Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Claikson Benedito

Curvas de luz do núcleo de Centaurus A em raios-X e em 43 GHz

São Paulo
2021

Claikson Benedito

Curvas de luz do núcleo de Centaurus A em raios-X e em 43 GHz

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica
Orientadora: Prof.ª Dr.ª Zulema Abraham

São Paulo

2021

Dedico esse trabalho às vítimas da pandemia mundial de Covid-19. Em especial, a todos os trabalhadores e trabalhadoras que morreram ou tiveram familiares mortos por terem que sair de suas casas para exercer sua atividade laboral.

Agradecimentos

À Isabel, minha mãe;

Aos amigos da vida toda: Alfredo Henrique, Gabriel Carlos, Julio César, Erik Ernani, Rubem Guevara, Gabriel Mourad e Leonardo Quarties;

Aos amigos do CRUSP: Pedro Campos, Felipe Manoel, Jean Michael, Fernanda Rodrigues, Juliana Aparecida e Gustavo Salmazo;

À orientadora Professora Zulema Abraham;

Aos Professores Vito Vanin, André Machado, Susana Salém e Cecil Chow do Laboratório de Demonstrações do IF-USP;

E ao PAPFE (Programa de Apoio à Permanência e Formação Estudantil) da Universidade de São Paulo.

Esta tese/dissertação foi escrita em LaTeX com a classe IAGTESE, para teses e dissertações do IAG.

"*Somos como borboletas que voam por um dia e acham que é para sempre.*"

Carl Sagan

"*Levante a cabeça truta, onde estiver seja lá onde for*
Tenha fé porque até no lixão nasce flor"

Pedro Paulo Soares Pereira (Mano Brown)

Resumo

Centaurus A é uma rádio galáxia, portanto uma *Active Galactic Nucleus* (AGN). CenA tem um espectro que estende-se das radiofrequências até os raios-X e γ. Tem também uma buraco negro super massivo em seu núcleo ($5,5 \times 10^7\ M_\odot$) e um par de jato e contra jato muito colimado que se estendem até o meio intergaláctico. Usando dados de raio-X obtidos e disponibilizados pelas equipes do ASM/RXTE (*All Sky Monitor/Rossi X-ray Timing Explorer*) em um catálogo de domínio público, fizemos as curvas de luz de Centaurus A do ano de 1996 até o ano de 2011 para a média de 7, 10 e 14 dias consecutivos. Fizemos também a curva de luz de Centaurus A com os dados de radiofrequência de 43 GHz obtidos no Rádio Observatório de Itapetininga, em Atibaia, com uma antena de 13,7 metros de diâmetros. Os dados foram coletados entre os anos de 2003 e 2013. Para comparação, construímos um gráfico com os dados de raio-X (média de 14 dias) e de 43 GHz onde percebemos que existia um comportamento parecido em ambas as curvas de luz, principalmente entre meados de 2007 e 2009. Para confirmar essa correlação, fizemos a DCF (*Discrete Correlation Function*) dessas duas séries temporais com dados irregularmente distribuídos no tempo. Nessa DCF ajustamos uma curva gaussiana que nos forneceu uma valor para o pico mais proeminente de -5 dias com desvio padrão de 75 dias e uma coeficiente de correlação de $0,290 \pm 0,002$. Portanto concluímos que há uma correlação entre os sinais de radiofrequência de 43 GHz e de raio-X (1,5 - 12 keV) vindos do núcleo de Centaurus A e que o sinal de rádio está atrasado em aproximadamente 5 dias em relação ao sinal de raio-X.

Abstract

Centaurus A (CenA) is a radio galaxy and, therefore, an Active Galactic Nucleus (AGN). CenA's spectrum extends itself from the radiofrequencies to the X-ray and γ. CenA's contains a supermassive black hole inside its nucleus ($5,5 \times 10^7\ M_\odot$) and a jet and counterjet highly collimated that goes along the intergalactic environment. Through the X-ray data collected and shared by the ASM/RXTE (All Sky Monitor/Rossi X-ray Timing Explorer) team via a public domain catalog, we have made CenA's light curves from 1996 to 2011 considering a 7, 10 and 14 consecutive days average. Also, we have made CenA's light curve with the 43 GHz radiofrequency data obtained from Itapetininga Radio Observatory, Atibaia/Brazil, which antenna diameter is 13,7 m. We collected the data between 2003 and 2013 and we built an X-ray data graphic (average of 14 days) with 43 GHz for comparison, where we found out that was an equal behavior between both light curves - mainly between 2007 and 2009. To confirm this correlation, we have done a DCF (Discrete Correlation Function) between these temporal series with unevenly distributed data through time. On DCF, we adjusted the gaussian curve that gave us the value for most outstanding peak, -5 days with 75 days standard deviation and correlation coefficient of $0,290 \pm 0,002$. Therefore, we have concluded that there is a correlation between the radiofrequency signs of 43 GHz and X-ray (1,5 - 12 keV) that comes from CenA's nucleus and that its radio signal has a delay of, approximately, 5 days in relation to the X-ray signal.

