



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**O ESTUDO DAS VARIAÇÕES DE BRILHO
MULTIBANDA DOS BLAZARES NO CONTEXTO DA
INFRAESTRUTURA OBSERVACIONAL BRASILEIRA
EM RADIOASTRONOMIA**

Gustavo Silva de França

Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC), sob orientação da Dra. Tânia Dominici.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**O ESTUDO DAS VARIAÇÕES DE BRILHO
MULTIBANDA DOS BLAZARES NO CONTEXTO DA
INFRAESTRUTURA OBSERVACIONAL BRASILEIRA
EM RADIOASTRONOMIA**

Gustavo Silva de França

Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC), sob orientação da Dra. Tânia Dominici.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar a variação de brilho em blazares, que são uma classe de Núcleos Ativos de Galáxias (AGNs) conhecida por apresentar variações de brilho em diferentes escalas de tempo, alta polarização e emissão no contínuo que se estende desde frequências rádio até raios-gama. Além disso, sua distribuição espectral de energia (Spectral Energy Distribution, SED) é caracterizada por dois picos de emissão: um em baixas energias, associado à radiação síncrotron, e o segundo em altas energias, podendo ser causado por efeito Compton inverso, caso a atividade dos dois picos apresentem estar correlacionadas. Inicialmente, realizamos revisões bibliográficas sobre astrofísica extragaláctica, com foco em AGNs. Em seguida, o estudo concentrou-se em um blazar específico, o OJ 287, com o objetivo de tomar conhecimento acerca da literatura atual sobre a correlação de suas curvas de luz em rádio frequências com outros comprimentos de onda. OJ 287 se destaca por ser o único blazar ao qual foi associada uma variabilidade quasi-periódica de seu brilho no óptico, estimada em aproximadamente 12 anos. Entre os modelos propostos para explicar o fenômeno, são considerados a existência de um sistema binário de buracos negros supermassivos e o movimento de precessão de um jato relativístico. Durante o projeto, uma etapa importante foi compreender e implementar o chamado método de função de correlação discreta (Discrete Correlation Function, DCF) em curvas de luz simuladas, a fim de entender o impacto das diferenças e limites de amostragem de dados. O objetivo é aplicar o método na investigação da existência de atrasos entre as curvas de luz em radiofrequências e em raios-gama – correspondentes à duas componentes da SED. O próximo passo do projeto será aplicar esse método em curvas de luz reais do blazar OJ 287, buscando identificar padrões de variação sincronizada ou correlacionada entre as faixas de rádio e gama. Além de contribuir para a compreensão da física dos blazares, especialmente em relação às características da emissão em diferentes faixas espectrais e aos processos físicos relacionados, o projeto fornecerá informações relevantes para o planejamento de pesquisas futuras através de observações com o Radio Observatório Pierre Kaufmann (ROPK), o James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) e o Large Latin American Millimeter/submillimeter Array (LLAMA).

Palavras-chave: Astrofísica Extragaláctica. Blazares. AGN. Radioastronomia.

STUDY OF MULTIBAND BRIGHTNESS VARIATIONS OF BLAZARS IN THE CONTEXT OF THE BRAZILIAN OBSERVATIONAL INFRASTRUCTURE IN RADIOASTRONOMY

ABSTRACT

This work aims to study the brightness variation in blazars, which are a class of Active Galactic Nuclei (AGNs) known for exhibiting brightness variations on different time scales, high polarization, and emission across the electromagnetic spectrum, ranging from radio frequencies to gamma rays. Furthermore, their Spectral Energy Distribution (SED) is characterized by two emission peaks: one at low energies associated with synchrotron radiation, and the second at high energies, possibly caused by inverse Compton scattering if the activity of both peaks is found to be correlated. Initially, we conducted a literature review on extragalactic astrophysics, with a focus on AGNs. Subsequently, the study focused on a specific blazar, OJ 287, with the objective of investigating the current literature on the correlation of its light curves at radio frequencies with other wavelengths. OJ 287 stands out as the only blazar associated with quasi-periodic variability in its optical brightness, estimated to occur approximately every 12 years. Among the proposed models to explain this phenomenon are the existence of a binary system of supermassive black holes and the precession of a relativistic jet. During the project, a crucial step was to understand and implement the Discrete Correlation Function (DCF) method on simulated light curves to comprehend the impact of data differences and sampling limits. The goal is to apply this method in investigating the existence of delays between the light curves at radio frequencies and gamma rays, corresponding to two components of the SED. The next step of the project will involve applying this method to real light curves of the blazar OJ 287, aiming to identify synchronized or correlated variation patterns between the radio and gamma-ray bands. Besides contributing to the understanding of blazar physics, especially concerning the emission characteristics in different spectral ranges and related physical processes, the project will provide relevant information for planning future research through observations with the Radio Observatory Pierre Kaufmann (ROPK), the James Clerk Maxwell Telescope (JCMT), and the Large Latin American Millimeter/submillimeter Array (LLAMA).

Keywords: Extragalactic Astrophysics. Blazars. AGN. Radioastronomy.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	3
1.0.1 Núcleos Galácticos Ativos	3
1.0.2 Blazares	4
1.0.3 OJ 287	5
1.0.4 Função de Correlação Discreta (DCF)	7
2 ANÁLISE DE CORRELAÇÕES EM CURVAS DE LUZ SIMU- LADAS	13
2.1 Simulação de Curvas de Luz Sintéticas	13
2.2 Simulação de Curvas de Luz Sintéticas e DCFs	14
3 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	17
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

1 INTRODUÇÃO

1.0.1 Núcleos Galácticos Ativos

A astrofísica e cosmologia moderna revelam que as galáxias não têm uma forma e constituição única. Há vários tipos de galáxias, que variam de acordo com seu tamanho, padrão de posicionamento das estrelas e especialmente sua espectroscopia e luminosidade, sendo classificadas através de uma catalogação.

