

FIS02013 - Lista de questões sobre AGNs
Prof. Basílio X. Santiago

Parte I - PS, pag. 175 a 185

1) Defina em linhas gerais o que são os AGNs.

R: AGN é uma sigla que corresponde a *Active Galactic Nuclei*, ou seja, *Núcleos Ativos de Galáxias*. Os AGNs são objetos que se caracterizam por emitir grande quantidade de radiação em amplo domínio espectral, das altas energias às ondas de radio. Grande parte dessa radiação é não-térmica, ou seja, não é o resultado da conversão de energia interna do sistema em radiação EM. Os espectros ópticos dos AGNs possuem um contínuo de radiação na forma de lei de potência (ou seja, distinto de uma Planckiana). Linhas de emissão intensas e largas são também observadas nos espectros ópticos da grande maioria dos AGNs.

2) Responda as seguintes questões sobre as propriedades de quasares:

2.1) Qual sua aparência numa imagem óptica?

R: Quasares, como a sigla já deixa claro, têm aparência de fontes pontuais (ou quase) em imagens ópticas.

2.2) Em que domínio do espectro EM eles emitem radiação ?

R: Como todos os AGNs, a radiação emitida por quasares não está restrita à faixa óptica e infra-vermelha. Eles também são luminosos em radio (o que também fica claro pelo nome), bem como no UV e em raios X.

2.3) Quais as principais características de seus espectros no óptico e UV?

R: A presença de radiação contínua não térmica e a existência de linhas de emissão intensas e largas.

2.4) Como é a dependência da variabilidade no seu fluxo com o comprimento de onda?

R: O fluxo de quasares varia com maior amplitude e em escalas de tempo menores (ou seja, mais rápido) para comprimentos de onda menores.

3) Descreva a aparência típica de quasares em imagens radio, seguindo o roteiro:

3.1) Quais são os principais componentes estruturais de uma fonte de radio estendida quando imageada em alta resolução ?

R: Em geral, as radio-fontes espacialmente resolvidas têm uma fonte compacta no centro e dois lóbulos de radiação, os quais comumente estão ligados à região central por meio de jatos.

3.2) Quais os 2 principais tipos de fontes extensas em radio e como se diferenciam?

R: A classificação Fanaroff-Riley inclui duas classes principais. As fontes FR I têm um perfil de intensidade radio declinante, ou seja, são mais brilhantes no caroço central. Tendem a ser menos luminosos ($L_{radio} < 10^{32} \text{ ergs s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$). Já a classe FR II tem radio-fontes tipicamente mais luminosas e mais brilhantes nos lóbulos do que na região central. A presença de jatos é mais comum nas FR II.

3.3) Qual a forma espectral típica dos diferentes componentes de uma fonte radio estendida?

R: A emissão em radio é dominada por radiação contínua, na forma de uma lei de potência, com fluxo

$$S(\nu) \propto \nu^{-\alpha}$$

As regiões centrais compactas têm espectros menos inclinados, com $\alpha \simeq 0$, enquanto que $\alpha \simeq 0.7$ ocorre tipicamente nos jatos e lóbulos. Em ambos os casos, o grau de polarização dessa radiação é alto. Essas características permitem diagnosticar que trata-se de radiação síncrotron, emitida por partículas carregadas aceleradas por campos magnéticos.

4) Deduza a velocidade dos elétrons acelerados por um campo magnético de intensidade $B = 10^{-3}$ gauss e que emitem o pico de sua radiação síncrotron no comprimento de onda $\lambda = 6$ cm.

R: Pela expressão 5.3, temos uma relação entre a frequência característica da radiação síncrotron (ν_c), o fator de Lorentz dos elétrons (γ) e o campo magnético (B).

$$\nu_c = 4.2 \cdot 10^6 \gamma^2 \frac{B}{1G} \text{ Hz}$$

$$\gamma^2 = \frac{c}{\lambda} \frac{1}{4.2 \cdot 10^6} \frac{1}{B(G)}$$

Usando os valores dados, temos então

$$\gamma^2 = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{0.06 \text{ m}} \frac{1}{4.2 \times 10^6} \frac{1}{10^{-3}}$$

$$\gamma^2 = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{0.06 \text{ m}} \frac{1}{4.2 \times 10^6} \frac{1}{10^{-3}} = 5 \times 10^9 \cdot 2.4 \times 10^{-7} \cdot 10^3 = 1.2 \times 10^6$$

$$\gamma = 1.1 \times 10^3$$

Ou seja, temos que $v \simeq c$.

