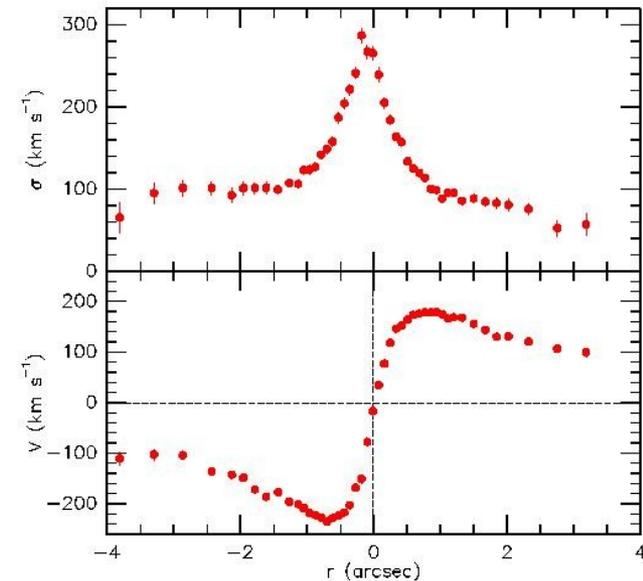
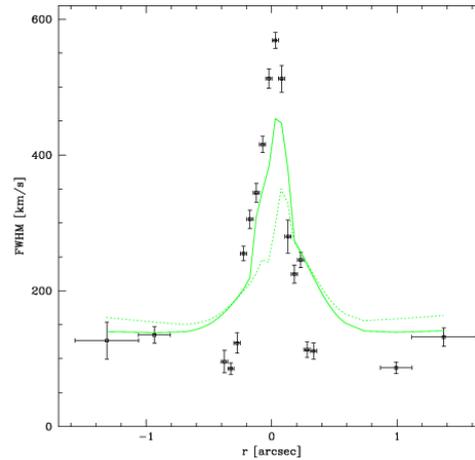
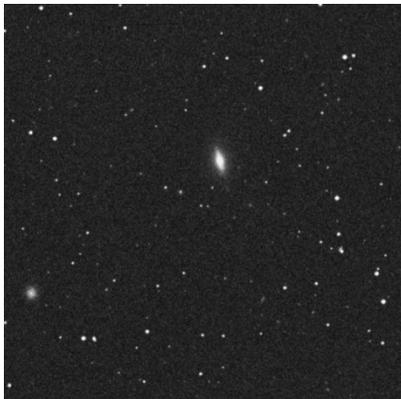
# A fonte de energia dos núcleos ativos: evidências de buraco negros no núcleo das galáxias

M31 -  $M_c \approx 3 \times 10^7 M_\odot$

- Curvas de rotação da região nuclear de galáxias próximas



NGC5252 -  $M_c \approx 10^9 M_\odot$



# A fonte de energia dos núcleos ativos: evidências de buraco negros no núcleo das galáxias

- Variabilidade de núcleos ativos:
  - alguns NAs, como Sey 1 e quasares, podem ter um brilho altamente variável
  - a idéia é que a variabilidade é produzida por instabilidades no disco de acréscimo, próximo ao BN
  - escala de tempo da variabilidade:  $\tau \sim$  dias
  - tamanho da região que produz a variabilidade:  $l \sim ct$
  - a região é pequena,  $\sim$  dias-luz

