

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem o propósito de apresentar aos professores, estudantes e pesquisadores uma visão abrangente de uma área que é recente e cujos estudos ainda estão em fase de desenvolvimento, mas têm uma grande importância: a Astrofísica dos Jatos em diferentes classes de objetos. Nos dias de hoje, o rápido desenvolvimento da tecnologia e seus serviços como telecomunicações, informática, vôos de aeronaves, sondas espaciais, regiões onde transitam astronautas, nos traz a necessidade pesquisas mais aprofundadas do Espaço próximo e não próximo para o entendimento desses fenômenos.

Em 1965, utilizando um dos primeiros rádio-telescópios, Arno Penzias e Robert W. Wilson deram continuidade ao trabalho pioneiro de K. Jansky em 1931, ao detectar ondas rádio emitidas pela Via Láctea. Descobriram a Radiação Cósmica de Fundo. Foi assim que na década de 60 apareceram os primeiros rádio-telescópios e interferômetros em Cambridge, Jodrell Bank no Reino Unido e, em Sidney e Parkes na Austrália. Com eles foi detectada a existência de fontes emissoras de rádio-frequência.

A primeira evidência de jatos emanados do núcleo de galáxias foi a descoberta de um jato na galáxia elíptica M87 do aglomerado de Virgo (Curtis, 1918). Descobertas de que os jatos também podem ser produzidos em menores escalas por sistemas binários é mais recente. O objeto SS433 foi o primeiro com emissão de jatos descoberto em nossa própria Galáxia (Margon, 1979). Jatos luminosos de distantes quasares são exemplos de grandes fluxos colimados no Universo. Mas o que mais chama a atenção são jatos próximos à vizinhança terrestre, dentro da Via Láctea (galáxia em que se encontra a Terra, o Sol e os outros planetas do sistema solar). Estes jatos cobrem uma grande faixa de luminosidade, com diversos fatores de colimação. Os objetos estelares jovens, quando são vistos no visível, apresentam notável

estrutura em forma de jatos e lóbulos. Já no Centro Galáctico os jatos são mais débeis e pobremente colimados.

Os jatos em escala galáctica como nos objetos estelares jovens, objetos Herbig-Haro, objeto SS433, em particular fontes superluminais galácticas; e em escala extragaláctica como por exemplo nos quasares, nas galáxias ativas, nos objetos BL Lacertae, têm diferentes tamanhos, velocidades e quantidades de energia, porém suas morfologias são semelhantes. Assim um dos objetivos deste trabalho é fazer um estudo comparativo dos tipos de estruturas de jatos tanto em grande escala (jatos extragalácticos) como em pequena escala (jatos galácticos).

2 JATOS

Pode-se entender os jatos como canais que transportam matéria e energia da região central da fonte para o meio externo desta. Geometricamente, estes jatos são cônicos e estreitos, sendo fenômenos onipresentes no Universo. Possuem grande luminosidade e um alto grau de colimação.

Atualmente sabe-se que jatos são encontrados em Galáxias Ativas, Galáxias Seyfert, Quasares, Objetos BL Lacertae, Estrelas Jovens, Objetos Herbig-Haro, Estrelas de nêutrons, Sistema binários de Raios-X, Estrelas Simbióticas, Micro-quasares, Fontes Superluminais, Estrelas quentes e massivas (como Eta-Carinae), Nebulosas proto-planetárias, Gamma Ray Bursts (possuem jatos relativísticos), Sol (Espículas), Anãs-Marrons, em Eventos Transientes Luminosos na alta atmosfera da Terra (Sprites, Halos de Sprites, Elves, Jatos Azuis e Jatos Azuis Gigantes, Trolls, Gnomes, Pixels, Tigers, Relâmpagos esféricos), Cometas, em Io (lua de Júpiter).

Estudos mais recentes mostram que jatos com velocidades muito altas, da ordem de centenas ou milhares de quilômetros por segundo, podem ser observados em estrelas jovens (Reipurth & Bertout 1997), em núcleos de nebulosas planetárias, e até mesmo em anãs brancas.

O processo pelo qual um jato é acelerado e colimado ainda não é completamente compreendido, mas acredita-se que os conceitos aplicados para jatos extragalácticos também possam ser estendidos a jatos de objetos galácticos. Em ambos objetos (galácticos e extragalácticos), é possível extrair energia e momento angular da rotação de um buraco negro para produzir campos elétricos e magnéticos e possivelmente obter fluxos mais rápidos de jatos (Blandford e Znajek, 1977).

Evidências da precessão de jatos são observadas tanto em fontes galácticas, quanto extragalácticas. Uma causa natural para esse fenômeno é a mudança de direção do disco de acrecimento da fonte. Considerando o disco de acrecimento como uma composição de anéis circulares, cada anel tem um índice diferente de precessão. A combinação dos efeitos dessas diferentes precessões influenciam na inclinação do disco de acrecimento.

2.1 Jatos observados na alta atmosfera da Terra

Sprites, jatos azuis, jatos azuis gigantes, gnomes, trolls, pixels, tigers e elves são conhecidos pela sigla TLE's ou seja Transient Luminous Events (Eventos Transientes Luminosos).

- **Red Sprites**

Essas estruturas são fenômenos luminosos que se desenvolvem a altas altitudes (de 30 a 95Km) e ocorrem associados com tempestades elétricas. Estes tipos de jatos são predominantemente vermelhos e sua duração é de alguns milissegundos. Podem chegar a velocidades de aproximadamente 10^7 m/s. Eles são detectados à noite por câmeras monocromáticas de alta sensibilidade. Contudo, estas estruturas podem ser vistas a olho nu por pessoas que tiverem a visão bem adaptada ao escuro.

A região mais brilhante de um sprite alcança uma altitude de 60 a 65 quilômetros. A morfologia destes se assemelha a águas-vivas ou cenouras.

As primeiras imagens de um sprite foram obtidas em 1990 (Franz et al, 1990). O nome Sprite só foi empregado em 1995 (Sentman et al, 1995). Registros de relâmpagos para cima e descargas de alta altitude têm mais de 100 anos, mas apenas recentemente foram registrados como sprites. Na figura 1 pode-se observar os sprites alcançando a ionosfera.

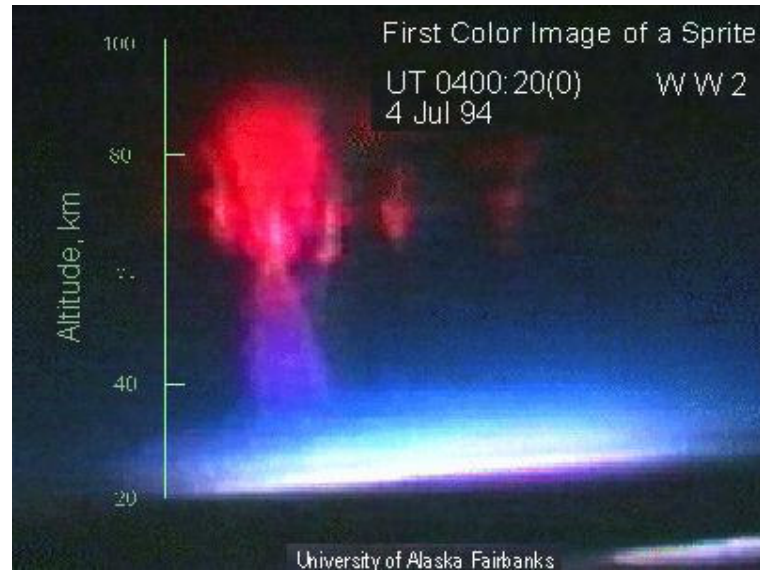


Figura1. Sprites que alcançam a ionosfera.

Fonte: NASA/University of Alaska, Fairbanks.

<http://www.public.asu.edu/~gbadams/lightning/lightning.html>.

- **Halos de Sprites**

Essas estruturas são discos luminosos que precedem os Sprites e se propagam de cima para baixo, ou seja, estes fenômenos acontecem em aproximadamente 85 quilômetros de altitude e chegam até 70 quilômetros. Estes fenômenos duram em média um milissegundo.

Até o ano de 1999, os Halos de Sprites, que podem ser vistos na figura 2, eram confundidos com Elves.

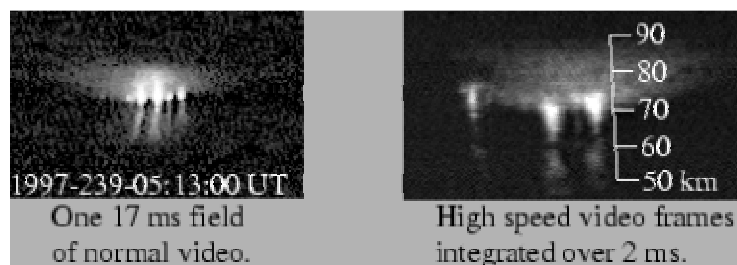


Figura 2. Halo de Sprite-Nota-se um halo largo e difuso, acima dos sprites.

Fonte: Universidade de Stanford.

<http://www-star.stanford.edu/~vlf/publications/theses/cpblThesis/node30.html>

- **Jatos Azuis e Jatos Azuis Gigantes**

Estas estruturas são ejeções ópticas provenientes do topo de regiões com núcleos eletricamente ativos de tempestades.

Estes jatos não estão alinhados com o campo magnético local. Propagam-se para cima em cones estreitos e alinhados com angulação de 15° . Possuem velocidades de aproximadamente 100km/s atingindo altitudes de até 40km. Sua duração é de alguns décimos de segundo.

Na figura 3 pode ser visto um jato azul gigante observado numa altitude de 90 km, tendo sido primeiro descrito como um híbrido de jato azul e sprite (parte superior lembra um sprite e a inferior um jato azul). Duração entre 200 e 400 milisegundos (maior do que dos sprites típicos). Altitude aproximada de 100 km na camada E da ionosfera.

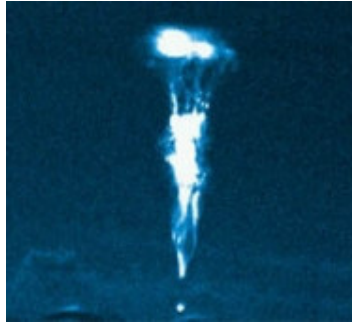


Figura 3. Jato azul gigante

Fonte: National Cheng Kung University.

<http://www.lorentzcenter.nl/lc/web/2007/265/presentations/Kuo.pdf>

- **Elves**

Elves são estruturas quase toroidais em expansão. É um fenômeno relativamente brilhante e de duração menor do que 500ms. Esse tipo de jato ocorre quando um pulso de energia eletromagnética se propaga pela ionosfera.

Estes jatos foram descobertos em 1991 e receberam este nome, pois são as iniciais cuidadosamente escolhidas do fenômeno que os originam: Emission of Light and Very Low Frequency perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources (Emissão de Luz e Perturbações de frequências muito baixas, devido a Pulsos Eletromagnéticos).

Na figura 4 pode ser vista uma imagem capturada em vídeo de um Elve acoplado com sprites.

