



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



# **OBSERVAÇÃO E COLETA DE DADOS DE LENTES GRAVITACIONAIS UTILIZANDO O RADIOTELESCÓPIO DO ITAPETINGA**

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

Mário Raia Neto (UFSCar, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: mraianeto@gmail.com

Luiz Cláudio Lima Botti (CRAAM/INPE, Orientador)  
E-mail: luizquas@yahoo.com.br

Julho de 2016

## RESUMO

O presente trabalho procura expor de forma clara e concisa alguns aspectos históricos da teoria da relatividade geral e conceitos qualitativos dos modelos que decorrem da teoria.

Por fim o presente relatório procura mostrar o funcionamento de um rádio telescópio.

Ao tratarmos das parte históricas da relatividade geral, vamos discutir alguns pontos de como se deu a transição, da bem estabelecida, mecânica newtoniana para a generalização proposta pela relatividade geral de Einstein tanto em 1906 quanto 1916.

Sobre os modelos decorrentes desta teoria, vamos trabalhar com quasares e principalmente, lentes gravitacionais, que decorrem das soluções da equação de campo de Einstein.

Além disso, sobre as lentes gravitacionais, o presente projeto de pesquisa busca estudar qual o comportamento da bem conhecida lente gravitacional PKS 1830-211.

## **ABSTRACT**

This paper attempts to show, in a simple but clear way, some historical aspects of general relativity and some qualitative concepts of the models which are consequences of this theory. Furthermore, this paper wants to show how a radio telescope works.

On the study of the historical parts of general relativity, we shall discuss some points of the transition of, the well established, Newtonian mechanics to the scope of the theory proposed by Einstein both 1906 and 1916.

About the models of general relativity, we shall discuss the concept of effects such as quasars and, principally, gravitational lenses that are provided by the solutions of Einstein's field equation

Moreover, about the gravitational lenses, this paper attempts to study the behavior of the well know lensed object PKS 1830-211.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>5</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>6</b>
<b>3. ALGUNS PONTOS SOBRE A CRONOLOGIA DA HISTÓRIA DA RELATIVIDADE GERAL</b>	<b>6</b>
3.1 A TRANSFORMAÇÃO DE GALILEU A MECÂNICA NEWTONIANA	6
3.2 O ELETROMAGNETISMO DE MAXWELL E O ÉTER	9
3.3 AS TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ	9
3.4 RELATIVIDADE ESPECIAL E A DINÂMICA DE EINSTEIN	11
3.5 RELATIVIDADE GERAL	11
<b>4 ALGUNS MODELOS PROVENIENTES DA RELATIVIDADE GERAL</b>	<b>12</b>
4.1 LENTES GRAVITACIONAIS	12
4.1.1 TIPOS DE LENTEAMENTO	12
4.2 QUASARES	13
4.2.1 BREVE HISTÓRICO	13
4.2.2 O QUASAR PKS 1830-211	14
4.2.3 ANÁLISE DA CURVA DE LUZ DE PKS 1830-211	16
<b>5 MÉTODOS E O FUNCIONAMENTO DE UM RÁDIO TELESCÓPIO</b>	<b>17</b>
5.1 O CONCEITO DE DENSIDADE DE FLUXO	18
5.2 SOFTWARE DE AQUISIÇÃO	19
5.3 MÉTODOS DE COLETA DE DADOS	22
<b>6 RÁDIO OBSERVATÓRIO DO ITAPETINGA</b>	<b>22</b>
<b>7 CONCLUSÃO</b>	<b>23</b>
<b>8 BIBLIOGRAFIA</b>	<b>24</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o advento da Teoria da Relatividade Geral, a visão newtoniana sobre o espaço e o tempo, foi mudada drasticamente (ASIMOV, 1993). Quanto a natureza do espaço, Einstein propôs que o mesmo seria uma estrutura não absoluta e que seria passível de modificações perante a massa dos corpo. A Relatividade Geral, dentre outras coisas, prediz que raios de luz ao entrar em contato com um campo gravitacional suficientemente forte se desviam e percorrem um novo caminho levemente curvado. Tendo essa concepção em mente, astrônomos procuraram um meio viável de experimentar a tão recente Teoria da Gravitação de Einstein. A única maneira viável era a de estudar as estrelas vizinhas do halo solar, em um eclipse total, para então se comprovar, a curvatura do raio de luz.

A curvatura da luz, em um campo gravitacional de um corpo massivo, foi observada pela primeira vez em 29 de maio de 1919, em duas expedições realizadas pela Real Sociedade Astronômica de Londres, para o Brasil (Sobral, Ceará) e para África (Ilha de Príncipe no Golfo de Guiné (ASIMOV, 1993). O experimento consistiu em medir a posição relativa das estrelas brilhantes no momento do eclipse. As duas expedições comprovaram, sem sombra de dúvidas, a Relatividade Geral, pois os raios de luz rasantes ao halo solar, tornaram as estrelas ligeiramente afastadas (EDDINGTON, 1920).

Segundo Burke (1997), Einstein cogitou que mais de um raio de luz poderia ser visto de uma mesma fonte; essa conjectura foi então confirmada em 1979 quando os cientistas (Walsh, Carswell e Weymann, 1979) descobriram a rádio fonte *B0957+561*, que apresentava duas “estrelas” com o mesmo espectro e o mesmo *redshift*<sup>1</sup>. Com essa descoberta, foi proposto que a separação das duas imagens era devido a uma curvatura do espaço-tempo, devido a uma galáxia que se encontra na frente da rádio fonte, e que atuava como uma espécie de “lente” na linha de visada. A rádio fonte era um objeto estelar, denominada *Quasar*, o qual fora chamado, neste caso, de *Duplo Quasar*. Com a descoberta desse objeto e desse efeito gravitacional, a pesquisa sobre Lentes Gravitacionais nascera.

---

<sup>1</sup> O efeito *redshift*, em física, acontece quando a luz ou qualquer outra radiação eletromagnética de algum objeto se afasta do observador aumentando o comprimento de onda, ou como é frequentemente conhecido o jargão, desvio para o vermelho.

## **2 OBJETIVO**

O objetivo principal deste trabalho é fazer um estudo de alguns aspectos históricos da relatividade de Einstein –tanto a relatividade especial quanto a relatividade geral-. Tratando dos conceitos básicos da relatividade proposta por Galileu Galilei, o presente trabalho visa o estudo histórico da transição da mecânica clássica de Newton até os estudos que culminaram na necessidade de tratar a mecânica com a abordagem relativística. Após o estudo histórico, apresenta-se, qualitativamente, uma aplicação, proveniente da relatividade geral, que estuda fenômenos tais como, lentes gravitacionais e quasares.

Sobre o estudo das lentes gravitacionais e quasares, serão apresentados os conceitos qualitativos básicos dos fenômenos e posteriormente uma discussão de dados observacionais (provenientes de rádio-telescópios), preferencialmente dados do Rádio Observatório do Itapetinga (ROI) e do Observatório de Michigan (sobre a fonte PKS 1830-211), para tratar da física contida nas curvas de luz. Será utilizado a curva de luz de PKS 1830-211 em três frequências: 4,8GHz, 8.0GHz e 14,5GHz, num período de 1992 a 2012 para então analisar o estudo das lentes gravitacionais.

## **3 ALGUNS PONTOS SOBRE A CRONOLOGIA DA HISTÓRIA DA RELATIVIDADE GERAL**

### **3.1 A TRANSFORMAÇÃO DE GALILEU E A MECÂNICA NEWTONIANA**

O conceito da relatividade não é algo próprio da teoria da relatividade de Einstein.

Desde a época de Galileu o conceito de relatividade é presente no estudo do movimento e com os trabalhos de Newton, este conceito ganhou corpo e forma.

