

**INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**BACHARELADO EM ASTRONOMIA**

**FÁBIO MUFFO CAFARDO**

# **Investigação de Sagitário A\* em Raios Gama com o Telescópio Fermi**

São Paulo  
2016



FÁBIO MUFFO CAFARDO

# **Investigação de Sagitário A\* em Raios Gama com o Telescópio Fermi**

Trabalho apresentado no Bacharelado em Astronomia  
do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências  
Atmosféricas da Universidade de São Paulo

Área de concentração: Astronomia  
Orientador: Dr. Rodrigo Nemmen

São Paulo  
2016



## **Resumo**

Este trabalho apresenta o estudo parcial de Sagitário A\* em raios gama utilizando dados do *Large Area Telescope* do *Fermi Gamma-ray Space Telescope*. Foram considerados 7,7 anos de observações de raios gama com energia de 100 MeV a 300 GeV. Através das ferramentas computacionais *Fermi Science Tools*, utilizadas com auxílio do pacote Enrico, foi possível identificar uma fonte pontual na região de Sagitário A\* com espectro ajustado através de uma lei de potências com significância  $>100\sigma$ .

Palavras chave: AGN, Astrofísica de Altas Energias, Buracos negros, *Fermi Gamma-ray Space Telescope*, *Fermi Science Tools*, Raios gama, Sagitário A\*



## Lista de Figuras

1. O FGST _____	9
2. Variação da área efetiva do FGST em função da energia dos fótons captados _____	10
3. Variação da área efetiva do FGST em função do ângulo de incidência para fótons com 10 GeV _____	10
4. Modelo unificado dos AGNs _____	12
5. Comparação entre o espectro de um corpo negro com o de um quasar típico _____	14
6. Órbita de 6 estrelas ao redor de Sagitário A* _____	15
7. <i>Fermi Bubbles</i> _____	16
8. As principais ferramentas computacionais das <i>Fermi Science Tools</i> . _____	18
9. Mapa de contagens, modelo e resíduos para Sagitário A* _____	21
10. Resultado do ajuste pelo método de <i>Maximum Likelihood Estimation</i> _____	23
11. Comparação entre o modelo gerado e os dados obtidos _____	23
12. Modelo para o fluxo de energia obtido para Sagitário A* _____	24
13. O caminho anual do Sol _____	28



# Sumário

<b>Capítulo 1: Introdução</b>	<b>7</b>
<b>Capítulo 2: Objetivos</b>	<b>7</b>
<b>Capítulo 3: O <i>Fermi Gamma-ray Space Telescope</i></b>	<b>8</b>
3.1. A precisão do LAT	9
<b>Capítulo 4: Buracos negros supermassivos</b>	<b>11</b>
4.1. Modelo unificado	12
4.2. Buracos negros em hibernação	13
4.3. O espectro dos AGNs	13
4.4. Sagitário A*	15
<b>Capítulo 5: Metodologia</b>	<b>17</b>
5.1. Dados	17
5.2. <i>Fermi Science Tools</i>	18
5.3. Enrico	19
<b>Capítulo 6: Resultados</b>	<b>20</b>
6.1. <i>Likelihood Analysis</i>	20
6.2. <i>TS map</i>	25
6.3. Curva de luz	26
<b>Capítulo 7: Próximos passos</b>	<b>26</b>
<b>Capítulo 8: Conclusões</b>	<b>28</b>
<b>Referências</b>	<b>29</b>
<b>Apêndice</b>	<b>33</b>



## **Capítulo 1: Introdução**

O estudo de buracos negros supermassivos é bastante complexo, uma vez que a maior parte deles se encontra a distâncias muito grandes para que possam ser estudados em detalhes. A exceção é Sagitário A\*, o buraco negro supermassivo que ocupa o centro de Nossa Galáxia.

Sagitário A\* é uma fonte bem conhecida nos comprimentos de onda de rádio, infravermelho e raios-X<sup>[1]</sup>. Mas ela tem sido pouco estudada na faixa mais energética do espectro eletromagnético: os raios gama. O lançamento do *Fermi Gamma-ray Space Telescope* criou a oportunidade de se atingir este objetivo.

Neste trabalho, é apresentado um estudo de Sagitário A\* em raios gama. O objetivo principal é quantificar a significância da emissão desta fonte e inferir seu espectro. Para isso, serão utilizadas as *Fermi Science Tools*, um conjunto de ferramentas computacionais desenvolvidas para se estudar os dados coletados pelo *Fermi Gamma-ray Space Telescope*, além do pacote Enrico, utilizado para simplificar o uso destas ferramentas.

Após a apresentação dos objetivos, é construída uma pequena base teórica, com a intenção de se apresentar o telescópio; situar o leitor sobre o estado atual do estudo de buracos negros supermassivos e núcleos ativos de galáxia; e, finalmente, estabelecer Sagitário A\* como um buraco negro supermassivo.

Em seguida, a metodologia e, por fim, os resultados obtidos são apresentados. Dentre eles, destaca-se a identificação de uma fonte pontual de raios gama situada na região de Sagitário A\* com nível de significância de  $158\sigma$ .

## **Capítulo 2: Objetivos**

Os dados do *Fermi Gamma-ray Space Telescope* (FGST) têm sido amplamente utilizados para se estudar diversas fontes astrofísicas de raios gama. O objetivo deste trabalho é o de utilizar este observatório para se estudar Sagitário A\*, o buraco negro supermassivo no centro da Nossa Galáxia, uma fonte pontual bem conhecida nos comprimentos de onda de rádio, infravermelho e raios-X<sup>[1]</sup>.

Para se fazer isso, pretende-se atingir três objetivos. O primeiro é o de identificar se existe uma fonte pontual de raios gama correlacionada com a posição do centro galáctico. O segundo é o de caracterizar tal emissão, através da produção de imagens e espectros. O terceiro é o de produzir curvas de luz buscando por surtos de atividade nuclear ao longo do período de análise.

### **Capítulo 3: O Fermi Gamma-ray Space Telescope**

Apesar de o universo ser praticamente transparente para raios gama com energia da ordem de MeV e GeV, a atmosfera terrestre é uma barreira absorvedora muito eficiente. Desta forma, a observação direta de raios gama cósmicos é uma atividade que precisa ser realizada diretamente no espaço.

A forma como os raios gama interagem com a matéria – por espalhamento Compton, produção de pares  $e^+ e^-$ , e pelo efeito fotoelétrico – não permite que ocorram reflexão ou refração. Sendo assim, um telescópio para observação de raios gama trata-se, na prática, de um detector que se utiliza de técnicas de aceleradores de partículas adaptadas para serem utilizadas no espaço<sup>[2]</sup>.

Foi neste contexto que o FGST foi lançado em junho de 2008, com expectativa de 5 a 10 anos de vida útil.

Ele possui dois instrumentos, ilustrados na Figura 1:

- O *Large Area Telescope* (LAT) é o instrumento principal, desenvolvido para medir a direção, energia e instante de detecção de raios gama individuais com energia de 20MeV a mais de 300GeV, que, ao interagirem com o instrumento, produzem pares  $e^+ e^-$ . Sua resolução angular para um único raio gama é melhor do que  $1^\circ$ , o que permite a localização da maior parte das fontes com precisão de 10 minutos de arco. Para as fontes mais brilhantes, a precisão é melhor do que 1 minuto de arco.
- O *Gamma-Ray Burst Monitor* (GBM) é um instrumento que pode observar todo o céu (exceto a parte encoberta pela Terra). Ele é sensível a raios-X e raios gama com energias de 8keV a 40MeV.

O telescópio se aproveita dos grandes campos de visão de seus instrumentos para observar todo o céu a cada três horas. Com isso, a astrofísica de raios gama pode ser abordada em duas frentes:

- Exposição continuamente aprofundada do céu em raios gama. Os instrumentos são capazes de detectar mais fótons a cada órbita, obtendo, assim, imagens cada vez mais profundas e nítidas das fontes perenes de raios gama.
- Astronomia de raios gama ao longo do tempo. Por monitorar o cosmos continuamente, os instrumentos são sensíveis a variações no céu de raios gama, em escalas de tempo que podem ir de microssegundos a anos.

A primeira abordagem é particularmente interessante uma vez que cerca de um terço das fontes de raios gama catalogadas não possuem nenhuma emissão em outros comprimentos de onda. A observação continuada destas fontes pode levar a uma maior compreensão deste fenômeno.

Já a segunda abordagem, pode ser utilizada para o estudo dos *gamma ray bursts* (GRB). Acredita-se que os GRB sejam resultados de eventos estelares cataclísmicos.