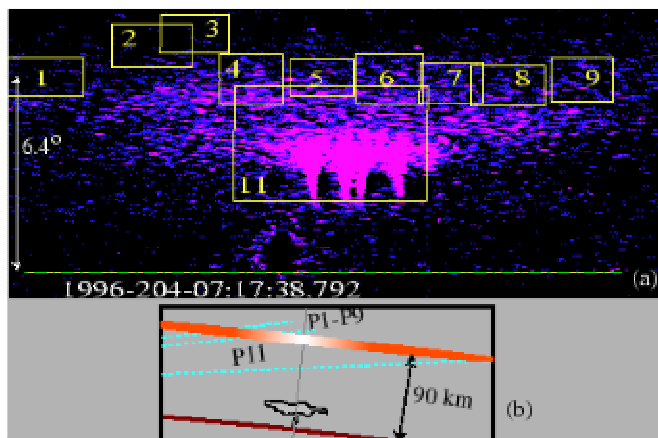


Figura 4. Um Elve comum acoplado com sprites. Duração de 33 milissegundos (Vídeo).

Fonte: Barrington-Leigh (2000).

<http://www.star.stanford.edu/~vlf/publications/theses/cpblThesis/node30.html>

A figura 5 mostra a detecção de um Elve azul particularmente muito brilhante. (vídeo) À direita é visto o registro desse elve por fotômetros, correspondendo a sua assinatura em Kr (unidades de brilhância). Pode-se notar a grande extensão do fenômeno, atingindo tamanhos laterais maiores que 250 km. O referencial em que o Elve foi visto se encontra no chão. Duração de 17 milissegundos. A figura 8 mostra um Elve visto de um avião.

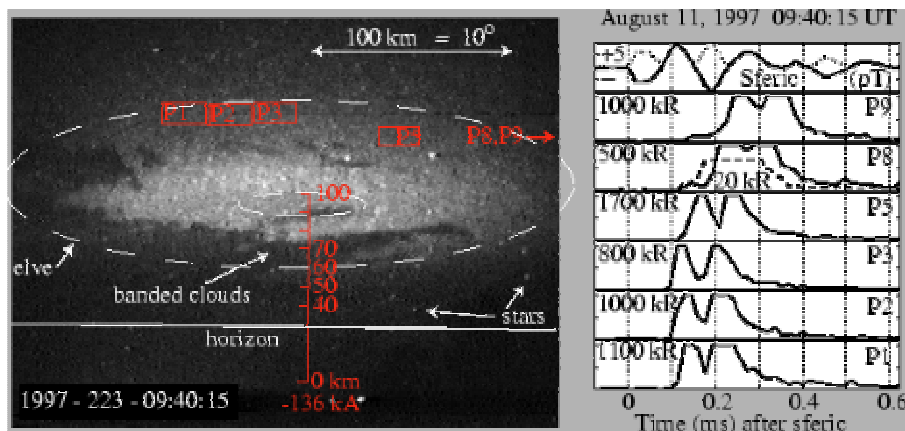


Figura 5. Detecção de Elve azul. Fonte: Tese da Universidade de Stanford

<http://www.star.stanford.edu/~vlf/publications/theses/cpblThesis/node30.html>

- **Trolls, Gnomes, Pixels e Tigers**

De todos os fenômenos que são observados na alta atmosfera da Terra, os Trolls assemelham-se aos Blue Jets, porém sua coloração é avermelhada e ocorrem depois dos Sprites .

Gnomes são fenômenos de pequena escala e muito breves. Tem características luminosas que apontam para cima, a partir do topo de nuvens carregadas. Têm aproximadamente 150 metros de largura por 1 km de altura e duram poucos microssegundos. Apresentam coloração branca em vídeos, como relâmpagos comuns.

Os Pixels são pontuais com dimensões menores que 100 metros. Em imagens de vídeo parecem espalhados numa superfície em forma de domo ou cúpula. Aparecem como flashes randômicos e têm coloração branca como relâmpagos comuns.

Os Tigers são uma nova espécie de Eventos Transientes Luminosos, descoberta em dezembro de 2004. Utilizou-se o satélite (TAIWAN) ROCSAT-2, lançado em 2004, para detectar sprites e elves pelo mundo todo. Na figura 6 pode-se ver o primeiro Tiger “capturado” no infravermelho.



Figura 6. Primeiro Tiger capturado em Madagascar em 20 de Janeiro de 2003, no infravermelho.

Fonte: MEIDEX/ISA/NASA. <http://geology.about.com/od/sprites/a/aa012305a.htm>

2.2 Jatos presentes no Sol

O Sol é dividido em três camadas: fotosfera, cromosfera e coroa solar como pode ser visto na figura 7. Na cromosfera, pode-se presenciar a emissão de jatos brilhantes de gás que se elevam até 10000 quilômetros acima da cromosfera e possuem uma velocidade de aproximadamente 20 quilômetros por segundo. Esse fenômeno de ejeção de gás é chamado de espícula.

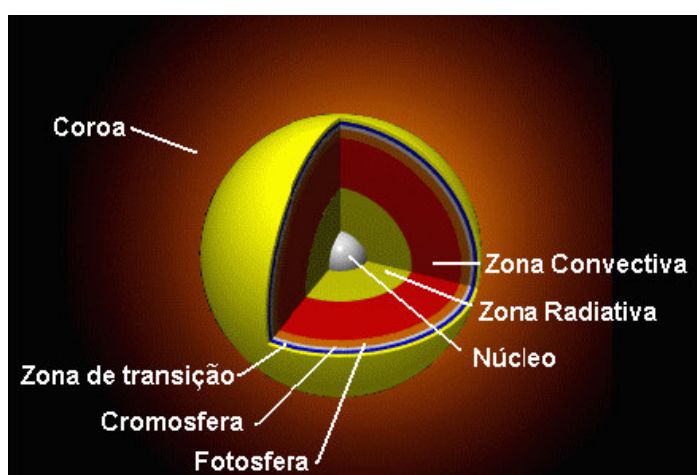
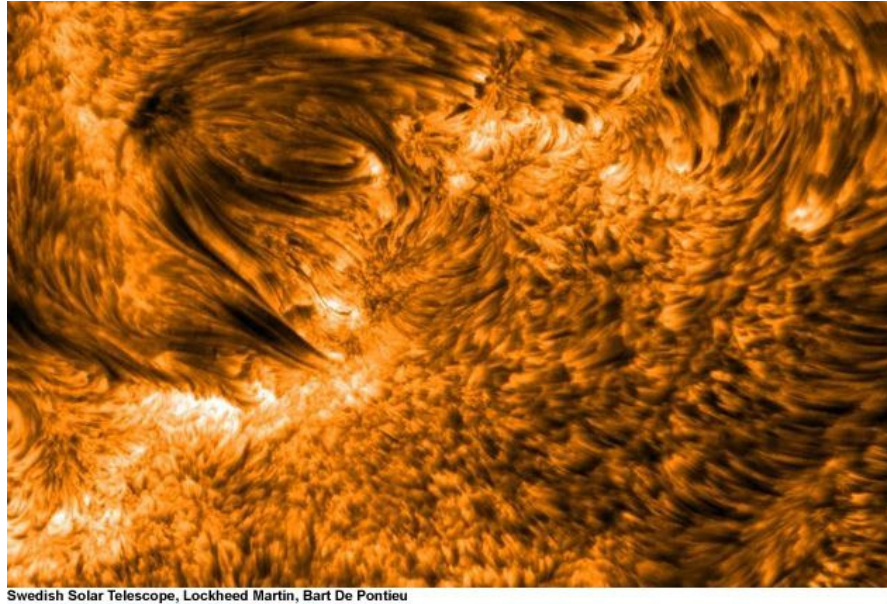


Figura 7. Estrutura do Sol fora de escala.

Fonte: <http://astroweb.iag.usp.br>

As espículas, como mostra a figura 8, foram descobertas em 1877 pelo Padre Angelo Secchi do Observatório do Vaticano em Roma. Estas estruturas são encontradas por toda a cromosfera. Encontram-se associadas à regiões de alto fluxo magnético. Em 2004, Bart de Pontieu de Palo Alto na Califórnia; Robert Erdélyi e James P. Stewart, ambos da Universidade de Sheffield no Reino Unido, desenvolveram estudos e chegaram a conclusões de que as espículas são originadas em ciclos regulares e a duração de cada espícula é de aproximadamente 5 minutos.



Swedish Solar Telescope, Lockheed Martin, Bart De Pontieu

Figura 8. Espículas Solares.

Fonte: Telescópio solar da Suécia; Lockheed Martin.

<http://blalisboa.blogspot.com/2004/08/desvendada-origem-das-espulas-solares.html>

2.3 Jatos encontrados no Sistema Solar

- **Io**

Io, uma das luas de Júpiter, é o corpo vulcanicamente mais ativo do Sistema Solar. Possui 3642,6 quilômetros de diâmetro, suas dimensões a colocam em quarto lugar em escala de tamanho na categoria satélites do Sistema Solar. Descobertas recentes (Lopes, R. M., 2001) concluíram que jatos de lava são ejetados de vulcões localizados no pólo norte de Io, como pode ser visto na figura 9. Já foram detectados pelo menos 100 vulcões ativos em sua superfície. Io possui uma luminosidade considerável, proveniente de lagos incandescentes devido às altas temperaturas e as descargas elétricas entre Io e Júpiter. A energia deste vulcanismo resulta de efeitos de maré gerados pela interação de Io, Júpiter, Europa e Ganimedes. As três luas estão em ressonância orbital, de modo que Io orbita duas vezes em

torno de Europa que, por sua vez, orbita duas vezes em torno de Ganímedes. Io mantém sempre a mesma face virada para Júpiter. A interação gravitacional de Europa, Ganímedes e Júpiter, obriga o diâmetro de Io a sofrer constantes variações (cerca de 100 metros), num processo que gera calor através de fricção interna.

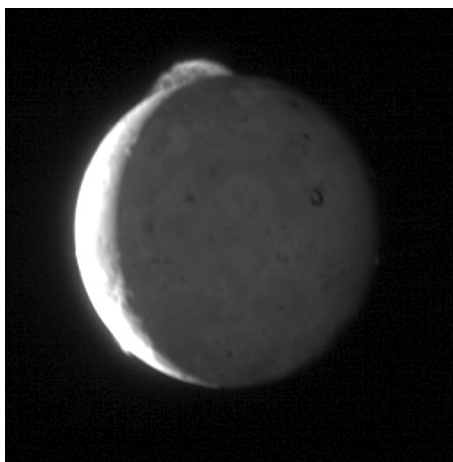


Figura 9. Imagem de Io em 1° de Março de 2007.

Fonte: <http://content.answers.com/main/content/wp/em/th/ump/d/d1/200px-Tvashtarvideo.gif>

Muitos dos vulcões de Io são cercados por halos circulares, presumivelmente de matéria ejectada. Há o registo de treze estruturas de impacto e 78 prováveis, sugerindo que a superfície seja regenerada por depósitos vulcânicos a cada período de um milhão de anos. As matérias expelidas dos vulcões em atividade escorrem ao longo das vertentes das montanhas vulcânicas elevando-se em jatos imensos para voltarem a cair sobre a paisagem policromática, cobrindo desse modo antigas crateras abertas pelo impacto de meteoritos. Os jatos alcançam de uma maneira geral 500 quilômetros de altitude, sendo que o jato da figura 9 alcançou 33 quilômetros de altura.

- **Cometas**

Os cometas também possuem jatos que emanam de seu núcleo. No ano de 2004, a sonda Stardust (NASA) divulgou imagens do cometa Wild-2, uma delas pode ser vista na figura 10. Neste cometa, foram detectadas protuberâncias e crateras de onde jatos de matéria com altíssimas velocidades são projetados.

