



MORFOLOGIA DE RADIOFONTES QUE APRESENTAM JATO

RELATÓRIO DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)

Iara Tosta e Melo (Faculdade Oswaldo Cruz, Bolsista PIBIC/CNPq/INPE)
E-mail: iara@craam.mackenzie.br

Dr. Luiz Claudio L. Botti (CRAAM/EE/Mackenzie e DAS/CEA/INPE,
Orientador)
E-mail: botti@craam.mackenzie.br

COLABORADOR
Henrique Veiga Giannini (Mackenzie, Bolsista PIBIC/CNPq)

Julho de 2010

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	05
1.1 Objetivos do trabalho.....	05
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO.....	06
2.1 Centro Galáctico e seus Componentes.....	07
2.2 AGNs e quasares.....	11
2.3 OJ287.....	12
2.4 Modelos.....	17
2.4.1 Modelo Canônico.....	17
2.4.2 Modelo de Marscher & Gear.....	18
2.5 Aplicações.....	23
2.5.1 Aplicação do Modelo Canônico.....	23
2.5.1 Aplicação do Modelo de Marscher & Gear.....	24
CAPÍTULO 3 – MÉTODO.....	25
3.1 Rádio Observatório do Itapetinga (ROI)	25
3.2 Coleta de dados.....	29
3.3 Conversão dos dados.....	30
3.3.1 Redução dos dados obtidos no ROI.....	31
3.3.2 Correção dos erros de apontamento do Rádio-Telescópio.....	33
3.3.3 Correção devido ao radiotelescópio estar localizado no interior de uma redoma.....	35
3.3.4 Conversão dos dados após a realização das correções	36
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS.....	37
4.1 Análise dos dados obtidos com o Rádio-Observatório do Itapetinga	
4.1.1 Virgo A	
4.1.2 Sgr A*	
4.1.3 OJ287	
4.2 Distribuição Espectral de Energia	
4.2.1 Distribuição Espectral de Energia do quasar OJ287	
4.2.2 Distribuição Espectral de Energia de Sgr A*	

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	43
CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS.....	43

1.0 Introdução

Um dos grandes problemas tratados em um núcleo ativo de galáxias ou em galáxias como a Via Láctea é a origem de certas emissões em determinadas faixas do espectro eletromagnético. Independentemente do modelo que trata deste assunto, deve-se levar em consideração a presença dos campos elétricos e magnéticos, como por exemplo os modelos de Sligh e de Shklovsky (SLISH, 1963; SHKLOVSKY, 1960).

Tanto na região central de Nossa Galáxia como nos quasares localizados a grandes distâncias existem jatos e o estudo da Física dessas regiões é de suma importância, uma vez que é nela que se dá a produção e o transporte de energia e matéria.

Assim como no trabalho anterior a este, foram realizadas observações do Centro Galáctico e do quasar OJ287 em 22 e 43 GHz utilizando o Rádio-Observatório do Itapetinga, a fim de se obter as curvas de luz das respectivas fontes para entender melhor o comportamento destas fontes nestas frequências.

O estudo do núcleo de Nossa Galáxia é de grande ajuda para o entendimento dos AGN's¹, uma vez que ele se encontra muito próximo e por apresentar características semelhantes às galáxias com núcleos ativos (GIANNINI, 2008).

Portanto, a fonte OJ287 que é classificada como um quasar servirá de objeto de comparação com o Centro da Nossa Galáxia, devido às semelhanças encontradas nos seus centros galácticos, assim como seus processos de emissão na frequência rádio.

1.1 Objetivo

¹ Núcleo Ativo de Galáxia. Do inglês Active Galactic Nuclei.

Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo sobre a fonte rádio compacta Sgr A* localizada no Centro de Nossa Galáxia e o quasar OJ287 explorando suas principais características a partir dos dados obtido no ROI. Foram aplicados alguns modelos tentando explicar a grande quantidade de energia produzida por regiões de dimensão muito pequena bem como a variabilidade destes objetos compactos.

2.0 Referencial teórico

Neste tópico apresenta-se uma revisão das características do Centro Galáctico e do quasar OJ287, assim como a descrição das principais componentes dessas fontes, observando suas principais características a partir dos dados obtidos no ROI.

2.1 Centro Galáctico e seus Componentes

Assim como já foi mencionado no trabalho anterior, hoje sabemos que Nossa Galáxia é considerada uma galáxia espiral Sb, onde S representa a sigla para uma galáxia de formato espiral e b representa o tamanho intermediário para o núcleo e para os braços espirais.

Do ponto de vista morfológico, Nossa Galáxia é composta por um esferóide, onde está localizado o halo, por uma estrutura, onde se encontra o disco galáctico e os braços espirais, e por uma estrutura denominada bojo nuclear. Cada uma destas regiões apresenta características distintas, porém, em todas são observadas estrelas em diversas fases de evolução, gás, poeira, e outras características.

Na região central da Nossa Galáxia, que também é conhecida como Sagittarius A (Sgr A), nome devido ao Centro Galáctico estar na direção da constelação de Sagittarius, encontram-se inúmeras fontes interessantes tais

como regiões HII, remanescente de supernova, filamentos, arcos etc, já discutidas no trabalho anterior.

Outro componente interessante presente no interior do Centro Galáctico que ainda não foi mencionada é o aglomerado de estrelas massivas jovens, localizado a cerca de 10 pc de Sgr A*. Há dois grupos de estrelas neste aglomerado: o primeiro grupo é IRS 16, que é um aglomerado de estrelas massivas jovens, que segue a rotação no sentido horário do centro dinâmico de Nossa Galáxia. O segundo grupo seguindo o sentido anti-horário de rotação é o aglomerado compacto de estrelas massivas jovens, denominada IRS 13. Esta região deve ser responsável pela radiação detectada no infravermelho. Neste caso, a radiação ultravioleta e visível emitidas pelo Centro Galáctico é absorvida pelos grãos interestelares, que re-irradiam no infravermelho. Este último aglomerado coincide com uma fonte discreta de raios-x, que pode conter um núcleo remanescente de um buraco-negro de massa intermediária (IMBH) (MAILLARD et al. 2004). Para se ter uma idéia da localização de IRS 16 e IRS 13, ambos os aglomerados encontram-se no interior de Sgr A.

Outra fonte que está presente na morfologia do Centro Galáctico são as estruturas filamentosas ou filamentos. Estes são estruturas filamentosas com aproximadamente 150 pc de comprimento e cerca de 1 pc de espessura (YUSEF-ZADEH, MORRIS, CHANCE, 1984). Possuem estruturas alongadas (Figura 2.1.1), provavelmente devido a campos magnéticos poloidais perpendiculares ao plano galáctico. Há também uma estrutura espiral em torno dos filamentos.

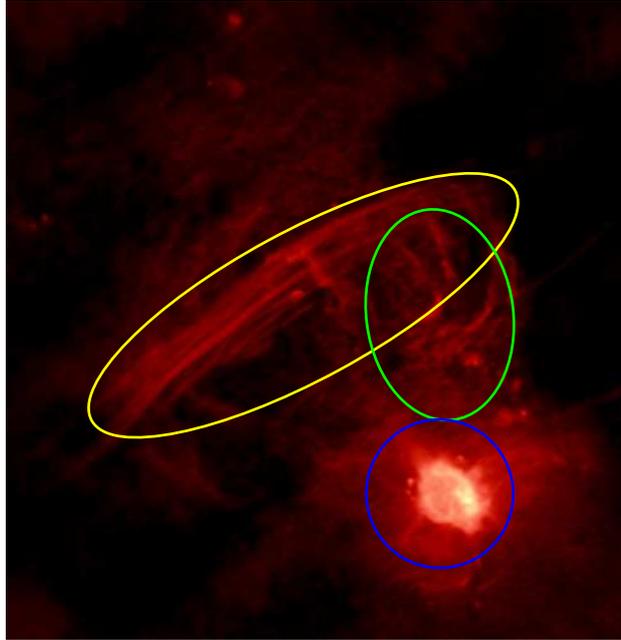


Figura 2.1.1 – Arcos de filamentos e Sgr A em VLA em 1,4 GHz.

Fonte – Yusef-Zadeh, Morris e Chance (1984)

Um fato interessante é que essas estruturas são características de campos magnéticos livres de força. Matematicamente, seu comportamento pode ser verificado pela equação de movimento magneto-hidro-dinâmica (2.1) para o caso de um único fluido. Estas estruturas são consideradas como um plasma magnetizado que tem a capacidade de transportar corrente na presença de um campo gravitacional (Priest, 1982).

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{B}}{c} - \nabla p + \rho \mathbf{g} \quad (2.1)$$

onde ρ é a densidade volumétrica, \mathbf{J} a densidade de corrente elétrica, \mathbf{B} o campo magnético, ∇p o gradiente de pressão e \mathbf{g} a aceleração da gravidade.

Mas para o caso estacionário, o termo $\frac{d\mathbf{v}}{dt} = 0$ e \mathbf{g} é desprezível.

Com isso, se obtém a relação entre a força de Lorentz e o gradiente de pressão, dada por (2.2).

$$\frac{\mathbf{J} \times \mathbf{B}}{c} = \nabla p \quad (2.2)$$

Assim, para o caso de a Força de Lorentz for maior que o gradiente de pressão, ocorrerá o estrangulamento do campo magnético. Essa situação pode ser explicada através da equação 2.3, conhecida como parâmetro β do

plasma, que é a razão entre a densidade térmica pela densidade de energia magnética:

$$\beta = \frac{12\pi n K_B T}{B^2} \quad (2.3)$$

onde B é o campo magnético, n o número de portadores de cargas, T a temperatura desse plasma e K_B é a constante de Boltzmann. O parâmetro β distingue as regiões onde o plasma é confinado pelo campo magnético ($\beta \ll 1$) e onde não pode ser confinado ($\beta \gg 1$). Quando o numerador for maior que o denominador, ou seja, $12\pi n K_B T < B^2$, será atingida a condição de estrangulamento (Priest, 1982), o que implica que $\beta \ll 1$ e que as estruturas serão confinadas por um campo magnético. A partir dessa situação, espera-se observar um condutor gigantesco, onde flui uma corrente elétrica livre de força.

Além desses curiosos filamentos foi identificada a partir de observações da região Central de Nossa Galáxia em 1408 MHz, Sofue et al. (1988) uma estrutura conectada ao Centro Galáctico. A esta conexão com a região Central da Galáxia, supôs-se estivesse relacionada à atividade desta região e fosse resquício de um jato ejetado do Centro Galáctico (SOFUE et al., 1989).

Porém, na realidade, esta estrutura tem origem a partir do Centro Galáctico, e se estende por cerca de 4 kpc e apresenta diâmetro de aproximadamente de 200 pc, o que implica numa estrutura altamente colimada. Tendo um formato cilíndrico essa fonte gera emissão de natureza não térmica. Quanto aos seus mecanismos de emissão e aceleração, há duas hipóteses: uma considera um jato ejetado do Centro Galáctico ou o remanescente de um feixe de plasma relativístico do núcleo, a outra considera um campo magnético poloidal torcido devido à rotação diferencial entre o disco e o halo. Esta torção do campo pode fortalecer o campo e acelerar o plasma, bem como produzirá raios cósmicos ao longo das linhas de campo magnético (SOFUE et al. 1989). Porém, ainda existe certa controvérsia se esta estrutura núcleo-jato existe mesmo ou se é fruto de despolarização em posições intermediárias. No entanto, um mapa feito em 5 GHz, em Effelsberg, aponta para uma estrutura em forma de jato alcançando regiões de até 160 pc do núcleo, perpendicularmente ao plano galáctico (ALTENHOFF et al. 1979).

Já no interior de Sgr A Oeste encontra-se a fonte compacta sincrotrônica Sgr A*, descoberta em 1974, que é o verdadeiro Centro de Nossa Galáxia (BROWN, LO, 1982). Acredita-se que esta fonte deva coincidir com um buraco-negro supermassivo de $10^6 M_{\odot}$, situado no centro dinâmico da Galáxia. Desde sua descoberta, sua densidade de fluxo tem sido observada em comprimentos de onda centimétricos e milimétricos, buscando identificar flutuações em sua densidade de fluxo. Zhao, Bower e Goss (2001), a partir dos dados obtidos com o VLA, identificaram periodicidade na densidade de fluxo do Sgr A*, com ciclos de aproximadamente 106 ± 10 dias, o que implica que Sgr A* pode ser uma fonte quase-periódica.

Nestas observações, foi verificado que a amplitude da variabilidade tende a aumentar para comprimentos de onda mais curtos.

A Figura 2.1.2 mostra as curvas de luz durante o período de 2000 até 2003 em quatro épocas distintas com o VLA. Pode-se verificar que Sgr A* é bem variável nos comprimentos de onda de 2,0, 1,3 e 0,7 cm (15 GHz, 23 GHz e 43 GHz). As flechas indicam explosões ocorridas em raios-X. Nota-se também que a amplitude de variação da densidade de fluxo aumenta com a diminuição do comprimento de onda, como foi verificado por Zhao, Bower e Goss (2001).

