

Astrofísica Moderna

Galáxias Ativas

Prof. Aion Viana e Prof. Vitor de Souza

Referencias principais da aula:

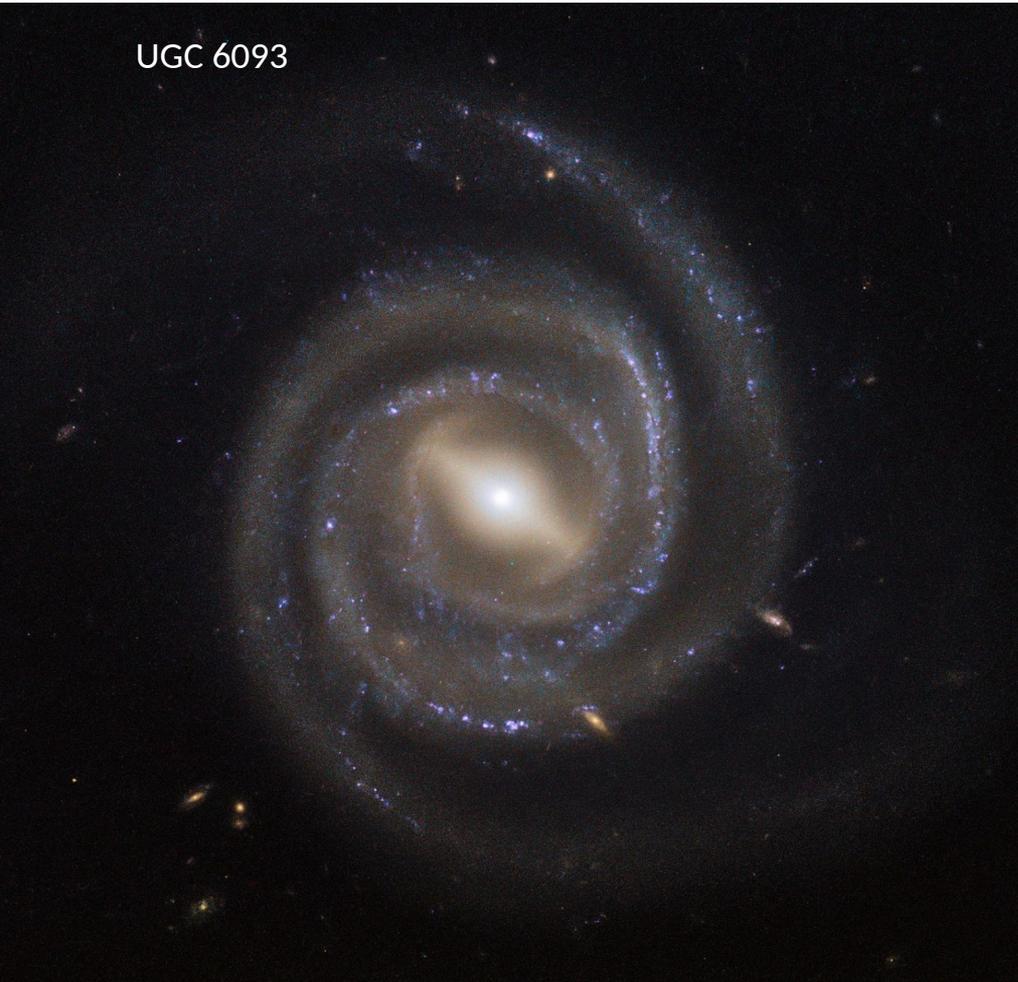
“An introduction to modern astrophysics”, B.W.Carroll and D.A. Ostlie

“Astronomia e astrofísica”, K. de Souza Oliveira Filho e Maria de Fátima Oliveira Saraiva

“Fundamentos de Astronomia”, notas de aula da Prof. Elisabete Gouveia dal Pino IAG/USP

Galáxias Ativas vs Galáxias Normais

UGC 6093



➤ Galáxias da classificação de Hubble

=> **GALÁXIAS NORMAIS**

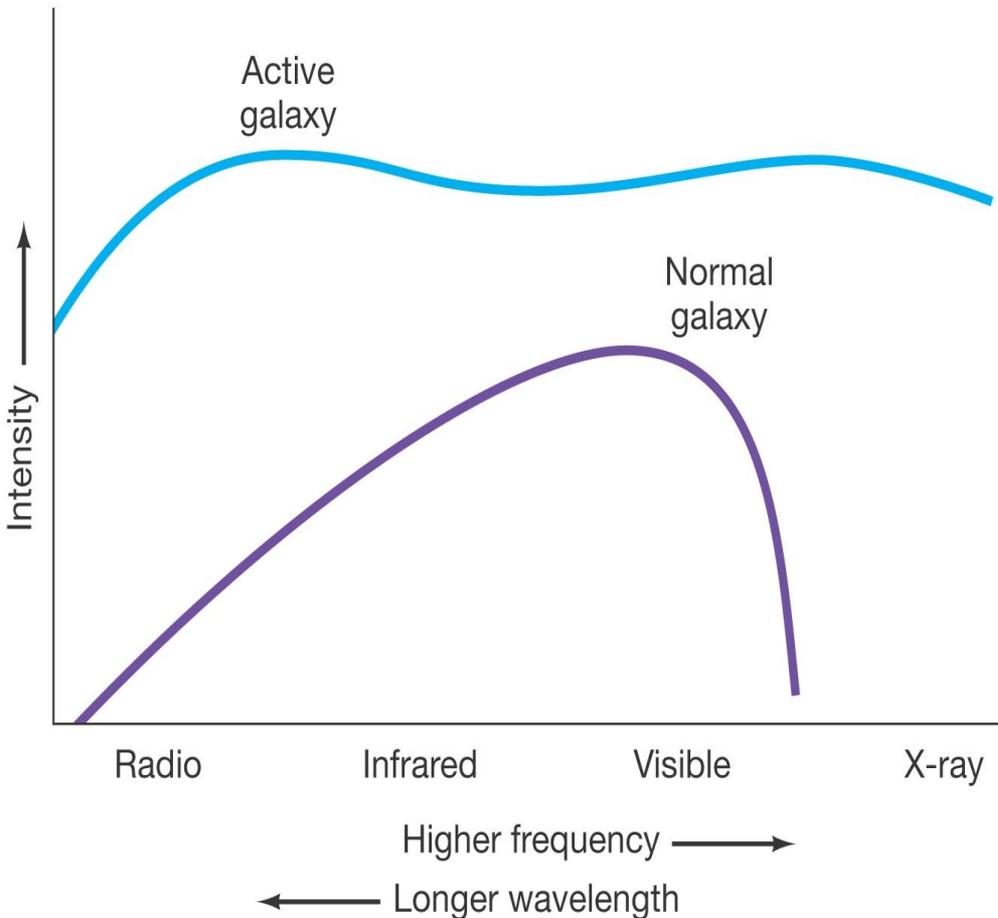
- emissão principal no **VISÍVEL**

➤ Galáxias com o núcleo muito mais brilhante do que o usual

=> **GALÁXIAS ATIVAS**

- fontes muito intensas de emissão **RÁDIO, INFRAVERMELHO, E ALTAS FREQUÊNCIAS**

Galáxias Ativas vs Galáxias Normais



➤ GALÁXIAS NORMAIS

- Radiação provém da luz acumulada de estrelas => **espectro de radiação de Planck**