Os jatos podem formar-se quando o Sol brilha nas áreas geladas perto da superfície do cometa. O gelo transforma-se em gás sem passar por uma fase líquida e o material escapa para o vácuo do espaço, lançado a centenas de quilômetros por hora.



Figura10. Imagem do Cometa Wild-2 com alguns jatos.

Fonte: sonda Stardust/NASA. <http://www1.folha.uol.com.br/folha/pensata/ult3193u19.shtml>

2.4 Jatos Galácticos

- **Nebulosas Planetárias**

Ao contrário do que se possa pensar, as nebulosas planetárias também contêm jatos. Este é um objeto espacial com um invólucro brilhante de gases e plasma, formados por certos tipos de estrelas no período final do seu ciclo de vida. Não estão de todo relacionadas com planetas; o seu nome é originário de uma suposta similaridade de aparência com planetas gigantes gasosos. Os gases das nebulosas planetárias afastam-se da estrela central a uma velocidade aproximada de alguns quilômetros por segundo. Simultaneamente à expansão dos gases, a estrela central esfria à medida que irradia a sua energia, assim as reações de fusão param porque a estrela não tem a massa necessária para gerar no seu núcleo as temperaturas requeridas para se dar a fusão de carbono e oxigênio. Eventualmente, a temperatura estelar irá diminuir de tal maneira que não poderá ser emitida radiação ultravioleta suficiente para ionizar a nuvem gasosa cada vez mais distante. A estrela transforma-se numa anã branca e o gás adjacente recombina-se, tornando-se invisível. Para uma nebulosa planetária típica deverão passar dez mil anos entre a sua formação e a recombinação dos gases. Na figura 11 podem ser vistas duas nebulosas planetárias com seus jatos associados: NGC6210 (tartaruga) e NGC7009 (saturno).

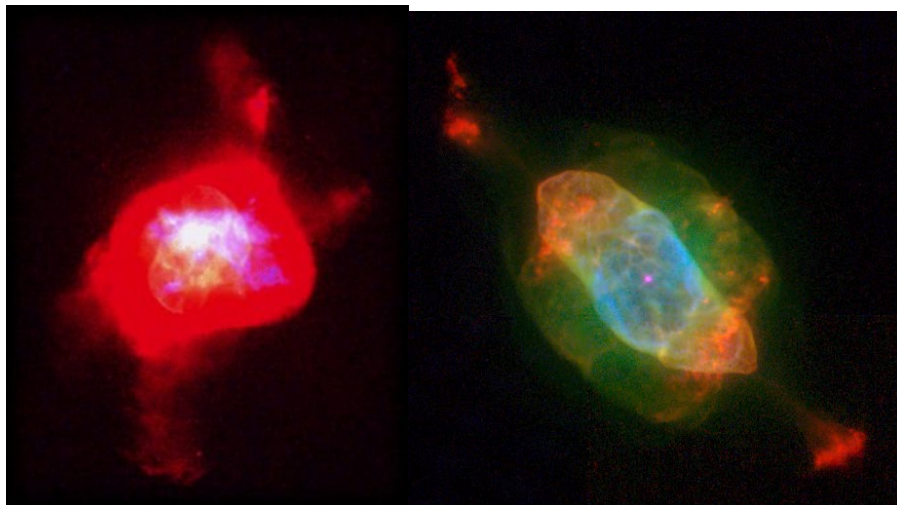


Figura 11. Nebulosa Planetária NGC6210 à esquerda e à direita NGC 7009, onde presenciam-se jatos.

Fonte: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1998/36/> e

<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap971230.html>

Outros jatos que podem ser observados em nossa Galáxia são detectados em microquasares, fontes superluminais e sistemas jovens como será mostrado nos itens a seguir.

- **Fontes Superluminais**

Por mais de vinte anos (Pearson e Zensus 1987; Zensus 1997), foram observadas em quasares, expansões de jatos com velocidades cerca de dez vezes maiores que a da luz, e esses tipos de fontes também foram observadas na nossa Galáxia. Essa analogia entre quasares e microquasares levaram ao descobrimento das fontes superluminais em nossa própria Galáxia. O objeto GRS 1915+105 foi a primeira fonte superluminal a ser descoberta em nossa Galáxia.

As linhas de campo magnético logo acima do disco de acreção que circunda o buraco-negro dos microquasares são capazes de liberar a energia necessária para aquecer o gás a dezenas de milhões de graus Kelvin, produzindo a emissão raio-x e acelerar os elétrons térmicos à velocidades relativísticas, produzindo as ejeções aparentemente superluminais com espectro de emissão rádio.

- **Micro-quasares**

Jatos relativísticos foram descobertos primeiramente em núcleos de galáxias e quasares mais distantes. Mais tarde, os mesmos foram detectados em fontes localizadas na nossa Galáxia. A princípio conhecia-se apenas o objeto SS433, mas com observações feitas em raios-x e em ondas de rádio, foram descobertas novas fontes com jatos relativísticos, conhecidas por microquasares. Estes objetos têm três características importantes que os assemelham aos quasares; um buraco negro em seu centro da ordem de algumas massas solares; um disco de acreção com temperaturas menores do que as detectadas em um quasar e jatos colimados com partículas ejetadas a velocidades relativísticas.

Estes objetos são sistemas binários de estrelas compostos por uma estrela muito massiva (estrela companheira) e um objeto compacto muito denso; um buraco negro ou uma estrela de nêutrons. O objeto compacto orbita em torno da estrela companheira, como pode ser visto na figura 12.

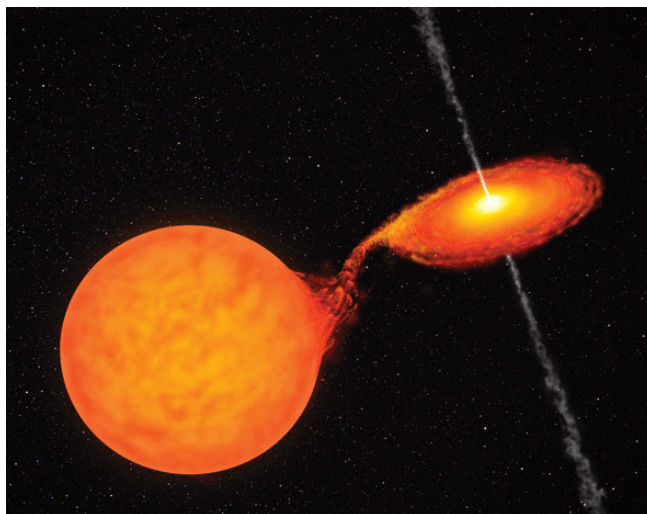


Figura 12. Representação ilustrativa de um microquasar.

Fonte: www.ub.es/homeub/en/news/052006_microquasar.html

A intensa gravidade do objeto compacto extrai material da estrela companheira, formando um disco que lentamente espirala em direção à superfície do objeto. Este material é aquecido a 100 milhões de graus Kelvin, produzindo raios-x intensos e reações termonucleares que aceleram elétrons e prótons com velocidades próximas a da luz, produzindo jatos com fortes emissões de radiação.

O objeto SS433 foi o primeiro caso encontrado em nossa galáxia com emissão de jatos. Foi detectado por Morgan et al (2001). Esta fonte está a 18000 anos-luz de distância. A figura 13 mostra um esquema deste objeto.

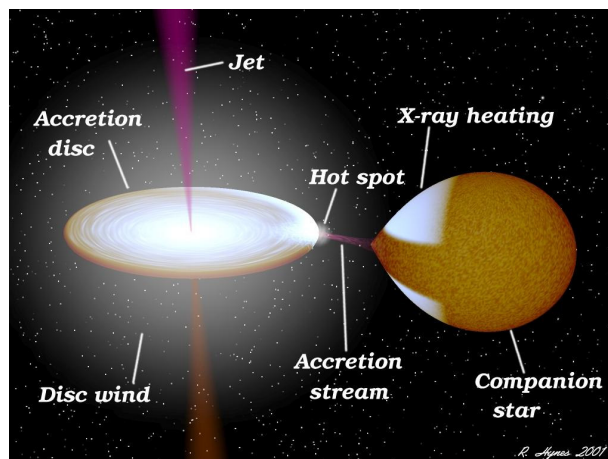


Figura 13. Objeto SS433

Fonte: Mirabel & Rodriguez (2002).

Outra fonte interessante é Sco-X que foi detectada em 1969 em comprimentos de onda rádio por Ables (1969). Até essa época não se tinha certeza a respeito da existência de jatos em fontes galácticas. Depois dela, várias binárias de raio-x foram descobertas.

- **Sistemas Jovens (YSO's)**

Quando uma proto-estrela (estrela em fase inicial de formação) se forma, permanece à sua volta um disco de poeira e gás. Este disco é formado à medida que o material da nebulosa que circunda a estrela é atraído gravitacionalmente por ela. No entanto, parte da matéria que está sendo acrescida à proto-estrela também é lançada para fora dela sob a forma de jatos. Estes são perpendiculares ao disco de poeira e possuem direções opostas, estendendo-se por milhares de anos-luz no espaço interestelar e têm comprimentos que variam 0,01 até alguns parsecs. Os jatos de matéria lançados pelas proto-estrelas têm altas velocidades, próximas a 300 quilômetros por segundo e mergulham na nebulosa circundante produzindo fortes ondas de choque que aquecem o gás e o fazem brilhar.

- **Objetos Herbig Haro**

Os jatos de matéria brilhante produzidos por uma proto-estrela são chamados de Objetos Herbig Haro, em homenagem aos astrônomos George Herbig e Guiller Haro, pois realizaram vários trabalhos precursores sobre esses jatos nos anos de 1950.

Portanto estes objetos podem ser formados quando uma estrela jovem lança jatos de matéria de volta para o espaço interestelar como pode ser visto no esquema da figura 14.

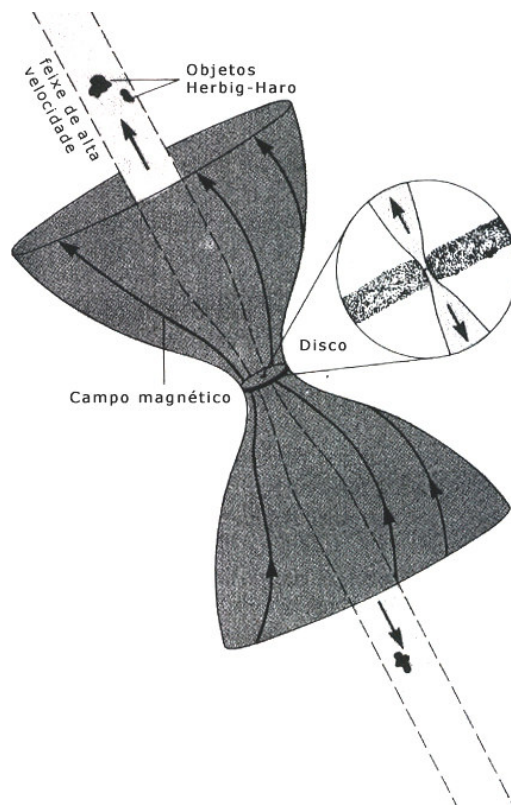


Figura 14. Desenho esquemático de como se formam os objetos Herbig Haro.

