

# Núcleos galácticos activos e fontes extragalácticas de radiofrequência

MARIA JOÃO MARCHÃ

Centro de Electrodinâmica, Instituto Superior Técnico, Lisboa

ANTÓNIO A. DA COSTA

Centro de Electrodinâmica, Instituto Superior Técnico, Lisboa  
Universidade de Évora

*O objectivo deste artigo é apresentar uma visão geral do domínio dos Núcleos Galácticos Activos e Fontes Extragalácticas de Radiofrequência. Procura-se estabelecer de forma concisa, não só as grandes áreas de investigação actuais, como também o conhecimento gerado pelo trabalho realizado.*

## 1. Introdução

A concepção de Astronomia, e consequentemente a compreensão do universo, sofreu grandes alterações com o advento das novas astronomias, nomeadamente a radioastronomia, a astronomia de infravermelho, de ultra-violeta, raios-X e raios- $\gamma$ . Assim, os objectos anteriormente observados exclusivamente na zona do visível, passaram a poder ser estudados em qualquer região espectral, «inundando» os astrónomos com novos e fascinantes dados, que revolucionaram o conceito de universo «calmo». Por exemplo, embora alguns objectos tivessem uma aparência estelar numa placa fotográfica, as suas características mostraram ser bem distintas daquelas que os astrónomos estavam habituados a observar até então. Foram assim designados por QSO (do inglês «Quasi-Stellar-Objects»), e apresentavam as seguintes propriedades:

- i) Aparência estelar;
- ii) Grandes desvios das riscas espectrais para o vermelho, medidos por um parâmetro  $z = \Delta\lambda/\lambda$  onde  $\Delta\lambda$  é o desvio da risca, e  $\lambda$  o seu comprimento de onda;
- iii) Elevado fluxo de radiação ultra-violeta;
- iv) Luminosidade variável;
- v) Largas riscas de emissão.

Esta classe de objectos foi durante algum tempo considerada única, embora posteriormente fosse aceite como um dos vários exemplos da actividade nos núcleos de determinadas galáxias. Para este facto contribuíram as descobertas das riscas de absorção e elevados fluxos de radiação noutros domínios de frequência.

Nesta perspectiva, fala-se então de galáxias activas como sendo aquelas cuja potência radiada excede a de uma galáxia dita normal. Estas, são consideradas um aglomerado de cerca de  $1.10^{11}$  estrelas que se encontram numa configuração gravitacional estável, emitindo radiação através de processos térmicos. Contrariamente às galáxias normais, as activas apresentam excesso de radiação de origem não térmica, concentrada no núcleo (ver Tabela 1).

Surgiu assim a designação de núcleos galácticos activos (NGA), para a pequena região central da galáxia onde parece ter origem o excesso de radiação. Existem vários tipos destes objectos classificados de acordo com o agrupamento de determinadas propriedades tais como a polarização, luminosidade, espectro, desvio para o vermelho e morfologia. Apesar de apresentarem características comuns, as

diferentes classes apresentam determinadas propriedades específicas que estão em geral relacionadas com o nome atribuído. Existe no entanto uma certa ambiguidade neste domínio uma vez que diferentes autores e observadores «baptizam» os mesmos objectos com nomes diferentes. Esta ambiguidade, aliada às limitações ao nível de observação, justifica a carência de estudos estatísticos completos relativos às diferentes classes de objectos relativamente ao conjunto global das fontes.

TABELA 1 — Nesta tabela são apresentadas as luminosidades bolométricas ( $L_{bol}$  é a luminosidade «integrada» em todas as frequências), de 3 quasars em comparação com a galáxia normal mais luminosa ( $L_G$  é a luminosidade óptica da Via Láctea). Foram usados os valores de  $H_0 = 50 \text{ Kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  para a constante de Hubble e  $q_0 = 0.1$  para a parâmetro de desaceleração (segundo Kourganoff, 1980).

| Nome      | Tipo                         | $L_{bol}/L_G$ | $z$   |
|-----------|------------------------------|---------------|-------|
| Mrk 231   | Galáxia normal mais luminosa | 400           | —     |
| 3C 273    | Quasar                       | 3000          | 0.158 |
| 3C 232    | Quasar                       | 20000         | 0.529 |
| Q0420-388 | Quasar                       | 50000         | 3.12  |

Classificaremos os objectos em quatro grandes classes, de acordo com Witta (1985):

Quasars;

Radiogaláxias;

Galáxias Seyfert (Sy)

BL Lacertae (BL Lac).