De fato, ao se falar da dinâmica de Newton, estamos pensando basicamente em suas três leis:

A 1ª lei: o princípio da inércia. O princípio da inércia diz respeito a uma propriedade fundamental, a de que todo corpo físico possui uma quantidade chamada inércia, que ganha quantificação ao se medir a massa do corpo. Quando se tem este valor, pode-se determinar o quanto este corpo resiste a tentativa de mudança de seu movimento atual. Se a variação do momento em função do tempo for nula, seu estado inercial é invariante no intervalo de tempo considerado o que implica em um corpo que não sofre interações

ou que a soma vetorial de todas as interações atuantes no corpo são iguais a zero. Onde  $\mathbf{p}$  é o momento e  $\dot{\mathbf{p}}$  é a variação do momento com respeito ao tempo.

$$\dot{\mathbf{p}} = 0 \quad (3.1)$$

a 2ª lei: a da mudança do estado inercial com o passar do tempo é devido a uma quantidade denominada Força, onde a  $\mathbf{F}$  é a força que é uma função do tempo  $t$  da posição  $\mathbf{r}$  e da velocidade  $\dot{\mathbf{r}}$ , justamente por que o momento é uma função destas três variáveis.

$$\dot{\mathbf{p}} = F(t, \mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}) \quad (3.2)$$

e a 3ª lei: a da ação e reação, ou seja a mudança do estado inercial de um corpo 1 é devido a uma interação com outro corpo 2, por essa interação o corpo 2 também sofre uma mudança em seu estado de movimento devido ao corpo 1.

$$\dot{\mathbf{p}}_{12} = -\dot{\mathbf{p}}_{21} \quad (3.3)$$

Entretanto, apesar da três leis de Newton serem filosoficamente importantes para o entendimento do movimento dos corpos e matematicamente práticas para descrever também o movimento, temos ainda que mostrar mais duas leis que compreende o conjunto dos 5 postulados de Newton (KNUDSSSEN,1995) . São a 4ª lei: o postulado de tempo absoluto e a 5ª lei: o postulado do espaço absoluto. Ambas, 4ª e 5ª leis, não possuem uma tradução matemática no contexto da mecânica Newtoniana.

A 4ª diz respeito a uma região onde o tempo é comum em todo ponto, isso nos diz que a dinâmica não interfere na sincronização dos tempos em cada ponto, e que um evento A medido no tempo  $t$  em relação a um referencial K é igual ao tempo  $t'$  medido em relação a um referencial K', ou seja o evento A é absolutamente simultâneo para qualquer referencial na mecânica de Newton.

A 5ª nos mostra a existência de um local onde a geometria do espaço não interfere na dinâmica, ou seja o espaço é apenas um local onde o movimento acontece. Ainda mais, é pelo espaço absoluto de Newton que acontecem as distinções entre um referencial inercial e um referencial não inercial, levando o referencial do espaço externo aos dois referenciais, a um patamar de referencial absoluto o que implica em forças de inércia e de Coriolis (NUSSENSZVEIG,2013).

Como foi dito, a relatividade do movimento, não é uma consequência da teoria da relatividade de Einstein. De fato, o conceito de relatividade foi proposto por Galileo Galilei em sua famosa obra (STILLMAN,1974) intitulada -em tradução livre- "Sobre as duas novas ciências"

A conclusão fundamental da relatividade do movimento é expressa pela equação:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{V}t \quad (3.4)$$

A equação acima é chamada de transformação de Galileo e diz respeito a como se transformam as coordenadas de um ponto P, frente a dois sistemas de coordenadas K e K'.  $\mathbf{r}'$  é o vetor posição em relação ao referencial K',  $\mathbf{r}$  é o vetor posição em relação ao referencial K,  $\mathbf{V}$  é o vetor velocidade do referencial K' em relação ao referencial K e  $t$  é o tempo. (NUSSENSZVEIG,2013).

Esta equação nos mostra, operacionalmente, que o movimento é um conceito relativo, e juntamente com a 1ª lei, cria-se uma classe de referenciais chamados de *referenciais inerciais* onde toda a mecânica pode ser descrita, ou seja, a equação da segunda lei de Newton, descreve o mesmo fenômeno em relação a qualquer referencial em que suas coordenadas se transformem conforme uma transformação de Galileo.

Uma outra forma de se dizer isso é tomando as derivadas segundas da transformação de Galileo, o que resultará em acelerações iguais nos referenciais K e K', o que implicará em dizer que frente as transformações de Galileo, a segunda lei de Newton assume a mesma forma em todo referencial inercial, ou ainda: a segunda lei de Newton é *covariante* (NUSSENSZVEIG,2013) frente a uma transformação de coordenadas, neste caso a de Galileo.

Sendo assim a transformação de Galileo implica em invariância, sendo  $\dot{\mathbf{p}}'$  a força em relação ao referencial K' e  $\dot{\mathbf{p}}$  a força em relação ao referencial K.

$$\dot{\mathbf{p}}' = \dot{\mathbf{p}} \quad (3.5)$$

### 3.2 O ELETROMAGNETISMO E O ÉTER

Com o advento das experiências de, principalmente, Faraday e Oersted, as interações magnéticas e elétricas foram estudadas cuidadosamente, bem como seus fenômenos.

No final do século XIX o físico James Clerk Maxwell, axiomatizou a física experimental de Faraday e Oersted o que culminou em uma descrição completa dos fenômenos magnéticos e elétricos, bem como a unificação de duas interações na formulação da *interação eletromagnética*.

Uma importante conclusão da teoria eletromagnética no contexto da relatividade de Einstein, é a de que todo o eletromagnetismo de Maxwell é fundamentalmente relativístico sendo assim esse fato culminou na necessidade de uma nova categoria de transformações para levar a eletrodinâmica a sua forma covariante, respeitando assim o princípio da relatividade proposto por Galileo.

Ao se trabalhar matematicamente com as equações de Maxwell (BARCELOS,2010), para se resolver as equações de onda, chega-se a um importante resultado que é o da velocidade de uma onda eletromagnética (onde a velocidade  $v$  detém unidade, no SI, de  $\frac{m}{s}$ ):

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2,99 \times 10^8$$

Segundo (BARCELOS,2010), estes resultados levaram Maxwell a descartar quase que completamente o modelo corpuscular da luz e a postular um meio hipotético chamado de Éter, por onde as ondas eletromagnéticas se propagariam.

Sendo o eletromagnetismo de Maxwell por si só uma descrição que não obedecia o princípio da relatividade de Galileo, o Éter, ajudava a entender o mecanismo do por quê desta aparente quebra de simetria.

Ainda segundo BARCELOS,2010), com o Éter, a invariância não era necessária criando então o famoso paradigma de um referencial absoluto, o referencial do Éter, para onde toda a Física era suficientemente bem descrita.

### 3.3 AS TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ

A natureza relativística da teoria eletromagnética, não foi prontamente notada por Maxwell. De fato, Maxwell não tinha conhecimento sobre as ideias de uma possível restrição frente as transformações de Galileo. Ele postulou um meio de propagação por onde seu eletromagnetismo ,i.e as ondas eletromagnéticas, se propagassem, em analogia total à propagação das ondas no ar ou na água. Este meio, aparentemente necessário, ficou conhecido como Éter

Anos mais tarde, o conceito do Éter sofreria vários questionamentos, i.e. a tentativa, falha, de medir a velocidade da terra em relação ao Éter, o que culminou em uma formulação de transformações espaciais propostas por Woldemar Voigt (MARTINS,2015) onde frente estas transformações, a propagação de ondas se tornariam invariantes.

Entretanto, Voigt considerava suas transformações apenas truques matemáticos (MARTINS,2015) para tratar da propagação das ondas eletromagnéticas e desconsiderava, também, a questão da coordenada temporal. As transformações de Voigt foram o antecedente histórico das transformações propostas pelo físico Hendrik Lorentz. (MARTINS,2015)

Em 1904 Lorentz publicou seu trabalho sobre a eletrodinâmica de Maxwell, apresentando então as transformações que levariam a um eletromagnetismo invariante e assim respeitando a relatividade de Galileo. Porém, a conclusão histórica mais importante (que levou à teoria da relatividade especial de Einstein) é que para Lorentz suas transformações eram de caráter essencialmente matemático, i.e. recursos para tentar adaptar a relatividade do movimento ao eletromagnetismo, o que levou a Einstein três anos mais tarde a exprimir um caráter Físico das transformações de Lorentz o que culminou na Relatividade Especial. A saber, as transformações de Lorentz são dadas pelas equações (3.6) e (3.7) onde  $\mathbf{r}'$  e  $t'$  são, respectivamente, o vetor posição e tempo.

$$\mathbf{r}' = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{V}t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.6)$$

$$t' = \frac{t - \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{r}}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.7)$$

### 3.4 RELATIVIDADE ESPECIAL E A DINÂMICA DE EINSTEIN

Einstein em seu famoso artigo sobre a eletrodinâmica proposta por Lorentz, postula os princípios de sua teoria e infere um caráter físico nas transformações de Lorentz, retirando-as do patamar de simples artifícios matemáticos.

