
Capítulo 8

Núcleos Galácticos Ativos

A descoberta e caracterização dos quasares.

Tipos de Núcleos Galácticos Ativos (AGNs): o Modelo Unificado.

Núcleos ativos de galáxias e a formação de estrutura no universo.

A descoberta e caracterização dos quasares

Novidades de grande porte nas Altas Energias aconteceram como decorrência do lançamento dos primeiros satélites que levaram detectores de raios X ao espaço, na década de 1960. Este fatos, somados ao notório desenvolvimento dos radiotelescópios revelaram, de forma totalmente inesperada, a existência de grandes quantidades de energia sendo emitidas por objetos de aparência estelar (denominados *quasi-stellar objects*, ou QSO, ou *quasares*), mas cuja origem extragaláctica ficou progressivamente estabelecida. O primeiro destes objetos, o mais famoso exemplo de *quasar*, foi descoberto nos anos 1960: denominado *3C 48*, ele não pôdeser classificado inicialmente com base no espectro observado. Uma série de linhas muito largas em posições que não correspondiam a elementos conhecidos deixou os astrônomos muito desorientados. Pouco tempo depois, outros objetos similares foram achados. Na verdade, esta denominação original de quasar já mostra como foi difícil compreender estes objetos, já que ao telescópio óptico eles *parecem* uma estrela qualquer. Porém, o estudo aprofundado das linhas espectrais (produto da absorção e emissão atômica, a qual retira ou coloca fótons em determinadas regiões do comprimento de onda) mostrou que as linhas observadas *já eram conhecidas* de transições de elementos químicos ordinários, mas estavam localizadas em posições bem diferentes das usuais, e encontravam-se deslocadas uniformemente para a região do vermelho do espectro (Fig. 8.1). Este deslocamento uniforme foi logo atribuído à *expansão do Universo*, o que por sua vez implicava que os quasares estavam localizados a distâncias cosmológicas com o gás emissor que correspondia a algum tipo de galáxia. Os trabalhos que permitiram esta conclusão tinham começado com Slipher (1912), quem mostrou que uma expansão

do Universo provocaria "efeito Doppler" entre o quasar e a Terra se movimentando com velocidade relativa v , observado como um deslocamento uniforme das linhas da posição do laboratório (λ_0) à real (λ) segundo

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}. \quad (8.1)$$

Pouco mais tarde, quando desenvolvidos os chamados modelos cosmológicos do tipo Friedmann-Robertson-Walker, os quais contém soluções onde a escala do Universo aumenta com o tempo, ficou claro que o deslocamento *não* é realmente devido ao efeito Doppler, mas antes à própria expansão do espaço-tempo que "arrasta" o quasar respeito da Terra. Ou seja, não é que existe uma velocidade v relativa enquanto o substrato permanece fixo, mas é o próprio espaço-tempo que se expande (aumenta a escala) levando com eles todos os objetos no Cosmos. Porém, a primeira ordem em $\frac{v}{c}$ a expressão (8.1) está correta porque é o primeiro termo em uma serie de Taylor completa, e pode ser utilizada pelo menos para deslocamentos relativamente pequenos (Horvath *et al*, 2006).

