

## GALÁXIAS ATIVAS E QUASARES

Elisabete M. de Gouveia Dal Pino e Vera Jatenco-Pereira

### INTRODUÇÃO

A radiação emitida por galáxias normais, como aquelas examinadas no Capítulo 10, é dominada por processos térmicos. Estes incluem luz estelar, emissão radiotérmica do gás e emissão infravermelha da poeira aquecida do meio interestelar. Em contraste, há certas classes de galáxias, denominadas ativas, cuja emissão é dominada por processos não térmicos, como a radiação síncrotron (ver adiante), ou por processos térmicos envolvendo energias extremamente altas.

Em uma galáxia normal, a densidade de estrelas cresce em direção ao centro. Nesse caso, o centro da galáxia é caracterizado por um núcleo de origem estelar (isto é, constituído de grande concentração de estrelas). Já nas galáxias ativas, o núcleo é muito pequeno e, em geral, não-resolvido (possuindo diâmetro angular inferior a 1 segundo de arco). Em placas fotográficas de curta exposição, seu aspecto é estelar. Entre os objetos de maior atividade, a luminosidade irradiada pelo núcleo pode exceder a do resto da galáxia. Como veremos, acredita-se que tais núcleos ativos possam conter buracos negros supermassivos para suprir as enormes quantidades de energia por eles emitidas. Em virtude da intensa atividade nuclear, as galáxias ativas são comumente designadas de *Núcleos Ativos de Galáxias*, ou simplesmente, NAGs.

Além das galáxias com núcleos ativos, há uma outra classe de objetos compactos extragalácticos muito distantes, com propriedades similares às dos NAGs, mas com luminosidades ainda maiores. São os *quasares* (esse nome é originário da abreviatura da expressão em inglês: *quasi-stellar object*). Acredita-se que os mesmos sejam exemplos extremos de NAGs, embora, por serem muito distantes, o corpo de sua galáxia hospedeira seja, freqüentemente, muito difícil de ser observado.

Em geral, os diferentes tipos de NAGs e quasares apresentam parte ou a totalidade das características abaixo: luminosidades superiores a  $10^{37}W$  (ou  $2,5 \times 10^{10}L_{\odot}$ ); emissão não-térmica intensa no ultravioleta, infravermelho, rádio e raio X, em comparação às galáxias normais; variações temporais na luminosidade (com períodos de alguns meses ou semanas); contrastes de brilho marcantes entre o núcleo e o restante do corpo da galáxia; estruturas em forma de jatos emergindo da região nuclear e linhas de emissão largas e intensas.

É importante notar que o núcleo de nossa Galáxia, a Via Láctea, bem como os de outras galáxias normais, também possui algumas dessas características, porém, ele não é capaz de gerar tanta energia como a dos NAGs (no caso da Via Láctea, a luminosidade nuclear é de cerca de  $10^{35}W$ ). Em seguida, examinaremos em detalhe, os diferentes tipos de NAGs e quasares, dando especial ênfase às peculiaridades de cada subclasse.

## OS NAGs

Entre os NAGs, podemos distinguir: as Galáxias de Seyfert, os objetos BL-Lacertae, as radiogaláxias e também objetos de atividade mais moderada, como: os LINERs e as galáxias com surtos explosivos de formação estelar, denominadas galáxias *starburst*.

### *Galáxias de Seyfert*

Em 1943, bem antes da descoberta das radiogaláxias e quasares, Carl Seyfert identificou seis galáxias espirais com núcleos muito brilhantes (Atlas, imagem 28) e linhas largas em seus espectros. Galáxias (em sua maioria espirais) com tais características são hoje chamadas de Seyfert. Cerca de 1% de todas as galáxias espirais são Seyferts e, talvez, todas as espirais passem pelo menos uma fase de sua vida como galáxias de Seyfert.

As galáxias de Seyfert, muitas das quais estão relativamente próximas, fornecem pistas importantes sobre a natureza das galáxias ativas. Essas pistas provêm, sobretudo, de seu espectro de linhas de emissão.



Antes de prosseguirmos, cabe aqui uma nota sobre linhas de emissão. Estas são produzidas quando um átomo (ou mesmo um íon ou molécula) passa de um estado excitado para um estado menos excitado de energia emitindo um fóton (capítulo 2). Um átomo pode passar a um estado excitado após uma colisão ou após a absorção de um fóton. Dois tipos de linhas espectrais podem ser produzidas, as *permitidas* e as *proibidas*. O tempo médio de vida de um átomo em um estado excitado é da ordem de  $10^{-6}$ s, mas há certos estados com tempos de vida maiores que 1 s. Estes são denominados de metaestáveis. Linhas permitidas são produzidas em transições entre estados normais, enquanto que as proibidas decorrem de transições envolvendo um estado metaestável. Para que um átomo possa ser excitado para um estado metaestável, permitindo, portanto, a produção de linhas proibidas, o gás do meio deve ser rarefeito o bastante para que o tempo entre colisões atômicas seja maior que o tempo de vida do estado metaestável. Embora seja difícil de se conseguir tais substratos rarefeitos aqui na Terra, mesmo nos melhores vácuos de laboratório, no meio interestelar das galáxias as densidades são, em geral, baixas o bastante para permitirem a produção de linhas proibidas. Como veremos, estas são freqüentes nos espectros de linhas de emissão das galáxias de Seyfert e demais NAGs. Nos parágrafos que se seguem, adotaremos a nomenclatura convencional para designar linhas espectrais. Por exemplo, a linha permitida C IV 1 549 representa uma linha com comprimento de onda  $1\,549\text{ \AA}$  (ou  $1\,54,9\text{ nm}$ ) do átomo de carbono que perdeu 3 elétrons (três vezes ionizado); já para representar uma linha proibida, um par de colchetes é incluído na nomenclatura, por exemplo, [O III] 5 007 denota a linha proibida com comprimento de onda  $5\,007\text{ \AA}$  do átomo de oxigênio que perdeu 2 elétrons.

