

MORFOLOGIA DE RADIOFONTES QUE APRESENTAM JATO

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

Henrique Veiga Giannini (Mackenzie, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: henrique@craam.mackenzie.br

Dr. Luiz Claudio Lima Botti (CRAAM/INPE, Orientador)
E-mail: botti@craam.mackenzie.br

Julho de 2009

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	4
1.1 Objetivos do trabalho.....	5
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1 Centro Galáctico.....	5
2.2 AGNs e quasares.....	9
2.3 OJ287.....	11
2.4 Modelos.....	15
2.4.1 Modelo de Slish.....	15
2.4.2 Modelo de Shklyvsky.....	15
2.4.3 Modelo Canônico.....	16
2.5 Aplicação do Modelo Canônico.....	17
CAPÍTULO 3 – MÉTODO	18
3.1 Rádio Observatório do Itapetinga (ROI)	18
3.2 Coleta de dados.....	23
3.3 Conversão dos dados.....	25
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS	29
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	32
CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS	34

1.0 Introdução

Do ponto de vista morfológico, Nossa Galáxia possui duas componentes principais, uma no formato esferoidal onde estão presentes o halo e o bojo nuclear e uma componente achatada, onde se localizam o disco galáctico e os braços espirais.

No esquema elaborado em 1936 por Edwin Powel Hubble, que classifica as galáxias em elípticas (E), espirais (S) e irregulares (I), Nossa Galáxia é considerada uma galáxia espiral Sb, onde *b* significa que o núcleo e os braços espirais da Via Láctea são intermediários.

No Centro Galáctico encontra-se a fonte Sagittarius A (Sgr A), onde se acredita existir um buraco-negro super-massivo. O Centro Galáctico apresenta dois jatos dispostos perpendiculares à região central e também dois lóbulos que são semelhantes aos que são encontrados em rádio-galáxias.

O Centro Galáctico é a região de atividade mais intensa. Quando comparada com a atividade de quasares, que é considerado um AGN¹, sua atividade é muito inferior.

Um exemplo de AGN é o quasar OJ287, descoberto por Blake (1970). A fonte localiza-se na constelação de Câncer² e possui um desvio-para-o-vermelho³ de $z=0,306$. OJ287 faz parte da classe de galáxias com núcleo ativo (AGN). Apresenta um sistema binário de buracos-negros onde um deles tem seu disco de acréscimo cortado pelo outro buraco-negro e são responsáveis por explosões periódicas desta fonte.

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. Acredita-se existir um buraco-negro de milhões de massas solares no Centro de Nossa Galáxia, enquanto nos quasares distantes, de bilhões de massas solares. Portanto a

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

²Quarta constelação zodiacal, compreendida entre as ascensões retas de 7h 53min e 9h e 19min, entre as declinações de 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.

³A sigla *z* corresponde ao valor do desvio para o vermelho (redshift)

comparação e o estudo de AGNs possibilitarão o entendimento da região central e de suas características físicas.

Apensar de Sgr A* não ser um AGN e possuir um buraco-negro super-massivo, encontra-se muito mais próximo do que qualquer AGN, o que possibilita o estudo destes objetos distantes através de suas características.

1.1 Objetivo

Este trabalho mostra o estudo das variabilidades temporais de Sagittarius A e OJ287, a fim de realizar uma comparação entre uma fonte galáctica com uma fonte extragaláctica e também para entender melhor os Núcleos Galácticos Ativos (AGNs). Procurou-se observar mensalmente estas fontes e também a fonte calibradora Virgo A entre junho de 2008 e julho de 2009, nas frequências de 22GHz e em 43GHz com a grande antena do Itapetinga, localizada no Rádio-Observatório do Itapetinga em Atibaia.

2.0 Referencial teórico

2.1 Centro Galáctico

Na região central, encontra-se o Centro Galáctico a uma distância de aproximadamente 8,5 kpc do sistema solar (CLEMENS, 1985), conhecido ainda como Sagittarius A (Sgr A). Esta fonte não pode ser observada no visível devido à grande quantidade de poeira presente no disco galáctico. Acredita-se que em Sgr A exista um buraco-negro super-massivo com massa próxima de $4,7 \times 10^6 M_{\odot}$ em um raio de praticamente 1,7 pc.

Nesta região, é encontrada uma grande variedade de fontes térmicas⁴ e não térmicas⁵, incluindo a fonte não térmica Sgr A Leste e a fonte térmica Sgr A Oeste, em que Sgr A é

⁴Emitem radiação que segue uma distribuição de Maxwell – Boltzmann.

⁵Emitem radiação não térmica, como por exemplo, radiação sincrotrônica.

dividida. A fonte Sgr A está situada próximo ao verdadeiro Centro da Galáxia, onde é encontrada a fonte rádio Sgr A*, que é considerado o verdadeiro Centro de Nossa Galáxia. Acredita-se que esta fonte compacta rádio deva coincidir com um buraco-negro exatamente no Centro de Nossa Galáxia. Esta rádio fonte é representada com "*" para distingui-la das outras fontes, uma vez que ela é a fonte mais intensa na direção de Sagittarius.

A Figura 2.2.1 apresenta uma visão mais atual da Região Central da Galáxia, na frequência de 330 MHz. O processamento desta imagem é devido a Kassim, Briggs, Imanura, Lazio, La Rosa e Hyman servindo-se de dados inicialmente obtidos por Anantharamaiah, Pedlar, Erkes e Goss (1991).

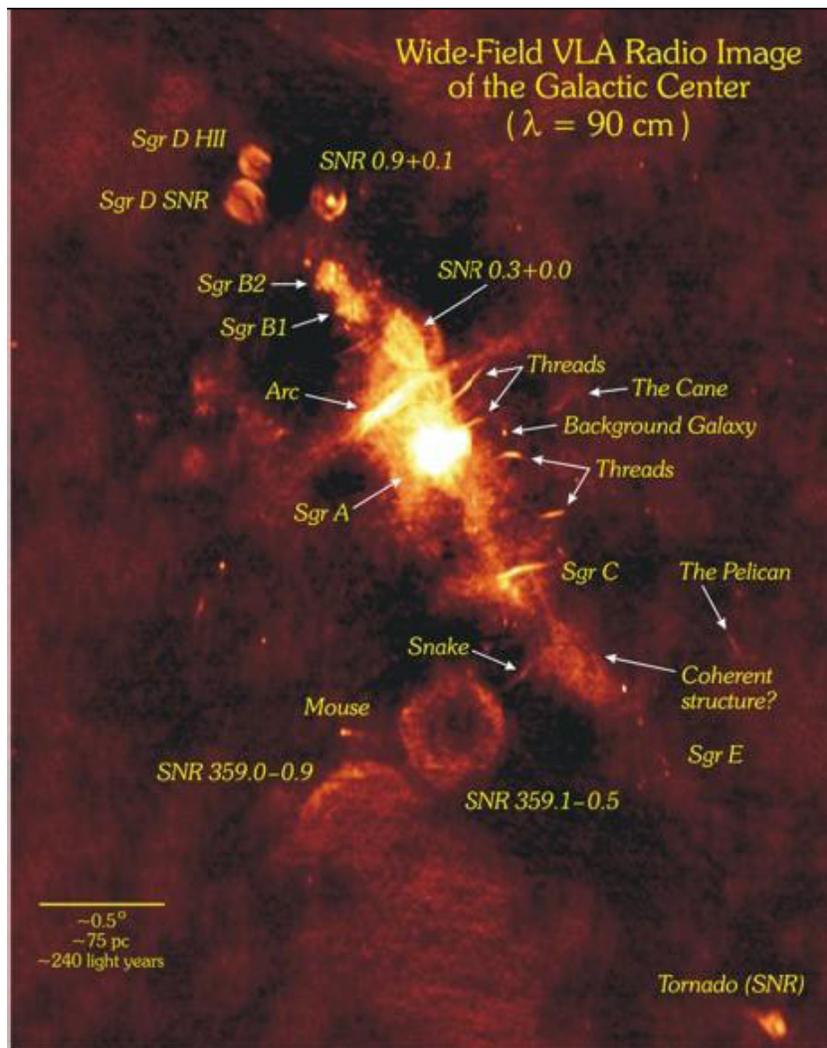


Figura 2.1.1 - Centro Galáctico em 330 MHz.
Fonte - <http://www.haystack.mit.edu/>

No centro da figura destaca-se o complexo Sagittarius A (nome devido ao Centro Galáctico estar na direção da constelação de Sagitário⁶), que inclui as fontes Sgr A Oeste e Sgr A Leste. A fonte Sgr A Leste assemelha-se ao formato de uma concha não térmica, com características que a conecta com o remanescente de um evento explosivo envolvendo 40 vezes mais energia que uma única explosão de supernova⁷. Sgr A Oeste é um conjunto de estruturas de filamentos, caracterizados pelo gás ionizado pelas estrelas próximas de sua localização. Várias fontes são identificadas na figura conforme suas coordenadas galácticas.

Ainda nesta região, pode-se verificar os arcos-rádio, que são filamentos alinhados entre si, praticamente perpendiculares ao Plano Galáctico, com emissão não térmica em ondas rádio. Acredita-se que o campo magnético seja um fator importantíssimo na dinâmica e formato desta região, apesar de haver outras explicações para o fenômeno. No interior de Sgr A, encontra-se a fonte compacta de emissão sincrotrônica Sgr A*, descoberta em 1974 (BROWN, LO, 1982) que é o verdadeiro Centro de Nossa Galáxia, onde em torno da qual Sgr A Oeste parece orbitar.

Desde a descoberta de Sgr A*, sua variabilidade tornou-se o foco de estudo de muitos pesquisadores. Utilizando dados obtidos com o VLA, Zhao (2001) e Herrnstein (2006) detectaram um ciclo de 106 +/- 10 dias que pode ser visto claramente em 3,6, 2,0, e 1,3 cm. Como não há outra fonte que interfira na variabilidade detectada, isso sugere que esta ocorra no interior de SGR A*.

