

ATENÇÃO: esses resumos visam a **auxiliar** o estudo de cada capítulo, enfatizando os principais pontos levantados em cada trecho do livro *Extragalactic Astronomy and Cosmology: an Introduction*, de Peter Schneider. **De forma alguma** esses resumos podem **substituir** a leitura e estudo do livro, o qual é muito mais completo.

Capítulo 5 – Resumo

Galáxias ativas ↔ emissão de radiação não associada às estrelas, gás e poeira que comumente constituem as galáxias. Galáxias ditas normais, nas quais os processos radiativos mais importantes são a emissão térmica proveniente de atmosferas estelares e emissão no infra-vermelho pela poeira (esta última é dominante apenas em galáxias com intensa formação estelar). As galáxias ativas, por outro lado, emitem desde os raios X (ou mesmo gama) até ondas de rádio. Essa emissão é concentrada numa pequena região central da galáxia (o núcleo), de forma que podemos falar de núcleos ativos de galáxias ou galáxias com núcleo ativo, AGNs.

A figura 5.1 mostra espectros ópticos de diferentes tipos de AGNs, nos quais se destacam intensas linhas em emissão associadas a elementos químicos em alto grau de ionização e de excitação. Há também um contínuo de emissão que comumente cresce na direção de comprimentos de onda menores. Os espectros mostrados são típicos de QSOs, galáxias Seyfert I e galáxias Seyfert II.

AGNs são objetos luminosos, em geral suplantando em brilho o resto da galáxia que os hospedam. Os QSOs, em especial, figuram entre os objetos mais luminosos do Universo, às vezes emitindo centenas de vezes mais radiação EM do que uma galáxia como a nossa. Espectros de QSOs são mostrados em mais detalhe nas figuras 5.2 e 5.3. Uma outra característica de AGNs é a variabilidade. Ela tende a ser mais rápida e de mais alta intensidade em comprimentos de onda menores (como raios X e UV). Tanto o contínuo espectral quanto as linhas apresentam variabilidade.

A Seção 5.1 apresenta a história da descoberta dos AGNs. Os primeiros foram identificados como galáxias espirais com um núcleo muito brilhante em imagens ópticas. Os espectros nucleares desses objetos revelam linhas de emissão muito largas, sugerindo movimentos internos dos átomos emissores da ordem de 10^3 - 10^4 km/s. Essas galáxias com núcleo ativo são chamadas de Seyfert, em homenagem a quem primeiro as estudou de forma sistemática.

Posteriormente, fontes de rádio, as quais tinham aparência de estrelas em imagens ópticas, também revelaram espectros semelhantes às Seyfert, novamente dominados por fortes e alargadas linhas de emissão no óptico. A diferença é que os espectros ópticos dessas radiofontes tinham desvios para o vermelho grandes. Interpretando, à luz da Lei de Hubble, esses desvios como indicação de distâncias de centenas de Mpc, a luminosidade

inferida seria de centenas de vezes a luminosidade da Galáxia. A aparência estelar no óptico sugere então que toda essa radiação provém de um volume relativamente pequeno.

Essas fontes de rádio com aparência estelar no óptico, alto redshift, grande luminosidade e espectros de AGN são chamadas de *quasares*. O nome é uma abreviação de quasi-stellar radio source, bastante apropriado, portanto.

O espectro óptico de quasares, assim como de outros AGNs, além das mencionadas linhas de emissão, apresenta um contínuo que cresce na direção de menor comprimento de onda. Isso faz com que quasares tenham cores ópticas muito azuis, em que a maior parte da radiação contínua é emitida no ultra-violeta (UV). O contínuo, inclusive em outros domínios que não o óptico, é geralmente parametrizado por uma lei de potência, como na eq. 5.2.

A subseção 5.1.3 descreve as propriedades de quasares no rádio, onde eles são descobertos. De forma resumida, as imagens em rádio apresentam um objeto central compacto (não resolvido, ou seja, pontual, mesmo quando observado com a resolução do VLBI (ver subseção 1.3.1)) e lóbulos estendidos em direções a grosso modo simétricas com relação à emissão central (ver figuras 5.5 e 5.6). Os lóbulos não raro se conectam à fonte compacta por meio de jatos, que são estruturas finas. Quasares cuja intensidade em rádio cai do centro para fora em geral têm luminosidade menor do que aqueles cujos lóbulos são mais brilhantes do que o núcleo. Isso leva ao sistema de classificação Fanaroff-Riley.

