Introdução à Astronomia Extragaláctica

# 6. Núcleos Ativos





AGA 299– IAG/USP Ronaldo E. de Souza Novembro2019

**Cap.** 7

Graças aos buracos negros supermassivos os núcleos ativos de galáxias estão entre os fenômenos mais energéticos que podem ser observados no Universo local.

<u>Cap. 5</u>



# Tópicos

- 6.1 <u>Buracos Negros</u> <u>Supermassivos</u>
- 6.2 Modelo Unificado
- 6.3 <u>Principais</u> <u>Propriedades</u>
- 6.4 Galáxias de Seyfert

- 6.5 <u>Quasares</u>
- 6.6 <u>Rádio Galáxias</u>
- 6.7 <u>Blazares</u>
- 6.8 Problemas

# 6.1 **Buracos Negros Supermassivos**

Inúmeras galáxias apresentam evidências de conter um buraco negro supermassivo na região central. Qual seria a sua origem? Como detectá-lo? Qual o seu efeito?



A presença de um objeto supermassivo na região central de uma galáxia altera fortemente a distribuição de massa na região nuclear e consequentemente a sua curva de rotação. Imagine uma situação bastante simplificada em que um buraco negro de dimensão pontual e massa  $M_{BH}$  conviva na região central com uma densidade de massas estelares,  $\rho$ , aproximadamente constante. A massa total contida dentro de uma dimensão radial, r, será

 $M(r) \sim M_{BH} + 4\pi/3 \rho r^{3}$ 

e esta massa deve induzir uma velocidade circular de rotação V<sup>2</sup>~GM(r)/r no seu entorno. Portanto a massa integrada poderia ser determinada através da análise da curva de rotação das estrelas próximas à região central

M(r)~V<sup>2</sup>r/G

Desta forma podemos inferir em primeira aproximação que a velocidade circular de rotação deve ser

 $V^{2}$ ~ $GM_{BH}/r$  + 4 $\pi$ G/3 $\rho$   $r^{2}$ 

mostrando que, graças ao primeiro termo, a velocidade de rotação deve crescer fortemente na região central antes de crescer linearmente com o raio.

Podemos verificar pela figura abaixo (<u>Sofue & Rubin, 2001</u>) que realmente as observações sobre a curva de rotação de algumas galáxias espirais próximas mostram esta elevação consistente da velocidade circular de rotação central devido à presença de um buraco negro supermassivo. O problema, no entanto, é que a observação deste efeito requer uma resolução espacial bastante elevada. No caso da Via Láctea, como o BH tem uma massa relativamente pequena (10<sup>6</sup>M<sub>o</sub>), a resolução requerida é mais elevada mas ainda assim possível de ser observada com a instrumentação moderna.



No entanto esta aproximação é considerada por demais simplista e pouco eficiente para os objetos mais distante. Uma situação mais realista considera que o perfil de densidades estelares possa variar na região central. Além disto as estrelas podem apresentar ainda uma dispersão anisotrópica de velocidades, além do movimento de rotação circular. Uma aproximação mais cuidadosa considerando-se as equações hidrodinâmicas (veja Binney & Tremaine, 1985) mostra que

 $M(r) = V^2 r/G + \sigma_r^2 r/G[-d \ln \rho_*/d \ln r - d \ln \sigma_r^2/d \ln r - (1 - \sigma_{\theta}^2/\sigma_r^2) - (1 - \sigma_{\phi}^2/\sigma_r^2)]$ 

Esta equação é a base do método usado por Kormendy (<u>1995,ARAA,33,581</u>) para detecção de buracos negros em galáxias próximas e considera além da rotação o efeito da dispersão de velocidades das estrelas próximas ao núcleo.

Observe que quando consideramos a densidade de estrelas, e a dispersão de velocidades, como sendo constantes e além disto uma dispersão isotrópica de velocidades vamos recuperar o tratamento simplificado obtido anteriormente.

![](_page_6_Figure_4.jpeg)

Em NGC 3115 a velocidade de rotação na região central é cerca de 165±4 km/s a 2" do núcleo ( 1"=47,2 pc) е а **á**<sup>km s⁻¹</sup>)[ dispersão de velocidades cerca de 7" atinge 182±3 Km/s. Os dados ao longo do eixo menor mostram que este é o valor típico do bojo. Na região dentro de 2" este valor cresce 295±9 Km/s devido à para influência de um SMBH de 10<sup>9</sup>  $M_{\odot}$  (Kormendy, 1992, AIPC, 254,  $m^{-1}$ 23). Ao remover o disco nuclear da imagem observada obtém-se região de alto brilho uma (cuspy) cuja dispersão /de velocidades é da ordem de 600±37 km/s (kormendy et al, 1996, ApJ, 459, L57). Como comparação a dispersão de velocidades dos aglomerados estelares mais massivos se situa na faixa 10-20 km/s/

Mostre que quando dln $\rho$ /dr~0 e V<sub>rot</sub>~0 temos que M~r<sup>2</sup>/G d  $\sigma$ <sup>2</sup>/dr.