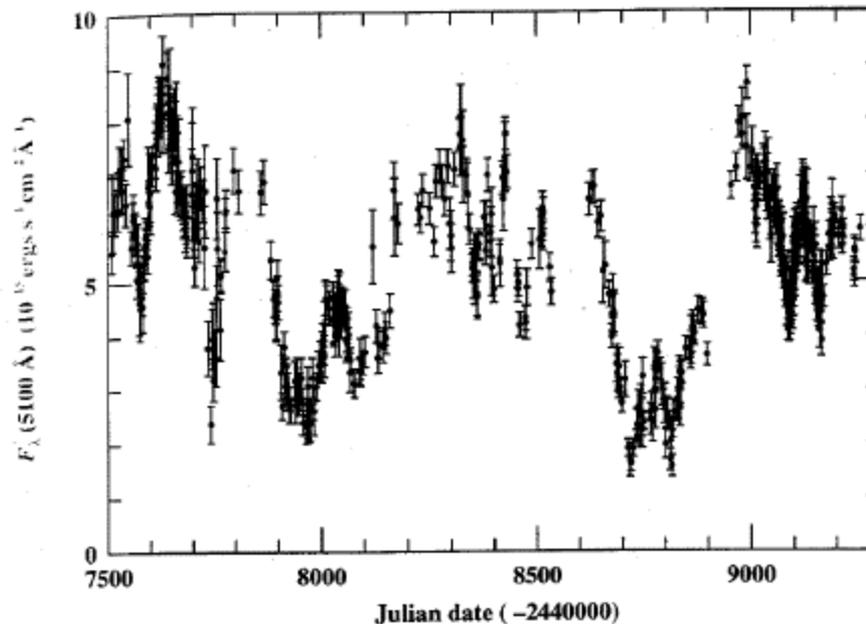


Figura 8.6: Curva de luz óptica da Sey 1 NGC5548, de 1988 a 1993. A contribuição da luz da galáxia foi subtraída.

# As rádio-galáxias

- são galáxias que apresentam luminosidade em rádio muito maior que galáxias semelhantes de mesma luminosidade
- tipos de fontes rádio:
  - compactas (nuclear)
  - extensas (jatos e lóbulos)
  - muitas fontes apresentam as componentes compactas e extensas, outras apenas a componente extensa

as rádio-galáxias mais luminosas são E gigantes

3C 296

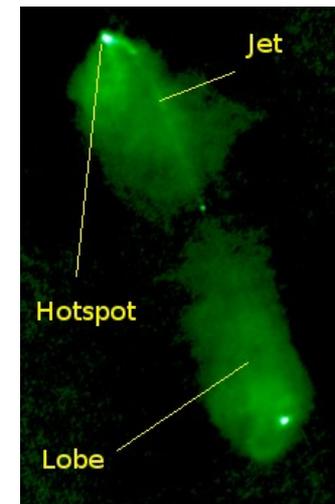
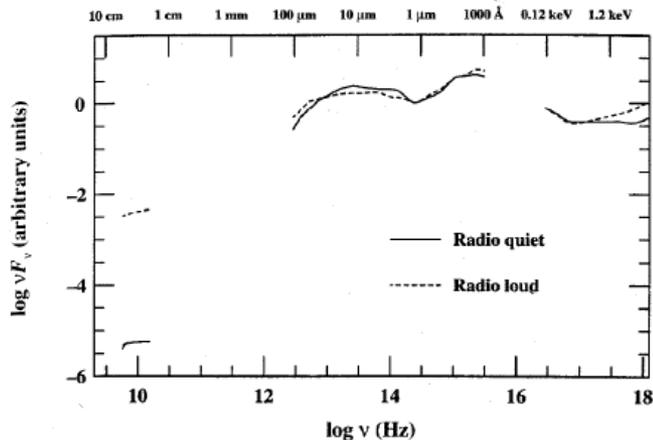
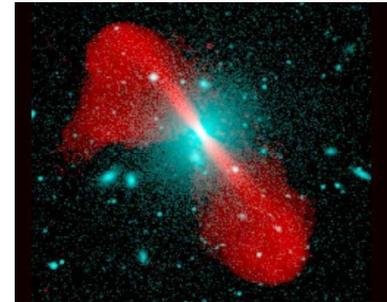
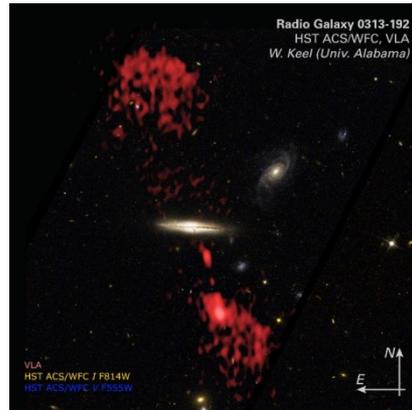
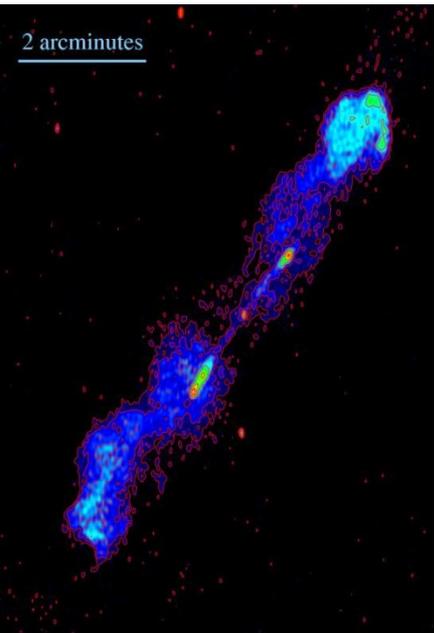