Fonte: Barthel (1989)

Na figura 15 podem ser vistos três objetos Herbig Haro. Na imagem superior esquerda pode-se ver o objeto proto-estelar chamado Herbig-Haro 30 (HH30). A imagem mostra o disco de poeira, visto de borda, que cerca a estrela recentemente formada. A proto-estrela está escondida nas partes mais densas deste disco. Embora o jato de matéria emitido pela proto-estrela permaneça confinado a um estreito feixe, ele se estende por bilhões de quilômetros no espaço. Esta proto-estrela está localizada na constelação Touro, a 450 anos-luz da Terra.

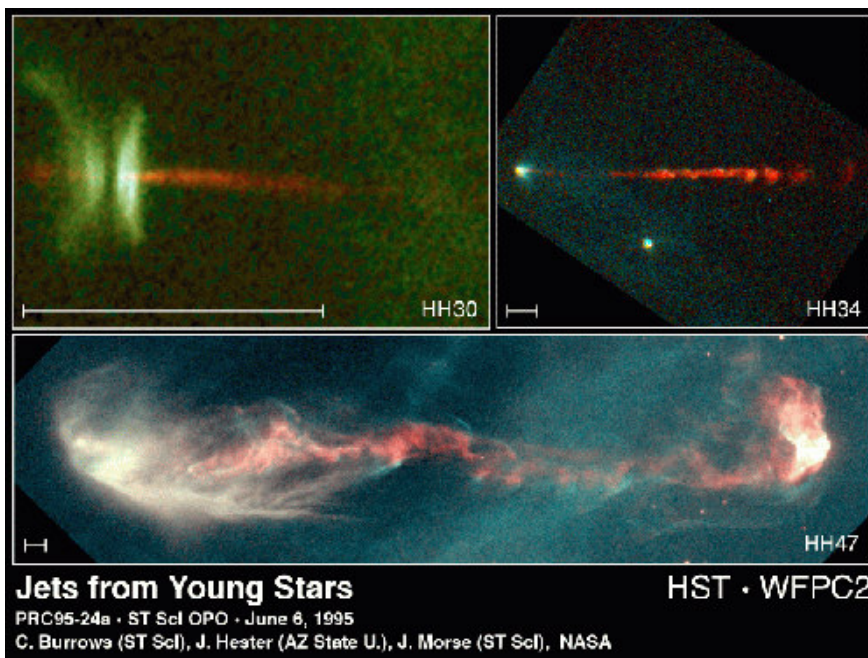


Figura 15. Objetos Herbig Haro.

Fonte: NASA. <http://passporttoknowledge.com/hst/photo.html>.

A figura superior direita mostra uma proto-estrela situada a 1500 anos-luz de nós, na vizinhança da constelação de Orion. O jato emitido pela proto-estrela; o objeto Herbig-Haro 34 (HH34) possui a característica de não ter uma estrutura contínua. Ele é formado por amontoados de matéria. Acredita-se que "bolhas" de gás quente são ejetadas pela proto-estrela.

A imagem da figura inferior mostra o objeto Herbig-Haro HH47 situado a 1500 anos-luz da Terra, na borda da nebulosa Gum. Este jato possui 4,8 trilhões de quilômetros de comprimento e a sua estrutura complicada parece indicar que a estrela que o gera (escondida dentro da nuvem, próxima à borda esquerda da imagem) está oscilando, possivelmente devido à perturbações causadas por uma estrela companheira.

Na figura 16 pode ser visto um desenho esquemático de como os objetos Herbig-Haro são ejetados.

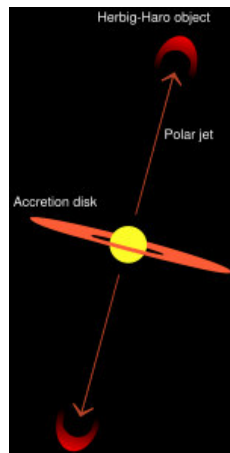


Figura 16. Diagrama esquemático de como um objeto HH é ejetado.

Fonte: <http://www.answers.com/topic/herbig-haro-object?cat=technology>

2.5 Jatos em Galáxias Ativas (AGN's)

Antes da descoberta de galáxias emissoras de rádio-frequência, pensava-se que as galáxias eram apenas um aglomerado de milhões de estrelas, de nuvens de hidrogênio e poeira, e que a energia por elas produzida era a soma da energia produzida por estes diferentes componentes. Porém, a descoberta de fontes capazes de lançar jatos emissores de rádio-frequência que se estendem por vários milhares de anos-luz, abriu espaço para novos estudos. Tornou-se claro que estas fontes emissoras de rádio, tinham de produzir a sua energia por um processo mais violento que a fusão termonuclear que ocorre nas estrelas.

Hoyle e Fowler (1963) propuseram que a energia destas fontes era de origem gravitacional, derivada do colapso de objetos de elevadas massas. Assim surgiu a idéia de que a atividade destas fontes era resultado da existência de um objeto extremamente massivo no seu centro: um buraco-negro.

Quando as galáxias são jovens, as estrelas que estão na sua região central estão tão próximas que colidem e se aglutinam dando origem a um buraco-negro massivo. O potencial atrativo deste objeto é tão forte que suga o material ao seu redor, seja este uma estrela, ou gás do meio interestelar da própria galáxia ou até mesmo de uma galáxia vizinha. O material que é aspirado pelo buraco-negro forma um disco de acréscimo em torno deste e a partir do disco são emitidos os jatos. Na figura 17 pode-se ver a galáxia Centaurus A com o jato.

As distâncias alcançadas por jatos emitidos pelos AGN's são de alguns mega parsecs e podem ser detectados em bandas de frequências rádio, raios-X e raios gama.

Os AGN's conhecidos são os quasares, rádio-galáxias, galáxias Seyfert e os objetos BL Lacertae.

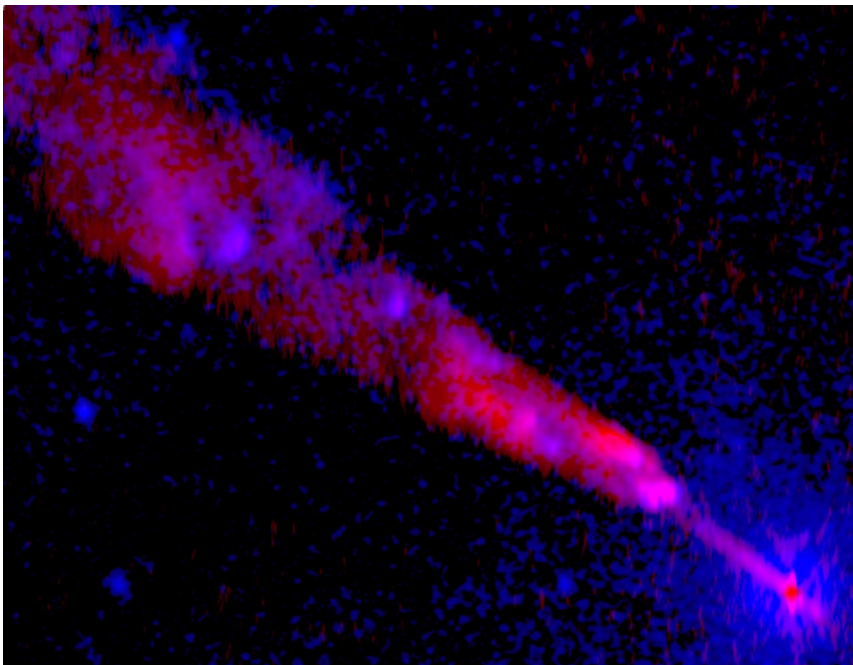


Figura 17. Centaurus A e a emissão do jato em raio-x (azul) e rádio (vermelho)

Fonte: Chandra e VLA. <http://chandra.harvard.edu/photo/2003/cenajet/>

2.6 Jatos em Quasares

Nos quasares, os jatos são colimados e as partículas ejetadas a altas energias podem viajar à distâncias de milhões de anos-luz (Mirabel e Rodriguez, 1999). Extremamente energéticos, com uma luminosidade correspondente a 100 galáxias e jatos com velocidades superluminais, os quasares sempre exerceram um certo fascínio em seu estudo.

O buraco-negro de um quasar tem dimensão de uma unidade astronômica, seu disco de acreção mede cerca de um miliparsec, o núcleo rádio compacto, 0,1 parsec, e seus lóbulos e manchas quentes chegam a um mega parsec.

Os quasares possuem características muito interessantes. Apresentam componentes compactas (núcleo do objeto), que na verdade são constituídas de várias outras componentes, cada uma caracterizada pela radiação sincrotrônica (elétrons relativísticos ao longo do campo

magnético, emitindo radiação eletromagnética na direção de seu movimento). De tal modo que as várias componentes somadas, ou melhor sua envoltória, daria um espectro que não varia com a frequência, ou seja, plano. Na figura 18 pode ser vista a estrutura de quasar em comparação com um microquasar.

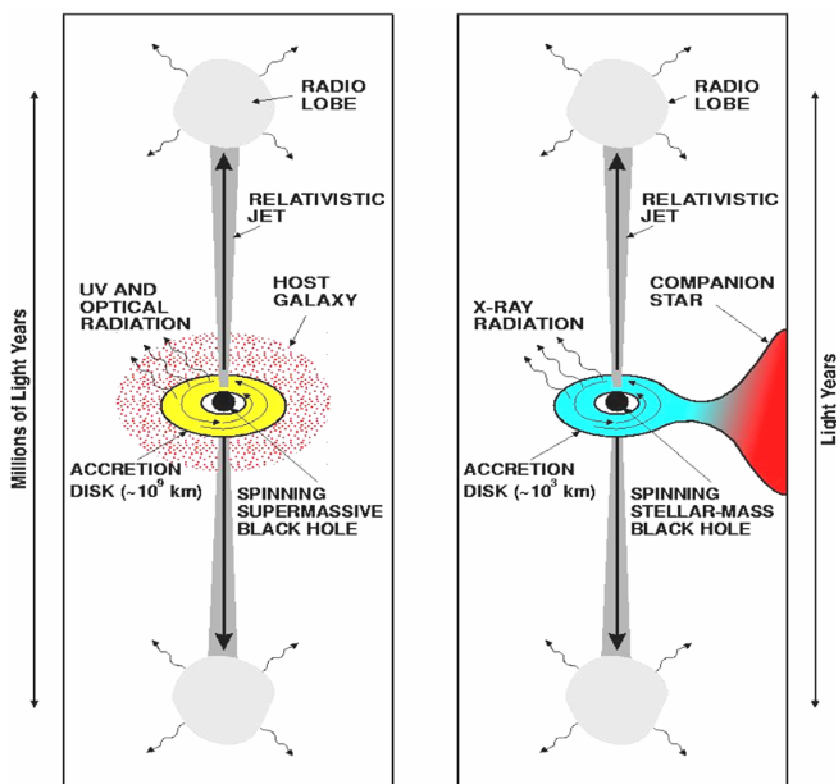


Figura 18. Ilustração da estrutura de um quasar em comparação com a estrutura de um microquasar.

Fonte: Mirabel & Rodriguez (1999).