A luminosidade observada em galáxias é geralmente causada por estrelas e poeira estelar. Essa emissão eletromagnética pode se estender em comprimentos de onda entre 4.000 e 20.000 angstroms (Schneider (2015)). No entanto, algumas galáxias têm uma distribuição de energia em um intervalo de comprimentos de onda ainda mais extenso, chegando até raios-gama com energias da ordem de TeV. Observou-se que essa emissão vem principalmente de um pequeno espaço no centro da galáxia (com raio $\leq 1pc$), que denominamos de Núcleos Ativos de Galáxias (AGNs, do inglês Active Galactic Nuclei).

Os AGNs são uma classe de objetos astronômicos que têm desafiado os astrônomos desde a sua descoberta, na década de 1960. O estudo dessas fontes cósmicas exige uma abordagem técnica e científica complexa, envolvendo diversas disciplinas da astrofísica e da física de altas energias.

Uma das características distintivas dos AGNs é sua emissão não térmica, diferente de galáxias comuns, cuja luminosidade é atribuída principalmente ao brilho das estrelas. Em AGNs acredita-se que uma parcela da emissão seja resultado de processos altamente energéticos, como a aceleração de partículas subatômicas em campos magnéticos intensos.

A luminosidade detectada nas AGNs pode variar enormemente, desde algumas vezes a luminosidade do Sol até ser mais brilhante que bilhões de sóis. Algumas galáxias AGN, conhecidas como quasares, são os objetos astronômicos mais luminosos do universo, emitindo uma grande quantidade de energia que não pode ser explicada apenas pela emissão estelar. Essa emissão energética provém principalmente de uma região compacta no centro da galáxia, com um raio em escala de parsecs, onde acredita-se estar localizado um buraco negro supermassivo que alimenta o AGN.

Buracos negros supermassivos são objetos exóticos e com uma força gravitacional tão intensa que nada pode escapar de sua atração, nem mesmo a luz, sendo que aqueles localizados no centro de galáxias chamados de Buracos Negros Supermas-

sivos (SMBH). No contexto das AGNs, acredita-se que esses buracos negros sejam os "motores" que impulsionam toda a atividade energética observada. A matéria ao redor do buraco negro forma um disco de acreção, uma estrutura em forma de disco composta por gás e poeira que orbita em torno do buraco negro. À medida que a matéria cai em direção ao buraco negro, ela é acelerada e aquecida a altas temperaturas, liberando uma significativa quantidade de energia, incluindo em altas energias.

Além da radiação liberada pelo disco de acreção, em AGNs são observados jatos relativísticos. Essas estruturas são feixes de partículas subatômicas, como elétrons e prótons, aceleradas a velocidades próximas à da luz. A origem desses jatos ainda é objeto de investigação, mas acredita-se que estejam associados ao campo magnético do buraco negro e às forças de torção geradas pelo seu movimento de rotação. Os jatos se estendem para além da galáxia hospedeira por distâncias astronômicas e emitem radiação em diversas faixas do espectro.

Os AGN são classificados em vários tipos, dependendo da natureza da radiação eletromagnética emitida e da forma como o material é canalizado em direção ao buraco negro. Alguns dos tipos mais comuns incluem Quasares (Quasi-Stellar Objects), Blazares e Galáxias Seyfert.

1.0.2 Blazares

Os blazares são uma classe de AGNs que se destaca pela existência de variações de brilhos em diferentes escalas de tempo, polarização acentuada e emissões ao longo de todo o espectro eletromagnético, incluindo altas energias. Esses objetos astronômicos são caracterizados por apresentarem jatos relativísticos extremamente intensos, que apontam diretamente para a Terra, o que é associado ao brilho altamente variável em todas as faixas do espectro eletromagnético.

A variabilidade observada nos blazares é caracterizada por escalas de tempo de décadas até poucas horas, desafiando nossa compreensão das dinâmicas astrofísicas envolvidas. Essa variabilidade intensa é decorrente dos processos dinâmicos em seus jatos relativísticos, onde partículas carregadas, como elétrons, são aceleradas a velocidades próximas à da luz em campos magnéticos intensos.

Assim, os jatos relativísticos com ângulos de visada pequenos em relação à Terra constituem uma das principais características distintivas dos blazares. Eles são estreitos feixes de partículas subatômicas aceleradas, que se estendem por milhares de anos-luz além da galáxia hospedeira. À medida que essas partículas se movem quase

à velocidade da luz, interagem com campos magnéticos intensos e com a radiação presente no ambiente, emitindo radiação de alta energia, como raios-X e raios gama.

A distribuição espectral dos blazares exibe duas componentes principais. A primeira abrange as frequências de rádio a ultravioleta, que é relacionada à emissão de radiação síncrotron. Nesse processo, partículas aceleradas em campos magnéticos curvam suas trajetórias, emitindo radiação eletromagnética altamente polarizada na direção do campo magnético. A segunda componente compreende a radiação de raios-X e raios gama, que é mais bem explicada pelo processo conhecido como "Compton inverso", onde fótons de menor energia são dispersos e ganham energia ao interagir com elétrons altamente energéticos.