Após a descoberta de Carl Seyfert, a identificação de novas Seyferts levou Daniel Weedman a sugerir uma subclassificação das mesmas em dois tipos. As Seyferts de tipo 1 apresentam linhas de emissão permitidas (como as da série de Balmer do hidrogênio) *extremamente* largas. Se sua largura é causada pelo efeito Döppler (capítulo 2), então, as velocidades típicas do gás que as produzem seriam de  $5\,000$  a  $10\,000\text{ km s}^{-1}$ ! As linhas proibidas (provenientes do O II, O III, N II, S II etc.) são mais estreitas, indicando velocidades da ordem de  $200$  a  $400\text{ km s}^{-1}$ . A Figura 11.1 mostra um espectro típico de uma Seyfert 1. Já as Seyferts de tipo 2 possuem apenas linhas estreitas (proibidas e permitidas) em comparação às de tipo 1 (com velocidades típicas de  $200$  a  $1000\text{ km s}^{-1}$ ), porém, bem mais largas que as de uma galáxia normal.

O modelo padrão para as Seyferts é o de uma pequena região central produzindo fótons ionizantes que, ao fluírem para fora do núcleo ativo, encontram duas regiões gasosas distintas. A mais interna seria uma *Região de Linhas Largas* (RL). A partir de estudos da variabilidade das linhas de emissão, é possível ava-

liar-se o tamanho de uma RLL como sendo no máximo de  $10^{11}$  km. Mais externamente, envolvendo a RLL, haveria uma *Região de Linhas Estreitas* (RLE), com tamanho provável de 100 a 1 000 vezes maior. A RLL não produz linhas proibidas e, portanto, possui densidades maiores (aproximadamente  $10^{13} - 10^{15}$  partículas  $\text{cm}^{-3}$ ) que a RLE onde, tanto linhas permitidas como proibidas estão presentes. Estima-se que a massa total de gás em uma RLL seja da ordem de 30 a  $50 M_{\odot}$ .

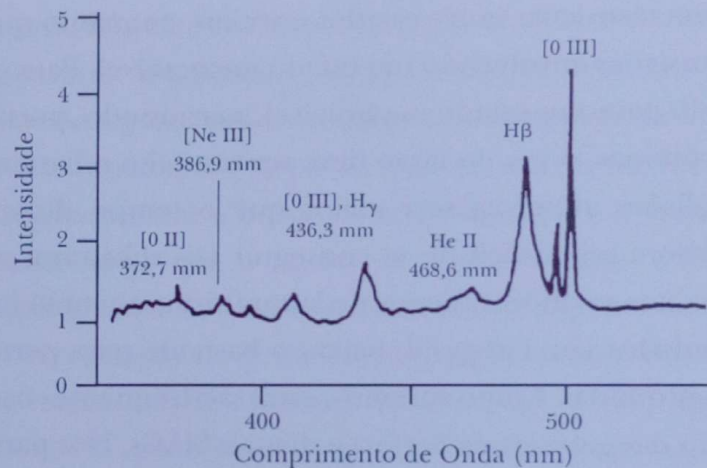


Figura 11.1. Espectro de uma galáxia de Seyfert tipo 1, Markarian 509. Note-se que as linhas permitidas da série de Balmer,  $H\beta$  e  $H\gamma$  são largas, enquanto que as linhas proibidas, como [O III], são estreitas (as intensidades das linhas estão em unidades arbitrárias).

As galáxias de Seyfert não são, em geral, fontes intensas de rádio ou raios X, mas irradiam grande quantidade de energia no infravermelho. Boa parte dessa energia se deve à poeira que circunda o núcleo e o restante é de origem síncrotrônica. A radiação síncrotron é produzida por elétrons viajando a velocidades próximas à da luz, através de um campo magnético (Figura 11.2). A combinação da radiação estelar e da radiação infravermelha produz luminosidades de  $10^{37}$  a  $10^{38}$  W. Qual a causa de toda essa atividade? A fonte central deve ser bem pequena para *cabrer* dentro da RLL e, não obstante, deve ser muito poderosa para ser capaz de acelerar o gás da RLL até altas velocidades e também produzir as altas luminosidades observadas. Retornaremos a essa questão acerca do caráter da fonte de energia dos NAGs adiante (em “Fontes de energia dos NAGs e quasares: buracos negros?”).

As diferenças entre as galáxias de Seyfert de tipos 1 e 2 são atribuídas, pelo menos em parte, à presença da poeira que causaria forte absorção da radiação óptica e ultravioleta e das linhas largas. Os fótons emitidos seriam espalhados pela poeira, mascarando parcialmente a região nuclear, nas Seyferts 2 mais que nas Seyferts 1.



Um estudo recente de uma amostra de várias Seyferts observadas revelou um resultado bastante curioso: muitas delas estão próximas de outra galáxia, formando sistemas binários. Essa proximidade poderia induzir fortes interações gravitacionais entre um par de galáxias e ser a causa do surgimento da atividade Seyfert em uma delas por um certo período de tempo.

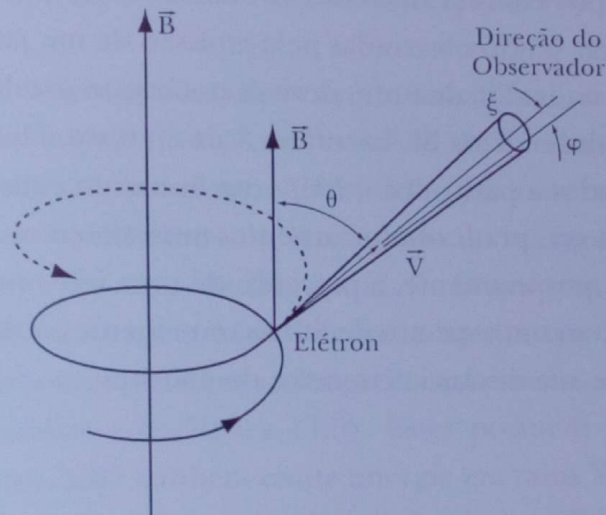


Figura 11.2. Radiação síncrotron é a radiação produzida por um elétron relativístico, isto é, viajando com velocidade próxima à da luz, através de um campo magnético  $\vec{B}$ . A radiação emitida pelo elétron em movimento concentra-se em um cone de ângulo bem pequeno ( $2\psi$ ). Em conseqüência, a radiação pode ser vista somente por um observador para o qual o ângulo  $\psi$ , entre a direção de movimento do elétron e a sua direção, é inferior a  $\psi$ .

### Objetos BL Lacertae

Um outro tipo de galáxia ativa é conhecido pelo nome de seu protótipo: o objeto BL Lacertae.