➤ GALÁXIAS ATIVAS

- Radiação dominante => **não estelar ou não-térmica**

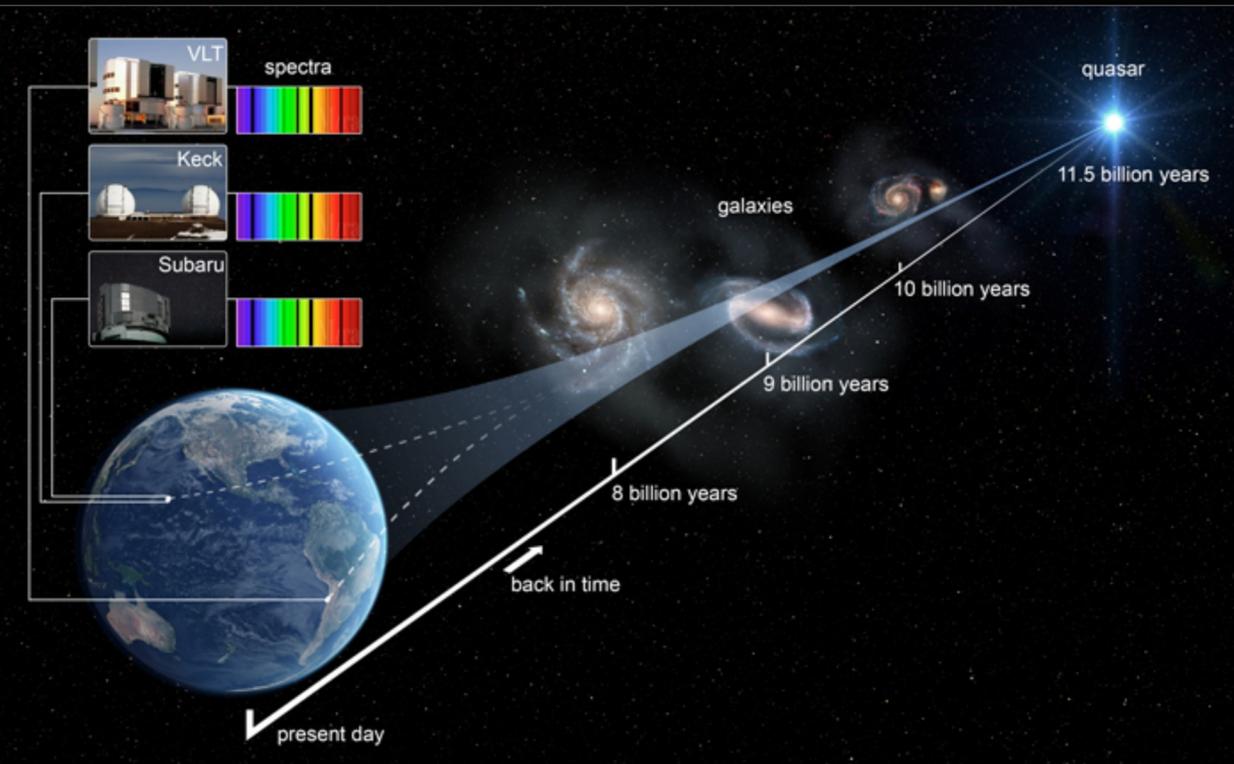
Galáxias Ativas

- Galaxias bem + luminosas que as normais (em geral):

$$L = 100 - 1000 L_{\text{Via-Lactea}}$$

- Rápida **variabilidade** na luminosidade
- Alto contraste de brilho entre o núcleo e o resto da galaxia => **núcleo ativo de galáxia (AGN, Active Galactic Nucleus)**
- **Linhas de emissão alargadas**: indica rápidos movimentos internos na região de produção de energia
- Emissão de energia não-estelar: -> **NÃO pode ser explicada pela combinação da emissão de trilhões de estrelas**

Distâncias



- Galáxias ativas: são encontradas em geral a **grandes distâncias**.
- As **mais ativas** são as **mais distantes**

Objetos mais remotos correspondem ao Universo de muito tempo atrás: condições físicas eram mais violentas (radiação emitida) do que é hoje em dia

Tipos de Galáxias Ativas

- **Galáxias de Seyfert**
 - núcleo pequeno e intenso; linhas de emissão alargadas
- **Rádio-galáxias**
 - $L_{\text{rádio}} > 10^{40}$ erg/s, jatos e lóbulos emissores em rádio
- **Objetos BL Lacertae (ou blazars)**
 - rápida variabilidade rádio, infravermelho, visível, e frequências maiores
- **Objetos “quasi-stellar” (quasares):**
 - $L \sim 10^3$ vezes maior que a de uma galáxia espiral normal.

Cerca de 10% das galáxias conhecidas são ativas.

Galáxias de Seyfert

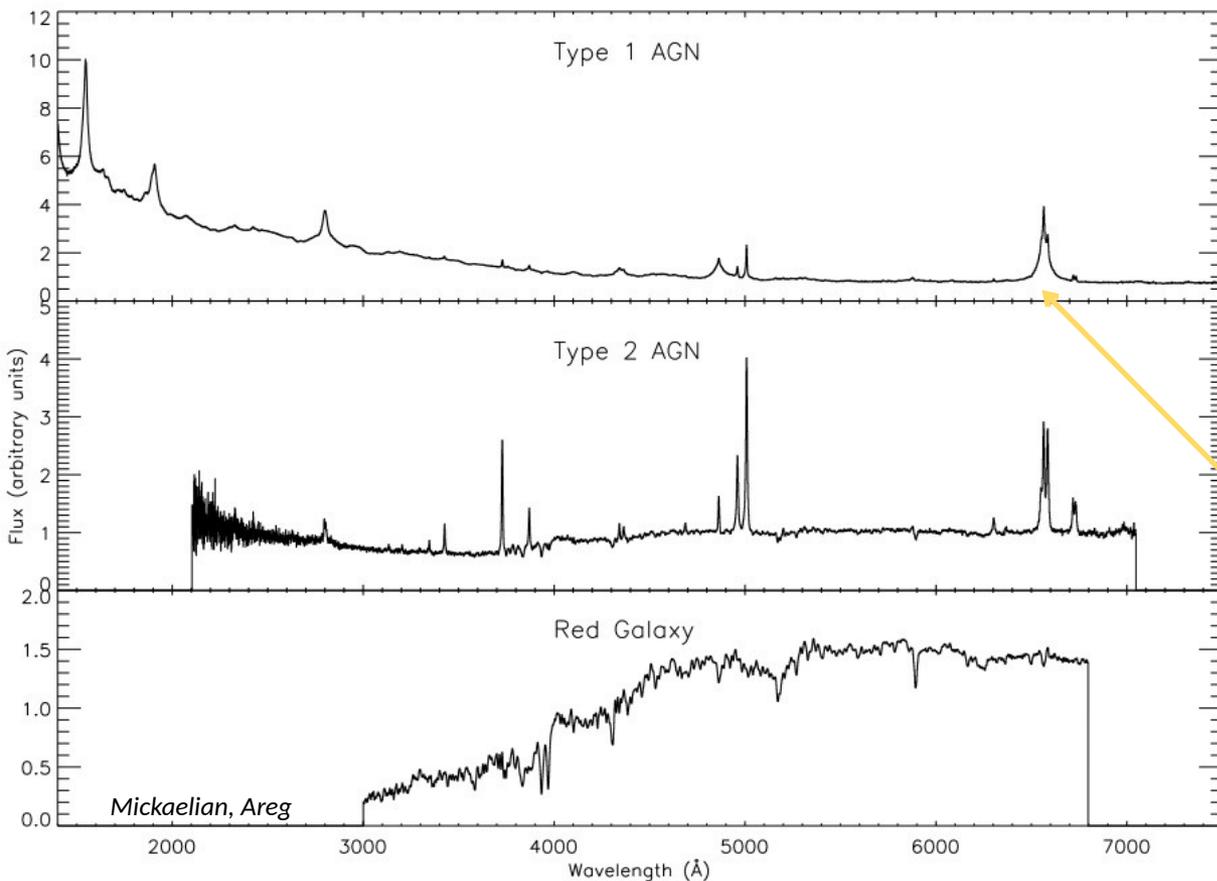
- **Carl K. Seyfert (1911-196)** descobriu que uma pequena porcentagem das galáxias espirais (S) tinham um núcleo muito mais brilhante com linhas de emissão
=> **galáxias Seyfert**
- Propriedades intermediárias entre galáxias normais e as ativas mais violentas conhecidas => Ligação evolutiva entre os dois extremos
- Altos redshifts indicam distâncias de $\sim 10^8$ pc (100 Mpc)
- No visível: aspecto de galáxia espiral normal mas com com aproximadamente metade da luminosidade total vindo do núcleo => região central 10^{3-4} vezes mais brilhante que o núcleo de nossa Galáxia