![](_page_7_Figure_2.jpeg)

Observe que é essencial neste método dispor de instrumentos capazes de observar a região nuclear com a máxima resolução possível. Infelizmente, no entanto, mesmo atualmente, ainda não somos capazes de amostrar diretamente as proximidades da região conhecida como o raio de Schwarzschild, ou raio do horizonte causal

 $r_s=2GM/c^2\sim 2,96 \text{ km M/M}\odot$ 

Mas podemos pelo menos amostrar a região onde o buraco negro é capaz de induzir nas estrelas que se movimentam no seu entorno uma dispersão de velocidade  $\sigma$  se observarmos a região com uma resolução espacial

 $\begin{array}{l} R_{infl} \sim GM_{SMBH} / \sigma^2 \\ \sim 45 pc \; (M_{SMBH} / 10^8 M_{\odot}) (\sigma / 100 \; km/s)^{-2} \end{array}$ 

Considera-se atualmente que as melhores indicações diretas de detecção de buracos negros devam ser feitas com esta resolução conhecida como o raio de influência.

Se uma galáxia está a uma distância de 10 Mpc qual deve ser a dimensão angular correspondente ao raio de influência? A melhor resolução angular disponível no infravermelho próximo é da ordem de 0,1". Até qual distância podemos mapear o raio de influência das galáxias próximas?

![](_page_9_Picture_0.jpeg)

NGC 4594, também conhecida como a galáxia Sombrero, muito provavelmente também hospeda na região central um buraco negro com cerca de  $10^9 M_{\odot}$ .

![](_page_10_Figure_0.jpeg)

Em NGC 4594 é possível, utilizando os dados espectroscópicos do HST, remover a contribuição do bojo e analisar o efeito do SMBH central de  $10^9 M_{\odot}$  (kormendy et al, <u>1996, ApJL, 473, L91</u>)

![](_page_11_Figure_0.jpeg)

## M31's intriguing nucleus

Hubble telescope observations have yielded insights into the Andromeda Galaxy's (M31's) complex nucleus. New images from Hubble uncovered a disk of young, hot, blue stars swirling around a supermassive black hole. The disk is nested inside an elliptical ring of older, cooler, red stars, seen in previous Hubble observations. The inset images show M31's bright core and a view of the entire galaxy.

![](_page_12_Figure_2.jpeg)

galáxia Α nossa vizinha, M31, também apresenta evidências de conter um SMBH central com cerca de  $10^7 M_{\odot}$ . Ao que parece este objeto central massivo induziu а presença de um disco interno de estrelas de quentes e mais jovens circundado por um segundo disco de estrelas vermelhas.

> Qual é a resolução angular necessária para resolver o raio de influência do buraco negro de M31?

**P1** 

![](_page_13_Figure_1.jpeg)

A região central de M31 contém um núcleo duplo que provavelmente reflete a presença de um disco de estrelas orbitando a vizinhança do SMBH. A distribuição de velocidade de rotação e dispersão de velocidades indicam a presença de um objeto central com cerca de 3,3 x  $10^7 M_{\odot}$ .

![](_page_14_Figure_1.jpeg)

Sabendo que M31 está a 812 Kpc estime a distância entre as componentes P1 e p2.

![](_page_15_Picture_0.jpeg)

A escala destas imagens é igual a 284". Sabendo que a distância de NGC 1275 é igual a 78,7 Mpc estime a escala linear destas distorções.

Observações com o satélite de raios-X Chandra na região central do aglomerado de Perseus durante 53 horas, e aplicando uma técnica de subtração de imagem, detectouse indícios de ondas acústicas possivelmente produzidas pela acresção violenta de massa em um SMBH na radiogaláxia Perseus-A (Fabian et al, 2003).

**Raios-X** Chandra

Óptico DSS

Continuo Rádio NRAO

21 cm NRAO

Em Centaurus-A a faixa de poeira fria parece ser cortada pela emissão de dois jatos de partículas relativísticas cuja origem se localiza no SMBH no centro do objeto. As observações do VLA do SMBH da via Láctea ilustram а interação deste com o material vizinho. A cor vermelha representa o gás frio, o verde o gás morno ionizado e em azul as estrelas orbitando a região. Observe a estrutura espiral de três braços presente gás no ionizado e que parece emergir do objeto central.

SGR A está a cerca de 7,94 Kpc. Qual é a escala das menores estruturas que podem ser resolvidas no centro da Via Láctea? Qual é a dimensão do anel de gás frio? Porque ele não cai sobre a região central?

![](_page_17_Picture_2.jpeg)

alguma De forma а presença dos SMBHs se relaciona com OS bojos como mostra a correlação dispersão entre а de velocidade dos bojos ( $\sigma$ ) e dos SMBHs. massa a Atualmente sabe-se da existência de SMBHs em grande número de um galáxias próximas. Uma atualizada versão da relação  $M_{BH} x \sigma$  em bojos de galáxias baseada em 49 medidas 19 limites e superiores mostra que a massa destes objetos em unidades solares é dada por

Log(M<sub>SMBH</sub>/M<sub>☉</sub>)~8,12+ 4.24Log(σ/200 km/s)

com um desvio quadrático médio da ordem de 0,44 (Gultekin et al, <u>2009, ApJ,</u> <u>698, 198</u>).