Outras classificações foram propostas para certas fontes extragalácticas, que não foram aceites pela maioria dos autores. Assim num estudo mais aprofundado (Witta, 1985; Marchã, 1986) é possível discutir objectos como as galáxias N e as Markarianas (Mrk), as OVV (do inglês «Optically Violently Variable Galaxies»), NELG (do inglês «Narrow Emission Line Galaxies») e os LINER (do inglês «Low Ionization Nuclear Emission-line Region»). No

presente trabalho estas últimas categorias serão consideradas como subclasses de algumas das quatro grandes classes referidas ab-initio. Maior detalhe poderá ser encontrado em Witta (1985) ou Marchã (1986).

O estudo destes objectos tem por objectivo o entendimento completo do seu funcionamento, origem e evolução. Porém esta teorização envolve um conjunto de problemas complexos com várias perspectivas contraditórias, de que procuremos dar informação neste artigo.

## 2. Observação

Num estudo aprofundado destes objectos é possível discutir as suas propriedades em todas as regiões do espectro. No presente estudo fala-se fundamentalmente no domínio da radiofrequência e do seu papel determinante na classificação dos NGA. As características destes objectos noutras frequências são igualmente determinantes para a sua compreensão, porém elas constituem ainda uma pequena parcela do conhecimento geral das fontes. Tão grande discrepância tem a ver com a história do desenvolvimento das astronomias não ópticas, e não com quaisquer propriedades intrínsecas dos objectos que privilegiem a radioastronomia, pois esta foi de entre as novas astronomias, aquela que mais cedo se desenvolveu. O seu início deu-se há mais de meio século com a detecção de ondas rádio provenientes do centro da galáxia por Jansky, estando intimamente ligado ao aparecimento destes objectos, simultaneamente espectaculares e intrigantes, as fontes extragalácticas de radiofrequência.

Na radioastronomia, tal como na astronomia óptica, pretende-se obter radiofotografias cujo detalhe seja semelhante às fotografias usuais. Este objectivo se do ponto de vista teórico não levanta problemas novos, o mesmo não se poderá dizer sobre o seu aspecto prático. Trata-se de resolver estruturas com dimensões angulares de paralaxe da ordem de fracções de segundo de arco, o que implica a

construção de sistemas de incomportáveis dimensões.

Como alternativa a estes «gigantes» surge a hipótese da radio-interferometria como poderoso método de resolução das fontes. Associada à radiofotografia, temos sempre a sua transformada de Fourier em frequências espaciais. Basicamente, aquilo que um radiointerferómetro mede é a transformada de Fourier da distribuição de intensidade da fonte, que uma vez obtida permite traçar um mapa desta (radiofotografia).

Presentemente o método mais poderoso de observação de que se dispõe é o VLBI (do inglês «Very Long Baseline Interferometry»), com o qual se conseguem resoluções da ordem dos  $1.10^{-4}$  '' arc, para um comprimento de onda de 21 cm, com linhas de base da ordem das centenas de quilómetros (da Costa, 1990), ou seja, resoluções superiores àquelas que se obtém para o domínio óptico.

Assim o aspecto apresentado por determinada fonte de rádio pode variar muito, consoante a escala e frequência em que é observada. A conjugação destes dois factores permite distinguir com maior ou menor pormenor as características de determinada fonte (ver Fig. 1), e definir-se vários tipos de morfologias de acordo com a resolução do método de observação utilizado. Contudo, independentemente da classe morfológica atribuída a uma determinada fonte, existem características específicas que lhe são inerentes. São elas:

- a) *Lóbulos*: regiões de luminosidade reduzida aparecendo, na maior parte das vezes, simetricamente de cada lado da galáxia óptica. Estas estruturas podem estender-se por alguns Mpc ( $1 \text{ pc} = 3.09 \times 10^{16} \text{ m}$ );
- b) *Manchas quentes* (do inglês «hot spots»): regiões de maior luminosidade que estão ainda inseridas nos lóbulos e cujas dimensões típicas são de alguns Kpc;
- c) *Jactos*: estruturas alongadas e finas que parecem ter origem no núcleo e que acaba nas regiões mais extensas, i.e., nos lóbulos.

Uma das características mais importantes para a distinção destes objectos é o tipo de

espectro contínuo apresentado. De facto, enquanto as fontes ditas normais apresentam um espectro de origem térmica, i.e., espectros que obedecem à lei de Planck, estes objectos apresentam um espectro que obedece a uma lei de potência do tipo

$$F(\nu) \propto \nu^\alpha$$

em que  $\alpha$  assume diversos valores conforme a frequência  $\nu$  em que se observa. Esta característica comum a todas as fontes é de extrema importância para o seu desenvolvimento teórico, como aliás se verá mais adiante.

## 2.1. Classificação das fontes

Até agora falou-se destes objectos como um todo, isto é, foram apresentadas as características comuns a todos eles como sendo propriedades únicas de uma classe de objectos a que se chamou NGA. Estamos então suficientemente familiarizados com este tipo de fontes para podermos distinguir de entre elas as 4 classes anteriormente mencionadas. Assim, apresentam-se de seguida, e de forma muito resumida, as principais características de cada uma dessas classes.