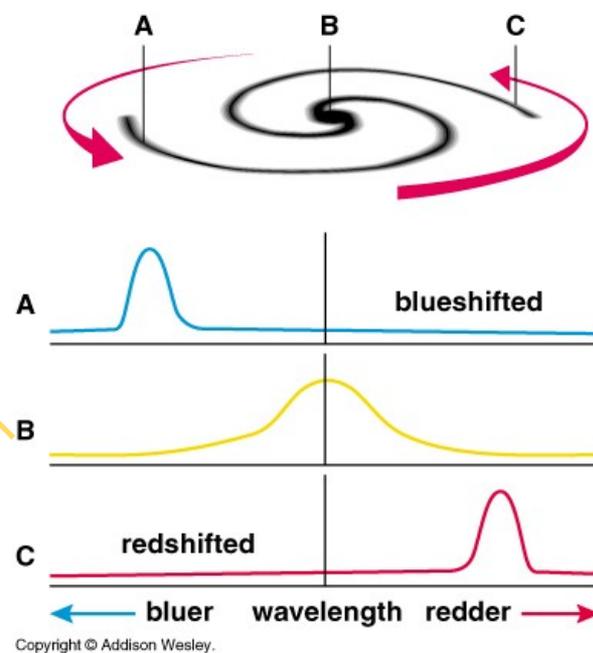
Galáxias de Seyfert

- **Discos e braços espirais:** radiação similar de estrelas de galáxias S normais
- Maior parte da energia do núcleo brilhante: radio e infravermelho de origem não estelar
- **Linhas espectrais (núcleo):** diferentes das produzidas por estrelas normais
 - gases muito quentes e ionizados ($T > 10^8$ K)
- **Linhas de emissão alargadas** de elementos altamente ionizados indicam:
 - ou gás rodando muito rápido (1000 km/s): em volta de objeto central (alargamento das linhas indica movimentos rápidos na região nuclear)

Espectro óptico do núcleo de Galáxias Seyfert



Alargamento de linhas de emissão



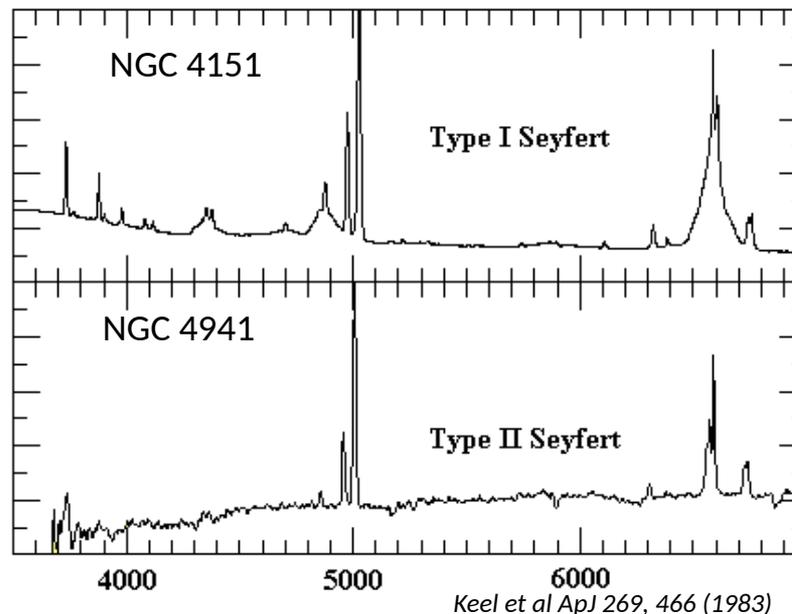
Seyferts de tipo 1 e tipo 2

Seyferts tipo I

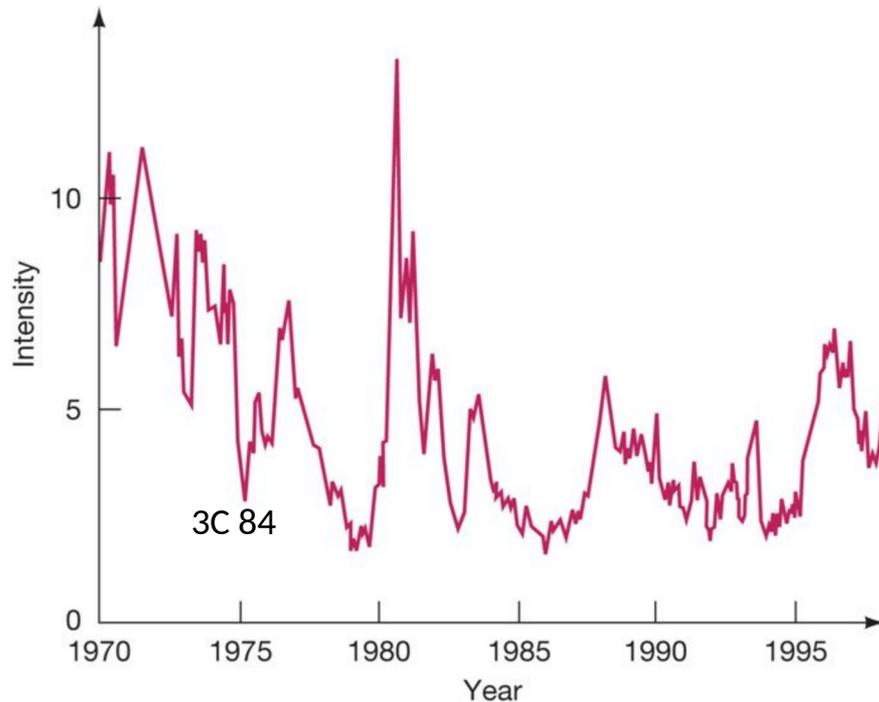
- Linhas de emissão alargadas indicando velocidades da ordem de 1000 km/s
- Além de luz ótica, emite fortemente UV e raio-X

Seyferts tipo II

- Linhas de emissão mais finas, indicando velocidades de no máximo 500 km/s
- Além de luz ótica, emite fortemente infravermelho



Variabilidade de Galáxias Seyfert



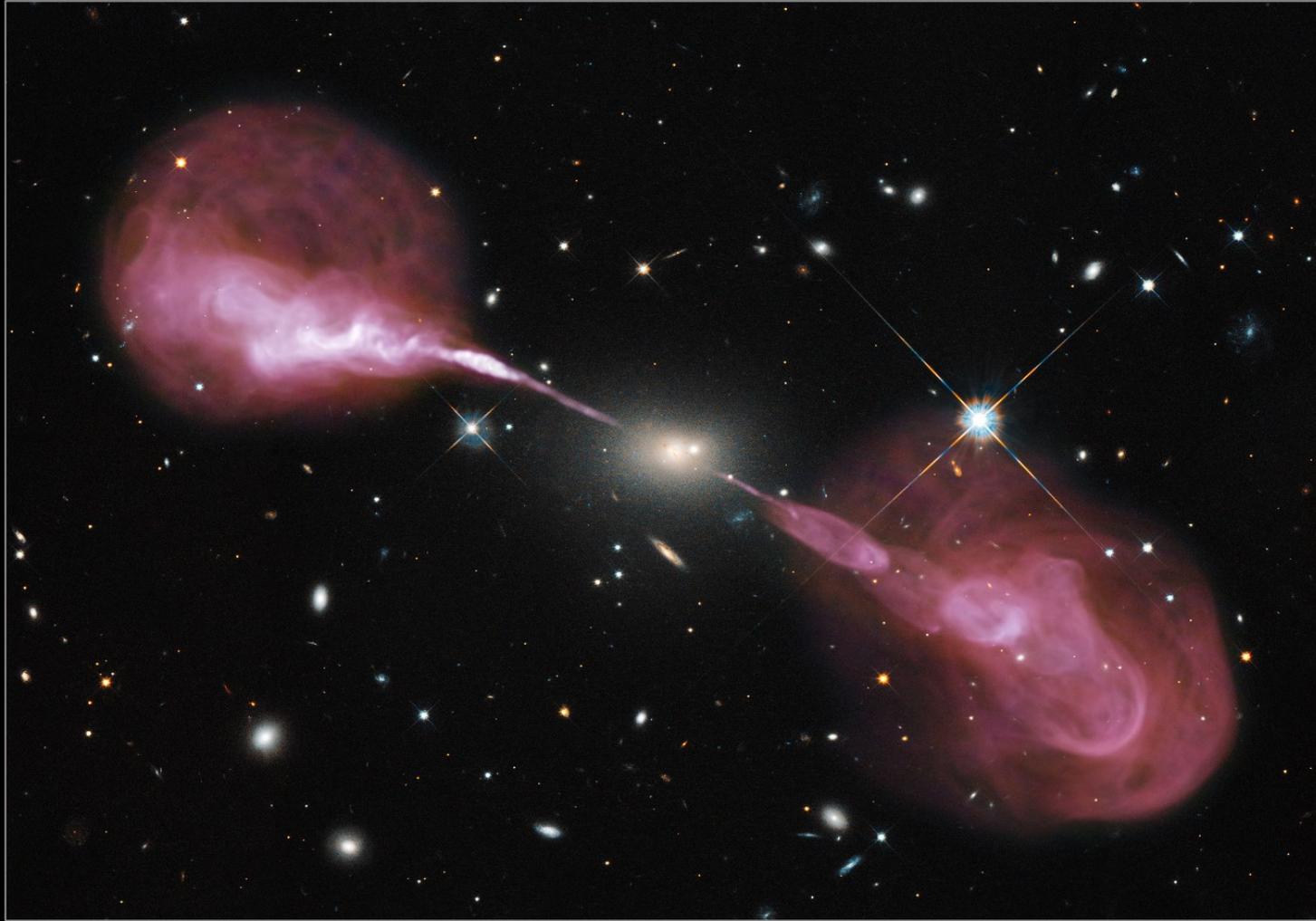
Copyright © 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