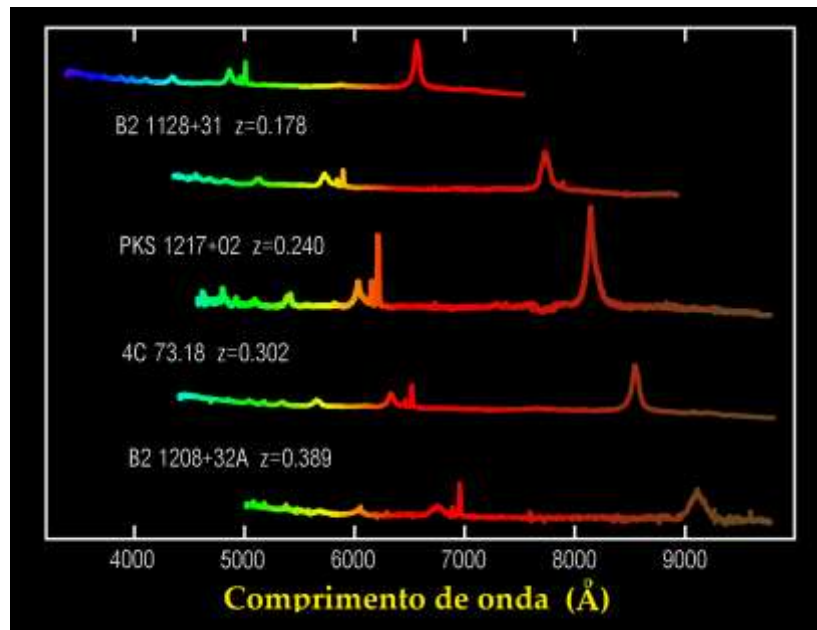


Fig. 8.1. O deslocamento ao vermelho das linhas de emissão de quatro quasares, progressivamente mais longínquos de cima para baixo. Observe-se a uniformidade do deslocamento que afeta a todas as linhas por igual.

Depois de um tempo os astrônomos ficaram bem convencidos do caráter extragaláctico dos quasares, apesar que isto exige aceitar que a energia emitida é

extremamente grande. As variações rápidas (em tempos curtos $\tau < \text{minutos}$) observadas nas curvas de luz indicavam uma natureza *compacta* para eles (Capítulo 3), já que, tal como discutido anteriormente, a região de emissão deve ser menor do que $c \times \tau$ para dar conta da variação observada sem violar a causalidade. Mas o problema da fonte de energia permanecia sem solução. Ao menos duas décadas de estudos foram necessárias para concluir que o modelo mais viável era o de acréscimo de gás por buracos negros muito massivos, com massas gigantescas, $\geq 10^6$ vezes maiores que a massa do Sol, valores necessários para explicar a energia emitida (vide a seguir). Assim, associaram-se os QSO com outra classe de galáxias ativas, notórias por emitirem em rádio e raios X no que hoje é conhecido como *modelo unificado dos AGN* (ou *Active Galactic Nuclei* em inglês, vide abaixo).

A pergunta que motivou inicialmente esses estudos era: como é que os QSOs conseguiam ser visíveis? Em outras palavras, qual é sua fonte de energia? Depois de uma longa controvérsia científica, onde todas as hipóteses foram consideradas, incluindo aquelas que tinham buracos negros como responsáveis pela emissão de energia, a origem cosmológica dos quasares ficou estabelecida quando foi possível observar uma *supernova* num deles. Assim, foi provado que os quasares residiam em algum tipo de galáxia (hoje podemos ver essas galáxias em imagens profundas como as da Fig. 8.2), na qual havia também estrelas normais tais como a progenitora da supernova que explodiu, mas que estas estrelas, em geral, não eram visíveis individualmente por causa das enormes distâncias. Observaram-se também nos AGNs *jatos* de partículas relativísticas que emergem dessa região e se propagam por muitos *kpc* como produto adicional desse acréscimo (Fig. 8.2), formados por matéria que escapa perpendicular ao plano do disco de acréscimo acelerada nas vizinhanças do buraco negro central, tal como discutido no Capítulo anterior. Todo apontava para estarmos em presença dos maiores sistemas em acreção no Universo inteiro. É o acréscimo de gás e estrelas pelos buracos negros supermassivos faz com que vejamos um quasar, enquanto a maioria das vezes a galáxia hospedeira é invisível por ser muito tênue às distâncias típicas (Peterson, 1997).