Mas note que o brilho relativo do centro, jatos e lóbulos varia com o domínio de frequência de onda coberto pelas observações. Isso porque a inclinação do contínuo espectral varia. Em geral, a fonte central compacta dos quasares tem expoente $\alpha \sim 0$ (ver eq. 5.2), enquanto que os lóbulos têm um espectro dominado por frequências mais baixas, $\alpha \sim 0.7$. Observações em rádio em frequências mais altas, por exemplo, tendem a favorecer quasares dominados pela fonte compacta, do tipo FRI. E vice-versa.

A origem da emissão em rádio está associada à radiação síncrotron. Ela resulta da presença de um campo magnético num plasma, ou seja, num meio com partículas carregadas. As partículas sofrem força de Lorentz e espiralam em torno das linhas do campo magnético. Por estarem sendo aceleradas, elas emitem a dita radiação síncrotron.

A radiação se dá em um contínuo de frequências, cujo espectro é graficado, para vários valores de energia E de um elétron, na figura 5.7. A frequência de pico ou frequência característica é dada pela eq. 5.3. Note a dependência dessa frequência com a intensidade do campo B e com a velocidade da partícula, esta última embutida no chamado fator de Lorentz (γ , eq 5.4). Para emitirem síncrotron no domínio rádio, assumindo-se um campo magnético fraco ($B \sim 10^{-4}$ G), elétrons precisam ser fortemente relativísticos, ou seja, ter

velocidade muito próxima a c .

O espectro de potência observado em rádio resulta, conforme mostrado na figura 5.7, da sobreposição de elétrons com diferentes energias. Se a distribuição de energia dos elétrons é uma lei de potências, a radiação síncrotron composta resultante também o será.

Porém, há absorção da radiação síncrotron pelos próprios elétrons, principalmente para as frequências de onda mais baixas. Isso altera a forma do espectro de radiação observado, ou seja, que efetivamente emerge do AGN. Como vimos, a região central de um quasar tem índice $\alpha \sim 0$, enquanto que os componentes estendidos em geral têm valores maiores. Isso sugere que a absorção é mais eficiente na fonte rádio central, ou seja, a profundidade óptica é maior do que nos lóbulos.

Levando-se em conta a potência total irradiada por uma partícula, dado o espectro de emissão síncrotron, e a energia do elétron, pode-se estimar o tempo durante o qual ele pode irradiar. Em geral, esse intervalo é bem menor do que o necessário para a partícula percorrer toda uma galáxia, o que significa que o elétron emissor comumente deve ser gerado por processos locais, próximos de onde vemos a emissão.

As linhas de emissão, conforme já mencionamos, são uma característica marcante dos espectros de AGNs no óptico. A eq 5.7 define a largura equivalente, que é uma medida da intensidade de uma linha. As larguras equivalentes das linhas largas dos AGNs são da ordem de 150\AA , o que equivale a velocidades relativas internas de uns 10^4 km/s. Enquanto isso, as linhas de emissão estreitas têm $W \sim 10\text{\AA}$, o que equivale a velocidades internas de algumas centenas de km/s.

Quasares têm uma distribuição de redshift bastante larga (ver painel esquerdo da figura 5.8). A partir da distribuição dos redshifts e das magnitudes aparentes (ver painel direito da figura 5.8), é possível estimar a magnitude absoluta e, por conseguinte (levando-se em conta os efeitos de seleção), determinar a função de luminosidade. Para os quasares, esta se comporta como uma lei de potências tanto no domínio de luminosidade menores quanto nas menores do que o valor de pico. No domínio de L mais altas, isso difere do comportamento exponencial da função de Schechter, para galáxias.

A seção 5.2 descreve em mais detalhe os demais tipos de AGN, além dos quasares:

- Quasi Stellar Objects (QSOs): quasares, como implícito no nome, foram descobertos em rádio. Mas sua aparência estelar e bem azulada no óptico permite que se procurem por esses objetos usando imagens no UV ou na banda B. De fato, muitos objetos com todas as características de quasares (variabilidade, alto redshift, alta luminosidade vinda de uma região central, espectro com linhas largas e intensas, etc) foram selecionados opticamente. Muitos, porém, não são

intensas fontes em rádio. Daí ter sido criado este termos, mais geral, para classificar objetos como quasares, mas do tipo *radio quiet*.