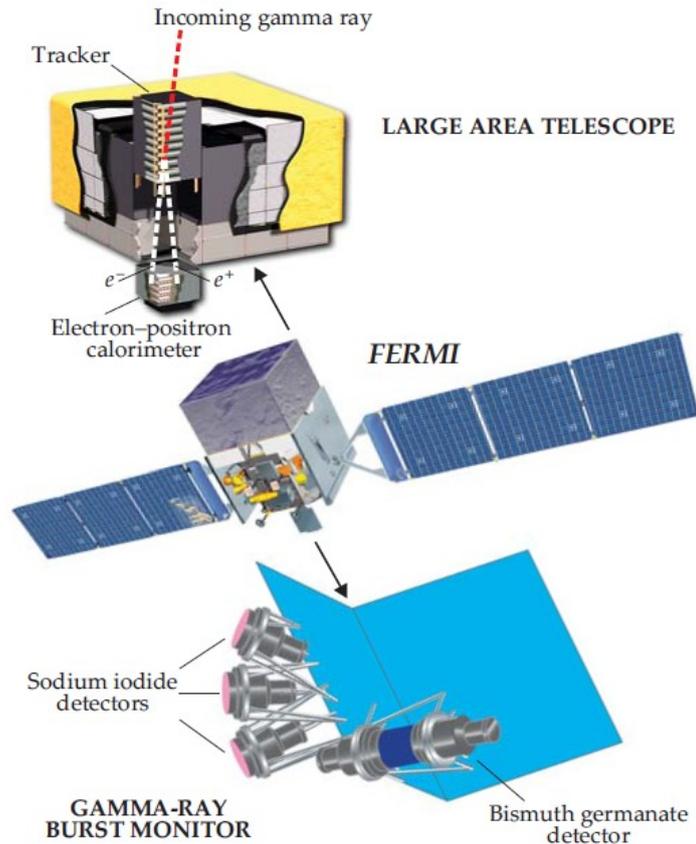


Figura 1<sup>[2]</sup>: O FGST e seus dois instrumentos científicos. O LAT mede a direção e energia de fótons com energias de 20MeV a mais de 300GeV. O GBM, foi desenhado para detectar fótons de menores energias (entre 8keV to 40MeV) originários de gamma ray bursts.

Todos os dados obtidos pelo FGST são disponibilizados para a comunidade científica imediatamente, em conjunto com softwares de análise e documentação, através das *Fermi Science Tools*, sob coordenação do *Fermi Science Support Center* (FSSC) do *Goddard Space Flight Center* da NASA.

### 3.1. A precisão do LAT

A qualidade dos dados obtidos pelo LAT do FGST é dependente da posição relativa entre o satélite e a fonte estudada e da energia dos fótons detectados. À medida que o nível de energia dos fótons captados pelo FGST aumenta, sua área efetiva (ou seja, a capacidade do telescópio de gerar imagens com nitidez) aumenta, até um ponto em que passa a diminuir. Do contrário, à medida que o ângulo entre a normal do telescópio e o objeto estudado aumenta, a área efetiva é reduzida. Os resultados podem ser vistos nos gráficos das Figuras 2 e 3.

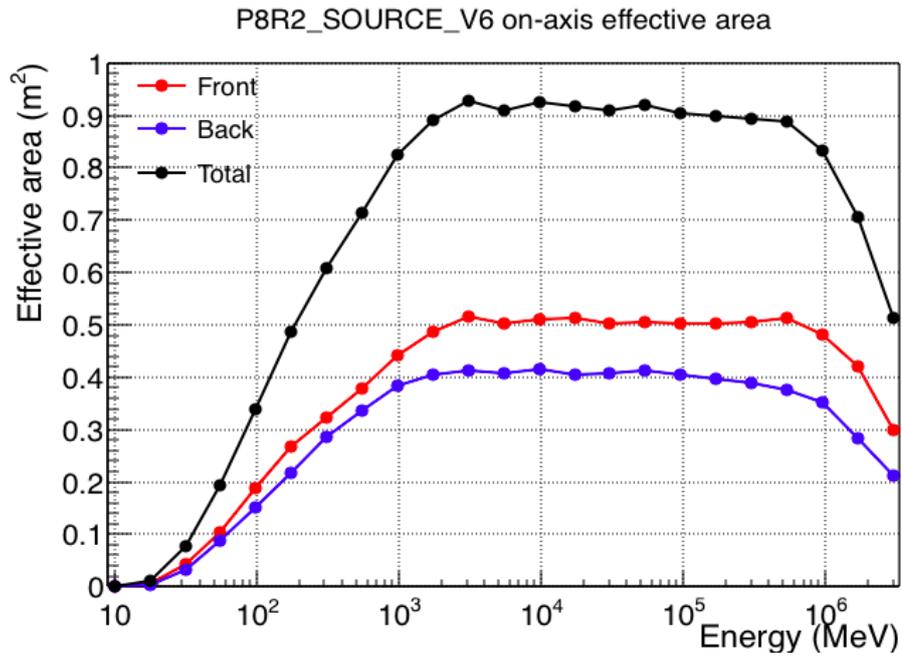


Figura 2<sup>[3]</sup>: Variação da área efetiva do FGST em função da energia dos fótons captados com incidência normal. A distinção entre Front e Back refere-se à região do LAT onde o raio gama detectado foi convertido em pares  $e^+ e^-$ . Devido a detalhes sobre a construção do LAT, a resolução angular dos fótons convertidos na região frontal é intrinsecamente melhor<sup>[4]</sup>. O resultado importante, porém, refere-se ao Total.

O tratamento destes efeitos sobre os dados, bem como os efeitos que eles causam sobre a precisão dos resultados, já está automaticamente contemplado nas *Fermi Science Tools*.

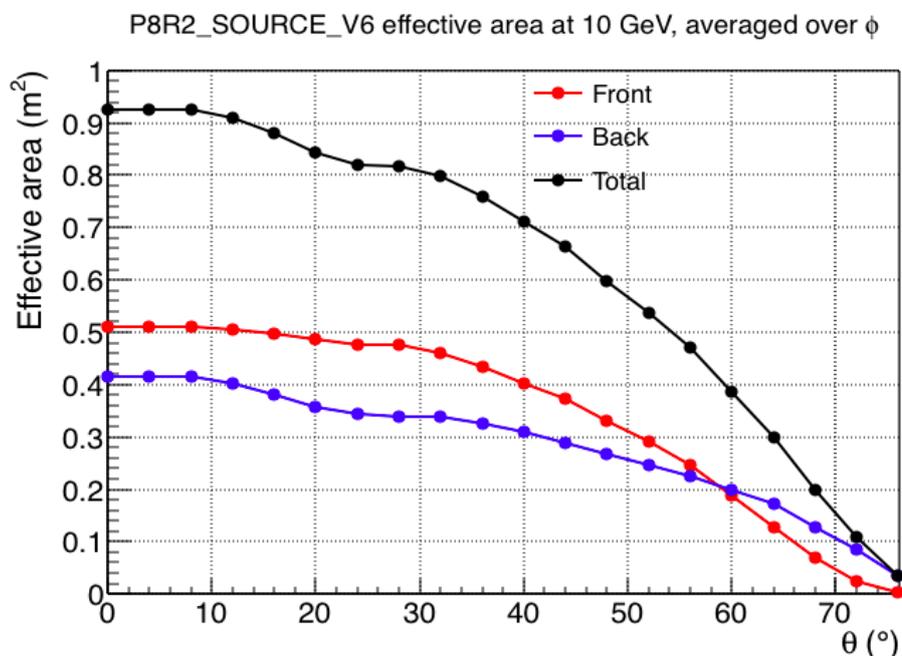


Figura 3<sup>[3]</sup>: Variação da área efetiva do FGST em função do ângulo de incidência para fótons com 10 GeV. Os comentários sobre a distinção entre Front e Back feitos na Figura 2 também valem para este gráfico.

## **Capítulo 4: Buracos negros supermassivos**

Evidências de que algum tipo de atividade violenta estava ocorrendo nos centros de galáxias já eram conhecidas há mais de meio século quando, finalmente, os quasares foram descobertos em 1963.

Utilizando o *Parkes Radio Telescope*, na Austrália, Cyril Hazard, M. B. Mackie, e John Shimmins, conseguiram determinar a localização de uma fonte de rádio, 3C 273, com precisão de alguns arcos de segundo, um grande feito para a época que só foi alcançado observando-se o momento em que a fonte era ocultada pela Lua para determinar sua localização<sup>[5]</sup>. Este resultado foi, então, combinado com imagens obtidas no visível e o único objeto coincidente com a emissão de rádio era algo parecido com uma estrela de magnitude 13.