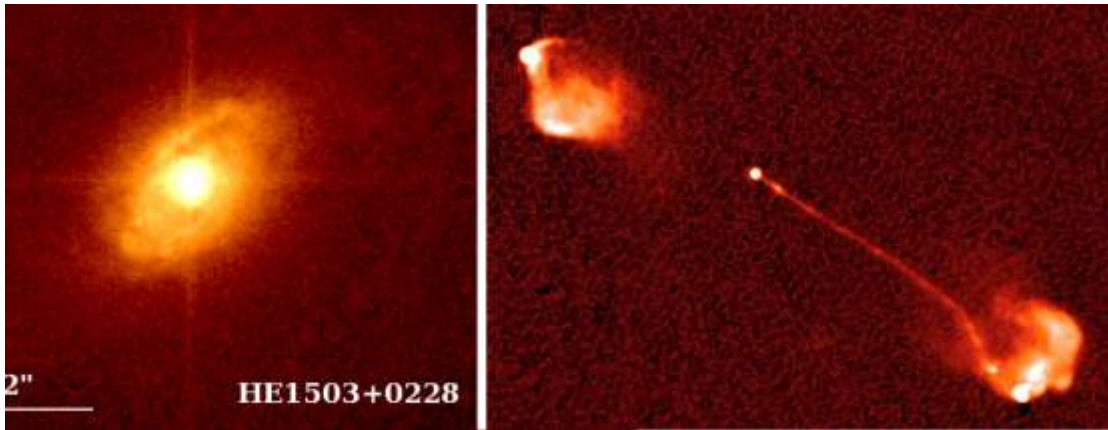


Fig. 8.2. Esquerda: o quasar HE1239-2426 no centro da galáxia hospedeira, revelada em imagens de alta resolução. Direita: um exemplo de jatos extragalácticos no quasar 3C 175.

Estabelecer que a fonte de energia dos quasares *não é* a aniquilação de matéria com antimatéria (como se pensava inicialmente), mas antes o acréscimo de gás levou diretamente às estimativas atuais das massas. Vejamos como é que chegou-se a esta conclusão no caso dos AGNs. A luminosidade produzida pela queda de matéria com uma taxa \dot{M} resulta

$$L = \frac{GM\dot{M}}{2r} = 2\pi r^2 \sigma T^4 \quad (8.2)$$

(o fator "2" decorre da conversão da energia sujeita ao Teorema do Virial eq.(4.23), radiada a seguir pelo disco nas duas caras como corpo negro). A eq. (8.2) pode ser invertida para obtermos

$$T \propto (M \dot{M})^{1/4} r^{-3/4} \quad (8.3)$$

ou, introduzindo o raio de Schwarzschild R_S do Capítulo 6 como uma escala espacial adequada ao tratar com um buraco negro

$$T = \left[\frac{3GM\dot{M}}{8\pi\sigma R_S^3} \right]^{1/4} \left(\frac{r}{R_S} \right)^{-3/4} \quad (8.4)$$

Se lembrarmos que a matéria segue trajetórias espirais até cair subitamente quando atingir o raio da última órbita estável (ISCO em inglês), e que sem levar em conta o *spin* do buraco negro este último é $3 \times R_S$, chegamos à conclusão que a radiação mais dura provém da borda mais interna do disco, enquanto o óptico e

infravermelho são produzidos nas regiões mais afastadas onde a temperatura cai o suficiente. Isto se aplica a radiação do disco, mas já tínhamos apontado que a emissão de rádio é seguramente devida ao síncrotron dos elétrons dos jatos (embora não é claro do onde sai o campo magnético \vec{B} que a possibilita...). Esta emissão rádio está também relacionada de forma estreita com a emissão mais dura em raios gama, já que os elétrons muito energéticos dos jatos colidem com fótons e transferem sua energia para estes (pelo processo Compton inverso do Capítulo 2), embora o local exato onde estes fótons "moles" estão é objeto de ampla discussão. Mas em qualquer caso, para reproduzir as luminosidades observadas e supondo que a emissão acontece na taxa máxima de Eddington, a eq.(8.2) com $\dot{M} = \dot{M}_{Eddington}$ indica que a massa M do objeto central deve ser de milhões, e até bilhões de massa solares em alguns casos. Daí a necessidade de lidar com buracos negros chamados de *supermassivos*.

Às vezes não resulta fácil identificar uma *galáxia ativa* ou AGN, a classe da qual o quasar é um dos exemplos. Existem vários tipos de galáxias ativas que parecem ser normais nas imagens ópticas, uma galáxia igual a outra qualquer. Mas quando examinadas em rádio, raios X ou raios gama, algumas destas emissões resultam *muito maiores* do que a das galáxias normais. Ou seja, algum tipo de processo de alta energia está ativo na galáxia sem necessariamente aparecer nas bandas ópticas. Um dos exemplos bem estudados aparece na Fig. 8.3.