- Seyfers: são os primeiros AGNs a serem identificados. São em sua grande maioria galáxias espirais e são menos luminosas do que os QSOs. São, portanto, tipicamente amostradas a distâncias menores do que estes últimos, sendo que NGC 1068 é o AGN mais próximo do Grupo Local. As Seyfert se subdividem em duas categorias básicas, as Seyfert I e Seyfert 2. As primeiras apresentam tanto linhas largas, com centenas de angstroms de largura equivalente, quanto linhas mais estreitas (com $W \sim 10 \text{ \AA}$) no seu espectro óptico. As Seyfert 2 só possuem linhas do tipo mais estreito, mas note que ainda assim essas linhas são bem mais largas que as observadas em regiões de formação estelar de galáxias espirais normais, como a nossa. As Seyfert 1, na verdade, apresentam características que em tudo se assemelham aos QSOs, sendo apenas contrapartidas mais próximas, menos luminosas e espacialmente resolvidas desses últimos.
- Rádio galáxias: em sua maioria são do tipo *early-type* (Es e S0s). Assim como as Seyfert, elas se subdividem entre as que têm linhas largas no espectro óptico nuclear e as que não têm. Exceto pela morfologia, essas duas subcategorias são como Seyferts com emissão em rádio (*radio loud*). Sua aparência no radio tem características semelhantes às dos quasares.
- Objetos com intensa variabilidade (OVVs): São QSOs com variabilidade óptica particularmente intensa, que pode chegar a uma grande fração do seu fluxo em poucos dias. Outra característica é o alto grau de polarização no óptico, da ordem de alguns por cento, em contrapartida à polarização de $\sim 1\%$ dos demais QSOs.
- BL Lacs: são OVVs que possuem um espectro óptico atípico, pela ausência, ou relativamente baixa intensidade das suas linhas de emissão. OVVs e BL Lacs são coletivamente chamados de blazares. A magnitude de um BL Lac pode variar por várias unidades ao longo do tempo, sendo que em alguns casos, linhas de emissão se tornam mais visíveis perto do mínimo de fluxo. Sobre a variabilidade, ver figura 5.9.

A seção 5.3 introduz a ideia de um buraco negro supermassivo como sendo a origem do AGN. São feitas algumas considerações sobre o tempo mínimo de duração da atividade nuclear (com base no tamanho da região afetada pelo fenômeno), sobre a energia total produzida (duração do AGN x luminosidade do AGN) e sobre o tamanho do próprio AGN. O texto demonstra que para produzir toda a energia emitida pelo AGN por fusão nuclear, pelo menos usando a conversão de H em He, as cinzas resultantes do processo teriam que ter a dimensão do AGN. Um mecanismo mais eficiente de produção de radiação é a fricção viscosa pela acreção de matéria a um objeto relativístico. Na

verdade, qualquer processo de acreção, mesmo a um objeto clássico, leva à conversão de energia potencial gravitacional em cinética. E, em se tratando de gás atômico e molecular, há conversão de energia cinética em energia interna das partículas, com emissão de radiação EM. Mas a eficiência da conversão de energia em radiação no caso da acreção a um BN é maior, especialmente se ele estiver em rotação. Este, portanto, é um mecanismo capaz de gerar a grande quantidade de radiação produzida por um AGN, sem consumir com cinzas nucleares todo o volume esperado para o mesmo.

O processo de queda do gás a um BN, mesmo envolvendo fricção interna, não remove o muito do momentum angular do material, de forma que forma-se um disco de acreção cujo plano é perpendicular ao vetor L resultante do material. O disco rotaciona seguindo uma curva Kepleriana (afinal, quase toda a massa está concentrada no BN central). O efeito da fricção é localmente desimportante, de forma que ele leva à uma leve desaceleração da rotação a cada ponto. Mas este processo de desaceleração leva à contração do disco, pois há dissipação de energia mecânica, a qual, em última instância, é convertida na radiação EM observada.

Para a situação descrita no parágrafo anterior, é possível calcular analiticamente a luminosidade esperada para um disco infinitesimal e opticamente espesso que rotaciona ao mesmo tempo em que se contrai e dissipa sua energia mecânica. Assumindo-se que a emissão de corpo negro, a temperatura do disco em função da distância ao BN é dada pela eq. 5.13 ou 5.14. A um raio fixo (em unidades do raio de Schwarzschild) a temperatura é maior para maiores taxas de acreção de matéria e para BN de menor massa. O espectro total do disco de acreção, combinando a radiação emitida de todos os pontos, será então um superposição de Planckianas.