As conclusões mais importantes da Relatividade Especial são: a unificação do conceito de espaço físico a uma variedade chamada *espaço-tempo*, onde cada ponto é definido por quatro coordenadas, três espaciais e uma temporal, levando ao conceito preciso de evento e simultaneidade; o conceito de tempo próprio e a dinâmica newtoniana corrigida para velocidades próximas a  $c$ . As equações (3.8), (3.9) e (3.10) exemplificam grandezas Físicas corrigidas para a dinâmica relativística. Respectivamente são a  $\mathbf{E}$  a Energia,  $\mathbf{p}$  o Momento Linear e  $m$  a Massa.

Entretanto, as transformações de Lorentz nos revelam que os comprimentos são contraídos e o tempo sofre uma dilatação e, ainda mais, surge também uma correção para a mecânica newtoniana, criando toda uma dinâmica próximas à velocidade limite  $c$ , para o momento, para energia e para massa :

$$\mathbf{E} = \sqrt{\mathbf{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4} \quad (3.8)$$

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.9)$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.10)$$

### 3.5 RELATIVIDADE GERAL

Uma década após a publicação da Relatividade Especial, Einstein publica a teoria da Relatividade Geral (MARTINS,2015) que agora trata da aceleração, ou dos referenciais acelerados, descobrindo que em suma a aceleração e a gravitação são conceitos íntimos e indissociáveis, levando então a ideia de que a geometria é a própria gravitação.

A conclusão da teoria da Relatividade Geral reside em uma equação de campo dada pela equação abaixo:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad (3.11)$$

A equação de campo de Einstein, descreve o que o campo gravitacional de Newton realmente é, e nos diz respeito sobre algo ainda mais geral, que é a estrutura do universo tanto local quanto geral, devido a massa e a energia.

Matematicamente, a equação de Einstein é essencialmente Tensorial onde  $R_{\mu\nu}$  é o tensor de Ricci  $g_{\mu\nu}$  é o tensor métrico  $T_{\mu\nu}$  é o tensor de energia-momento;  $G$  é a constante da Gravitação –devida a Newton- e  $R$  é o escalar de curvatura

## **4 ALGUNS MODELOS PROVENIENTES DA RELATIVIDADE GERAL**

### **4.1 LENTES GRAVITACIONAIS**

As lentes gravitacionais são, basicamente, um sistema onde existe um observador, uma fonte e um corpo, que devido a sua massa, tem a capacidade de curvar o espaço entre os dois, apresentando o efeito da lente gravitacional.(ref)

O objeto que representa a lente pode ser uma galáxia e até mesmo outros objetos atuando de forma semelhante, tais como buracos negros e super aglomerados de estrelas. Um objeto que seja suficientemente massivo para curvar a luz proveniente da fonte, pode ser considerado uma lente e, dentro dessa afirmação, a literatura apresenta certos tipos de lenteamento, que curvam a luz proveniente da fonte e assim produzem uma variedade de efeitos (SCHNEIDER;EHLERS;FALCO, 1999).

#### **4.1.1 TIPOS DE LENTEAMENTO**

O efeito das lentes gravitacionais pode acontecer em graus diferentes de intensidade. Pode-se ter grandes efeitos em arco e cruzeis principalmente, devido ao efeito de lenteamento forte. Esse efeito é bastante observado e PKS 1830-211 é em verdade um objeto que apresenta, no sistema de lentes gravitacionais, o efeito de anel de Einstein.(ref)

Temos também os lenteamentos fracos onde só podem ser observados com metodologias estatísticas onde é necessária observação de vários objetos, para então chegar a uma medição precisa.(ref)

É necessário ressaltar que quando o objeto, que está curvando o espaço e criando o efeito de lente gravitacional, está em nossa própria galáxia, temos o efeito do “micro-lensing” que pelo fato do objeto estar em nossa galáxia a escala deste tal objeto é em micro segundos de arco.(ref)

### **4.2 QUASARES**

#### **4.2.1 BREVE HISTÓRICO**

No final da década de 50, os radio astrônomos haviam compilado catálogos repletos de radio fontes que ainda não haviam sido identificadas com nenhum objeto óptico .No começo da observação dos Quasares, estes não eram totalmente entendidos devido as

suas linhas de emissão largas que não condiziam com nenhuma literatura presente na época e, sobre o ponto de vista observacional, os quasares eram, morfológicamente quase idênticos a estrelas distantes.

O histórico das indagações sobre a natureza de um novo tipo de objeto (o quasar) se deu quando, no primeiro ano da década de 60 com a fonte 3C48; os cientistas Thomas Matthews e Allan Sandage descobriram um objeto de magnitude aproximadamente 16, que até então parecia ser uma estrela ordinária, porém que coincidia com a posição da rádio fonte 3C 48 e apresentava linhas de emissão largas e possuía emissões majoritariamente em comprimentos de onda do ultravioleta do espectro. Pouco tempo depois, em 1963, outra radio fonte foi observada, 3C 273, onde Matthews e Sandage puderam observar com mais precisão constatando que as linhas de emissão na verdade apresentavam a característica das linhas de emissão dos átomos de hidrogênio, porém deslocadas para cima do espectro, para os comprimentos menos energéticos, como o vermelho.

Após uma revisão do espectro de 3C 48, (Matthews e Greenstein, 1963) verificaram que suas linhas de emissão estavam deslocadas de um fator 0,367 para o vermelho. Com isso, eles introduziram um novo objeto de estudo, os quasares, que significa “quase-stellar radio sources”.

#### 4.2.2 O QUASAR PKS 1830-211

A rádio-fonte PKS 1830-211 (RAO; SUBRAHMANYAN, 1988; SUBRAHMANYAN et al. 1990; JAUNCEY et al. 1991) é uma das dez rádio fontes mais brilhantes ( $\sim 10 \text{Jy}^2$ ) em comprimentos de onda centimétricos, distando cerca de  $5,7^0$  do plano galáctico<sup>3</sup>. Ela foi modelada como um *quasar* composto por um núcleo, um nó e um jato na escala de 100-200 milissegundos de arco (SUBRAHMANYAN et al. 1990).

Como PKS1830-211 situa-se em uma linha de visada próxima ao plano galáctico, houve pouco sucesso até 1992 (DJORGOVSKY et al. 1992) na identificação da fonte em óptico e infravermelho. Em óptico foi encontrado um objeto vermelho bem fraco dentro de um segundo de arco, que pareceu ter o espectro de uma estrela anã M3. Este não seria o objeto esperado. No entanto, imagens no infravermelho obtidas do telescópio

---

<sup>2</sup> Unidade de densidade de fluxo, que confere a equação:  $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{Hz}}$

<sup>3</sup> Em astronomia, se denomina um plano galáctico, o plano onde se encontram a maior parte das estrelas de uma galáxia.

anglo-australiano no comprimento de onda de 2,1  $\mu\text{m}$  indicam que a estrela M3 pareceu ser ligeiramente estendida na direção sudoeste, próxima à posição da componente obtida por DJORGOVSKI et al. (1992), em rádio. Este objeto muito vermelho poderia ser a galáxia-lente ou o objeto-lente esperado. Porém, espectroscopicamente, este objeto foi muito difícil de ser observado devido a sua extrema proximidade com a estrela anã M3.

Em 1995, foi feito um estudo para verificar se existiam linhas de emissão ou absorção associadas à fonte usando o telescópio Parkes equipado com um receptor de banda larga (LOVELL et al., 1996). Foi encontrada uma única linha a 1,19 GHz, exibindo características de absorção HI. Se interpretada como HI, essa linha revela um desvio para o vermelho de 0,19. Observações realizadas, por meio de telescópios localizados na Austrália (Australian Telescope Compact Array), confirmaram a existência dessa linha e mostraram que a absorção estava centrada na região da componente NE.