Figura 8.9: Comparação entre a distribuição de energia espectral de quasares *radio-quiet* e *radio-loud*.

# As rádio-galáxias

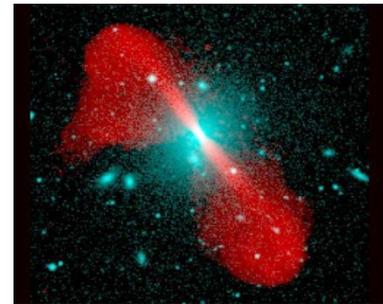
- modelo básico:
  - o núcleo da galáxia (que é uma rádio-fonte) emite 2 jatos simétricos de partículas relativísticas
  - os jatos colidem com material gasoso da galáxia ou do meio intergaláctico e são desacelerados
  - o material depositado pelos jatos forma os lóbulos
  - a emissão rádio é síncrotron: produzida por eletrons relativísticos em um campo magnético

B1545-321

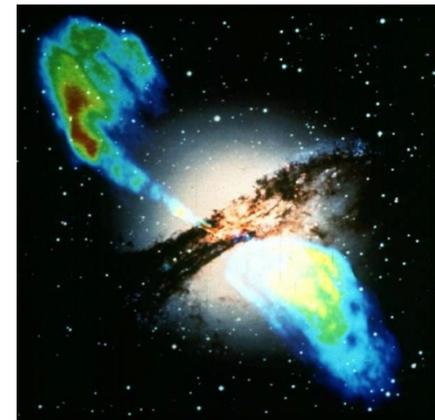
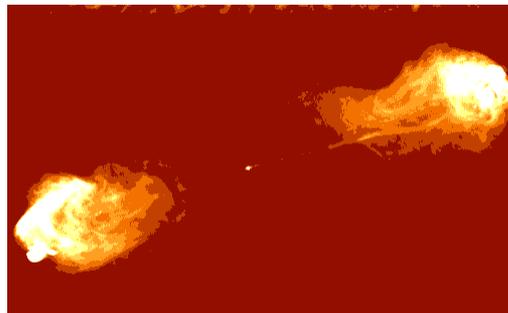


0313-192

3C 296



Cyg A

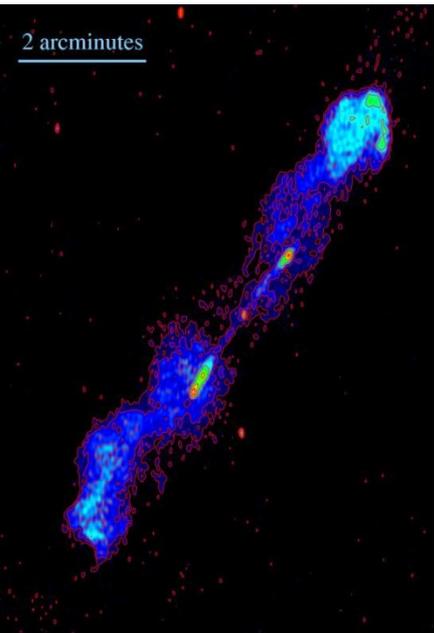


Cen A

# As rádio-galáxias

- jatos:
  - alguns são simétricos, outras vezes só se vê um jato
  - o campo magnético deve ser fundamental para colimar o jato
  - o material dos jatos parece ser emitido de forma intermitente pelo núcleo