Do núcleo são ejetadas componentes com certas velocidades. Muitas vezes essas componentes possuem velocidades próximas à velocidade da luz (chegam a 80% de c). Outras componentes possuem velocidades muito abaixo da velocidade da luz. Da Terra, nota-se que muitas vezes essas velocidades são superluminais. Na verdade o que é visto daqui é a

projeção do vetor velocidade na direção perpendicular à linha de visada. E é esta velocidade aparente que muitas vezes é superior à velocidade da luz.

Os jatos dos quasares, dos objetos BL Lacertae e galáxias com núcleos ativos têm dimensões que muitas vezes chegam a Mpc. No início da década de 70 esses três tipos de objetos eram considerados objetos diferentes vistos em ângulos diferentes em relação à linha de visada. Os quasares, por exemplo, apresentam jatos em uma só direção e as galáxias ativas, jatos em duas direções, perpendiculares à linha de visada, como pode ser visto na figura 19.

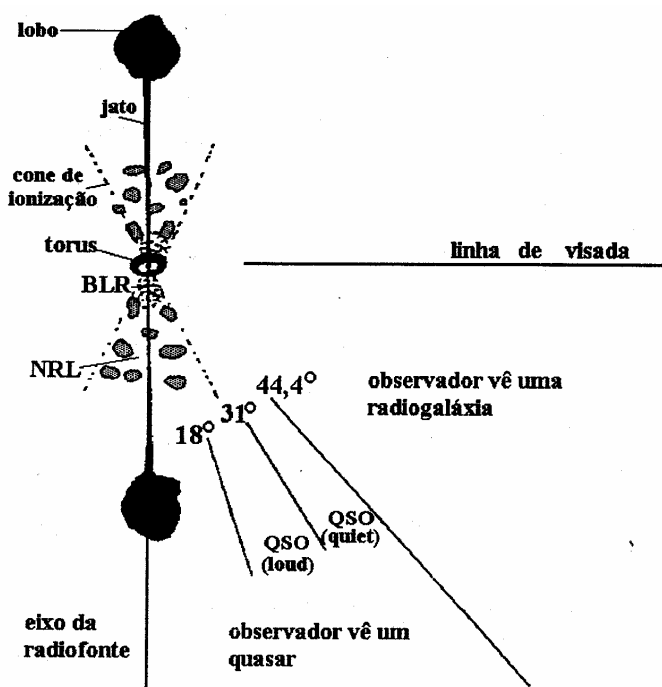


Figura 19. Estrutura de uma fonte extragaláctica classificada de acordo com a linha de visada.

Fonte: Barthel (1989)

Quanto mais relativístico for o objeto, menor é o ângulo entre a direção do jato e a linha de visada (Θ) como mostra a expressão (E.1).

$$\Theta \propto 1/\gamma \quad (\text{E.1})$$

Este ângulo é proporcional a um dividido pelo fator de Lorentz, onde Θ é o ângulo entre o jato e a linha de visada e γ é o fator de Lorentz conforme a expressão (E.2).

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{(1-v^2/c^2)}}. \quad (\text{E.2})$$

Quando $v \rightarrow c$, γ é maior que 1, e Θ tende a ficar pequeno. Os quasares apresentam este ângulo bem pequeno, quando comparados às galáxias.

A velocidade aparente vista por um observador da Terra é proporcional ao fator de Lorentz multiplicado pela velocidade da luz. ($v_{ap} = \gamma c$). De modo que para fatores de Lorentz maiores que 1, a velocidade aparente é superluminal.

A figura 20 mostra o quasar 3C175 no visível e em rádio. Pode-se observar o jato em apenas uma direção. Na figura 21, em comparação com o quasar, pode ser vista a radiogaláxia 3C130 com jatos em duas direções diametralmente opostas.

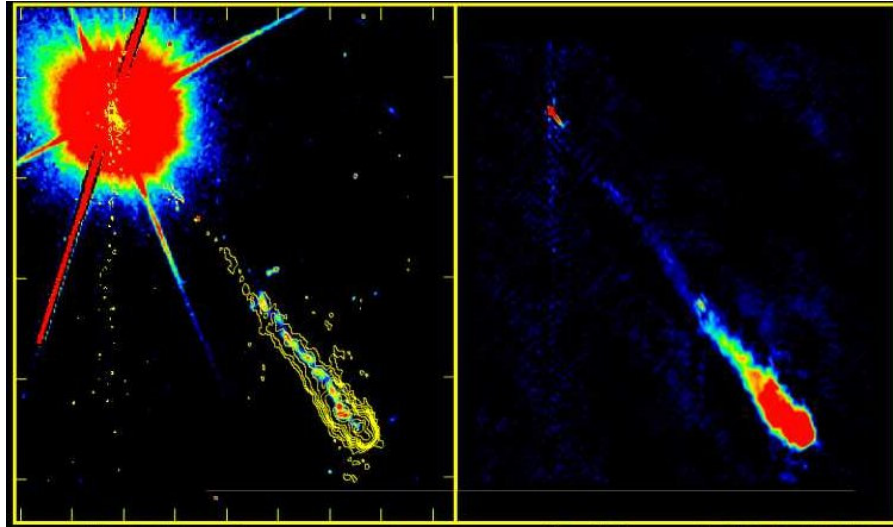


Figura 20. Quasar 3C175. Telescópio Hubble (esquerda) e Merlin (direita).

Fonte: <http://chandra.harvard.edu/>

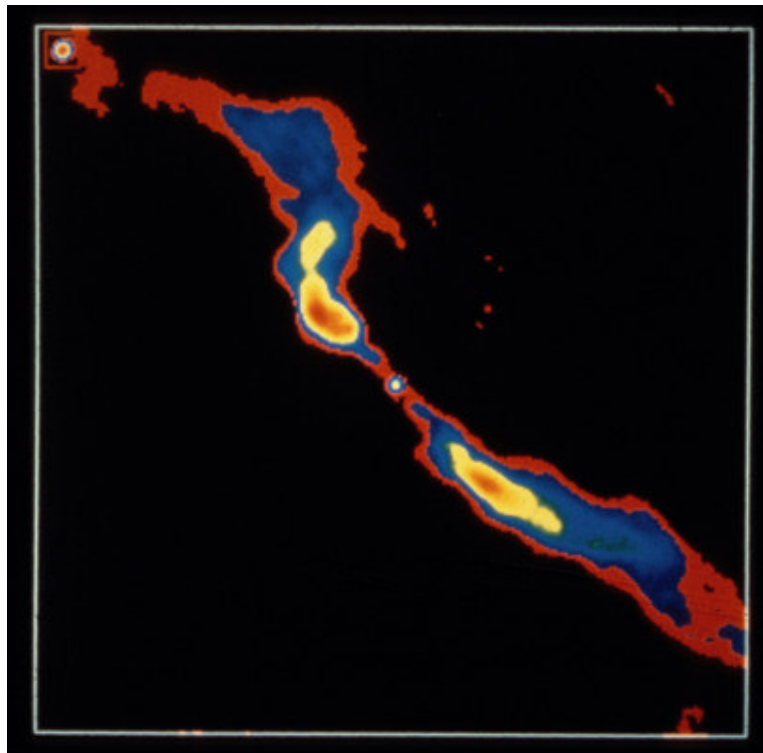


Figura 21. Rádio-Galáxia 3C130. (rádio)

Fonte: NRAO/AUI. <http://www.nrao.edu/imagegallery/php/level3.php?id=446>

3 RÁDIO OBSERVAÇÃO DAS FONTES GALÁCTICAS E EXTRAGALÁCTICAS

A observação em rádio de jatos e aspectos da morfologia de fontes galácticas e extragalácticas é feita através de radiotelescópios. A seguir estão descritos os principais sistemas utilizados.

3.1 VLA (Very Large Array)

Este sistema consiste em 27 rádio-antenas dispostas no formato da letra “Y” como pode ser visto na figura 22. Cada antena tem 25 metros de diâmetro e a distância entre elas pode chegar até 36 quilômetros. As informações coletadas pelas antenas são combinadas eletronicamente como se a resolução final obtida fosse de uma antena de 130 metros de diâmetro. O VLA opera nas seguintes frequências; 0,073 – 0,0745 GHz; 0,30-0,34 GHz; 1,34-1,73 GHz; 4,5-5 GHz; 8-8,8 GHz; 14,4-15,4 GHz; 22-24 GHz; 40-50 GHz.



Figura 22. Interferômetro VLA, Socorro, Novo México.

Fonte: <http://www.oal.ul.pt/oobservatorio/vol10/n4/pagina4.html>

3.2 VLBA (Very Long Baseline Array)

O VLBA é um sistema de radiotelescópios, cada um com 25 metros de diâmetro e pesando 240 toneladas. Estas antenas estão localizadas desde o Havaí e vai até as Ilhas Virgens como mostra a figura 23. Estas antenas operam em frequências até 22 GHz.

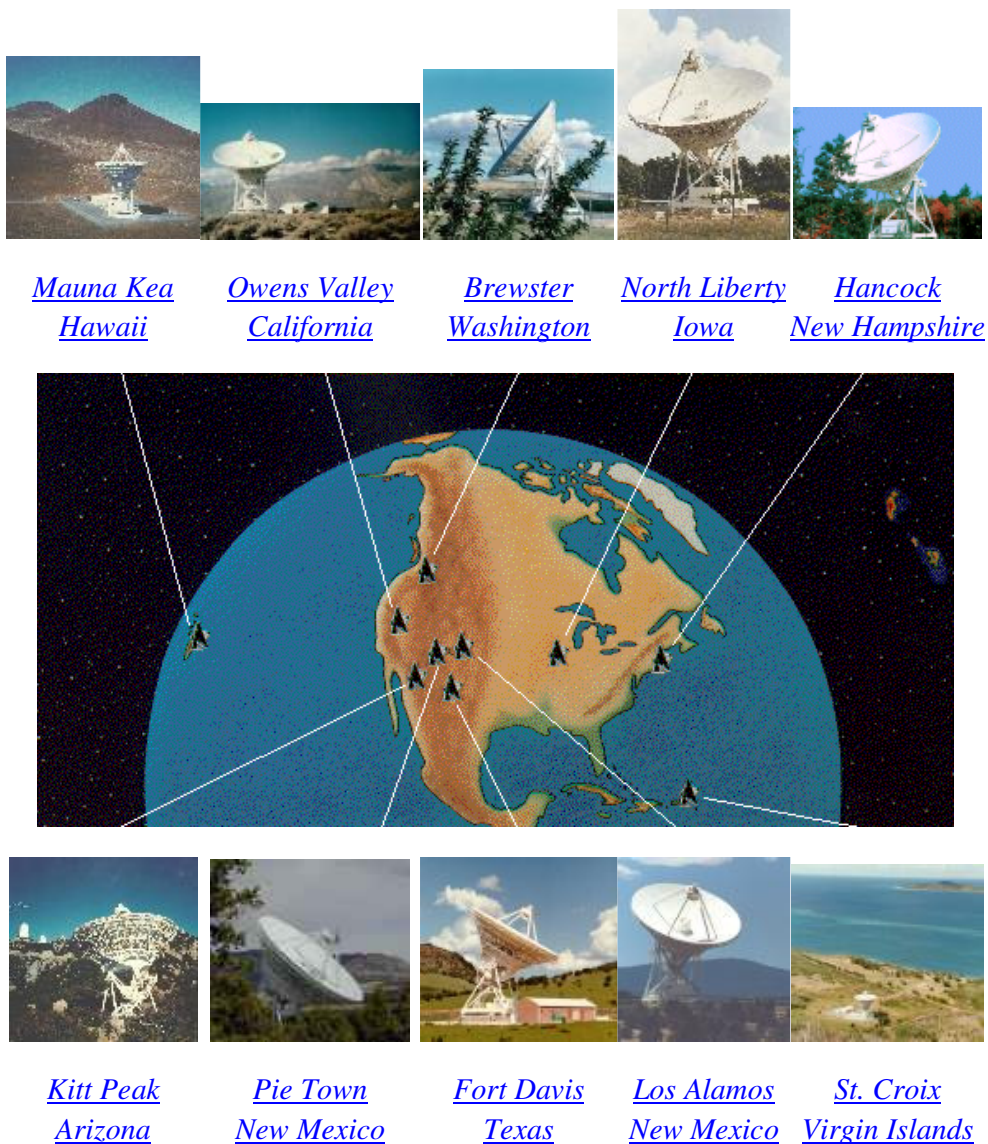


Figura 23. Na figura estão localizadas as antenas do sistema de VLBA.