Wiklind e Combes em 1995 observaram PKS 1830-211 com o SEST (Swedish-ESO Submillimeter Telescope) e detectaram características de absorção por diferentes moléculas, dentre elas,  $\text{HCO}^+$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{HNC}$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ ,  $\text{CS}$  e  $\text{N}_2\text{H}^+$  (GERIN et al. 1997) resultando num desvio para o vermelho de 0,886. De acordo com Wiklind e Combes (1996) o gás responsável pela absorção encobre somente a componente SE da fonte, sugerindo que esta se situaria mais próxima ao centro da galáxia absorvedora. Isso é consistente com o modelo de Nair, Narashima e Rao de 1993 e com a ordem de grandeza das variações de densidade de fluxo correlacionadas nas duas componentes, conforme detectado por (OMMEN et al. 1995). Sendo assim, e considerando-se que a galáxia-lente tenha o tamanho de 1'' de arco (centro coincidente com a imagem SE e raio igual à distância entre as duas imagens), chega-se a um raio de  $10 \text{ kpc}^4$  (o diâmetro da Via-Láctea é de 50kpc) a um  $z$  de 0,886. Portanto, não seria possível que um único objeto fosse responsável pelos dois distintos desvios para o vermelho. Então, dois objetos ao longo da linha de visada, de um a quatro vezes e meia mais distante que o outro.

(OMMEN et al. 1995) identificaram um atraso de  $44 \pm 9$  dias entre variações na densidade de fluxo, correlacionada entre as duas imagens. Inserindo esse valor de atraso no modelo de lente única de Mathur (1997), Narashima (2002) e Rao (1988) associado

---

<sup>4</sup> *Parsec(pc)* é unidade de medida de distância com valor  $3.08567758 \times 10^{16}$  m, cuja a parallaxe anual média tenha valor de um segundo de arco. Neste caso o valor é ligeiramente maior pois trata-se do *Kiloparsec (kpc)*, sendo então,  $3.08567758 \times 10^{19}$  m.

ao  $z^5$  da lente de 0,886 identificado por Wiklind e Combes, o desvio para o vermelho do *quasar* se situaria entre 1,5 e 2,4 (com  $H_0 = 50 \text{ km}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ,  $q_0 = 0,5$ ).

Através do programa de observações *ROSAT* All Sky Survey, Mathur e Nair (1997) obtiveram dados em raios-X e estimaram o índice espectral do *quasar* PKS1830-211 na banda óptico-raios-X em  $\alpha_{\text{OX}} = 0,87$  para um  $z$  de 1,5 supondo uma densidade de fluxo em óptico, um pouco abaixo do limite de detecção a  $5,7^0$  do plano galáctico.

#### 4.2.3 ANÁLISE DA CURVA DE LUZ DE PKS 1830-211

Com o auxílio do gráfico disponibilizado pelo observatório de Michigan (Figura 1), poderemos então expor uma análise do comportamento da fonte.

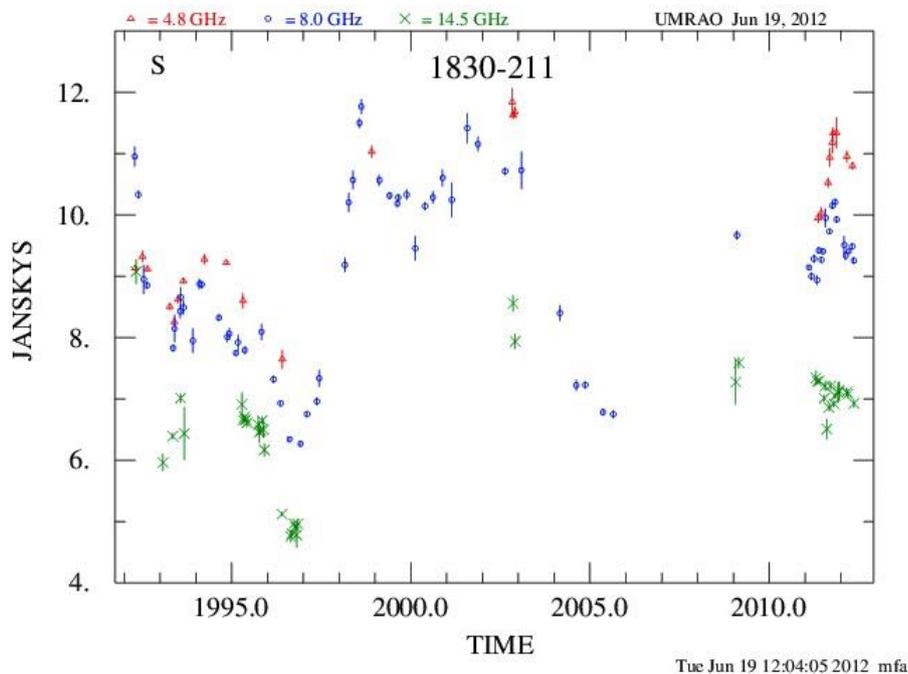


Figura 1: Comportamento das curvas de luz de PKS 1830-211

A análise será feita levando em conta as três frequências da fonte: 4,8GHz, 8,0GHz e 14,5GHz em um gráfico de densidade de fluxo em função do tempo de observação. Ao se analisar os pontos de 4,8GHz notou-se 4 picos de máxima atividade ao longo do tempo. O primeiro aconteceu em 1995, o segundo em 1999, o terceiro em 2004 e por fim o último pico em 2012. Já em 8,0GHz nós verificamos muitos pontos a mais e com períodos de máxima em 1994, 1999, 2001, 2004, 2009 e por fim em 2012. Em 14,5 GHz pode-se observar as menores densidades de fluxo o que demonstra uma emissão

<sup>5</sup> "z" é o parâmetro determinante do *redshift*

menor desta frequência. Seus períodos de máxima atividade seguem o padrão de 4,8GHz e 8,0GHz. Em verdade, foi notado comportamento similar nas três frequências, porém o que contrasta entre as frequências é então a densidade de fluxo. Como 8,0GHz detém os maiores valores de densidades de fluxo. Um outro aspecto interessante é que a distribuição dos picos de máxima e mínima atividade demonstrando que realmente a fonte emite nestas três frequências no mesmo intervalo de tempo, de modo bastante igualitário.

Podemos mostrar ainda, um outro gráfico (Figura 1.1) que denota o comportamento de PKS 1830-211 para uma vasta gama de frequências: O espectro de PKS 1830-211. Ainda mais, pode-se notar um comportamento com energias muito maiores (em comparação com baixas frequências) a altas frequências.