O origem das variações de brilho em blazares é influenciada pelo material presente em seus jatos relativísticos, por material emitido pela fonte central e os campos magnéticos que confinam e interagem com as partículas. Durante eventos de flares, podem vir a ocorrer processos correlacionados de emissão síncrotrônica e Compton inverso, onde as interações das partículas resultam em picos de radiação de alta energia. À medida que o jato se expande e a energia é dissipada, os flares são observados em várias faixas do espectro eletromagnético, inclusive em frequências de rádio. Assim, por efeitos de opacidade, são esperados atrasos entre as variações de brilho em distintas frequências, com a contrapartida em energias mais altas sendo observadas antes.

1.0.3 OJ 287

O OJ 287 é um blazar localizado nas coordenadas equatoriais $\alpha = 08^h54^m48.87^s$ e $\delta = +20^\circ06'30.64''$ (J2000). Quanto ao redshift (desvio para o vermelho) do OJ 287, estima-se que seu valor seja de $z = 0,306$.

O que distingue OJ 287 de outros blazares é o fato de que nele é observada uma variação de brilho quasi-periódica, de cerca de 11.6 anos, na curva de luz no óptico (por exemplo, Sillanpaa et al. (1996), Abraham (2000)). O comportamento peculiar da curva de luz do OJ 287 foi identificado pela primeira vez na década de 1970 mas, até os dias atuais, continua a ser objeto de intensas investigações e estudos.

Para compreender em detalhes as variações de brilho nesta fonte, os astrônomos desenvolveram modelos complexos, incluindo a possibilidade de existir um sistema binário de buracos negros supermassivos, no qual as interações gravitacionais entre os dois objetos cósmicos desencadeiam variações regulares na emissão de radiação

eletromagnética. Um dos modelos mais aceitos é aquele que postula a presença de um buraco negro menor, chamado de secundário, em órbita em torno do buraco negro supermassivo primário. A órbita do buraco negro secundário, que teria o período de cerca de 11,6 anos, correspondente à variação periódica observada na curva de luz óptica de OJ 287.

As interações gravitacionais entre os buracos negros binários desempenham um papel fundamental na variação da luminosidade do OJ 287. À medida que o buraco negro secundário orbita em torno do SMBH central, ele perturba o disco de acreção do primário, o que pode causar um movimento de precessão no seu jato relativístico que pode ser associado às variações de brilho periódicas. As perturbações no disco também podem aumentar a taxa de acreção do buraco negro primário, provocando a emissão de novas componentes do jato relativístico. Estes eventos seriam observados como flares nas curvas de luz da fonte e, pelo modelo chamado de shocks-in-jets (Marscher; Gear, 1985), a contrapartida seria observada primeiramente em frequências altas e posteriormente, com atrasos de vários dias a meses, em rádio.

Embora esse modelo seja uma explicação plausível para a variabilidade observada no OJ 287, é importante ressaltar que outros cenários também foram propostos para descrever esse fenômeno, inclusive sem considerar o sistema binário (Abraham, 2018).

Pretendemos estudar a variação multibanda de AGNs com ênfase no estabelecimento de programas de monitoria em frequências rádio com observatórios aos quais a comunidade astronômica brasileira tem ou terá acesso em um futuro próximo. OJ 287 foi selecionado como fonte inicial da pesquisa. Além disso, estão sendo estudadas ferramentas para a análise de curvas de luz, nomeadamente no contexto do presente relatório, a Discrete Correlation Function (DCF, (Edelson; Krolik, 1988)). Este trabalho está organizado da seguinte maneira: na seção 2 discutimos o comportamento multibanda de OJ 287 com base na literatura recente. Na seção 3, apresentamos a simulação de curvas de luz com o objetivo de compreender efeitos de amostragem no cálculo da DCF. Finalmente, a Seção 4 traz conclusões e perspectivas futuras.

As variações de brilho em OJ 287 têm sido registradas há mais de um século em frequências ópticas (Gaida; Roeser, 1982) e o conhecimento sobre as características observacionais da fonte vai sendo ampliado conforme a astronomia tem acesso a observatórios em outras regiões do espectro eletromagnético. Nesta seção, vamos apresentar as informações mais recentes disponíveis na literatura sobre a atividade

da fonte em diferentes faixas espectrais, escalas de tempo de variabilidade e também sobre a evolução de estruturas do jato com alta resolução espacial, observada através de interferometria rádio.

Em particular, coletamos na literatura observações que buscaram identificar o flare previsto para acontecer em 2022, caso a variação quasi-periódica de 11,6 anos se repetisse.

Observa-se um flare entre 2016/2017, com um pico que é detectado em todas as frequências de rádio observadas (Figura 1.1) e que possui uma densidade de fluxo de aproximadamente 10 Jy. Após esse pico, notamos um rápido decaimento entre 2017/2018. Em seguida, notamos uma constância de fluxo, até que entre 2021/2022 ocorre um segundo flare de aproximadamente 8 Jy que, entre as frequências mais altas, é possível notar uma rápida queda e recuperação. De modo geral, a variabilidade de emissão observada nas curvas de rádio, juntamente com os picos de emissão e os padrões de declínio e recuperação podem ser explicados pelo efeito síncrotron. As variações nas frequências ópticas e também em raios-X, observadas pelo telescópio espacial Swift, podem ser vistas na Figura 1.2 (Komossa et al., 2021). Um flare óptico correspondente à atividade observada a cada 11,6 anos, aproximadamente, era previsto para ter início no final de 2021, mas não foi detectado.