A próxima etapa da análise foi a extração de seu espectro de luz. Isso foi feito por Maarten Schmidt<sup>[6]</sup>, utilizando o telescópio *Hale*, de 200 polegadas, do Monte Palomar. Schmidt percebeu, ao comparar o espectro obtido com o do Hidrogênio, que as linhas de emissão de 3C 273 estavam defasadas em 16% (*redshift*). Isso significava que o objeto estava a cerca de 2 bilhões de anos luz de distância. A esta distância, mesmo uma galáxia inteira seria bem menos luminosa. Este era o objeto mais luminoso até então observado. Logo, a análise do espectro de objetos semelhantes mostrou que estes também apresentavam grandes *redshifts*.

O estudo dos arquivos fotográficos mantidos pela *Harvard College Observatory* desde o século XIX revelou que a luminosidade de 3C 273 flutuava em uma escala de tempo menor do que um mês. Isso colocava um limite máximo ao seu tamanho.

Assim, foi descoberta uma classe de objetos que, a primeira vista se pareciam com estrelas comuns, mas possuíam espectro com altos *redshifts*. Estes foram chamados de *quasistellar objects*, ou objetos quase estelares. O brilho dos quasares poderia superar o de uma galáxia por um fator de 100.

Em poucos anos, as explicações mais plausíveis para as luminosidades e densidades de energia tão intensas dos quasares foram dadas através da conversão de energia gravitacional em radiação, à medida que matéria é acreta em buracos negros supermassivos<sup>[7][8]</sup>.

Os núcleos de galáxias diferem fortemente com relação ao seu nível de atividade. Um núcleo ativo de galáxia (AGN) é uma região compacta, localizada no centro de uma galáxia, que possui luminosidade muito acima da normal em pelo menos parte do espectro eletromagnético. Existem diversas classes de AGNs, cujos espectros diferem entre si devido à energia dos fótons que eles emitem: blazares (que formam uma subcategoria dos quasares), galáxias de Seyfert e rádio-galáxias são alguns exemplos. A diferença entre elas pode ser, pelo menos parcialmente, explicada pela taxa com que matéria é acreta no buraco negro e pela posição relativa entre o disco de acreção que se forma ao redor do buraco negro e o observador.

#### 4.1. Modelo unificado

Um tema recorrente no estudo dos AGNs e dos núcleos de galáxias é o desenvolvimento de um modelo unificado. Esta ideia é baseada na existência de diversas classes de AGNs. Acredita-se que as diferenças entre elas sejam oriundas da posição relativa entre o observador e o eixo de acreção do buraco negro<sup>[9][10]</sup>. De acordo com sua orientação, o observador pode ser incapaz de observar algum aspecto do AGN, ou estar em posição que favoreça a observação de outro. A Figura 4 ilustra algumas destas possibilidades.

Por exemplo, em AGNs cujo jato esteja diretamente alinhado com a Terra, pode-se observar uma flutuação violenta da fonte, que, de tão intensa, ofusca a radiação do disco de acreção e das nuvens que o cercam. Estes objetos são conhecidos como blazares, uma categoria de AGNs.

O sucesso dos modelos de classificação em função das posições leva a crer que as diferentes categorias de AGNs são, na verdade, formadas por objetos bastante similares. Estudar estas classes individualmente, porém, é bastante relevante para que se possam conhecer as diferentes características destes objetos.

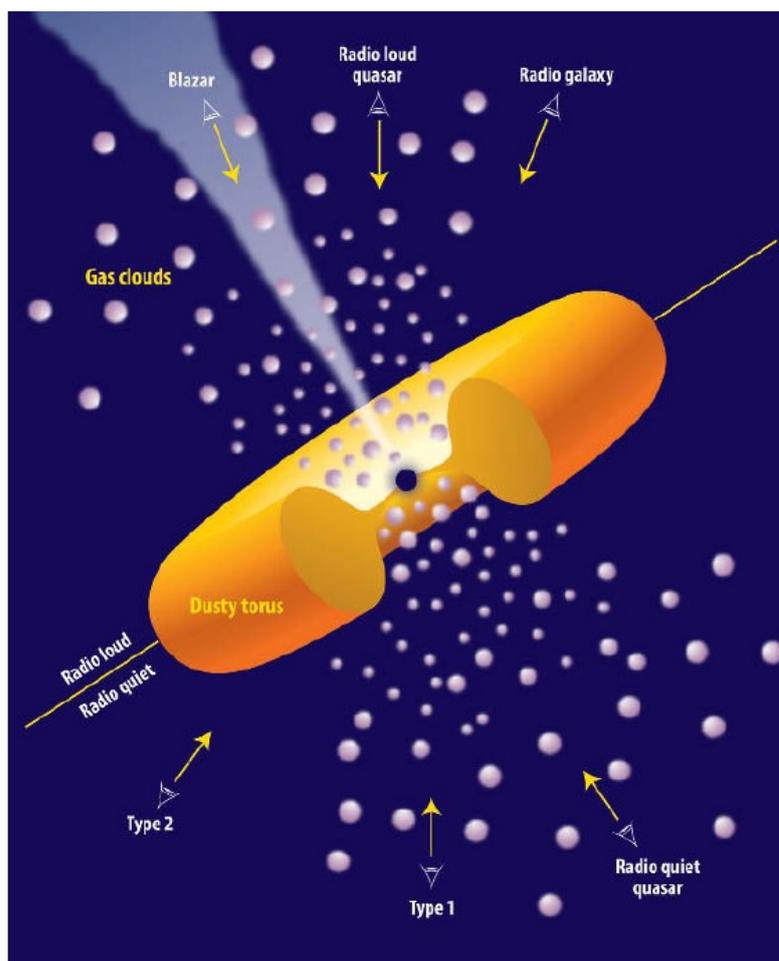


Figura 4<sup>[10][11]</sup>: Representação esquemática de um AGN, exibindo suas componentes mais importantes, as diferentes fontes de radiação e o impacto da geometria na concepção de um modelo unificado.

No caso de núcleos de galáxias não ativos, a quantidade de matéria espiralando em direção ao buraco negro é tão pequena que a emissão é desprezível em comparação com a das estrelas da própria galáxia.

Obviamente, por se tratar de um modelo (um colega chama este de “o átomo de Bohr dos buracos negros supermassivos”), ele está sujeito a diversas críticas<sup>[12]</sup>. Porém, este modelo tem forte apelo didático e tem obtido sucesso para explicar algumas das observações.

## 4.2. Buracos negros em hibernação

Tão logo a acreção de matéria em buracos negros supermassivos foi proposta como explicação para os quasares, ainda no final da década de 1960 e no início da década seguinte, foi proposto<sup>[7][13]</sup> que a maioria das galáxias – incluindo a Nossa Galáxia – deveria possuir um buraco negro supermassivo, os quais, na maior parte dos casos, são muito menos ativos do que os quasares.

Menos de 1% das galáxias do universo apresentam algum tipo de atividade em seus núcleos<sup>[14]</sup>. Isso não significa, porém, que os buracos negros supermassivos ocorram apenas nesta pequena fração de galáxias, uma vez que a presença do buraco negro não é o único requisito para que se forme um AGN: é também necessário combustível. Estimativas<sup>[14]</sup> indicam que é necessária uma taxa de acreção de cerca de uma massa solar por ano, pelo menos, em um buraco negro supermassivo para que seja exibido algum tipo de atividade. Mesmo para uma galáxia, esta não é uma quantidade pequena de matéria e é improvável que esta taxa de *inflow* seja mantida por mais do que uma pequena parcela do tempo de vida de uma galáxia<sup>[14]</sup>.

Quando o combustível é esgotado, a atividade cessa. Mas o buraco negro supermassivo continua presente no centro de praticamente todas as grandes galáxias, inclusive a Via Láctea. Suas massas (e, conseqüentemente, suas presenças) podem ser estimadas a partir de características morfológicas de suas hospedeiras<sup>[14]</sup>.

## 4.3. O espectro dos AGNs

Os AGNs podem gerar luminosidade através de dois processos, que podem operar simultaneamente: através de um disco de acreção ou por processos eletromagnéticos que retiram energia cinética rotacional do buraco negro. Como analogia para este processo, pode-se imaginar o buraco negro como a roda de um carro e a matéria que o cerca atuando como um freio que ganha energia enquanto diminui a rotação do buraco negro. Este mecanismo parece ser chave na explicação dos jatos emitidos pelos AGNs.

As propriedades dos AGNs dependem, entre outros fatores, da contribuição destes dois mecanismos de geração de energia os quais, por sua vez, dependem da taxa de acreção, do momento

angular deste material, dos campos magnéticos, da rotação do buraco negro, da sua massa, de sua posição relativa à linha de visada do observador, dentre vários outros fatores.

Os modelos existentes atualmente preveem que o pico de emissão por um AGN da energia gerada pela acreção se daria no ultravioleta. Esta faixa do espectro, porém, é de difícil detecção devido à absorção causada pelas nuvens de poeira e gás. Mesmo assim, pode-se identificar no espectro dos quasares uma concentração em torno do azul (*big blue bump*).