5) Prove que se a distribuição de elétrons em função da sua energia é uma lei de potência do tipo

$$N(E)dE \propto E^{-s}dE$$

então o espectro de radiação síncroton por eles emitido será também uma lei de potência

$$S(\nu) \propto \nu^{-\alpha}$$

com $\alpha = (s - 1)/2$.

R: Assumindo uma relação de unicidade entre a energia E do elétron e a frequência ν da radiação síncroton por ele emitida, tal como atestado pela expressão 5.3, temos a identidade

$$N(E)dE = E^{-s}dE = N(\nu)d\nu \propto \nu^{-s/2}\nu^{-1/2}d\nu$$

O seja, o **número** de fótons emitidos num intervalo de frequência $[\nu, \nu + d\nu]$ é igual ao **número** de elétrons cuja energia está no intervalo $[E, E + dE]$, sendo a relação entre E e ν a já mencionada 5.3 do livro PS.

Mas o espectro $S(\nu)$ diz respeito não ao **número** de fótons, mas à **energia** (fluxo) por eles carregada. Então temos que multiplicar $N(\nu)d\nu$ pela energia do fóton correspondente a esta frequência, $E_{\text{foton}} = h\nu$.

$$S(\nu)d\nu \propto \nu N(\nu)d\nu \propto \nu \nu^{-s/2} \nu^{-1/2} d\nu$$

$$S(\nu)d\nu \propto \nu^{-(s-1)/2} d\nu$$

6) Sobre os diferentes tipos de AGN responda:

6.1) Qual a proporção entre QSOs com fraca emissão em radio e aqueles com forte emissão no mesmo domínio espectral?

R: Há em torno de 10 QSOs com pouca emissão radio (*radio-quiet*) para cada QSO brilhante em radio (*radio-loud*).

6.2) Qual a diferença básica entre galáxias Seyfert 1 e 2?

R: As Seyfert 1 têm linhas permitidas largas (alargamento Doppler da ordem de 10000 km/s) em seus espectros ópticos, enquanto que as Seyfert 2 têm tanto linhas permitidas quanto proibidas comparativamente estreitas (velocidades Doppler da ordem de 400km/s)

6.3) Qual a diferença básica entre QSOs e galáxias Seyfert 1?

R: A luminosidade total é maior nos QSOs. Além disso, as Seyfert (tanto 1 quanto 2) são galáxias espirais que hospedam AGNs, enquanto que os QSOs, em geral tendo redshifts mais altos, têm aparência pontual, sendo mais difícil distinguir suas galáxias hospedeiras. Ou seja, podemos interpretar as Seyfert 1 como AGNs mais próximos e de menor luminosidade do que suas contrapartidas típicas de redshift mais alto, os QSOs.

6.4) Qual a diferença básica entre uma radio-galáxia e uma Seyfert?

R: A diferença básica é a galáxia hospedeira, que é uma espiral no caso das Seyfert e uma *early-type* no caso das rádio-galáxias.

6.5) O que são os blazares e como se subdividem?

R: Os blazares são objetos que têm um espectro óptico dominado por um contínuo não térmico na forma de lei de potência, assim como os demais AGNs. A diferença está no fato de que as flutuações de brilho são mais intensas nos blazares. Além disso, num dos subtipos de blazares, os BL Lac, não há linhas de emissão no espectro óptico. Já nos objetos *violentamente variáveis no óptico* (OVVs), há linhas típicas de AGNs, além de forte polarização da luz.

Parte II - PS, pag. 185 a 195

7) Reproduza com suas próprias palavras os principais argumentos em favor de que a intensa radiação de um AGN seja resultante de acreção de matéria em direção a um buraco negro supermassivo.

8) Com relação ao processo de acreção de matéria a um buraco negro supermassivo responsável pelo perfil de temperatura dado pela expressão 5.14, responda:

8.1) Qual a geometria esperada para o material em processo de queda ao BN central?