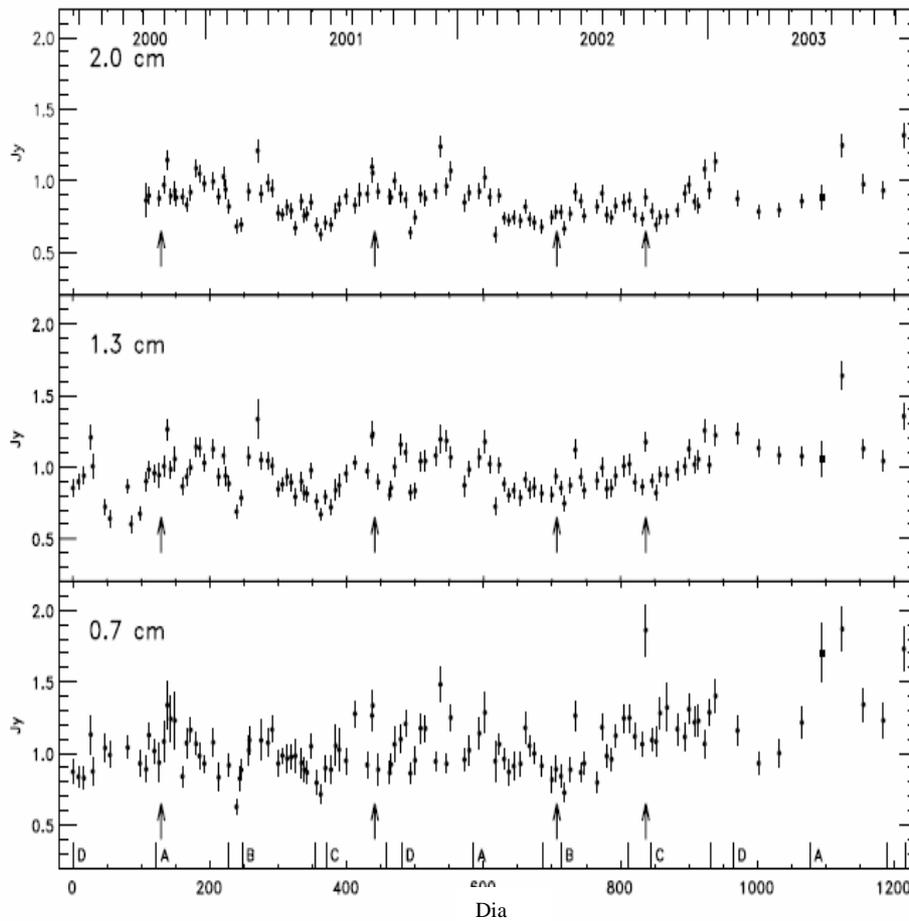


Figura 2.1.2 – Curvas de luz de Sgr A* em rádio em 2.0, 1.3 e 0.7 cm
 Fonte - Herrnstein et al. (2004)

Herrnstein et al (2004) não confirmaram a possível variação com período de cerca de 106 dias observados por Zhao (2001). Nota-se que para os três comprimentos de onda, Sgr A* é uma fonte bem variável, apresentando variação na sua densidade de fluxo de 0.63 ± 0.06 Jy até 1.87 ± 0.16 Jy para 0,7 cm, $0,60 \pm 0,06$ Jy até $1,64 \pm 0,10$ Jy para 1,3 cm e de $0,62 \pm 0,05$ Jy até $1,32 \pm 0,08$ Jy para 2,0 cm (HERRNSTEIN et al. 2004). Os dados do Gráfico 3 podem ser conferidos no Apêndice A.

2.2 AGN e Quasares

Resumidamente, os núcleos ativos de galáxias (AGNs) são os objetos que diferem das galáxias normais como nas linhas de emissão largas e

contínuo não térmico. Entre suas características principais, está a produção de enormes quantidades de energia a partir de um volume muito pequeno e a alta variação em luminosidade em curtos períodos de tempo, podendo variar de horas até anos. É justamente devido ao seu brilho muito intenso que estes objetos podem ser observados à grandes distâncias. Uma explicação para os fenômenos citados acima seria a existência de um buraco-negro supermassivo, localizado na região central dos AGNs (PETERSON, 1997).

De acordo com a teoria atual sobre AGNs, estes objetos podem apresentar características e propriedades diferentes conforme o ângulo de observação. Por exemplo, caso o ângulo entre o jato e a linha de visada esteja situado entre 30° e 90° , tem-se uma rádio-galáxia. Caso o ângulo formado esteja entre 10° e 30° , observa-se um quasar. E para finalizar, para ângulos menores que 10° entre o jato e a linha de visada, observa-se um blazar² ou um objeto BL Lacertae³.

O modelo atualmente aceito para os AGNs consiste em um disco de acrecimento associado a um buraco-negro supermassivo, localizado na região central destes objetos, cuja emissão ocorre como um jato relativístico.

Outra característica marcante de um AGN é sua emissão de origem não-térmica, denominada radiação sincrotrônica. É definida por um elétron relativístico espiralando num campo magnético. Ao espiralar, o elétron emite radiação eletromagnética na direção de seu movimento.

Já os quasares, descobertos em 1963, (SCHMIDT, 1963), foram inicialmente confundidos com estrelas, devido a sua aparência estelar. Esses objetos que apresentavam grande emissão na frequência rádio receberam o nome de quasar, nome que vem de objeto quase-estelar. Outra característica presente nos quasares que os diferencia de uma estrela é a emissão sincrotrônica.

Os quasares são classificados também conforme seu comportamento nas frequências rádio do espectro. Os AGNs que emitem fracamente em rádio são denominados de Radio Quiet⁴ e os objetos que

² Os blazares são um subconjunto de objetos pertencentes à categoria de galáxias ativas. Um blazar é uma galáxia elíptica, com um centro tipo-estrela muito brilhante.

³ Objeto BL Lac é um tipo de galáxia com núcleo muito ativo, classificado como sendo um subtipo de blazar. É um objeto altamente variável.

⁴ Silencioso, quieto.

apresentam fluxo significativo nesta frequência são chamados de Radio Loud⁵. Os objetos classificados como Radio Quiet podem ocorrer em galáxias elípticas ou em galáxias espirais, sendo que os Radio Loud são observados apenas em galáxias elípticas (PETERSON, 1997).

2.3 OJ287

Um exemplo de quasar é a fonte OJ287, que é um grande núcleo galáctico ativo localizado na constelação de Câncer⁶. Possui um desvio-para-o-vermelho⁷ de $z = 0,306$, o que equivale a uma distância de 3,5 bilhões de anos-luz da Terra.

OJ287 tem sido observada em óptico desde o final do século 19, porém somente em 1968 foi identificada como um quasar. A Figura 2.3.1, representa a variação da magnitude com o tempo, denominados dados fotométricos, ao longo de 100 anos de observações.

Observações em comprimento de onda óptico apresentam variações rápidas de grande amplitude de minutos, horas e dias bem como variações mais lentas com escalas temporais de vários anos.

Na curva de luz pode-se notar claramente um período referente a fortes explosões em intervalos de tempo de 12 anos. A partir dos dados obtidos no projeto OJ-94, criado para acompanhar a explosão prevista para o outono de 1994, envolvendo mais de 50 astrônomos de 10 países, verificou-se que entre os períodos de 12 anos existem vários picos duplos separados de 1 a 3 anos (SILLANPAA, et al. 1996; LETHO e VALTONEN, 1996).

⁵ Ruidoso, barulhento.

⁶ Quarta constelação zodiacal, compreendida entre as ascensões retas de 7h 53min e 9h e 19min, entre as declinações 6.8° e 33.3°. A constelação zodiacal de Câncer é representada pelo Caranguejo, que na mitologia grega, foi o animal que mordeu o pé de Hércules.

⁷ A sigla z corresponde ao valor do desvio para o vermelho (redshift).

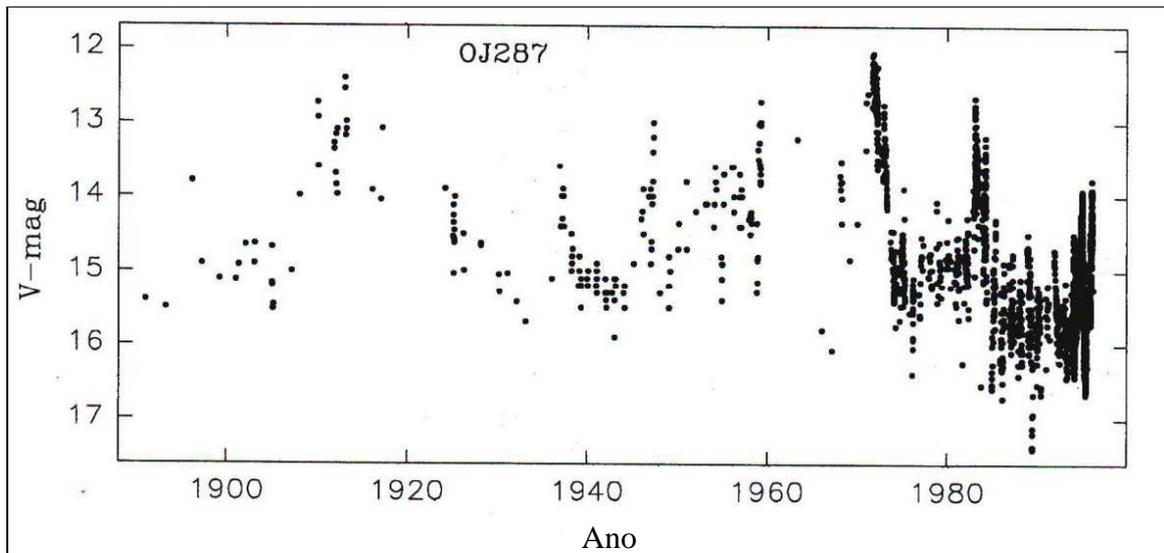


Gráfico 2.3.1 – Dados fotométricos de OJ287 na banda V entre 1891 e 1997.
 Fonte – Observatório de Turku.

Há alguns modelos que tentam explicar a variabilidade de 12 anos encontrada em OJ287, mas uma explicação para a presença desta periodicidade encontrada na curva de luz em óptico é a que haja um sistema binário de buracos-negros supermassivos em seu centro (LETHO, VALTONEN, 1996).

Este modelo está diretamente relacionado com as fortes explosões com periodicidade de 12 anos. O modelo baseia-se na existência de dois buracos-negros supermassivos, onde o maior, denominado de primário teria em torno dele e de seu disco de acréscimo um outro buraco-negro, chamado secundário. O secundário teria sua órbita descrita em torno do buraco-negro primário com alta inclinação em relação ao disco de acréscimo do primário. Logo, sempre que o buraco-negro secundário cruzar o disco de acréscimo do primário, fortes perturbações seriam induzidas e ocorreria uma explosão, ocasionando o aumento de emissão (LETHO, VALTONEN, 1996). Isto ocorre devido à relação entre a taxa de acréscimo no disco e o aparecimento de componentes no jato, que estão por sua vez conectados com o aumento da densidade fluxo que é observada.

A Figura 2.3.2 ilustra o sistema binário de buracos-negros onde o primário está com o disco de acréscimo representado pela cor azul, que é o maior e mais massivo entre ambos, contendo cerca de $18 \times 10^9 M_{\odot}$. O buraco-

negro secundário tem uma massa muito menor comparada com o primário, com cerca de $10^8 M_{\odot}$.

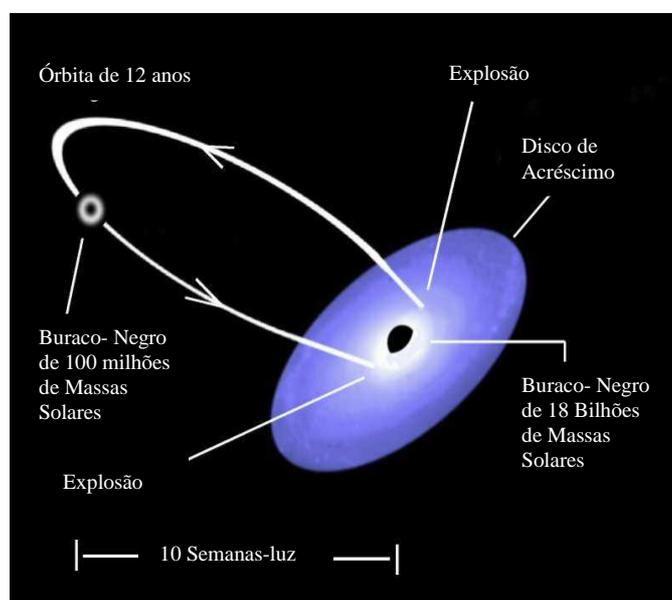


Figura 2.3.2 – Sistema binário de buracos-negros do quasar OJ287

Fonte - http://www.astroarts.co.jp/news/2008/04/24oj_287/index-j.shtml

Esta fonte apresenta características muito semelhantes a um objeto BL Lac. Como exemplo, em observações com VLBI, apresenta componentes que estão correlacionadas com eventos detectados no contínuo. Estas componentes apresentam movimento superluminal, isto é, sua velocidade supera a velocidade da luz.

A velocidade aparente superluminal⁸ das componentes pode ser comprovada pelas observações realizadas entre outubro de 1990 e dezembro de 1996 por Tateyama et al. (1999). Na Figura 2.3.3 são mostrados 27 mapas de VLBI em 8 GHz obtidos em diferentes períodos de observação.

Nesta figura é possível verificar o nascimento e o deslocamento no decorrer do tempo de seis componentes (C1 à C6), que apresentavam velocidade superluminal média de aproximadamente $9c$.

Nota-se em todos os mapas que o centro da fonte é imutável no tempo, e que as componentes surgem a partir da região central, deslocando-se no sentido oeste.

⁸ A velocidade aparente superluminal trata-se da projeção do movimento do jato de um AGN que é observado a um ângulo em relação à linha de visada.

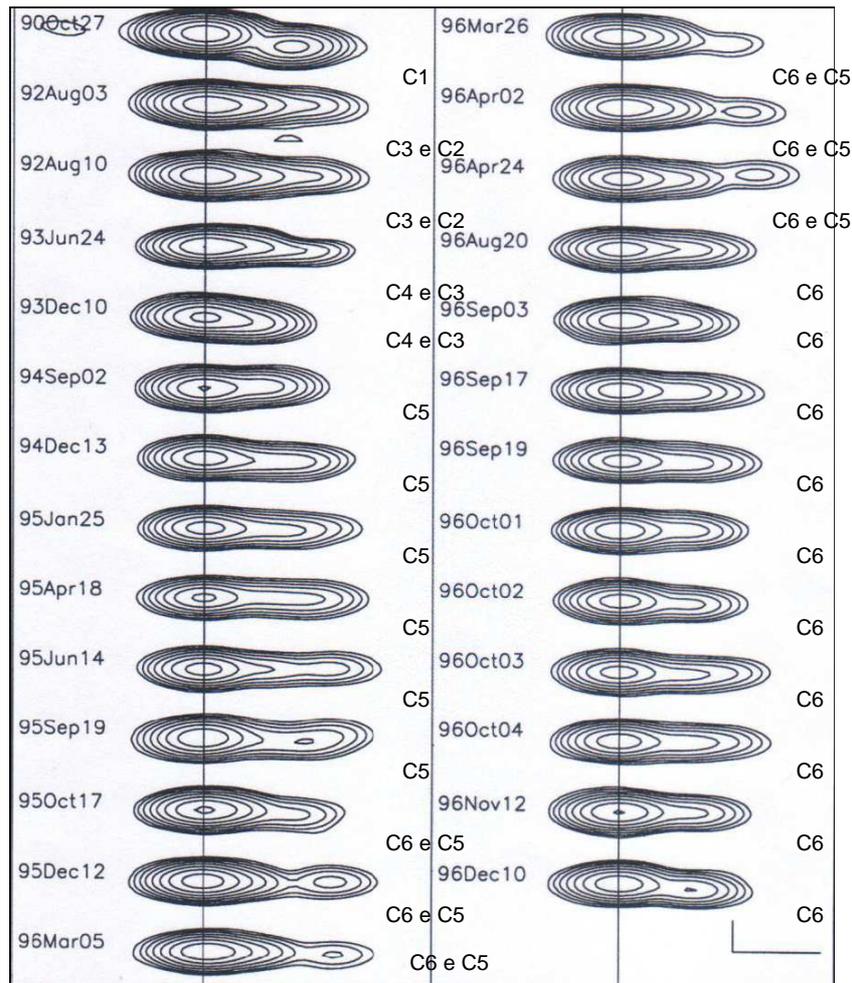


Figura 2.3.3 – Mapas de VLBI da fonte OJ287 em 8 GHz.
 Fonte – Tateyama et al. (1999).