Lista de Figuras

1.1 Centaurus A em rádio (submilimétrico), óptico e raio-X 18

2.1 Curvas de luz com os dados do ASM/RXTE 23
2.2 Imagem de Centaurus A com o esquema da coleta dos dados em 43 GHz . 24
2.3 Curva de luz com os dados do Rádio Observatório Pierre Kaufmann 25

3.1 Curvas de luz com os dados do ASM/RXTE e do Rádio Observatório Pierre Kaufmann 27
3.2 *Discrete Correlation Function* para as séries de dados em 43 GHz e em raio-X. 28
3.3 *Discrete Correlation Function* com o ajuste de função gaussiana 29

Sumário

1. Introdução 17

2. Dados e Metodologia 21

2.1 Dados em raio-X 21

2.2 Dados em radiofrequência de 43 GHz 22

3. Análise 27

4. Conclusões 31

Referências 33

Capítulo 1

Introdução

Uma AGN (*Active Galactic Nucleus*) é um tipo de galáxia que tem uma região muito pequena no centro muito mais luminosa que todo o resto da galáxia. A *Spectral Energy Distribution* (SED) de uma AGN é conhecida por ser muito larga indo do rádio ao raio-X e por ter muitas linhas de emissão na região do óptico e do ultravioleta. A luminosidade desse núcleo compacto é devido à radiação não térmica, onde a radiação em rádio é de origem síncroton e a radiação em raio-X é originada do processo Compton inverso. Segundo o modelo unificado para as AGN's, esses objetos têm um buraco negro super massivo em seus núcleos com um disco de acreção muito brilhante, um disco de poeira opaco em volta do núcleo e pares de jatos de partículas carregadas e relativísticas muito colimados que se estendem até o meio intergaláctico. Quando se chocam com o meio intergaláctico, esses jatos geram grandes lóbulos que emitem fortemente em rádio. Por fim as AGN's são classificadas no modelo unificado segundo o ângulo entre a nossa linha de visada e a direção de um dos jatos de partículas (Mo et al., 2010).

Centaurus A, ou NGC 5128, é uma galáxia elíptica E0 massiva e a radiogaláxia mais próxima da Terra, tendo uma distância de $3,84 \pm 0,35$ Mpc (Rejkuba , 2004). Radiogaláxia é um tipo de AGN onde o ângulo entre a linha de visada e um dos feixes de partículas é de $\sim 90°$. Por causa da sua moderada luminosidade em radiofrequência, Centaurus A pode ser classificada como uma radiogaláxia *Fanaroff-Riley type I* (FR I) (Fanaroff et al., 1974) ou uma AGN *radio-loud*. Sua SED estende-se das frequências de rádio aos raios-γ passando por emissões de raio-X. Sabe-se também que as emissões tanto em rádio como em raio-X tem uma alta variabilidade tendo oscilações na escala de dias, meses e anos (Botti et al., 1993).

Estima-se que no núcleo de NGC 5128 haja um buraco negro de $5,5 \times 10^7$ $M_\odot$ (Häring-

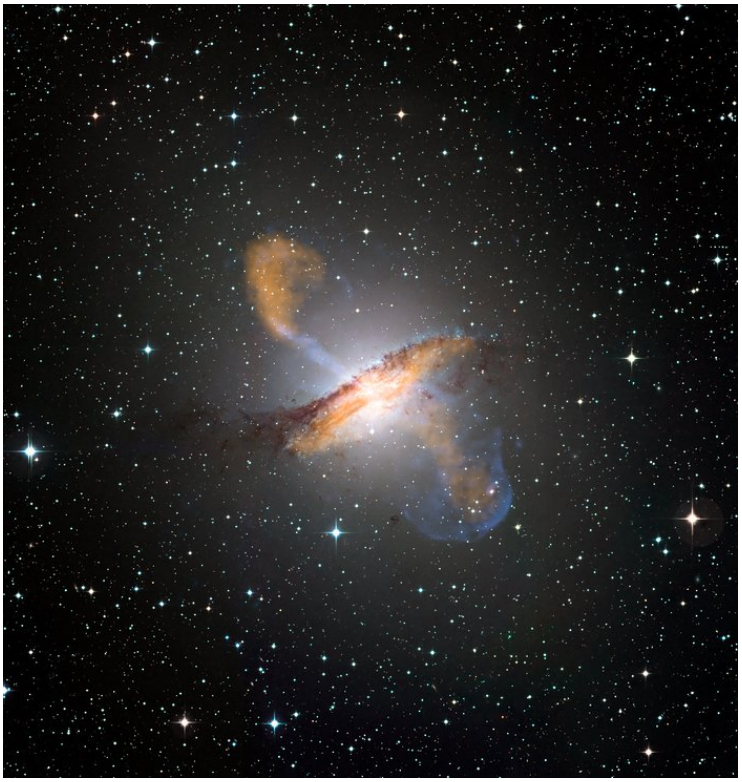


Figura 1.1: Imagem composta de Centaurus A. As partes alaranjadas da imagens foram feitas em rádio, as azuladas em raio-X e os outros detalhes, como os pontos luminosos, foram feitos em óptico. Crédito: ESO/WFI (Optical); MPIfR/ESO/APEX/A.Weiss et al. (Submillimetre); NASA/CXC/CfA/R.Kraft et al. (X-ray)

Neumayer et al., 2006). Usando a *very-long-baseline interferometry* (VLBI), o *Event Horizon Telescope* (EHT) fez a imagem com maior resolução atual do núcleo e dos jatos de Cen A, com 25 μas de resolução. Com essa imagem, os autores do estudo puderam ver com detalhes a estrutura interna de Centaurus A e estimar onde está o vértice dos jatos e a possível posição do buraco negro super massivo (Janssen et al., 2021). Os autores desse mesmo estudo concluíram também que a sombra do horizonte de eventos do buraco negro no centro desse objeto poderá ser vista em medições em frequência de THz (terahertz). Nosso objeto celeste tem também uma faixa de poeira na região do plano equatorial que bloqueia a luz visível (Israel , 2006) e contamina a radiação infravermelha vinda do núcleo (Lépine et al., 1984). Por fim, este objeto apresenta um jato e um contra jato de partículas carregadas e relativísticas muito colimado e com assimetria de brilho um em relação ao outro (Janssen et al., 2021). Por causa desse par de feixes de partículas, Cen A tem 3 rádio lóbulos com distâncias na escala de kpc (Cooper et al., 1965). Na Figura 1.1, vemos uma imagem de Centaurus A em óptico, submilimétrico e raio-X.