Pode-se notar também pela Figura 2.1.2 que a fonte compacta Sgr A* é muito variável. A curva de luz desta fonte está presente nos comprimentos de onda de 20 cm (1,5 GHz), 8 cm (3,7 GHz), 3,6 cm (8,3 GHz), 2 cm (15 GHz) e 1,3 cm (23 GHz). Os dados utilizados para na Figura 2.1.2 foram obtidas no Very Large Array (VLA) entre 1976 e 2000. Além dos dados de Sgr A*, a figura da direita mostra os dados de uma estrela que foi utilizada como

⁶Nona constelação zodiacal, compreendida entre as ascensões retas de 17h41min e 20h25min e, entre as declinações de -11°,8 e -45°,4. Esta constelação é representada sob a forma de um ente metade homem e metade cavalo, com um arco na mão.

⁷Supernova é o nome dado a explosões de estrelas com mais de 10 M_o, que produzem objetos extremamente brilhantes.

uma estrela calibradora e apresenta o comportamento temporal de Sgr A* entre 1990 e 1994 de um modo mais ampliado, para os mesmos comprimentos de onda.

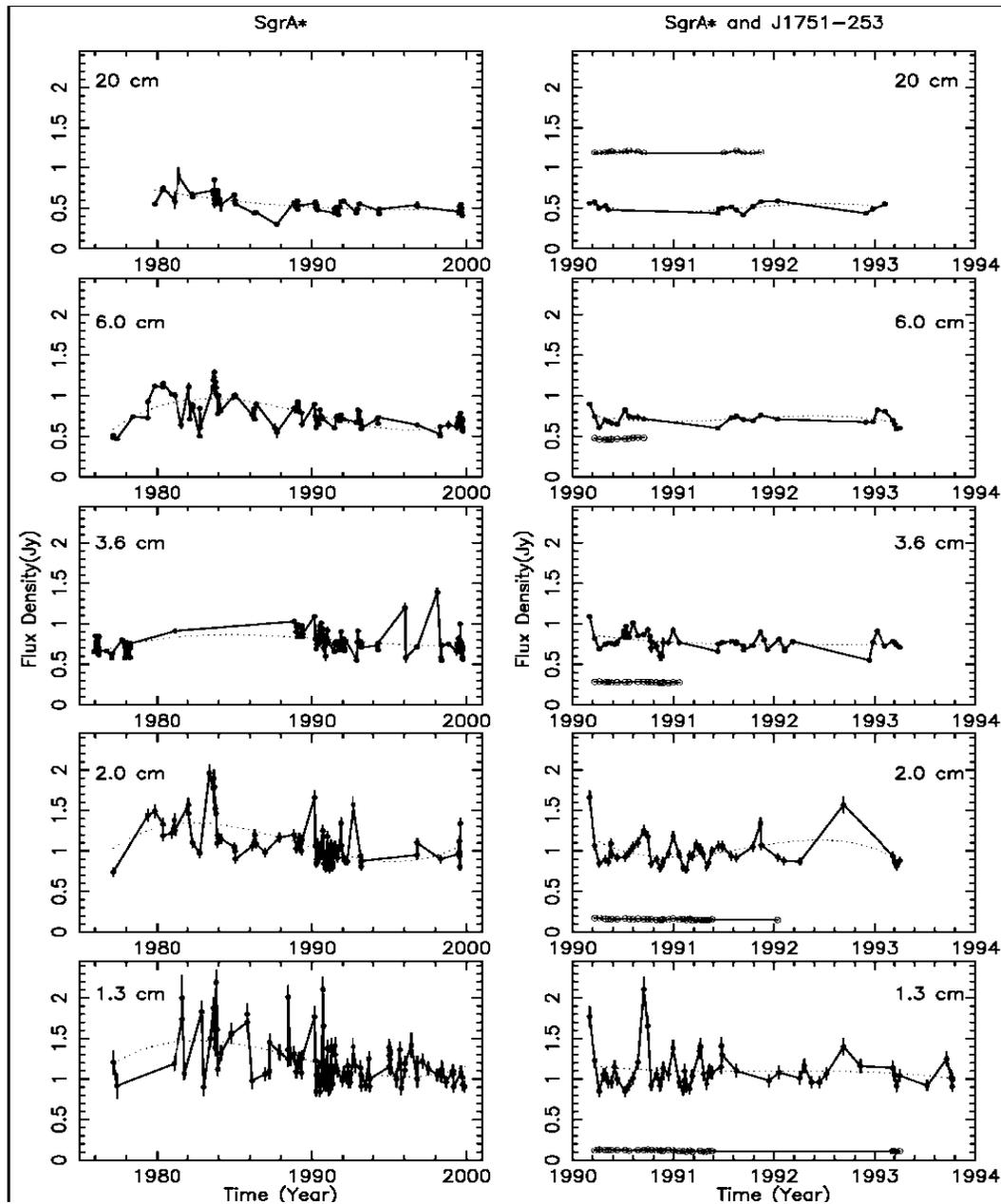


Figura 2.1.2 – Sgr A* observado em vários comprimentos de onda.
 Fonte – Very Large Array (VLA)

Para os comprimentos de onda de 20 cm, 6 cm, 2,0 cm e 1,3 cm entre o período de 1980 e 1990 a fonte Sgr A* apresentou significativas flutuações em sua densidade de fluxo e apenas em 3,6 cm permaneceu calmo. Na figura da direita pode-se notar que a fonte Sgr A*

permaneceu calmo durante o período de 1990 a 1993 nos comprimentos de onda de 6 cm e 20 cm. Para os comprimentos de onda de 1,3 cm e 2,0 cm, Sgr A* apresentou grandes flutuações em sua densidade de fluxo, chegando a atingir mais que 2 Jy em 1,3 cm.

A região onde Sgr A* se encontra é considerada como a região mais intensa em toda Galáxia. Porém, analisando a fonte compacta de Nossa Galáxia com objetos extragalácticos, como por exemplo, galáxias com núcleo ativo, sua atividade é muito menor. Apesar de Nossa Galáxia não ser um AGN, Sgr A* é uma fonte muito importante quanto ao estudo de buracos-negro super-massivos encontrados também em quasares distantes e também para uma melhor compreensão de galáxias com núcleo ativo.

2.2 AGN e Quasares

São denominados de núcleo ativos de galáxias (AGNs) os objetos que diferem das galáxias normais em relação ao seu brilho central elevado e características espectrais, como linhas de emissão largas e contínuo não térmico. Estes objetos produzem quantidades enormes de energia a partir de volumes muito pequenos. Uma das características marcantes destes objetos é a alta variação em luminosidade em períodos de tempo de horas até anos. Devido seu brilho ser muito intenso, pode ser observado à grandes distâncias. Uma hipótese para essa enorme quantidade de emissão de energia num volume muito pequeno é de que buracos-negros super-massivos estão presentes nas regiões centrais dos AGNs.

Uma classe pertencente aos AGNs são os quasares. Descobertos em 1963, (SCHMIDT, 1963), inicialmente era confundido com estrela devido sua aparência estelar, daí o nome quasar, objeto quase-estelar. Uma característica dos quasares que o diferencia de uma estrela é a emissão de radiação sincrotrônica, de origem não térmica.

O modelo atualmente aceito para um AGN consiste em um disco de acreção associado com buraco-negro super-massivo na região central deste objeto, cuja emissão é entendida como um jato relativístico.

Os quasares são caracterizados também conforme seu comportamento nas frequências rádio do espectro. Os AGNs que emitem fracamente em rádio são denominados de Radio Quiet e os objetos que apresentam fluxo significativo nesta frequência são chamados de Radio Loud⁸. Os objetos classificados como Radio Quiet⁹ podem ocorrer em galáxias elípticas ou em galáxias espirais, sendo que os Radio Loud são observados apenas em galáxias elípticas.

Os jatos emitidos pelos AGN's são muito extensos, podendo chegar a alguns mega parsecs de distância e podem ser detectados em frequências de rádio, raios-x e raios gama. A maior contribuição de emissão no jato de um AGN é na faixa de rádio (Figura 2.2.1). Isso é devido ao mecanismo de emissão sincrotrônica, pois os elétrons ganham energia e emitem fótons em toda a faixa de rádio. Este fato querer ainda que haja correlação do rádio com outras faixas do espectro eletromagnético (PERTERSON, 1997).

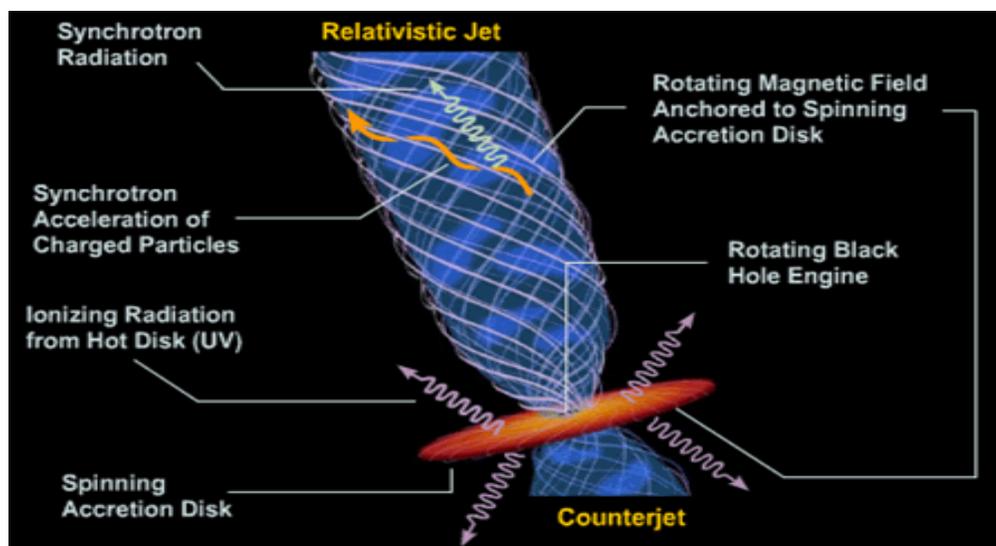


Figura 2.2.1: Modelo da radiação sincrotrônica de um AGN. Podem ser observados, um disco de acreção em torno de um buraco-negro e seu jato disposto perpendicularmente a região central, representado pelas linhas de campo magnético com o elétron espiralando nesse campo e emitindo radiação na faixa rádio.