Outro fato interessante é que, existe uma excelente concordância entre as épocas de nascimento das componentes e as explosões detectadas em rádio, o que implica que o aumento da densidade de fluxo de OJ287 nessas frequências está diretamente ligado com o surgimento dessas componentes.

Essa concordância pode ser verificada na Figura 2.3.4, que apresenta a curva de luz em óptico (parte superior do gráfico) e as curvas de luz em rádio para as frequências de 15, 8 e 5 GHz (de cima para baixo). As retas verticais que cruzam o eixo das abscissas representam o início de cada explosão, e conseqüentemente o surgimento das componentes C1 a C6, como pode ser verificado nos mapas de VLBI em rádio. Já as linhas tracejadas representam a época de nascimento das fontes denominadas K1, K2 e K3.

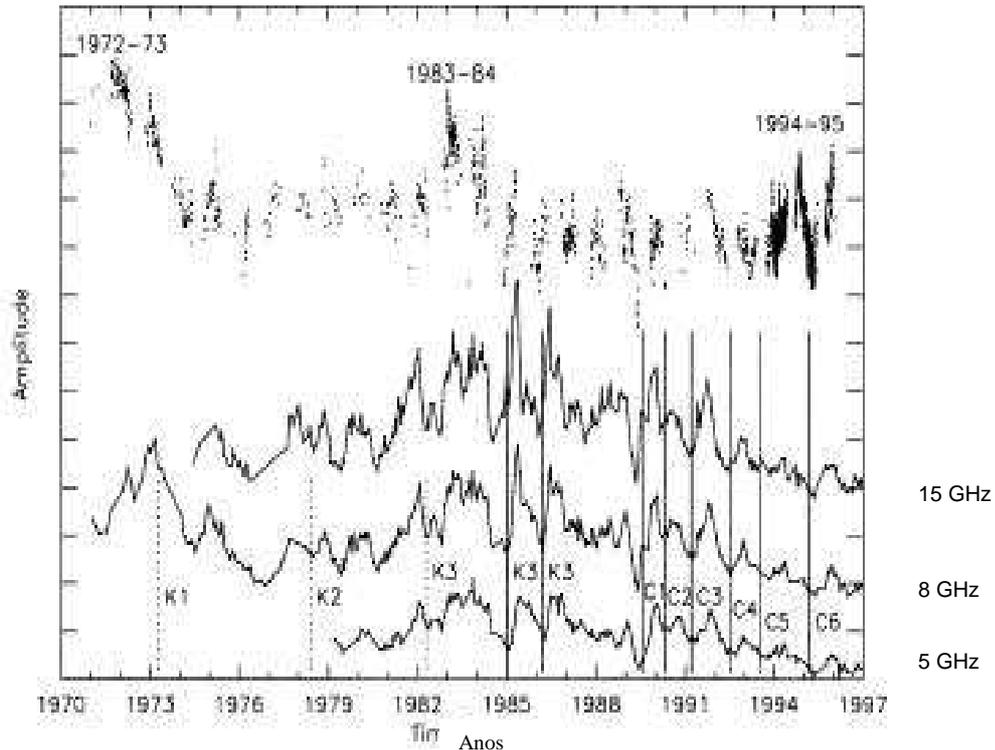


Gráfico 2.3.4 – Curvas de luz em óptico, e em rádio nas frequências de 15, 8 e 5 GHz. Cada marca no eixo das ordenadas (amplitude) corresponde a uma densidade de fluxo de 2 Jy para os dados em rádio e de 1 magnitude para os dados em ótico.

Fonte – Sillanpaa et al. (1996) e University of Michigan Radio Astronomy Observatory

Comparando os dados contidos na Figura 2.3.4 com os mapas de VLBI (figura 2.3.3), nota-se que as épocas onde estão presentes as retas verticais nas curvas de luz em rádio, que representam o início de uma explosão, coincidem com a mesma época do surgimento das componentes C1 a C6 nos mapas de VLBI, ou seja, o surgimento de cada uma das componentes dos mapas de VLBI está relacionado com explosões ocorridas na época de seu nascimento, verificadas nas curvas de luz em rádio.

As componentes superluminais K1, K2 e K3 são outras componentes ejetadas a partir do núcleo do quasar OJ287, com seus surgimentos entre 1970 a 1985. Estas três fontes apresentavam uma velocidade aparente superluminal entre 3,7c e 5,1c (TATEYAMA et al., 1999).

Analisando a figura 2.3.4, nota-se que o comportamento apresentado nas curvas de luz em rádio parecem correlacionados com a curva de luz em óptico, o que permite seu estudo em conjunto, havendo atrasos de poucos meses entre as explosões em cada frequência (VALTAOJA,

SILLANPAA, VALTAOJA, 1987). Essa correlação pode ser notada na dupla explosão ocorrida em 1983 – 1984, onde tanto em rádio como em óptico, OJ287 apresentou o mesmo comportamento.

2.4 Modelos

Existem vários modelos na literatura que tentam explicar o comportamento dos objetos compactos, a grande quantidade de energia emitida em uma dimensão muito pequena além de suas variabilidades temporal e espectral características. A seguir será realizada uma descrição geral do modelo Canônico (SHKLOVSKY, 1965; VAN DER LAAN, 1966; PAULINY-TOTH e KELLERMANN, 1966) e o de Marscher & Gear (1985), assim como suas aplicações para o quasar OJ287.

2.4.1 Modelo Canônico

Este modelo foi introduzido por Shklovsky (1965), van der Laan (1966), Pauliny-Toth e Kellermann (1966) e consiste em tentar explicar os possíveis mecanismos de emissão em duas hipóteses. Este modelo considera primeiramente uma evolução uniforme e de velocidade constante da nuvem de elétrons relativísticos, sendo que posteriormente ocorreria a perda de energia dos elétrons devido à expansão adiabática.

Nota-se também, através deste modelo, que é possível verificar como é a densidade de fluxo nas regiões opticamente espessa e opticamente fina, conforme as equações 2.4 e 2.5, respectivamente,

$$S(\nu) \propto B^{-1/2} \theta^2 \nu^{5/2} \quad (2.4)$$

$$S(\nu) \propto B^{(s+1)/2} \theta^3 \nu^{-(s-1)/2} \quad (2.5)$$

onde B é o campo magnético, θ é o tamanho angular da fonte e ν é a frequência de observação.

Inicialmente este modelo foi aplicado à fonte 3C120, que apresentou um bom acordo com as observações. Porém, posteriormente, houve a aplicação deste modelo para outras fontes sem sucesso. Havia diferenças entre as observações e o modelo. Este não conseguia explicar certas características. Por exemplo, o tempo de subida de uma explosão podia em algumas fontes ser maior do que o tempo de descida, o fluxo que não podia atingir seu valor máximo nas frequências altas antes de atingir seu valor máximo nas frequências baixas e o espectro era plano abaixo da frequência de máximo, contrariando a previsão do modelo canônico de um índice espectral de -2,5 (BOTTI, 1990).

2.4.2 Modelo de Marscher & Gear

Apesar do modelo Canônico explicar à princípio o comportamento de 3C120, este não foi útil para explicar o comportamento de fontes com variabilidades mais intensas. Para que seja possível explicar o comportamento destes objetos, o modelo deveria levar em consideração uma expansão relativística da nuvem de elétrons relativísticos.

O modelo de Marscher & Gear (1985) é um dos modelos atuais que reproduzem de maneira natural as características de uma explosão, assim como a evolução de componentes presentes no jato e de componentes superluminais em fontes compactas, que estão associadas à propagação de uma onda de choque em um jato relativístico cônico e adiabático. Este modelo leva em conta a expansão relativística de uma onda de choque, que traduz o que ocorre dentro do jato de maneira mais satisfatória.

Esses choques são formados quando ocorre alguma perturbação no fluxo do jato, como por exemplo, uma mudança muito brusca na pressão interna. Logo após a formação do choque, os elétrons são acelerados e os campos magnéticos na região são intensificados (MARSCHER, GEAR, 1985).

A Figura 2.4.2.1 apresenta o jato cônico considerado neste modelo, sendo que o mesmo apresenta um ângulo de abertura constante 2Φ e um ângulo θ , que é o ângulo entre o eixo central do jato cônico e a linha de visada.

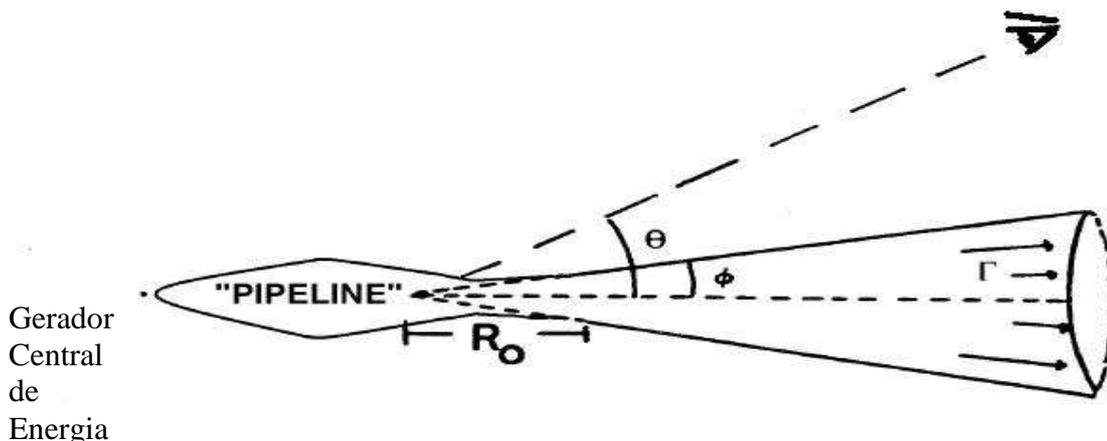


Figura 2.4.2.1 – Esquema geométrico do jato cônico relativístico considerado no modelo de Marscher & Gear.

Fonte – Modificado de MARSCHER, GEAR (1985).

O gerador central de energia deste modelo é o responsável por gerar os elétrons relativísticos e o campo magnético. No caso de um AGN, pode-se considerar como responsável por essa geração um disco de acreção que está associado a um buraco-negro supermassivo na região central do objeto, porém ainda não se sabe quem é o verdadeiro responsável por essa geração.

Os elétrons relativísticos e campos magnéticos antes de serem injetados no jato cônico, atravessam a região denominada "pipeline", que pode ser verificada na Figura 2.4.2.1.

A variável R_0 indica onde se inicia a parte visível do jato. Adotando o eixo central do jato cônico como sendo o eixo x, para a situação quando $R \ll R_0$, ou seja, próximo do gerador central de energia, tem-se a maior densidade de energia magnética e intensidade do campo magnético, sendo que é em R_0 que o plasma contendo os elétrons relativísticos e o campo magnético é injetado. Este plasma apresenta um comportamento estável com uma velocidade relativística, caracterizada por um fator de Lorentz Γ_j constante. Sendo Γ_j dado pela equação 2.6:

$$\Gamma_j = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.6)$$

Para este modelo, assume-se que o fator Doppler⁹ δ^{10} (2.7) seja constante e que o fluxo do plasma no interior do jato cônico seja adiabático. O fato do fluxo ser adiabático implica que não ocorre troca de energia dos elétrons relativísticos com meio externo, sendo que sua densidade vai diminuindo conforme a onda de choque se expande. A densidade do plasma na região de choque é considerada constante até uma distância máxima, sendo que logo após esta distância, a densidade vai para zero.

$$\delta = 33(1+z)B^{1/5}S_\nu^{2/5}\theta_\nu^{-4/5}\nu^{-1} \quad (2.7)$$

onde $B = \left[\frac{8S_\nu^{2/5}\theta_\nu^{-4/5}(1+z)^{1/5}}{\nu} \right]^5$ é o campo magnético, S_ν a densidade de fluxo correspondente à frequência ν , θ_ν é a dimensão angular e ν é a frequência de observação.

Durante a evolução e expansão da onda de choque pelo jato, o volume emissor também se expande. Nessa expansão, os elétrons relativísticos sofrem perdas relevantes devido ao efeito Compton, que é o choque entre elétrons relativísticos com os fótons de baixa energia. Ocorrem três fases de perdas neste modelo: a) Compton; b) Sincrotrônica; c) Adiabática.

No estágio Compton, a densidade de fluxo aumenta em todas as frequências devido à colisão dos elétrons relativísticos com os fótons presentes na região.

Na região de perdas devido ao efeito Compton, a densidade de fluxo em função da frequência, a frequência de máximo e a densidade de fluxo máxima em função da frequência de máximo são dadas pelas equações 2.8, 2.9 e 2.10, respectivamente:

$$S_\nu \propto R^{[(11-s)-a(s+1)]/8} \nu^{-s/2} \quad (2.8)$$

$$\nu_M \propto R^{-(a+1)/4} \quad (2.9)$$

$$S_M \propto \nu_M^{-(11-a)/[2(a+1)]} \quad (2.10)$$

⁹ O fator Doppler está relacionado com a variação do comprimento de onda observado quando o corpo que emite a luz se desloca.

¹⁰ O fator de Lorentz e o fator Doppler estão relacionados à velocidade relativística de expansão das componentes do jato.