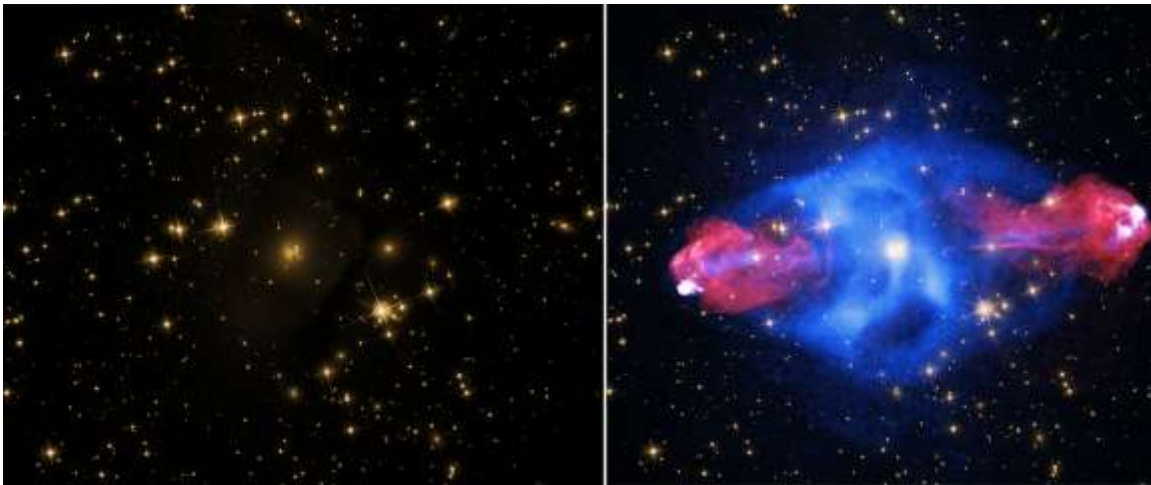


Fig. 8.3. A galáxia Cygnus A em bandas ópticas (esquerda) e em raios X/rádio (direita). Embora aos telescópios convencionais ela não pareça ter nada de especial, quando investigada em outras bandas tanto a emissão X (em azul) quanto os jatos emergentes (em vermelho) a colocam na classe de galáxias ativas.

Tipos de Núcleos Galácticos Ativos (AGNs): o Modelo Unificado

Com o aparecimento e classificação de diversos tipos de AGN, os quais mostravam diferentes emissões, surgiu aos poucos a idéia de que todos eles, afinal, poderiam ser a mesma estrutura básica, mas observada desde diversos ângulos devido à orientação aleatória respeito da linha de visada. A construção deste *modelo unificado* de AGN levou em conta que devia haver um buraco negro supermassivo, junto com matéria em um disco de acreção, além de abundante poeira (detectada) que obscurece o sistema no plano equatorial. Nuvens de gás na região interior e exterior foram postuladas para explicar a largura das linhas (como as da Fig. 8.1). As linhas estreitas devem-se originar longe da região central, onde as nuvens têm uma velocidade baixa, enquanto as nuvens mais próximas em órbitas curtas produzem linhas largas devido ao efeito Doppler do seu movimento. Dependendo da inclinação desse plano "equatorial" do objeto com relação à linha de visada, vemos diferentes aspectos da galáxia ativa, e assim a variedade de tipos encontrados foi unificada pelos astrônomos, e denominada genericamente de AGNs englobando os quasares e outros "primos" de natureza similar (chamados de galáxias Seyfert, *blazars*, etc.), mas que no fundo seriam o mesmo objeto (Beckmann e Schrader, 2012).

O quadro da Fig. 8.4 revela os tipos de AGN observados que precisavam ser explicados. A classificação básica começa com a observação da emissão em rádio, que pode ser fraca/nula (o AGN se diz "quieto" em rádio) ou importante (AGN "intenso"). A presença ou ausência de linhas largas ou estreitas também divide os AGNs em categoria I ou II, com a "categoria 0" indicando a ausência dos dois tipos (embora possam existir linhas de absorção). Assim, o modelo unificado pretendido precisava conter regiões onde as linhas estreitas e as linhas largas fossem produzidas, e a razão para que apareçam ou não nos diversos grupos.