### 2.1.1. Quasars

Estes objectos são muitas vezes identificados com QSO. Porém esta designação pode ter um significado mais amplo, não sendo por isso utilizada no presente trabalho. São exemplos desta classe as fontes 3C49, 3C273 e 3C345 (ver Fig. 2a e 2b). As suas características são:

- i) Aparência estelar;
- ii) Forte excesso de radiação ultra-violeta em relação às estrelas da sequência principal;
- iii) Emissão óptica variável;
- iv) Riscas de emissão permitidas com uma largura superior a  $20 \text{ \AA}$  no referencial do objecto, e algumas riscas de absorção;
- v) Grandes desvios para o vermelho que ao supor-se devido à expansão do universo, implicam uma grandeza absoluta da ordem de  $M_V = -82$  (com-

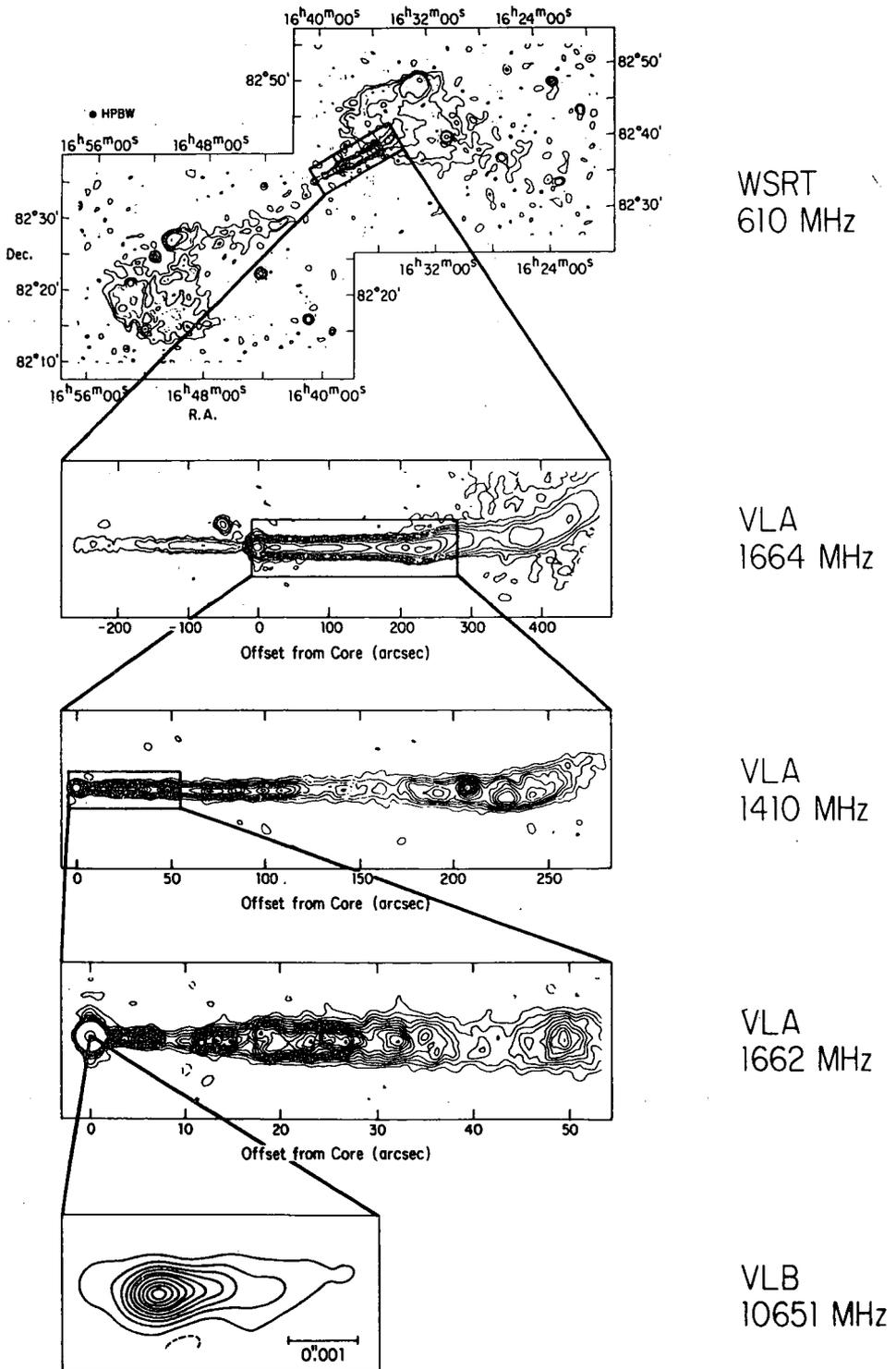
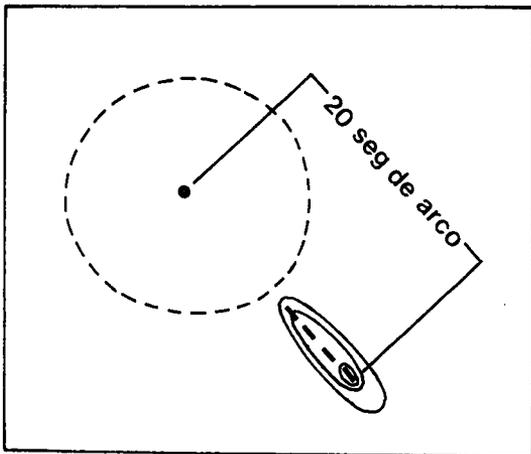
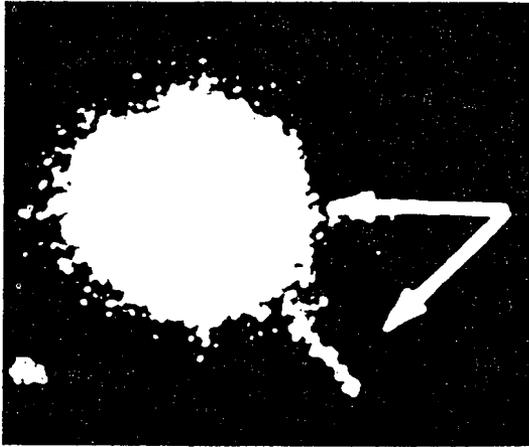
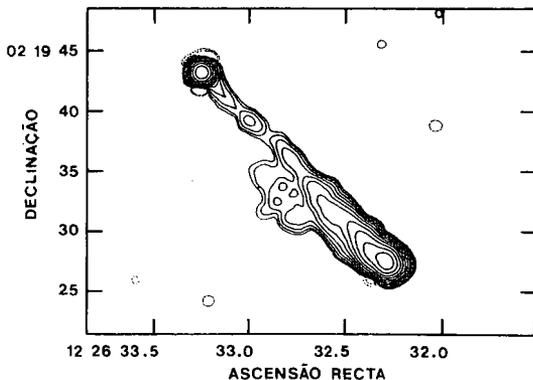