R: Dadas as altas velocidades relativas e considerando-se que o material está caindo em direção ao BN central, por conservação de momentum angular esperamos que o material forme um disco em rotação diferencial.

8.2) Qual a cinemática interna do material?

R: O disco de acreção rotaciona, com velocidade decrescente com a distância ao buraco negro.

8.3) De onde vem originalmente a energia irradiada pelo material em acreção ?

R: A energia irradiada pelo disco de acreção é de origem térmica e resulta da contração gravitacional do material do disco. Ou seja, energia potencial gravitacional é convertida em energia térmica, parte da qual é convertida em radiação EM.

8.4) Quais as hipóteses adotadas para as propriedades geométricas, ópticas e radiativas que levam à dedução da expressão 5.14?

R: O disco de acreção é geométricamente fino, opticamente espesso e cada anel de distância r do buraco negro irradia como um corpo negro a uma dada temperatura cuja dependência com r é então expressa pela citada equação .

9) Deduza a expressão 5.18 a partir da expressão 5.17. Feito isso, deduza a expressão 5.19 substituindo a 5.18 na 5.17.

R: A velocidade aparente dada pela expressão 5.17 será máxima quando a derivada da expressão com relação a ϕ for nula.

$$\frac{dv_{app}}{d\phi} = \frac{d}{d\phi} \left(\frac{v \sin\phi}{1 - \beta \cos\phi} \right)$$

$$\frac{dv_{app}}{d\phi} = \frac{v \cos\phi}{1 - \beta \cos\phi} - \frac{v \sin\phi \beta \sin\phi}{(1 - \beta \cos\phi)^2}$$

$$\frac{dv_{app}}{d\phi} = \frac{v \cos\phi - v \beta \cos^2\phi - v \beta \sin^2\phi}{(1 - \beta \cos\phi)^2}$$

Igualando a zero e notando que o denominador nunca pode ser ∞ , temos que

$$v \cos\phi - v \beta = 0$$

$$\cos\phi = \beta$$

$$1 - \sin^2\phi = \beta^2$$

$$\sin^2\phi = 1 - \beta^2 \rightarrow \sin\phi = \frac{1}{\gamma}$$

Substituindo este valor de $\sin\phi$ na expressão 5.17, temos então

$$v_{app} = \frac{v\sin\phi}{1 - \beta\cos\phi}$$

$$v_{app} = \frac{v}{\gamma(1 - \beta^2)}$$

$$v_{app} = \frac{v}{\gamma(1 - \beta^2)} = v\gamma$$

10) Prove também que a condição $v_{app} > c$ leva de fato à condição

$$\beta > \frac{1}{\sin\phi + \cos\phi} \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$$

R: Aplicando a condição $v_{app} > c$ à exp. 5.17, temos que

$$v_{app} = \frac{v\sin\phi}{1 - \beta\cos\phi} > c$$

$$v\sin\phi > c - v\cos\phi$$

$$v(\sin\phi + \cos\phi) > c \rightarrow \beta > \frac{1}{\sin\phi + \cos\phi}$$

Estudando o comportamento da função $f(\phi) = \sin\phi + \cos\phi$, temos que

$$\frac{df}{d\phi} = \cos\phi - \sin\phi$$

Logo

$$\frac{df}{d\phi} = 0 \rightarrow \cos\phi = \sin\phi \rightarrow \phi = 45^\circ$$

Onde acima consideramos apenas ângulos de 1o quadrante. Já a segunda derivada resulta em

$$\frac{d^2 f}{d\phi^2} = -\sin\phi - \cos\phi = -(\sin\phi + \cos\phi) < 0$$

Logo, deduzimos que $f(\phi)$ atinge máximo em $\phi = 45^\circ$, quando então $f(\phi) = \sqrt{2}$. Isso prova o valor mínimo que desejamos provar.

11) Seja um AGN cuja luminosidade bolométrica é $L = 3 \cdot 10^{13} L_\odot$. Qual a massa mínima do buraco negro central esperada para esse AGN? Caso essa massa seja medida de alguma forma e se revele menor do que o valor de Eddington, você teria alguma explicação para essa aparente discrepância? Qual?