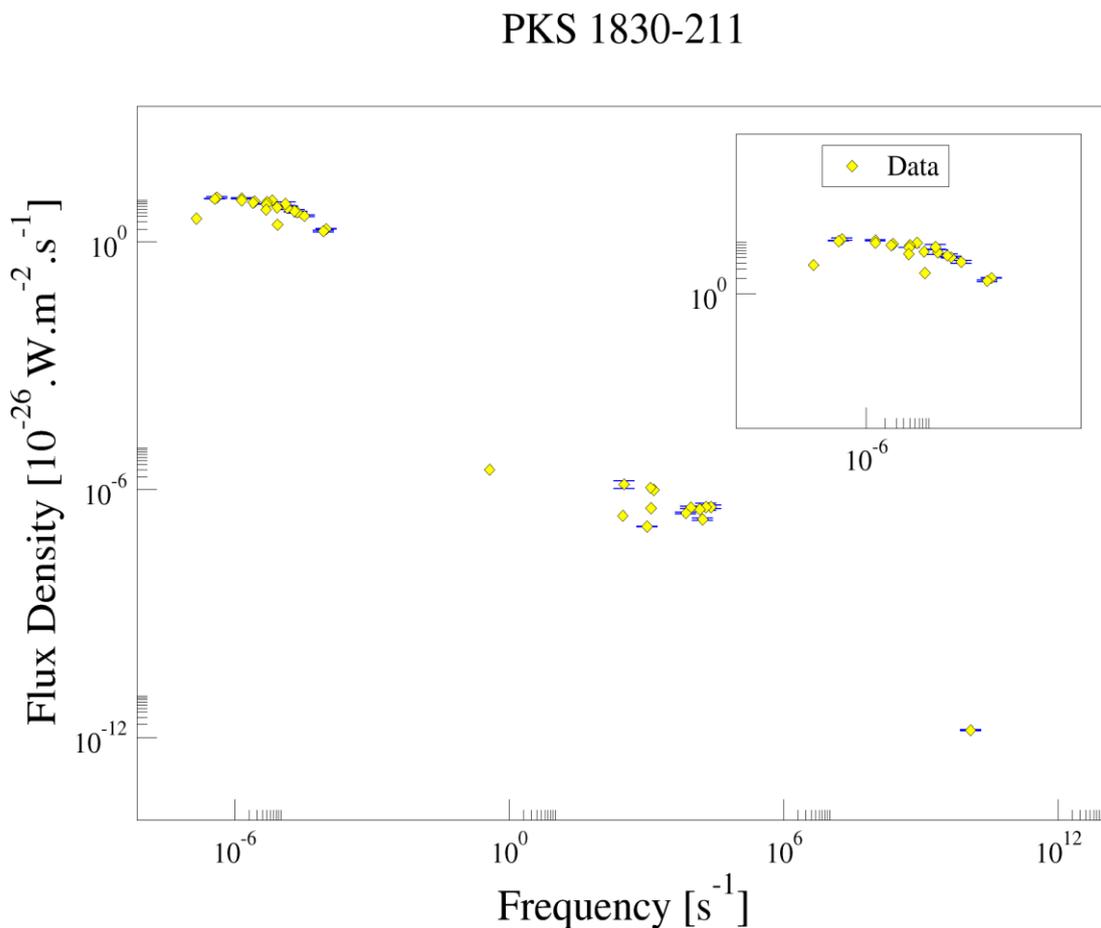


Figura 1.1: Espectro de PKS 1830-211.

A análise do gráfico da Figura 1.1, conta com uma janela onde é possível verificar as energias mais altas com uma ampliação das barras de erro.

## 5 MÉTODOS E O FUNCIONAMENTO DE UM RÁDIO TELESCÓPIO

### 5.1 O CONCEITO DE DENSIDADE DE FLUXO

A densidade de fluxo é um conceito que nasceu da teoria eletromagnética e que ganhou uma grande aplicação em Radioastronomia, pois é pela medida da densidade de fluxo que são construídas, as curvas de luz de um Quasar. Minimamente a intensidade de radiação provinda de fontes extragalácticas ,e outras como o Sol por exemplo, são descritas basicamente pelo fluxo e o brilho.

O Brilho é geralmente utilizado em descrições de fontes extensas utilizando o conceito de Intensidade de Brilho e a densidade de fluxo é utilizada em descrições de fontes discretas. Matematicamente a intensidade de brilho é uma derivada parcial do fluxo de energia  $\partial E$  por unidade de área  $\partial A$  ,unidade de ângulo  $\partial \Omega$  ,unidade de frequência  $\partial \nu$  e uma unidade de tempo  $\partial t$  . Essa derivada nos mostra o quanto de energia que passa por uma abertura com um angulo tal e em quanto tempo, sendo assim tem-se uma descrição que podemos aplicar a qualquer fonte. A derivada parcial é usualmente escrita como:

$$\frac{\partial E}{\partial A \partial \Omega \partial \nu \partial t} = I_{\nu} \quad (5.1)$$

Um fato interessante é que esta derivada não depende da distância, logo pode-se dizer que esta descrição pode ser aplicada a superfície da fonte e a superfície do observador, ou seja, um detector em um radiotelescópio.

Isso quer dizer que a intensidade de brilho  $I_{\nu}$ , pode ser escrita na forma integral, representando uma área, ou seja é integrado a intensidade de brilho  $I_{\nu}$  em relação a sua extensão angular assim tem-se então a densidade de fluxo

$$S = \int I_\nu \partial\Omega \quad (5.2)$$

A unidade de densidade de fluxo é dada em Jansky (Jy).

## 5.2 SOFTWARE DE AQUISIÇÃO

Para a coleta efetiva dos dados, foram utilizados dois computadores; o computador de aquisição de dados e o de rastreamento.

Por meio do computador de rastreamento, pode-se adquirir várias variáveis sobre a fonte. Neste computador também tem-se os programas necessários para o monitoramento da fonte em questão, tais como o tempo sideral, tempo universal, a posição da fonte a distância angular que a antena está da fonte “Position”, o status da antena “Status”, (Figura 2). Pode-se ver também a data completa na tela da janela “Time” (Figura 3). Temos também no programa um sistema que mostra as coordenadas, ascensão reta e declinação (Figura 4 e 5), azimute e elevação (Figura 6) a tela que mostra a conexão entre os dois computadores (Figura 7), os métodos de rastreamento e o tempo de duração de cada varredura (Figura 8). Na (Figura 9) temos todos os parâmetros de controle da antena, como por exemplo o ganho para os motores. Com todos os parâmetros do software de aquisição pode-se então registrar os dados na tabela fornecida pelo rádio observatório.