![](_page_18_Figure_3.jpeg)

Utilize a relação Faber-Jackson para estimar a relação entre a massa do SMBH e a massa total das galáxias elípticas. Uma relação análoga existe ainda entre a massa dos SMBHs e a luminosidade do bojo das galáxias

 $Log(M_{SMBH}/M_{\odot})$ ~8,95+1,11Log (L<sub>V</sub>/L<sub>V $\odot$ </sub>)

com um desvio quadrático de 0,38 que é menor do que o observado na relação com a dispersão de velocidades dos bojos. Este resultado é um tanto surpreendente dada a diferença de escalas entre as dimensões do bojo (3-5 kpc) e da região de influência do SMBH

R<sub>infl</sub>~GM<sub>SMBH</sub>/σ<sup>2</sup> ~45pc (M<sub>SMBH</sub>/10<sup>8</sup>M<sub>☉</sub>)(σ/100 km/s)<sup>-2</sup>

De alguma forma esta relação indica que a evolução dos buracos negros supermassivos deve estar associada à própria evolução do bojo das galáxias.

Qual é o raio do horizonte causal de um BH de 10<sup>9</sup> Msun?

![](_page_19_Figure_6.jpeg)

### Cenário de Formação de um SMBH por Acresção

![](_page_20_Figure_1.jpeg)

O problema com este cenário é que a máxima taxa de acresção ocorre quando o gás capturado libera a luminosidade de Eddington e neste caso é possível mostrar que a massa do BH duplica a cada  $t_e \sim 10^7$ anos. Portanto a sua massa total deve evoluir segundo

#### $M_{BH}=2M_0 \exp(t/t_E)$

Supondo que a semente inicial seja da ordem de uma massa estelar são necessários cerca de 700 milhões de anos para formar um SMBH típico. O problema é que os SMBH são os motores dos quasares e existem alguns destes objetos em z~7,085 quando o Universo tinha uma idade máxima de 759 milhões de anos. Como explicar que os SMBHs já estavam formados nesta época se incluirmos o tempo de formação das galáxias e a evolução das estrelas progenitoras?

Algumas possíveis alternativas para evitar esta dificuldade são:

1. Talvez os SMBHs se formaram hierarquicamente através de fusões múltiplas entre sistemas menos massivos. Durante o evento de fusão deve ter ocorrido um intenso episódio de formação estelar pela compressão do gás. Isto deve ter alterado as características iniciais dos objetos transformando-os em sistemas esferoidais. Ao mesmo tempo os MBHs dos dois, ou mais, objetos se acomodaram na região central por efeito da fricção dinâmica. Após algum tempo deve ter ocorrido uma fusão dos MBHs gerando os objetos que observamos hoje no centro dos grandes esferoides.

![](_page_21_Picture_2.jpeg)

2. Talvez os SMBHs se formaram através de sementes cosmológicas primordiais que surgiram no próprio Big Bang. Neste caso pode ser que parte do gás que formou as galáxias foi desviado para a região central aumentando gradualmente a massa dos buracos negros primordiais. Após o episódio inicial de formação dos grandes bojos e galáxias elípticas o suprimento de gás foi interrompido e os SMBHs adquiriram massas proporcionalmente ao reservatório inicial justificando assim a relação desta com a

massa do bojo.

![](_page_21_Picture_5.jpeg)

![](_page_21_Picture_6.jpeg)

![](_page_21_Picture_7.jpeg)

Mesmo galáxias espirais que no início estivessem desprovidas de um esferoide central poderiam desenvolver MBHs através das instabilidades geradas em seus discos. Estas instabilidades espirais poderiam eventualmente evoluir para a formação de fortes barras.

Estas barras podem canalizar material do disco alimentando a região central e eventualmente criando, ou alimentando uma semente de MBH préexistente.

![](_page_22_Picture_2.jpeg)

Este processo pode gerar uma região central conhecida como 0 pseudo-bojo muito semelhante em vários aspectos aos chamados bojos clássicos. E na região nuclear este processo de acresção criaria um MBH.

# 6.2 Modelo Unificado

![](_page_23_Figure_1.jpeg)

O processo de captura do material pode ser aproximadamente descrito pelo potencial newtoniano modificado U=-GM/(R-R<sub>s</sub>), sendo R<sub>s</sub> =2GM/c<sup>2</sup> o raio de Schwarzschild. O movimento de uma partícula deve preservar a energia e o momentum angular e pode ser descrita pelo potencial efetivo

 $U_e = L^2/2R^2 - GM/(R-R_s)$ 

A condição para que ocorra uma órbita circular é que ocorra um mínimo do potencial efetivo, ou seja  $\partial U_e/\partial R=0$  e  $\partial^2 U_e/\partial R^2>0$ . No caso newtoniano as órbitas são sempre estáveis. No caso relativístico ocorre um ponto crítico quando  $\partial^2 U_e/\partial R^2=0$  e a segunda derivada troca de sinal. Utilizando o potencial efetivo acima pode ser facilmente verificado que o caso crítico ocorre quando R=3R<sub>s</sub> a partir de onde as órbitas inferiores são instáveis.

Como a energia total por unidade de massa de uma partícula é dada por

 $E=1/2 V_R^2 + U_e$ 

resulta que na última órbita estável ( $V_R$ =0) a energia total por unidade de massa da partícula será

$$E = -1/16 c^2$$

Neste ponto a energia de ligação da partícula será a diferença entre a sua energia no infinito (E=0) e a energia desta última órbita estável e portanto  $E_b=1/16c^2$ . Ao ser capturada pelo BH a partícula vai emitindo energia continuamente e o resultado final é que o montante equivalente à energia de ligação retorna ao meio na forma de fótons.

A consequência final deste processo é que a eficiência do BH em produzir energia eletromagnética a partir do material capturado é  $\epsilon mc^2 = 0,0625 mc^2$  o que equivale a cerca de 6% da massa de repouso. Esta eficiência é enorme quando comparada com a fusão nuclear que libera 0,01% da massa de repouso do material. Desde os anos de 1950 este é um dos principais argumentos em favor do uso dos SMBHs como motores centrais dos AGNs.