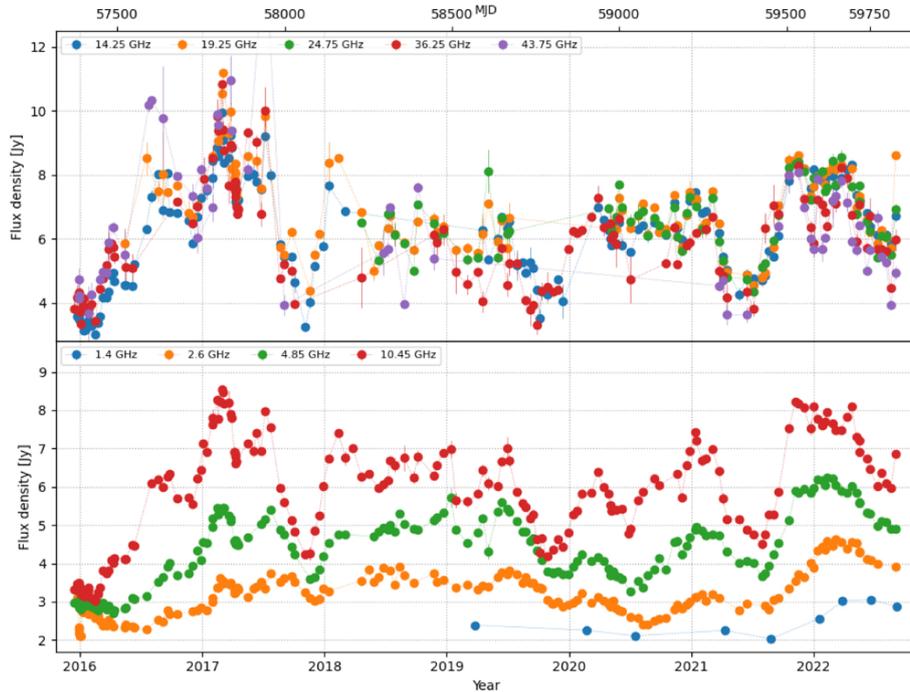
Nas frequências que são associadas ao efeito Compton Inverso, também é possível notar a presença de um flare entre 2016/17 obtidas pelo Swift (1.2), seguido também de uma rápida queda e uma certa constância. Após isso, notamos um segundo flare que ocorre em 2020 e declina rapidamente, mas que aparenta se recuperar entre 2020/2021. Porém, ao analisarmos os dados obtidos do Fermi-LAT durante o mesmo período (1.3), observamos o primeiro flare ocorrendo entre 2015/2016, e o segundo entre 2021/2022. Esta é uma análise ainda preliminar.

Através dos dados em raios-gama e das componentes obtidas pelo MOJAVE (Lister; Homan, 2005) e que podem ser vistos na Figura 1.4, é possível notar uma possível correlação com a ejeção das componentes com os flares observados (principalmente em raios-gama), como no pico ocorrido no período de 2011/12, que houve a ocorrência da componente 21 (Fig. 1.3).

1.0.4 Função de Correlação Discreta (DCF)

Na análise de curvas de luz, muitas vezes é necessário determinar se duas séries temporais estão correlacionadas de alguma forma. A correlação pode indicar possíveis

Figura 1.1 - Observações em rádio frequências de OJ 287

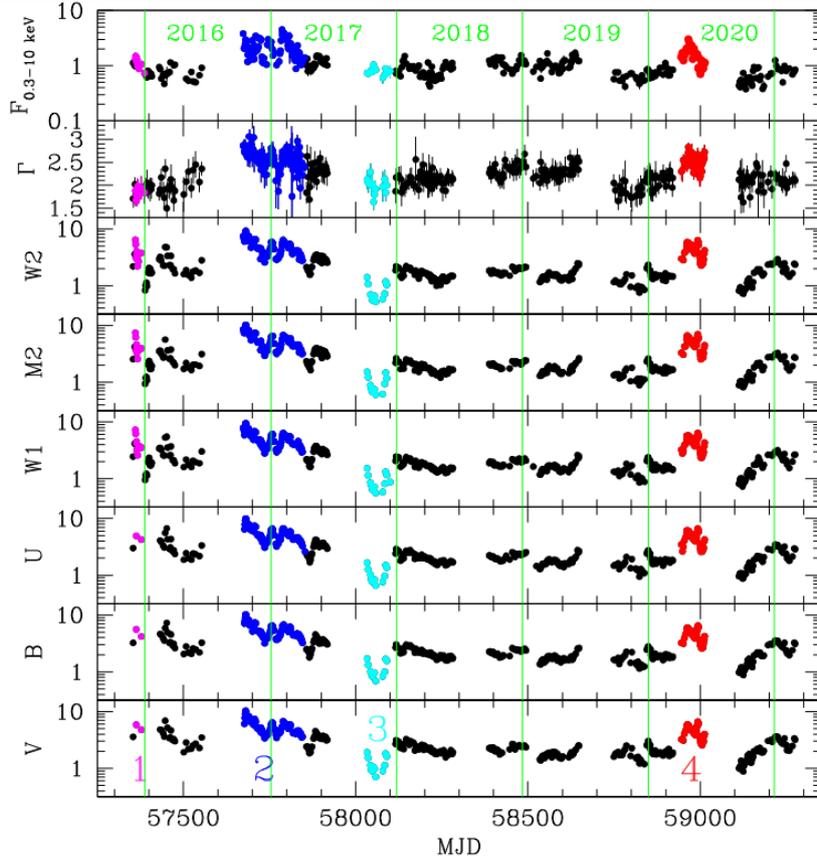


Curvas de luz multifrequência de rádio do OJ 287 entre 2016 e 2022, obtidas com o Radiotelescópio Effelsberg (Komossa et al., 2023) .

relações causais ou influências mútuas entre os processos subjacentes que geram essas curvas. Isso é especialmente relevante em astronomia, onde mudanças na emissão eletromagnética de fontes astrofísicas podem estar relacionadas a diferentes processos físicos. A análise da existência de correlações entre curvas de luz é uma ferramenta valiosa para identificar padrões e relações temporais entre fenômenos astronômicos e variáveis observáveis.