Fonte: <http://www.astro.rug.nl/~koopmans/lecture6.pdf>

⁸ruidoso, barulhento.

⁹silencioso, quieto.

2.3 OJ287

Por cerca de um século esta fonte é observada a fim de se obter seu comportamento temporal. A Figura 2.3.1 mostra a variação da magnitude no decorrer do tempo, de OJ287 durante um período de 100 anos, quando observada em óptico.

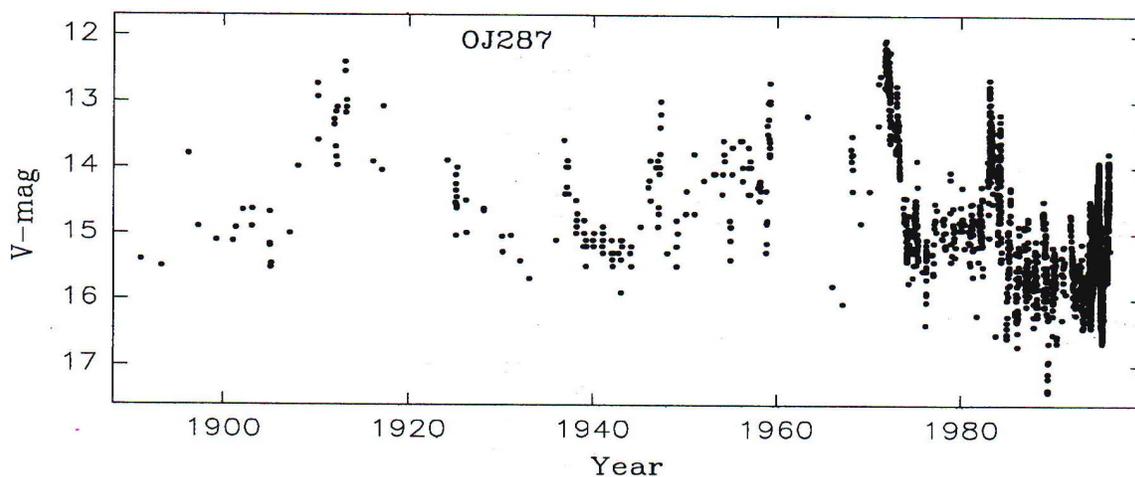


Figura 2.3.1 – Dados fotométricos de OJ287 na banda V entre 1891 e 1997
Fonte – Observatório de Turku.

Pode-se notar um período de fortes explosões em intervalos de tempo de aproximadamente 12 anos. Uma explicação para a presença da variabilidade na curva de luz em óptico é que haja um sistema binário de buracos-negros em seu centro (LETHO, VALTONEN, 1996).

O modelo de dois buracos-negros está diretamente relacionado às fortes explosões. Essas fortes explosões têm a seguinte configuração: o buraco negro maior, denominado primário, teria em torno dele e de seu disco de acreção outro buraco-negro, chamado de secundário, onde sua órbita é descrita em torno do buraco-negro primário com alta inclinação em relação ao disco de acreção, esquema que pode ser verificado na Figura 2.3.2. Sempre que o buraco-negro secundário cruzar o disco de acreção do primário, fortes perturbações seriam induzidas e ocorreria uma explosão, o que significa o aumento de emissão (LETHO, VALTONEN, 1996).

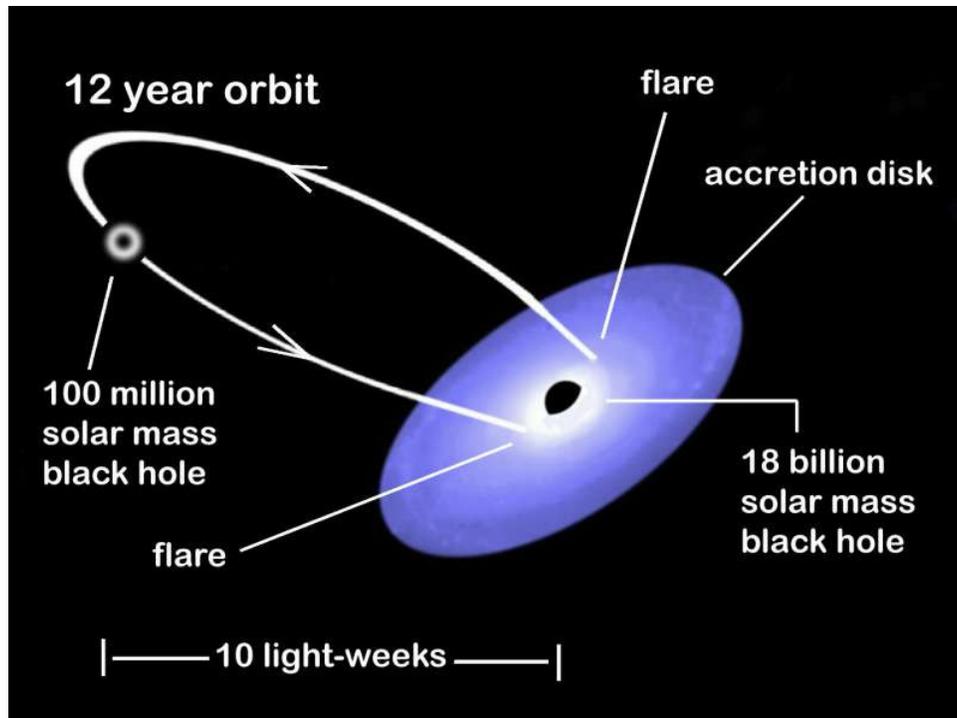


Figura 2.3.2 – Sistema binário de buracos-negros do quasar OJ287

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

Na Figura 2.3.2, o primário está com seu disco de acreção representado pela cor azul, que é o maior e mais massivo entre ambos os buracos-negros, contendo cerca de $18 \times 10^9 M_{\odot}$. O buraco-negro secundário tem massa muito menor comparada com o primário, com cerca de $100 \times 10^6 M_{\odot}$.

Outra característica deste objeto é que apresenta velocidade aparente superluminal¹⁰. Isto pode ser comprovado através das observações realizadas entre outubro de 1990 e dezembro de 1996 por Tateyama (TATEYAMA et al., 1999). Através dos mapas obtidos em VLBI durante as observações em 8 GHz e das curvas de luz em óptico e rádio, pode-se notar que neste mesmo período foram identificadas 6 componentes que apresentavam uma velocidade superluminal média de aproximadamente $9c$.

Pode-se notar nos mapas de VLBI em 8 GHz obtidos por Tateyama que em todas as observações, seu centro é imutável e que no decorrer do tempo outras componentes surgem e se deslocam pelo jato do quasar no sentido oeste (Figura 2.3.3).

¹⁰A velocidade aparente superluminal trata-se da projeção do movimento do jato de um AGN que é observado a um certo ângulo θ em relação à linha de visada.

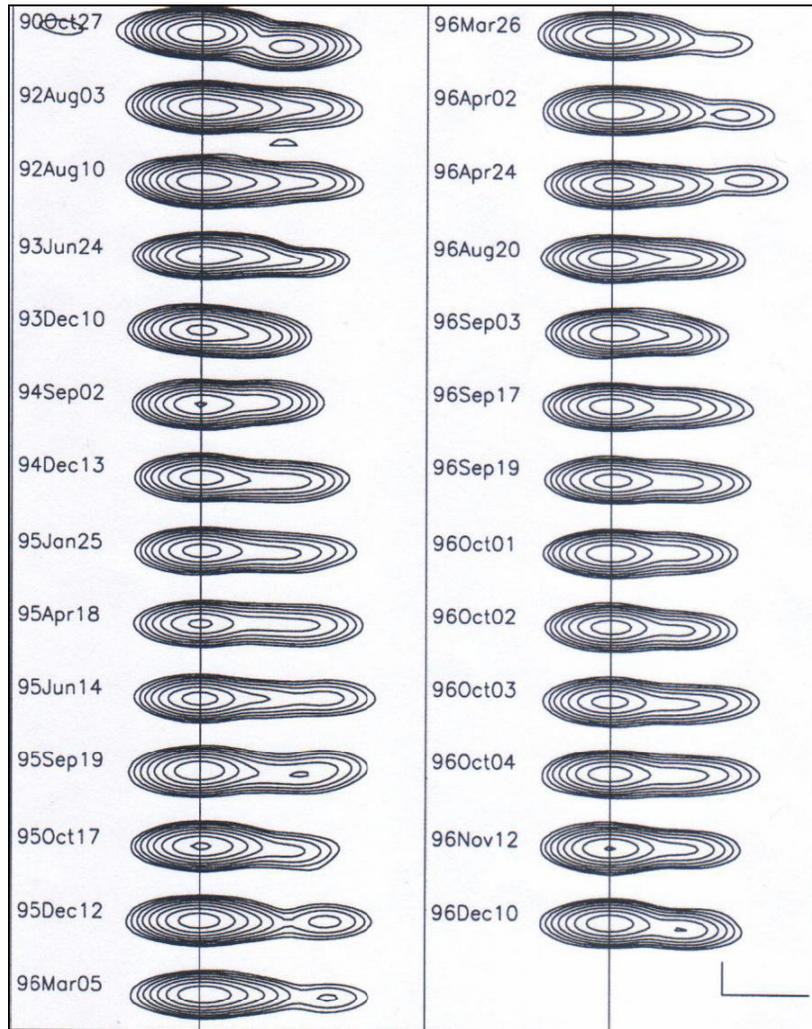


Figura 2.3.3 – Mapas de VLBI da fonte OJ287 em 8 GHz.
 Fonte – Tateyama et al. (1999)

Pode-se relacionar o surgimento das componentes com as curvas de luz em óptico e em rádio, uma vez que o nascimento de cada fonte está diretamente ligado com uma explosão. Na parte superior da Figura 2.3.4 tem-se a curva de luz em óptico e as curvas de luz em rádio em 5, 8 e 15 Ghz (de cima para baixo).