R: Obtemos a massa mínima para o BN pela expressão 5.24 do PS.

$$M_{BN} \geq 8 \cdot 10^7 \frac{L(\text{ergs/s})}{10^{46}} M_\odot$$

$$M_{BN} \geq 8 \cdot 10^7 \frac{3 \cdot 10^{13} \cdot 4 \cdot 10^{33}}{10^{46}} M_\odot$$

$$M_{BN} \geq 12 \times 8 \cdot 10^7 M_\odot$$

$$M_{BN} \geq 9.6 \cdot 10^8 M_\odot$$

Caso descubra-se, por determinações diretas, que esse limite inferior para M_{BN} é violado, a explicação pode estar na violação da premissa de que o AGN irradia isotropicamente. Essa premissa foi adotada na dedução da expressão 5.24.

12) Na dedução do limite de Eddington, justifique com suas palavras o motivo de a força centrífuga causada pelo espalhamento Thomson da radiação do material em torno do BN central sobre um *elétron* ser contrabalançada pela força gravitacional do BN sobre um *próton*.

R: Note que os prótons e elétrons formam um plasma acoplado no disco de acreção. Ou seja, se os elétrons são empurrados pela radiação proveniente

do entorno do BN, os prótons os acompanharão , via forças Coulombianas. Analogamente, se os prótons são atraídos pela gravidade do BN, os elétrons também o serão .

13) Suponha que a eficiência de conversão de energia em radiação num disco de acreção seja $\epsilon = 10\%$. Responda:

13.1) Qual a taxa máxima de acreção de matéria esperada para um buraco negro central de massa $M_{BN} = 10^8 M_{\odot}$?

R: A taxa máxima é dada pelo limite de Eddington. Usando a eq. 5.27, temos

$$\frac{dm_{edd}}{dt} \simeq \frac{2 \cdot 10^{-9}}{\epsilon} M_{BN}/ano$$

Substituindo $\epsilon = 0.1$ e $M_{BN} = 10^8 M_{\odot}$, temos

$$\frac{dm_{edd}}{dt} = \frac{2 \cdot 10^{-9}}{0.1} 10^8 M_{\odot}/ano$$

$$\frac{dm_{edd}}{dt} = 2 M_{\odot}/ano$$

13.2) Se a taxa de acreção de matéria a um BN central é de $dm/dt = 8 \cdot 10^{30}$ kg/ano, qual a massa mínima esperada para este BN central?

R:

$$\frac{dm}{dt} = 8 \cdot 10^{30} kg/ano = 4M_{\odot}/ano$$

Essa taxa é o dobro da determinada no item anterior. Neste caso, o BN tem que ser pelo menos duas vezes mais massivo do que o do item anterior, de forma a que a taxa de acreção de massa esteja no limite máximo. Logo

$$M_{BN} = 2 \cdot 10^8 M_{\odot}$$

14) Seja um BN com massa $M = 7 \cdot 10^7 M_{\odot}$. Determine:

14.1) A luminosidade emitida pelo material sendo acretado ao BN, assumindo-se que a taxa de acreção de matéria seja 20% do limite de Eddington.

R: Sabemos que a razão entre as taxas de acreção de massa é igual à razão entre as luminosidades:

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{edd}} = \frac{L}{L_{edd}}$$

Logo, se o lado esquerdo acima é 0.2, temos que

$$L = 0.2L_{edd}$$

Usando a expressão 5.23 para a luminosidade limite, temos:

$$L = 0.2 \cdot 1.3 \cdot 10^{38} M_{BN}(M_{\odot}) = 0.2 \cdot 1.3 \cdot 7 \cdot 10^{45} \text{ ergs/s} = 1.8 \cdot 10^{45} \text{ ergs/s}$$

14.2) A eficiência de conversão de energia em radiação se o BN deverá dobrar sua massa em $3 \cdot 10^8$ anos.