- Jatos de materia supersônicos (emissão radio estendida)
- Monitoramento das galáxias Seyfert mostra que a emissão de energia varia freqüentemente com o tempo
- A luminosidade pode dobrar ou diminuir à metade dentro de apenas 1 ano
- Variações rápidas => fonte de energia compacta ($t_{\text{variação}} \sim 1 \text{ ano}$)

$$\text{diâmetro} = c t_{\text{variação}} = 1 \text{ a.l.}$$

Radiogaláxias

Radio Galaxy Hercules A



Hubble
Heritage

Radiogaláxias

- Galáxias com **emissão radio muito intensas**

$$\Rightarrow L_{\text{rádio}} = 10^7 \text{ a } 10^{12} L_{\text{sol}}$$

- Para radiogaláxias, a energia emitida em comprimentos de **onda de rádio é 0.1 a 10 vezes** a energia emitida em comprimentos de **onda visíveis**.
- A maioria das galáxias de rádio são galáxias **elípticas ou elípticas gigantes** no visível
- A emissão de rádio vem de uma pequena fonte brilhante no núcleo da galáxia, bem como grandes **jatos e lóbulos** que são geralmente maiores que a galáxia e se estendem até **Mpcs**.

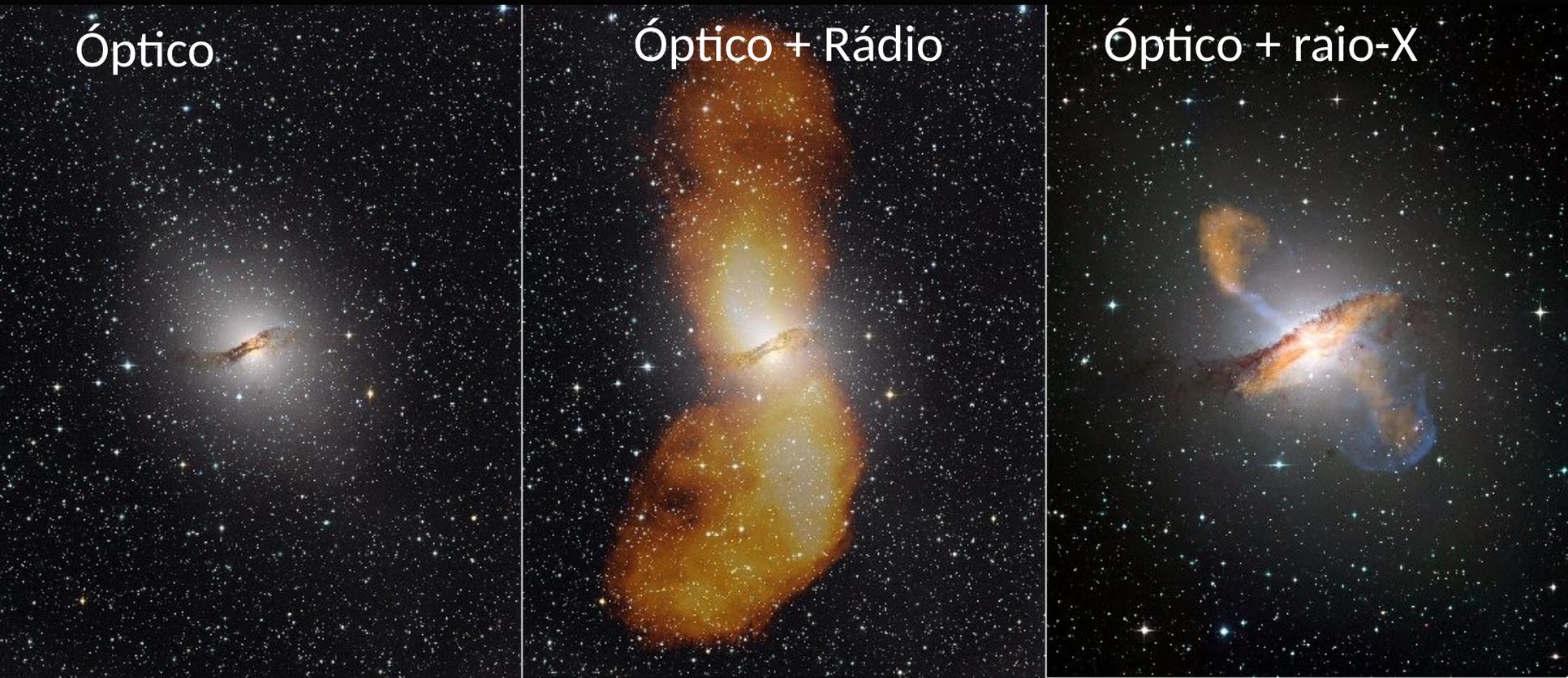
Centaurus A



Imagens tiradas em comprimentos de onda visíveis. Esta imagem mostra um close-up do núcleo mostrando a formação de estrelas ocorrendo dentro do núcleo empoeirado.

- A galáxia Centaurus A a uma distância de cerca de 4 Mpc é a galáxia ativa mais próxima de nós.
- Esta galáxia é uma galáxia elíptica com um disco de poeira.

Centaurus A



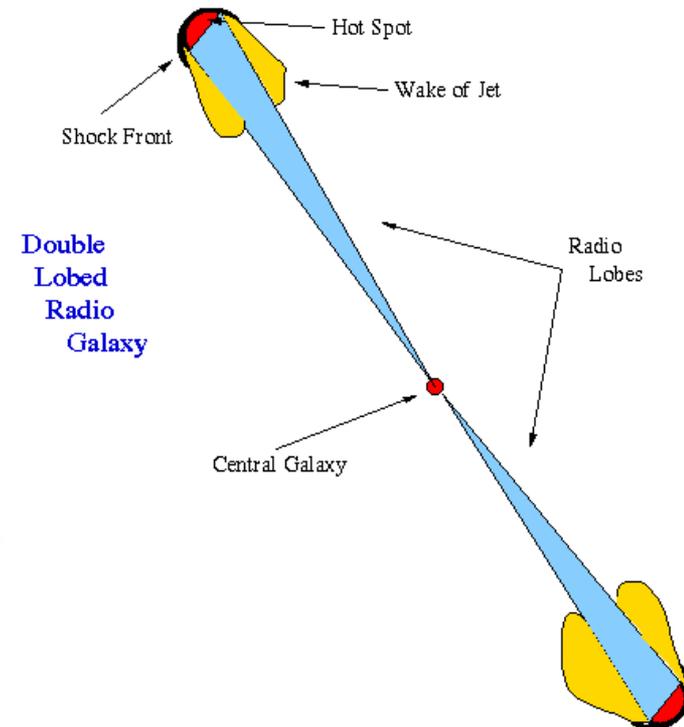
- Os lóbulos e jato não emitem no visível.
- A emissão de rádio se origina de jatos gigantes que apontam em direções perpendiculares ao disco empoeirado.
- O comprimento do jato radio é de cerca de 10 kpc

Emissão extensa radio

- Jatos de matéria: (e^- , e^+) ou (e^- , p): ejetados do núcleo e acelerados supersonicamente até $v \sim (0,5-0,9)c$
- Produzem lobos brilhantes (de até 400 kpc): são a região onde jato impacta supersonicamente meio ambiente (com $v > v_{som}$):