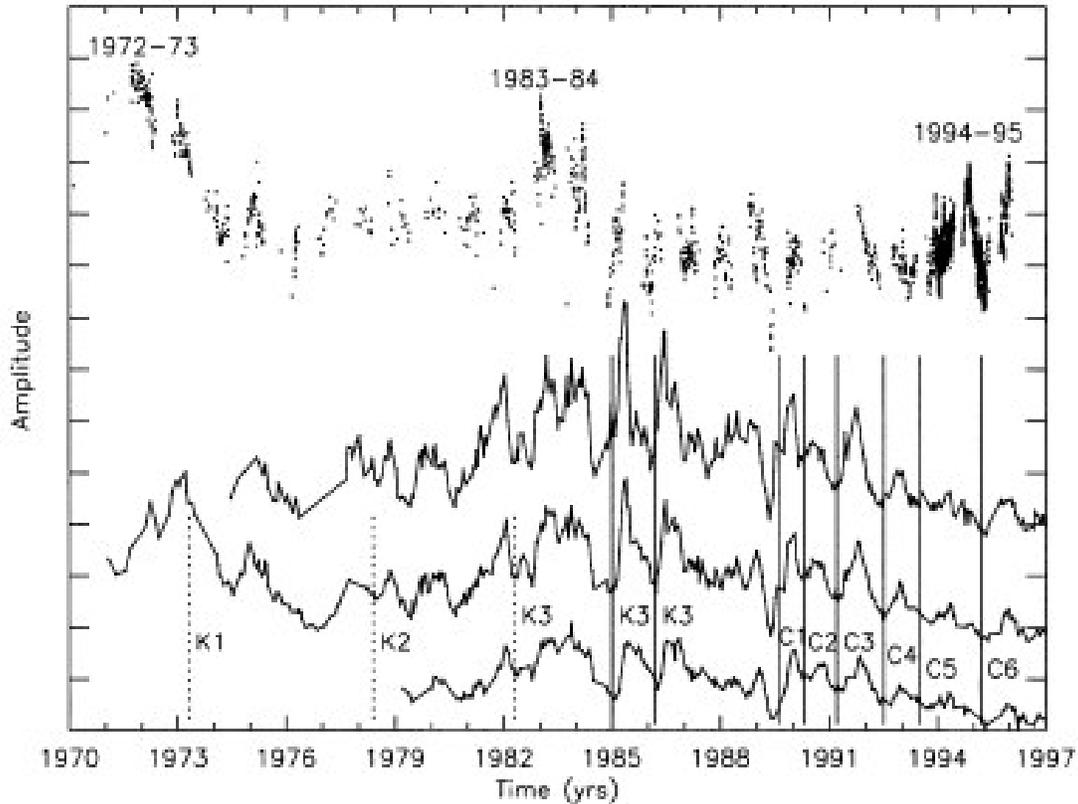


Figura 2.3.4 – Curva de luz em óptico, e em rádio nas frequências de 5, 8 e 15 GHz.

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

As retas verticais que cruzam o eixo x representam o início de cada explosão e o nascimento de uma das componentes C1 à C6. Essas informações também podem ser obtidas através dos mapas de VLBI. As linhas tracejadas no gráfico representam a época de nascimento das fontes K1, K2 e K3.

Pode-se notar também que as curvas de luz em rádio e em óptico para OJ287 parecem estar correlacionadas (USHER, 1979) e (VALTAOJA, SILLANPAA, VALTAOJA, 1987), o que significa que podem ser estudadas em conjunto, apresentando atraso da ordem de alguns meses entre suas explosões. Essa correlação pode ser na dupla explosão ocorrida em 1983 – 1984, que tanto em óptico como em rádio apresentaram o mesmo comportamento.

2.4 Modelos

Buscando explicar a variabilidade dos objetos compactos, a grande quantidade de energia emitida por uma dimensão muito pequena e o comportamento dos diversos AGN's, assim como seus respectivos jatos, existem vários modelos, entre eles o modelo canônico que será aplicado ao quasar OJ287.

2.4.1 Modelo de Sligh

Buscando explicar o espectro dos quasares, seu modelo baseou-se na reabsorção sincrotrônica. Obteve também a partir da frequência do máximo de emissão, da densidade de fluxo e do índice espectral α a suas dimensões angulares. A partir disto, concluiu que a dependência do campo magnético é pequena (SLISH, 1963).

2.4.2 Modelo de Shklovsky

Primeiramente havia proposto seu modelo para explicar o comportamento do fluxo de remanescentes de supernova, Shklovsky adaptou-o para tentar explicar a variabilidade detectada em fontes compactas (SHKLOVSKY, 1960).

Seu modelo se baseia em uma nuvem magnetizada de partículas relativísticas, com velocidades próximas a da luz, ejetadas de uma região muito compacta e opticamente espessa. Conforme a nuvem se expande a região começa a se tornar opticamente fina e sua densidade de fluxo diminui. No início, quando a região é opticamente espessa, a densidade de fluxo aumenta. Conforme se expande, a região torna-se opticamente fina e sua densidade de fluxo diminui com a frequência (SHKLOVSKY, 1965).

2.4.3 Modelo Canônico

Este modelo foi introduzido por Shklovsky em 1965, van der Laan em 1966, Pauliny-Toth e Kellermann em 1966 e consiste em tentar explicar os possíveis mecanismos de emissão em duas hipóteses.

Considera primeiramente que a nuvem de elétrons relativísticos se expanda uniformemente, com velocidade constante, e posteriormente ocorrendo perda de energia dos elétrons devido à expansão adiabática.

Através deste modelo é possível verificar que também a densidade de fluxo nas regiões opticamente espessa e opticamente fina, respectivamente, se dá conforme as equações abaixo:

$$S(\nu) \propto B^{-1/2} \theta^2 \nu^{5/2} \quad (2.1)$$

$$S(\nu) \propto B^{(s+1)/2} \theta^3 \nu^{-(\beta-1)/2} \quad (2.2)$$

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, a qual apresentou um bom acordo entre as observações com o modelo canônico. Porém, posteriormente, outras fontes tentaram ser explicadas por este modelo, não obtendo sucesso, havendo diferenças entre as observações e o modelo que não conseguia explicar em algumas fontes certas características. Por exemplo, o tempo de subida de uma explosão pode ser maior do que o tempo de descida, o fluxo que não pode atingir seu valor máximo nas frequências altas antes de atingir seu valor máximo nas frequências baixas e o espectro que pode ser plano abaixo da frequência de máximo, contrariando a previsão do modelo canônico de um índice espectral de -2,5 (BOTTI, 1990).

2.4 Aplicação do modelo canônico

Será feita a aplicação do modelo canônico, com o objetivo de verificar se os dados são explicados por esse modelo.

Como foi explicado no tópico 2.3.3, a evolução temporal de uma explosão é devido a uma nuvem de elétrons relativísticos que se expandem de uma forma simetricamente esférica e uniformemente, com velocidade constante, ocorrendo perda de energia dos elétrons devido à expansão adiabática.

Para verificar se o modelo explica corretamente os dados obtidos, serão utilizados dois parâmetros definidos por Ennis et al. (1982) e Altschuler e Wardle (1975), que servirão para caracterizar a variabilidade de uma fonte.

O primeiro parâmetro, denominado de R_I fornece a razão entre a intensidade de uma explosão em duas frequências, pela equação:

$$R_I = \frac{\Delta S_{14,5}}{\Delta S_{4,8}} \quad (2.3)$$

onde $\Delta S_{14,5} = S_{14,5}^{maz} - S_{14,5}^{\min}$ e $\Delta S_{4,8} = S_{4,8}^{maz} - S_{4,8}^{\min}$ e onde $S_{14,5}^{maz}$, $S_{4,8}^{maz}$, $S_{14,5}^{\min}$ e $S_{4,8}^{\min}$ são as densidades de fluxo máximas e mínimas nas frequências em 4,8 e 14,5 GHz.

O segundo parâmetro, representado por R_T , fornece a razão das diferenças de tempos de uma explosão em duas frequências diferentes, que pode ser verificado na equação:

$$R_T = \frac{t_{4,8} - t_0}{t_{14,5} - t_0} \quad (2.4)$$

onde $t_{4,8}$ e $t_{14,5}$ são o tempo para o qual a densidade de fluxo atingiu seu valor máximo e t_0 é o tempo do início da explosão em uma determinada frequência.

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

$$R_{IC} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{\left(\frac{7s+3}{4s+6} \right)} \quad (2.5)$$

$$R_{TC} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{\left(\frac{s+4}{4s+6} \right)} \quad (2.6)$$

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 2.1, 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 GHz e 14.5 GHz, e entre 4.8 GHz e 8.0 GHz, correspondente à época em que ocorreu o evento.