Fig. 1 — Montagem ilustrada da fonte NGC 6251 para diferentes escalas angulares. Ao lado indicam-se os radio-interferómetros utilizados (WSRT: Westerbork, Holanda; VLA: Very Large Array, Novo México, EUA; VLB: Radiointerferometria intercontinental), e as frequências em que se observaram os diferentes detalhes da fonte (segundo Begelman *et al.*, 1984).

pare-se este valor com os mais luminosos enxames de galáxias cuja grandeza absoluta é  $-26 \leq M_v \leq -22$ ).



(a)



(b)

Fig. 2 — (a) Fotografia e desenho esquemático da fonte 3C 273 (segundo Sciama, 1973); (b) Mapa de contorno da mesma fonte 3C 273 a 408 MHz (segundo Thomasson, 1986).

Contrariamente àquilo que inicialmente se esperava, a distribuição espacial destes objectos não é uniforme. Na realidade, a lei observada corresponde a  $\log N \sim -1.8 \log l$ , em que  $N$  é o número de quasars existentes num determinado ângulo sólido com luminosidade aparente  $l$ . Com base nas observações disponíveis entre 1973 e 1982, verificava-se que este número aumentava até  $z$  próximo de 2.5, sofrendo em seguida um decréscimo acentuado seguido de um corte brusco para  $z \sim 3.5$ .

Este facto conduziu a duas ideias contraditórias sobre a natureza do fenómeno. Seria este corte devido a efeitos de selecção nas condições de observação, ou seria antes de facto esta a data de nascimento destes objectos, podendo neste último caso o corte estar relacionado com a formação das próprias galáxias, e fornecendo assim um elo de ligação entre os quasars e as galáxias actuais?

Para ultrapassar esta situação assistiu-se a um extremo desenvolvimento das técnicas de observação (Osmer, 1982; Hazard & McMahon, 1985), o que permitiu descobrir quasars com  $z > 3.5$ , observação que favorece a primeira hipótese. Porém o seu número é bastante inferior ao número de quasars com  $z < 3.5$ , o que reforça a segunda hipótese. A recente descoberta de cinco destes objectos com um desvio para o vermelho superior a 4, continua a encorajar os observadores de forma a detectar quasars cada vez mais distantes, fazendo prever que num futuro próximo quasars com  $z > 5$  sejam descobertos. O quasar mais afastado que se conhece hoje é a fonte Q0051-279 cujo  $z = 4.43$  (Warren *et al.*, 1987).