Mas um disco de acreção não pode explicar todas as características do espectro de um AGN. Isso porque se acredita que vários fenômenos físicos diferentes contribuem: a radiação infravermelha é emitida pelo aquecimento das nuvens de gás ao redor do buraco negro, os raios-X podem vir de uma espécie de “atmosfera” ao redor do disco (da mesma forma que a coroa solar emite raios-X), rádio e raios gama provavelmente são emitidos por jatos de radiação paralelos ao eixo de rotação do buraco negro, dentre outros. Modelos mais recentes passaram a considerar um fenômeno conhecido como “reprocessamento”: radiação emitida em um comprimento de onda pode ser interceptada pela matéria do próprio AGN e ser reemitida em outros comprimentos de onda. Estes fenômenos dão aos AGNs seu espectro não térmico, que pode ser visto na Figura 5. O grande intervalo de energia observado no espectro dos AGNs sugere que uma variedade de mecanismos de emissão estão envolvidos.

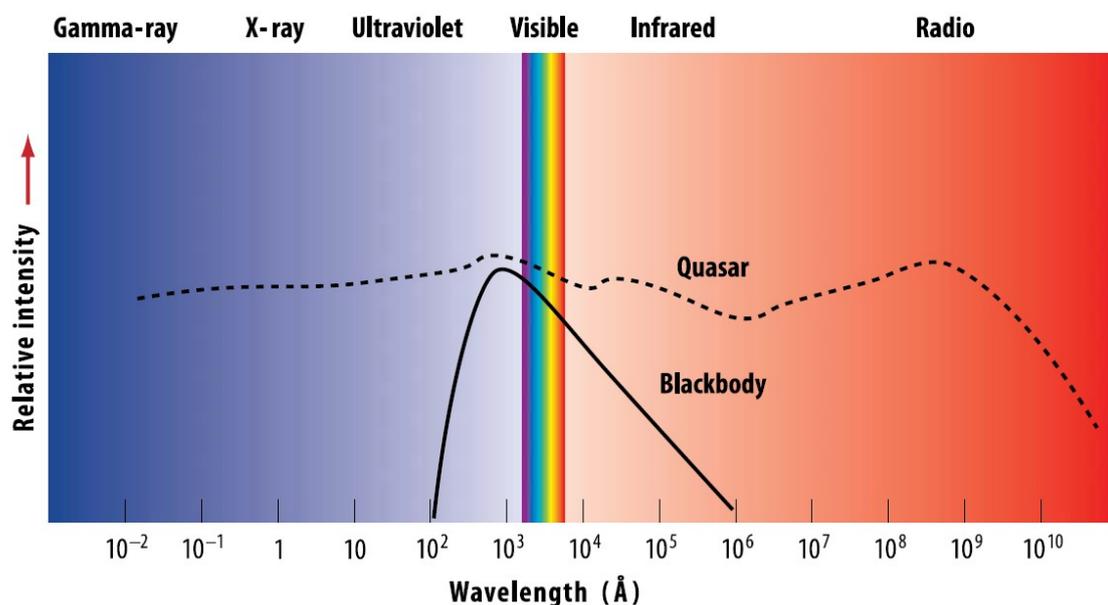


Figura 5<sup>[15]</sup>: Comparação entre o espectro de um corpo negro com o de um quasar típico. O formato da curva do quasar mostra que a energia está distribuída ao longo de vários comprimentos de onda distintos. Isso ocorre porque regiões com diferentes temperaturas contribuem para o espectro e, também, devido ao fenômeno de reprocessamento. Já o espectro do corpo negro é aquela que o quasar teria caso fossem detectados apenas os fótons emitidos pela região imediatamente ao redor do buraco negro.

Aqueles buracos negros supermassivos que se encontram cercados por muita matéria tendem a se tornar AGNs, emitindo intensa luminosidade. Já os buracos negros cuja vizinhança é mais pobre em

matéria irão liberar menos energia gravitacional e serão, portanto, menos luminosos. O buraco negro supermassivo no centro da Nossa Galáxia pertence a este grupo.

#### 4.4. Sagitário A\*

Tendo em vista a complexidade que é se estudar buracos negros supermassivos, uma boa abordagem é a empírica. E o buraco negro central no núcleo da Via Láctea é o mais próximo que se pode estudar, a apenas  $7.940 \pm 420$  pc<sup>[16]</sup>. Um dos obstáculos para isso é a forte presença de gás e poeira na linha de visada, que tem como efeito uma extinção de 25 magnitudes no visível<sup>[17]</sup>. Por isso, outros comprimentos de onda devem ser utilizados (rádio, micro-ondas, infravermelho, raios-X e raios gama).

Mas, primeiramente, devem-se considerar as principais evidências de que existe, de fato, um buraco negro supermassivo em Sagitário A\*.

Uma das melhores evidências vem do estudo da órbita da estrela S2. Esta estrela tem um período de 15,2 anos e o pericentro de sua órbita encontra-se a 120 UA de um objeto central<sup>[18]</sup>. Isso permite estimar a massa deste objeto como sendo de  $4,1 \times 10^6 M_{\odot}$ <sup>[19]</sup>. O único objeto astrofísico que pode concentrar tanta massa em um raio tão pequeno é um buraco negro supermassivo. A Figura 6 exibe a órbita de 6 estrelas (incluindo a S2) ao redor de Sagitário A\*.

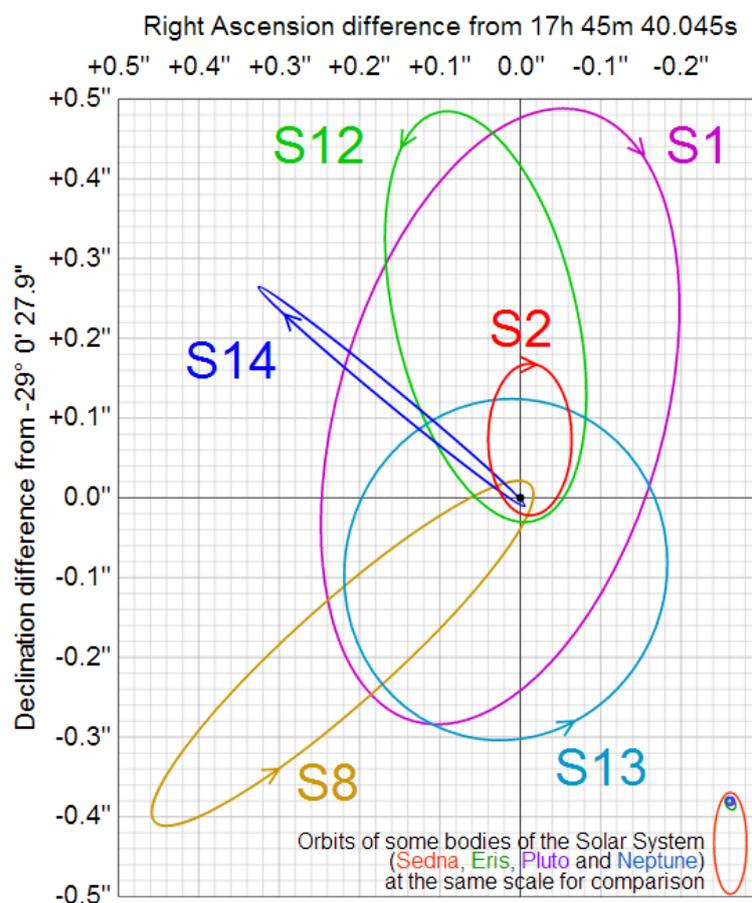


Figura 6<sup>[16]</sup>: Órbita de 6 estrelas ao redor de Sagitário A\*.

Estudos independentes também apontam a existência de um buraco negro supermassivo em Sagitário A\*, através da observação do movimento de nuvens gás<sup>[20]</sup>, da órbitas de estrelas<sup>[21]</sup> e do movimento próprio de Sagitário A\*<sup>[22]</sup>.

Apesar de estabelecida a presença de um buraco negro supermassivo em Sagitário A\*, ele não pode ser caracterizado como um AGN. O motivo para isso é a baixa taxa de acreção de matéria, que é de  $10^{-8} M_{\odot}/\text{ano}$ <sup>[23]</sup>. Mesmo assim, Sagitário A\* não é completamente inativo. Estudos do Centro Galáctico feitos pelo *Chandra X-Ray Observatory* e pelo *XMM-Newton Observatory* indicam que ocorre, em média, um *flare* por dia. Eles têm duração de cerca de uma hora e atingem picos de  $3,6 \times 10^{28} \text{ W}$ , mais de 160 vezes o nível de emissão padrão em raios-X<sup>[24]</sup>.