Tabela 2.1 – Resultado do modelo canônico

Época	R_I	R_T	R_{IC}	R_{TC}	S
2006	3,25	1,12	1,45	0,35	-0,6
2006	1,35	0,92	1,60	0,55	-0,8

3.0 Método

Para o estudo da variabilidade temporal do quasar OJ287 e de Sagittarius A* (fonte não térmica localizada no Centro de Nossa Galáxia), fez-se observações mensais das duas fontes mencionadas e da fonte calibradora Virgo A no Rádio-Observatório do Itapetinga nas frequências em 22 GHz e em 43GHz.

3.1 Rádio-Observatório do Itapetinga

O Rádio-Observatório do Itapetinga foi inaugurado em 1974, recebendo o nome do bairro Itapetinga onde está situado (cidade de Atibaia) a 60 km ao norte da cidade de São Paulo, em um vale natural cercado por montanhas que bloqueiam as interferências. Possui uma antena parabólica de 13,7m de diâmetro e um refletor secundário de 1,10m de diâmetro.

Está localizado no interior de uma redoma de cerca de 22m de diâmetro. Pode-se verificar pela Figura 3.1.1 que a redoma é constituída por painéis triangulares de forma assimétrica e aleatória. A utilização desta redoma reduz o desgaste da antena e também promove um melhor apontamento.



Figura 3.1.1 - Estrutura da redoma que contém a grande Antena de Itapetinga.

No foco da antena encontra-se uma corneta retangular, que é responsável por detectar a componente vertical da polarização. Tanto para 22GHz como para 43 GHz, cada frequência tem uma corneta, que pode ser observada na Figura 3.1.2.



Figura 3.1.2 - Corneta retangular para a freqüência de 22 GHz.

O monitoramento de fontes com a grande antena do Itapetinga é realizado por dois computadores interligados: o computador de rastreo e o computador de aquisição de dados, localizados na sala de comando.

A partir do programa do computador de rastreo (Figura 3.1.3) têm-se várias técnicas para o monitoramento de uma fonte. Neste programa pode-se obter o tempo sideral para o dia da observação, posição da antena, a posição da fonte que se deseja observar e diferença entre a posição do encoder e a posição real da fonte. Na tela “time” é possível verificar o dia, mês e ano da observação e outras informações. Pode-se verificar também nas telas “Tracking Coordinates e Input Coordinates” qual fonte está sendo observada, assim como suas respectivas coordenadas. Pode-se verificar do lado direito inferior da tela, os gráficos do erro do rastreo em azimute e em elevação. É possível também modificar o tipo de rastreo, a amplitude e o intervalo de tempo de cada varredura na tela “Select Tracking” e modificar os parâmetros da antena e o ganho dos motores da antena na tela “Antenna Parameters”. Na sala de comando é possível verificar também a temperatura ambiente e modificar o índice de refração, que é obtido através de uma tabela de umidade pela temperatura ambiente.



Figura 3.1.3 – Programa do computador de rastreio

Para iniciar 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.

A primeira coisa a ser feita é a calibração com o tubo de ruídos e carga à temperatura ambiente (Figura 3.1.4).

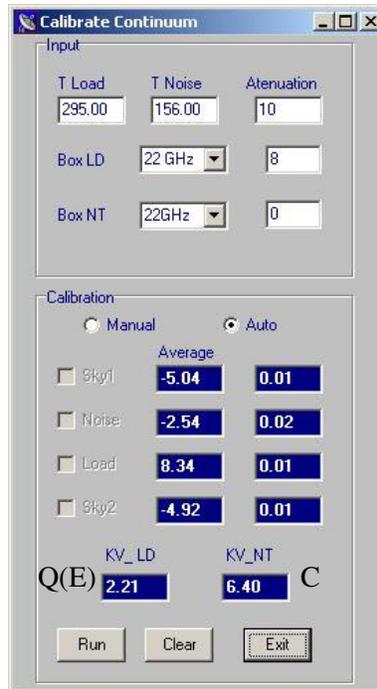


Figura 3.1.4 – Tela do computador de aquisição de dados ao realizar a calibração.

Iniciada a observação, pode-se verificar o nome da fonte, sua ascensão reta e declinação para a última varredura realizada, tempo sideral, data da observação, os parâmetros da antena, o tipo de scan que está sendo realizado. Na parte inferior desta tela encontra-se o número de varreduras que já ocorreram, a amplitude de observação, a posição x_0 do pico da gaussiana, a temperatura máxima de antena T_{max} e a largura do feixe à meia altura. É possível acompanhar quantas varreduras foram realizadas e o andamento das observações pelo gráfico “Last Observation”, que representa a última observação realizada da radiofonte (lado esquerdo) e o gráfico “Average Observation” representa a integração no tempo de todas as observações realizadas desta fonte (lado direito). Pode-se verificar a tela do programa do computador de aquisição de dados pela Figura 3.1.5.

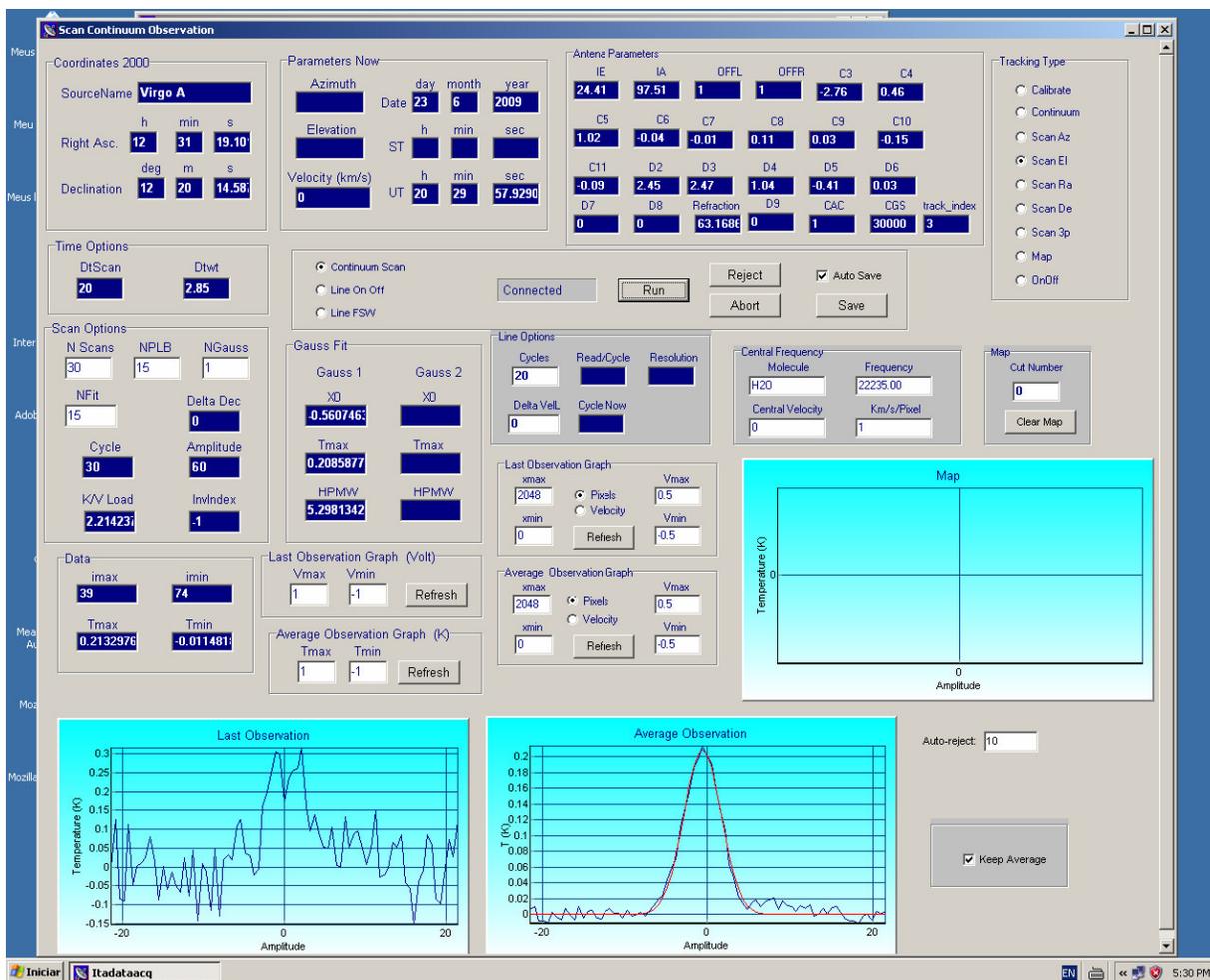


Figura 3.1.5 – Tela do computador de aquisição de dados.

3.2 Coleta de dados

As observações foram realizadas nas frequências de 22 e 43 GHz. 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', sendo que as respectivas amplitudes são ajustadas antes de se realizar as observações, possibilitando a verificação do apontamento da antena (BOTTI, 1990).

Antes das observações, faz-se necessário realizar uma calibração com um “noise source” (tubo de ruídos) e um “load” (carga) à temperatura ambiente, sendo o valor do “load” de aproximadamente 295 K.

Para a observação dos dados no Rádio-Observatório de Itapetinga para o quasar OJ287 e para a rádio-galáxia Virgo A, foi utilizado o método de varredura em azimute e elevação. Sgr A foi observado com o método de varredura em 3 pontos, na menor extensão da fonte, o que possibilita uma melhor linha de base, pois as varreduras são feitas perpendicularmente ao plano da galáxia. Cada observação tem duração de 10 minutos, sendo que são realizadas 30 varreduras de 20s cada.

A aquisição dos dados ocorre da seguinte maneira: 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 algumas varreduras é feita uma regressão linear dos pontos no extremo de cada varredura e também a média dos 81 pontos para cada varredura, subtraindo a contribuição do céu. Com isso, é possível ajustar os dados em uma gaussiana contendo 14 pontos centrais da média das varreduras (Figura 3.2.1).