Em geral, os objetos BL Lacertae emitem radiação não-térmica sincrotrônica, predominantemente no infravermelho, e não apresentam linhas de emissão. Quando observados em comprimentos de onda no óptico, comumente possuem o aspecto de objeto estelar, sem evidências de estrutura extensa. Em rádio, a emissão é também compacta, podendo às vezes apresentar uma ligeira estrutura extensa com emissão bem mais fraca do que a da região central.

A grande diferença entre os objetos BL Lacertae e os demais tipos de NAGs é a rápida e caótica variação de sua emissão. A emissão óptica, por exemplo, pode variar sua magnitude em 20 vezes. Noite à noite, as flutuações em luminosidade podem chegar a 10 ou 30%, e alguns poucos BL Lacertae apresentaram variações de um fator 100 em suas luminosidades!

O fato de esses objetos quase não apresentarem linhas de emissão em seu espectro constitui um mistério para a sua compreensão. No modelo padrão para as galáxias ativas que vimos anteriormente, a radiação contínua (síncrotron) produzida na região nuclear deveria ser capaz de ionizar qualquer gás à volta do núcleo, produzindo linhas de emissão. Então, por que elas não aparecem nos objetos BL Lacertae se estes possuem radiação contínua não-térmica suficiente? A explicação possível é que talvez as linhas de emissão estejam sendo produzidas, mas não apareçam por estarem *submersas* na emissão contínua. Alternativamente, as linhas podem estar sendo obstruídas pela emissão de um jato (ver adiante) ao longo da linha de visada. Finalmente, deve-se notar que não há boas determinações das distâncias dos objetos BL Lacertae. A razão disso é que as distâncias são normalmente avaliadas a partir dos *redshifts* das linhas de emissão (veja adiante), as quais são, por sua vez, praticamente ausentes nesses objetos. Para o objeto protótipo BL Lacertae, propriamente, a presença de uma fraca nebulosidade envolvendo esse objeto, com um espectro de linhas semelhante ao de uma galáxia elíptica, permitiu avaliar sua distância em cerca de 430 Mpc.

### *Radiogaláxias*

As primeiras observações em comprimentos de onda de rádio (entre 1 milímetro e 30 metros, correspondendo a frequências entre  $3 \times 10^{11}$  e  $10^7$  Hz) somente tiveram início na década de 30, quando Karl Jansky detectou emissão rádio no centro de nossa Galáxia. Mas, foi somente após a Segunda Guerra Mundial que a Radioastronomia tomou impulso com o emprego do equipamento de radar desenvolvido durante a guerra. Em 1949, astrônomos australianos identificaram pela primeira vez duas radiofontes intensas, Centaurus A e M87, com galáxias próximas, NGC 5128 e 4486, respectivamente. Posteriormente, em 1954, Walter Baade e Rudolf Minkowski mostraram também que a radiofonte Cygnus A estava associada a uma galáxia distante. Essas identificações marcaram a descoberta de uma nova classe de objetos extragalácticos, as radiogaláxias. Nos anos 60, o progresso crescente nas observações em rádio levou à descoberta dos quasares, dos quais falaremos adiante.

A maior parte das galáxias espirais normais, de magnitude visual aparente 11 ou mais brilhante, irradia também em rádio, porém, não mais que  $10^{33}$  W. Já uma radiogaláxia emite em rádio luminosidades superiores a essa. As radiogaláxias podem ser de dois tipos: compactas ou extensas. Nas *radiogaláxias extensas* a emissão rádio se estende por uma região maior que a imagem óptica da galáxia; já nas *radiogaláxias compactas*, a emissão rádio é do mesmo tamanho ou até menor que a imagem óptica. Não raro, as radiofontes extensas apresentam uma



estrutura dupla com dois lóbulos gigantes separados por distâncias de alguns Mpc, dispostos simetricamente em lados opostos em relação ao núcleo. A Figura 11.3 mostra Cygnus A, uma das radiofontes mais intensas, e um exemplo desse tipo de radiofonte, comumente designado de *dupla clássica*. Em Cygnus A, os lóbulos encontram-se a 50 kpc da galáxia central e possuem cerca de 17 kpc de diâmetro. O diâmetro dos lóbulos pode, no entanto, chegar até 1000 kpc em outras fontes. Sua emissão em rádio é de  $10^{38}$  W. Cygnus A é uma galáxia elíptica e possui um núcleo ativo no centro com um espectro de linhas de emissão e radiação síncrotron.

M87 é também uma radiogaláxia típica. Localizada ao centro do aglomerado de galáxias de Virgo, a 20 Mpc de distância, M87 é identificada opticamente como uma galáxia elíptica gigante. No núcleo há uma radiofonte compacta de apenas 1,5 meses-luz de diâmetro. Emergindo do núcleo, observa-se um jato que se estende por 6 000 anos-luz (Figura 11.4). O jato tem uma luminosidade óptica de  $10^{34}$  W. Uma imagem mais detalhada mostra que o jato possui várias estruturas arredondadas brilhantes ao longo de sua extensão, como as contas de um colar, denominadas *nós* (Figura 11.5). Estes possuem alguns décimos de anos-luz de diâmetro. M87 também emite energia em raios X, com uma luminosidade cerca de 50 vezes maior que no óptico. As observações em rádio mostram que a emissão rádio também coincide com as emissões óptica e raios X e se prolonga até formar dois lóbulos simetricamente opostos. A emissão é atribuída à radiação sincrotrônica produzida por elétrons relativísticos acelerados em um campo magnético de cerca de  $10^{-3}$  G.

Centaurus A, a galáxia ativa mais próxima de nós (a 4 Mpc), é um outro exemplo de radiofonte extensa. Opticamente identificada como uma galáxia elíptica circundada por um anel de poeira (Atlas, imagem 30), ela possui dois radiolóbulos gigantes com 200 e 400 kpc de diâmetro. Internamente a esses lóbulos, ela possui mais um par de lóbulos menores (de 10 kpc de diâmetro) que se localizam nas extremidades da galáxia óptica e se alinham com os lóbulos externos. Um jato emerge de um dos lados, ligando o núcleo a um dos lóbulos internos.