Existem evidências, também, de que Sagitário A\* já foi bastante mais ativo no passado. Uma das evidências de atividade passada de Sagitário A\* são as *Fermi Bubbles*. Estas, representadas na Figura 7, são duas gigantescas estruturas em raios gama que se estendem acima e abaixo do núcleo da Nossa Galáxia. Uma das possíveis explicações para elas é a emissão de jatos por Sagitário A\* há poucos milhões de anos<sup>[25][26][27]</sup>.

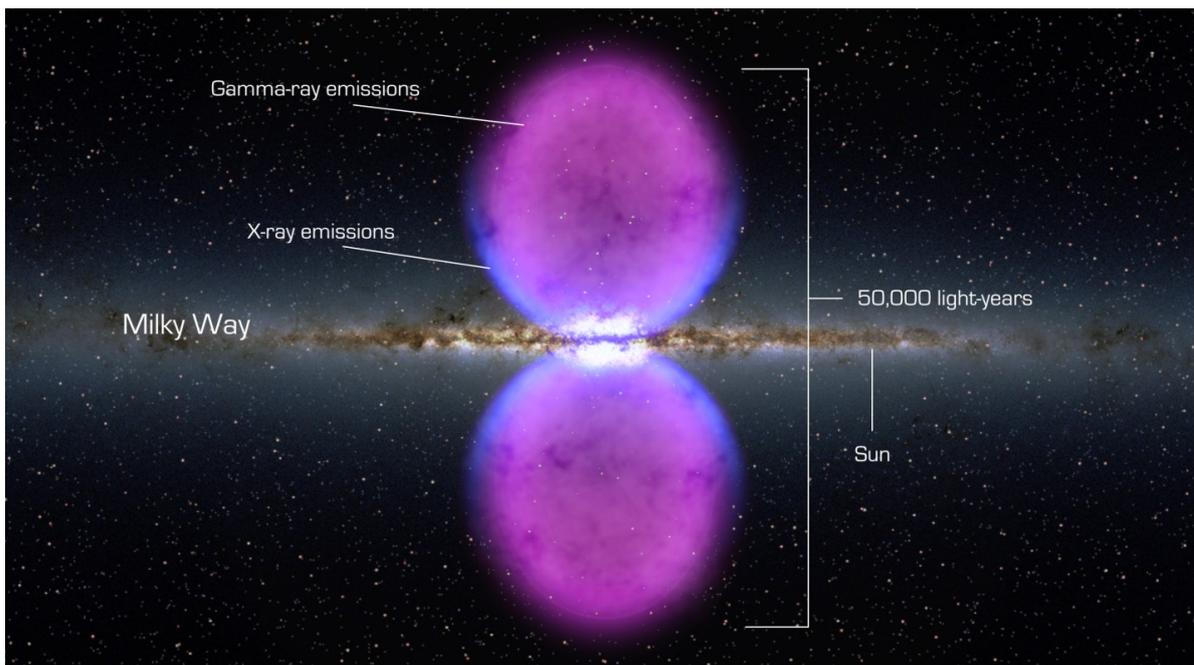


Figura 7<sup>[31]</sup>: Ilustração representando as *Fermi Bubbles*. Elas se estendem a aproximadamente  $55^\circ$  em cada hemisfério galáctico.

Mais uma evidência de um passado ativo para Sagitário A\* foi obtida pelo telescópio espacial *International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory* (INTEGRAL), que observou a interação entre raios gama, emitidos por Sagitário A\*, e a nuvem molecular gigante Sagitário B2 (distante cerca de 350 anos luz), causando a emissão de raios-X pela nuvem<sup>[28]</sup>. A luminosidade total deste *outburst*, cerca de  $1,5 \times 10^{39} \text{ erg/s}$ , é aproximadamente um milhão de vezes maior do que a emissão atual de Sagitário A\* e

comparável a de um AGN de baixa luminosidade. Observações realizadas pelo satélite de raios-X *Suzaku* confirmaram esta conclusão<sup>[29]</sup>.

Finalmente, observações do *High Energy Stereoscopic System* (HESS), conseguiram relacionar raios cósmicos galácticos com energia da ordem de alguns petaeletrons (∼10<sup>15</sup> eletrons) com uma região ao redor do Centro Galáctico<sup>[30]</sup>. Um surto de atividade de Sagitários A\* há algo entre 10<sup>6</sup> e 10<sup>7</sup> anos poderia explicar estas observações.

## **Capítulo 5: Metodologia**

Nesta seção, são descritas os dados utilizados e as ferramentas empregadas na análise de Sagitário A\* em raios gama. Para realizar este trabalho, foram utilizadas as *Fermi Science Tools*, disponibilizadas pelo FSSC, para tratamento e processamento dos dados. Para utilizar estas ferramentas de modo mais simples e eficiente, foi utilizado o pacote Enrico.

### **5.1. Dados**

Os detalhes sobre a forma como os dados são obtidos e armazenados pelo LAT podem ser encontrados no site do FSSC<sup>[32]</sup>. Nesta seção, eles são apresentados apenas superficialmente para que o leitor possa entender os critérios de seleção utilizados e, de forma geral, o processo de análise.

O LAT, que é o instrumento do FGST que será usado neste trabalho, grava eventos discretos, ou seja, leituras individuais de fótons detectados que são comparadas com simulações de forma a se reconstruir a direção e a energia de cada evento. Estes são gravados em um banco de dados e formam a principal fonte de informações para as pesquisas.

Além dos dados dos eventos, é necessário se conhecer a posição e a orientação do telescópio espacial quando eles foram detectados. Estas informações também são disponibilizadas em um arquivo que as reporta em intervalos de 30 segundos. Para se fazer uma análise, portanto, é necessário que se tenha informações tanto sobre os eventos quanto sobre a posição do telescópio. Isso pode ser obtido em uma página específico do site do FSSC<sup>[33]</sup>. Em geral, os cientistas optam por baixar e armazenar rotineiramente (uma vez por semana, por exemplo), todos os novos dados disponibilizados, de forma a agilizar as análises. Então, quando se faz uma nova pesquisa, basta selecionar os dados de interesse.

Neste trabalho, os dados foram selecionados de acordo com os seguintes critérios:

- Posição central:  $\alpha = 17^{\text{h}} 45^{\text{m}} 40,04^{\text{s}}$ ,  $\delta = -29^{\circ} 0' 28.118''$ , escolhida de forma a centralizar a área de interesse na posição de Sagitário A\*<sup>[22]</sup>.

- Raio da região de interesse: 15°. Como a PSF do LAT é relativamente grande<sup>[34]</sup>, é necessário se analisar não apenas a região imediatamente ao redor da fonte estudada, mas também as fontes próximas. Por isso, foi escolhida uma área com raio de 15° ao redor das coordenadas determinadas anteriormente. O valor escolhido seguiu orientação do próprio FSSC<sup>[35]</sup>.
- Período de coleta de dados: de 2008-08-04 15:43:37 UTC até 2016-04-10 00:00:00 UTC, cobrindo praticamente todo o período de dados disponíveis desde o início da operação do LAT até o momento do processamento, totalizando mais de 7 anos e 8 meses de informações.
- Intervalo de energia: de 100 MeV a 300 GeV.

## 5.2. Fermi Science Tools

As *Fermi Science Tools* são um conjunto de ferramentas computacionais desenvolvidas em uma colaboração entre o FSSC e a equipe de instrumentação do LAT para se trabalhar com os dados disponibilizados por eles e já mencionados acima. Todas as etapas deste projeto foram feitas utilizando a versão *Pass 8*<sup>[36]</sup> das *Fermi Science Tools*, lançada em 24/06/2015. O gráfico exibido na Figura 8 ilustra as principais ferramentas.