### 2.1.2. Radiogaláxias

Esta classe de objectos diz respeito às fontes extragalácticas que emitem consideravelmente mais energia no domínio de radiofrequência do que em qualquer outro. Mais especificamente, as radiogaláxias radiam potências da ordem  $P_{408} > 1.E23 \text{ W Hz}^{-1}$  (em que o sub-índice 408 significa 408 MHz).

Estes objectos são normalmente constituídos por um núcleo central e duas regiões extensas denominadas lóbulos, e que são quase sempre responsáveis pela maior parte da emissão de radiofrequência (ver Fig. 3).



Fig. 3 — Radiofotografia de uma radiogaláxia típica, em que se mostra a galáxia central (visível) e os dois lóbulos emissores de radiofrequência (segundo Bowers & Deeming, 1984).

Com o desenvolvimento das técnicas de radio-interferometria começou a ser possível melhorar as observações neste domínio de frequência, permitindo aos observadores estudar não só a estrutura extensa destas fontes, como também a sua estrutura compacta.

Assim, em relação à estrutura extensa — note-se que estas fontes podem estender-se por regiões enormes da ordem das centenas de Kpc e até de alguns Mpc (ver Fig. 4) — definem-se

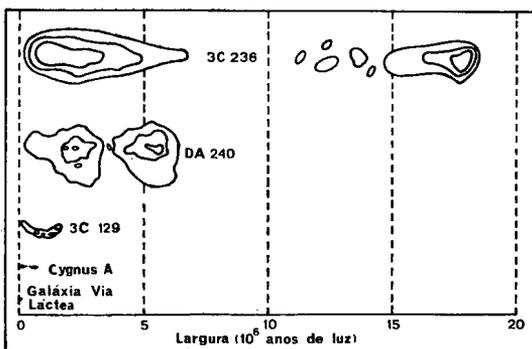


Fig. 4 — Desenho esquemático ilustrativo da diferença de escala entre algumas radiogaláxias e a própria Via Láctea (segundo Kaufmann III, 1985).

várias morfologias conforme o valor do ângulo entre os seus dois lóbulos, sendo as fontes duplas clássicas (lóbulos a 180°) aquelas que mais interesse suscitam.

Determinadas regiões pertencentes aos lóbulos, e que podem atingir alguns kpc, apresentam maior luminosidade que a estrutura que as rodeia sendo, por essa razão, denominadas por manchas quentes. Pensa-se que estas regiões estejam relacionadas com a interação do plasma, ou do feixe de partículas, com o gás extragaláctico. Quanto à sua localização ela pode variar ao longo de toda a extensão do lóbulo não parecendo haver qualquer preferência.

Outra característica importante das fontes de rádio são os jactos. Estes apresentam dimensões variadas que podem ir desde 1 pc até extensões de 400 Kpc, e os seus índices espectrais não se afastam muito do valor médio  $\langle \alpha \rangle = -0.6$ .

Relativamente à estrutura compacta destas fontes, e de acordo com Miley (1980), existem dois tipos de núcleos:

- 1) Núcleos ultra compactos com dimensões inferiores a 1pc, e tipicamente com  $\alpha < -0.5$ ;
- 2) Núcleos cujas dimensões são tipicamente de alguns Kpc, apresentando  $\alpha < -0.4$ .

Os núcleos em que os espectros são mais pronunciados tendem a ter maiores luminosidades e mostram muitas assimetrias à escala do seg. de arco, enquanto que os menos luminosos tendem a mostrar-se mais simétricos. São exemplos desta classe as fontes Cyg A, 3C 449 e NGC 6251.

### 2.1.3. Galáxias Seyfert (Sy)

Estas galáxias receberam o nome do seu «primeiro observador» após a publicação em 1943 dos resultados sobre 6 galáxias espirais que foram os protótipos seguidos.

Estas galáxias são espirais intermédias, possuidoras de um núcleo de aparência estelar

responsável por grande percentagem da luminosidade de todo o sistema, e que apresentam riscas de emissão largas (0-100 Å). De uma maneira geral pode dizer-se que esta classe morfológica é constituída por objectos de aspecto nebuloso e que apresentam largas riscas de emissão no seu espectro (Wiita, 1985).

De acordo com este autor, cerca de 1% de todas as galáxias espirais são galáxias Seyfert, estando ainda por esclarecer a razão de tal valor. Será este um fenómeno raro embora duradouro ou, alternativamente, é o fenómeno Seyfert uma fase curta de todas as espirais?

Tradicionalmente dividem-se estas galáxias em duas subclasses:

- i) Sy I — são Seyferts que apresentam riscas permitidas muito largas e riscas proibidas mais estreitas. São exemplos as Mrk 1243 e a NGC 4151;
- ii) Sy II — são Seyferts que apresentam riscas permitidas e proibidas com larguras semelhantes. São exemplos deste tipo as Mrk 1157 e NGC 1068.