#### O resultado final é que se fosse possível operar um AGN com a máxima eficiência então a sua luminosidade seria Qual deve ser a taxa de captura de um SMBH para que o

 $L=\epsilon c^2 dm/dt$ 

Qual deve ser a taxa de captura de um SMBH para que o mesmo possa liberar uma luminosidade equivalente a 100 vezes a luminosidade da Via Láctea? Mantendo esta taxa de captura qual seria a massa do SMBH em 10<sup>10</sup> anos?

![](_page_25_Figure_4.jpeg)

![](_page_25_Figure_5.jpeg)

R/R<sub>s</sub>

Existe no entanto uma outra limitação física que impõe um limite máximo à luminosidade dos AGNs. Os fótons expelidos transportam consigo momentum e portanto são capazes de exercer pressão contra os elétrons presentes na região central. Como a energia dos fótons é E=pc resulta que pressão de radiação depende diretamente do fluxo  $F_{\lambda}$  emergente [  $P_{rad}$ =Força/Area=( $\Delta p/\Delta t$ )/ $\Delta A$ = $\Delta E/(c\Delta A\Delta t)$ = $F_{\lambda}/c$  ] e portanto

 $P_{rad}=L/(4\pi r^2 c)$ 

A interação destes fótons com os elétrons se dá através da seção de choque de Thomson ( $\sigma_e$ ) e em consequência o módulo da força radial exercida pela radiação será

 $F_{rad} = \sigma_e L/(4\pi r^2 c)$ 

Para que o processo de emissão da radiação seja mantido em operação é necessário que a força gravitacional sobre os pares elétrons+prótons supere a pressão de radiação, caso contrário o suprimento de material para a fonte central deve ser interrompido. Portanto,

 $\sigma_{\rm e} L/(4\pi r^2 c) < GMm_{\rm p}/r^2$ 

Resultando que a luminosidade do AGN deva ser inferior ao limite de Eddington

 $L_{E}$ =4 $\pi$ Gcm<sub>p</sub>/ $\sigma_{e}$  M= 1.26 x 10<sup>38</sup> (M/M<sub>o</sub>) ergs/s

Qual deve ser a taxa de captura para que um SMBH de  $10^9 M_{\odot}$  emita no limite de Eddington?

No entanto para viabilizar este processo é preciso encaminhar ainda uma solução para o problema do transporte do momentum angular do material a ser capturado. No círculo solar, por exemplo, a velocidade de rotação é da ordem de 220 km/s e como estamos a cerca de 10 Kpc do núcleo o conteúdo médio de momentum angular por unidade de massa é da ordem de L/m ~2 200 km/s.kpc.

Para alimentar o SMBH este material teria que ser transportado inicialmente para a região do raio de influência central onde o material deveria atingir um conteúdo de momentum angular da ordem de L/m= $\sigma R_{infl}=GM_{SMBH}/\sigma$  e considerando uma dispersão central de velocidades da ordem de  $\sigma$ =300 km/s obtemos L/m~1,5 10<sup>-3</sup> km/s.kpc. É preciso explicar como o material que estava no disco perdeu 5 ordens de magnitude do momentum angular inicial! Possivelmente uma parte deste momentum angular poderia ser perdido através da influência de perturbações não axissimétricas como barras por exemplo, mas esta é uma questão ainda em debate.

Supondo que o material tenha atingido a região da esfera de influência ainda temos que explicar como o mesmo atingiu a região da última órbita estável onde o seu conteúdo de momentum angular é

L/m~(27/2)<sup>1/2</sup> GM<sub>SMBH</sub>/c<sup>2</sup>

O que resulta em L/m~5,4 10<sup>-6</sup> km/s.kpc. É impossível realizar esta tarefa através de um colapso esfericamente simétrico do material capturado.

A solução adotada consiste em supor que o material forme um disco de acresção e vá perdendo gradualmente parte do seu momentum angular graças aos efeitos da turbulência e/ou da viscosidade.

A estrutura ao lado é um modelo matemático mais realista que foi 10-20% usado por Elvis (2000, ApJ, 545, **63**) para simular as principais características dos AGNs. 0 material capturado proporciona uma luminosidade que por sua vez força a expulsão de parte do material nas imediações do disco de acresção dimensão uma com radial da ordem de centésimos de parsecs. O fluxo de gás quente emerge da região central PHYSICS do disco de acresção expelindo o gás da região interna do toro a altas velocidades.

![](_page_28_Figure_1.jpeg)

Qual deve ser a escala de tempo para que uma nuvem seja expelida da região central por ação do vento?

![](_page_29_Figure_0.jpeg)

Acredita-se que a estrutura do toro em torno do disco de acresção seja composta de gás ionizado e de nuvens que se movimentam em altas velocidades nos seus limites externos. A presença destas nuvens é fundamental para entender as diferenças observacionais que existem entre os diversos AGNs e as larguras das linhas de emissão.

Estima-se que a dimensão da região do toro varie entre 10 a 100 pc. Por outro lado o disco de acresção deve ter no máximo uma fração de parsecs.