A Função de Correlação Discreta (DCF, (Edelson; Krolik, 1988)) é uma ferramenta importante na análise de correlação entre curvas de luz, pois é construída para estudar séries temporais nas quais os dados não são igualmente espaçados. Este é o caso das observações astronômicas, onde cada faixa do espectro eletromagnético é explorada por instrumentos com diversas limitações neste sentido. O caso clássico é a observação nas frequências ópticas, que só pode ser realizada durante a noite e, frequentemente, tem interrupções por conta de passagens de nuvens e afins. Além disso, diferentes processos físicos podem introduzir atrasos entre as curvas, o que torna difícil identificar correlações significativas sem ferramentas de análise específicas.

Figura 1.2 - Observações no óptico em raios-X de OJ 287, entre 2016 e 2022



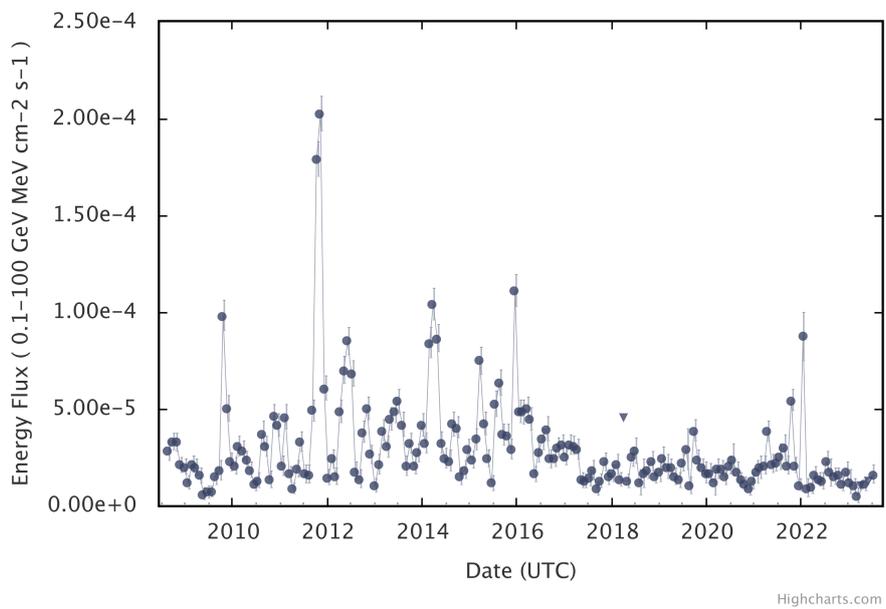
Curvas de luz Observações com no óptico em raios-X de OJ 287, entre 2016 e 2022, com o telescópio espacial Swift (Komossa et al., 2021) .

A DCF é calculada através da covariância normalizada das duas séries temporais, levando em conta diferentes intervalos de tempo (τ). A fórmula da DCF é dada por (Edelson e Krolik (1988)):

$$DCF(\tau) = \frac{E\{[a(t) - \bar{a}][b_{t+\tau} - \bar{b}]\}}{\sigma_a \sigma_b} \quad (1.1)$$

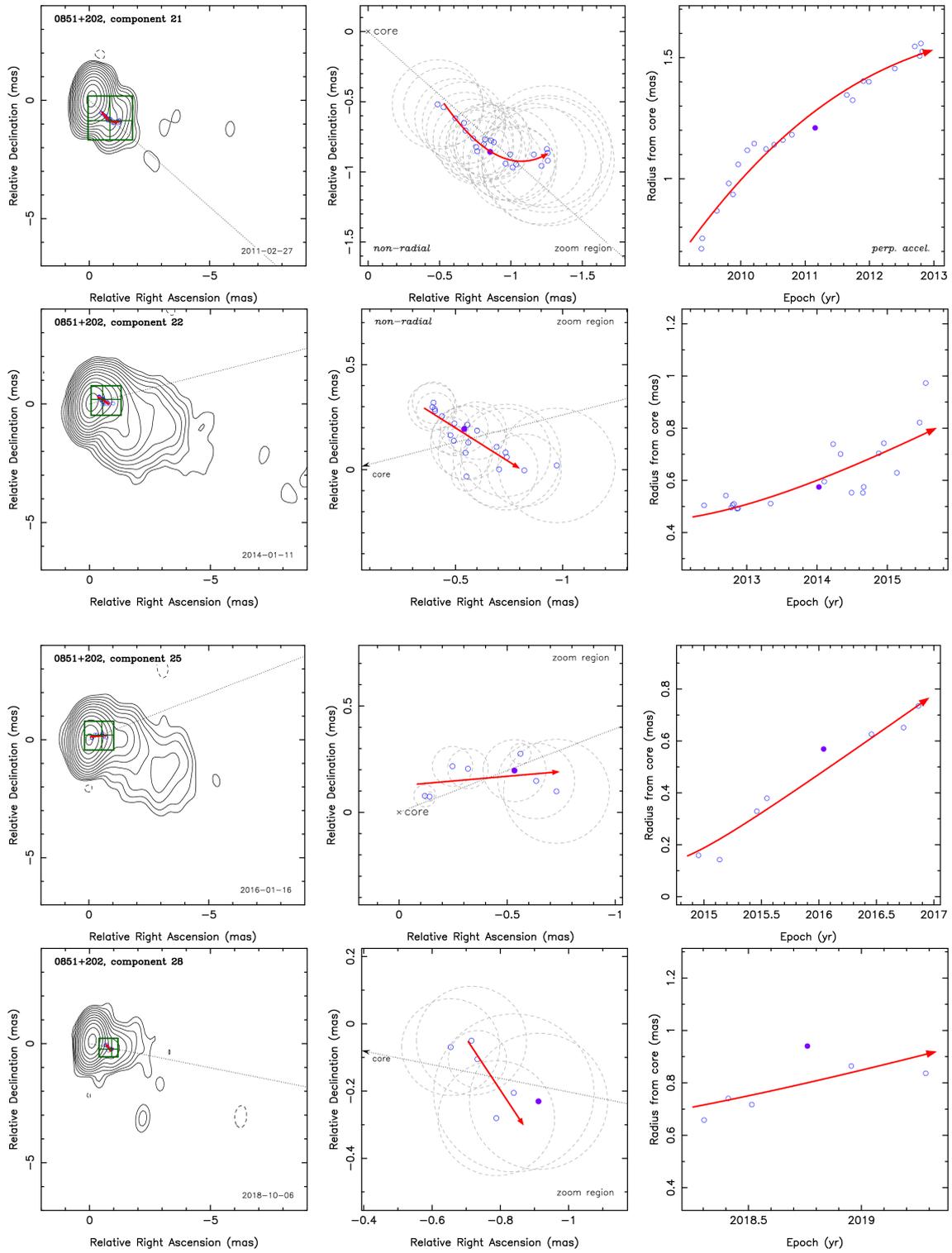
Onde $DCF(\tau)$ é a Função de Correlação Discreta para um atraso τ , E é o valor esperado da função, a_t e $b_{t+\tau}$ são os valores das curvas de luz nos tempos t e $t + \tau$, \bar{a} e \bar{b} representam as médias da curva de luz e σ_a e σ_b são os desvios padrão das curvas de luz.