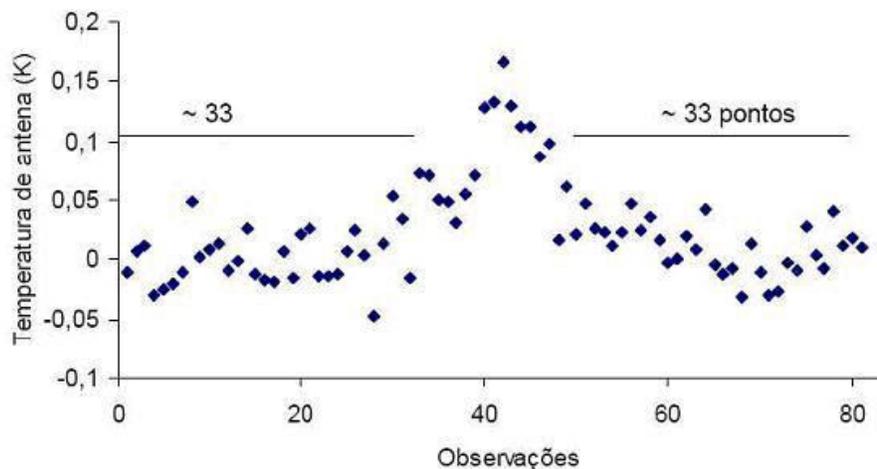


Figura 3.2.1 - Exemplo de “scan” de Virgo A em 43GHz, mostrando os 81 pontos da varredura. Fonte – Gastaldi (2006)

Términada a observação de 10 minutos, é gerado um arquivo no computador de aquisição de 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 (Figura 3.2.2).

```
SOURCE      = 'OJ287'
DATE-OBS    = '19/12/8'
DATE-KEPT   = '19/12/8'
LST         = '06:07:10'
SCAN        = 29
RA          = 8.5521
DEC         = 20.0427
L           = 1.7991
B           = 2.1508
TC          = 295.00
TSYS       = 65.00
DUR         = 580.00
NCH         = 81
AZ          = 46.825
EL          = 30.403
RMS         = 1
V           = 0.0
DV          = 0.26812
NU          = 22235.000
DNU         = 1.000
VELDEF      = 'LSR RADIO'
DATA
0.020105
0.041662
-0.034655
0.008353
0.003781
```

Figura 3.2.2 – Dados gerados pelo computador de aquisição de dados.

3.3 Conversão dos dados

Utilizou-se os dados obtidos entre junho de 2008 e julho de 2009 no Rádio-Observatório do Itapetinga, nas frequências de 22GHz (devido a alguns eventuais imprevistos não foi possível observar regularmente nesta frequência) e 43 GHz, para construir a curva de luz de Sagittarius A (Sgr A) e do quasar OJ287 para verificar sua variabilidade.

Para obter as respectivas curvas de luz é necessário converter os dados de temperatura de antena para densidade de fluxo, o que possibilitará verificar se as fontes observadas apresentam alguma variação na sua densidade de fluxo, quando comparadas com a fonte calibradora Virgo A.

Antes desta conversão, foi realizada a correção devido ao apontamento da antena, para que os dados coletados no Rádio-Observatório do Itapetinga pudessem ser tratados de forma mais confiável. Esta correção consiste em minimizar os erros referentes ao apontamento da antena. Este ajuste foi realizado utilizando a seguinte equação:

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

sendo $\sigma = \frac{HPBW}{\sqrt{8 \ln 2}}$

onde, T_0 é a temperatura de antena obtida na observação; 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.

Visando corrigir as observações devido à grande antena do Itapetinga se encontrar no interior de uma redoma, cujo fator de transmissão é η , utilizou-se um algoritmo que permitisse este feito, 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).

Para se determinar precisamente a temperatura de antena da fonte que foi observada, deve-se obter o valor de um tubo de ruído que independe da elevação e da carga à temperatura ambiente.

A temperatura de um tubo de ruídos, cujo valor independe da elevação é dada por:

$$T_{NT} = C(\Delta V_{NT+CÉU} - \Delta V_{CÉU}) \quad (3.2)$$

onde C é a constante radiométrica, $\Delta V_{NT+CÉU}$ é a voltagem do tubo de ruído e céu e $\Delta V_{CÉU}$ a voltagem do céu.

A relação entre a temperatura de antena T e a voltagem ΔV é:

$$T = C(\Delta V + V_o) \quad (3.3)$$

onde V_o é uma constante da voltagem arbitrária dada por:

$$V_0 = \frac{T_{AMB}}{C} - \Delta V_L \quad (3.4)$$

onde T_{AMB} é a temperatura ambiente e ΔV_L é a voltagem da carga.

Mas como a antena está localizada no interior de uma redoma, a temperatura de antena de uma fonte fora da atmosfera T_{FO} se relaciona à temperatura de antena dada por:

$$T_F = \eta T_{FO} \exp(-\tau \cos ec E) = C(\Delta V_{F+CÉU} - \Delta V_{CÉU}) \quad (3.5)$$

onde T_F é a temperatura de antena, η é o fator de transmissão da redoma, T_{FO} é a temperatura de antena de uma fonte fora da atmosfera, τ é a profundidade óptica, $\Delta V_{F+CÉU}$ é a contribuição de uma fonte pontual e do céu ao seu redor e $\Delta V_{CÉU}$ é a contribuição do céu.

Isolando a temperatura de uma fonte fora da atmosfera na equação 9 tem-se:

$$T_{FO} = \left(\frac{C}{\eta} \right) (\Delta V_{F+CÉU} - \Delta V_{CÉU}) \exp(\tau \cos ec E) \quad (3.6)$$

onde $K'(E) = \frac{\exp(\tau \cos ec E)}{\eta}$, tem-se:

$$T_{FO} = K'(E) C (\Delta V_{F+CÉU} - \Delta V_{CÉU}) \quad (3.7)$$

A emissão da atmosfera, num plano paralelo a aproximação é dada por:

$$T_{CÉU} = \eta \bar{T}_{CÉU} [1 - \exp(-\tau \cos ec E)] = C(\Delta V_{CÉU} + V_o) \quad (3.8)$$

onde $\bar{T}_{CÉU}$ é a média da temperatura cinética do céu na região onde é a maior parte da absorção ocorre.

Calculando,

$$\alpha T_{AMB} - T_{CÉU} = \alpha T_{AMB} - \eta \bar{T}_{CÉU} [1 - \exp(-\tau \cos ec E)] \quad (3.9)$$

Sendo que $\alpha = \eta \frac{\bar{T}_{CÉU}}{T_{AMB}}$

Combinando as equações (3.6), (3.7), (3.8) e (3.9) chega-se:

$$K'(E) = \frac{\alpha}{\eta} \left[\frac{1}{(\alpha - 1) + \left(\frac{C}{Q(E)} \right)} \right] \quad (3.10)$$

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 calculo do valor de $K'(E)$ utilizou-se $\bar{T}_{CÉU} = T_{AMB}$, o que implica que $\alpha = \eta$. O valor de transmissão da redoma é de $\eta = 0,77$ para 22 GHz e $\eta = 0,66$ para 43 GHz ((Abraham, Botti e Del Ciampo, 1986).

O valor da constante rádiométrica 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 e dados, como pode-se verificar na Figura 3.1.4.

Obtido o valor de $K'(E)$, seu valor foi multiplicado ao valor encontrado da temperatura de antena T' após a correção do apontamento da antena, obtendo assim o valor final de temperatura de antena, dado pela equação:

$$T'' = T' K'(E) \quad (3.11)$$

Utilizando a temperatura de antena obtida com a correção devido a antena estar localizada no interior de uma redoma T'' , foram convertidos os dados de temperatura de antena em densidade de fluxo. A conversão é fundamentada na comparação entre a temperatura de antena que foi obtida para fonte observada e a temperatura de antena de uma fonte calibradora, sendo que a densidade de fluxo para a fonte calibradora nas frequências observadas, permanece constante. Foi adotada como fonte calibradora a radigaláxia Virgo A, que em tese sua densidade de fluxo não varia para as frequências em 22GHz e 43GHz. 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).

Realizado todos os ajustes na temperatura de antena inicial, foi feita uma média simples para cada dia de observação e com isso calculado o desvio padrão pela fórmula (Bisqueira et al., 2004).

$$ERRO = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{OBS} - T_{MED})^2}{n}} \quad (3.12)$$

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.

Feito todos esses procedimentos, uma vez que já se tem a temperatura de antena (K) de cada uma das fontes, pode ser realizada a conversão dos dados para densidade de fluxo (Jy) por meio de uma regra de três, conforme as equações (GASTALDI, 2006):

$$F_{22GHz} = \frac{21,5}{T_{VIRGO(22)}} T_{FONTE(22)} \quad (3.13)$$

$$F_{43GHz} = \frac{11,5}{T_{VIRGO(43)}} T_{FONTE(43)} \quad (3.14)$$

4.0 Resultados

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos das observações do quasar OJ287, da fonte compacta de Nossa Galáxia Sagittarius A* e da fonte calibradora Virgo A, nas frequências de 22GHz e 43GHz, com o intuito de estudar as variabilidades temporais desses núcleos compactos ativos. Nos gráficos em 22 e em 43 GHz para OJ287 e Virgo A foram aplicadas as correções do apontamento da antena e a correção devido a antena estar no interior de uma redoma. Para Sagittarius A* (Sgr A*), os dados plotados nos gráficos de 22 e 43 GHz foi aplicado somente a correção devido a antena estar no interior da redoma.

Para as duas primeiras fontes foi feito o gráfico de Densidade de Fluxo versus Tempo e para a fonte calibradora o gráfico de Temperatura de Antena versus Tempo. A discussão dos gráficos e a aplicação do modelo Canônico serão abordadas na conclusão.