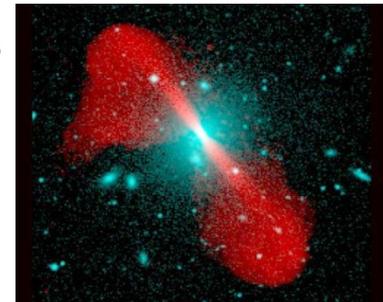
B1545-321



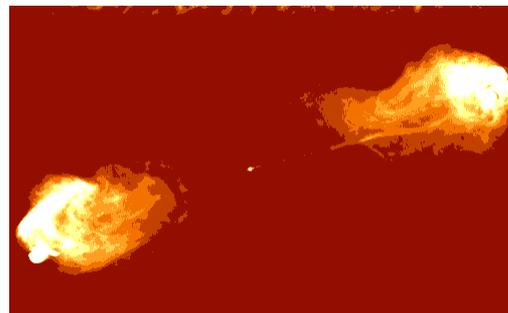
M87



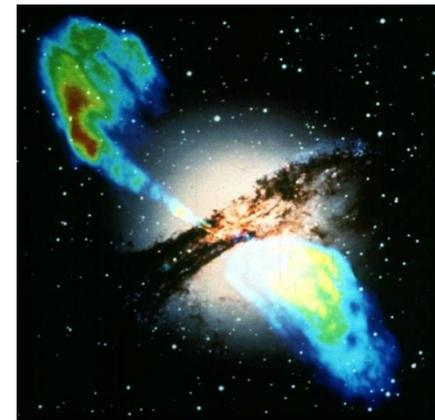
3C 296



Cyg A



Cen A



# As rádio-galáxias

- emissão síncroton
  - perda de energia de um eletron girando num campo magnético:

$$dE / dt = -4/3 \sigma_T c \gamma^2 U_{mag}$$

onde

$\sigma_T$  é a seção de choque de Thomson,

$\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  é o fator de Lorentz

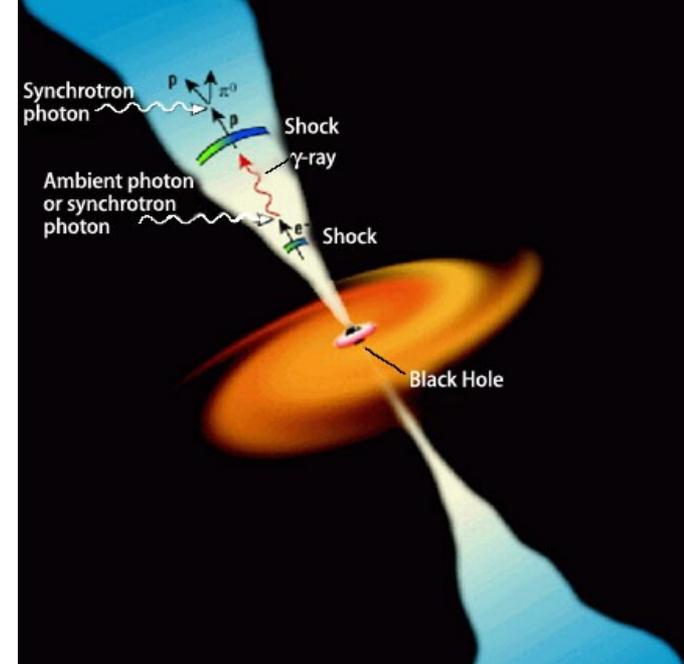
$U_{mag} = B^2/(8\pi)$  é a densidade de energia do campo magnético

– o grosso da radiação de um eletron é emitida dentro de um cone estreito,  $\theta \sim 1/\gamma$ , na direção de seu movimento