Antonucci (1983) e Antonucci & Miller (1985) levantam a hipótese de a distinção entre os dois tipos de Seyfert poder estar relacionada com o valor do ângulo compreendido entre a direcção de polarização no domínio óptico, e o eixo de radiofrequência. As poucas observações efectuadas neste sentido são consistentes com o facto de no primeiro caso este ângulo ser praticamente 0°, enquanto que no segundo ele seria de aproximadamente 90°. A ser confirmado, este facto deverá ser convenientemente interpretado.

Tal como já foi referido na anterior classe de objectos, alguns autores distinguem outros tipos de galáxias Seyfert. Por exemplo, as designações Sy 1.5, 1.8 e 1.9 estão associadas a combinações determinadas entre as riscas espectrais (ver Osterbrock, 1984).

A maioria das galáxias Seyfert não são fortes emisoras de radiofrequência. De facto, as suas luminosidades nesta região espectral varia entre  $1.10^{32}$  e  $1.10^{34}$  W (Witta, 1985), o que constitui 4 ou 5 ordens abaixo da sua luminosidade bolométrica. Dos estudos feitos

até à data, parece haver evidência de que as Sy II são fontes de radiofrequência mais fortes que as do tipo I, não parecendo no entanto estar relacionadas a qualquer estrutura dupla.

#### 2.1.4. B1 Lacertae (BL Lac)

Estes objectos foram nomeados à semelhança dos primeiros detectados, não devendo por essa razão ser confundido a fonte BL Lac, com a classe do mesmo nome.

As suas propriedades são as seguintes:

- i) Ausência de riscas de emissão provenientes do núcleo da fonte;
- ii) Rápida variabilidade na zona de radiofrequência, infravermelho e óptico;
- iii) Espectro contínuo não térmico com a maior fracção da luminosidade proveniente do infravermelho;
- iv) Polarização forte e rapidamente variável.

Apesar de terem sido posteriormente detectadas algumas riscas de emissão e absorção nos espectros de alguns destes objectos, graças ao desenvolvimento técnico relativamente à resolução, o que é certo é que esta continua a ser a principal característica destes objectos, dificultando por isso a determinação dos seus desvios para o vermelho. Porém, a propriedade talvez mais surpreendente destas fontes é a rápida variação, quer na luminosidade, quer na polarização apresentada por estes objectos.

Estas fontes que parecem estar relacionadas com galáxias elípticas, apresentam grandes dificuldades no seu estudo devido às duas características mencionadas anteriormente.

### 3. Modelos teóricos

O desenvolvimento teórico das fontes extragalácticas de radiofrequência assenta num pressuposto fundamental proposto por Alfvén e Herlofsen em 1950 e Shklovsky em 1953 que afirma ser o mecanismo base de emissão a radiação sincrotrónica, produzida por electrões relativistas com energias entre 100 MeV e

10 GeV, em presença de uma indução magnética entre  $1.10^{-10}$  e  $1.10^{-5}$  T (Begelman *et al.*, 1984).

De facto, admitindo que a energia dos electrões tem uma distribuição dada por  $N(E) \sim KE^{-n}$ , pode demonstrar-se que a densidade de fluxo de radiação de sincrotrão é:

$$F(\nu) \propto \nu^\alpha, \text{ com } \alpha = (1-n)/2$$

Embora o objectivo final de qualquer modelo teórico seja a compreensão da fonte na sua globalidade, é usual dividir-se o problema em duas grandes áreas: modelos para os núcleos e modelos para os jactos.

### 3.1. Modelos para os núcleos

Neste caso, a questão fundamental à qual se pretende responder é a do funcionamento da «máquina central» que é o núcleo activo da galáxia, e que se prende com dois assuntos essenciais:

- i) Qual o processo que dá origem à libertação de uma energia superior a  $1.10^{54}$ J, numa região de apenas alguns Kpc;
- ii) Como é que essa energia é depois transferida para os jactos.

Para tentar explicar estas questões existem várias hipóteses concorrentes, não devendo este facto causar surpresa, já que o fenómeno responsável é impossível de ser testado, além de provavelmente englobar mais do que um determinado processo. Vejamos então quais são estas hipóteses:

#### 3.1.1. Enxames de estrelas

Foi sugerido que a actividade das galáxias e quasars tenha origem num sistema muito denso de estrelas. Para isso bastaria reunir cerca de  $1.10^8$  estrelas do tipo O num volume aproximado de 1 pc (Begelman *et al.*, 1984).