R: Sabemos que $M_{BN}/\dot{m} = 3 \cdot 10^8$ anos. Usando a eq. 5.26, temos que

$$\epsilon = \frac{1.3 \cdot 10^{38}}{c^2} \frac{L}{L_{edd}} \frac{M(M_{\odot})}{\dot{m}}$$

$$\epsilon = \frac{1.3 \cdot 10^{38}}{9 \cdot 10^{20} \cdot 2 \cdot 10^{33}} \cdot 0.2 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 3.15 \cdot 10^7$$

$$\epsilon = \frac{1.3 \cdot 10^{38}}{9 \cdot 10^{20} \cdot 2 \cdot 10^{33}} \cdot 1.9 \cdot 10^{15}$$

$$\epsilon = \frac{2.5}{18} = 0.14$$

14.3) O valor da taxa de acreção \dot{m} em massas solares por ano.

$$M_{BN}/\dot{m} = 3 \cdot 10^8$$

$$\dot{m} = M_{BN}/3 \cdot 10^8 = 0.23M_{\odot}/ano$$

Parte III - PS, pag. 195 a 207

15) Deduza a expressão 5.29 a partir das expressões 5.14 e 5.27.

R: A expressão 5.29 é dada por

$$T(r) \propto \left(\frac{\dot{m}}{m_{\text{edd}}} \right)^{1/4} \left(\frac{M_{BN}}{10^8 M_{\odot}} \right)^{-1/4} \left(\frac{r}{r_S} \right)^{-3/4}$$

Já a expressão 5.27 nos dá uma relação de proporcionalidade entre a massa do buraco negro central, M_{BN} , e o limite de acreção de Eddington, m_{edd}

$$M_{BN} \propto m_{\text{edd}}$$

Pela expressão 5.14 temos

$$T(r) \propto \dot{m}^{1/4} M_{BN}^{-1/2} \left(\frac{r}{r_S} \right)^{-3/4}$$

Usamos então a relação 5.27

$$M_{BN}^{-1/2} = M_{BN}^{-1/4} M_{BN}^{-1/4} \propto M_{BN}^{-1/4} m_{\text{edd}}^{-1/4}$$

Inserindo em 5.14 temos então

$$T(r) \propto \dot{m}^{1/4} M_{BN}^{-1/4} m_{\text{edd}}^{-1/4} \left(\frac{r}{r_S} \right)^{-3/4}$$

$$T(r) \propto \left(\frac{\dot{m}^{1/4}}{m_{\text{edd}}^{1/4}} \right) M_{BN}^{-1/4} \left(\frac{r}{r_S} \right)^{-3/4}$$

$$T(r) \propto \left(\frac{\dot{m}}{m_{\text{edd}}} \right)^{1/4} \left(\frac{M_{BN}}{10^8 M_{\odot}} \right)^{-1/4} \left(\frac{r}{r_S} \right)^{-3/4}$$

16) Explique o que são linhas de emissão permitidas, semi-proibidas e proibidas. Explique porque elas permitem estimar um domínio possível de valores de densidade do meio emissor.

R: linhas permitidas correspondem a transições entre níveis de energia internos de um átomo de dado elemento em dado estado de ionização que são observadas em laboratórios terrestres. Linhas proibidas correspondem a transições que não ocorrem nestes mesmos ambientes. Mas essas últimas são por vezes observadas em objetos astrofísicos, como nas BLRs e NLRs de AGNs. A explicação para isso está na densidade do meio onde as linhas se formam

e no tempo necessário para o decaimento entre os níveis de energia a elas correspondentes.

Linhas permitidas correspondem a transições que ocorrem muito rápido: o átomo retorna ao nível de energia mais baixo (emitindo um fóton) em algo como 10^{-8} s. Neste intervalo, mesmo em laboratórios terrestres, onde a densidade é mais alta, não há tempo de a de-excitação do átomo ocorrer através de uma colisão com outro átomo. Já as transições que formam as linhas proibidas, o decaimento natural (por emissão de fóton) é mais lento, da ordem de 1s. Em laboratórios terrestres o átomo sofrerá várias colisões nesse intervalo, de forma que seu decaimento será colisional, sem emissão de luz.

Em ambientes de baixa densidade, onde colisões são menos frequentes, o mecanismo de decaimento colisional é menos eficiente, de forma que mesmo transições mais estáveis (das linhas proibidas) podem ocorrer naturalmente.

As linhas semi-proibidas correspondem a transições atômicas em intervalos intermediários, as quais ocorrem naturalmente em ambientes de densidade igualmente intermediária.