Neste trabalho propomos construir as curvas de luz do núcleo de Centaurus A em raio-X e radiofrequência de 43 GHz e verificar se existe alguma correlação entre esses dois sinais como indicado por Abraham et al. (2007). Faremos também uma análise estatística mais robusta para tentar confirmar essa correlação similar ao que Davids et al. (2019) fez para os sinais de raio-X e raios-γ de Cen A. No Capítulo 2, apresentaremos como foram obtidos e tradados os dados em raio-X e 43 GHz.

Capítulo 2

Dados e Metodologia

2.1 Dados em raio-X

Os dados de raio-X deste trabalho foram fornecidos pelas equipes ASM/RXTE no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) e no RXTE SOF (*Science Operations Facility*) e GOF (*Guest Observer Facility*) no GSFC (*Goddard Space Flight Center*) da NASA (*Nacional Aeronautics and Space Administration*). No *site*[1] mantido por essas equipes há um grande catálogo de objetos celestes fontes de raio-X, que inclui Centaurus A. O *site* fornece também as curvas de luz de cada objeto feitas durante os anos de operação da missão RXTE (1996 até 2011). Neste trabalho foram usados os dados que representam a média das contagens de um dia (*"One-Day Averages"*): dias (em Dias Julianos), as respectivas médias de intensidades (em contagens por segundo) e estimativas dos erros por RMS (*root mean square*). Os dados vieram em 4 conjunto caracterizados pelo intervalo de energia dos fótons: Somas das Bandas (1,5 - 12 keV), Banda A (1,5 - 3 keV), Banda B (3 - 5 keV) e Banda C (5 - 12 keV) (Levine et al., 1996).

Para o trabalho, utilizamos apenas os dados do conjunto Soma das Bandas. Futuramente vamos repetir esta análise para as outras faixas de energia. Primeiro calculamos os pesos que usamos posteriormente nas médias das intensidades. Os pesos foram calculados como sendo o inverso das incertezas originais ao quadrado. A média das intensidades foi feita com conjuntos de 14, 10 e 7 intensidades consecutivas e ponderada pelos respectivos pesos calculados. A incerteza de cada média ponderada foi calculada como sendo a raiz quadrada do inverso da somas dos pesos do intervalo em questão. Por último, a data que representa cada média ponderada foi escolhida como sendo a data que fica no meio do

[1] http://xte.mit.edu/

intervalo onde a média das intensidades foi calculada. Calculamos também cada uma das datas escolhidas em anos gregorianos. Com essas datas e valores, construímos os gráficos da Figura 2.1.

Observamos em todos os gráficos da Figura 2.1 uma variação global do fluxo em raio-X. Há uma região de baixo fluxo, $\sim 0,5$ cts/s, de 53000 até 54300 JD (2004 até 2007). E regiões de alto fluxo, uma de 51300 até 53000 JD (1999 até 2004) com $\sim 0,7$ cts/s e outra de 54300 até 55500 DJ (2007 até meados de 2010) com $\sim 1,0$ cts/s.

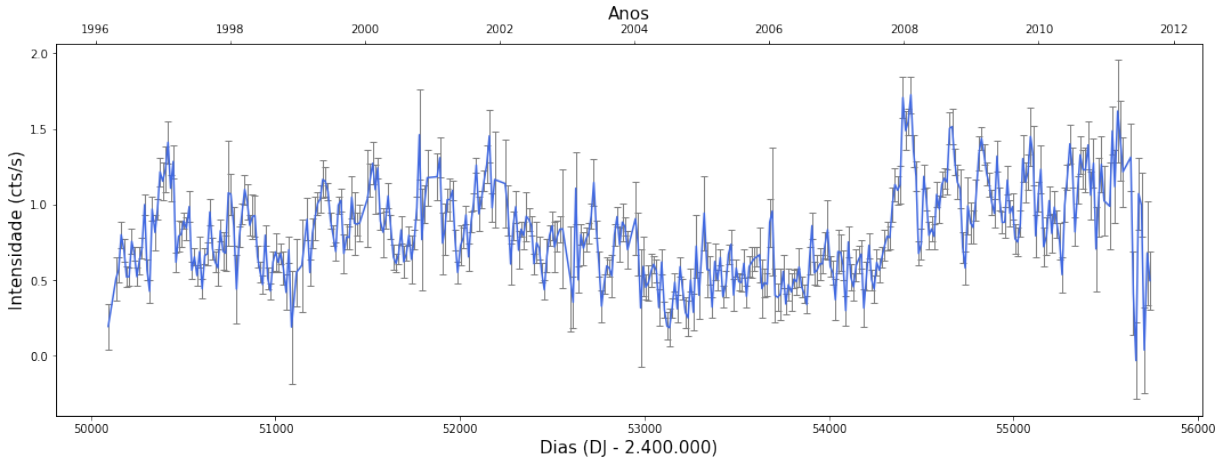
Note que em todos os gráficos os últimos valores, a partir de meados de 2010, têm uma variação e incertezas muito grande. Esse comportamento é nítido mesmo depois do tratamento dos dados, onde retiramos as médias ponderadas de intensidade que tinham incertezas maiores que a média das incertezas de toda a amostra. Atribuímos esse fato à medidas imprecisas feitas pelos equipamentos durante seus últimos dias da missão. Nesse período, notamos pelos dados retirados diretamente do *survey* que muitos dias não tiveram medições e os dias que tiveram ambos a intensidade e o erro eram muito maiores que o comum, chegando a valores 8 vezes maior.