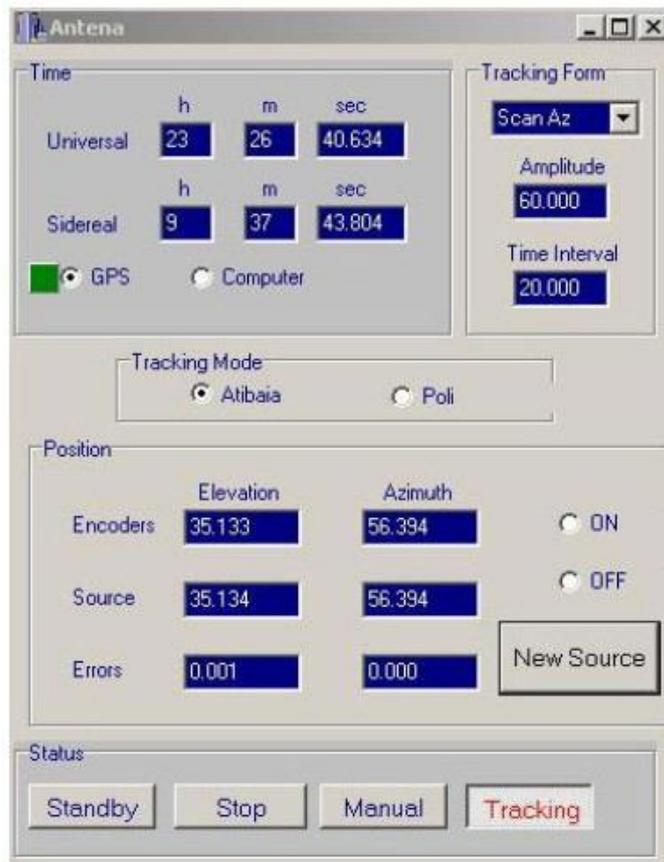


Figura 2: Configuração da antena e status

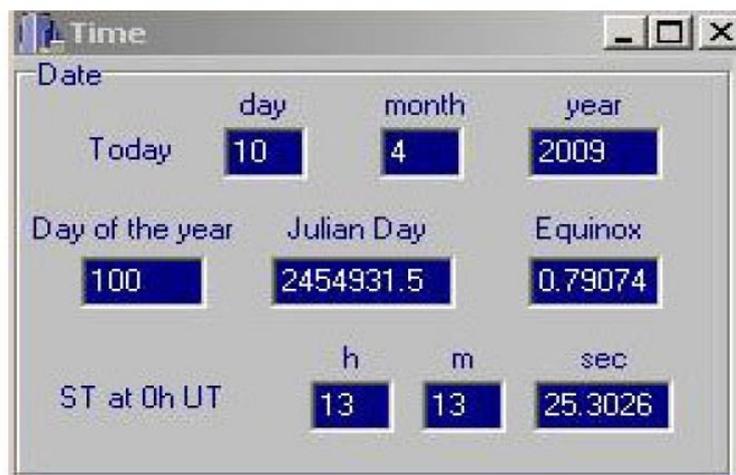


Figura 3: Tempo

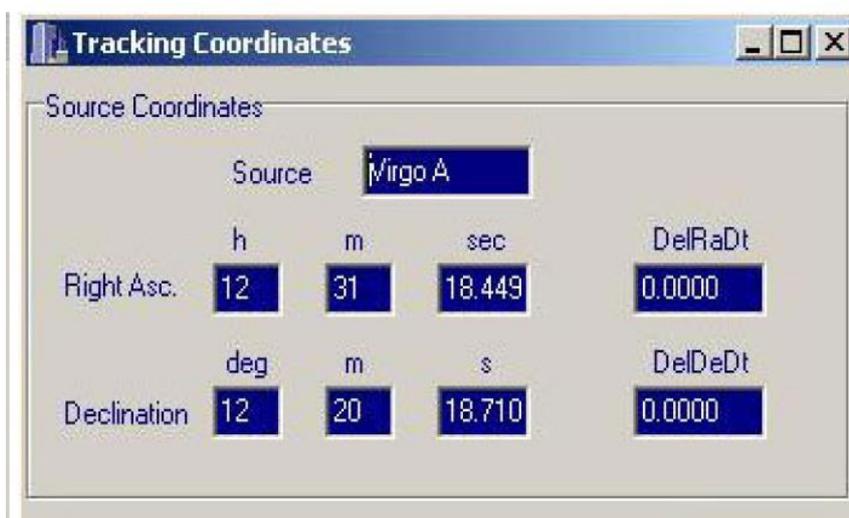


Figura 4:Coordenadas da Fonte

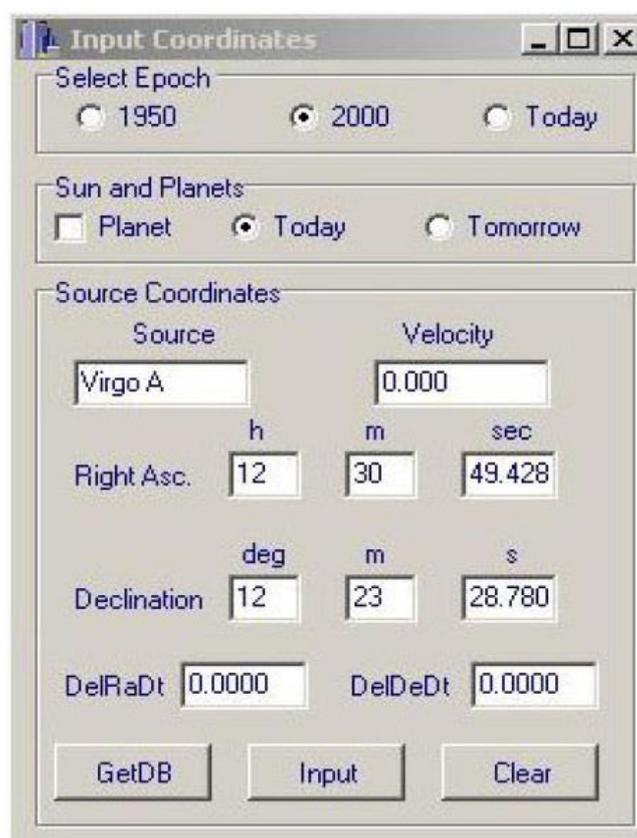


Figura 5: Coordenadas

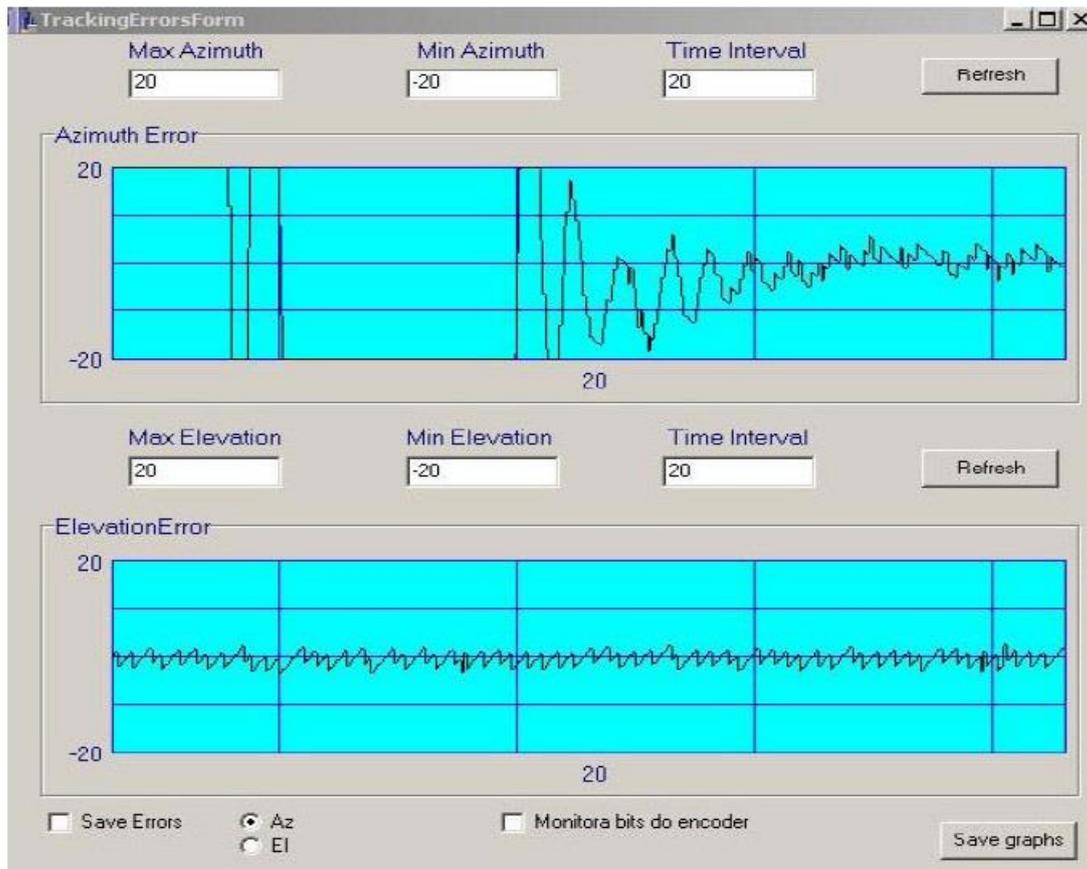


Figura 6: Gráficos de Azimute e Elevação em relação a fonte

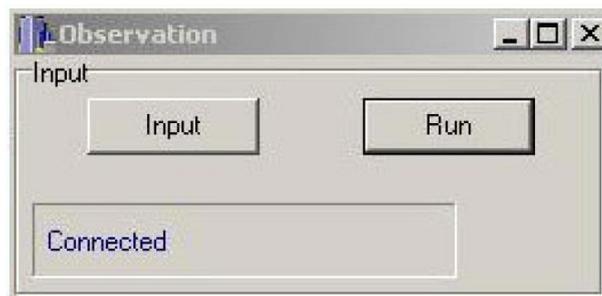


Figura 7: Observação

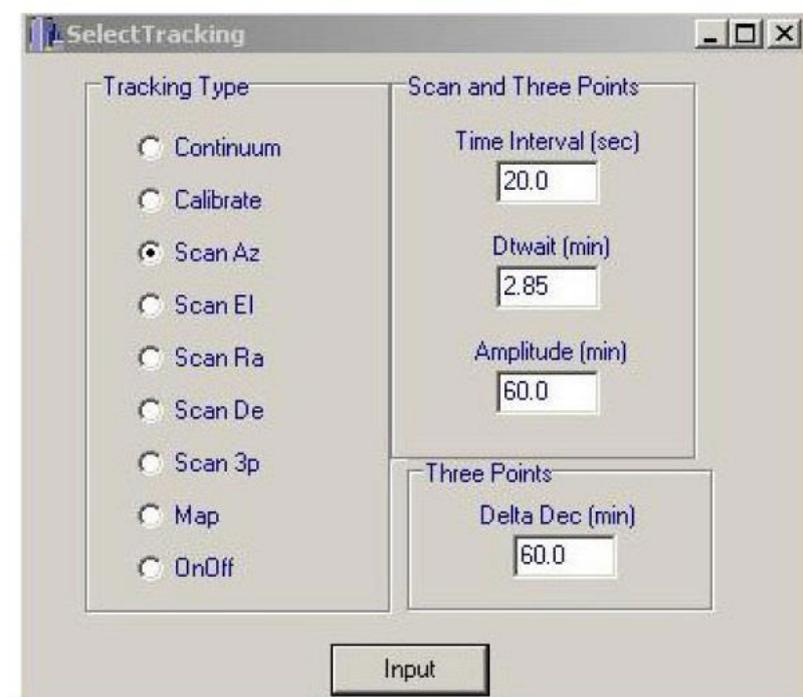


Figura 8: Tipos de Rastreo e Tempo de Duração de cada Varredura

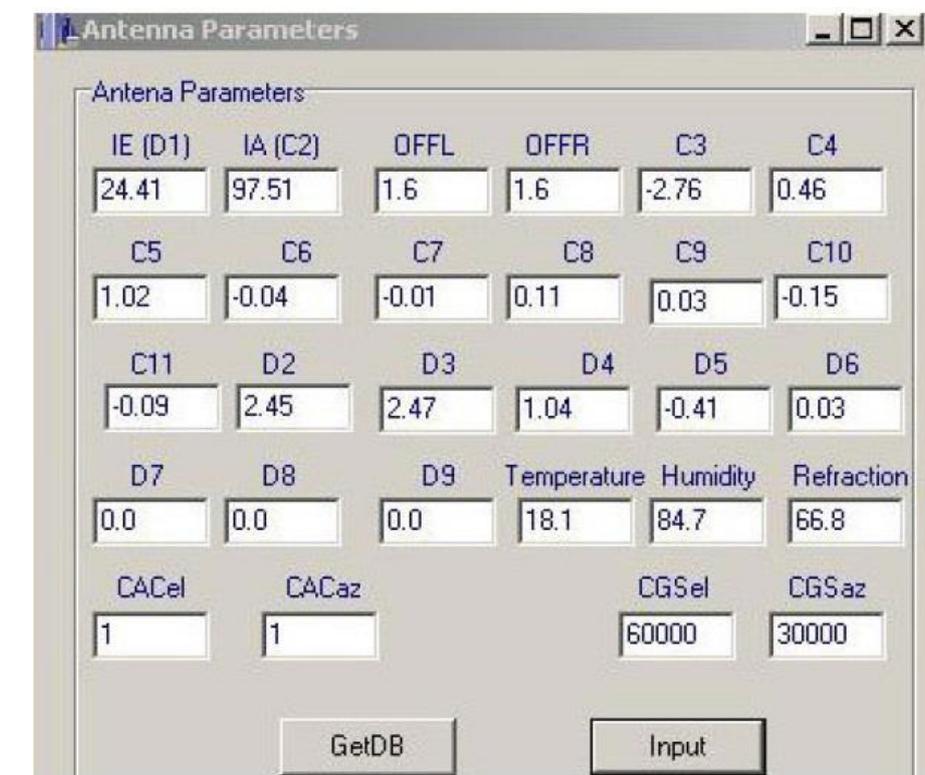


Figura 9: Parâmetros da Antena

A partir do computador de aquisição podemos então inicializar a observação da fonte organizando os dados coletados tanto escritos como digitais.

Antes de começar a observação, é realizada a calibração de ruídos e carga à temperatura ambiente (Figura 10)

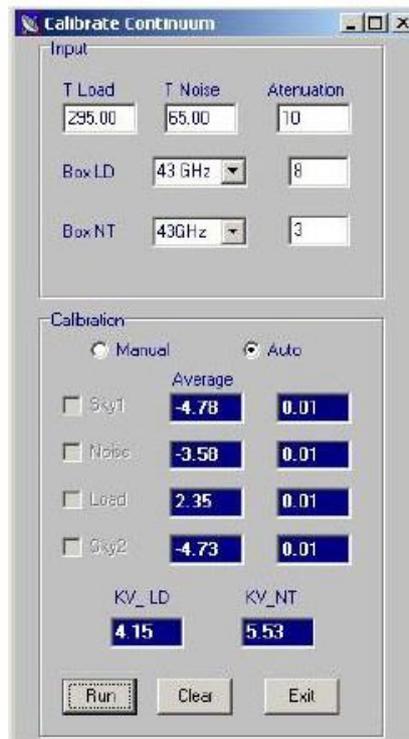