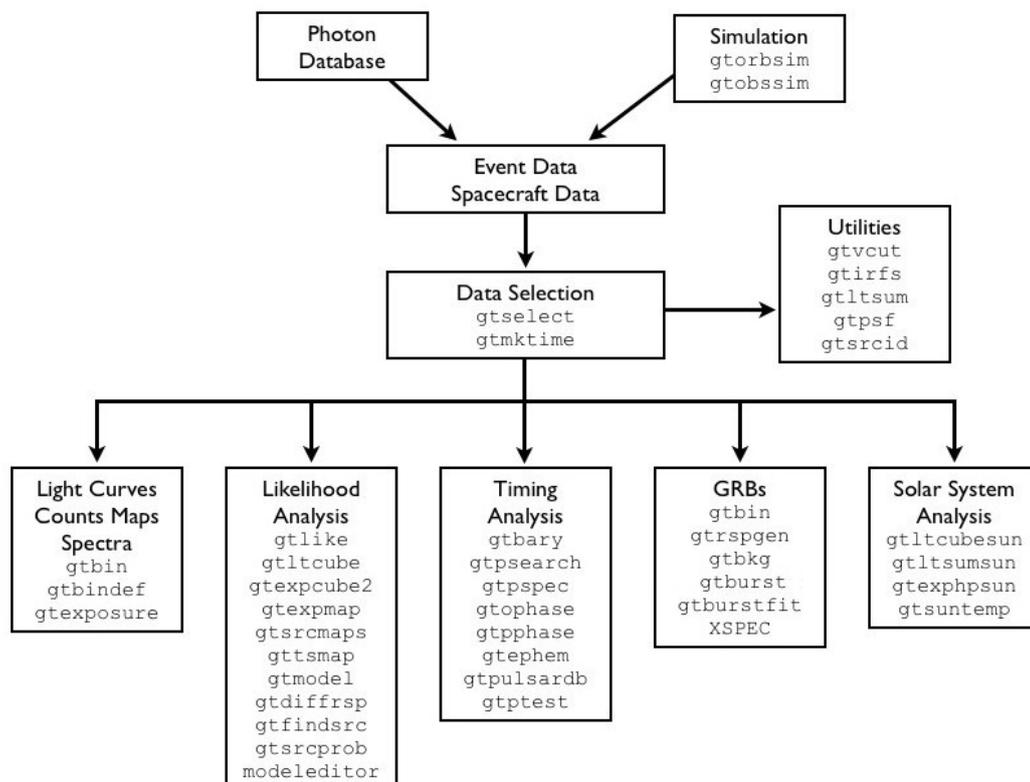


Figura 8<sup>[37]</sup>: Gráfico com as principais ferramentas computacionais das Fermi Science Tools.

Os conteúdos das caixas da Figura 8 correspondem às ferramentas. A ferramenta *gtselect*, por exemplo, é usada para se fazer cortes na base de dados de acordo com o momento da tomada de cada

dado, a energia dos fótons, a posição do objeto com relação ao satélite, etc.. Em minha monografia de Trabalho de Graduação I, vide Apêndice, o uso de várias dessas ferramentas é explicado detalhadamente. Mais detalhes sobre todas elas podem ser obtidos em página específica do FSSC<sup>[37]</sup>.

As *Fermi Science Tools* não foram usadas diretamente. O uso de todas elas foi intermediado pelo pacote Enrico, que será apresentado na seção seguinte. Antes, porém, pensando em garantir a reprodutibilidade dos resultados aqui apresentados, é importante apresentar os modelos de fontes de raios gama utilizados neste projeto.

Para se trabalhar os dados e se construir um modelo para a emissão em raios gama de uma fonte estudada, é necessário que sejam usados modelos já desenvolvidos das fontes catalogadas que façam parte da região de interesse. Este catálogo é disponibilizado pelo FSSC com o nome de 3FGL<sup>[38][39]</sup> (pois é o 3º catálogo a ser disponibilizado desde o início da missão).

### 5.3. Enrico

O Enrico<sup>[40]</sup> é um pacote que utiliza linguagem Python para simplificar a aplicação das *Fermi Science Tools*. Ele agrupa as ferramentas apresentadas na Figura 8 em códigos que as executam em determinadas sequências. Assim, o usuário precisa usar apenas um comando no Enrico para utilizar uma série de ferramentas das *Fermi Science Tools*.

Para utilizar o Enrico, o usuário precisa baixar e instalar as ferramentas, usando tutorial disponibilizado na internet<sup>[41]</sup>; montar um arquivo de configuração onde os parâmetros de sua análise devem ser explicitados (tais como os parâmetros especificados na seção ‘Dados’, acima) e a localização dos arquivos com os eventos de detecção dos fótons e da posição do satélite (também apresentados na seção ‘Dados’); e executar os comandos desejados. Um tutorial com todos os comandos possíveis encontra-se na página do Enrico na internet<sup>[42]</sup>.

Para se criar um modelo matemático que explique a emissão de uma fonte pontual na região de Sagitário A\* através do método de *Maximum Likelihood Estimation*<sup>[43]</sup> (Método da Máxima Verossimilhança), deve-se partir de um mapa de contagens dos fótons desta área. Para isso, é necessário se usar dois comandos do Enrico. O primeiro é o comando *enrico\_xml*, que monta um arquivo .xml com o modelo do céu em raios gama. Este arquivo é usado ao se executar o segundo comando, *enrico\_sed*. Este é o responsável por encontrar os parâmetros que melhor se ajustam ao modelo escolhido (pode ser uma lei de potências, uma lei de potências com duas componentes, uma gaussiana, dentre outros modelos<sup>[44]</sup>).

Para se gerar um *Test Statistic map* (mapa de significância) que permita localizar a posição exata de uma fonte de raios gama em determinada posição estudada, o comando usado é

*enrico\_tsmmap*. Este comando calcula a significância estatística de existir uma fonte em cada *bin* da região de interesse estudada.

E, finalmente, para se construir a curva de luz de Sagitário A\* durante os mais de 7 anos e 8 meses de dados analisados, o comando *enrico\_lc* deve ser empregado.

Os resultados obtidos com o uso destas ferramentas encontram-se na próxima seção.

## **Capítulo 6: Resultados**

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos com o projeto. Em primeiro lugar, será apresentado o resultado da *Likelihood Analysis*, que tem por objetivo construir um modelo que se ajuste aos dados. Nesta etapa, também, é exibido um *count map* com os fótons utilizados na análise. Em seguida, tentou-se produzir um *Test Statistic map (TS map)*, para que fosse possível localizar a posição de uma fonte de raio gama na região de interesse, mas isso não foi possível dentro do prazo disponível para produção desta Monografia. Finalmente, foi feito um esforço pra se produzir uma curva de luz da fonte estudada, com o intuito de buscar por variações na taxa de emissão de raios gama desta fonte ao longo do período de análise.

### **6.1. Likelihood Analysis**

A *likelihood* (verossimilhança) é uma medida da probabilidade de se obter os dados a partir de um determinado modelo. No caso deste projeto, o modelo é a distribuição das fontes de raios gama na região centrada em Sagitário A\*, o que inclui suas intensidades e espectros. É calculado um modelo para o espectro de cada uma das fontes, inclusive para Sagitário A\*, que é considerada como presente na região central da área de interesse. Já os dados são as contagens de fótons obtidas pelo LAT. Os resultados estão exibidos na Figura 9.

A Figura 9(a) mostra o mapa de contagens com os fótons entre 100MeV e 300GeV detectados no período de análise na região centrada em Sagitário A\*. Estes são os dados. Na Figura 9(b), encontra-se o modelo total obtido pelo método de *Maximum Likelihood Estimation*. Na construção do modelo, é levado em consideração o catálogo de fontes conhecidas para a região. Elas estão demarcadas com círculos e com seus respectivos nomes no catálogo 3FGL. Ao todo foram identificadas 135 fontes. Já a Figura 9(c) mostra os resíduos da comparação entre os dados e o modelo.

Repare que, pelo menos para a região mais próxima ao centro da imagem (onde se encontra Sagitário A\*), a qualidade do ajuste é boa, o que é evidenciado por uma região em que os resíduos são bastante homogêneos.