Outro fato importante a ser percebido é que as curvas de luz ficam mais sensíveis a essas medidas inconsistentes quanto menor é o número de dados usados para fazer a média ponderada e o cálculo das incertezas. Por isso o gráfico com média de 14 dias (Figura 2.1a) não tem tantos picos e incertezas tão grandes quanto o gráfico com médias de 7 dias (Figura 2.1c).

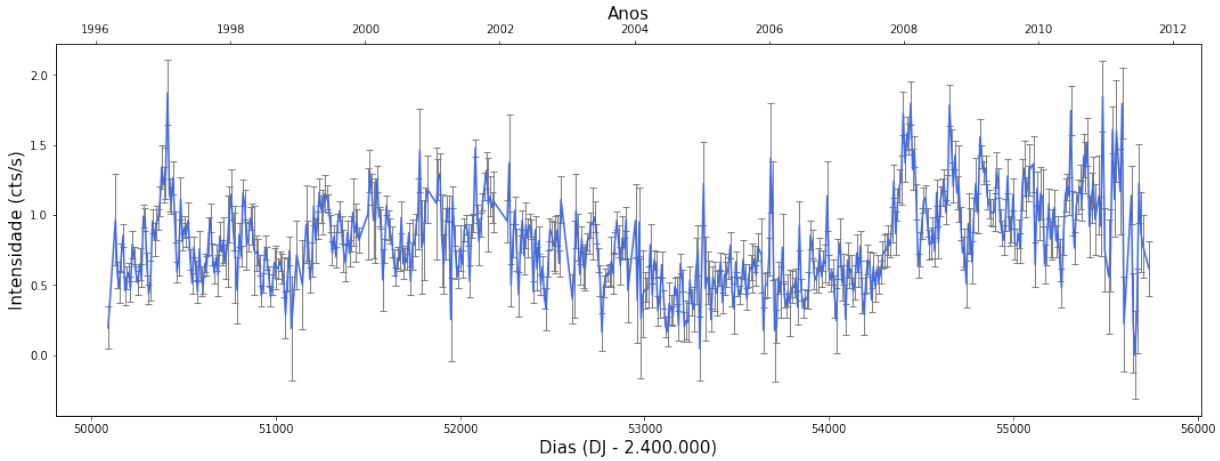
2.2 Dados em radiofrequência de 43 GHz

Os dados de radiofrequência utilizados neste trabalho foram coletados no Rádio Observatório de Itapetininga (ROI), atualmente Rádio Observatório Pierre Kaufmann, em Atibaia. As medidas foram feitas com um radiotelescópio de 13,7 metros de diâmetro e com um receptor de 43 GHz. Os dados foram coletados de meados de 2003 até meados de 2013. Apenas os dados de 2003 até 2004 foram publicados (Abraham et al., 2007), o restante será publicado ao término deste trabalho.

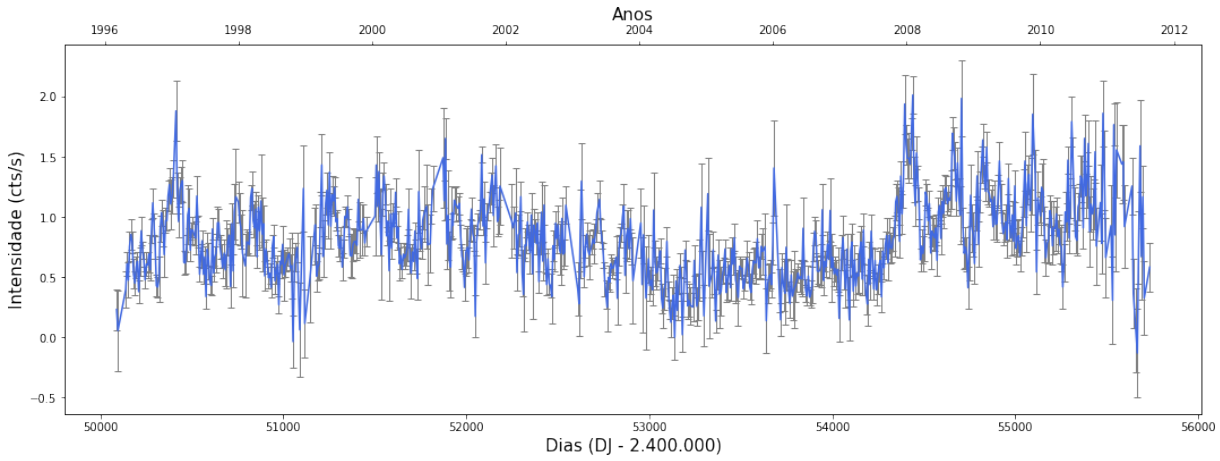
A observação foi feita de tal forma que a antena varre uma região com comprimento de 20 minutos de arco durante 20 s, fazendo 81 medidas igualmente espaçadas durante todo o percurso com um tempo de integração de 1/6 s por ponto medido. Esse processo



(a) Gráfico feito com a média ponderada da intensidade de 14 dias consecutivos.