Figura 1.3 - Curva de luz em raios-gama de OJ 287



Curvas de raios X-Gamma do OJ 287 entre 2010 e 2022, obtidas com o Fermi-LAT.

Figura 1.4 - Componentes do OJ 287



Componentes do OJ 287 obtidas pelo programa MOJAVE no período de 2011 à 2018 que tiveram maiores correlações entre os flares analisados pelas curvas de luz e o momento em que foram detectados

2 ANÁLISE DE CORRELAÇÕES EM CURVAS DE LUZ SIMULADAS

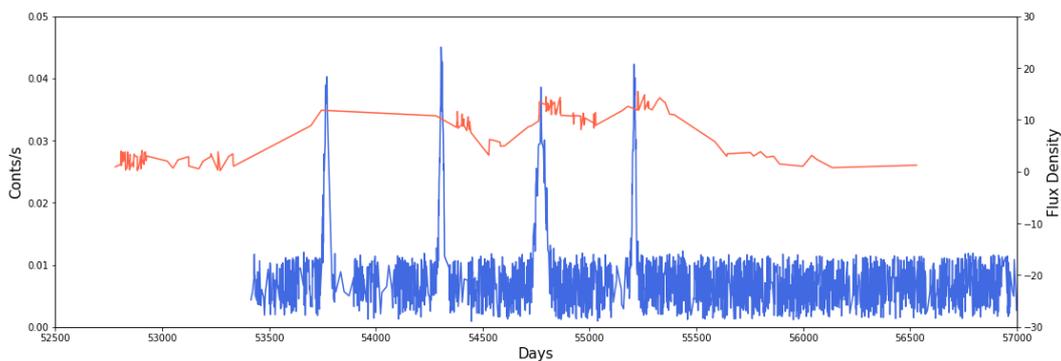
2.1 Simulação de Curvas de Luz Sintéticas

Quão confiável são as DCFs na determinação de atrasos entre curvas de luz obtidas em diferentes frequências e com distintas amostragens? Esta questão motivou que o grupo de pesquisa investisse em criar uma ferramenta em Python para a simulação de curvas de luz. Assim, foi possível explorar o comportamento da DCF em diferentes cenários.

Em particular, o trabalho se concentrou em tentar reproduzir com curvas de luz sintéticas a DCF calculada entre a curva de luz em 43 GHz, com dados do ROPK, e em raios-X, com dados obtidos com o All-Sky Monitor do RXTE (ASM/RXTE), para a rádio galáxia Centaurus A (CenA). CenA é frequentemente associada a um "blazar desalinhado" (Abraham et al., 2005). Na DCF calculada entre as curvas de luz em rádio e em raios-X (Figura 2.2), encontramos um atraso de cerca de 20 dias, com a emissão em raios-X acontecendo antes. Isso é compatível com o modelo de shocks-in-jet (Marscher; Gear, 1985). No entanto, surge um segundo pico, também significativo, indicando um atraso de cerca de 230 dias, onde a emissão em baixas energias apareceria primeiro. A nossa hipótese é de que este segundo pico tenha origem espúria, devido à problemas de amostragem na curva de luz em 43 GHz.

Assim, a simulação das curvas de luz, descrita na seção a seguir, foi realizada no sentido de demonstrar que o segundo pico não era real.

Figura 2.1 - Curvas de Luz Sintéticas



Curva de luz em óptico (azul) e raios-X (vermelho) do OJ 287 obtidas pelo Swift entre 2005 e 2022.

2.2 Simulação de Curvas de Luz Sintéticas e DCFs

Para gerar as curvas de luz sintéticas, primeiramente estabelecemos diversos parâmetros que controlam e definem as características das curvas, como intensidade dos flares, duração e ruídos. Como as curvas de rádio e em raios-X possuem resolução temporal diferentes, o código também realiza um cálculo da cobertura temporal total entre os tempos das duas curvas reais.