Muitas das radiogaláxias possuem lóbulos e a quase totalidade das radiogaláxias de baixa luminosidade possui jatos. Os lóbulos podem armazenar grandes quantidades de energia. Possuem luminosidades típicas de  $10^{36}$  a  $10^{37}$  W, enquanto que as galáxias elípticas, às quais acham-se associados, emitem somente  $10^{35}$  W. Se a emissão que produzem é sincrotrônica, então, eles constituem possivelmente grandes reservatórios de campo magnético e elétrons relativísticos, podendo acumular uma energia de mais de  $10^{52}$  J. Acredita-se que os jatos sejam os canais através dos quais o núcleo conduza partículas e energia para os lóbulos, alimentando-os continuamente.

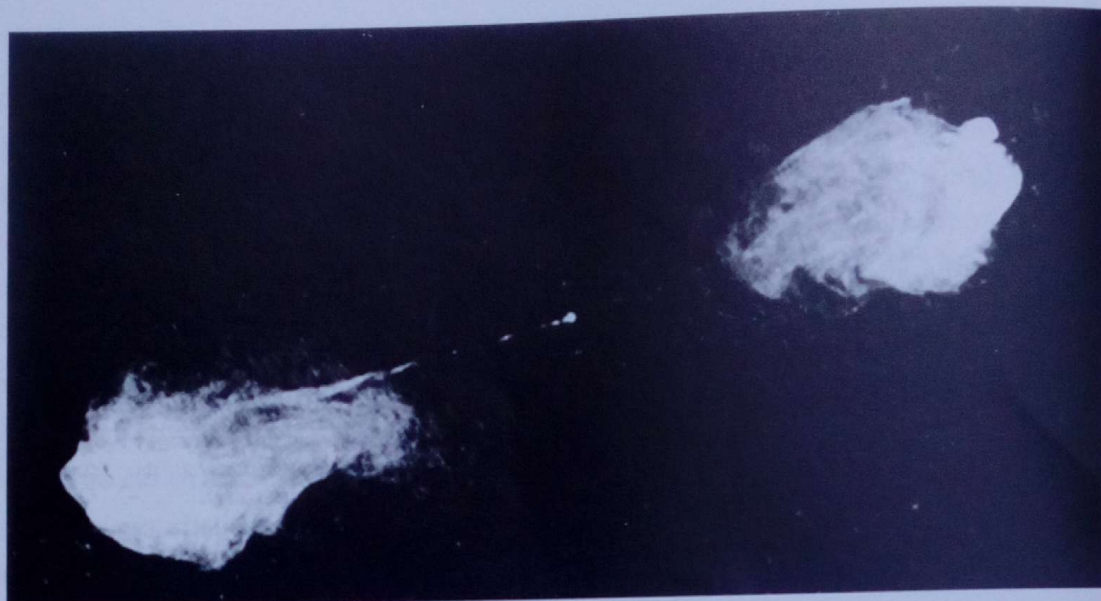


Figura 11.3. Mapa em rádio de Cygnus A. Esta imagem extraordinária mostra a estrutura de lóbulos gigantes situados em posições simetricamente opostas em relação ao núcleo da fonte ao centro. Note-se também o jato estreito emergindo à direita do núcleo em direção ao lóbulo e a estrutura filamentar de ambos os lóbulos (NRAO).



Figura 11.4. A galáxia elíptica ativa M87, uma radiogaláxia próxima. Note-se o jato emergente da fonte à direita na imagem. (AURA/NOAO).



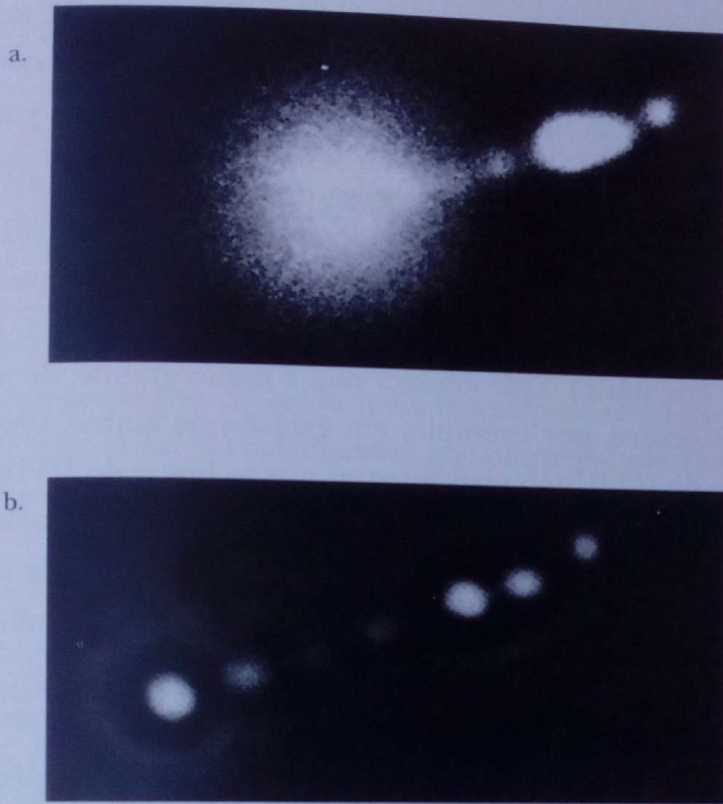


Figura 11.5. O jato de M87. (a) Fotografia da galáxia e do jato; (b) Imagem do jato processada por computador mostrando os nós brilhantes ao longo de sua extensão (AURA/NOAO).

### Galáxias de Atividade Moderada

Ainda entre os NAGs, podemos distinguir algumas classes de galáxias com menor atividade nuclear que os demais NAGs, mas superior à de galáxias normais. Entre os tipos com atividade moderada, podemos distinguir os LINERS (do inglês: *Low Ionization Nuclear Emission Regions*). Nesses objetos, há forte emissão nuclear de linhas e o espectro assemelha-se ao de regiões H II (capítulo 9). A energia da radiação nuclear que ioniza o gás emissor não é muito grande, de modo que, ao contrário do que ocorre, por exemplo, em galáxias de Seyfert (Figura 11.1), as linhas de emissão do [O II] são mais intensas que as linhas do [O III].