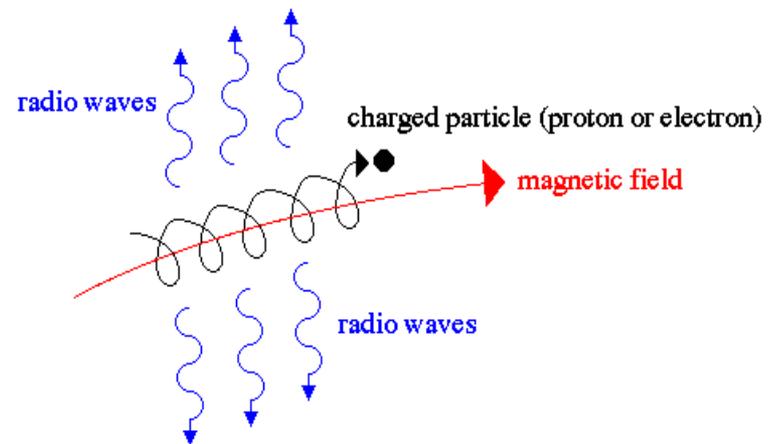
– se os eletrons têm uma distribuição de energia em forma de lei de potência, a radiação emitida também é em lei de potência

– a emissão síncroton é altamente polarizada

– este mecanismo também é responsável pela emissão rádio da Galáxia e de restos de supernovas (ex. Caranguejo)



## Synchrotron radiation



synchrotron radiation occurs when a charged particle encounters a strong magnetic field – the particle is accelerated along a spiral path following the magnetic field and emitting radio waves in the process – the result is a distinct radio signature that reveals the strength of the magnetic field

# As rádio-galáxias: movimentos super-luminais

- Alguns jatos parecem mover-se a velocidades maiores que a da luz
- exemplo: 3C273
  - $z = 0.158$ ,  $v \approx cz = H_0 d$
  - se  $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  então  $d \approx 948 \text{ Mpc}$
  - o jato emite “caroços”
  - $\alpha$ : distância angular entre o caroço e a fonte que o ejetou
  - o caroço emitido se afasta do núcleo a uma taxa
  - $da/dt \approx 2.2 \times 10^{-3} \text{ arcsec ano}^{-1} \approx 3.3 \times 10^{-16} \text{ radianos s}^{-1}$
  - logo, a componente transversal da velocidade do caroço é
  - $v = da/dt \ d = 9.7 \times 10^{11} \text{ cm s}^{-1} \approx 32c !!!$

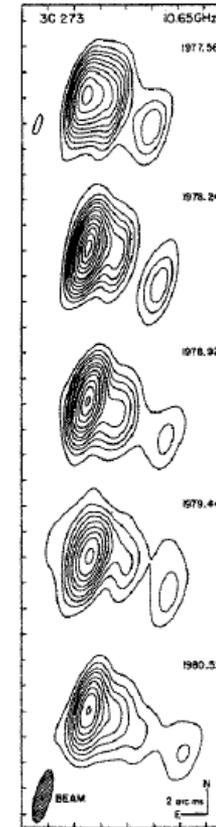


Figura 8.11: Mapas em 10.65 GHz de 3C273 ( $z = 0.158$  em 5 épocas diferentes, mostrando a expansão “super-luminal” da fonte.

# As rádio-galáxias: movimentos super-luminais

- teoria (Rees, 1966):

- caroço emitido com velocidade  $v$  numa direção formando um ângulo  $\theta$  com a linha de visada por uma rádio-galáxia a uma distância  $d$  do observador

- considere 2 eventos:

A - ejeção de um caroço de gás pelo núcleo no instante  $t$  (no referencial em repouso no caroço)

B - observação desse caroço em  $t + \Delta t$  (no referencial em repouso no caroço)

- o observador vai detectar esses dois eventos em

$$t_1 = t + d / c$$

$$t_2 = t + \Delta t + (d - v \Delta t \cos \theta) / c$$

- logo,

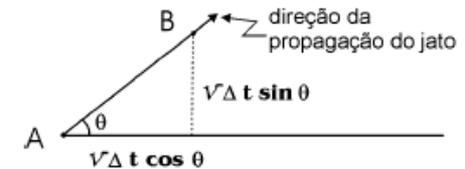
$$t_{obs} = t_2 - t_1 = \Delta t [1 - (v / c) \cos \theta]$$

- e a velocidade aparente do caroço será

$$v_{ap} = v \Delta t \sin \theta / t_{obs} = v \sin \theta / [1 - (v/c) \cos \theta]$$

- pode-se verificar que  $v_{ap}$  é máxima quando  $v_{ap} = v\gamma$  e  $\theta \approx 1/\gamma$