Após este estágio, os elétrons relativísticos sofrem perdas sincrotrônicas, ou seja, os elétrons que se movimentam com velocidades relativísticas espiralam num campo magnético emitindo radiação sincrotrônica. Nesta etapa, a densidade de fluxo apresentada pela onda de choque depende do valor do índice espectral de energia dos elétrons relativísticos “s”, sendo que pode permanecer constante ($s = 2.5$), aumentar ($2 < s < 2.5$) ou cair lentamente com o tempo ($s > 2.5$) (MARSCHER, GEAR, 1985).

Da teoria sincrotrônica (Pacholczyk, 1979), tem-se a densidade de fluxo da região opticamente fina do espectro, a frequência de turnover e a densidade de fluxo máxima em função da frequência de turnover, dadas pelas equações 2.11, 2.12 e 2.13 respectivamente:

$$S_v \propto R^{-[4(s-1)+3a(s-2)]/6} v^{-s/2} \quad (2.11)$$

$$v_M \propto R^{-[4(s-2)+3a(s-1)]/3(s+5)} \quad (2.12)$$

$$S_M \propto v_M^{(2s-5)(2+3a)/[4(s+2)+3a(s-1)]} \quad (2.13)$$

onde R é a distância perpendicular à linha de visada, s é o índice do espectro de energia dos elétrons relativísticos, $s = 1 - 2\alpha(S \propto v^\alpha)$, α é o índice

espectral, calculado por $\alpha = \frac{\log S_{22}/S_{43}}{\log v_{22}/v_{43}}$, e o expoente a informa quanto o campo

magnético decresce com a frequência.

No último estágio deste modelo, as perdas adiabáticas são relevantes. O termo adiabático refere-se às perdas de energia dos elétrons que irradiam principalmente na frequência observada e não devido á onda de choque. Neste estágio, a densidade de fluxo em função da frequência, a frequência máxima e a densidade de fluxo máxima em função da frequência de máximo são expressas pelas equações 2.14, 2.15 e 2.16, respectivamente:

$$S_v \propto R^{-7a(s-1)/6} v^{-(s-1)/2} \quad (2.14)$$

$$v_M \propto R^{-a(7s+8)/3(s+4)} \quad (2.15)$$

$$S_M \propto v_M^{10a(s-1)/(7s+8)} \quad (2.16)$$

É possível encontrar a distância a partir da origem até a região onde ocorreu o choque em épocas distintas, utilizando a equação 2.17:

$$R_2 - R_1 = \beta_s c (t_2 - t_1) (1 + z)^{-1} (1 - \beta_s \cos \theta)^{-1} \approx \Gamma_j \delta c (t_2 - t_1) (1 + z)^{-1} \quad (2.17)$$

sendo t_1 e t_2 os tempos correspondentes às épocas 1 e 2, β_s é a velocidade de expansão do choque e os fatores Γ_j e δ os fatores Lorentz e Doppler, respectivamente.

O modelo de Marscher & Gear prevê que durante a evolução de uma explosão, ocorre o aumento da densidade de fluxo enquanto o máximo de emissão se desloca de uma dada frequência maior para uma frequência menor. Um exemplo de sucesso do modelo é a análise da explosão que ocorreu com o quasar 3C273 no ano de 1983, entre as frequências rádio e o infravermelho (MARSCHER; GEAR, 1985), como pode ser verificado no Gráfico 8. Pode-se notar que o modelo tem um excelente ajuste dos pontos sobre as duas curvas.

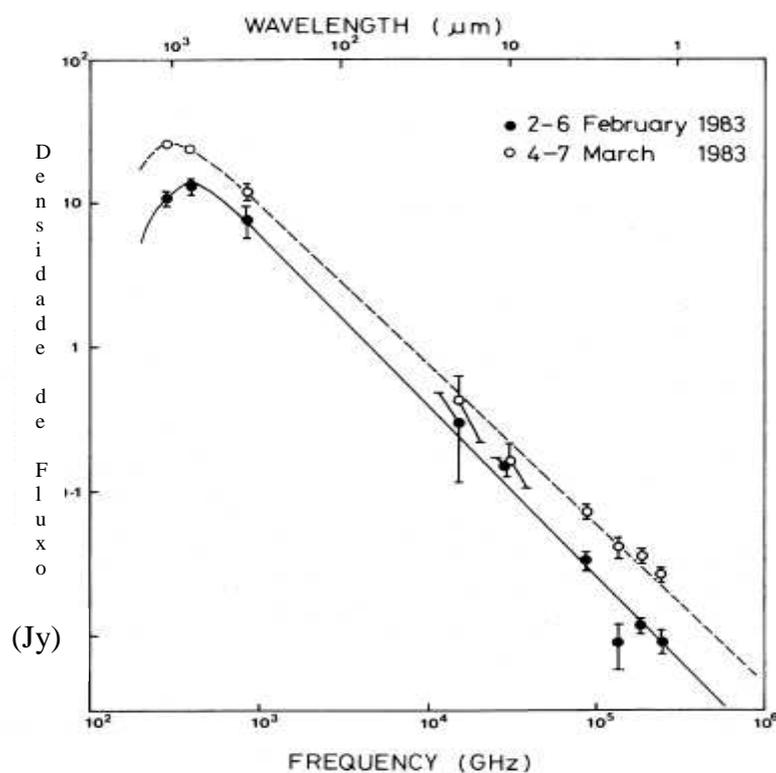


Gráfico 8 – Aplicação do modelo de Marscher & Gear para a explosão de 1983.
Fonte – Marscher e Gear, 1985

2.5 APLICAÇÕES

2.5.1 Aplicação do Modelo Canônico

Esta aplicação foi apresentada no trabalho anterior, mas será novamente utilizada para que seja possível realizar uma comparação deste modelo com o modelo de Marscher & Gear. Assim, visando verificar se o modelo Canônico explica os dados observados para o quasar OJ287, segue sua aplicação.

Resumidamente, para explicar corretamente os dados obtidos, serão utilizados dois parâmetros definidos por Ennis et al. (1982) e Altschuler e Wardle (1975), que caracterizam a variabilidade de uma fonte.

$$R_I = \frac{\Delta S_{14,5}}{\Delta S_{4,8}} \quad (2.18)$$

$$R_T = \frac{t_{4,8} - t_0}{t_{14,5} - t_0} \quad (2.19)$$

onde R_I fornece a razão entre a intensidade de uma explosão em duas frequências e R_T fornece a razão das diferenças de tempos de uma explosão em duas frequências diferentes.

Estes dois parâmetros também podem ser calculados para o modelo canônico, pelos parâmetros R_{IC} e R_{TC} , conforme as equações 2.20 e 2.21:

$$R_{IC} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{\left(\frac{7s+3}{4s+6} \right)} \quad (2.20)$$

$$R_{TC} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{\left(\frac{s+4}{4s+6} \right)} \quad (2.21)$$

onde s é o índice do espectro de energia dos elétrons relativísticos e λ_1 e λ_2 são os comprimentos de onda utilizados nas observações.

Na Tabela 1, fez-se uma comparação entre os resultados observacionais e o modelo canônico. Os valores de s foram calculados a partir da equação $\alpha = (s-1)/2$ sendo $S \propto \nu^{-\alpha}$, com o índice espectral entre 4.8 e

14.5 GHz, e entre 4.8 e 8.0 GHz, correspondente à época em que ocorreu o evento, sendo α calculado como:

$$\alpha = \frac{\log\left(\frac{S_1}{S_2}\right)}{\log\left(\frac{v_1}{v_2}\right)} \quad (2.22)$$

Tabela 1 – Resultado da aplicação do modelo canônico

Época	RI	RT	RIC	RTC	s
2006	3,25	1,12	1,45	0,35	-0,6
2006	1,35	0,92	1,60	0,55	-0,8

Ao analisar os dados contidos na Tabela 1, conclui-se que o modelo canônico não explica corretamente os dados observados, uma vez que não foi possível ajustar os parâmetros R_{IC} e R_{TC} com os dados observados R_I e R_T .

Com isso, faz-se necessário a aplicação de outro modelo que consiga obter sucesso nos ajustes dos dados observados. O modelo elaborado por Marscher & Gear (1984) é uma opção para tais ajustes, uma vez que o mesmo leva em consideração a expansão relativística de uma onda de choque, a qual explica de maneira mais precisa o que ocorre dentro do jato extragaláctico.

2.5.2 Aplicação do Modelo de Marscher & Gear

A aplicação do Modelo de Marscher & Gear (1985) foi realizada observando a evolução de uma explosão no quasar OJ287. Verificou-se que ocorre o deslocamento da frequência de máximo de 37 GHz para 22 GHz, e o aumento na densidade de fluxo, conforme o esperado teoricamente pelo modelo. Essas características podem ser melhor observadas na Figura 2.5.2.1.

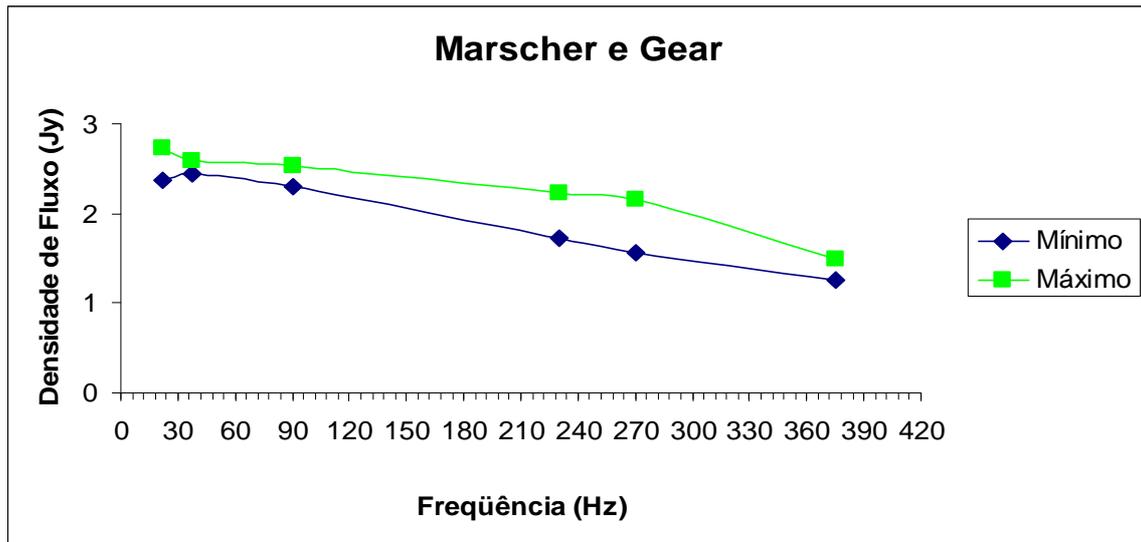


Figura 2.5.2.1 – Aplicação do modelo de Marscher & Gear, 1985

3 METODOLOGIA

Com o objetivo de se estudar a variabilidade temporal do quasar OJ287 e de Sagittarius A* (fonte não térmica localizada no Centro de Nossa Galáxia), foram realizadas observações mensais no Rádio-Observatório do Itapetinga (ROI) nas frequências de 22 e 43 GHz para essas duas fontes e para a rádio-galáxia Virgo A, que será utilizada como fonte calibradora neste trabalho.

Neste tópico serão abordadas as características do rádio-telescópio utilizado, assim como o programa utilizado para o monitoramento de fontes com a grande antena do Itapetinga. Será mostrado também como é realizada a coleta de dados e as correções que serão realizadas nos dados obtidos.

3.1 RÁDIO-OBSERVATÓRIO DO ITAPETINGA (ROI)

O Rádio-Observatório localiza-se na cidade de Atibaia, a 60 km da cidade de São Paulo, em um vale natural cercado por montanhas que

bloqueiam as interferências. O equipamento utilizado neste trabalho foi o radiotelescópio de 13,7 m de diâmetro, que possui um refletor secundário de 1,10 m de diâmetro. Este local é administrado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Devido ao fato da antena estar localizada no interior de uma redoma com cerca de 22 m de diâmetro, constituída por painéis triangulares, distribuídos de forma assimétrica e aleatória. A utilização desta redoma reduz o desgaste da antena e também promove um melhor apontamento, como se pode verificar na Figura 3.1.1.

Atualmente, o observatório possui dois receptores para observação no contínuo em 22 e 43 GHz e detectam a componente vertical da polarização.



Figura 3.1.1 – Rádio-Observatório do Itapetinga

A antena tem montagem altazimutal, o que implica que o monitoramento de radiofontes pelo radiotelescópio é feito através de duas coordenadas, sendo uma a elevação (entre 25° e 70°) e o outro o azimute.

O rastreamento e a aquisição de dados do rádio-telescópio é feito por dois computadores interligados através de uma rede interna, sendo denominados: computador de rastreamento e computador de aquisição de dados, ambos localizados na sala de comando.

Na sala de comando verifica-se a temperatura ambiente e a umidade relativa para ajustar o índice de refração, que é obtido através de uma tabela de umidade pela temperatura ambiente.

O computador de rastreio possibilita a escolha da amplitude, do intervalo de tempo de cada varredura e de várias técnicas de rastreio para monitorar uma fonte, dentre elas, a varredura em azimute e elevação e a técnica “scan” 3 pontos, que foram as técnicas utilizadas neste trabalho. Pode-se verificar também o tempo sideral para o dia da observação e as respectivas coordenadas da fonte que está sendo observada (ascensão reta α e a declinação δ). Ainda nesta tela, pode-se modificar os parâmetros da antena, o ganho dos motores e visualizar os gráficos do erros de rastreio em azimute e elevação. A Figura 3.1.2 mostra a tela do computador de rastreio e as informações citadas acima.