Fonte: <http://www.vlba.nrao.edu/sites/>

3.3 MERLIN (Multi-Element Radio Linked Interferometer Net Work)

Este sistema de antenas opera nas frequências de 151 MHz a 24 GHz. Estão localizadas no Reino Unido como pode ser visto na figura 24. Essas antenas são separadas por distâncias de 217 quilômetros.

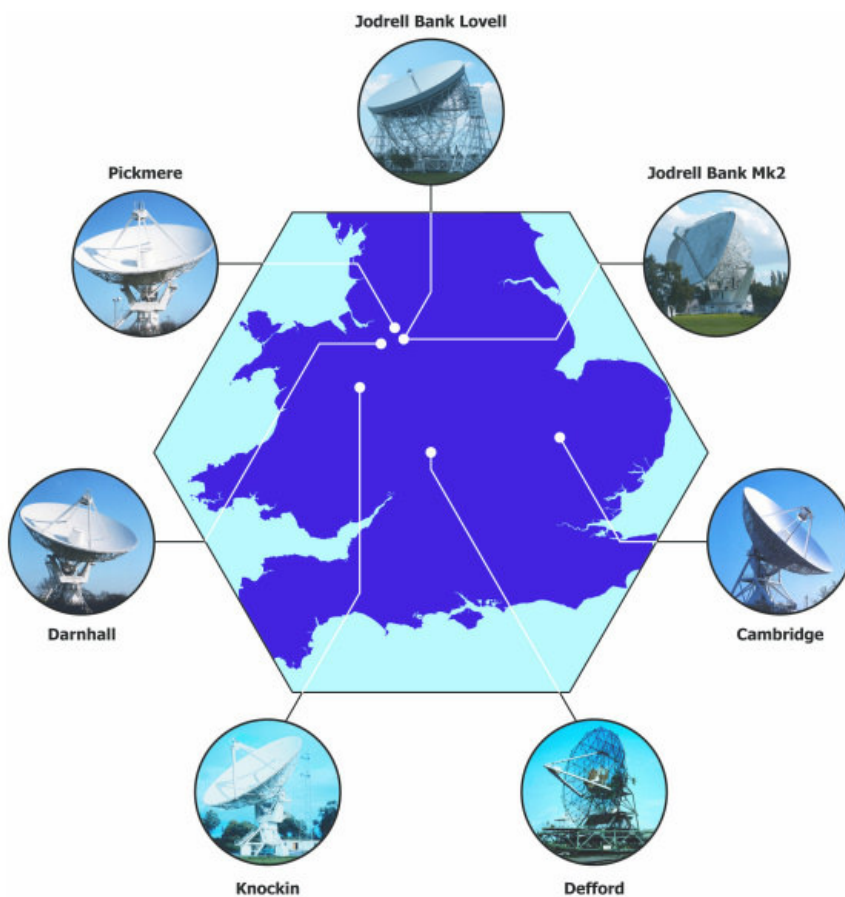


Figura 24. Sistema de antenas MERLIN, no Reino Unido.

Fonte: <http://www.merlin.ac.uk/>

3.4 VLBI (Very Long Baseline Interferometry)

Na figura 25 pode ser vista a antena do radiotelescópio do Itapetinga que opera em 22 e 43 GHz.

A sigla VLBI significa Interferômetro de Longa Linha de Base. Para isso são utilizados diversos radiotelescópios espalhados por todo o globo terrestre. Como exemplo tem-se o Rádio-Observatório de Itapetinga que participou de diversos experimentos de VLBI no passado.



Figura 25. Radiotelescópio de Atibaia

Fonte: www.mackenzie.br

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De acordo com a evolução dos conhecimentos a respeito de fontes galácticas (micro-quasares) e extragalácticas (quasares) nos últimos 25 anos, observou-se notável semelhança morfológica entre essas fontes. A figura 26 mostra a comparação entre os dois objetos.

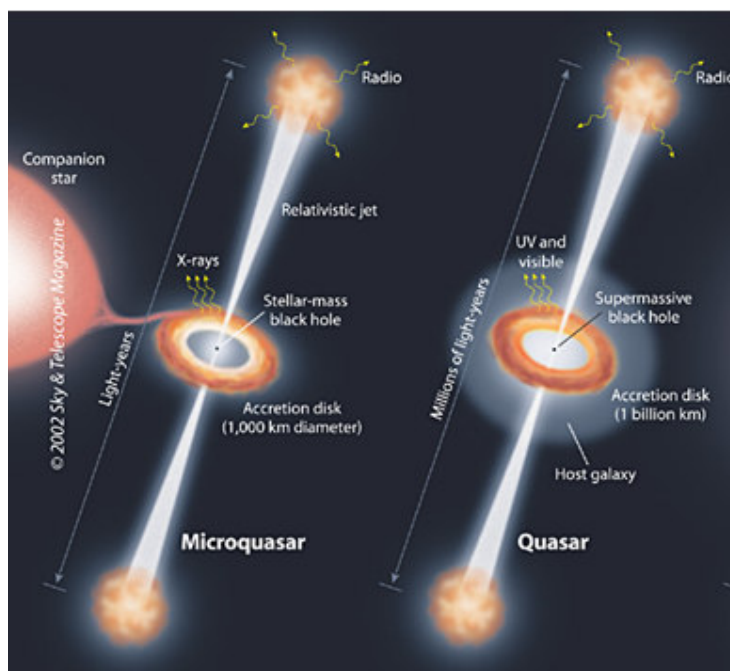


Figura 26. Microquasar e Quasar.

Fonte: Mirabel e Rodriguez (2002).

Os micro-quasares, fontes dentro de nossa própria Galáxia, possuem em sua região central um buraco-negro ou uma estrela de nêutrons de massa estelar, um disco de acrecimento e jatos relativísticos. À medida que o disco vai perdendo momento angular as partículas caem em direção ao buraco negro ou estrela de nêutrons, formando os jatos. A formação dos jatos a partir do disco é matéria ainda em discussão. Este sistema é considerado um sistema binário. Já objetos cosmológicos como os quasares, têm características morfológicas muito parecidas

com os micro-quasares sendo compostos por um buraco negro massivo em seu centro, um disco de acreção e jatos relativísticos. .

As diferenças entre eles estão nas dimensões e propriedades físicas. Em relação às escalas envolvidas, um micro-quasar tem alguns anos-luz de tamanho (levando-se em conta a distância de um lóbulo a outro). O buraco negro em seu centro é da ordem de algumas massas solares. O disco de acreção tem 10^3 quilômetros de diâmetro. Um micro-quasar emite tanto em rádio, como no infravermelho, como em raios-x. Observando-se a figura 27, pode-se perceber o comportamento desta espécie peculiar de objeto ao longo do tempo. Nota-se que a emissão proveniente do disco de acreção ocorre primeiramente em raios-x (emissão do disco) e se propaga para o infravermelho e rádio em tempos posteriores. A emissão em rádio vem das componentes que se deslocam ao longo do jato.

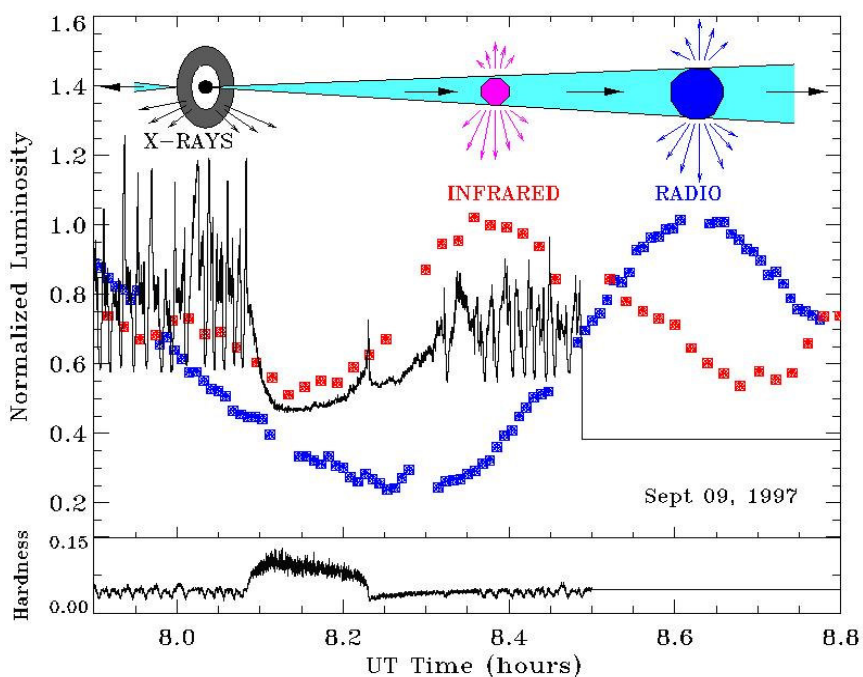


Figura 27. Gráfico Luminosidade x tempo.

Fonte: Mirabel et al, (1992).

Os quasares por sua vez, possuem milhões de anos-luz de tamanho (se considerados o tamanho dos lóbulos), o disco de acrecimento tem cerca de 10^9 quilômetros de diâmetro e emite radiação na banda do visível, ultravioleta e também podem ser observados em rádio, raios-x e raios gama. Considera-se que o buraco negro localizado no seu centro é da ordem de 10^9 massas solares.

Da figura 27 pode-se dizer que o micro-quasar tem essa assinatura particular. O mesmo pode-se imaginar para os quasares que estão a distâncias cosmológicas. Eles têm uma certa assinatura, representada por sua curva de luz. O interessante é que eventos que ocorrem na alta atmosfera da Terra também têm sua assinatura, como pode ser visto analisando o evento que ocorreu a 22 de julho de 1996, às 07:17:38 UT. (ver figura 5). A duração do evento foi de cerca de 33 milissegundos, terminando às 07:17:38,792 UT. Nela vê-se uma imagem de vídeo mostrando um Elve (possui forma de disco) e Sprites (Jatos). Na figura 28 (painel de cima) é registrada sua assinatura. Às 07:17:38,769 UT houve o registro de um evento em VLF, seguido por um pulso brilhante observado por um fotômetro (ver o painel do meio) No último painel da figura podem ser vistos dois eventos: o primeiro mais rápido corresponde ao surgimento do Elve e o segundo (mais lento) ao aparecimento dos Sprites, vários milissegundos depois.