Outra classe de objetos com atividade moderada são as galáxias com surtos explosivos de formação estelar, ou galáxias *starburst*. A galáxia irregular M82 é um protótipo dessa classe (Atlas, imagem 29). Seu espectro indica a presença de material expandindo de seu centro a velocidades da ordem de  $100 \text{ km s}^{-1}$ . A região nuclear é bem maior que a de nossa Galáxia e emite fortemente no infravermelho: cerca de  $10^{37} \text{ W}$ . Aglomerados de estrelas e regiões H II gigantes dominam a região nuclear. Esta contém em seu centro uma pequena fonte de radiação não-térmica. Filamentos e fragmentos de poeira bloqueiam parcialmente a observação óptica dessa região. Observações em raios X também mostram que o núcleo é cheio de estruturas e granulações e emite uma potência de  $3 \times 10^{33} \text{ W}$  nessa faixa de comprimentos de onda. As fontes emissoras são possivelmente estrelas binárias de raios X (similares a Cyg X-1 em nossa galáxia), estrelas OB e restos de supernovas (capítulo 8). Essas observações favorecem a interpretação de que a região nuclear teria sofrido um grande surto de formação de estrelas há  $10^7$  ou  $10^8$  anos atrás e que teria se prolongado até hoje. Como M82 acha-se próxima a uma galáxia espiral (M81) é possível que interações gravitacionais e de atrito entre as duas galáxias tenham desencadeado o surto de formação estelar em M82, bem rica em gás e poeira, ingredientes essenciais para a formação de estrelas.

### QUASARES

No final da década de 50, os radioastrônomos haviam compilado catálogos repletos de radiofontes que ainda não haviam sido identificadas com nenhum objeto óptico. Buscando possíveis associações de radiofontes com objetos ópticos, Thomas Matthews e Allan Sandage, em 1961, descobriram um objeto óptico de magnitude 16, com aspecto estelar, cuja posição coincidia com a



da radiofonte 3C 48 (onde 3C designa o nome abreviado do terceiro catálogo de radiofontes de Cambridge). Esse objeto possuía um espectro de linhas de emissão largas que não pôde ser identificado com linhas conhecidas e emitia mais em comprimentos de onda do ultravioleta que qualquer estrela ordinária. Sua natureza permaneceu um mistério até 1963, quando uma outra radiofonte intensa, 3C 273, foi também identificada com um objeto óptico de aspecto estelar de magnitude 13. Suas linhas de emissão também eram intrigantes, mas puderam ser identificadas como as linhas do átomo de hidrogênio bem deslocadas para comprimentos de onda mais vermelhos. O comprimento de onda observado de uma linha ( $\lambda$ ) relaciona-se ao comprimento de onda no espectro de laboratório ( $\lambda_0$ ), em repouso, aqui na Terra, através da equação

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0, \quad (11.1)$$

onde  $z$  é o *redshift* (ou deslocamento para o vermelho) sofrido pela linha. No caso de 3C 273, o *redshift* medido foi 0,158. Matthews e Greenstein reexaminaram, então, o espectro de 3C 48 e verificaram que suas linhas de emissão estavam deslocadas de um fator 0,367 para o vermelho. Essas novas radiofontes descobertas, identificadas com objetos ópticos de aspecto estelar, foram designadas de *quasares*, uma abreviatura da terminologia em inglês: *quasi-stellar radio sources*. Esses *redshifts* indicam que esses objetos estão bem mais distantes que as galáxias vizinhas, pertencentes ao grupo local. Hoje, vários quasares já foram identificados, todos com altos *redshifts*, correspondendo a valores que vão de  $z \sim 0,06$  a 4,0.

Tal como as radiogaláxias e demais NAGs, os quasares emitem radiação não-térmica sincrotrônica, em geral, nos diversos comprimentos de onda, do rádio ao raio X. Vários deles também apresentam uma estrutura dupla extensa em rádio. Outros, consistem apenas de uma radiofonte compacta.

Os quasares com emissão extensa em rádio também costumam possuir uma componente compacta em rádio no centro, coincidente com o quasar. Variações na luminosidade são observadas tanto no óptico, como em rádio nessas componentes. Essas variações têm períodos da ordem de 1 ano, mas podem ser ainda mais rápidas em alguns casos, com períodos da ordem de dias a semanas. As variações no óptico são importantes, pois permitem estimar os tamanhos reais dos quasares. Se um objeto varia por um período  $t$ , então, seu raio ( $R$ ) não deve exceder a  $t$  multiplicado pela velocidade da luz,  $R \leq ct$ , do contrário, se o objeto fosse maior que  $ct$ , o tempo de viagem da luz iria  *mascarar* as variações temporais de período  $t$ . (Por exemplo, se  $ct$  fosse de 1 mês-luz, mas o objeto possuísse um diâmetro de 1 ano-luz, então, a radiação proveniente do ponto mais distante do objeto estaria defasada de 1 ano em relação àquela do ponto mais próximo do observador, mascarando, portanto, as variações mensais.) Essas esti-



mativas indicam que os quasares devem ter dimensões de 1 pc ou menos, correspondendo a volumes  $10^{12}$  vezes menores que os de uma galáxia normal.

Apesar de descobertos por sua emissão em rádio, somente 10% dos quasares são, de fato, emissores em rádio. O espectro óptico dos quasares é similar ao das galáxias de Seyfert. Também emitem grande parte de sua radiação no infravermelho, mas são bem mais intensos em comprimentos de onda de raio X e raio- $\gamma$  que as galáxias de Seyfert.

A morfologia em rádio dos quasares, suas propriedades espectroscópicas, sua estrutura óptica compacta e sua variabilidade indicam que os quasares são mais uma variedade do fenômeno dos NAGs. A grande diferença entre os quasares e os núcleos ativos das galáxias próximas é a sua luminosidade muito superior. Por exemplo, se o alto *redshift* dos quasares se deve à expansão do Universo (ver adiante), então, o *redshift* de 3C 273,  $z = 0,158$ , implica uma distância  $d \sim zc/H_0 \sim 770$  Mpc (onde  $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  é a constante de Hubble). A essa distância e com uma magnitude aparente igual a 13, 3C 273 emite cerca de  $10^{40}$  W, ou 1 000 vezes mais que uma galáxia espiral ordinária. Tudo indica, portanto, que os quasares são exemplos extremos de NAGs! Um aspecto observacional que confirma essa hipótese é a observação de *nebulosidades* envolvendo os quasares mais próximos. O alto brilho e a distância dos quasares tornam bastante difícil a observação de qualquer emissão potencial circundante a um quasar. Porém, a detecção dessas nebulosidades ao redor de vários quasares mostrou que as mesmas são, na verdade, galáxias nas quais os quasares acham-se embebidos. Mais de 200 quasares apresentam evidências de estarem contidos em galáxias.