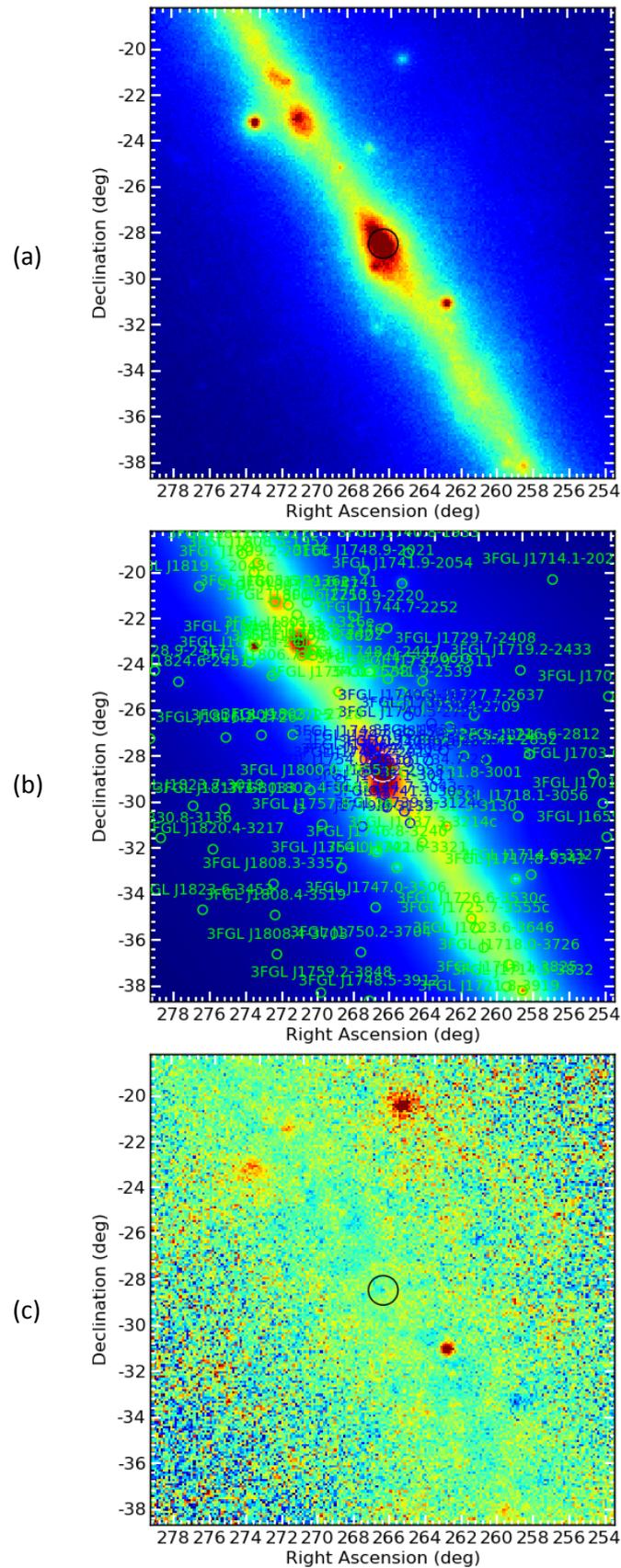


Figura 9: (a) Mapa de contagens com os fótons entre 100MeV e 300GeV detectados no período de análise na região centrada em Sagitário A\*. (b) Modelo de lei de potências ajustado pelo método de Maximum Likelihood Estimation para os espectros das fontes. (c) Resíduos obtidos na comparação entre o modelo e os dados.

Vale a pena mencionar a existência de dois pontos mais avermelhados (com coordenadas aproximadas:  $\alpha = 263^\circ$ ,  $\delta = -31^\circ$  e  $\alpha = 266^\circ$ ,  $\delta = -21^\circ$ ) que se destacam na Figura 9(c) para os quais, certamente, o modelo não se ajustou perfeitamente. A primeira suspeita era a de que se tratasse de duas fontes não catalogadas. Porém, esta suspeita pôde ser descartada facilmente ao se consultar as coordenadas delas no catálogo 3FGL.

O motivo do modelo não ter se ajustado a elas, portanto, só pode ser causado por uma variação no fluxo de ambas desde que o catálogo foi criado. Este catálogo foi criado com os 4 primeiros anos de dados do FGST<sup>[39]</sup>, cobrindo o período entre 4/08/2008 e 31/07/2012. Desde então, é bastante provável que o fluxo oriundo destas fontes tenha variado, de forma que o catálogo não esteja mais atualizado. Esta suspeita, aliás, é corroborada quando se compara as Figuras 9(a) e 9(b). É possível reparar que ambas as fontes são mais intensas na Figura 9(a), onde estão os dados observacionais, do que na Figura 9(b), onde está o modelo. Mesmo assim, pode-se considerar que o modelo está bem ajustado aos dados.

Existem formas de melhorar ainda mais este ajuste. Quando um modelo é criado, cada fonte é ajustada com um espectro que, em geral (mas nem sempre), segue uma lei de potência. O Enrico, automaticamente, fixa os parâmetros sugeridos pelo catálogo 3FGL para a função que modela seus espectros de todas as fontes que se encontram a mais de  $3^\circ$  de distância do centro da imagem, que é o caso de ambas. Porém, é possível instruir o Enrico a não fixar os parâmetros destas duas fontes em particular, deixando-os variar até que se encontrem valores que permitam o melhor ajuste. Isso certamente melhoraria o ajuste na região destas fontes. Mas, o impacto sobre a qualidade do ajuste na região que realmente importa (aquela a até  $3^\circ$  de Sagitário A\*) seria muito pouco afetado. Por isso, optou-se por, pelo menos nesta etapa do projeto, não realizar esta melhoria.

O gráfico exibido na Figura 10 mostra a comparação entre os dados e o modelo. Este gráfico indica que as demais fontes dominam a emissão em raios gama para a área estudada. É interessante observar, também, que o número de fótons coletados para as maiores energias é muito pequeno se comparado com as observações mais usuais em Astronomia.

Por sua vez, o gráfico da Figura 11 compara o modelo obtido (a soma de todas as fontes, inclusive Sagitário A\*) com os dados. É importante ressaltar que, neste gráfico, fica claro que o modelo se desvia dos dados nos extremos do intervalo de energia avaliado. Em ambos os casos, pelo menos parte deste desvio pode ter sido ocasionado pela menor precisão do LAT para estas energias, em virtude da diminuição da área efetiva do telescópio (vide Figura 2). Além disso, para as energias mais altas, a quantidade de fótons é relativamente pequena, o que também torna as medidas menos precisas.

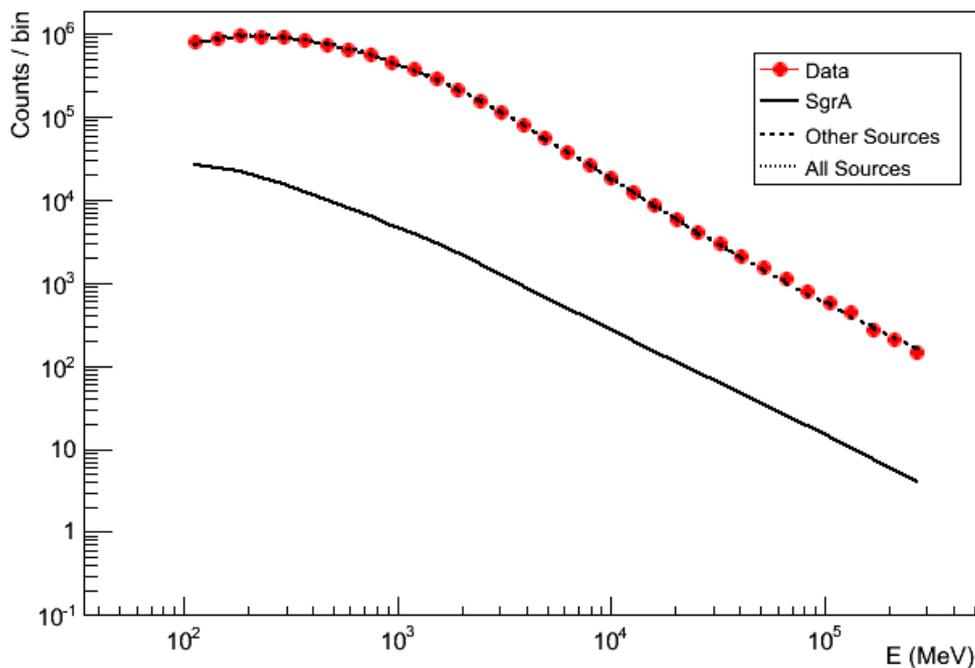


Figura 10: Resultado do ajuste pelo método de Maximum Likelihood Estimation. Os pontos em vermelho correspondem aos dados. As linhas pretas correspondem ao modelo e estão separadas em 3: Sagitário A\* (linha preta contínua), as demais fontes da área estudada (linha preta tracejada) e o total (linha preta pontilhada). Estas duas últimas praticamente se sobrepõem.

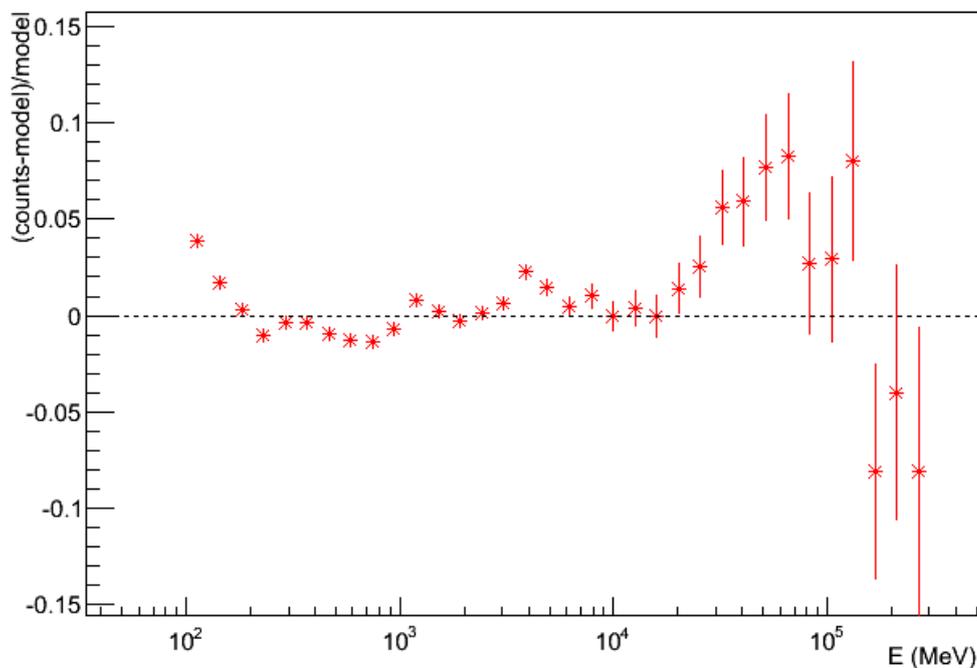


Figura 11: Comparação entre o modelo gerado e os dados obtidos. Repare que, para os extremos de energia, o modelo se desvia um pouco dos dados. Isso pode ser explicado pela diminuição da área efetiva do LAT nestas regiões do espectro. Para as maiores energias, a pequena quantidade de fótons também pode ter contribuído.