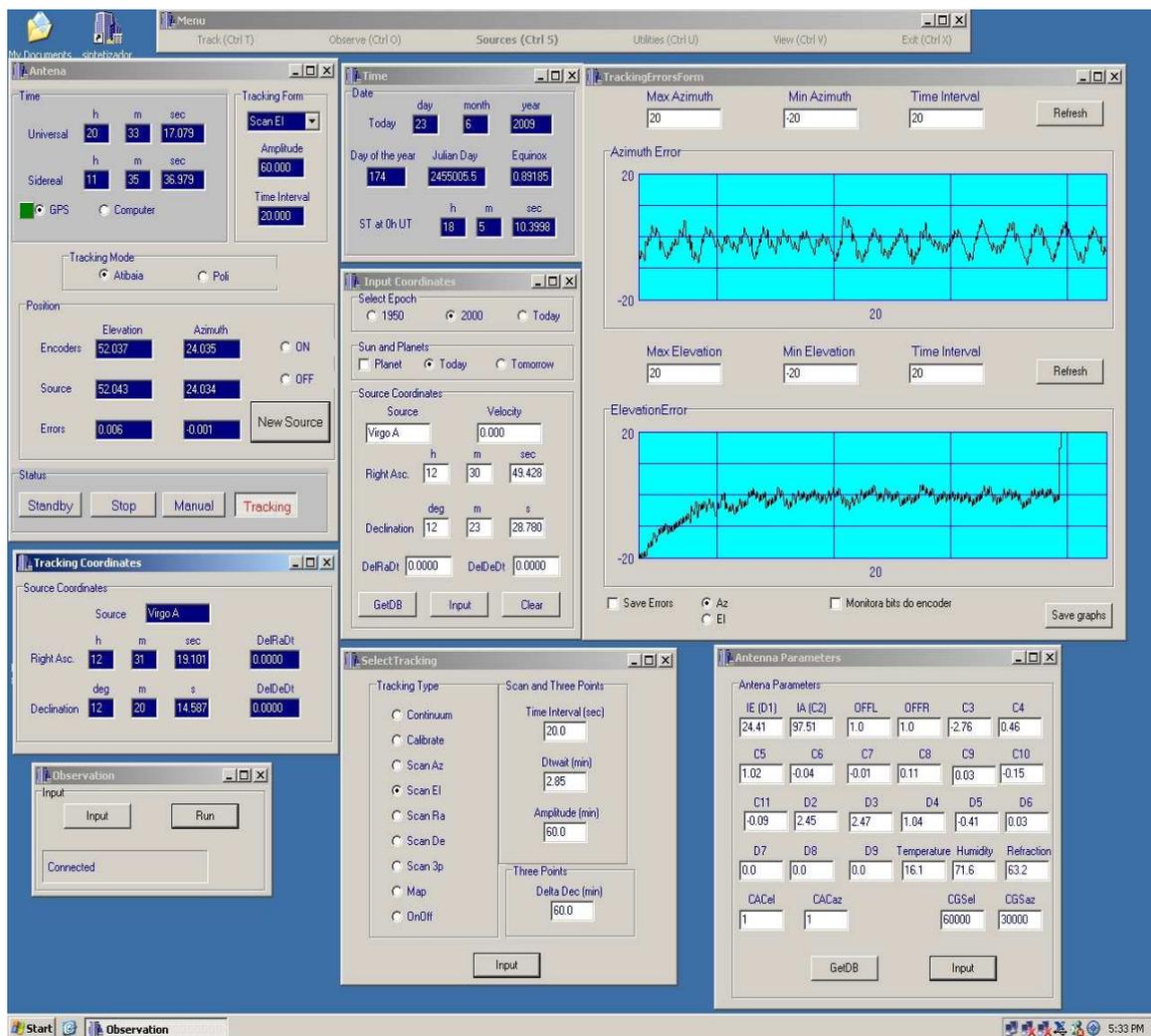


Figura 3.1.2 – Programa do computador de rastreio

Para realizar as observações, é utilizado um programa específico no computador de aquisição de dados, chamado “Itapetinga Data Acquisition System”, que organiza o arquivamento dos dados coletados.

Para observação de uma fonte, a primeira tarefa a ser feita é a calibração de temperatura do sistema, que é realizada com o auxílio do tubo de ruídos e de uma carga à temperatura ambiente, como é mostrado na Figura 3.1.3.

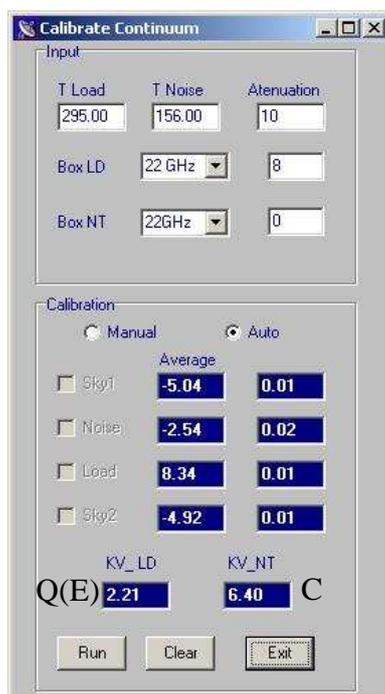


Figura 3.1.3 – Tela do computador de aquisição de dados ao realizar a calibração

Realizado este primeiro procedimento, pode-se iniciar as observações, a partir do programa de aquisição de dados. A Figura 3.1.4 mostra a tela dos parâmetros do sistema no computador de aquisição de dados.

Neste programa é possível monitorar os dados principais da fonte que está sendo observada, o nome da fonte e suas coordenadas, os parâmetros da antena e o tipo de varredura, escolhido para rastreamento. Ainda nesta tela, pode-se verificar o número de varreduras realizadas, a amplitude da observação, a temperatura máxima de antena T_{max} e a largura do feixe à meia potência.

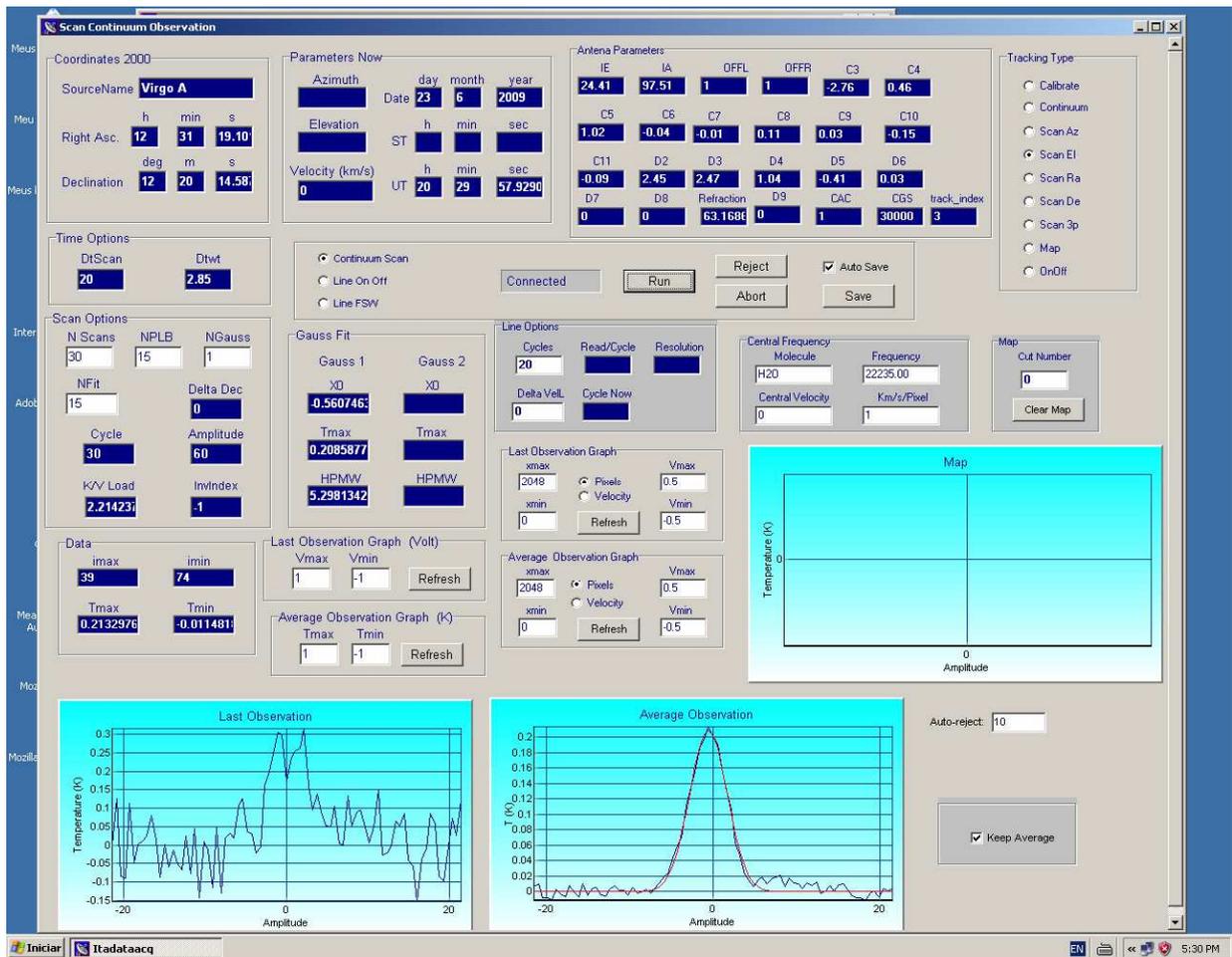


Figura 3.1.4 – Tela do computador de aquisição de dados.

3.2 COLETA DE DADOS

Como foi dito anteriormente, para iniciar as observações, faz-se necessário realizar a calibração do sistema com um “noise source” (tubo de ruídos) de temperatura conhecida, sendo $T_{NS(22)} \approx 156K$ para 22 GHz e $T_{NS(43)} \approx 61K$ para 43 GHz e um “load” (carga) à temperatura ambiente, sendo o valor do “load” de aproximadamente 295 K.

Assim, deve-se escolher um tipo de varredura para o objeto que será observado. No caso do quasar OJ287 e para a rádio-galáxia Virgo A, foi utilizado o método de varreduras em azimute e elevação, de modo que o tipo de varredura era alternado ao final de uma observação. Para Sgr A* foi utilizado o método de varredura de 3 pontos, centrado na menor extensão da

fonte, o que implica na obtenção de uma linha de base melhor¹¹, pois as varreduras são feitas perpendicularmente ao plano da Galáxia.

As observações foram realizadas nas frequências de 22 e 43 GHz, com duração de 10 minutos cada, realizando 30 varreduras de 20 segundos cada.

Porém, cada uma das frequências utilizadas apresenta características próprias. Para a frequência de 22 GHz, a largura do feixe à meia potência é de 4,2' com amplitude de 60' e em 43 GHz a largura do feixe de 2,1' com amplitude de 30'. As amplitudes das varreduras são ajustadas antes de se realizar as observações, possibilitando a verificação do apontamento da antena (BOTTI, 1990).

No caso da aquisição de dados, ocorre o seguinte procedimento: o computador de aquisição de dados integra o sinal da varredura realizada em um sexto de segundo, armazenando os dados em sua memória. Como a antena apresenta oscilações no início e no término de cada varredura, os 3 primeiros segundos e os três últimos segundos são descartados da varredura. Para cada dado armazenado no computador de aquisição de dados são armazenadas 81 leituras do voltímetro digital durante 14 segundos.

Após a realização de algumas observações é feita uma regressão linear em pontos no extremo de cada varredura e também a média dos 81 pontos, subtraindo a contribuição do céu. Com isso, é possível ajustar uma gaussiana aos 14 pontos centrais da média, como pode ser verificado na Figura 3.2.1

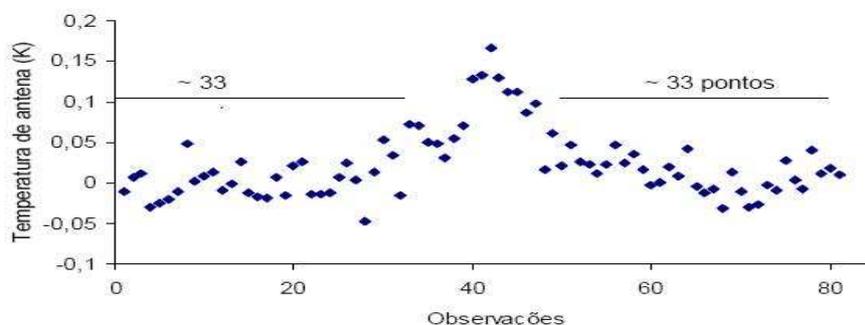


Figura 3.2.1 - Exemplo de “scan” de Virgo A em 43GHz, mostrando os 81 pontos da varredura.

Fonte – GASTALDI, 2006

¹¹ Indica que a observação será realizada na maior extensão da fonte.

Terminada a observação de 10 minutos, é gerado um arquivo, no computador de aquisição dados, contendo o nome da fonte, a data da observação, o horário da observação, as coordenadas da fonte, a temperatura do céu e a temperatura da antena.

3.3 CONVERSÃO DOS DADOS

Com intuito de construir a curva de luz para o quasar OJ287 e para Sgr A* buscando verificar as suas respectivas variabilidades, utilizou-se os dados obtidos entre junho de 2008 e outubro de 2009 no Rádio-Observatório do Itapetinga, nas frequências de 22 e 43 GHz (devido a outros projetos estarem sendo realizados no ROI, a antena ficou restrita a maior parte do tempo com o receptor de 43 GHz, o que implicou na obtenção de poucos dados em 22 GHz).

Para análise dos dados de temperatura de antena utilizou-se o pacote de redução de dados Drawspec e realizou-se também a correção referente ao apontamento da antena e a correção devido a antena estar no interior de uma redoma.

3.3.1 Redução dos dados obtidos no ROI

A fim de reduzir os dados obtidos no Rádio-Observatório do Itapetinga (ROI) foi utilizado o pacote de redução de dados Drawspec¹². Esse programa possibilita a subtração da linha de base através de um polinômio de até sexta ordem. O Drawspec é um programa de redução de dados elaborado por Harvey H. Liszt do NRAO¹³. Com esse pacote de redução de dados foi feita a média dos espectros, os ajustes das linhas de bases e também das gaussianas. Com estes ajustes, obtém-se como arquivo de saída um arquivo

¹² distribuído gratuitamente pelo site <http://www.cv.nrao.edu/~hlszt>

¹³ National Radio Astronomy Observatory

no formato .TXT com os parâmetros de cada gaussiana e outro arquivo no formato .DAT, lido apenas pelo DRAWSPEC.

O procedimento para redução de dados foi efetuado da seguinte maneira: foi realizada a conversão dos dados obtidos no ROI de .TXT para .DAT (tipo de arquivo lido pelo programa Drawspec). Após esta conversão, os dados foram lidos pelo pacote de redução de dados, apresentando cada scan de maneira individual (Figura 3.3.1.1).