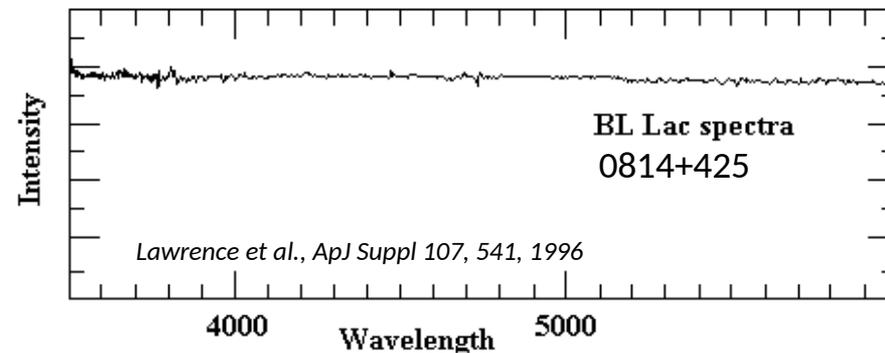
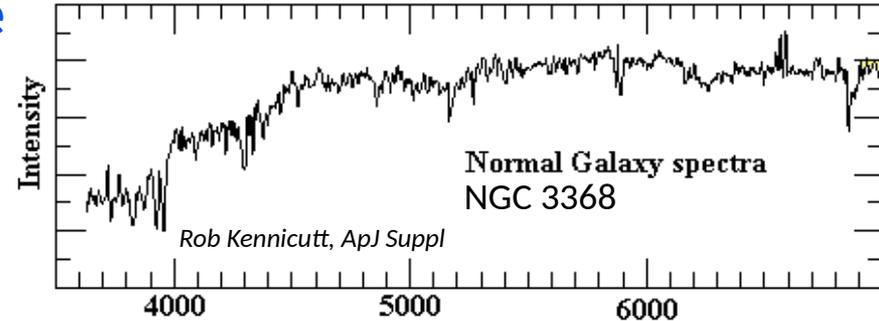
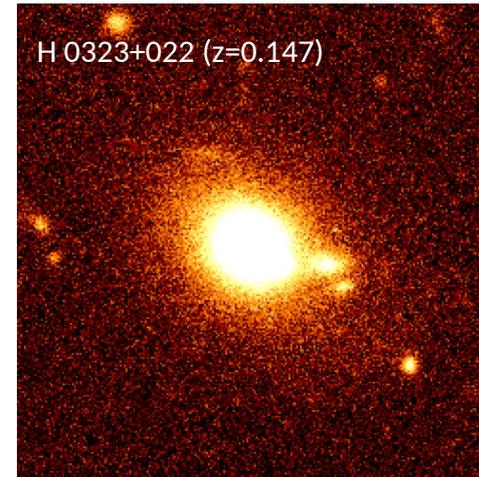
- formando onda de choque que energiza o gás fazendo-o irradiar (brilhante)

- $L_{\text{radio dos lobos}} \sim 10^{36} - 10^{38} \text{ J/s}$ entre 0,1 e $10 L_{VL}$



Objetos BL Lac ou Blazares

- Essa classe assim chamada pois recebeu o nome do 1º objeto descoberto
- Todos os objetos semelhantes a este primeiro blazar são chamados de objetos **BL Lac ou Blazars**.
- Espectro não-térmico **sem linhas de emissão ou absorção**
- **Extraordinária variabilidade** em curtos períodos de tempo
- Suspeita-se que sejam radio galáxias: porém com jato apontando em nossa direção



Quasares

- Quasar é a abreviação de Quasi-Stellar Object, também abreviada como QSO.
- 1959-1963: 3º catálogo de Cambridge: lista várias radio-fontes com posição coincidente com imagem óptica pontual que parecia ser uma estrela:
 - **Exs. : 3C48 e 3C273**
- Espectro de linhas (efeito Doppler): mostrou que esses objetos pontuais no óptico: muito distantes
- O desvio para o vermelho para 3C 273 é $z = 0.158$, o que corresponde ao movimento da galáxia a uma velocidade (em relação a nós) de 16% da velocidade da luz.
 - **3C273: $d = 640$ Mpc**
 - **3C48 : $d = 1300$ Mpc**

Distância e luminosidade de quasares

3C 273:

Redshift: $z = 0.158 \Rightarrow v = 0.145 \cdot c$

Usando a lei do Hubble, podemos encontrar a distância até 3C 273.

$$d = \frac{v}{H_0} = \frac{0.145 \times c}{70 \text{ km/s/Mpc}} = 620 \text{ Mpc}$$

Sabendo que a magnitude aparente de 3C 273 é $V=12.8$, magnitude absoluta é:

$$M_V = V - 5 \log_{10} \left(\frac{d}{10 \text{ pc}} \right) = -26.2$$

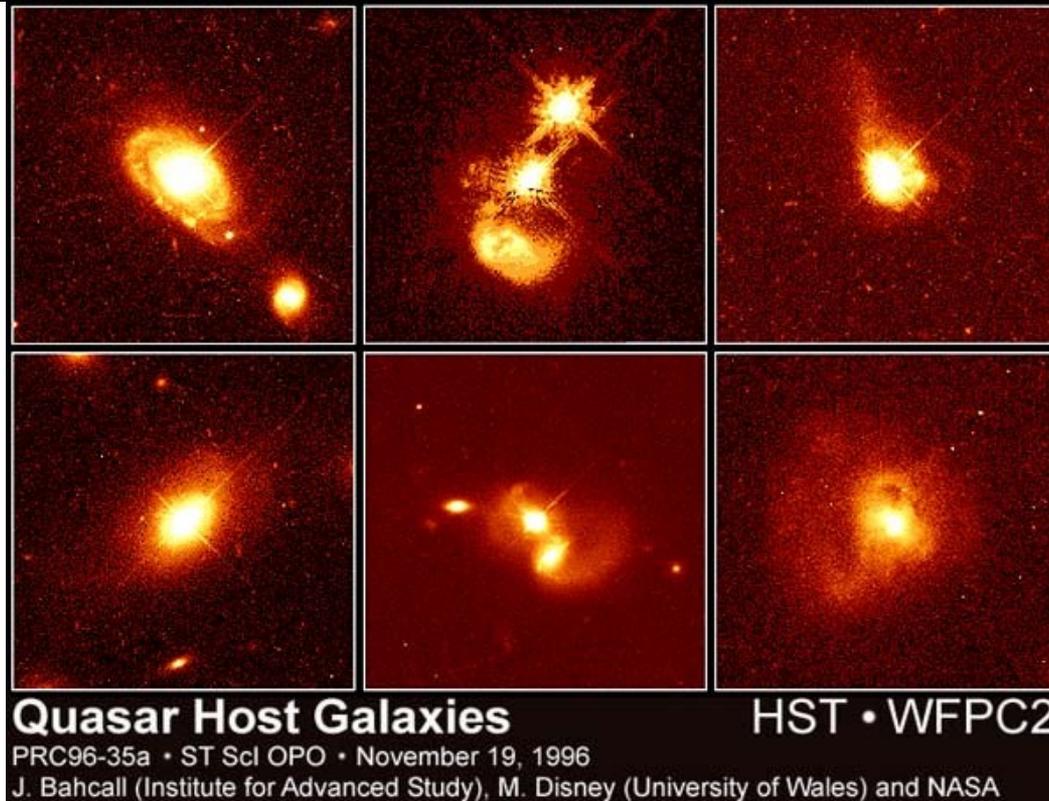
Como a magnitude absoluta do Sol é $M_{sol} = 4.82$, temos que

$$L_V = 100^{(M_{sol} - M_V)/5} L_{sol} = 2.6 \times 10^{12} L_{sol} = 1 \times 10^{39} W \\ \approx 10^3 L_{ViaLactea}$$

Distância e luminosidade de quasares

- Quasares são os objetos mais luminosos do Universo e estão entre os objetos mais distantes já observados
- Em Dezembro de 2017 foi encontrado o **quasar mais distante já observado** : **ULAS J1342+0928**
- J1342+0928 foi observado com um **redshift de $z=7.54$** , o que implica numa distância de **9 Gpc ou 29.3×10^{12} anos luz** (distância comovente, ie levando em conta a expansão do Universo)
- O quasar emitiu a luz observada na Terra hoje menos de 690 milhões de anos após o Big Bang, cerca de **13,1 bilhões de anos atrás**.
- A luminosidade do quasar é estimada em **4×10^{13} luminosidades solares**. Esta energia é gerada por um buraco negro supermassivo estimado em **8×10^8 massas solares**.

Quasares são AGNs



- Hoje telescópios mais poderosos mostram que os QSOs têm galáxias fracas em torno deles, sugerindo que os quasares são os núcleos muito brilhantes de galáxias ativas.
- Os quasares mais brilhantes têm uma luminosidade de $10^{15} L_{\text{sol}} \sim 100.000$ x mais luminosa que a Via Láctea.