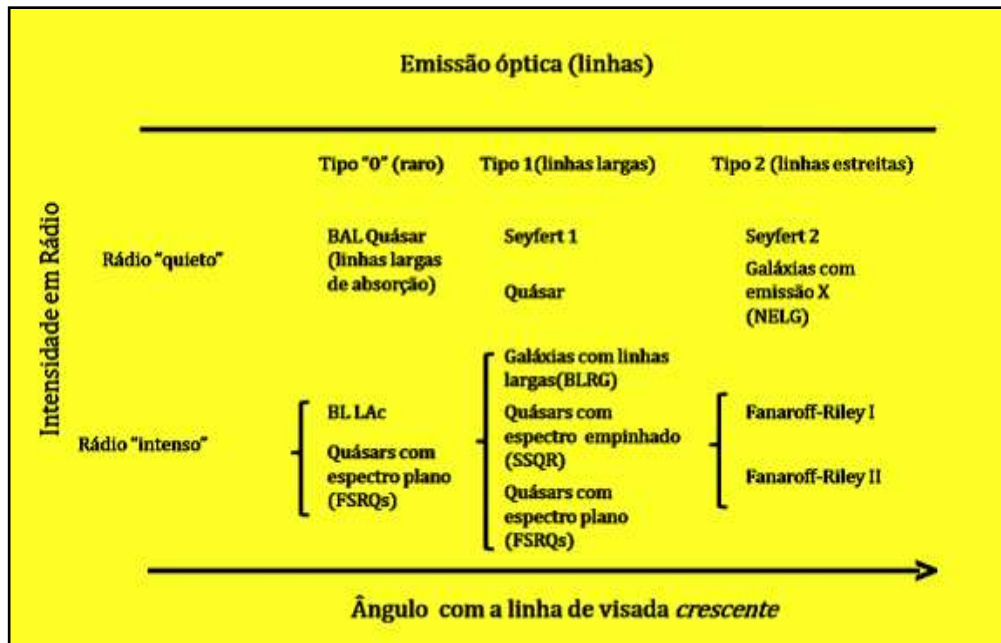


Fig. 8.4. O zoológico dos AGNs em um quadro único, vide texto.

As estruturas físicas que foram postuladas para explicarem cada característica observada podem ser apreciadas na Fig. 8.5. Basicamente o sistema buraco negro-disco de acreção (fóssil) ocupa a região central ou "motor" do AGN, mas ainda fica rodeado de um *torus* de gás e poeira (não confundir este com o disco de acreção, quase pontual na escala da figura) que obscurece substancialmente o sistema no plano equatorial, e nuvens de gás na direção perpendicular, além de jatos que são os principais responsáveis da emissão em rádio. A divisão entre "intenso" ou "quieto" depende então dos jatos, e as linhas do ângulo com a linha de visada, sempre de acordo com este modelo unificado. Uma representação do observado em cada caso segundo o ângulo da observação está na Fig. 8.5. Devemos apontar que, além dos jatos freqüentemente observados, existe evidência bastante direta da presença dos discos obtida, por exemplo, com os instrumentos do *Hubble Space Telescope*. Já as regiões onde as linhas largas e estreitas devem-se formar são inferidas só indiretamente, embora há consenso na medida que são hipóteses muito razoáveis. Se o modelo unificado está correto inferimos que os AGNs onde o estudo dos jatos resulta particularmente adequado são os blazars, já que estaríamos observando diretamente no eixo destes. Os jatos, além de serem candidatos a acelerar partículas de energias extremas (Capítulo 12), devem fornecer dados importantes do ambiente, tais como o mencionado campo magnético, densidade e outros, mantendo-se colimados por 50 kpc ou mais.