(b) Gráfico feito com a média ponderada da intensidade de 10 dias consecutivos.



(c) Gráfico feito com a média ponderada da intensidade de 7 dias consecutivos.

Figura 2.1: Curvas de luz feitas com os dados fornecidos pelo ASM/RXTE. As intensidades são dadas em contagens por segundo, os dias em Dias Julianos (eixo horizontal inferior) e os anos em Anos Gregorianos (eixo horizontal superior).

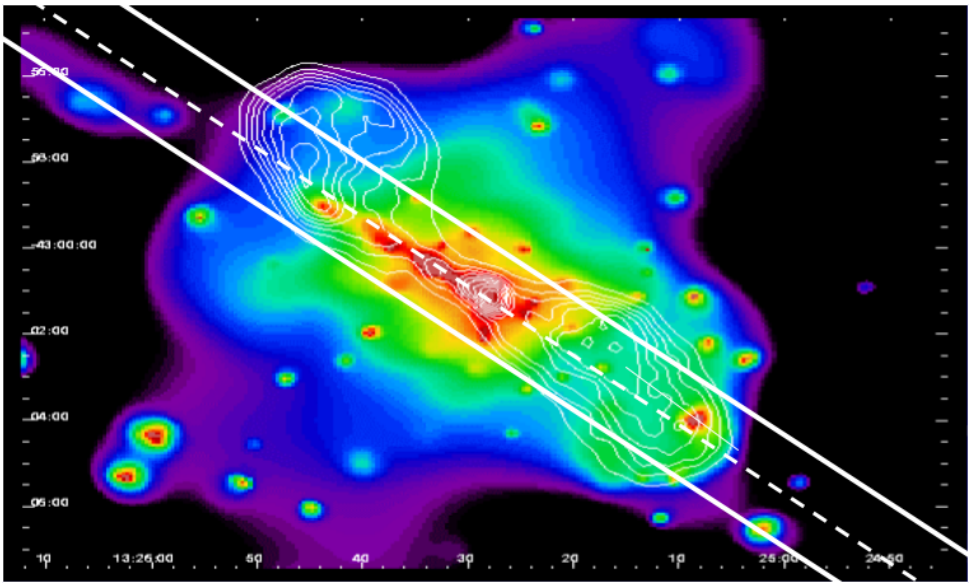


Figura 2.2: Imagem de Centaurus A mostrando o tamanho do *beam* da antena do radiotelescópio de Atibaia (distância entre as linhas brancas continuas) e a direção em que as medidas foram feitas (linha branca tracejada). Os contornos em branco foram feitas pelo VLA (*Very Large Array*) em radiofrequência. E as curvas de nível coloridas são dados do XMM (*X-ray Multi-Mirror*) em raio-X.

foi repetido cerca de 300 vezes por dia, dando um tempo de integração total de 50 s por ponto. A varredura feita pelo radiotelescópio passava tanto pelo núcleo como pelos dois lóbulos mais internos de Cen A (Figura 2.2). Isso foi muito importante, pois permitia que a medições do núcleo fossem calibradas em relação aos rádio lóbulos vizinhos, driblando os efeitos atenuantes causados pela atmosfera (Abraham et al., 2007). Assim, com a média da intensidade de cada dia feita no ROI, fizemos a curva de luz de Centaurus A em radiofrequência de 43 GHz (Figura 2.3).

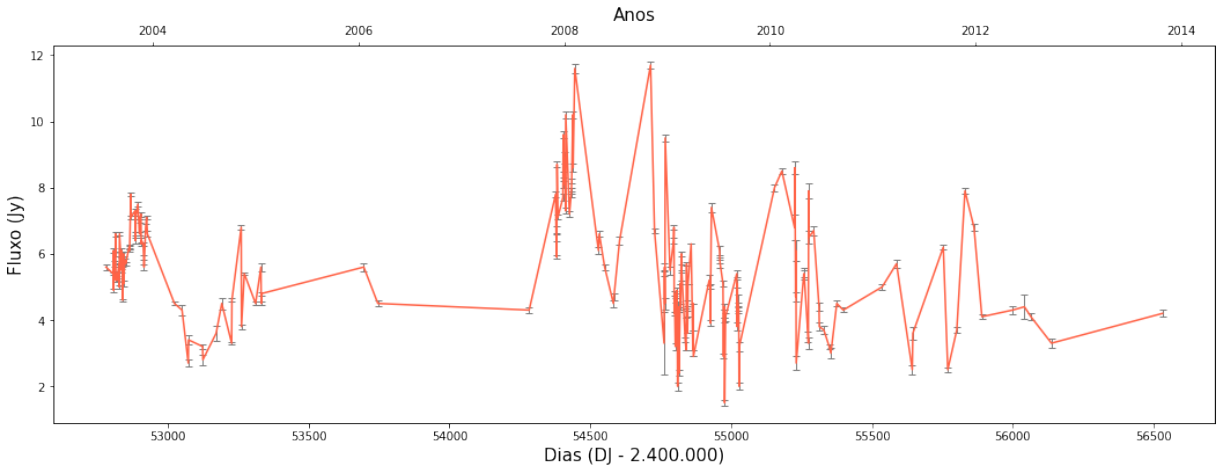


Figura 2.3: Curva de luz feita com os dados coletados no Rádio Observatório Pierre Kaufmann. O fluxo é dado em Jansky (Jy), os dias em Dias Julianos (eixo horizontal inferior) e os anos em Anos Gregorianos (eixo horizontal superior).