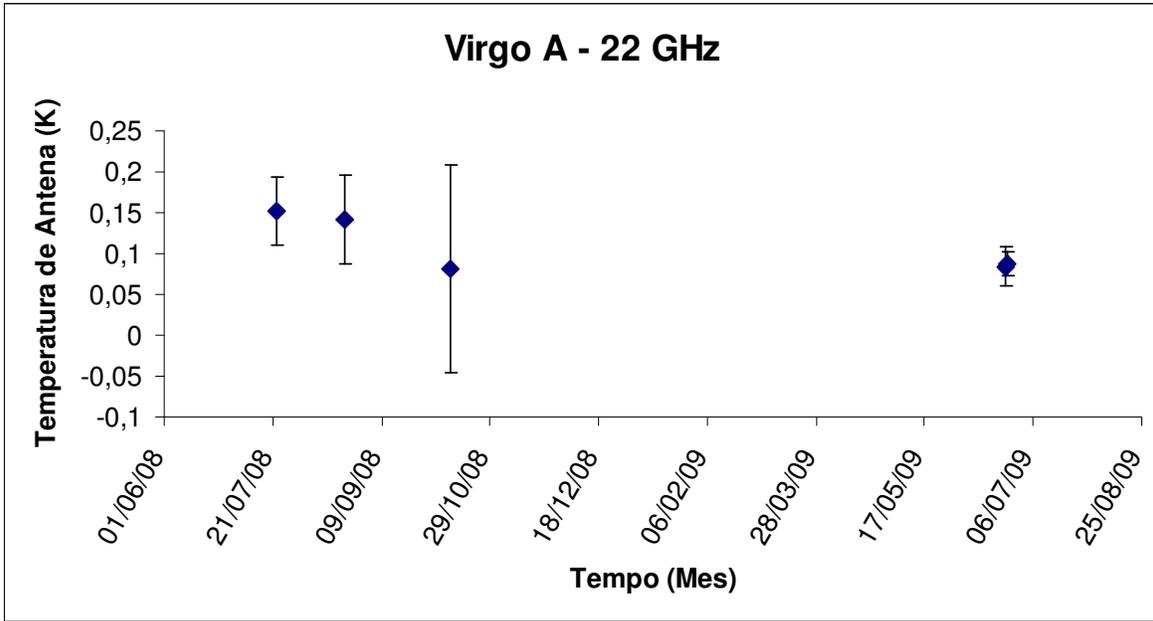


Figura 4.1 – Comportamento temporal da Temperatura de Antena de Virgo A em 22 GHz de julho de 2008 a julho de 2009.

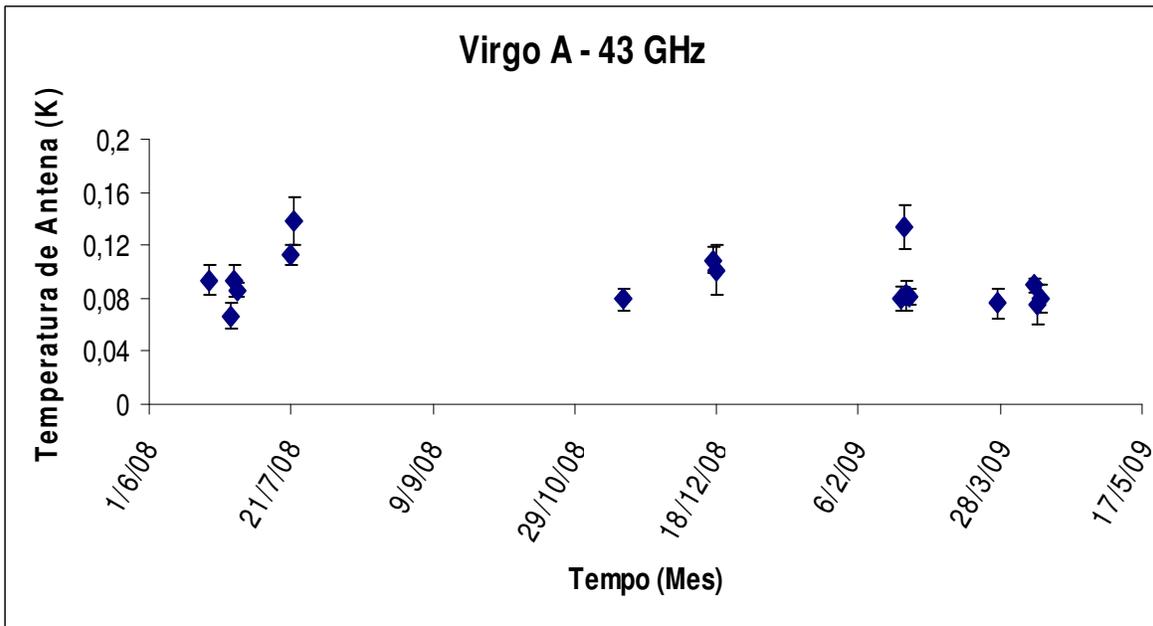


Figura 4.2 – Comportamento temporal da Temperatura de Antena de Virgo A em 43 GHz de junho de 2008 à abril de 2009.

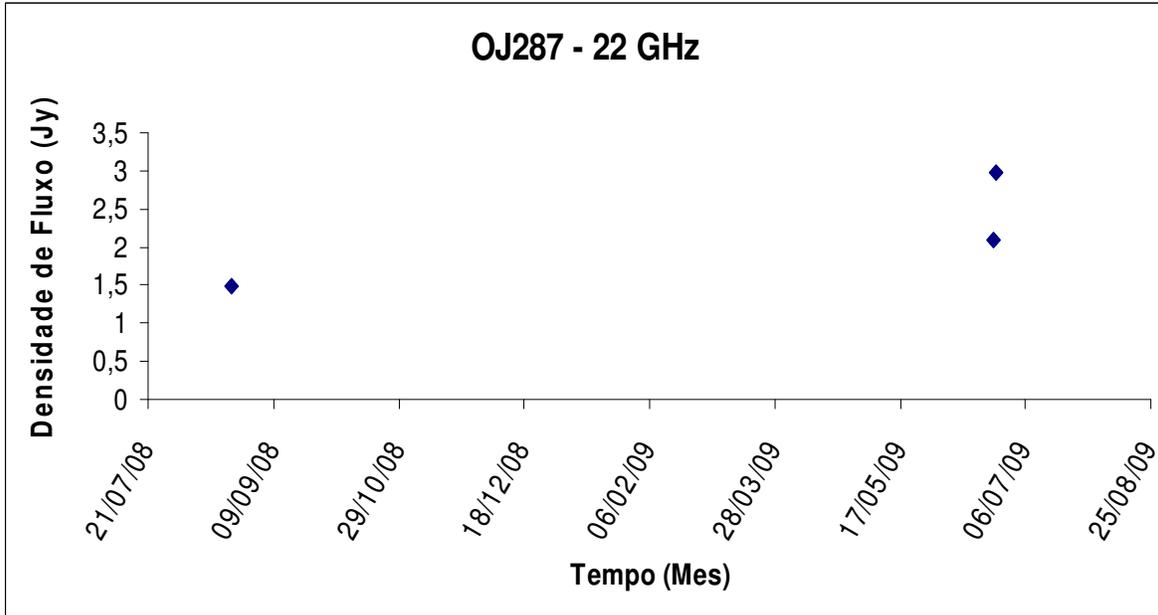


Figura 4.3 – Comportamento temporal do quasar OJ287 em 22 GHz, no período de agosto de 2008 e julho de 2009.

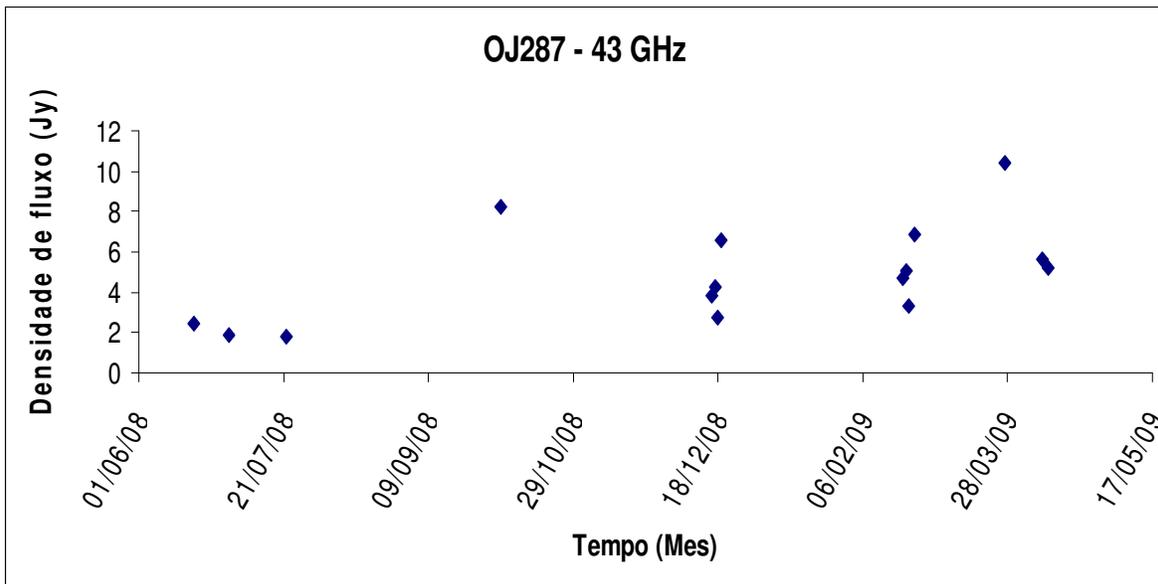


Figura 4.4 – Comportamento temporal do quasar OJ287 em 43 GHz, no período de julho de 2008 à junho de 2009.