Figura 10 – Calibração.

Quando a observação é iniciada deve-se verificar o nome da fonte, suas coordenadas, a posição da antena em azimute e elevação no momento que realizou o scan, o tempo sideral, as constantes (parâmetros) da antena, o tipo de scan e o tipo de observação (no contínuo) (Figura 11).

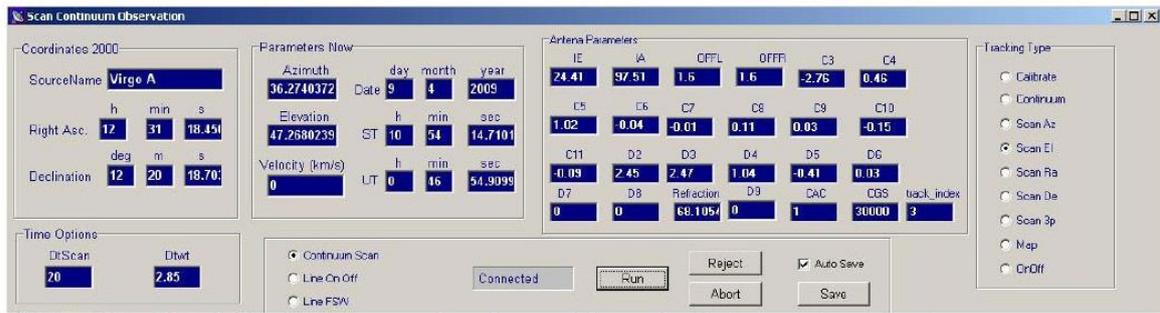


Figura 11 – Parte superior da tela do computador de aquisição de dados.

Por fim, verifica-se o total de scans para cada observação, a posição  $X_0$ , a temperatura máxima  $T_{max}$  e HPMW.

Neste setor pode-se também acompanhar as varreduras já realizadas pela antena. A aba “Average Observation” representa a integração no tempo das observações afim de realizar uma média e construir uma gaussiana no final das observações. (Figura 12)

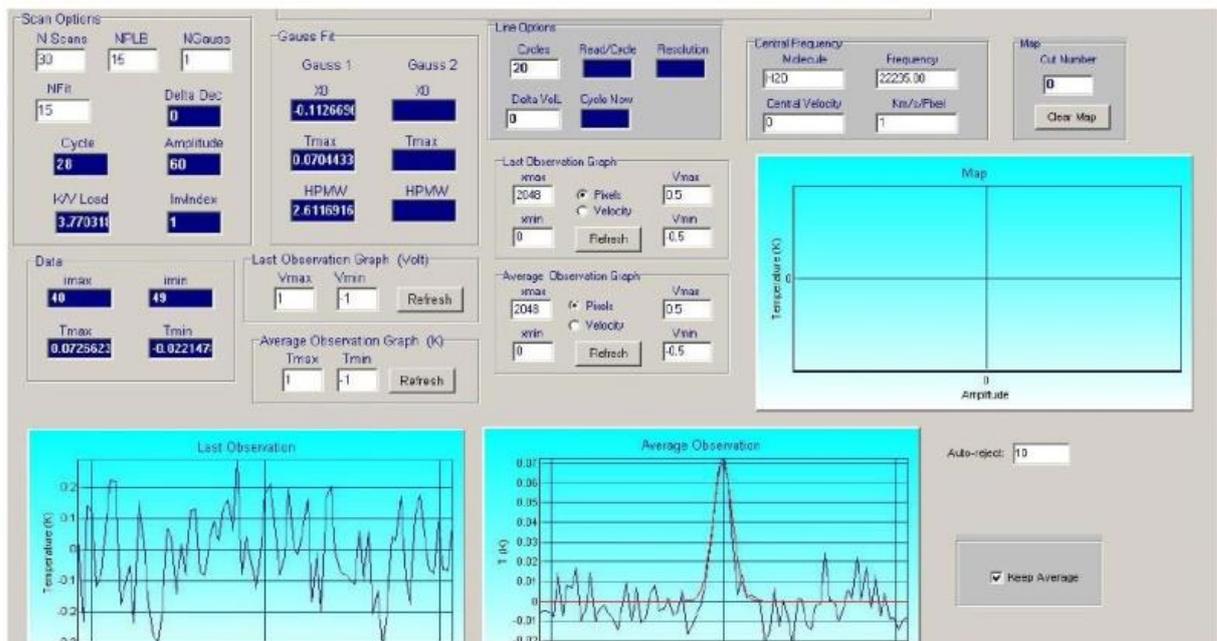


Figura 12 – Parte inferior do computador de aquisição de dados.