Movimentos superluminais: como sugerido pelo nome, tratam-se de objetos que, aparentemente pelo menos, se deslocam a velocidades superiores a c , o que pode causar desconforto. Esses movimentos são observados ao longo dos jatos de AGNs. Esses jatos possuem subestruturas, ou nós de emissão de luz. Medidas astrométricas da separação angular desses nós à fonte compacta muitas vezes demonstram que essa separação está aumentando e que, dada a distância ao AGN, a velocidade transversal desse nó com relação à fonte compacta central (dada pela eq. 5.15) supera c . Conforme explicado, trata-se de uma ilusão, por assim dizer, causada pelo fato de que o jato está voltado, ainda que obliquamente, formando um ângulo ϕ , para nossa linha de visada. O nó então se aproxima do observador ao mesmo tempo em que viaja ao longo do jato. A velocidade transversal aparente de afastamento do nó com relação ao AGN (fonte central compacta) é então uma combinação do deslocamento transversal e da diferença de recepção dos sinais do AGN e do nó. Ou seja, recebemos aqui na Terra, informações sobre a posição do nó e AGN que não são simultâneas, sendo que a posição do nó, por estar se aproximando de nós, é mais *atualizada*. O efeito é quantificado pela eq. 5.17. A partir dela podemos

inferir o ângulo ϕ entre o jato e a linha de visada ao AGN que maximiza a velocidade transversal. E podemos então inferir que velocidades espaciais do nó com relação ao AGN de 70% da luz ou mais, já permitem a observação desses movimentos superluminais.

Movimentos superluminais então exigem velocidades espaciais dos nós ao longo do jato do AGN que são comparáveis a c . Como essas velocidades tendem a ser da ordem da velocidade de escape do AGN (algo observado em outros sítios astrofísicos que envolve ejeção de matéria (=outflows)), conclui-se que o objeto central no AGN deve ter velocidade de escape próxima a c , o que, por definição, é algo como um BN. Obviamente, a massa envolvida neste tipo de fenômeno é a de um BN supermassivo (SMBH).

A subseção 5.3.5 introduz o conceito de luminosidade limite, ou luminosidade de Eddington. A ideia é igualar a pressão (ou força sobre uma área unitária) da radiação proveniente das regiões internas do disco de acreção ao SMBH com a pressão gravitacional. A pressão radiativa é calculada sobre os elétrons livres (eq. 5.20), os quais interagem com radiação via espalhamento Thomson. A pressão gravitacional é estimada sobre os prótons, que obviamente estão eletricamente acoplados aos elétrons livres. A condição mínima para que a acreção de matéria ao SMBH continue é que a pressão radiativa sobre o disco seja menor do que a pressão do *peso* do próprio disco.

Daí resulta o conceito de luminosidade de Eddington, dada pela eq. 5.23. L_{edd} é a luminosidade máxima que a fonte central do AGN pode produzir sem interromper a acreção de matéria (e o próprio fenômeno AGN). A eq 5.24 inverte a lógica e parte de um AGN com luminosidade L conhecida, de forma que podemos então estimar um limite inferior para a sua massa, M_{edd} , de forma a garantir que a mesma condição, $F_{\text{rad}} < F_{\text{grav}}$.

Uma premissa implícita nos cálculos de L_{edd} (ou M_{edd}) é que a emissão de radiação pela fonte central é isotrópica. Se relaxarmos essa hipótese e se a maior parte da radiação for emitida perpendicularmente ao disco, por exemplo, o AGN pode ter uma L muito maior, sem impedir a contínua acreção de matéria ao SMBH. Mas note que a mesma hipótese (isotropia) é adotada quando calculamos a luminosidade L do AGN, a partir de seu fluxo observado e de sua distância presumida. A anisotropia de um AGN, de fato, torna sua análise muito mais complicada.

Como a taxa de acreção de matéria ao SMBH pode ser escrita em função da luminosidade L (energia / tempo) dividida energia produzida pela acreção por unidade de massa (energia / massa), podemos então falar de um limite de Eddington também para a acreção de matéria, dada a massa do AGN e a eficiência com que energia é produzida, eq. 5.27. E com a taxa de acreção de massa e sua massa atual, podemos estimar quanto tempo foi necessário para produzir o SMBH, eq. 5.28.