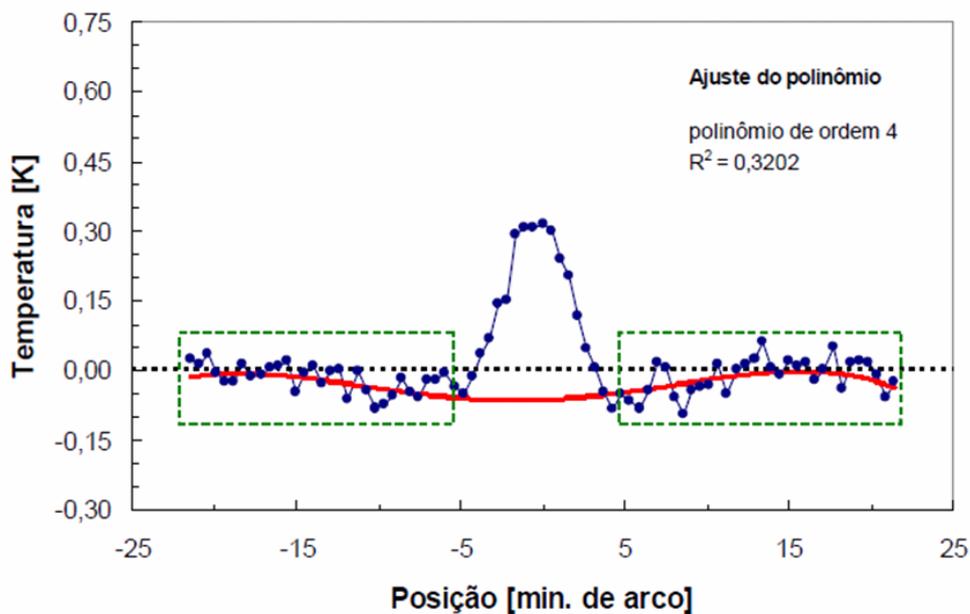


Figura 3.3.1.1 – Ajuste de um polinômio pelos pontos que representam a emissão do céu (retângulo pontilhado verde)

Fonte – GALO (2003)

Para cada scan foi retirada sua linha de base (Figura 3.3.1.2), alterando o valor máximo de temperatura de antena, assim como os outros 80 pontos da curva. Após a subtração de cada linha de base, o que implica na correção da temperatura de antena para cada observação, esse dado é adicionado ao stack. Após a redução de todos os dados para uma respectiva fonte ser concluído e adicionado no stack, foi utilizado a função “combine”, que realiza uma média ponderada, ponto a ponto, de todos os valores adicionados no stack. Por fim, é obtido um valor de temperatura de antena média, que é utilizado para a realização outras correções (Figura 3.3.1.3).

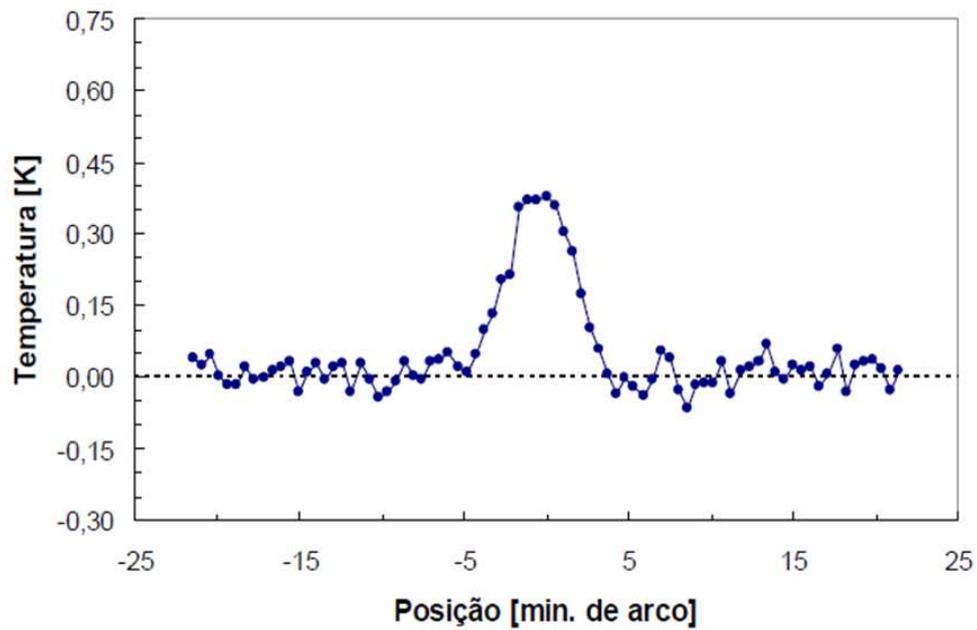


Figura 3.3.1.2 – Temperatura observada em função da posição ao longo da varredura após subtraída a contribuição do céu através do polinômio

Fonte – GALO (2003)

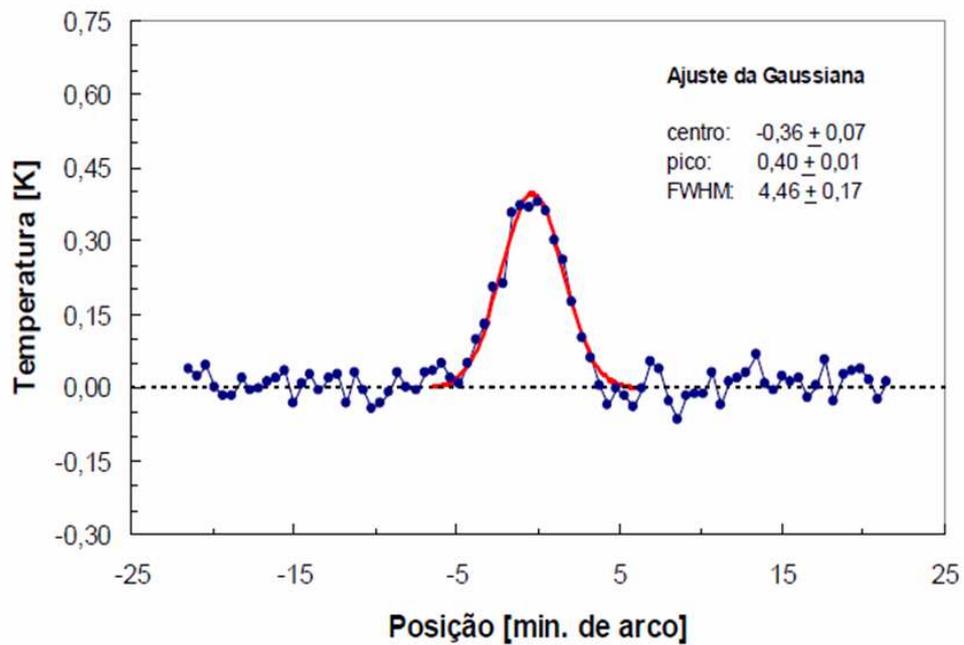


Figura 3.3.1.3 – Ajuste de uma gaussiana no sinal da fonte, após a combinação dos scans

Fonte – GALO (2003)

3.3.2 Correção dos erros de apontamento do Rádio-telescópio

Antes da conversão para densidade de fluxo, foi realizada a correção devido ao apontamento da antena, para que os dados coletados no Rádio-Observatório do Itapetinga pudessem ser tratados de forma confiável. Esta correção consiste em minimizar os erros referentes ao apontamento da antena como se pode notar na Figura 3.3.2.1. Este ajuste foi realizado utilizando a seguinte equação (3.1):

$$T' = T_0 \exp\left(\frac{x_0^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

onde $\sigma = \frac{HPBW}{\sqrt{8\ln 2}}$; T_0 a temperatura de antena obtida na redução dos dados com o Drawspec; x_0 é o desvio em relação à fonte; HPBW é a largura do feixe à meia potência; e T' a temperatura de antena com a correção.

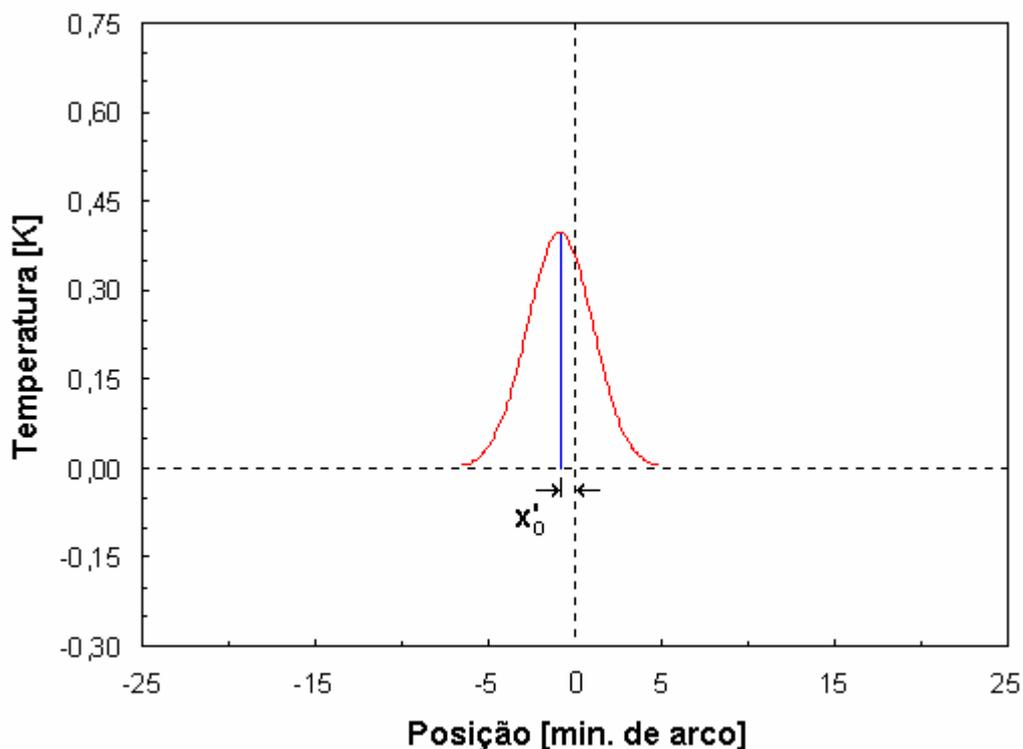


Figura 3.3.2.1 – Diferença entre a posição central da fonte e o centro da varredura (direção do apontamento da antena).

Fonte – GALO (2003)

3.3.3 Correção devido ao radiotelescópio estar localizado no interior de uma redoma

Visando corrigir as observações devido ao fato de antena se encontrar no interior de uma redoma, cujo fator de transmissão é η , utilizou-se um algoritmo que permitisse essa correção sem que fosse necessário medir a absorção atmosférica e nem determinar a profundidade óptica para várias elevações, uma vez que este procedimento é muito demorado (Abraham, Botti e Del Ciampo, 1986).

O fator para correção da temperatura de antena de uma fonte é dado pela equação (3.2) (a demonstração desta equação pode ser encontrada no trabalho anterior a este):

$$K'(E) = \frac{\alpha}{\eta} \left[\frac{1}{(\alpha - 1) + \left(\frac{C}{Q(E)} \right)} \right] \quad (3.2)$$

sendo $\alpha = \eta \frac{\bar{T}_{CÉU}}{T_{AMB}}$, $K'(E)$ definido como fator de correção da temperatura da fonte, $Q(E)$ definido como a diferença de temperatura de um corpo negro à temperatura ambiente e o céu na posição da fonte e C é a diferença de temperatura de um corpo negro à temperatura constante e o céu na posição da fonte.

Para o cálculo do valor de $K'(E)$ utilizou-se a condição $\bar{T}_{CÉU} = T_{AMB}$, o que implica que $\alpha = \eta$. Cada frequência utilizada para observação possui um valor de transmissão da redoma diferente, sendo de $\eta = 0,77$ para 22 GHz e $\eta = 0,66$ para 43 GHz (esses dados são para a redoma antiga) (Abraham, Botti e Del Ciampo, 1986).

O valor da constante radiométrica C , que está ligado ao Noise Tube e o valor de $Q(E)$, que está ligado ao Loud são obtidos após a realização da calibração no computador de aquisição de dados, como pode-se verificar na Figura 3.1.3.

Uma vez obtido $K'(E)$, ele deve ser multiplicado ao valor encontrado da temperatura de antena T' após a correção do apontamento

(3.1), obtendo assim o valor final de temperatura de antena, dado pela equação 3.3:

$$T'' = T' \cdot K'(E) \quad (3.3)$$

3.3.4 Conversão dos dados após a realização das correções

O fator de conversão entre temperatura de antena da fonte calibradora e a densidade de fluxo é calculado utilizando uma fonte calibradora que deve permanecer aproximadamente constante. Para isso, foi adotado como fonte calibradora a radiogaláxia Virgo A, cuja densidade de fluxo não varia para as frequências em 22 e 43 GHz, sendo que em 22 GHz sua densidade de fluxo é 21,5 Jy e em 43GHz sua densidade de fluxo é 11,5 Jy (JANSEN et al. 1974).

Como T'' já foi obtido para cada dia de observação, foi feita uma média simples para cada dia e com isso calculado o desvio padrão pela fórmula 3.4 (Bisqueira et al., 2004):

$$ERRO = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{OBS} - T_{MED})^2}{n}} \quad (3.4)$$

onde, T_{OBS} são os valores de temperatura de antena de cada observação e T_{MED} são as médias de T_{OBS} para cada dia.