Uma das descobertas mais surpreendentes em alguns quasares e radiofontes compactas foi a detecção de componentes *superluminais*, isto é, deslocando-se em relação ao núcleo com velocidades aparentemente maiores que as da luz. Um exemplo de fonte superluminal é o quasar 3C 273 que apresenta componentes brilhantes em rádio deslocando-se do núcleo a velocidades angulares de aproximadamente 0,001 segundos de arco por ano (Figura 11.6a). Conhecendo-se a distância das fontes, podemos avaliar a velocidade de deslocamento de suas componentes. Verifica-se que em certas fontes essas velocidades chegam a aparentemente 10 vezes a velocidade da luz! Tais velocidades correspondem, na verdade, ao deslocamento de componentes com velocidades *próximas* (mas não superiores) à da luz. A Figura 11.6b explica esse fenômeno cinemático. Quando uma nuvem de plasma é ejetada da fonte a tais velocidades próximas à da luz, ela pode ser observada somente em uma direção próxima ao seu movimento. Fontes superluminais são, portanto, fontes cuja direção de ejeção é próxima da linha de visada. Suponhamos que  $\theta$ , o ângulo entre a linha de visada do observador e a direção de ejeção, seja de  $5^\circ$  (Figura 11.6b) e a velocidade de ejeção do plasma seja de  $0,99 c$  (onde  $c$  é a velocidade da luz). Após 100 anos, a radiação





(a)

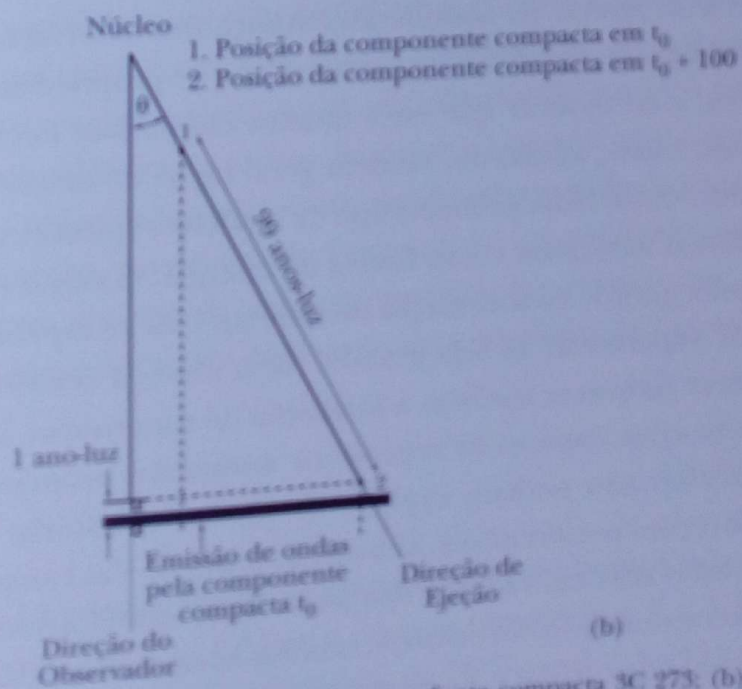


Figura 11.6. (a) O deslocamento de componentes superluminais na fonte compacta 3C 273; (b) Representação esquemática do deslocamento de uma componente superluminal.

emitida no instante  $t_0$  terá viajado 100 anos-luz e as componentes compactas, 99 anos-luz. A distância em tempo separando as ondas emitidas nos instantes  $t_0$  e  $t_0 + 100$  anos irá, portanto, ser somente de um ano. Por exemplo, se observamos, em 1997, aqui da Terra a onda emitida no instante  $t_0$ , na fonte, a onda emitida no instante  $t_0 + 100$  anos será observada em 1998. A separação observada entre as duas componentes, em 1998, será  $d = D \sin \theta = 9$  anos-luz (com  $D = 99$  anos-luz), e a velocidade de separação *aparente* observada será, portanto, de  $9c$ . Talvez a característica mais contundente dos quasares seja, como vimos, seu altíssimo *redshift*. Na verdade, a descoberta dos quasares revolucionou o conhecimento do Universo. A maioria das galáxias que conhecemos possui espectros com *redshift* abaixo de 0,2. Quase todas essas galáxias estão localizadas dentro de uma esfera de raio  $D \sim 1200$  Mpc. Se os quasares participam da expansão do Universo (capítulo 13), seus enormes *redshifts* e brilhos aparentes indicam que são os objetos mais brilhantes e mais distantes do Universo observável. Suas luminosidades, as quais são tipicamente 100 vezes maiores do que as das galáxias próximas mais potentes, e que são produzidas em regiões extremamente compactas, conforme vimos acima, levantam um problema importante que discutiremos a seguir: qual a sua fonte de energia?

#### FONTES DE ENERGIA DOS NAGs E QUASARES: BURACOS NEGROS?

Após a descoberta dos quasares, vários modelos foram propostos para os NAGs. Apesar do considerável avanço das observações, ao longo dos anos, no sentido de descrever mais claramente as propriedades dos NAGs e dos quasares, e de mostrar que estes últimos são de fato núcleos extremamente ativos, não existe, ainda, um modelo geral capaz de descrever todas as propriedades dos NAGs. Num primeiro tipo de modelo, explosões de supernovas (capítulo 8) foram invocadas como fontes de energia. Como o centro das galáxias possui uma grande concentração de estrelas, é de se esperar que a taxa de produção de supernovas ali seja grande; além disso, a colisão freqüente entre estrelas deve favorecer também a formação de supernovas. Entretanto, esses modelos não eram capazes de reproduzir muitas das propriedades dos NAGs, em particular, não podiam explicar de modo satisfatório a ejeção de material em direções preferenciais, levando à formação das componentes duplas extensas, observadas em rádio, e dos jatos. Esses modelos foram, então, abandonados. Recentemente, no entanto, estudos comparativos dos espectros de emissão de linhas dos NAGs e de supernovas invocaram novamente esses modelos como potenciais fontes de energia, pelo menos para os NAGs de menor potência,



como as galáxias de Seyfert. Atualmente, o modelo mais popular e mais estudado para os quasares e NAGs envolve um buraco negro supermassivo, com massas de cerca de  $10^7$  a  $10^{10}$  massas solares (Figura 11.7). Este foi inspirado nos modelos para os pulsares observados em nossa Galáxia (capítulo 8).