![](_page_30_Figure_1.jpeg)

Qual deve ser a distância mínima de um objeto para que possamos resolver o toro com os atuais limites máximos de resolução (~0,001")? E o disco de acresção? Esta é uma visão tridimensional do modelo de Elvis (2000, ApJ, 545,63) para explicar a taxonomia dos diferentes tipos de AGNs observados na natureza.

![](_page_31_Picture_1.jpeg)

![](_page_31_Picture_2.jpeg)

![](_page_31_Picture_3.jpeg)

![](_page_32_Figure_0.jpeg)

Em 1943 astrônomo 0 americano Karl Seyfert (1943, ApJ, 97,28) identificou pela primeira vez a classe de AGNs que se tornaria conhecida como as galáxias de Seyfert. O que chamou a atenção desde então foram a presença de linhas de emissão muito alargadas indicando campos de velocidade de até 8000 km/s na região central destes velocidades objetos. Estas indicavam a presença de um fenômeno extremamente energético, bem distinto até das estrelas mais mesmo massivas. Desde esta data os observadores começaram a se preocupar com a identificação observacional objetiva dos AGNs atualmente que é realizada comparando-se as propriedades taxonômicas consideradas mais relevantes.

![](_page_32_Figure_2.jpeg)

#### **1**. Dimensões angulares muito reduzidas

Mesmo nos AGN's suficientemente próximos é possível observar que toda a luminosidade parece se originar em uma fonte aparentemente pontual cujo brilho pode ser superior ao da população estelar da galáxia como um todo!

Em NGC 1068, por exemplo, a resolução dos telescópios em solo equivale a cerca de 60 pc (1"). Mesmo a resolução do telescópio espacial não permite observar o disco de acresção. Somente com resolução das a observações rádio em VLBA talvez estejamos no limite de observar detalhes da região do toro central (Gallimore, 2004).

A distância de NGC 1068 é cerca de 12,25 Mpc. Qual é a escala linear das imagens ao lado?

![](_page_33_Figure_4.jpeg)

#### 2. Luminosidades Elevadas

A luminosidade típica dos AGNs varia na faixa  $10^{42} - 10^{48}$  erg/s. Considerando-se que para uma galáxia típica L\* ~10<sup>44</sup> erg/s podemos perceber que existem casos em que o AGN pode ser várias ordens de magnitude mais brilhantes que uma galáxia típica. 3C273, por exemplo, tem uma magnitude aparente da ordem de 12,8, z~0,158 e dada a sua distância (d~650 Mpc) obtém-se que M<sub>ABS</sub>~-26,7 ou cerca de 100 vezes maior que a

da Via Láctea! O brilho de 3C273 é tão elevado que mesmo nas imagens diretas de HST não se percebe claramente а galáxia hospedeira. Somente ao retirar a contribuição do AGN é possível detectar а nebulosidade associada à galáxia (Martel et al, 2003).

![](_page_34_Figure_3.jpeg)

Estime a taxa de acresção para que 3C273 opere no limite de Eddington. Estime a dimensão da galáxia hospedeira.

#### **3.** Distribuição Espectral de Energia

A distribuição espectral de energia dos AGNs é muito diversa tanto das estrelas como das galáxias normais. A figura abaixo mostra uma distribuição espectral de energia (SED) da galáxia M101. Observe a queda acentuada da emissão na região de baixas frequências indicando que estamos vendo uma composição de vários corpos negros devidos às estrelas. Trata-se de um espectro de natureza térmica gerado nas atmosferas estelares.

![](_page_35_Figure_2.jpeg)

Compare agora com a SED do quasar 3C 273 onde percebe-se claramente uma elevação sistemática na forma de uma lei de potência mesmo na região de baixas frequências. Este tipo de espectro foi denominado como não-térmico já que não podia ser facilmente interpretado como uma superposição de vários corpos negros. A origem da emissão radio associada com os AGNs está ligada à emissão sincrotron de elétrons relativísticos espiralando em um campo magnético.

![](_page_36_Figure_1.jpeg)

![](_page_37_Figure_0.jpeg)

Recentemente <u>Prieto et al (2010</u>) apresentaram uma compilação da SED de alguns AGNs mais bem observados. Nesta figura as SEDs já foram corrigidas pela contaminação devido à galáxia hospedeira.

No domínio óptico-IR acredita-se que a radiação ocorra no próprio disco de acresção. À medida que o material é capturado a sua energia potencial (U) vai se modificando e parte dela é convertida em energia cinética (K). O campo gravitacional comprime e aquece o gás e este aquecimento provoca a emissão de fótons. Como o material do disco deve perder momentum angular a concepção é que ocorra uma evolução gradual próxima do estado de virialização. Em um sistema que evolui gradualmente em equilíbrio do Virial temos que 2K+U=0 e ao mesmo tempo K+U=E. Suponhamos que em um dado instante o material em uma determinada camada tenha uma energia  $E_1=K_1+U_1=U_1/2$ . Ao cair para a posição um pouco mais interna a sua energia passa a ser  $E_2=K_2+U_2=U_2/2$ . Portanto houve neste processo uma variação da energia mecânica  $\Delta E=(U_2-U_1)/2= \Delta U/2$  e como a energia total deve ser conservar conclui-se que uma quantidade equivalente à metade da variação da energia potencial deve ser emitida pelo disco de acresção.