Variabilidade de quasares

Variações muito rápidas em Luminosidade:

como objeto não pode variar em brilho + rápido que tempo que luz leva para atravessá-lo:

$$D = t_{\text{cruz}} \times c, \text{ mas } t_{\text{var}} \geq t_{\text{cruz}} \rightarrow D \leq c t_{\text{var}}$$

Ex.: se um objeto tem $D = 1 \text{ a.l.} = 1 \text{ pc} / 3,3 = 10^{13} \text{ km}$
não pode variar em brilho com período < 1 ano

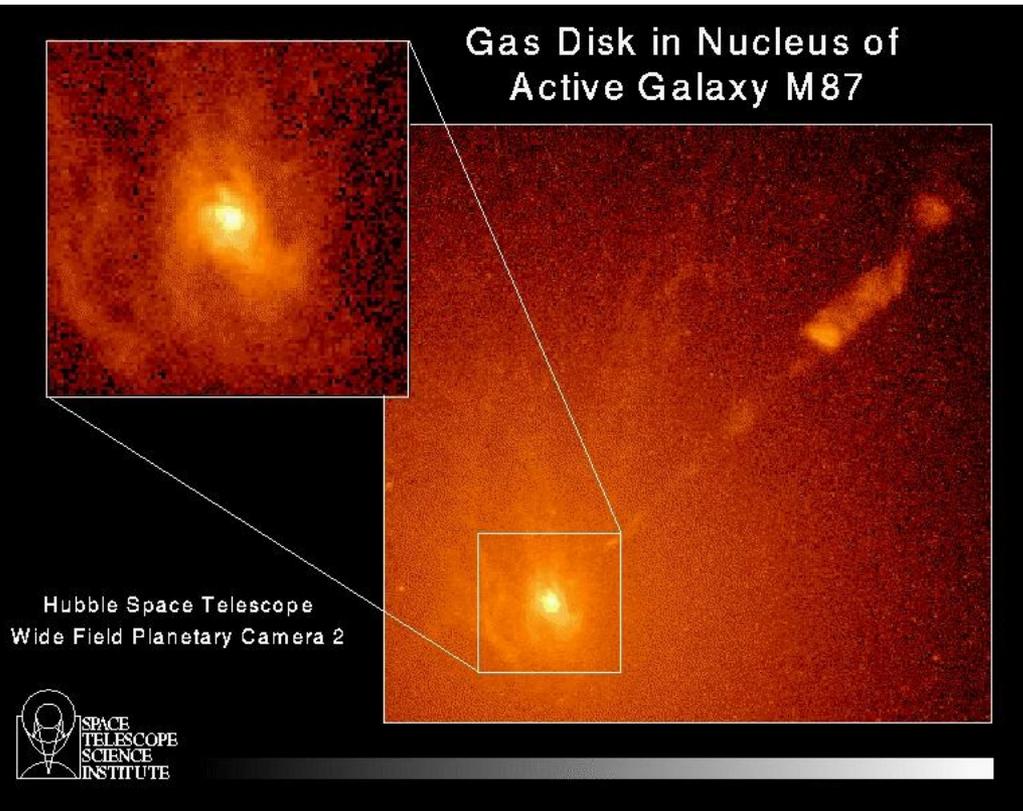
Mas o brilho de alguns QSOs: varia em meses, semanas, dias, horas:
→ **Fonte de energia do QSO muito pequena!**

Se $D \leq t_{\text{var}} c = 1 \text{ dia-luz} \sim$ dimensão do SS !

Mas QSO típico: **$L = 1000 L(\text{galaxia normal})$**

O que está produzindo essa enorme L em volume tão pequeno em objetos a enormes distâncias??

Velocidades Orbitais Perto do Núcleo de QSO

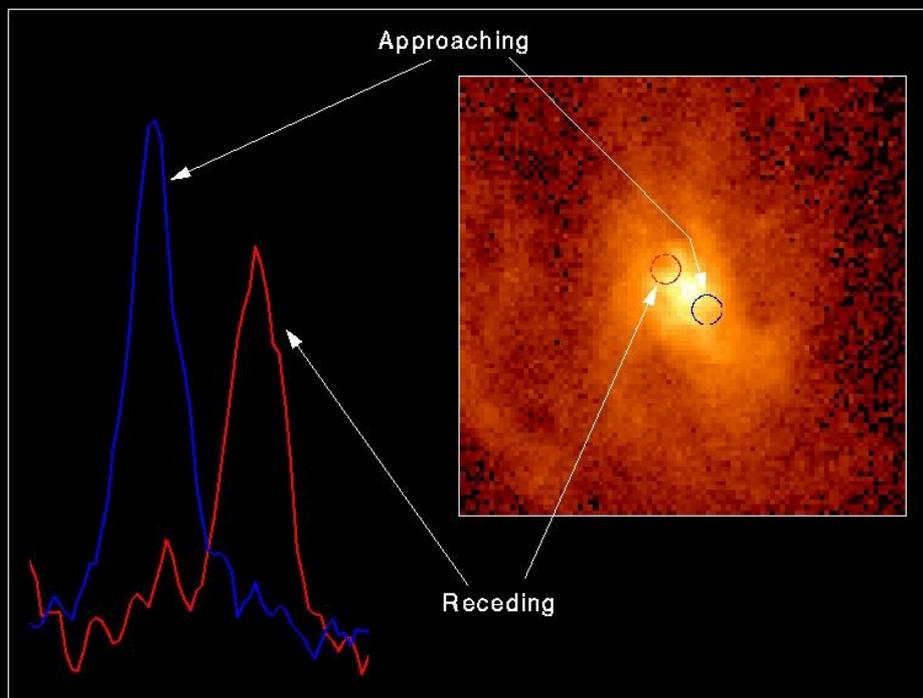


- O gás que se move em órbitas circulares perto dos núcleos de galáxias ativas foi observado.
- Um exemplo é a gigantesca galáxia elíptica M87, que também é uma radiogaláxia com um jato.

- No Telescópio Espacial Hubble da região central, um disco e um jato são vistos.
- Uma série de imagens de rádio do centro da galáxia mostram que a região energética brilhante é menor que um ano-luz de diâmetro

Evidência de um objeto de alta massa no núcleo

Spectrum of Gas Disk in Active Galaxy M87



Hubble Space Telescope • Faint Object Spectrograph

Espectros de nuvens de gás a uma distância de

$20 \text{ pc} = 6,2 \times 10^{14} \text{ km} = 4.100.000 \text{ UA}$ do centro foram medidas.

Os desvios Doppler mostraram que o gás orbita o centro a uma velocidade de 550 km / s .

A lei de Kepler nos dá a massa da região central:

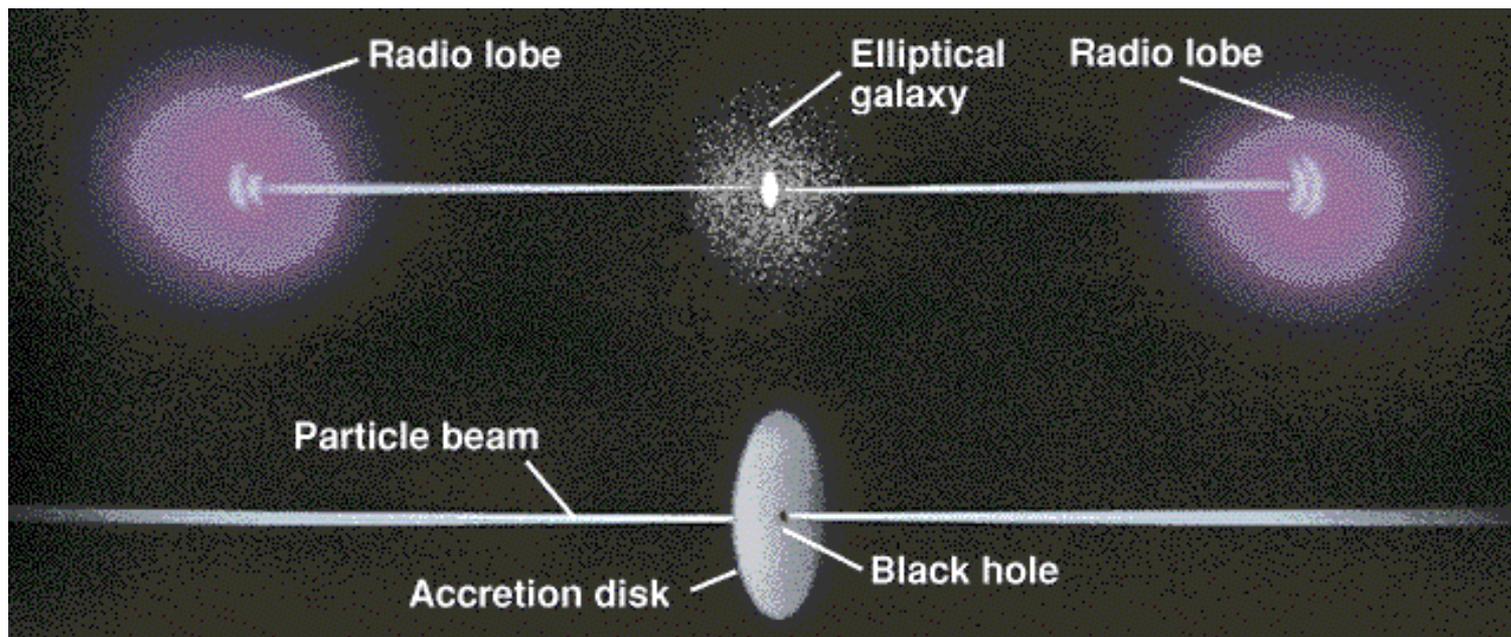
Período Orbital = $P = 2 \pi a / v = 2 \pi \times 6,2 \times 10^{14} \text{ km} / 550 \text{ km/s} = 7 \times 10^{12} \text{ s} = 220.000 \text{ anos}$.