Na curva de luz da Figura 2.3, é importante notar que nas regiões entre 53000 e 54400 JD (2004 até meados de 2007) e entre 55500 e 56500 JD (2011 até meados de 2013) foram feitas poucas medições de 43GHz. Apesar da falta de dados consecutivos em nessas partes da curva, podemos identificar uma região de alta intensidade, ~ 9 Jy, de 54400 até 54800 JD (de meados de 2007 à 2009). E duas regiões de baixa intensidade, ~ 5 Jy, uma entre 53000 e 54400 JD (2004 até meados de 2007) e outra entre 54800 e 56500 JD (de 2009 até meados de 2013). No Capítulo 3, faremos uma análise comparativa entre as duas séries temporais apresentadas e falaremos sobre os possíveis caminhos para a continuação desse estudo.

Capítulo 3

Análise

Utilizando os mesmos dados da curva de luz da Figura 2.1a e os mesmo dados de rádio descritos na Seção 2.2, construímos o gráfico da Figura 3.1:

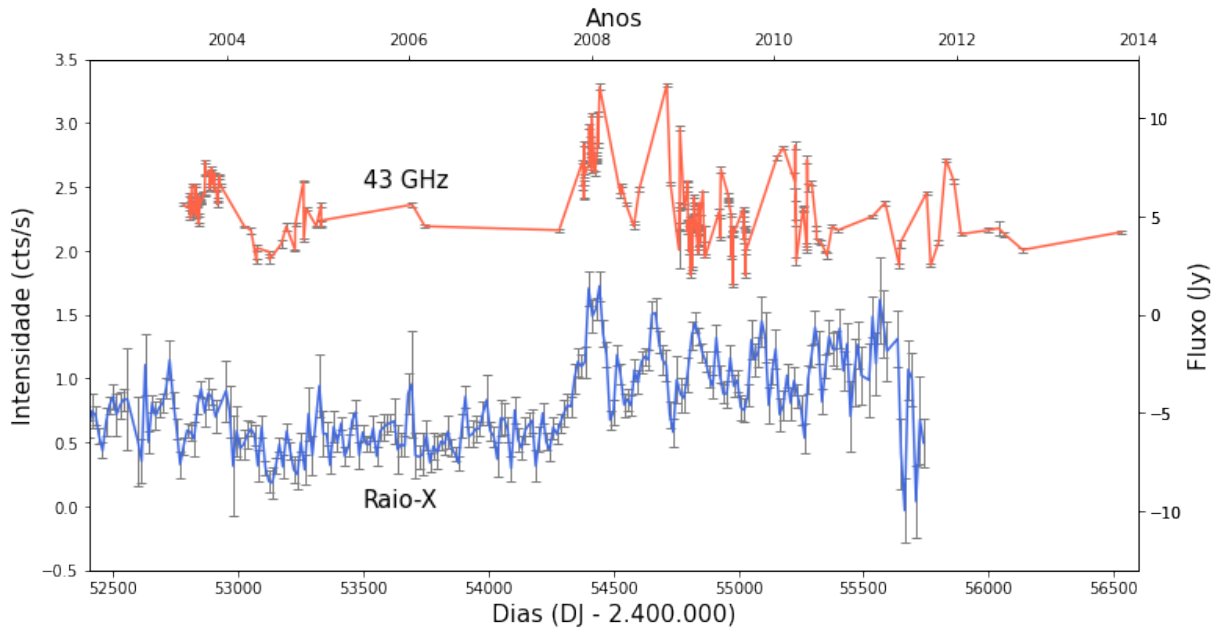
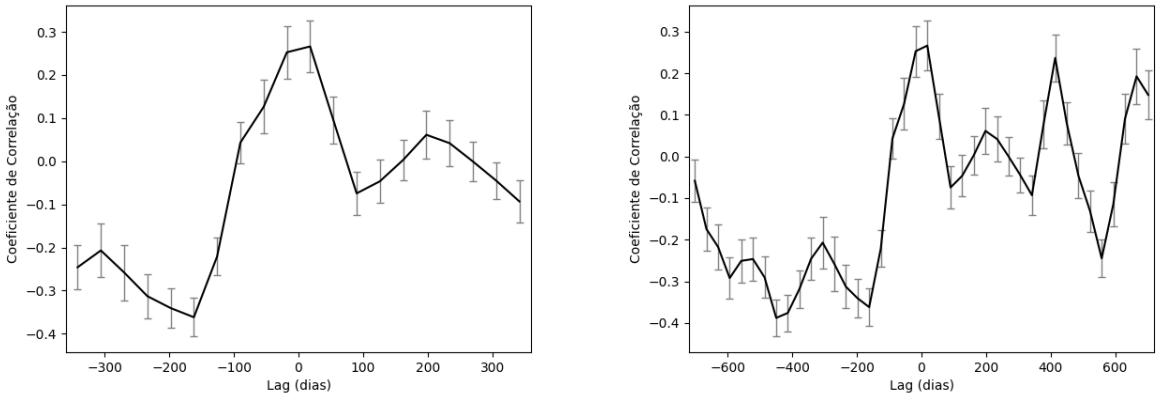


Figura 3.1: Curvas de luz feitas com os dados fornecidos pelo ASM/RXTE (linha azul) e coletados no Rádio Observatório Pierre Kaufmann (linha laranja). As intensidades são dadas em contagens por segundo (eixo vertical esquerdo), o fluxo é dado em Jy (eixo vertical direto), os dias em Dias Julianos (eixo horizontal inferior) e os anos em Anos Gregorianos (eixo horizontal superior).