![](_page_38_Figure_1.jpeg)

A SED (Distribuição Espectral de Energia) do disco de acresção pode ser obtida integrando-se a emissão de cada camada do disco. A luminosidade, L, de uma dada camada equivale à taxa de produção de energia obtida através da compressão do material pelo campo gravitacional

#### $\Delta W/\Delta t = GM/R^2 \Delta R dM/dt$

onde dM/dt representa a taxa de captura na direção da região interna. A luminosidade local emitida equivale portanto à metade desta variação dividida pela área da camada

 $L = 1/2 GM/R^2 \Delta R dM/dt 1/(\pi R\Delta R) = k/R^3$ 

Supondo que a emissão obedeça localmente a um espectro de corpo negro (L=cte T<sup>4</sup>) a temperatura local do disco será T=kR<sup>-3/4</sup>. Na emissão de corpo negro a maioria dos fótons é emitida próxima ao pico da distribuição no comprimento de onda  $\lambda_{max}$ =aT<sup>-1</sup>. O resultado é que a região responsável pela emissão deve estar a uma distância radial R=k $\lambda^{4/3}$  indicando que os fótons de maior energia proveem da região interna do disco.

É possível mostrar que se o perfil de temperatura seguir uma lei de potência, T=kR<sup>p</sup>, então o espectro resultante será

$$F_{\lambda} = k \lambda^{-3+2/p}$$

Indicando que o espectro resultante será também uma lei de potência. Acredita-se que o espectro óptico-IR em lei de potência observado nos AGNs seja o resultado deste processo que ocorre no disco de acresção.

#### 4. Fortes Linhas de Emissão

À exceção dos Blazares uma das características mais marcantes dos AGNs são as fortes linhas de emissão alargadas que não estão presentes nas galáxias normais.

![](_page_40_Figure_2.jpeg)

O gás aquecido e rarefeito emite tanto linhas permitidas como linhas proibidas. As linhas proibidas são decorrentes de transições atômicas não permitidas pelas regras de seleção da mecânica quântica. Apesar do nome sempre existe uma pequena probabilidade destas transições ocorrerem e por isto são também denominadas transições de estados meta estáveis. Normalmente as linhas permitidas ocorrem através de transições cuja meia vida é da ordem de alguns micro segundos. Em contrapartida as linhas proibidas ocorrem em transições com meia vida da ordem de milissegundos muito mais longas portanto. As linhas proibidas são normalmente observadas quando a densidade do gás é muito baixa já que em densidades mais elevadas ( >10<sup>9</sup> cm<sup>-3</sup> ) as transições ocorrem com muito maior probabilidade através das linhas permitidas que de-excitam rapidamente os elétrons presentes nos níveis mais energéticos . A nomenclatura usual consiste em indicar as linhas proibidas entre colchetes e as mais comumente observadas em AGNs são:

[OI] 6300 Å, [OII]3726 Å, [OII]3729 Å , [OIII]5007Å, [OIII]4959Å, [OIII]4363Å [NeV] 3426 Å, [SII]6716 Å, [SII]6731 Å , [NII]6583Å, [NII]6548Å

> Porque é necessário supor que as temperaturas na região emissora são elevadas a partir da identificação de linhas de alta ionização? Você acha que linhas de elementos com graus de ionização muito distintos podem ser emitidos em uma mesma região?

Várias das linhas de emissão dos AGNs, como NGC 4151 na figura abaixo, são de átomos fortemente ionizados, tanto nas linhas permitidas como proibidas, indicando a existência de condições extremas de temperatura e densidade eletrônica.

![](_page_42_Figure_1.jpeg)

#### 5. Variabilidade

Em vários AGNs observa-se a de forte presença uma variabilidade conforme ilustrado nos objetos ao lado. Observe que escala temporal dessa а variabilidade vai desde semanas Esta variabilidade até anos. indica que as regiões emissoras devem ter dimensões intrínsecas da ordem de L~ct, para que a informação física possa ser transmitidas coerentemente. Como

![](_page_43_Figure_2.jpeg)

![](_page_43_Picture_3.jpeg)

#### L~0,3 pc (t/1 ano)

resulta que as flutuações de curto período devem muito provavelmente ocorrer nas imediações do disco de acresção destes objetos.

Flutuações na região do toro devem induzir variabilidades em qual escala de tempo?

![](_page_43_Picture_7.jpeg)

![](_page_43_Figure_8.jpeg)

Em alguns casos extremos como o do quasar PKS 2155-304 (Pian, <u>1997, ApJ, 486, 784</u>) é possível perceber variações em escalas de dias. A origem desta variabilidade ainda é motivo de controvérsia (<u>Gaskell, 2008</u>). Possivelmente parte destas variações possa se originar na região do disco de acresção responsável pela emissão do pico UV, Big Blue Bump, ocorrendo posteriormente um reprocessamento dos fótons para outras regiões espectrais.

![](_page_44_Figure_1.jpeg)

#### 6. Polarização

relas emite <sup>zija</sup> A maioria das estrelas emite luz não Normalmente a luz polarizada destes objetos (~0,5 %) se deve à interação com os grãos do meio interestelar.

AGNs

No dos caso a polarização é mais frequente se situando na faixa ~0,5 -2 %. Mas alguns destes objetos apresentam forte polarização ~10% galáxia como а ultraluminosa IRAS 11058-1131 (Young et al. 1993, 260. MNRAS. L1) Curiosamente o espectro da luz polarizada é do tipo 1 enquanto o objeto é de tipo 2.