Massa = $a^3 / P^2 = (4,100,000)^3 / (220,000)^2 = 1,4 \times 10^9 M_{\text{sol}}$

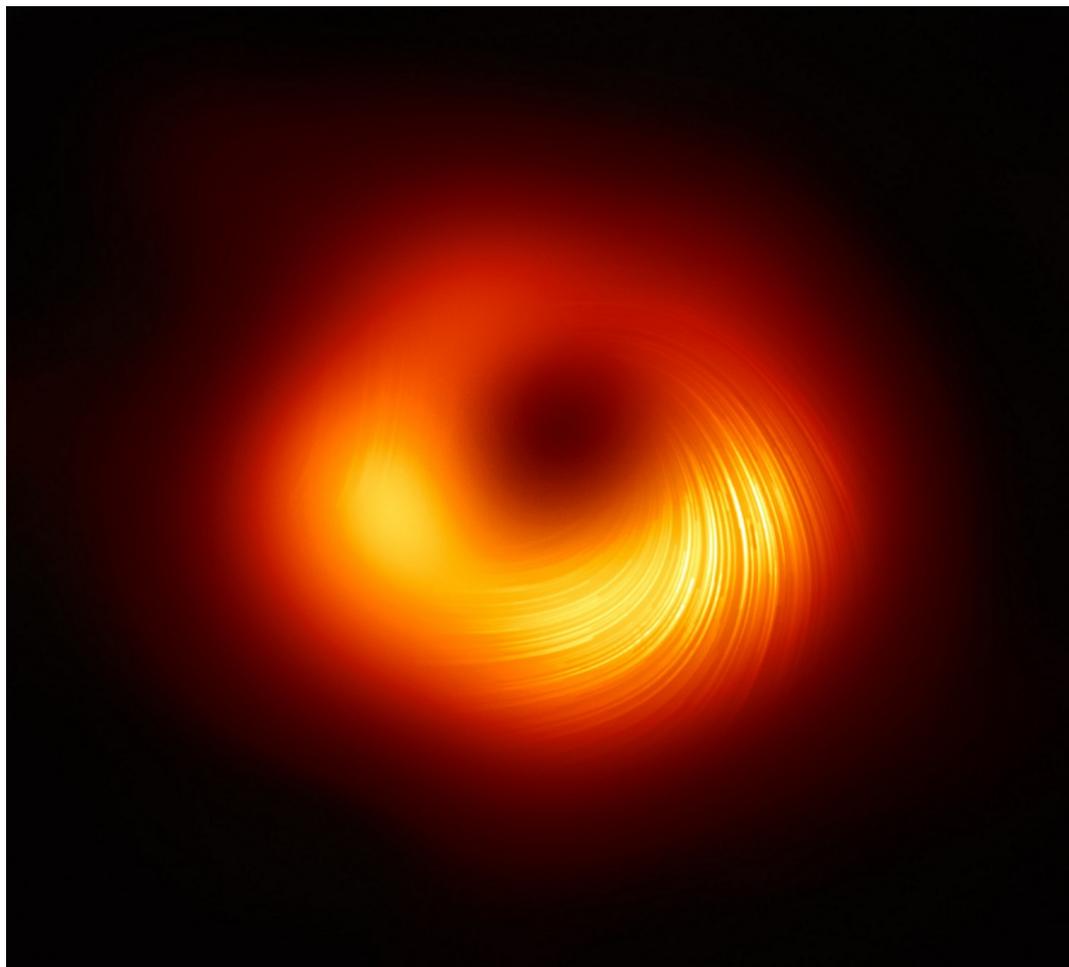
Uma gigantesca massa é encontrada dentro de uma pequena região.

BNs como fonte de energia de AGNs

- Um gigantesco buraco negro (ou buraco negro supermassivo) com uma massa na faixa de um milhão a um bilhão de massas solares também pode ter um disco de acreção que emite radiação.
- O modelo básico para todas as galáxias ativas é que um buraco negro supermassivo giratório está no centro da galáxia.
- O buraco negro tem um disco de acreção que emite radiação.
- A rotação rápida também pode canalizar o material para jatos que apontam ao longo do eixo de rotação, semelhante ao que é visto na formação de estrelas.



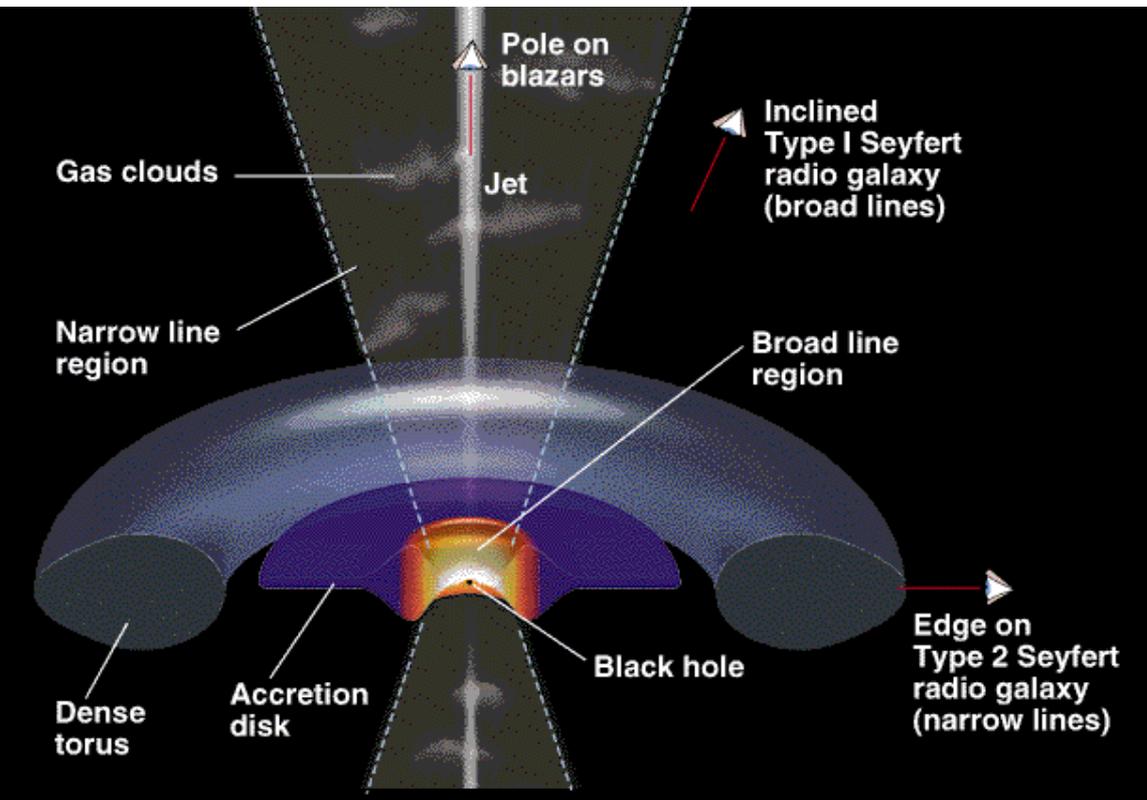
Buraco Negro no centro de M87



- Event Horizon Telescope observou o disco de acreção de M87 em 2019
- Massa $6,5 \times 10^9 M_{\text{sol}}$

Imagem buraco negro supermassivo M87 * em luz polarizada, obtida pelo Event Horizon Telescope e revelada em 24 de março de 2021. A direção das linhas no topo da intensidade total marca a direção das oscilações do vetor elétrico da onda eletromagnética.