A primeira característica de um NAG ou quasar é a quantidade colossal de energia que é capaz de produzir em um volume pequeno. NAGs muito ativos liberam cerca de  $10^{53}$  a  $10^{54}$  J em 100 milhões de anos. Para se ter uma idéia de quão grandes são esses valores, basta lembrar que o Sol terá liberado, por meio de reações nucleares, ao final de sua vida,  $10^{44}$  J em 10 bilhões de anos, correspondendo à conversão de  $10^{27}$  kg de massa em energia (a partir da equação  $E = mc^2$ ). Como a massa do Sol é de  $2 \times 10^{30}$  kg, ele terá então aniquilado somente 0,0005 de sua massa em 10 bilhões de anos. Assim, uma galáxia normal, compreendendo cerca de 100 bilhões de estrelas como o Sol, consome somente 0,005 massas solares por ano para manter sua luminosidade. Já um NAG que libera  $10^{54}$  J consome 5 milhões de massas solares em apenas 100 milhões de anos, ou 0,05 massas solares por ano (ou até mais). Esses números mostram que o processo de conversão de massa em energia em um NAG deve ser bem mais eficiente que aquele permitido pelas reações nucleares no interior das estrelas. Isso levou os astrofísicos a ponderarem que, possivelmente, a fonte primária de energia em um NAG seria a gravitacional, já que esta é a única forma de energia que pode ser convertida com uma eficiência maior que a das reações nucleares.

Embora vários processos conhecidos sejam capazes de converter energia gravitacional em radiação, um aspecto atraente do modelo do buraco negro supermassivo é que este é capaz de gerar com facilidade as grandes quantidades de energia necessárias a um quasar, em uma região com diâmetro de apenas alguns anos-luz, e converter energia gravitacional em radiativa de maneira eficiente. Nesse modelo, luminosidades da ordem daquelas requeridas pelos quasares (da ordem de  $10^{12}$  luminosidades solares) são produzidas através da acreção de matéria ao buraco negro, a uma taxa de 1 massa solar *ou menos* por ano. Quantitativamente, podemos ver isso da seguinte maneira: lembrando que a energia potencial de uma massa  $m$  trazida do infinito até uma distância  $R$  próxima à massa  $M$  é dada por:

$$W = -GMm/R, \quad (11.2)$$

então, para uma massa de 1 kg deslocada até as vizinhanças de um buraco negro de massa  $M = 10^8 M_{\odot}$  e raio  $R = 3 \times 10^8$  km, a energia requerida é  $E = 4 \times 10^{16}$  J  $\text{kg}^{-1}$ . Logo, para produzir-se uma luminosidade de  $10^{12} L_{\odot} = 4 \times 10^{38}$  J  $\text{s}^{-1}$ , é necessária a acreção de matéria a uma taxa:



$$L/E = (4 \times 10^{38} \text{J s}^{-1}) / (4 \times 10^{16} \text{J kg}^{-1}) \approx 0,05 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}. \quad (11.3)$$

Esse valor foi obtido sob a hipótese de que toda a energia gravitacional é convertida em radiação. Obviamente, isso não deve ocorrer na prática, de modo que a quantidade de massa a ser acrescida deverá ser maior.

Nos NAGs e quasares, um buraco negro supermassivo em um núcleo galáctico denso pode ser alimentado por estrelas que se rompem nas suas vizinhanças. O material estelar forma um disco de acreção que irradia à medida que espirala em rotação para dentro do buraco negro atraído por seu intenso campo gravitacional, alimentando assim o quasar. Além disso, fluxos de gás são acelerados para fora, na direção perpendicular ao disco, dando origem aos jatos e à emissão rádio dupla extensa que se observa em muitos dos NAGs (Figuras 7a e b).

No modelo de buraco negro, a produção de linhas de emissão dos NAGs pode também ser explicada de maneira satisfatória. As extremidades do buraco negro (região III, na Figura 11.7a) são fontes de radiação ultravioleta e raio X. Essa radiação aquece e ioniza o gás das nuvens que circundam o buraco negro e o disco de acreção (Figura 11.8). As linhas de emissão largas (ou RLL), presentes em Seyferts do tipo 1, por exemplo, são produzidas em nuvens densas (Figura 11.8), localizadas bem próximas ao núcleo, dentro de um raio igual ao do disco de acreção. A grande largura das linhas nessa região deve-se aos movimentos das nuvens provocados não apenas pela rotação ao redor do buraco negro, mas também pela pressão da radiação da fonte central. Nuvens menos densas e mais externas (Figura 11.8) são as responsáveis pelas linhas de emissão estreitas (ou RLE) dos NAGs.

Para finalizar, cabe uma nota sobre a importância dos NAGs e quasares no contexto evolutivo de suas galáxias hospedeiras e do Universo. Os NAGs mais ativos, como vimos, não são observados nas vizinhanças de nossa Galáxia, mas a distâncias de 10 bilhões de anos-luz. Isso indica que o número de NAGs decresceu no curso do tempo. O tempo de vida de um NAG é de cerca de 100 milhões de anos e é notável que a parte do Universo que contenha os NAGs mais ativos esteja a 10 bilhões de anos-luz daqui. Ainda não se sabe se todas as galáxias tiveram, em alguma fase de sua vida, um núcleo ativo, mas a maior parte delas, inclusive a nossa, possui um núcleo com atividade bem pequena. NAGs são palco de atividade bastante violenta durante um tempo muito pequeno comparado ao de vida médio de uma galáxia. Dessa forma, sua atividade, na maioria dos casos, deve ter possivelmente pouca influência sobre o resto da galáxia.