Observando as curvas da Figura 3.1, percebemos nitidamente que existe um comportamento parecido na emissão desse corpo celeste nas duas frequências estudadas nesse trabalho. Esse comportamento semelhante das curvas de luz fica muito evidente, principalmente, na região entre 54400 e 55500 JD (de meados de 2007 até 2009).

Para confirmar a aparente correlação entre as duas séries temporais, uma em raio-X e outra em rádio de 43GHz, utilizamos o método estatístico desenvolvido por Edelson et al. (1988), a *Discrete Correlation Funtion* (DCF). Esse método tem a vantagem de não fazer interpolação, assim não cria dados que não foram coletados. E de ser perfeitamente aplicável a séries temporais com dados que não foram coletados em intervalos de tempo iguais e/ou com períodos grandes sem medições. Como nossos conjuntos de dados são desigualmente distribuídos, a DCF entre os dados de raio-X e rádio da Figura 3.1 é apresentada na Figura 3.2a.



(a) DCF com *bin* de 36 dias e intervalo de ±360 dias. Pico central por volta do dia 0 e outro à direita próximo do dia +205.

(b) DCF com *bin* de 36 dias e intervalo de ±720 dias. Pico central por volta do dia 0, outro próximo do dia +205, um terceiro em +410 e um quarto no dia +660.

Figura 3.2: Discrete Correlation Function para as séries temporais de dados de radiofrequência de 43 GHz e raio-X (1,5 - 12 keV) com médias de 14 dias consecutivos.

Notamos na curva da Figura 3.2a que exite um pico muito proeminente na parte central, aproximadamente dia 0, e outro pico um pouco menor por volta do dia +205. Esses picos indicam que existe uma periodicidade na DCF de aproximadamente 205 dias. Esse fato fica ainda mais nítido quando estende-se o intervalo de tempo analisado (Figura 3.2b).

Com a finalidade de definir melhor a posição do pico central, ajustamos uma curva gaussina a esse pico (Figura 3.3). O ajuste resultou em um pico em -5 dias com um desvio padrão de 75 dias e um coeficiente de correlação de $0,290 \pm 0,002$. Portanto concluímos que realmente existe uma correlação entre os dados de raio-X e de 43 Ghz e, como o *lag* é um valor negativo, que o sinal em radiofrequência está atrasado aproximadamente 5 dias em relação ao sinal de raio-X.

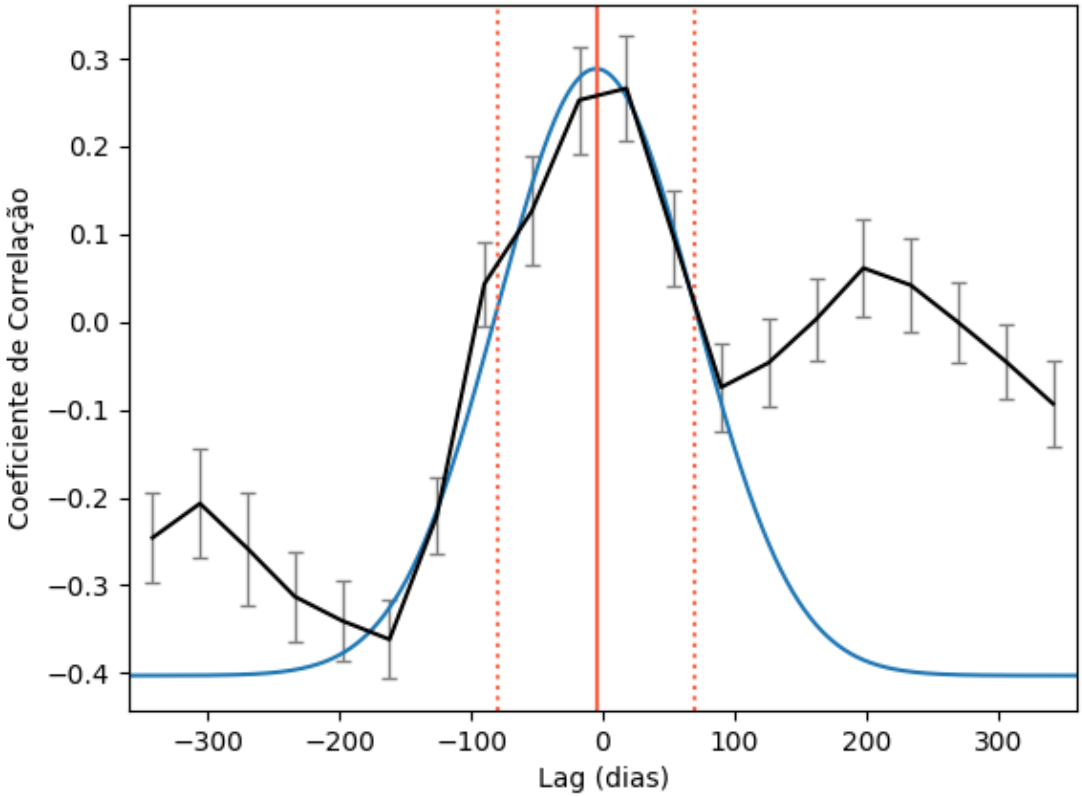


Figura 3.3: DFC entre o sinal de rádio e raio-X com o ajuste de uma função gaussiana (curva azul). Essa gaussiana tem o valor médio em -5 dias (linha vermelha contínua) e desvio padrão de 75 dias (linha vermelha pontilhada).