Modelo de AGNs



© 1997 Wadsworth Publishing Company/ITP

- Os tipos de AGNs são um resultado do ângulo de visão.
- Os **blazares** correspondem a galáxias com **jetos apontando diretamente para nós**.
- Galáxias de rádio e Seyferts correspondem **ângulos de visão inclinados**.
- A **luminosidade** do disco de acreção do buraco negro é proporcional à **taxa em que a massa cai no disco**.
- Os buracos negros que estão cercados por mais material devem ser mais brilhantes.

Fonte de energia

- Raio de Shwartzschild de BN com $M = 10^8 M_{\text{sol}}$?

$$\rightarrow R_S = M/M_{\text{sol}} 3 \text{ km} = 3 \times 10^8 \text{ km} = 2 \text{ UA}$$

→ energia gerada em volume compacto

Energia gravitacional do gas que cai do disco para o BN: é convertida em radiação

Vejamos:

En. potencial (de m) trazido do infinito para distancia R de (M):

$$EP = -GMm/R$$

Para que $m=1\text{kg}$ seja movido para $R = R_S$ do BN (com $M=10^8 M_{\text{sol}}$):

$$EP/m = -GMm/(R_S m) = 4 \times 10^{16} \text{ J/kg} = e$$

Para fornecer $L = 10^{12} L_{\text{sol}} = 4 \times 10^{38} \text{ J/s}$ requer-se acreção de:

$$L/e = (4 \times 10^{38} \text{ J/s}) / (4 \times 10^{16} \text{ J/kg}) = 10^{22} \text{ kg/s} = 10^{29} \text{ kg/ano} \\ = 0,05 M_{\text{sol}}/\text{ano}$$

Fonte de energia

Para fornecer $10^{12} L_{\text{sol}} = 4 \times 10^{38} \text{ J/s}$ requer-se acreção de:

$$\begin{aligned} L/e &= (4 \times 10^{38} \text{ J/s}) / (4 \times 10^{16} \text{ J/kg}) \\ &= 10^{22} \text{ kg/s} = 10^{29} \text{ kg/ano} \\ &= 0,05 M_{\text{sol}}/\text{ano} \end{aligned}$$

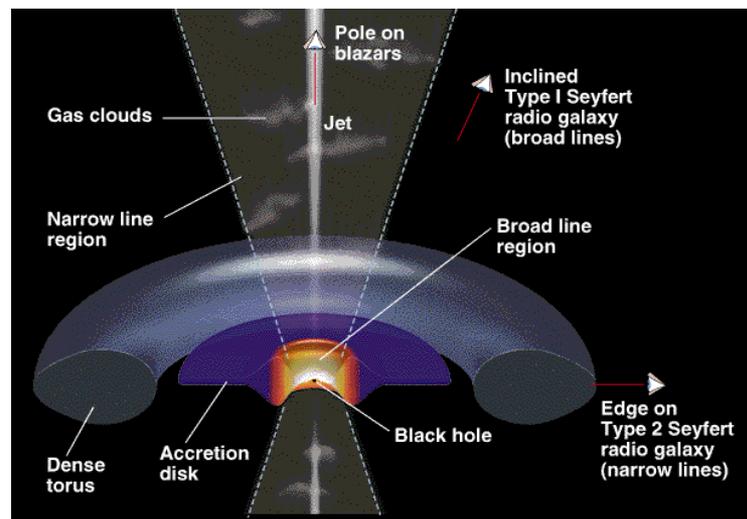
→ Se toda energia potencial for convertida em radiação: são necessárias 0,05 M(sol)/ano para produzir a radiação observada de $L=10^{12} L_{\text{sol}}$ numa galaxia ativa ou QSO

→ Na realidade: $L_{\text{disco}} = \eta \dot{M} c^2$,

onde η é a eficiência da conversão de massa em energia, que é tipicamente 10%, mas pode chegar a 42% (comparada com 0.07% na reação nuclear mais energética conhecida); e \dot{M} é a taxa de acreção.

Emissão de energia

- **Energia produzida no disco de acreção é reprocessada:** absorvida e re-emitida no infravermelho e rádio por gas e poeira ao redor do núcleo
- Os **atos de material: compostos de elétrons (e prótons ou positrons):** são ejetados das regiões mais internas do disco de acreção
- Jatos de material: contêm **fortes campos magnéticos:**
 - electrons (partículas carregadas): espiralam e são acelerados ao redor de B
- emitem **radiação sincrotron:** origem não-térmica pois não tem conexão com temperatura do gas emissor



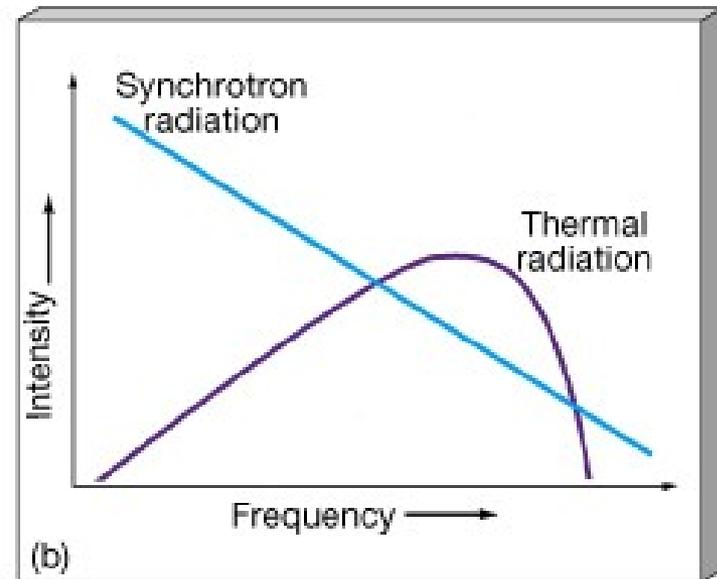
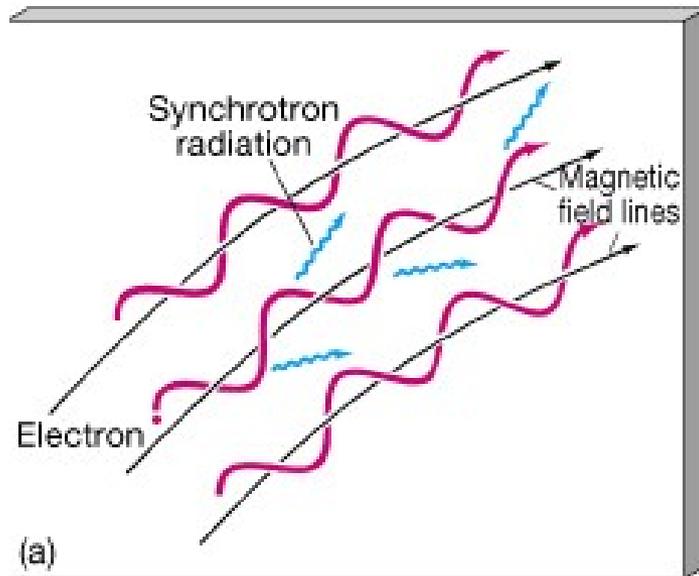
© 1997 Wadsworth Publishing Company/ITP

Distribuição espectral, ou fluxo monocromático de energia:

$$F_{\nu} \propto \nu^{-\alpha}$$

- lei de potência com **índice espectral α**
- α tipicamente entre 0.5 e 2.0 nas faixas de frequência radio ($\nu < 3 \times 10^9$ Hz)

Emissão síncrotron



(a) Partículas carregadas e em altas velocidades emitem radiação síncrotrônica enquanto espiralam em um campo magnético; (b) intensidade de emissões térmica (Planck) e síncrotron comparadas

Evolução das Galáxias Ativas

- Maioria dos QSOs: bem distantes (z grandes): eram mais comuns no passado
- Sugere que quando galáxias começaram a se formar: eram QSOs
- Presença de BN supermassivos nos centros de muitas galáxias normais (ex. VL): consistente com ideia de que começaram como QSOs que depois tornaram-se objetos + calmos (hoje)
- à medida que suprimento de combustível se reduziu:
 - **Galaxias Seyfert poderiam ter se tornado S normais**
 - **Radio-galaxias: teriam se tornado E normais**
- Teoria ainda necessita de confirmação!!

Evolução das Galáxias Ativas

Uma possível seqüência evolutiva para galáxias ativas