![](_page_45_Figure_3.jpeg)

A luz não polarizada se origina no toro rico em poeira. Mas o objeto emite uma vasta quantidade de fótons na direção ortogonal à nossa linha de visada. Portanto, o espectro na luz polarizada nos mostra o que está ocorrendo nesta outra direção e reforça a teoria do disco + toro.

![](_page_45_Picture_5.jpeg)

#### 7. Emissão Rádio

Outra característica importante dos AGNs é a sua forte emissão rádio. Um exemplo é a rádio fonte Cygnus A onde os lobos da emissão radio estão bem distantes da fonte central (Perley, 1984).

![](_page_46_Picture_2.jpeg)

![](_page_46_Figure_3.jpeg)

A interpretação deste fato é que a emissão rádio se deve a um fluxo de elétrons relativísticos espiralando no campo magnético da galáxia hospedeira. Por este motivo a extensão dos lobos radio pode ser gigantesca comparada com as dimensões da galáxia hospedeira.

Cygnus A está a 234 Mpc. Estime a distância média dos dois lobos ao objeto central e também as suas dimensões.

Usando o paradigma do modelo unificado explique a origem destas velocidades tão elevadas.

# 6.4 Galáxias de Seyfert

As galáxias de Seyfert são AGNs de baixa luminosidade com magnitudes absolutas  $M_B$ >-21,5. Apresentam um núcleo semelhante aos quasares mas a galáxia hospedeira é claramente visível. Estes objetos são identificados espectroscopicamente pela presença de linhas de emissão de alta ionização em seu núcleo. A maioria são de galáxias espirais. Existem dois tipos desta classe.

![](_page_47_Figure_3.jpeg)

This angle sees the BLR

As do tipo 1 apresentam dois conjuntos de linhas de emissão superpostas. Um destes conjuntos é caracterizado por um gás ionizado de baixas densidades eletrônicas  $(n_e \sim 10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3})$  e com dispersão de velocidades da ordem de algumas centenas de Km/s. Esta região produz as chamadas linhas estreitas. Um segundo conjunto, somente de linhas permitidas, apresentam larguras de até 10<sup>4</sup> km/s. A ausência de linhas proibidas com este alargamento indica que a região emissora deve ter densidade eletrônica superior a cerca de 10<sup>9</sup> cm<sup>-3</sup>.

Nas galáxias de Seyfert do tipo 2 somente as linhas estreitas estão presentes.

Uma classe independente de objetos são os LINERs (Low Ionization Nuclear Emission-Line Regions) se assemelham às Seyfert 2 mas com a diferença de que as linhas de baixa ionização, como [OI]6300Å e [NII]6548,6583 Å, são relativamente mais intensas.

![](_page_48_Figure_0.jpeg)

![](_page_48_Figure_1.jpeg)

![](_page_49_Figure_0.jpeg)

A identificação espectroscópica das galáxias de Seyfert depende da adoção de critérios específicos sobre a intensidade relativa das linhas. Um exemplo destes critérios encontra-se na figura abaixo extraída de <u>Ho (2008)</u>.

Podemos verificar que as regiões HII apresentam um comportamento bastante distinto da intensidade das linhas de emissão relativamente às linhas permitidas do Hidrogênio. Nas galáxias de Seyfert, e também nos Liners, apesar de que a razão [OIII]/H $\beta$  seja semelhante às regiões HII mais excitadas, podemos perceber que as razões [NII]/H $\alpha$ , [SII]/H $\alpha$  e [OI]/H $\alpha$  apresentam valores sistematicamente mais elevadas. Existe no entanto uma zona de transição em que a distinção se torna menos evidente.

![](_page_50_Figure_2.jpeg)

### 6.5 Quasares

Os quasares formam a classe de AGNs mais luminosos do Universo local,  $M_B$  <-21,5, e se distinguem das galáxias de Seyfert pelo fato de não serem resolvidos espacialmente. As imagens destes objetos se parecem com objetos estelares quando vistos no levantamento de Palomar. No entanto, as observações mais recentes mostraram que vários destes objetos são de fatos circundados por uma imagem difusa associada a uma galáxia hospedeira. Esta descoberta indica que o fenômeno que chamamos de quasar deve estar associado a uma fase na evolução das galáxias.

![](_page_51_Figure_2.jpeg)

Quasar com galáxia hospedeira em interação

Sistema triplo de quasares Djorgovski et al 2007

![](_page_51_Picture_5.jpeg)

Porque é tão surpreendente a descoberta de um sistema triplo de quasares?

![](_page_51_Picture_7.jpeg)

Um exemplo clássico de quasar é o objeto 3C273 que tem a aparência de uma estrela brilhante (m~12,86) e no entanto trata-se de um AGN situado em uma galáxia distante com z=0,158 (d~650 Mpc). Este é o quasar mais próximo da nossa Galáxia e por isso um dos mais bem estudados.

![](_page_52_Figure_1.jpeg)

Observed wavelength [ Å ]

![](_page_53_Figure_0.jpeg)

![](_page_54_Figure_0.jpeg)

![](_page_55_Figure_0.jpeg)

# 6.6 Radiogaláxias

As primeiras radiogaláxias foram descobertas através de levantamentos como o Third Cambridge Catalog of Radio Source (3C). A identificação da contrapartida óptica destas radiofontes apontou para a existência dos Quasi Stellar Radiosources (QSR), que eram objetos não resolvidos associados aos quasares. A categoria dos objetos resolvidos recebeu o nome de radiogaláxias. Atualmente esta distinção deixou de ser tão relevante

resolução dada а fotométrica das galáxias hospedeiras associadas aos quasares. Gradualmente percebeuse que as radiogaláxias são de fato AGNs cuja óptica contrapartida apresenta uma BLR e/ou NLR cujas e luminosidades óptica e rádio estão correlacionadas (McCarthy, 1993).