Por fim, feito todos esses procedimentos, uma vez que já se tem a temperatura de antena (K) de cada uma das fontes, para cada dia de observação, pode ser realizada a conversão dos dados para densidade de fluxo (Jy) por meio de uma regra de três, conforme as equações 3.5 e 3.6, para cada uma das frequências de utilizadas no ROI (GASTALDI, 2006):

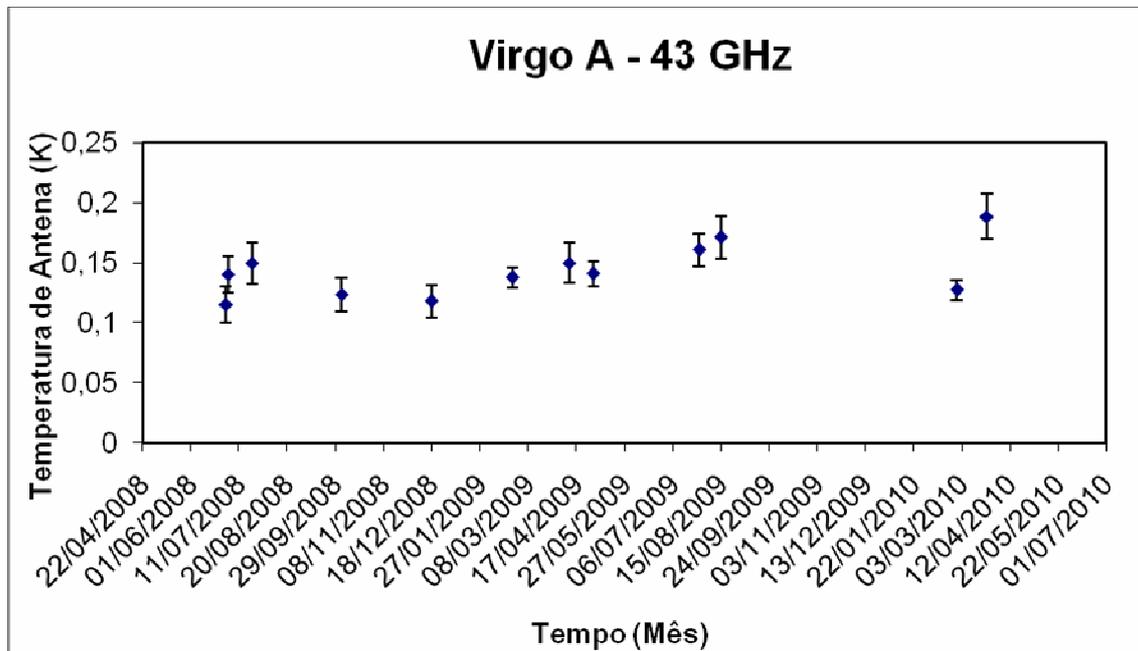
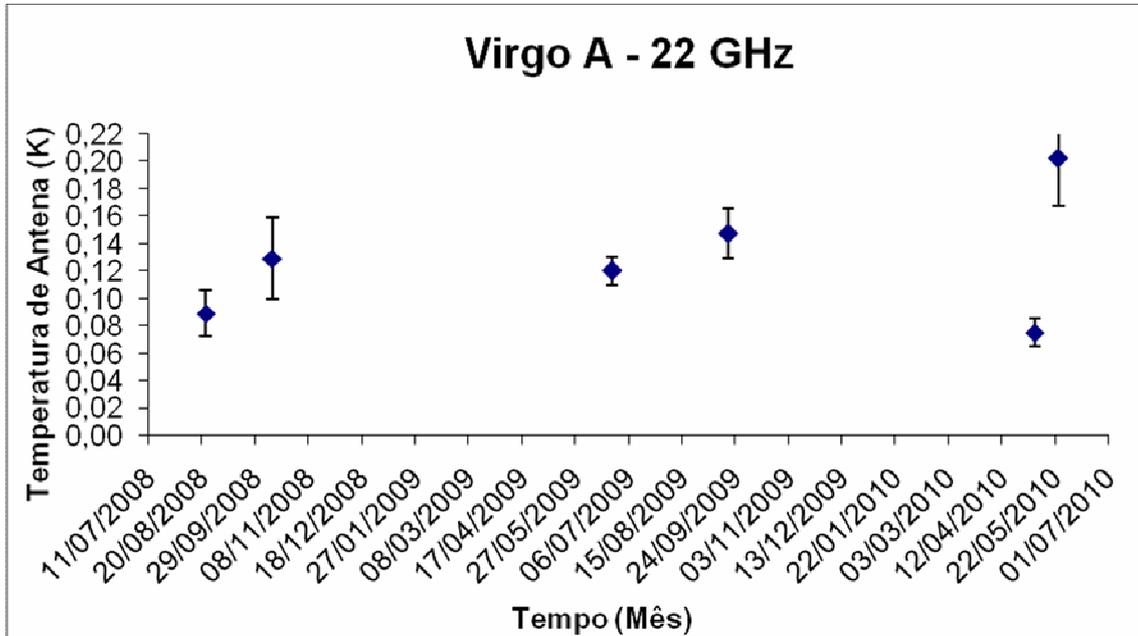
$$F_{22GHz} = \frac{21,5}{T_{VIRGO(22)}} T_{FONTE(22)} \quad (3.5)$$

$$F_{43GHz} = \frac{11,5}{T_{VIRGO(43)}} T_{FONTE(43)} \quad (3.6)$$

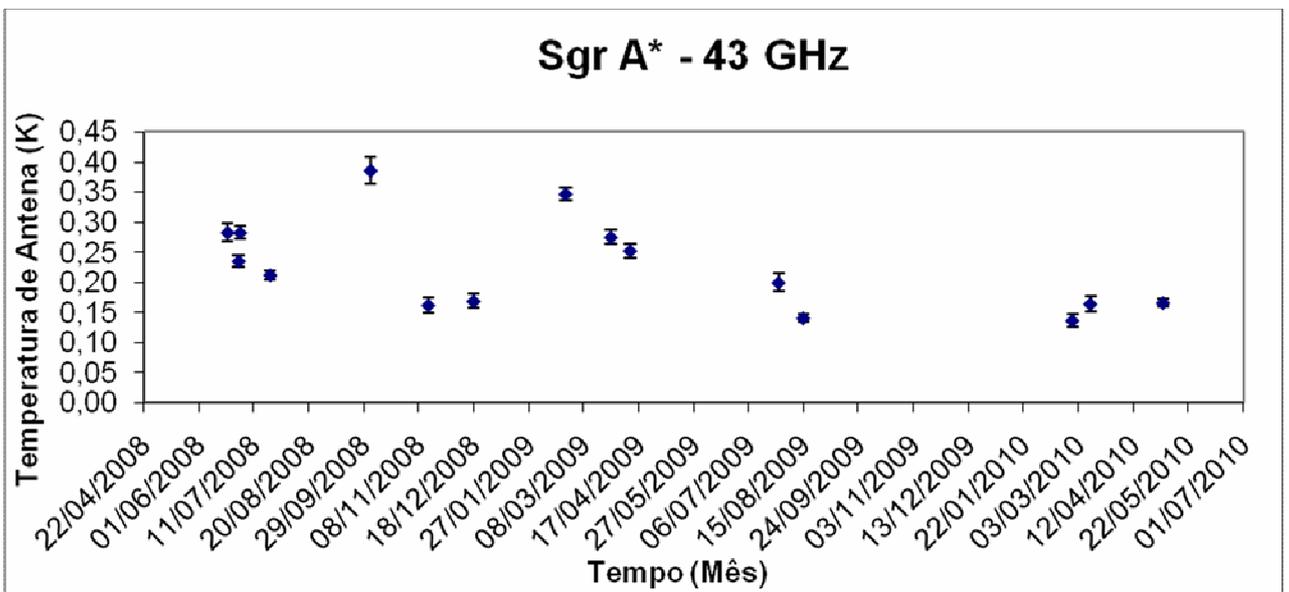
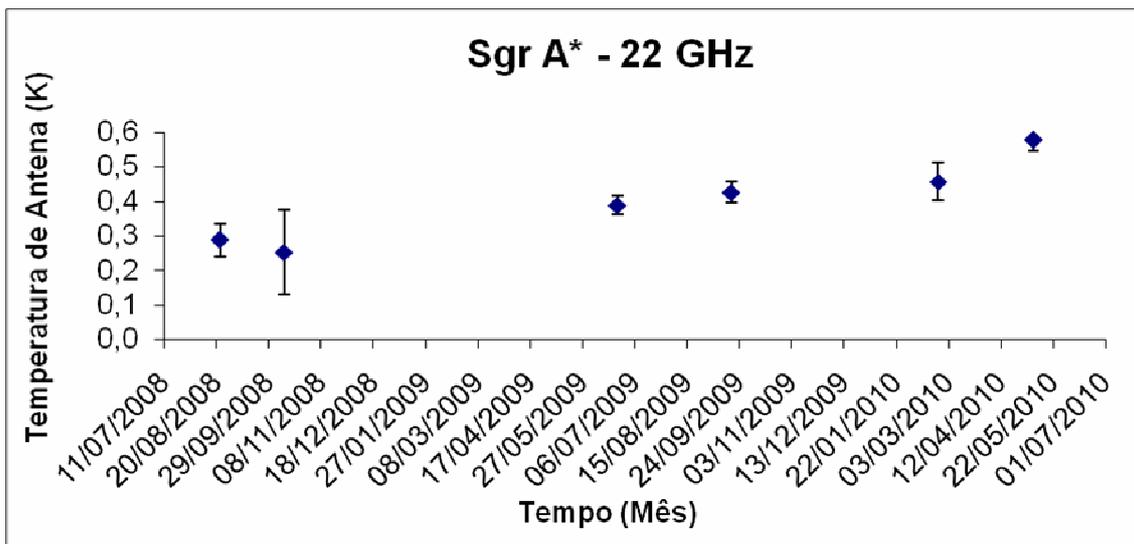
4.0 RESULTADOS

4.1 Análise dos dados obtidos com o Rádio-Observatório do Itapetinga

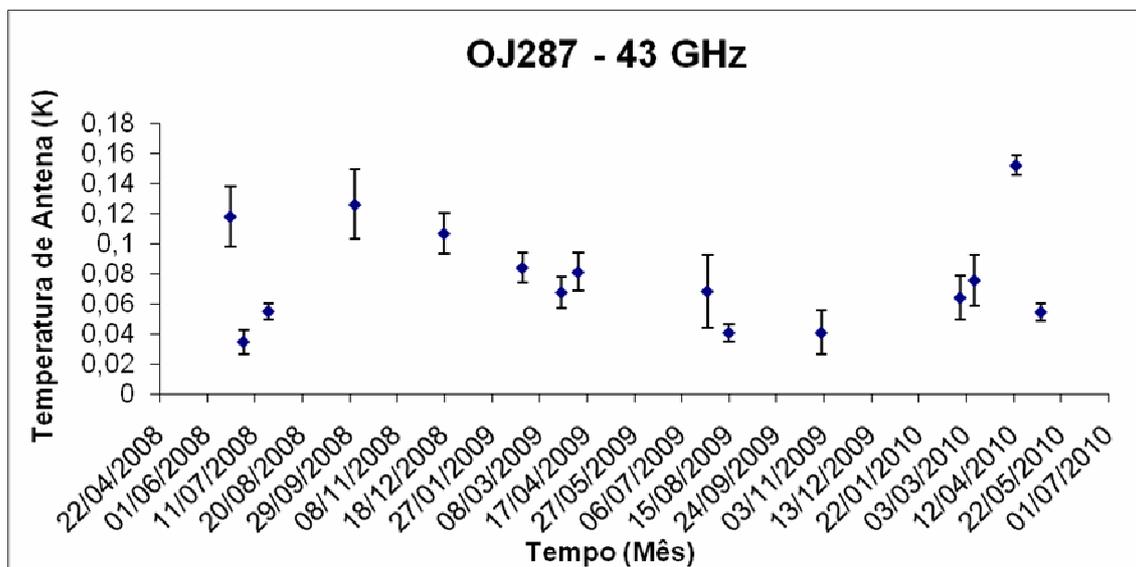
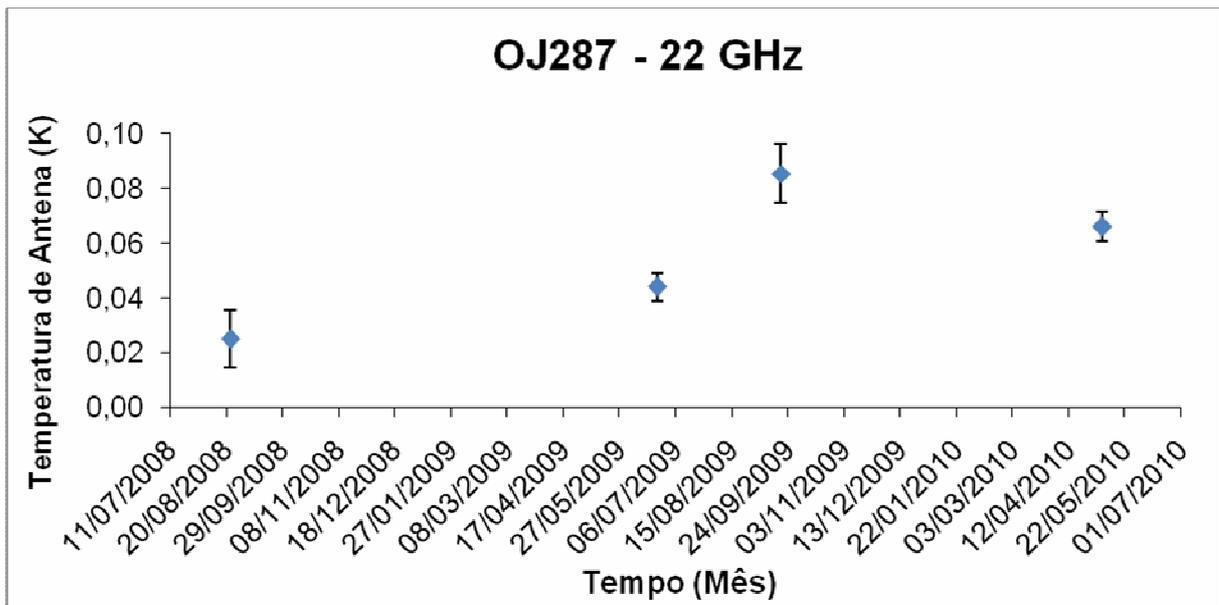
4.1.1 Virgo A



4.1.2 Sgr A*



4.1.3 OJ287



4.2 Distribuição Espectral de Energia

Outro recurso para verificar o comportamento das fontes envolvidas neste trabalho é a partir da análise da Distribuição Espectral de Energia (SED¹⁴), que possibilita o estudo da quantidade de energia em cada faixa do espectro eletromagnético. Tanto para Sgr A* como para OJ287, suas SED foram construídas a partir de dados encontrados na literatura.

¹⁴ Distribuição espectral de energia. Do inglês Spectral Energy Distribution (SED).

4.2.1 Distribuição Espectral de Energia do quasar OJ287

Pela Figura 4.2.1.1 pode-se verificar o comportamento do quasar OJ287 em várias frequências do espectro eletromagnético. Através da análise da distribuição espectral de sua energia (SED) é possível estudar as características e os mecanismos de emissão deste quasar.