A fim de simular as variações de intensidade ao longo do tempo, são geradas mais duas componentes para representar a variabilidade nas curvas em rádio e em raios-X. Cada uma dessas componentes possui também uma componente de ruído, que é gerada através de uma distribuição gaussiana por métodos estatísticos de média e desvios-padrão.

Para produzir os flares nas curvas sintéticas, atribuímos quatro componentes para cada uma das curvas de rádio e raios-X, que possuem as seguintes propriedades: Intensidade dos flares, duração, momento em que os flares se iniciam e o atraso entre eles (nessas duas últimas, são utilizados valores aleatórios delimitados que variam a cada interação do código). Um exemplo das curvas de luz geradas pode ser visto na Figura 2.1.

Após o desenvolvimento de todos os parâmetros para a criação das curvas sintéticas, foi realizado o cálculo das DCFs entre elas. O objetivo era encontrar as curvas que possuíam correlações muito parecidas com a DCF real (2.2) observada para CenA, e assim poder analisar todas as variáveis que construíram essa aproximação.

Para fazer a correlação entre as curvas sintéticas e os dados reais, foi aplicado métodos estatísticos de Erro Quadrático Médio que calculam as medidas de erro entre as DCFs sintéticas e a DCF real, e atribuem esse para o desvio rms.

Por fim, criamos um "loop" no código que altera os valores das variáveis delimitadas a cada interação, constrói as curvas sintéticas, compara as DCFs sintéticas com as reais e seleciona as que possuem maior aproximação (menores valores de desvio rms)(2.3).

Deste modo, pudemos reproduzir a situação observada na DCF com dados reais, demonstrando que o segundo pico é realmente espúrio e que a detecção do atraso de cerca de 20 dias é confiável.

Figura 2.2 - DCF Calculada

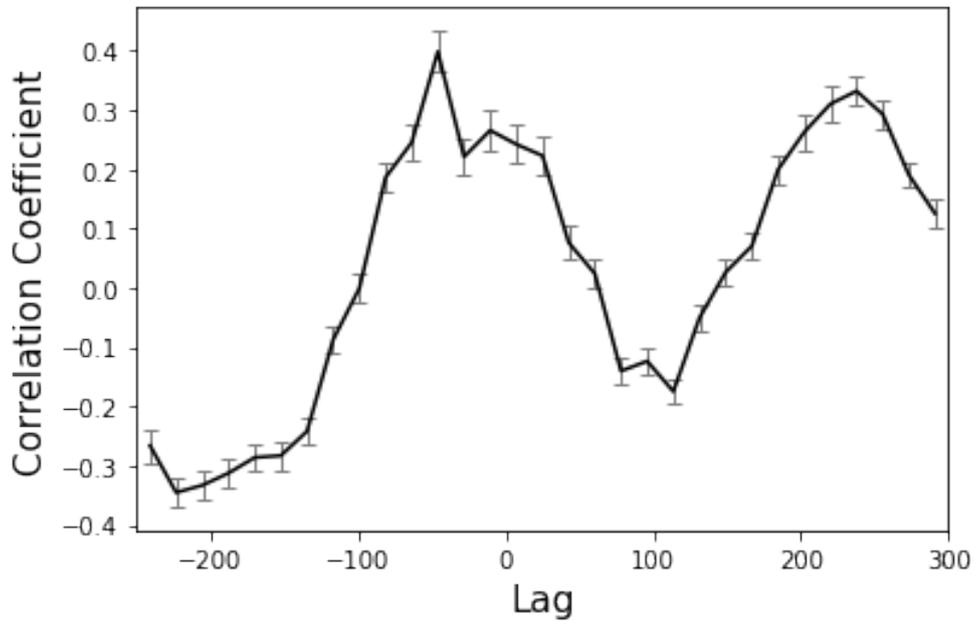
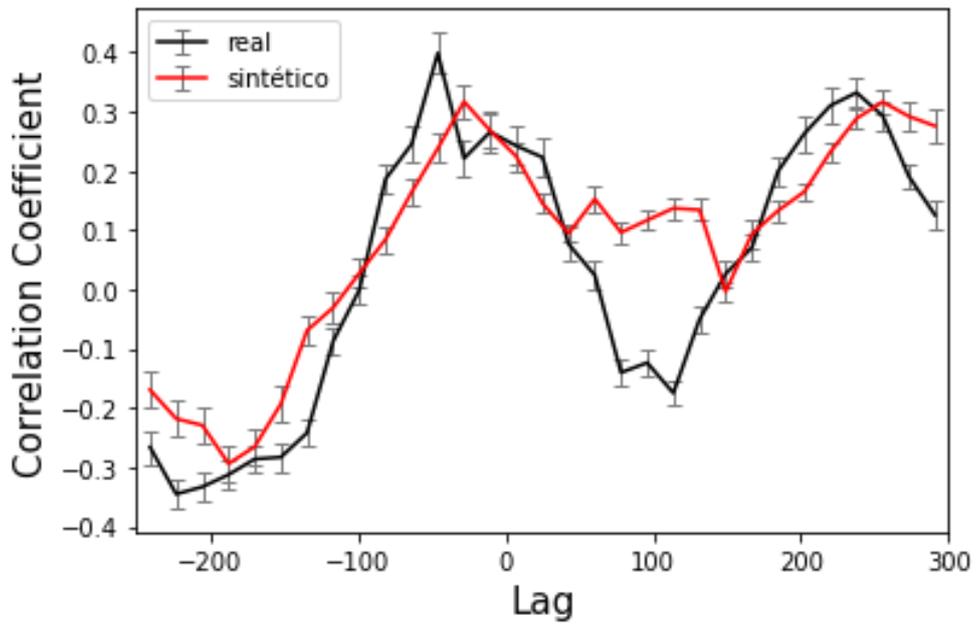