![](_page_56_Figure_3.jpeg)

As radio galáxias são normalmente associadas a jatos em galáxias elípticas, e apresentam uma forte emissão rádio. A energia associada à emissão seria gerada por um buraco negro supermassivo que provoca o surgimento de jatos de partículas relativísticas ejetadas a grandes distâncias do objeto central.

A distância de NGC 5532 é da ordem de 110 Mpc. Estime a dimensão dos lobos e a sua distância ao objeto central.

![](_page_57_Picture_2.jpeg)

![](_page_57_Figure_3.jpeg)

Um exemplo de radio galáxia é a fonte 3C 296 associada à galáxia elíptica NGC 5532 vista ao lado (Laing, 2006). As partículas de altas energias são mantidas confinadas em um jato fortemente colimado que emerge da região central da galáxia. A velocidade do jato é comparável à da luz e a plumas se estendem a distâncias da ordem de 150 kpc.

Outro exemplo de radio galáxia pode visto ser em Centaurus A (NGC 5128). Na figura ao lado vemos uma superposição da imagem radio do VLA em uma imagem óptica do objeto. Observe a estensão da emissão rádio e a colimação do jato na região central( Burns et al, 1983).

A distância de NGC 5532 é da ordem de 110 Mpc. Estime a dimensão dos lobos e a sua distância ao objeto central.

![](_page_58_Picture_2.jpeg)

Esta imagem de alta resolução do HST mostra uma tentativa de resolver a região central onde se localiza o buraco negro central.

![](_page_59_Picture_1.jpeg)

Nesta imagem obtida com o satélite Chandra vemos а emissão em raio x associada ao jato de Centaurus Α (azul) à superposta imagem em radio do VLA (vermellho). Α maior parte da emissão Χ ocorre fora da região colimada quando o jato colide com partículas do gás interestelar do objeto.

![](_page_60_Picture_1.jpeg)

## 6.7 Blazares

Os Blazares são AGNs que mostram uma forte variabilidade no contínuo, com forte variação de fluxo e alta polarização. Um protótipo desta classe de AGNs é o objeto Bl Lac visto ao lado. Durante algum tempo este objeto foi confundido com uma estrela devido ao fato do seu espectro não conter linhas de emissão típicas dos AGNs (<u>McLeod, 1971</u>). Posteriormente (<u>Miller, 1978</u>) descobriu-se tratar de um quaşar em z=0,07.

![](_page_61_Figure_2.jpeg)

variabilidade Α óptica desta classe de objeto é forte bastante pode como se perceber pela figura ao lado tanto em escalas de de anos como alguns dias.

![](_page_62_Figure_1.jpeg)

Nestas imagens de BL Lac obtidas por VLBA perceber podemos como a forma do jato escalas varia de em alguns anos.

![](_page_63_Figure_1.jpeg)

0

2200 + 420

10

ŝ

Relative Decl. [mas] 0

![](_page_63_Figure_2.jpeg)

## 6.8 Problemas

1. Mostre que a região onde o efeito de um SMBH domina a curva de rotação satisfaz á condição  $M_{BH}=2M_*(r)$ . Estime o raio desta região no caso da Galáxia sabendo que a densidade de estrelas nesta região é cerca de  $10^6 M_{\odot}/pc^3$ . O que impede que estas estrelas ainda não tenham sido capturadas selo SMBH?

2. A qual distância uma estrela como o Sol deve se aproximar do SMBH galáctico antes que a sua estrutura seja rompida pelas forças de maré? Repita esta estimativa para analisar a sobrevivência de um sistema planetário como o nosso.

3. O gráfico apresentado no slide seguinte mostra a curva de dispersão de velocidade central da galáxia NGC 3115 ao longo do semieixo maior. A partir deste gráfico estime o gradiente d $\sigma$ /dr e o gradiente logarítmico d ln  $\sigma$ /d ln r. Estime a massa do SMBH de NGC 3115 a partir destes dados. Na sua opinião quais seriam as principais limitações e aproximações envolvidas nesta estimativa?

4. Em qual situação orbital as estimativas de massa dos SMBH seriam maiores: (1) nas órbitas radiais; (2) ou nas órbitas tangenciais?

5. Estime o raio de influência do SMBH no centro da nossa Galáxia.

![](_page_65_Figure_0.jpeg)

6. A velocidade interna de dispersão em um aglomerado globular como ω-centauri é da ordem de 17 km/s. Qual seria a massa de um possível BH deste sistema se for obedecida a mesma relação observada nas galáxias?

7. Mostre que se a taxa de captura de massa por parte de um SMBH de massa M é dM=k Mdt então

 $M_{BH}=2M_0 \exp(t/t_E)$ 

8. Um dos quasares mais luminosos do Universo é a radiofonte 3C454.3 com uma magnitude absoluta  $M_B$ =-31,4. Supondo que ele opere na luminosidade de Eddington qual seria a taxa de acresção necessária?

9. O que você acha que poderia ocorrer com a atmosfera da Terra se o SMBH da Via Láctea se tornasse um quasar com o cone de luz apontado para o sistema solar?

![](_page_66_Picture_5.jpeg)