17) Compare as regiões de linhas largas e estreitas no que tange à temperatura típica, à densidade eletrônica do gás emissor e ao fator de preenchimento.

R: A BLR e a NLR têm temperaturas típicas da ordem de $T \simeq 2 \cdot 10^4$ K, sendo a BLR um pouco mais quente. Mas diferença mais pronunciada é quanto a densidade. Nas BLRs, a densidade eletrônica atinge valores da ordem de $n_e \simeq 3 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$, enquanto que a densidade nas NLRs é da ordem de $n_e \simeq 10^3 \text{ cm}^{-3}$. O fator de preenchimento também é bem diferente: $\simeq 10^{-7}$ nas BLRs e $\simeq 10^{-2}$ nas NLRs.

18) Quais as propriedades espectrais de galáxias Seyfert 1 e 2 no domínio de raios-X?

R: No domínio de raios-X moles ($0.1 \text{ keV} < h\nu < 2.4 \text{ keV}$) há uma relativa predominância de galáxias Seyfert 1. As Seyfert 2 só são detectadas em grande número em energias maiores ($h\nu \simeq 10 \text{ keV}$). Como no domínio de raios-X moles ainda se espera uma extinção significativa causada pelos átomos de H, acredita-se que seja essa a causa da relativa ausência de Seyferts 2 nesse domínio espectral. Ou seja, a radiação X dessas últimas estaria fortemente absorvida, enquanto que a das Seyfert 1 não é tão extinta.

A parte disso, é importante frisar que AGNs emitem grande quantidade de raios X, cuja origem acredita-se que seja nas regiões internas do AGNs, bem

próximas da borda interna do disco de acreção e do BN central. O espectro em raios X é dominado por radiação contínua seguindo uma lei de potência aproximada por $S(\nu) \propto \nu^{-0.7}$, de origem não térmica, possivelmente associada a radiação síncrotron. Mas para energias menores, há um excesso com relação a esta curva, provavelmente causado pela emissão térmica das regiões mais quentes do disco de acreção .

19) Explique com suas palavras o que são mapas de reverberação e como podemos usá-los para determinar o tamanho das BLR. Por que não podemos fazer o mesmo para as NLR?

R: Sabemos que na BLR formam-se linhas de alto grau de ionização e de excitação . Elas são o resultado da radiação ionizante proveniente do centro do AGN. O banho de radiação está aproximadamente em equilíbrio com o processo de emissão das linhas. Então , uma variação no contínuo de radiação proveniente do centro do AGN deverá ser acompanhada por uma variação na intensidade das linhas. Quanto menor for a região responsável pela formação de uma linha larga, mais rápida será a sua adaptação à variabilidade do fluxo contínuo. Isso porque a menor escala de tempo para que essa adaptação ocorra é dada por $t = r/c$, onde r é o tamanho da região e t é o tempo necessário para a radiação ionizante atravessá-la.

Os mapas de reverberação procuram acompanhar a variabilidade tanto do contínuo em raios X e UV responsável pela formação das linhas largas, quanto a variabilidade das próprias linhas. O retardo entre a variação do primeiro e das segundas é uma medida do tamanho da região que as emite. Assim, com esses mapas, podemos saber onde são geradas as linhas observadas e qual a distribuição de temperatura e densidade no interior da BLR.

20) Discuta como podemos estimar a massa do buraco negro supermassivo central usando:

20.1) Mapas de reverberação

R: Sabendo-se a dimensão r da região responsável por uma linha da BLR (via mapas de reverberação), podemos juntar essa info com a dispersão de velocidades responsável pelo seu alargamento, σ . Assim podemos aplicar o teorema do virial

$$M_{BN} \simeq \frac{r\sigma^2}{G}$$

para estimar a massa do BN.

20.2) Relações de escala entre as propriedades do BN e as de sua galáxia hospedeira.

R: Em AGNs estudados com mapas de reverberação , observa-se que a extensão r da BLR aumenta com a luminosidade do AGN:

$$r \propto L^{0.6}$$

Calibrada essa relação de escala, podemos então estimar o tamanho da BLR a partir da luminosidade L . Novamente usando a dispersão de velocidades σ medida pela largura das linhas, podemos então aplicar novamente o teorema do virial.