Figura 2.3 - Comparação da DCF Sintética



3 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Através da revisão da literatura recente sobre OJ 287, foi possível ter contato com a complexidade das variações de brilho multibanda em blazares. Esta fonte em particular tem apresentado nas últimas décadas um flare quasi-periódico de cerca de 11,6 anos na sua curva de luz no óptico. O último evento estava previsto para 2022 mas, até o momento da escrita, não foi observado. Este fato precisa ser interpretado no contexto dos diferentes modelos que buscam explicar o comportamento de OJ 287 como sendo devido à existência de um sistema binário de buracos negros supermassivos. Segundo (Komossa et al., 2023), a não observação do flare previsto favoreceria o cenário em que há dois buracos negros em interação, mas sem movimento de precessão do jato relativístico do buraco negro primário.

No entanto, as curvas de luz de blazares apresentam, de fato, a superposição de variações de brilho em escalas de tempo diversas e de diferentes origens. A observação de componentes do jato relativístico de OJ 287 com técnicas de interferometria e obtidas por meio do projeto MOJAVE (Lister; Homan, 2005), revelou a correlação entre a emissão de novos componentes e a observação de flares nas curvas de luz.

No contexto de melhor compreender as atividades nos blazares que geram variações de brilho em diferentes escalas, trabalhamos na elaboração de um código para simular curvas de luz em diferentes condições e avaliar o potencial do cálculo da DCF para apontar correlações entre as séries temporais. A simulação de curvas de luz sintéticas e a comparação com a DCF obtida a partir dos dados reais das curvas de luz de CenA, demonstrou que podemos simular as condições observadas e que correlações espúrias podem ser detectadas por efeitos de amostragem nas observações.

Ao analisar a influência de variáveis arbitrarias no código de simulação, torna-se possível estabelecer relações e descobrir como determinados parâmetros afetam a forma e estrutura da curva de luz sintética. Isso contribui sobretudo para a preparação de propostas de pedidos de tempo de observação. Em particular, esperamos que a metodologia desenvolvida seja aplicada em dados da literatura de OJ 287, como os introduzidos aqui, e nas futuras solicitações de tempo de telescópio no James Clerk Maxwell Telescope (JCMT, Havaí) e, futuramente, nos rádio observatórios ROPK e Large Latin American Millimeter/submillimeter Array (LLAMA).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abraham, Z. Precession, beaming and the periodic light curve of OJ287. , v. 355, p. 915–921, 2000. 5

_____. Jet precession in binary black holes. **Nature Astronomy**, v. 2, p. 443–444, 2018. 6

Abraham, Z.; Barres de Almeida, U.; Dominici, T. P.; Caproni, A. Centaurus A: The Nearest Blazar? In: Aharonian, F. A.; Völk, H. J.; Horns, D. (Ed.). **High Energy Gamma-Ray Astronomy**. [S.l.: s.n.], 2005. (American Institute of Physics Conference Series, v. 745), p. 505–509. 13

Edelson, R. A.; Krolik, J. H. The Discrete Correlation Function: A New Method for Analyzing Unevenly Sampled Variability Data. , v. 333, p. 646, 1988. 6, 8, 9

Gaida, G.; Roeser, H. J. The photometric history of the BL Lacertae object OJ 287. , v. 105, p. 362–363, 1982. 6

Komossa, S.; Grupe, D.; Gallo, L. C.; Gonzalez, A.; Yao, S.; Hollett, A. R.; Parker, M. L.; Ciprini, S. MOMO. IV. The Complete Swift X-Ray and UV/Optical Light Curve and Characteristic Variability of the Blazar OJ 287 during the Last Two Decades. , v. 923, n. 1, p. 51, 2021. 7, 9

Komossa, S.; Kraus, A.; Grupe, D.; A.G., G.; Gurwell, M.; Gallo, L.; Liu, F. Multifrequency Radio Variability of the Blazar OJ 287 from 2015 to 2022, Absence of Predicted 2021 Precursor-flare Activity, and a New Binary Interpretation of the 2016/2017 Outburst. , v. 522, p. L84–L88, 2023. 8, 17

Lister, M. L.; Homan, D. C. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. I. First-Epoch 15 GHz Linear Polarization Images. , v. 130, n. 4, p. 1389–1417, 2005. 7, 17

Marscher, A. P.; Gear, W. K. Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273. , v. 298, p. 114–127, 1985. 6, 13

Schneider, P. **Extragalactic Astronomy and Cosmology**. [S.l.]: Springer, 2015. 3

Sillanpaa, A.; Takalo, L. O.; Pursimo, T.; Nilsson, K.; Heinamaki, P.; Katajainen, S.; Pietila, H.; Hanski, M.; Rekola, R.; Kidger, M.; Boltwood, P.; Turner, G. W.; Robertson, J. W.; Honeycut, R. K.; Efimov, Y. S.; Shakhovskoy, N.; Fiorucci, M.; Tosti, G.; Ghisellini, G.; Raiteri, C. M.; Villata, M.; de Francesco, G.; Lanteri, L.; Chiaberge, M.; Peila, A.; Heidt, J. Double-peak structure in the cyclic optical outbursts of blazar OJ 287. , v. 315, p. L13–L16, 1996. 5