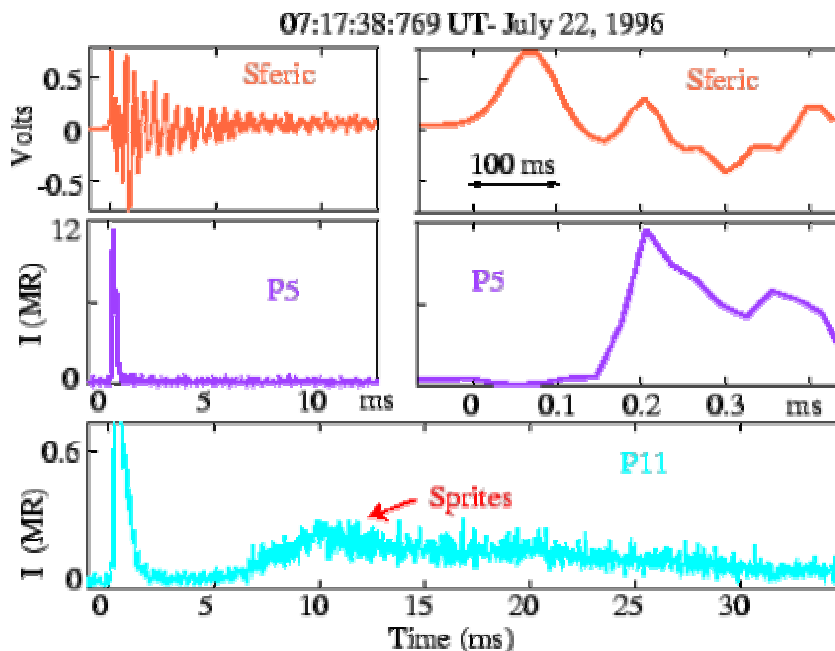


Figura 28. Elve e sprites observados em 22 de Julho de 1996.

Fonte: Christopher Paul Barrington-Leigh, Department of Applied Physics, Stanford University.

Outra discussão que se abre é a verdadeira contribuição do campo magnético em discos de acreção para gerar os jatos em micro-quasares ou em variáveis cataclísmicas (sistemas binários compostos por uma estrela e um buraco negro/estrela de nêutrons). O motivo para isso é que poucos desses objetos tem sido observados produzindo jatos. Por conseguinte seria necessário ter uma fonte de energia extra para gerar jatos poderosos. Para fontes tais como Nebulosas Planetárias e a variável cataclísmica T Pyx em particular, a queima nuclear sobre a superfície do objeto que está agregando matéria forneceria a energia extra necessária (Livio, 1998).

Em sistemas com um buraco-negro agregando matéria, a rotação do buraco-negro poderia estar gerando esta energia extra que se precisa através da energia rotacional extraída do buraco negro em rotação. Alguns micro-quasares foram estudados, com o intuito de se determinar o spin do buraco negro. Foram estudados vários micro-quasares e somente aqueles

que tinham jatos poderosos observados é que tiveram o seu momento angular específico diferente de zero. Isto indicaria que há uma relação entre a presença de jatos e a rotação do buraco negro. Estes objetos sem rotação não teriam jatos associados (Zhang, Cui e Chen,1997).

5 CONCLUSÕES

Com o assunto exposto e desenvolvido neste trabalho, notou-se que mesmo apresentando diferentes propriedades físicas, fontes galácticas e extragalácticas têm grandes semelhanças morfológicas. Mesmo que ainda não seja totalmente compreendido o processo faz uma conexão entre o disco de acrecimento e os jatos, observando-se que as duas estruturas estão sempre ligadas nas fontes observadas. Os jatos têm influência direta e um importante papel na definição morfológica das fontes. Os jatos são altamente colimados e intensos nos quasares enquanto que em fontes na nossa Galáxia os jatos são mais débeis.

Jatos são observados também em fenômenos luminosos na alta atmosfera da Terra e estão relacionados com as tempestades elétricas. Jatos também podem ser observados no Sol, em cometas e satélites. A formação e estrutura de um jato, varia de uma fonte para outra de acordo com os processos físicos envolvidos.

Estudar a estrutura morfológica de radiofontes galácticas e extragalácticas é de grande importância para se tentar compreender a física dos jatos e demais estruturas das fontes. E estudar e conhecer jatos na atmosfera da Terra e como são formados (conhecer suas propriedades físicas e morfológicas) é importante para acompanhar mudanças climáticas, regiões onde transitam aviões que estão submetidas ao surgimento de sprites, elves, jatos azuis, entre outros.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABLES, J. G., *Possible Time Variation of the Radio Emission from SCO X-1*, *Astrophysical Journal*, vol. 155, p.L27, 1969.
- BARRINGTON-LEIGH, C. P., *Fast Photometric Imaging of High Altitude Optical Flashes about Thunderstorms*. PhD Dissertation, Standford University, 2000.
- BARTHEL, R.D., *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 336, 606, 1989
- BLANDFORD, R. D. and ZNAJEK, R., *MNRAS* 179, 433, 1977.
- CURTIS, H. D., *The Planetary Nebulae*. Publications of the Lick Observatory, No. 13, Part III, p. 55-74, 1918.
- DE PONTIEU, B.; ERDÉLYI, R.; STEWART, S. *Solar chromospheric spicules from the leakage of photospheric oscillations and flows*. *Nature* 430, 536-539 (29 July 2004) doi:10.1038/nature02749; Received 31 Mar. 2004; Accepted 14 Jun. 2004.
- FRANZ, R., R. NEMZEK and J. WINCKLER, *Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system*, *Science*, 249, 48-51, 1990.
- HOYLE, F., FOWLER, W. A. *Nature*, 213, 373. 1967.
- LIVIO, M., in *Wild Stars in the old West*, ASP conf. Ser. (eds. S. Howell et al.), 137, 264. 1998.
- LOPES, R. M. C., GREGG, T.K., *Volcanic Worlds: Exploring the Solar System Volcanoes*. Foreword by Sally Ride. Praxis Publishing Company (Springer-Verlag, published September 2001).
- MARGON et al., *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 233. 1979.
- MIRABEL, I. F.; RODRIGUEZ, L. F.; CORDIER, B.; PAUL, J.; LEBRUN, F., *Nature*, 358, 215. 1992.
- MIRABEL, I.F., RODRÍGUEZ, L.F., *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol 37, 409-443. (Astro-ph 9902062). 1999.
- MIRABEL, I. F.; RODRIGUEZ, L. F., *Sky and Telescope*. Maio, 2002.
- MORGAN, N. D., CHARTAS, G., DAI, X., GALLAGHER, S. C., GARMIRE, G. P., BAUTZ, M. W., SCHECHTER, P. L., *Chandra Detects a Rapid Flare in the Gravitationally Lensed Mini-BALQSO RX J0911.4+0551*. astro-ph/0104453 (April 2001).
- PEARSON, T. J., ZENSUS, J. A. *Superluminal radio sources*; Proceedings of the Workshop, Pasadena, CA, Oct. 28-30, 1986 (A88-39751 16-90). Cambridge and New York, Cambridge University Press, p. 1-11. 1987.

PENZIAS, A. A., WILSON, R. *Radiação Cósmica de Fundo*. 1964. Disponível em: <<http://fantastico.globo.com/Jornalismo/Fantastico/0,,AA1284636-7092,00.html>>. Acesso em: 30 out. 2007.

REIPURTH, B.; BERTOUT, C.; *Herbig-Haro Flows and the Birth of Stars*; IAU Symposium No. 182, Edited by Bo Reipurth and Claude Bertout. Kluwer Academic Publishers, 1997.

SENTMAN, D. and E. WESCOTT, *Red sprites and blue jets: thunderstorm-excited optical emissions in the stratosphere, mesosphere, and ionosphere*, Phys. Plasmas (USA), Physics of Plasmas, 2, 2514-22, 1995.

SENTMAN, D., E. WESCOTT, D. OSBORNE, D. HAMPTON, and M. HEAVNER, Preliminary results from the Sprites 94 aircraft campaign. 1. *Red sprites*, *Geophysical Research Letters*, 22, 1205-8, 1995.

ZENSUS, J. A. *Parsec-Scale Jets in Extragalactic Radio Sources*. National Radio Astronomy Observatory, Charlottesville, Virginia 22903. Annual Review of Astronomy and Astrophysics Vol. 35: 607-636 (doi:10.1146/annurev.astro.35.1.607). (Volume publication date September 1997).

ZHANG, S. N., CUI, W., & CHEN, W., Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 476, 95. 1997.

A APÊNDICE A – VELOCIDADE SUPERLUMINAL APARENTE

A velocidade superluminal aparente das fontes deve-se ao movimento relativístico ao longo da linha de visada desta. Pode-se explicar como ocorre esse fenômeno levando em conta a figura 29. Considera-se que duas fontes estão inicialmente em B no instante t_1 , e são detectadas por um observador no ponto A no instante t_1' depois que a luz das fontes percorre a distância AB.

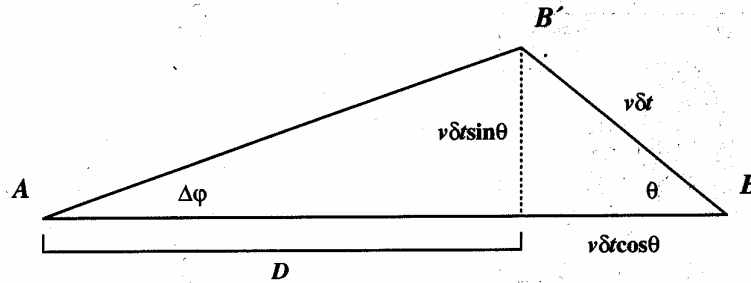


Figura 29. Geometria que se assume para explicar a aparente velocidade superluminal de rádio fontes.