## 5.2 MÉTODOS DE COLETA DE DADOS

As observações foram realizadas nas frequências de 22 e 43 GHz, sendo que em 22GHz a largura do feixe à meia potência é cerca de 4,2', com amplitude de 60' e em 43 GHz a largura do feixe à meia potência é cerca 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).

## 6 RÁDIO OBSERVATÓRIO DO ITAPETINGA

O Rádio-observatório do Itapetinga (ROI) foi inaugurado em 1974 na cidade de Atibaia, interior da cidade de São Paulo.

O Rádio-observatório conta com uma estrutura completa para aquisição e tratamento de dados de experimentos observacionais tanto em Rádioastronomia quanto em experimentos diversos que abrangem várias áreas como física solar e VLF.

O ROI possui uma antena parabólica de 13,7 m de diâmetro e um refletor secundário de 1,10m de diâmetro. A antena é constituída de 72 painéis de alumínio, sendo que 24 constituem o anel interno de 5,3 m de diâmetro e os 48 restantes são externos.

O tipo da montagem do ROI é azimutal com foco Cassegrain. A antena encontra-se no interior de uma redoma (Figura 13) que a protege contra ações externas como ventos e chuva, e promove vantagens para o desempenho da observação como evitar deformações devido à variações de temperatura ; é constituída por 620 painéis triangulares dispostos de uma forma assimétrica.

Ainda sobre a redoma, o material utilizado da membrana é chamado de Esscolam V que é a base de um material chamado Tedlar com espessura de 0,75 mm. No foco da antena encontra-se uma corneta retangular, que desempenha o papel de detectar a componente vertical da polarização. Cada frequência possui uma corneta específica.



Figura 13 – Redoma do ROI

## 7 CONCLUSÃO

As lentes gravitacionais formam um grande laboratório da cosmologia atual. Com o estudo mais aprofundado das lentes gravitacionais pode-se estudar vários pontos importantes para o entendimento do estudo da astrofísica. Além disso, com as perspectivas históricas da Relatividade Geral, pode-se perceber que de fato a possibilidade de observar, quantificar, e descrever modelos de quasares e lentes gravitacionais só foi possível com uma modificação profunda do conceito de espaço e tempo.

Ainda sobre o estudo dos quasares e lentes gravitacionais, estes modelos desempenham um papel importante pois com esse efeito natural é possível estudar não só quasares mas todo uma gama de objetos cósmicos.

A cerca da parte observacional; embora os dados sejam sucintos, no que diz respeito ao entendimento da Cosmologia e até das lentes gravitacionais, esses dados serão vitais para o processo de aprendizado de tratamento dos dados. Foi possível aprender ,no início da iniciação científica, com êxito a manipulação preliminar do manuseio da aparelhagem analógica que controla os motores da antena e a utilização do software de aquisição de dados.

## 8 REFERÊNCIAS

ASIMOV, I. **Cronologia das Ciências e das Descobertas**. 1.ed. Civilização Brasileira: Rio de Janeiro, 1996.

BURKE.F.B; SMITH.G.F. **An Introduction to Radio Astronomy**. 2.ed. Cambridge University Press: Cambridge,1998.

BARCELOS.N.JOÃO. **Matemática para Físicos: Volume 1**. 1.ed. v1. São Paulo: Livraria da Física, 2010.

BOTTI.L. **Estudo da variabilidade e do espectro de radiofontes em 22 e 43**,1990.

DAVID BOHM. **A teoria da Relatividade Restrita**:. 1.ed. São Paulo: Editora Unesp, 2015.

DJORGOVSKI, S.; MEYLAN, G.; KLEMOLA, A.; THOMPSON, D.J.; WEIR, W.N.; SARUP,G.; RAO, A.P.;SUBRAHMANYAN, R. E SMETTE, A. **A search for the**

**optical/IR counterpart of the probable Einstein ring source PKS1830-211.**  
Mon.Not.R.astr.Soc, v.257,p.240-244,1992.

EDDINGTON.A.S; M.A; M.Sc; F.R.S.**Report on the relativity theory of gravitation.**The physical society of London,1920.

GERIN, M.; PHILLIPS, T. G.; BENFORD, D. J.; YOUNG, K.H.; MENTEN, K. M.; FRYE, B. **Redshifted Molecular Absorption Systems toward PKS 1830-211 and B0218+357: Submillimeter CO, C i, and H 20 Data.** Astrophysical Journal Letters, v.488,p.L31,1997.

GREENSTEIN, J. L.; MATTHEWS, THOMAS. A. **Red-Shift of the Unusual Radio Source: 3C 48** Nature,v.197,p.1041-1042, 1963

JAUNCEY,D.L. et al. **An unusually strong Einstein ring in the radio source PKS1830–211.** Nature, v.352,p.132,1991.

KNUDSSEN.J.M. **Elements of Newtonian Mechanics.**2ed.Editora Springer, 1995.

LINDMAN, C. ; COURBIN, F. ; MEYLAN, G. ; BROADHURST, T. ; FRYE, B.;WELCH,W.J.W.,**A redshift of the gravitationally lensed radio source PKS 1830-211** ,Ap.J., v.514,p.L57,1999.

LOVELL, J. E. J.; REYNOLDS, J. E.; JAUNCEY, D. L.; BACKUS, P. R.; MCCULLOCH, P. M.; SINCLAIR, M. W.; WILSON, W. E.; TZIOUMIS, A. K.; KING, E. A.; GOUGH, R. G.; ELLINGSEN, S. P.; PHILLIPS, C. J.; PRESTON, R. A.; JONES, D. L. **PKS 1830-211: A Possible Compound Gravitational Lens,** Astrophysical Journal Letters, v.472,p.L5,1996.

MATHUR, S.; NAIR, S. **X-Ray Absorption toward the Einstein Ring Source PKS 1830-211,** Astrophysical Journal, v.484,p.140,1997.

MARTINS.A.ROBERTO. **A Origem Histórica da Relatividade Especial.** 1.ed. São Paulo: Livraria da Física, 2015.

NARASHIMA, D.; KANEKAR, N.;CHENGALUR, J.N. **Tracking the Shadows through GMRT**, J. Astrophys. Astr, v.23,p.165-171,2002.

NUSSENSZVEIG.M.H. **Curso de Física Básica: Mecânica**. 5.ed.v1.Editora Blücher, 2013.

OMMEN, T. D.; JONES, D. L.; PRESTON, R. A.; JAUNCEY, D. L. **Time delay in the Einstein ring PKS 1830-211**. Astrophysical Journal, Part 1, v.444,n. 2,p.561-566,1995.

RAO, A.P. SUBRAHMANYAN,R. **1830-211 - A flat-spectrum radio source with double structure**. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (MNRAS), v.231,p. 229-236,1988.

SCHNEIDER.P; EHLERS.J; FALCO.E.E. **Gravitational Lenses**. 2.ed. Springer, p.41-89,1999.

STILLMAN.D. **Galileo:Two New Sciences**. 2.ed.University of Wisconsin Press,1974.

SUBRAHMANYAN, R.; NARASIMHA, D.; PRAMESH-RAO, A.; SWARUP, G. R. **Gravitational lensed images of a flat-spectrum radio core** ,Mon. Not.R.astr.Soc., v.246,n.2,p.263,1990.

WALSH.D ; CARSWELL R. F ; WEYMANN R. J. **0957 + 561 A, B: twin quasi-stellar objects or gravitational lens?**, Nature, v.279, p.381-384,1979.