Esta hipótese levanta no entanto algumas dificuldades:

- O espectro obtido com este sistema não é o mesmo que se observa;
- A eficiência do processo de conversão massa-energia conseguido é muito baixa, o que significa uma vida média demasiadamente curta para estes objectos;
- Para satisfazer as necessidades energéticas destas fontes torna-se necessário recorrer a um elevado número de colisões ou explosões. Por exemplo, para se verificar uma potência de  $1.10^{42}$  W, seriam necessárias 5 a 10 explosões de supernovas por ano.

#### 3.1.2. Spinares

Contrariamente à hipótese anterior, sistemas com massas inferiores a  $1.10^8 M_\odot$  (em que  $M_\odot$  é a massa solar), tendem a formar estrelas supermassivas. Estas, quando dotadas de um movimento de rotação e associadas a um campo magnético, são vulgarmente denominadas spinares. Estes objectos estão de acordo com estudos feitos (Valtonen, 1984), sujeitos a instabilidades diversas que os levam a fragmentar. Se combinarmos esse facto com a sugestão de que as fontes duplas de radiofrequência são o resultado da expulsão de matéria por parte da região central, então teremos uma hipótese de explicação da estrutura dupla bastante interessante. Apesar de toda a teoria inerente a este problema se encontrar ainda aquém das necessidades, ela levanta hipóteses concretas na solução do problema:

- Formação de spinares através da agregação de gás para o centro das galáxias;
- Bifurcação e colapso de spinares;
- Interação do plasma com o meio interestelar para a explicação das regiões extensas emissoras de ondas rádio.

#### 3.1.3. Buracos negros

Os buracos negros são considerados por muitos autores o estágio final dos enxames das estrelas e das estrelas supermassivas, razão pela qual se tornam na solução mais atraente para o fenómeno NGA. Uma vez admitidos como base central destas fontes, torna-se necessário explicar três aspectos essenciais: (A) extracção de energia, (B) modos de agregação e (C) formação de jactos.

### (A) *Extracção de energia*

Neste domínio continua ainda a haver muitas dificuldades quanto à elaboração de um modelo completamente estruturado devido à complexidade do problema. Concretamente existem vários autores que tentam conjugar o conhecido efeito de Penrose dos buracos negros de Kerr, com o efeito de Compton inverso — efeito de Compton entre electrões relativistas e fotões de baixa frequência — e a produção de pares, enquanto outros tentam formar modelos de extracção de energia e momento angular do buraco negro através de processos electromagnéticos complicados. Qualquer uma destas frentes de investigação encontra dificuldades diversas devido à falta de conhecimento de soluções da magneto-hidrodinâmica em espaço de tempos curvos.

### (B) *Modos de agregação*

Se bem que a questão da origem da máquina central possa estar resolvida, é contudo necessário estabelecer como ela é mantida, já que a produção de energia sem contrapartidas está fora de questão. É óbvio que um objecto destes tem de ser excelentemente «alimentado» para dar origem às enormes luminosidades observadas. O que deixa de ser óbvio é o processo pelo qual se dá esta manutenção.

A proposta geralmente aceite consiste num processo de captura gravitacional de matéria circundante de um objecto compacto central. Este processo designado por agregação de matéria («accretion») é de bastante difícil resolução, encontrando-se apenas resolvido para alguns casos mais simples. De forma muito resumida, pode dizer-se que a agregação se pode fazer de duas maneiras: agregação quase esférica (sem momento angular), e agregação com momento angular diferente de zero. Neste último caso podem distinguir-se duas situações:

- i) Discos — em que o gás descreve órbitas Keplerianas;
- ii) Torus — cuja forma depende da distribuição do momento angular, e cuja eficiência é inferior à dos anteriores.

### (C) *Produção de jactos*

Para a produção de jactos é necessária a verificação de duas condições:

- i) O material expelido tem de possuir uma energia que lhe permita escapar à atracção gravitacional do objecto central;
- ii) Tem de haver um processo através do qual seja possível estabelecer uma colimação desse mesmo material.

Apesar de haver várias hipóteses para a explicação deste fenómeno, só o modelo de Blandford e Rees (1974) apresenta a teoria de uma forma integrada. Este modelo, apesar das simplificações feitas, procura explicar a ocorrência das fontes duplas de radiofrequência, considerando um fluxo adiabático numa aproximação unidimensional de um plasma cuja velocidade de propagação é superior à do som no meio. Este percorre um canal cuja secção varia de acordo com o balanço de pressão na superfície das suas paredes, e atravessa um ponto crítico denominado «nozzle», a partir do qual o canal alarga à medida que a pressão decai, conseguindo assim explicar a pré-colimação dos jactos.

### 3.2. **Jactos**

Neste domínio existem três questões fundamentais a ser estudadas: colimação, emissão de radiofrequência e interacção com o meio ambiente.