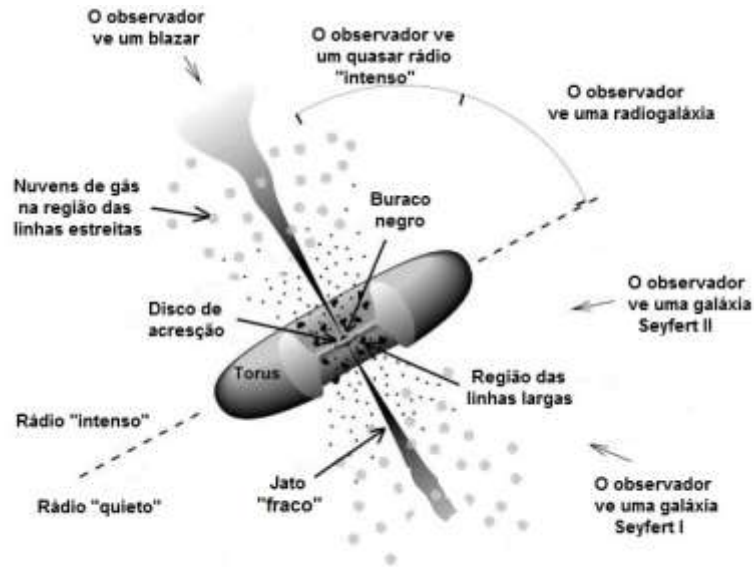


Fig. 8.5. As diferentes estruturas de um AGN e o resultado das observações indicado para cada ângulo.

Núcleos ativos de galáxias e a formação de estrutura no universo

A presença dos quasares no Universo primordial (o mais antigo e distante detectado se formou quando o Universo tinha $\sim 5\%$ da sua escala atual, com um *redshift* > 7.5) faz refletir a respeito da natureza do fenômeno relacionado com as galáxias, quando estas estavam em formação. Segundo o modelo mais aceito, a estrutura no Universo começa a se formar assim que é possível o crescimento das inhomogeneidades na densidade (por volta de $z \sim 20$), e conforme o tempo cósmico decorre, é observado que o número de quasares cresce muito rapidamente, atinge um pico para $z \geq 2$ e depois declina. Por volta de $z = 2$ um 10% das galáxias contém quasares, mas esse número é quase zero hoje (Fig. 8.6). Qual é a relação então entre os quasares e as galáxias? Já mostramos que muitas vezes as galáxias que os hospedam são de difícil observação, e existem casos onde o quasar não está alojado em galáxia alguma. Mas se a associação é real, é possível pensar que o processo de formação das galáxias tem a ver com os quasares, já que estes últimos regulariam com a energia emitida a formação estelar que constitui a galáxia hospedeira. De fato, quando ficou possível estudar as regiões centrais das galáxias (bojos) e estimar as massas dos buracos negros nos centros, houve uma descoberta importante: a massa do buraco negro central está fortemente correlacionada com a dispersão de velocidades σ das estrelas nos bojos, mais precisamente $M_{BH} \propto \sigma^4$ (Fig. 8.7).

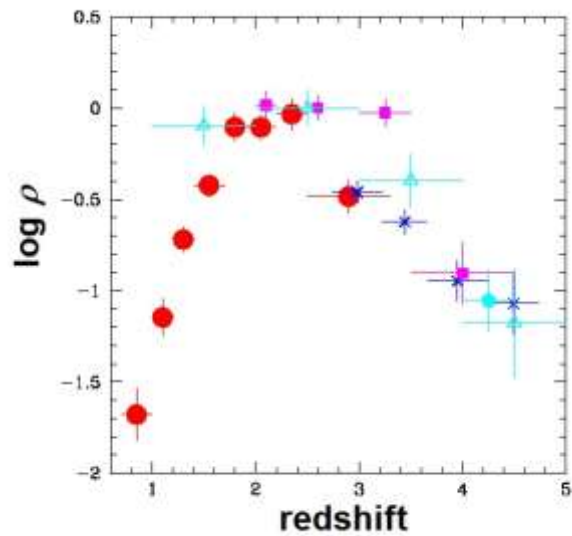


Fig. 8.6. O logaritmo da densidade dos quasares observados como função do redshift, refletindo a história cósmica da sua presença.

A interpretação geral desta correlação é que há uma "simbiose" entre o buraco negro central e a formação da região mais interna. Ou seja, que o buraco negro e a formação da galáxia hospedeira aconteceu de forma simultânea (Spinrad, 2005).