- como  $\gamma$  pode ser  $\gg 1$  e  $v \sim c$ , pode-se ter  $v_{ap} \gg c$



M 87

- exemplo:  $v \approx 0.99c \rightarrow \theta \approx 1/\gamma \approx 8^\circ$ ,  $v_{ap} \approx 7c$

# As rádio-galáxias: movimentos super-luminais

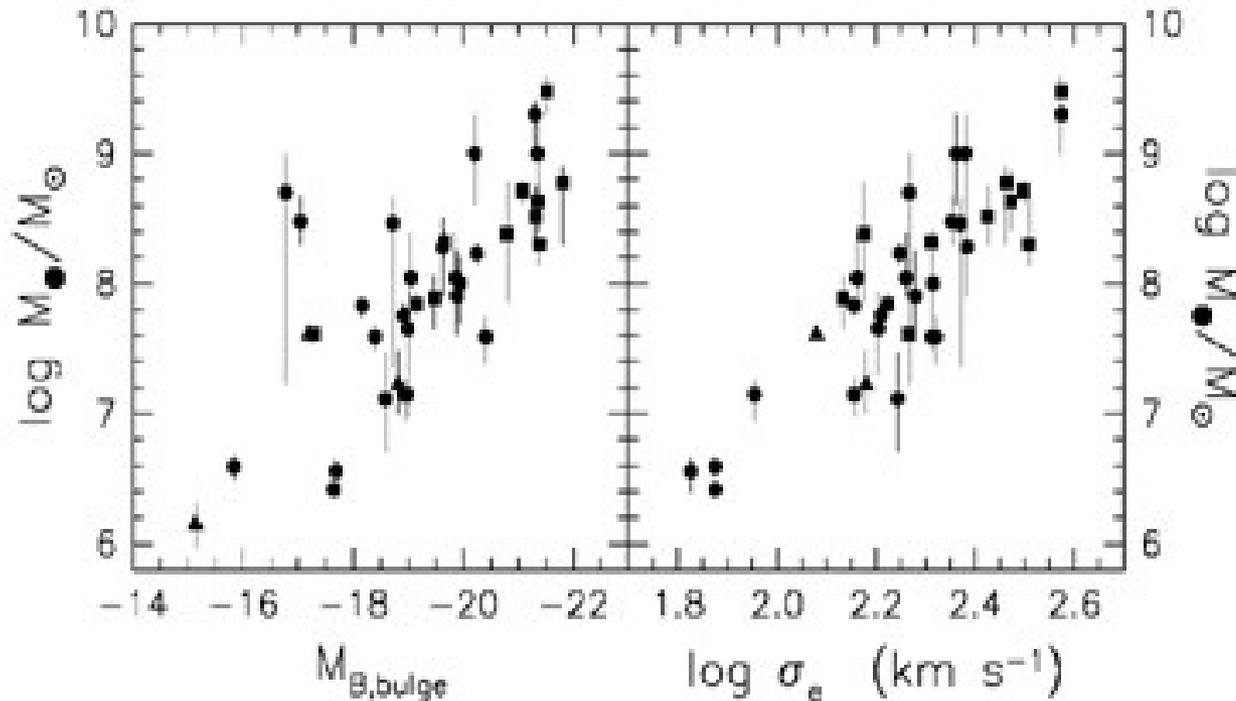
-*relativistic boosting*: o jato que se aproxima é amplificado e o que se afasta é enfraquecido

-pode explicar porque muitas vezes só se vê 1 jato!



# Relação entre buracos negros supermassivos e formação de galáxias

- A massa dos buracos negros se correlaciona com a luminosidade da galáxia. O que isso sugere?
- Aparentemente a formação das galáxias está associada à formação de BNs supermassivos



# Relação entre buracos negros supermassivos e formação de galáxias

- aparentemente a formação das galáxias está associada à formação de BNs supermassivos
- evolução dos quasares x evolução da formação estelar