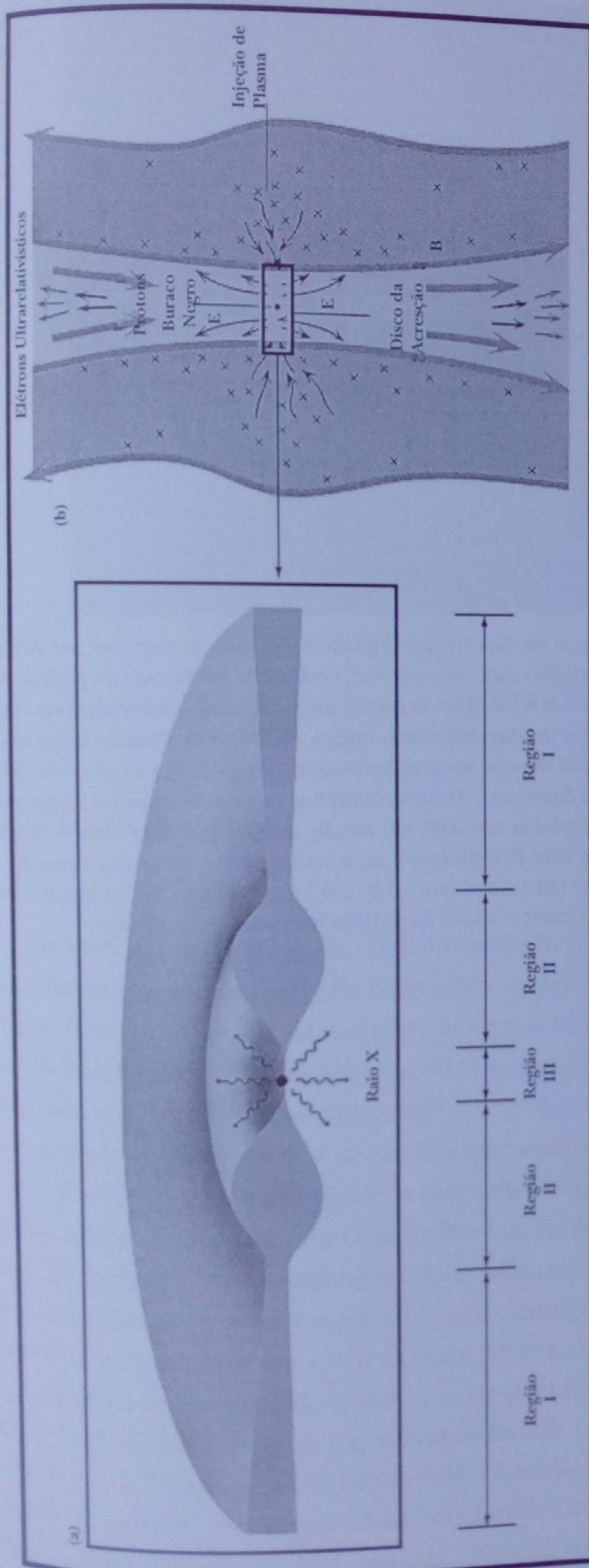


Figura 11.7. O modelo de buraco negro com disco de acreção para NAGs. (a) O campo gravitacional do buraco negro tende a engolir o gás que o circunda. O efeito combinado da gravidade e da força centrífuga resultante da rotação do gás ao redor do buraco faz com que o gás forme um disco achatado (região I). O gás é aquecido por sua própria viscosidade e acelerado pelo campo gravitacional em direção ao buraco negro. À medida que se aproxima o buraco, a temperatura do gás cresce e o disco infla, ficando mais espesso e formando um bojo (região II). Próximo ao buraco, a temperatura cresce para milhões de graus e o fluido torna-se turbulento (região III). Cerca de 80% da energia irradiada pelo gás, antes de cair no buraco negro, é em forma de raios X, nessa região. A região I é 20 vezes maior que a região II, que por sua vez é 100 vezes maior que a região III. (b) O gás que circunda o buraco negro e o disco de acreção contém campos magnéticos ( $\vec{B}$ ). O campo magnético do disco cria um campo elétrico ( $\vec{E}$ ) perpendicular ao disco. Elétrons e prótons do gás são, então, acelerados nas duas direções perpendiculares ao disco, criando os jatos de elétrons relativísticos responsáveis pela emissão sincrotrônica observada.

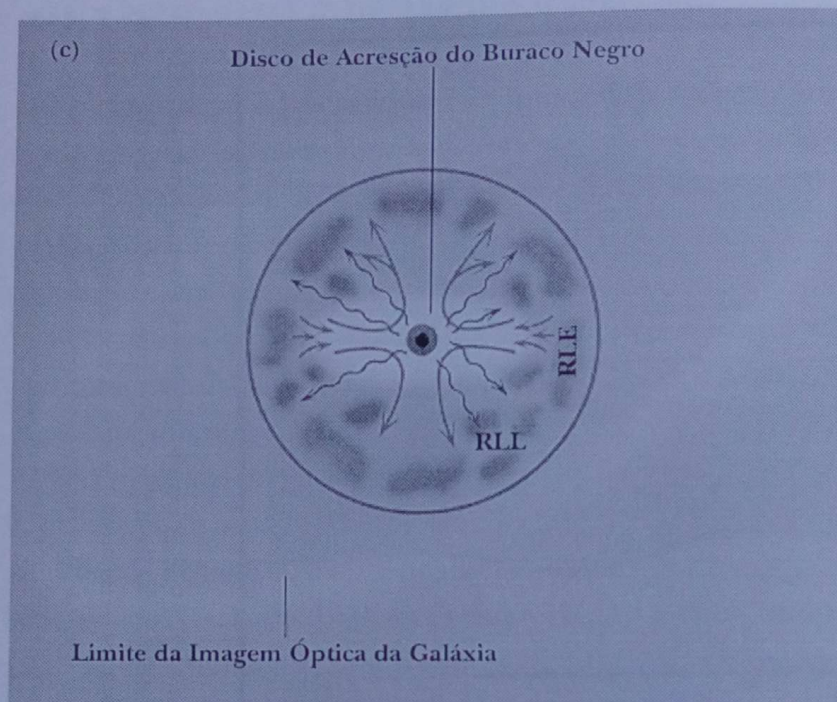


Figura 11.8. O disco de acreção e o buraco negro (Figura 11.7) são circundados por pequenas nuvens de gás e esta região está, por sua vez, embebida no núcleo da galáxia visível. As nuvens que circundam o disco de acreção são aquecidas e ionizadas pela emissão ultravioleta e raio X das bordas do buraco negro. As linhas de emissão largas são produzidas nas nuvens mais densas, localizadas num volume de raio igual ao do disco de acreção (nuvens mais internas). As linhas estreitas surgem nas nuvens menos densas e mais externas. O diagrama não está em escala; o raio da região onde se origina a radiação ultravioleta e raio X é de 0,001 pc; o raio da zona contendo as nuvens que produzem linhas largas (RLL) está entre 0,01 e 0,1 pc; a zona de linhas estreitas (RLE) estende-se por 1 pc ou mais; e o raio da galáxia hospedeira é de 10 kpc.