Depois de algum tempo, em $t_2 = t_1 + \delta$ (E.1) uma das fontes se deslocou à distância $v\delta t$. Assim, são feitas novas observações das duas fontes. A distância entre A e B é $D + v\delta t \cos \theta$, (E.2) contudo, devido ao movimento de uma das fontes na direção radial, a distância entre o observador A e a fonte em movimento B' é aproximadamente D. a separação angular entre as duas fontes na segunda observação é dada pela expressão (E.3):

$$\Delta\varphi = \frac{v\delta t \sin \theta}{D} \quad (\text{E.3})$$

O tempo das duas observações é dado pela expressão (E.4):

$$t_1' = t_1 + \frac{D + v\delta t \cos \theta}{c} \quad (\text{E.4})$$

e pela expressão (E.5)

$$t'_2 = t_2 + \frac{D}{c} \quad (\text{E.5})$$

Portanto o intervalo de tempo entre as duas observações é dado conforme a expressão (E.6):

$$\Delta t = t'_2 - t'_1 = t_2 - t_1 - \frac{v \delta t \cos \theta}{c} = \delta t (1 - \beta \cos \theta), \quad (\text{E.6})$$

Onde $\beta = \frac{v}{c}$, na convenção usual. Assim a velocidade transversal que se deduz é fornecida pela expressão (E.7):

$$\beta_T = \frac{v_T}{c} = \frac{D \Delta \varphi}{c \Delta t} = \frac{v \sin \theta}{c(1 - \beta \cos \theta)} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta} \quad (\text{E.7})$$

A figura 30 mostra a velocidade transversal β_T em função de do ângulo da linha de visada θ para alguns valores do fator de Lorentz, $\gamma = 1/\sqrt{(1 - \beta^2)}$ (E.8)

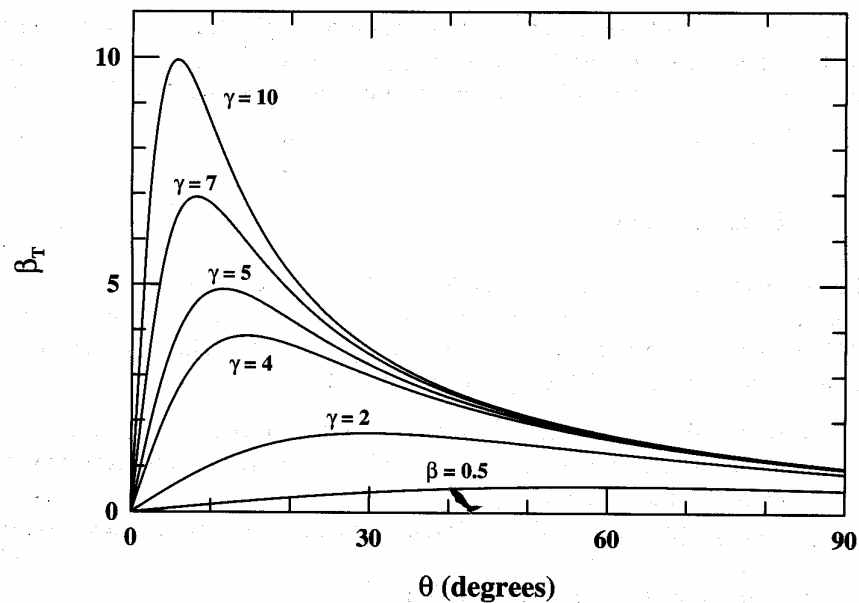


Figura 30. Velocidade transversal aparente $\beta_T = v_T/c$, de uma fonte movendo-se em direção à linha de visada de um observador, sob um ângulo θ , em função do fator de Lorentz.

Para encontrar o ângulo θ para o qual se tem o maior valor de β_T , tem-se a expressão(E.9):

$$\frac{\partial \beta_T}{\partial \theta} = \frac{\beta \cos \theta}{1 - \beta \cos \theta} - \frac{(\beta \sin \theta)(\beta \sin \theta)}{(1 - \beta \cos \theta)^2} = 0, \quad (\text{E.9})$$

Então, conforme a expressão (E.10):

$$\beta \cos \theta (1 - \beta \cos \theta) = \beta^2 \sin^2 \theta = \beta^2 - \beta^2 \cos^2 \theta, \quad (\text{E.10})$$

Onde tem-se, pela expressão (E.11) e pela expressão (E.12):

$$\theta_{max} = \cos^{-1} \beta \quad (\text{E.11})$$

$$\sin(\cos^{-1} \beta) = \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (\text{E.12})$$

Portanto obtém-se a expressão (E.13):

$$\beta_T^{max} = \frac{\beta(\sqrt{1 - \beta^2})}{(1 - \beta^2)} = \beta\gamma \quad (\text{E.13})$$

Assim para $\beta \rightarrow 1$ tem-se $\beta_{max} \approx \gamma$. Pode-se concluir que para movimentos relativísticos próximos a linha de visada (por exemplo $\theta \approx \cos^{-1} \beta$), o observador pode detectar velocidades aparentes excedendo a velocidade da luz.

B APÊNDICE B – GALÁXIAS ATIVAS

No centro de algumas galáxias existe uma importante fonte de energia que é diferente da usual radiação de calor proveniente das estrelas. As galáxias que possuem esta propriedade são classificadas como Galáxias Ativas. Este tipo de galáxias também é conhecido pelos nomes de Núcleo Galáctico Ativo ou pelas iniciais de seu nome em inglês AGN, que significa *Active Galactic Nuclei*. É importante enfatizar que somente a região central da galáxia é "ativa" e não a galáxia inteira. Daí, para termos uma descrição mais precisa destes objetos, devemos chamá-los de Núcleos Galácticos Ativos, ou pelas suas iniciais em inglês, AGN, termo amplamente utilizado pelos astrônomos profissionais. Classificar uma galáxia como galáxia ativa significa dizer que esta galáxia tem parte substancial de sua luminosidade dominada, em algum comprimento de onda, por processos que não são os que produzem a luz estelar.

C APÊNDICE C – GALÁXIAS SEYFERT

As galáxias Seyfert, descobertas por Carl Keenan Seyfert em 1943, são um tipo de galáxia que possuem um núcleo muito luminoso equivalente a metade da luminosidade total da galáxia.

O espectro nuclear demonstra movimentos muito rápidos no núcleo das galáxias desse tipo. Geralmente, a emissão dessas galáxias sofre variabilidade em períodos relativamente curtos, o que leva a concluir que a fonte emissora deve ser um buraco negro, ou alguma outra coisa também muito compacta.

As galáxias Seyfert morfologicamente são simplesmente galáxias espirais com núcleos extremamente brilhantes, mas a atividade próxima ao núcleo é suficiente para classificá-las em um grupo separado.

D APÊNDICE D – QUASARES

Os quasares (abreviatura de Quasi stelar objectus, do latim Objetos quase estelares) são objetos de extrema luminosidade encontrados nos confins do Universo conhecido, mais precisamente a partir de dois bilhões de anos-luz da Terra. Estes objetos são núcleos galácticos ativados por buracos negros super-massivos, que absorvem gás e poeira da galáxia liberando no processo energia muito superior à liberada pela fusão nuclear.

E APÊNDICE E – OBJETOS BL LACERTAE e BLAZARES

Os blazares são um subconjunto de objetos pertencentes à categoria de galáxias ativas ou AGN (Active Galactic Nuclei). São galáxias elípticas, com um centro tipo-estelar muito brilhante, e com determinadas características gerais; os blazares aparecem ópticamente no céu como um objeto puntiforme ou seja, não possui extensão espacial como ocorre com as galáxias e/ou nebulosas. Alguns blazares têm nebulosidades à sua volta ou seja, são objetos ligeiramente nebulosos mas a maior parte de sua emissão luminosa vem de uma fonte puntiforme. Seus espectros são bastante suaves, ou seja, os espectros dos blazares não apresentam linhas de absorção fortes tais como são encontradas em algumas estrelas. A luz visível dos blazares apresenta-se, frequentemente, parcialmente polarizada.

Vários blazares emitem uma significativa fração de sua radiação como energia acima de 100 MeV. Dependendo do valor para o qual o fluxo desta energia atinge o seu máximo, os blazares são separados em três categorias:

- classe LBL (blazar vermelho)

Neste caso o fluxo de radiação tem seu valor máximo na região entre 10 MeV a 1 GeV.

- classe HBL (blazar azul)

Esta classe de blazares apresenta o máximo do fluxo de energia na região entre 1 GeV e 100 GeV.

- blazar-TeV

Neste caso o máximo do fluxo de energia está localizado entre 200 GeV e 1 TeV. Existem poucos blazares nesta classe.

F APÊNDICE F – ESTRELAS DE NÊUTRONS

As estrelas de nêutrons são corpos celestes supermassivos, ultracompactos e com gravidade extremamente alta. Segundo estudos matemáticos e simulações, existem dois tipos de estrelas de nêutrons, a estrela de nêutron normal, que tem gravidade superficial relativamente fraca, e a estrela de nêutrons ultra compacta, com gravidade superficial extremamente alta.

Devido à alta densidade deste tipo de corpo celeste, os feixes de luz que passam próximo às estrelas de nêutrons são desviados, ocasionando distorções visuais, muitas vezes aberrações cromáticas ou o efeito chamado lente gravitacional.

Estrelas de nêutrons são um dos possíveis estágios finais na vida de uma estrela. Elas são criadas quando estrelas com massa de quatro a oito vezes a do Sol esgotam sua energia nuclear e passam por uma explosão de supernova. Essa explosão afasta as camadas mais externas da estrela, formando um resíduo de supernova. A região central da estrela se contrai com a gravidade, fazendo com que prótons e elétrons se combinem para formar nêutrons, e daí vem o nome "estrela de nêutrons".

G APÊNDICE G – SISTEMAS BINÁRIOS

Em astronomia, sistema binário ou estrela binária é um sistema composto por duas estrelas muito próximas, ligadas gravitacionalmente entre si e que à vista desarmada, ou com uma pequena ampliação, aparentam ser apenas uma. Num sistema binário, os dois componentes gravitam em torno de um centro de gravidade comum. Às vezes, seu período de revolução é breve, menos de 20 minutos em certos casos extremos; outras vezes, ao contrário, é muito longo.

H APÊNDICE H – ESTRELAS SIMBIÓTICAS

As estrelas simbióticas são geralmente aceitas como sendo sistemas binários de longo período orbital ($P \sim 200$ dias - 10 anos). Elas compreendem uma pequena classe de variáveis eruptivas que mostram um espectro simultâneo de estrela fria (forte contínuo vermelho, banda em absorção TiO e VO, linhas em absorção de metais ionizados simples e neutros) e de uma componente quente (linhas em emissão da série de Balmer, He I e [O III] e linhas em emissão altamente ionizadas como He II e [Fe VII]) e um fraco contínuo azul.

I APÊNDICE I – GAMMA RAY BURST (EXPLOSÃO DE RAIOS GAMA)

Nos últimos anos, graças principalmente aos dados obtidos pelo Observatório Compton de Raios Gama (americano), pelo satélite ítalo-holandês BeppoSAX e pela missão Internacional HETE (High Energy Transient Explorer), grandes avanços foram obtidos no nosso conhecimento sobre os enigmáticos fenômenos conhecidos por "bursts" de raios gama, ou explosões cósmicas de raios gama.

As explosões cósmicas de raios gama são os fenômenos que emitem a maior quantidade de energia por unidade de tempo no universo. Uma única explosão, com uma duração típica de alguns segundos, emite tanta energia em raios gama quanto o Sol vai emitir durante toda a sua vida de 10 bilhões de anos, em todas as faixas do espectro eletromagnético; isso é comparável a transformar inteiramente a massa do Sol em energia - de acordo com a famosa fórmula $E = mc^2$ de Einstein - em algumas dezenas de segundos, ou emitir durante esse período de tempo a mesma energia que a nossa Galáxia inteira emite em 100 anos. O único evento cósmico mais energético do que uma explosão dessas foi a própria explosão inicial do universo, o Big Bang.

J APÊNDICE J– ANÃS MARRONS

Anãs marrons são objetos formados de plasma e compostos em maior quantidade de hidrogênio e hélio e em menor quantidade por deutério, lítio e outros elementos. Possuem uma massa superior a 13, mas inferior a 75 vezes a massa de Júpiter. Devido ao processo de degeneração, elas apresentam um tamanho muito próximo de Júpiter e uma luminosidade muito fraca e avermelhada e não marrom como o nome pode erroneamente sugerir. Por causa dessa fraca luminosidade, sua luz se situa na faixa do infravermelho próximo do espectro.

Alcançam temperaturas de aproximadamente 1000 a 3400 K. São encontradas em sua maioria em sistemas binários, orbitando estrelas de massa baixa. Em alguns casos o sistema binário em si pode ser composto duas anãs marrons que compartilham um baricentro; ou ainda podem ser encontradas como objetos solitários.