Essa correlação entre os sinais era esperada, pois foi sugerida em Abraham et al. (2007). Entretanto, a causa física desse fenômeno ainda está em discussão. Uma das possíveis explicações é supor que a emissão de raio-X é originada no efeito Compton inverso entre os mesmos elétrons relativísticos que produzem a radiação síncrotron em ondas de rádio e os fótons de baixa energia produzidos na radiação síncrotron. Outra possível explicação é que a radiação em raio-X seja de origem sincrotrônica assim como a radiação em radiofrequência.

Continuaremos esse trabalho explorando os outros conjuntos de dados disponibilizados pelo ASM/RXTE que dividem os dados em bandas de acordo com a energia dos fótons (Seção 2.1) com o intuito de investigar se todas as faixas de energia estão correlacionadas com o sinal em rádio. Outra possível extensão é complementar o trabalho de Davids et al. (2019), que estudou a correlação entre o sinal de raio-X e raios-γ emitido por Centaurus

A, procurando dessa vez uma correlação entre os dados em raios-γ e rádio. Ao fim dessas outras análises, pretendemos publicar os resultados desse trabalho em um artigo.

Capítulo 4

Conclusões

Os dados de raio-X com energia de 1,5 até 12 keV disponibilizados pelo ASM/RXTE foram tratados afim de eliminar os efeitos de medidas de intensidade e incertezas inconsistentes. Após o tratamento, fizemos os gráficos apresentados na Figura 2.1. Nessa Figura temos as curvas de luz para médias ponderadas da intensidade de 14, 10 e 7 dias. Em todas as curvas vemos uma variação global do fluxo em raio-X com uma região de baixo fluxo, $\sim 0,5$ cts/s, de 53000 até 54300 JD (2004 até 2007). E regiões de alto fluxo, uma de 51300 até 53000 JD (1999 até 2004) com $\sim 0,7$ cts/s e outra de 54300 até 55500 DJ (2007 até meados de 2010) com $\sim 1,0$ cts/s.

Já os dados de radiofrequência de 43 Ghz foram obtidos no Rádio Observatório Pierre Kaufmann, em Atibaia, com uma antena de 13,7 metros de diâmetro. O radiotelescópio varreu o céu em uma região de 20 minutos de arco de comprimento de tal forma que passava tanto pelo núcleo de Cen A como pelo dois rádio lóbulos mais internos. A medição era feita dessa forma para evitar eventuais atenuações da atmosfera. A curva de luz de Centaurus A nessa frequência está apresentada na Figura 2.3 onde também podemos ver uma variação globa no fluxo. Temos uma região de alta intensidade, ~ 9 Jy, de 54400 até 54800 JD (de meados de 2007 à 2009). E duas regiões de baixa intensidade, ~ 5 Jy, uma entre 53000 e 54400 JD (2004 até meados de 2007) e outra entre 54800 e 56500 JD (de 2009 até meados de 2013).

A Figura 3.1 mostra a curva de luz do núcleo de Centaurus A em raio-X e em 43GHz em um mesmo gráfico. Nesse gráfico podemos notar facilmente uma semelhança entre as duas curvas principalmente na região entre 54400 e 55500 JD (de meados de 2007 até 2009). Para confirmar essa correlação, fizemos a *Discrete Correlation Function* para essas duas séries de dados (Figura 3.2a) e, com o ajuste de uma curva gaussiana (Figura 3.3),

tivemos que o sinal de rádio tem um atraso de 5 ± 75 dias e um coeficiente de correlação entre os dados de $0,290 \pm 0,002$.

Referências Bibliográficas

Abraham Z., Barres de Almeida U., Dominici T. P., et al., 2007, MNRAS, 375, 171

Botti L. C. L., Abraham Z., 1993, MNRAS, 264, 807

Cooper B. F. C., Price R. M., Cole D. J., 1965, Aust. J. Phys., 18, 589

Davids I. D., Böttcher M., Backes M., 2019, Galaxies, 7, 44

Edelson R. A., Krolik J. H., 1988, ApJ, 333, 646

Fanaroff B. I., Riley J. M., 1974, MNRAS, 167, 31P

Häring-Neumayer N., Cappellari M., Rix H., et al., 2006, ApJ, 643, 226

Israel F. P., et al., 1990, A&A, 227, 342

Janssen M., Falcke H., Kadler M., et al., 2021, Nature Astronomy, 5, 1017

Lépine J. R. D., Braz M. A., Epchtein N., 1984, A&A, 131, 72

Levine A. M., Bradt H., Cui W., et al., 1996, ApJ, 469, 33

Mo H., van den Bosch F., White S., 2010, Galaxy Formation and Evolution. Cambridge University Press, Cambridge

Rejkuba M., 2004, A&A, 413, 903