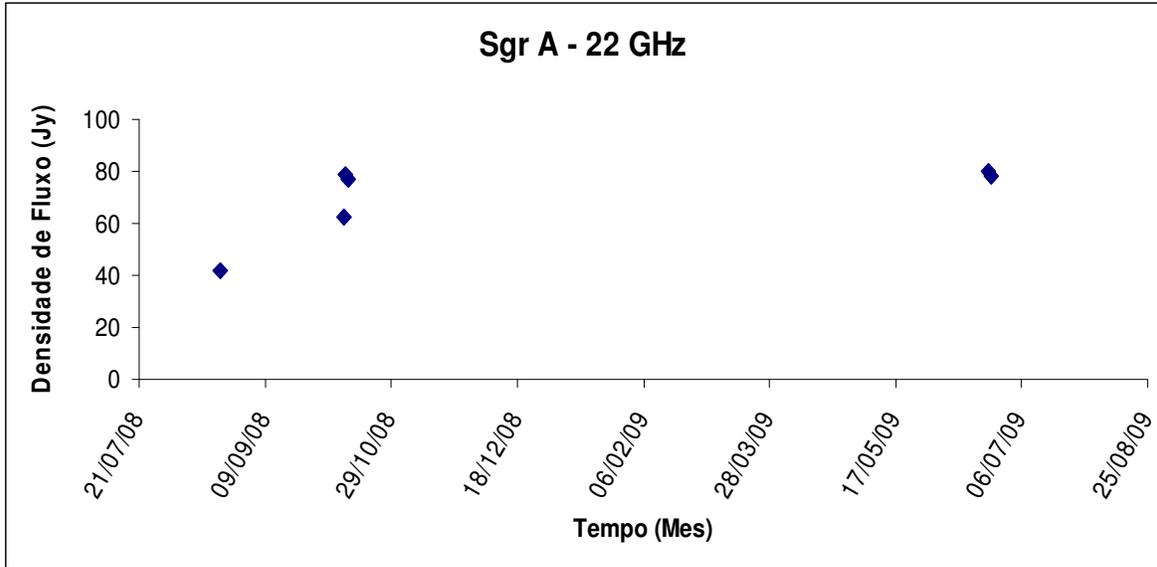


Figura 4.5 – Comportamento temporal de Sagittarius A* (Sgr A*) em 22 GHz, no período de julho de 2008 à junho de 2009.

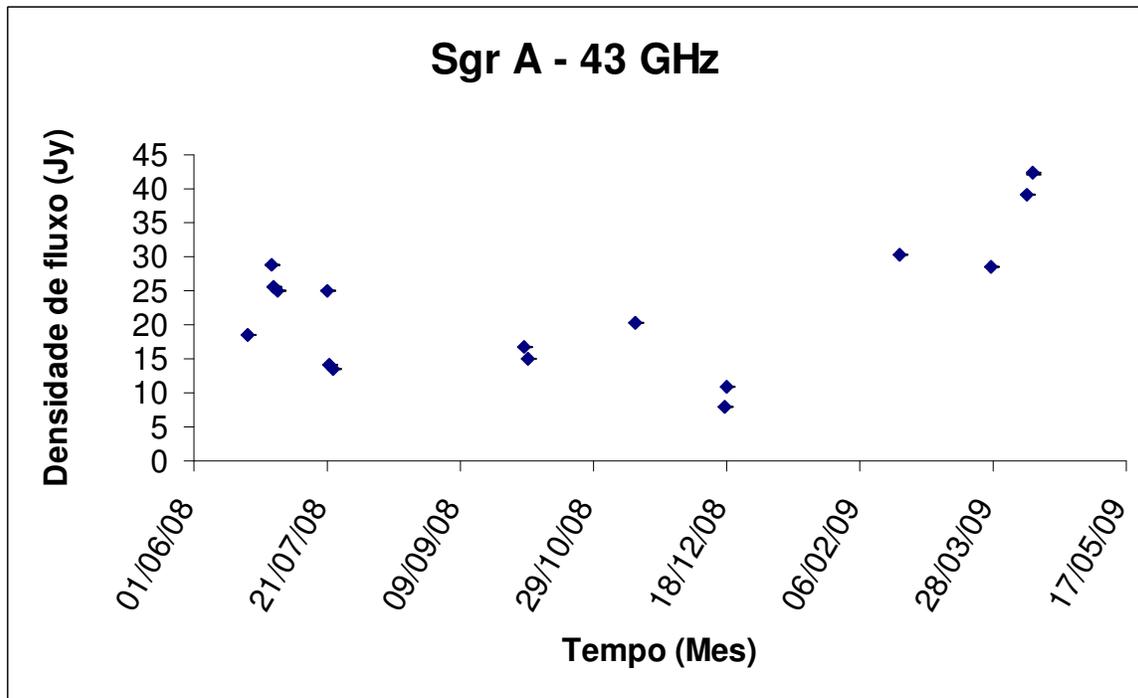


Figura 4.6 – Comportamento temporal de Sagittarius A* (Sgr A*) em 43 GHz, no período de julho de 2008 à junho de 2009.

5.0 Conclusão e trabalhos futuros

A partir da pesquisa bibliográfica realizada, concluiu-se que Nossa Galáxia apresenta características semelhantes ao quasar OJ287. Nota-se que em ambas as fontes a região de maior emissão está localizada na região central, onde acredita-se existir um buraco-negro super-massivo para Sgr A* e para OJ287 um sistema binário de buracos-negros. Observa-se também a existência de um par de lóbulos que se estendem pela região do Centro Galáctico semelhante aos existentes nos AGN's. Outra característica entre as fontes estudadas são as variações em suas densidades de fluxo, tanto em períodos curtos com em períodos mais longos, que podem ser verificadas nas curvas de luz apresentadas no referencial teórico.

Analisando as Figuras 4.1 e 4.2, que representam a variação da temperatura de antena de Virgo A pelo tempo, pode-se notar que, levando em consideração as barras de correção, suas variações são compensadas, o que mostra que é possível considerar esta radio-galáxia como uma boa fonte calibradora, uma vez que nas frequências em 22 e 43 GHz sua temperatura permaneceu constante.

Nas Figuras 4.3 e 4.5 não é possível fazer alguma análise, devido às poucas observações na frequência de 22 GHz.

Pela Figura 4.4, que representa o comportamento do quasar OJ287 pelo tempo, é possível notar que para os primeiros meses de observação sua densidade de fluxo permaneceu aparentemente constante e a partir de setembro de 2008 apresentou uma densidade de fluxo acima de 5 Jy. Pode-se verificar também pelo gráfico que, em março de 2009, OJ287 atingiu seu ponto de máxima emissão durante o período de observações com o ROI.

Na Figura 4.6, que representa o comportamento temporal da fonte não térmica no Centro de Nossa Galáxia, Sagittarius A*, nota-se que inicialmente apresentava uma densidade de fluxo em torno de 25 Jy. Durante o final de setembro de 2008 até o final de dezembro de 2008 sua densidade de fluxo diminuiu significativamente, apresentando densidade de fluxo um pouco menor que cerca de 10 Jy. A partir do início de 2009 apresentou uma acentuada elevação em sua densidade de fluxo, atingindo seu ponto de maior emissão durante o período de observação, acima de 40 Jy.

Analisando a Tabela 2.1, 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 . Para obter êxito nos ajustes, deve-se considerar um modelo que leve em conta a dinâmica da expansão da nuvem de elétrons relativísticos, como o modelo de Marscher e Gear (1985).

Nos próximos trabalhos, pretende-se estudar e aplicação de outros modelos que descrevem os jatos observados nas radiofontes estudadas, dando ênfase na aplicação do modelo de Marscher e Gear (1985). A obtenção das curvas de luz, visando o estudo da variabilidade temporal, a obtenção da distribuição espectral de energia (SED) do quasar OJ287 e do Centro Galáctico. Dar-se-á continuidade nas observações no Rádio-Observatório do Itapetinga (ROI) nas frequências em 22 e 43GHz e também no estudo histórico das fontes relacionadas ao projeto. Para a redução dos dados obtidos com a grande antena do Itapetinga, serão utilizados os programas Origin e DRAWSPEC (NRAO).

Os autores agradecem ao PIBIC/CNPq.

6.0 Referências

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

ANANTHARAMAIAH, K. R.; EKERS, R. D.; GOSS, W. M.; PEDLAR, A.; Radio studies of the Galactic Centre. II - The arc, threads, and related features at 90 CM (330 MHz). *Mon. Not. R. Astronomical Soc*, 249, p. 262-281, 1991.

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

BLAKE, G.M.; Observations of Extragalactic Radio Sources Having Unusual Spectra, *Astrophysical Letters*, Vol. 6, p.201, Jul 1970.

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

BROWN, R.L.; LO, K.Y.; Variability of the compact radio source at the Galactic Center. *The Astrophysical Journal*, 253 (1), 103-114, fev 1982.

CLEMENS, D. P.; Massachusetts-Stony Brook galactic plane CO survey: The galactic disk rotation curve. *The astrophysical Journal*, v. 295, p. 422-436, ago 1985.

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.; The Variability of Sagittarius A* at Centimeter Wavelengths. *The Astronomical Journal*, vol 127, p. 3399-3410, jun 2006.

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

LA ROSA, T. N.; KASSIM, NAMIR.E.; LAZIO, T.; JOSEPH.W.; HYMAN, S.D.; A Wide-Field 90 Centimeter VLA Image of the Galactic Center Region. *The Astronomical Journal*, Volume 119, Issue 1, pp. 207-240, 1991.

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

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

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

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

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

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

USHER, P.D.; BL Lacertae objects - The case for synchronous optical-radio outbursts in OJ 287. *Astronomical Journal*, vol. 84, Sept. 1979, p. 1253-1269.

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

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