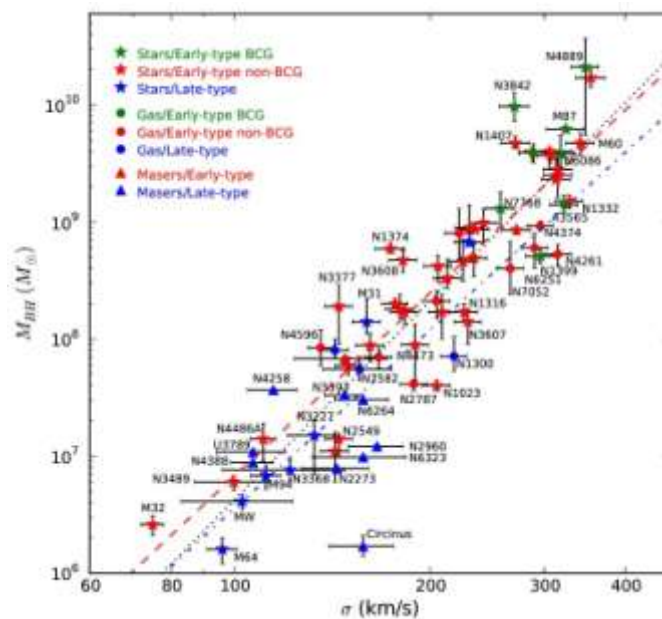


Fig. 8.7. A correlação entra a massa do buraco negro M_{BH} e a dispersão de velocidades das estrelas nos bojos correspondentes σ , note-se que esta relação se estende até as menores massas dos buracos negros já detectadas $\leq 10^5 M_{\odot}$.

Uma idéia muito simples que fundamenta esta correlação pode ser obtida considerando o cenário seguinte: suponhamos que a pressão de radiação gerada no AGN "empurra" o gás no centro, o qual é uma fração f da massa do bojo $M_{gas} = f M_{bojo}$. Utilizando a eq. (7.9) podemos escrever, balançando a força da pressão com a atração gravitacional em cima do gás, que

$$\frac{L_E}{c} = \frac{G M_{bojo} f M_{bojo}}{R^2} \quad (8.5)$$

É possível supor que a parte interior ao raio R no bojo corresponde a uma esfera isotérmica, onde a massa e a dispersão de velocidades das "partículas" seguem a relação $M_{bojo} = 2R\sigma^2/G$. Assim, $\frac{M_{bojo}}{R} = \frac{2\sigma^2}{G}$, a qual, substituída na (8.5) resulta em $\frac{L_E}{c} = Gf \left(\frac{2\sigma^2}{G}\right)^2$. Utilizando ainda a eq. (7.9), $L_E = \frac{4\pi G M_{BH} m_p}{\sigma_T}$, temos finalmente que

$$M_{BH} = \frac{\sigma_T f \sigma^4}{\pi G^2 m_p} \quad (8.6)$$

Embora pareça uma explicação plausível, a relação (8.6) tem sido criticada, por exemplo, porque o bojo interior não deve corresponder a uma esfera isotérmica. É possível que existam outros fatores além da pressão de radiação que contribuam para a correlação $M_{BH} \propto \sigma^4$ da Fig. 8.7.

Em resumo, os maiores sistemas em acreção no Universo se formam e evoluem a partir de um redshift bastante elevado > 5 , e existem alguns para $z > 7$. Isto quer dizer que o Universo forma buracos negros de massas gigantescas em um curto período de tempo após o Big Bang, coisa que até há pouco tempo era considerada impossível, mas que já parece viável pelo *colapso direto* do gás nas condições primordiais, pelo menos até a casa do $\sim 10^6 M_\odot$. O buraco negro se alimenta durante bilhões de anos da acreção do meio, até que o \dot{M} declina muito no Universo local, e os buracos negros supermassivos começam a "passar fome" (a exemplo do buraco negro no centro da nossa galáxia em Sgr A*, já mencionado) ficando em estado de latência, sem oferecer sinais fortes da sua presença. É claro que o AGN "some" assim que o gás deixa de ser acretado, e isto está associado à evolução da galáxia hospedeira, caso contrário, observaríamos muitos quasares próximos, ainda "em funcionamento". Uma estatística acurada dos AGNs apresenta outras dificuldades, por exemplo, a presença de poeira que dificulta a observação, e pode ocultar uma boa parte deles.