Nota-se que as emissões na frequência rádio aumentam com a frequência, o que foi mencionado na análise do SED de Sgr A*. Verifica-se também que o quasar OJ287 também apresenta emissão em altas frequências.

O espectro dos AGN's é muito complexo, mas pode ser descrito sob a forma de leis de potência (4.1), isso ocorre porque há a contribuição de elétrons relativísticos na densidade de fluxo em todas as frequências (PETERSON, 1997).

$$S_{\nu} \propto \nu^{-\alpha} \quad (4.1)$$

onde S_{ν} é a densidade de fluxo a uma dada frequência ν , e α é o índice espectral, onde cada faixa de frequência possui um índice espectral distinto.

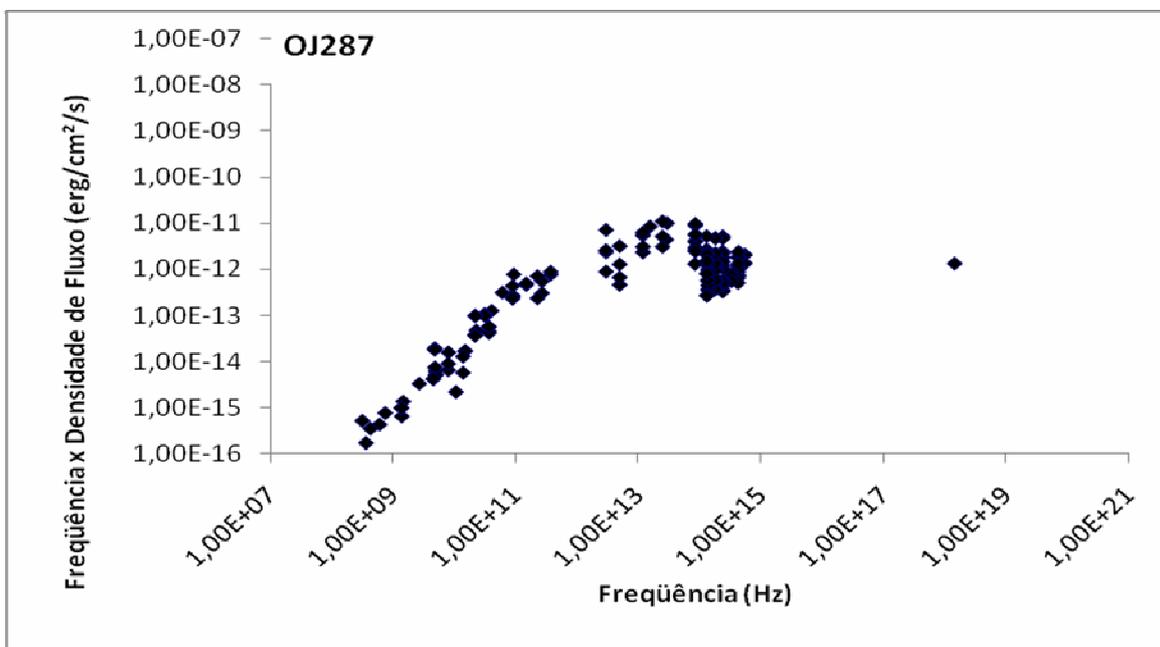


Figura 4.2.1.1 – (SED) Distribuição Espectral de Energia de OJ287

Fonte - http://glastweb.pg.infn.it/blazar/dati_sed/OJ_287.sed

4.2.2 Distribuição Espectral de Energia de Sgr A*

Analisando a distribuição espectral de energia (SED) de Sgr A* a partir da Figura 4.2.2.1, nota-se que há um pico na região do infravermelho (cerca de 10^{14} Hz), que é devido à nuvens de gás que se encontram a altas temperaturas, absorvendo a radiação de altas energias oriundas da região central da Galáxia e emitindo no infravermelho.

Pode-se notar também que Sgr A* apresenta emissão em altas energias (cerca de 10^{18} Hz), mas não tão altas quanto a comparadas com a emissão na mesma região para um AGN. Para tal comparação, ver a Figura 4.2.1.1, que representa o SED do quasar OJ287. Essa diferença ocorre devido ao fato de que o disco de acreção do quasar OJ287 ser mais quente e denso do que o encontrado no Centro Galáctico.

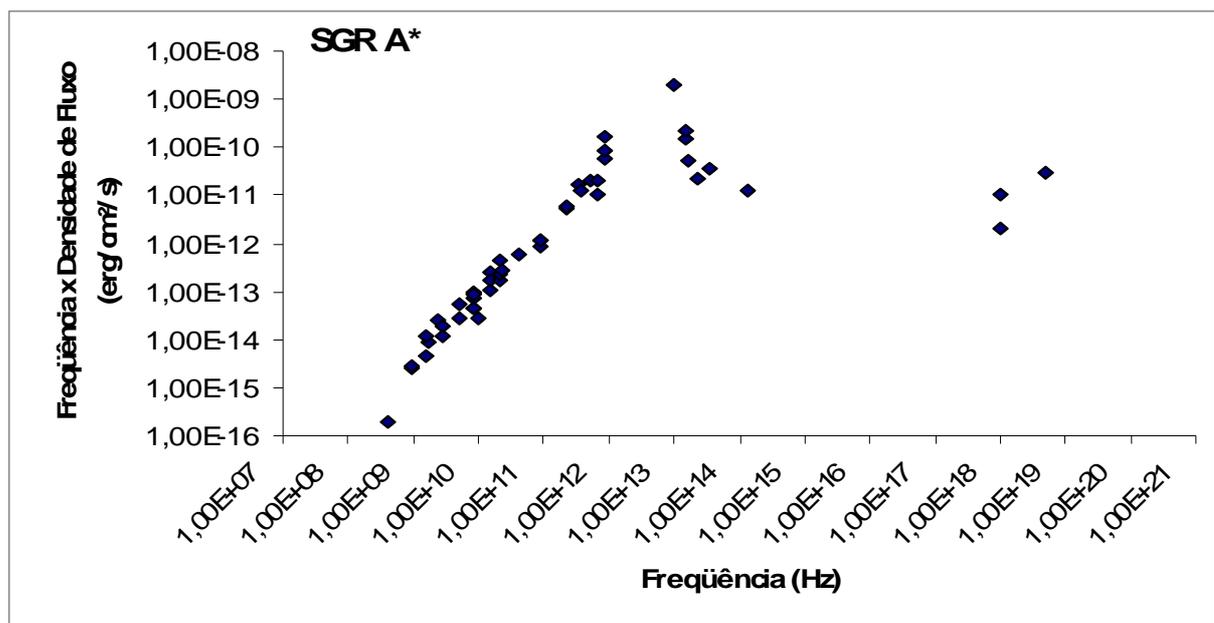


Figura 4.2.2.1 – (SED) Distribuição Espectral de Energia de Sgr A*

Através da comparação entre o SED de Sgr A* com do SED do quasar OJ287, verifica-se que Sgr A* apresenta um comportamento muito semelhante ao comportamento observado em núcleos ativos de galáxias e quasares, que se encontram à grandes distâncias da Terra.

A partir disto, a região Central de Nossa Galáxia oferece uma excelente oportunidade de se estudar e compreender o ambiente em torno de

um buraco-negro supermassivo. Tal situação é encontrada nos núcleos ativos de galáxias que estão localizados em distâncias colossais da Terra, impossibilitando seu estudo mais detalhado, podendo-se utilizar o Centro de Nossa Galáxia como um laboratório para se tentar compreender estes objetos distantes.

5.0 CONCLUSÕES

A partir do trabalho começado por Henrique Giannini com suas observações até início de 2010 com as minhas posteriores observações foi possível notar que as curvas de luz dos objetos que observamos não mudaram de forma significativa nesse tempo de pesquisa.

O tempo passado no ROI foi muito proveitoso para mim, Lara, que comecei a me acostumar com o equipamento para dar continuidade nas observações dos dois objetos mencionados nesse artigo.

Nas próximas observações dos objetos mencionados neste artigo continuarei analisando suas curvas espectrais para assim chegar a uma conclusão do como comportamento esses dois objetos.

6.0 REFERÊNCIAS

ABRAHAM, Z.; BOTTI, L.C.L.; DEL CIAMPO, L.F. (1986). Calibration methods in millimeter-wave radioastronomy. Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica, V12 Feb, Número especial.

ALTENHOFF, W. J.; DOWNES, D.; PAULS, T.; SCHRAML, J. (1979). Survey of the galactic plane at 4.875 GHz. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, vol. 35, Jan. 1979, p. 23-54

BISQUEIRA, R.; SARRIERA, J. C.; MARTÍNEZ, F. (2004); Introdução à estatística – Enfoque informático com o pacote estatístico. SPSS. Artmed,

BOTTI, L. C. L. (1990); Estudo da Variabilidade e do Espectro de radiofontes em 22 e 43 GHz. Tese (Doutorado em Ciência Espacial). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

BROWN, R.L.; LO, K.Y.(1982); Variability of the compact radio source at the Galactic Center. *The Astrophysical Journal*, 253 (1), 103-114, fev.
CLEMENS, D. P.(1985); Massachusetts-Stony Brook galactic plane CO survey: The galactic disk rotation curve. *The astrophysical Journal*, v. 295, p. 422-436, ago.

GALO, A. L. (2003); Variabilidade Rápida de Blazars em Ondas de Rádio: Estudo de Viabilidade. Dissertação de Mestrado no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, Mar. 2003, 107p.

GASTALDI, M. R.; Estudo de Variabilidades espectral e temporal de Radiofontes. Dissertação de Mestrado na Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Fev. 2007, 105p.

HERRNSTEIN, R. M.; ZHAO, J. H.; BOWER, G. C.; GOSS, W. M. (2004); The Variability of Sagittarius A* at Centimeter Wavelengths. *The Astronomical Journal*, Volume 127, Issue 6, pp. 3399-3410.

JANSEN, M. A.; GORDON, L. M.; WELCH, W. J. (1974); Extension of the absolute flux density scale to 22.285GHz. *Astronomy and Astrophysics*, v.33: 373-377, jul.

LU, J.R., GHEZ, A.M., HORNSTEIN, S.D., MORRIS, M., BECKLIN, E.E. (2005); IRS 16 SW: A New Comoving Group of Young Stars in the Central Parsec of the Milky Way. *The Astrophysical Journal*, Volume 625, Issue 1, pp. L51-L54.

LEHTO, H.J.; VALTONEN, M.J.(1996); OJ 287 Outburst Structure and a Binary Black Hole Model. *The Astrophysical Journal*, v.460, Mar, p.207.

MAILLARD, J.P., PAUMARD, T., STOLOVY, S. R., RIGAUT, F. (2004); The nature of the Galactic Center source IRS 13 revealed by high spatial resolution in the infrared. *Astronomy and Astrophysics*, v.423, p.155-167.

MARSCHER, A.P; GEAR, W. K. (1985) ; Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273. *Astrophysical Journal*, Part 1, vol. 298, Nov. 1, 1985, p. 114-127.

PAULINY-TOTH, I. I. K.; KELLERMANN, K. I.(1966); Variations in the radio-frequency spectra of 3C84, 3C273, 3C279, and other radiosources. *The Astrophysical Journal*, 146(3): 634-645, Dec. 1966.

PETERSON, B. M. (1997); Na introduction to active galactic nuclei. Cambridge University Press.

PRIEST E.R. (1982); Solar magnetohydrodynamics. D. Reidel Publishing Company, P. O. Box 17, 3300. AA Dordrecht, Holland.

SCHMIDT, M. (1963); 3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift. Nature, Volume 197, Issue 4872, p. 1040.

SHKLOVSKY, I. S. (1960); A provável variação secular do fluxo a partir da radioemissão de algumas fontes discretas. Astronomicheski Zhurnal, 37(2): 256-264.

SHKLOVSKY, J. (1965); Possible secular variation of the flux and spectrum of radio-emissions of source 1934-63. Nature, 206(4980): 176-177, Apr.

SILLANPAA, A.; TAKALO, L. O.; PURSIMO, T.; NILSSON, K.; HEINAMAKI, P.; KATAJAINEN, S.; PIETILA, H.; HANSKI, M.; REKOLA, R.; KIDGER, M.; BOLTWOOD, P.; TURNER, G. W.; ROBERTSON, J. W.; HONEYCUT, R. K.; EFIMOV, Y. U. S.; SHAKHOVSKOY, N.; FIORUCCI, M.; TOSTI, G.; GHISELLINI, G.; RAITERI, C. M.; VILLATA, M.; DE FRANCESCO, G.; LANTERI, L.; CHIABERGE, M.; PEILA, A.; HEIDT, J. (1996); Double-peak structure in the cyclic optical outbursts of blazar OJ 287. Astronomy and Astrophysics, v.315, Nov. p.L13-L16.

SLISH, V. I.; Angular size of radio stars. Nature, 199(4894): 682-682, Aug. 1963.

SOFUE Y. (1989); Large Scale Ejection Structures in the Galactic Center (review). The Center of the Galaxy: Proceedings of the 136th Symposium of the International Astronomical Union, held in Los Angeles, U.S.A., July 25-29, 1988. Edited by Mark Morris. International Astronomical Union. Symposium no. 136, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p.213

TATEYAMA, C. E.; BOTTI, L. C. L.; DE LUCENA, A. M. P.; KAUFMANN, P.; KINGHAM, K. A.; PINER, B. G. (1999); Observations of OJ287 from the Geodetic-VLBI archive of the Washington Correlator. Astronomical Journal, vol. 520, Aug. p. 627-633.

VALTAOJA, L.; SILLANPAA, A.; VALTAOJA, E. (1987); The correlation between radio and optical variations in OJ 287. Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361), vol. 184, no. 1-2, Oct. p. 57-62.

VAN DER LAAN, H. (1966); A Model for Variable Extragalactic Radio Sources. Nature, Vol. 211, pp. 1131.

YUSEF-ZADEH, F.; MORRIS, M.; CHANCE, D. (1984). Large, highly organized radio structures near the galactic centre. Nature, vol. 310, Aug. 16, 1984, p. 557-561.

ZHAO, J.H.; BOWER, G.C.; GOSS, W.M. (2001); Radio Variability of Sagittarius A* - a 106 Day Cycle. *The Astrophysical Journal*, v. 547, Issue 1, p. L29-L32, Jan 2001.