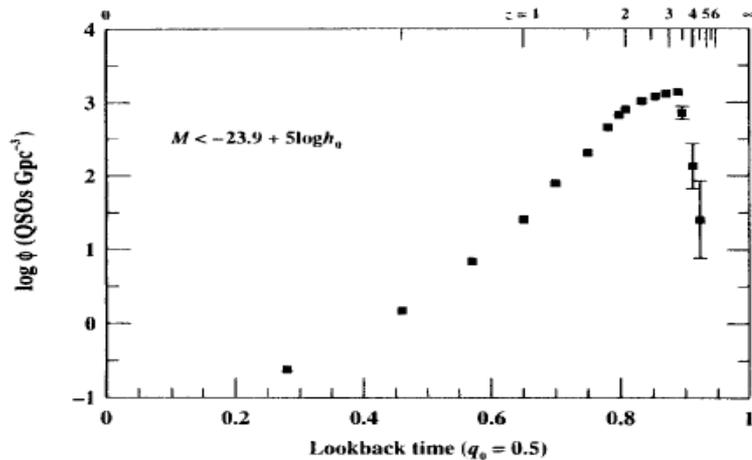
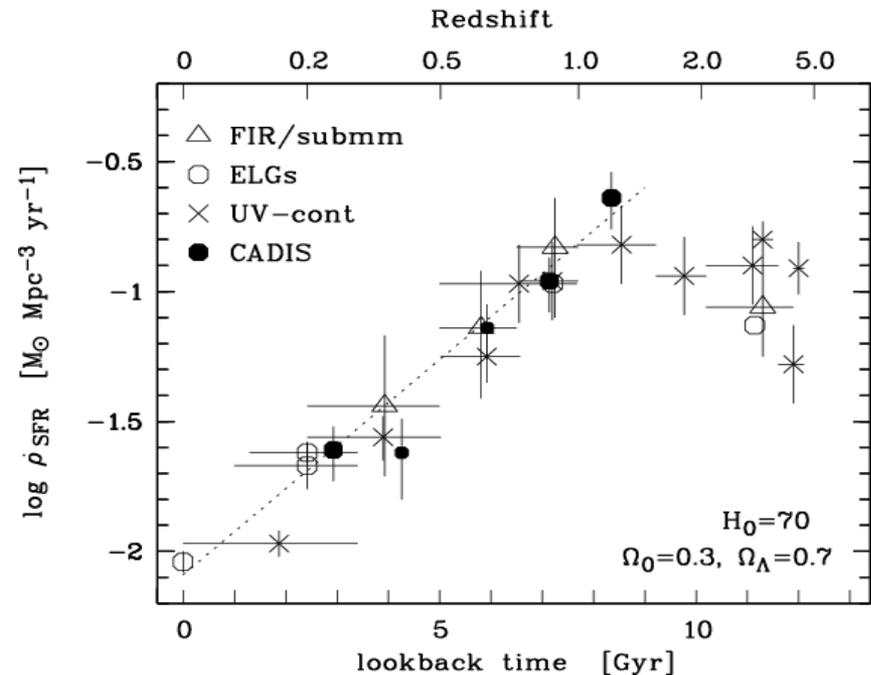


Figura 8.4: Densidade comóvel de quasares.



# exercícios

1. Estime o diâmetro angular em segundos de arco do raio de Schwarzschild que um buraco negro de  $10^6 M_{\odot}$  teria se estivesse no centro de nossa Galáxia, a 10 kpc.
2. O que é a luminosidade de Eddington? Determine a luminosidade de Eddington associada a um buraco negro cujo raio de Schwarzschild é de  $10^{13}$  cm.
3. Qual é a taxa de acréscimo, em  $M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$ , necessária para produzir um núcleo ativo com luminosidade de  $10^{10} L_{\odot}$ ? Assuma uma eficiência de 10% na conversão de energia.
4. Explique o que é o modelo unificado de núcleos ativos. O que é a região de linhas estreitas? E a de linhas largas?
5. Um jato superluminal move-se 5 milissegundos de arco com velocidade angular aparente de 3.5 c. Qual é a velocidade real do jato?
6. Mostre que  $v_{ap}$  é máxima quando  $v_{ap} = v\gamma$  e  $\theta \approx 1/\gamma$ .
7. Compare os espectros de NGC1667 (Sey 2) e de NGC1052 (Liner) com o da galáxia Sm/Im NGC4449 (ver aula 11 – Cores e Espectros). Use a linha  $H\beta$  como referência.