Para a compreensão do fenómeno da colimação é imprescindível um melhor conhecimento do campo magnético na região, sem o qual não se pode avançar muito mais.

Relativamente à segunda questão, é geralmente aceite que a radiação de sincrotrão é também responsável pela emissão de radiação dos jactos, embora existam outros processos capazes de explicar o espectro observado. No entanto, a admitir-se a primeira hipótese ter-se-á de supor uma aceleração local dos electrões, já que as dimensões das fontes são grandiosas.

Finalmente, o aparecimento de manchas quentes e de invólucros dos jactos são normal-

mente interpretados como a interacção deste com o meio ambiente.

Para que a física dos jactos seja totalmente compreendida será necessário conhecer, entre outras coisas, as velocidades do jacto no meio, suas densidades e campos magnéticos.

#### 4. Conclusões

O melhor conhecimento destas fontes passa necessariamente pelo desenvolvimento de dois grandes domínios:

- a) Domínio da observação;
- b) Domínio da teoria.

Estes dois domínios estão obviamente intrinsecamente ligados, estando o desenvolvimento de um deles condicionado pelo do outro. De facto, a observação encontra-se muito mais desenvolvida que a teoria, mas esta levanta questões para as quais não foram ainda feitas observações, ou então não existe ainda um número suficiente de dados que permita a realização de estudos estatísticos, provocando assim um impasse no desenvolvimento teórico.

No que diz respeito à observação, não estão ainda exploradas todas as potencialidades, quer ao nível das novas astronomias, quer ao nível das técnicas de interferometria. Projectos como o de montagem de uma antena orbital de 15 m (projecto QUASAT), o lançamento do telescópio orbital e de satélites que visam sobretudo a exploração no domínio dos raios-X, trarão concerteza muitos dados importantes para a melhor compreensão destes objectos.

Relativamente ao domínio da teoria, muitas são as áreas que permanecem por investigar. Essencialmente, é necessário estudar a magnetoplasmadinâmica em geral, e a sua aplicação em espaço-tempo curvos em particular. É sobretudo importante a simulação numérica de códigos plasmadinâmicos sofisticados. Sem o desenvolvimento destas duas questões é impossível pensar-se em compreender o processo que mantém activa a fonte, ou como são expelidos os jactos e lóbulos, ou seja, não será possível conhecer o fenómeno responsável pela existência dos Núcleos Galácticos Activos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a valiosa cooperação do Sr. Manuel Quintas, desenhador gráfico do Complexo Interdisciplinar I do Instituto Nacional de Investigação Científica na realização e montagem das figuras números 2 e 4.

#### BIBLIOGRAFIA

A bibliografia apresentada, salvo casos singulares, é formada por artigos de revisão. Para um estudo mais especializado podem ser consultadas as referências indicadas nas obras assinaladas.

- ANTONUCCI, R. R. — *Nature*, **303**, 193 (1983).
- ANTONUCCI R. R. & MILLER, J. S. — *Astrophys. J.*, **297**, 621 (1985).
- BEGELMAN, M. C., BLANDFORD, R. D. and RESE, M. J. *Rev. Mod. Phys.*, **56** (2), 255 (1984).
- BLANDFORD, R. D. and REES, M. J. — *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **169**, 395 (1974).
- BOWERS, R. and DEEMING, T. — «Astrophysics II: Interstellar Matter and Galaxies», Jones and Bartlett Inc., Boston (1984).
- DA COSTA, A. A. — Em preparação (1990).
- HAZARD, C. & MCMAHON, R. — *Nature*, **314**, 21 (1985).
- KAUFMANN III, W. J. — «Universe», W. H. Freeman and Co. (1985).
- KOURGANOFF, V. — «Introduction to Advanced Astrophysics», D. Reidel Publishing Co. (1980).
- MARCHÃ, M. J. — «Núcleos Galácticos Activos e Fontes Extragalácticas de Radiofrequência», Relatório de estágio realizado no Centro de Electrodinâmica da Universidade Técnica de Lisboa, e submetido ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (1986).
- MILEY, G. — *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **18**, 165 (1980).
- OSMER, P. S. — *Astrophys. J.*, **253**, 28 (1982).
- OSTERBROCK, D. E. — *Q. Jl. R. Astr. Soc.*, **25**, 1 (1984).
- SCIAMA, D. W. — «Modern Cosmology», Cambridge University Press (1973).
- THOMASSON, P. — *Q. Jl. Astro. Soc.*, **27**, 413 (1986).
- VALTONEN, M. J. — *Q. Jl. R. Astr. Soc.*, **25**, 28 (1984).
- WARREN, S. J., HEWETT, P. C., OSMER, P. S. & IRWIN, M. J. — *Nature*, **330**, 453 (1987).
- WITA, P. J. — *Phys. Rep.* **123** (3), 117 (1985).