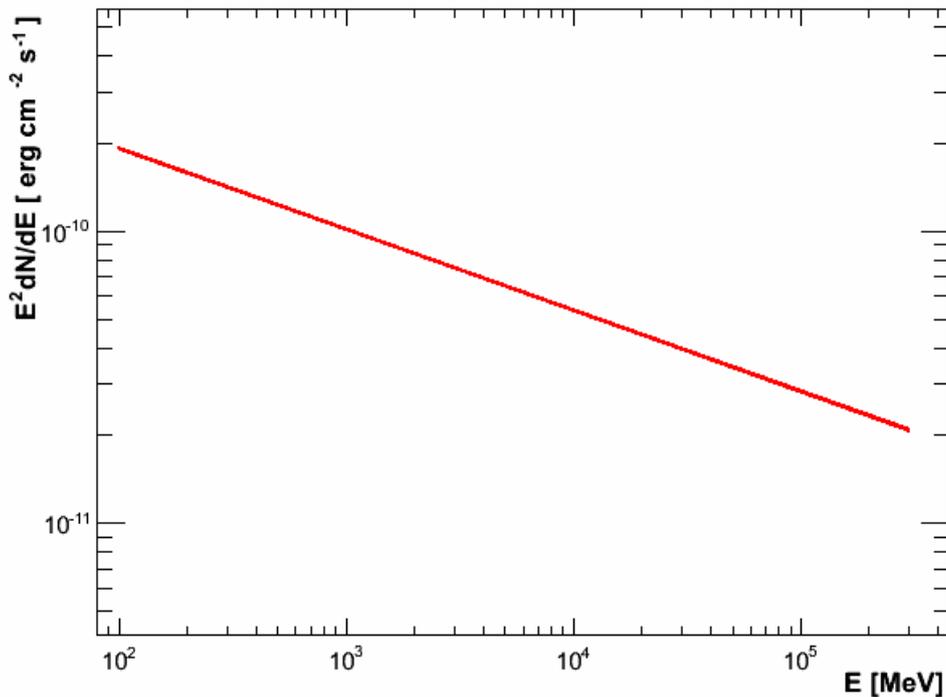


Figura 12: Modelo para o fluxo de energia obtido para Sagitário A\*.

Acredita-se, também, que este resultado pode ser melhorado, por exemplo, permitindo os parâmetros dos modelos daquelas duas fontes já mencionadas flutuarem livremente durante o processo de ajuste. Uma busca mais minuciosa por outras fontes que também não tenham sido bem ajustadas pode levantar ainda mais candidatas a terem seus parâmetros “liberados”. Porém, como o tempo disponível para o projeto é curto, optou-se por não realizar tais melhorias, ainda mais depois de avaliar o valor da significância do ajuste, que é bastante alta e será exibida mais adiante.

Finalmente, chega-se ao modelo encontrado para Sagitário A\*. Para ele, foi usada uma lei de potências para descrever o espectro, de acordo com a relação fornecida pelo FSSC<sup>[45]</sup>:

$$\frac{dN}{dE} = 7,55 \times 10^{-12} \times \left( \frac{E}{2545,5} \right)^{-2,278}$$

onde N corresponde ao número de contagens de fótons para cada valor de energia (E) e a grandeza  $dN/dE$  é o fluxo monoenergético de fótons, dado em  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MeV}^{-1}$ .

A Figura 12 apresenta um gráfico que mostra o modelo do fluxo de energia para Sagitário A\* em raios gama de 100 MeV a 300 GeV.

Finalmente, para se avaliar objetivamente a qualidade do ajuste feito, o Enrico fornece o valor do *Test Statistic*<sup>[46]</sup> (TS) obtido para o modelo de Sagitário A\*. Este valor mede a concordância entre o modelo e os dados e pode ser usado para rejeitar a hipótese nula (de que o modelo não representa os

dados). De uma forma geral, o TS é aproximadamente igual ao quadrado da significância estatística do ajuste<sup>[47]</sup>.

O TS encontrado para o modelo foi de 25043. Ou seja, a significância é de  $158\sigma$ , um valor alto o suficiente para se rejeitar a hipótese nula e afirmar que o modelo de uma fonte pontual nas coordenadas de Sagitário A\* é bom para explicar os dados.

Este resultado, porém, não é a significância da posição da fonte. Ele é apenas a significância do modelo, supondo uma fonte pontual no centro da área estudada. Para se encontrar a significância da posição da fonte (que pode estar desviada da posição central), é necessário que a área estudada seja dividida em um *grid* e que seja calculado o *maximum likelihood* para cada campo dele. A este mapa de significâncias estatísticas é dado o nome de *Test Statistic map (TS map)*, que é o tema da próxima seção.

## 6.2. TS map

O mapa de significância, que determina a posição da fonte, é feito dividindo-se a área estudada em um *grid* e calculando-se o TS de que a fonte encontra-se dentro de cada campo deste *grid*. O resultado é dado em três dimensões: declinação, ascensão reta e TS. Assim, o pixel que apresentar o maior TS é aquele onde há maior probabilidade de se encontrar a fonte. A significância desta afirmação é dada pela raiz quadrada do TS.

No caso deste projeto, o objetivo inicial era dividir a área estudada em um *grid* de 50 por 50 pixels (2.500 campos no total) para que esta atividade fosse feita. Era esperado que a região mais central da imagem apresentasse os pixels com maior TS. Em seguida, se fosse possível, seria feita uma segunda análise, desta vez dividindo a área em um *grid* de 100 por 100 pixels (10.000 campos no total). A vantagem desta nova divisão seria a de fornecer a posição da fonte com maior precisão. O risco seria o de se trabalhar com contagens muito pequenas de fótons em alguns dos pixels, o que levaria a um aumento nas incertezas envolvidas. Por isso a abordagem mais conservadora a princípio.

Pela descrição acima, percebe-se claramente que este é um processo que demanda muitos recursos computacionais. Por isso, objetivava-se realizar este processo no *cluster* Alphacrucis do IAG. A instalação das *Fermi Science Tools* no *cluster*, porém, se mostrou mais complexa do que o esperado. Desta forma, ela ainda não foi finalizada até o encerramento desta Monografia.

Ainda se tentou realizar o processo em um *desktop* poderoso, mas o tempo de processamento superava 450 dias para o campo com 2.500 pixels. Vale ressaltar que para outras fontes, especialmente aquelas mais isoladas de outras emissoras de raios gama, o tempo de processamento para se gerar um *TS map* de dimensões parecidas, usando a mesma máquina, foi significativamente menor (cerca de 6 dias). Isso ocorre porque estas regiões são bastante mais simples e, também, porque o período de análise era menor do que os 7 anos e 8 meses utilizados aqui (o que significa menos dados). Assim,

optou-se por encerrar esta etapa do projeto, e não fornecer a posição exata da fonte de raios gama identificada na etapa anterior.

### 6.3. Curva de luz

Nesta etapa do projeto, o interesse é estudar a variação da intensidade da fonte ao longo do tempo. Para isso, os mais de 7 anos e 8 meses de dados foram divididos em *bins* de 30 dias.

Esta também é uma etapa que exige muitos recursos computacionais. Até a data de entrega deste trabalho, o processo que geraria esta curva de luz ainda estava rodando. A previsão de encerramento indicava, ainda, mais 3 semanas. Porém, esta previsão (fornecida pelo próprio Enrico) é conhecida por ser muito grosseira. A experiência adquirida na geração de outras curvas de luz indica que é bastante possível que o processo se encerre ao longo da próxima semana, de forma que os resultados possam ser exibidos na apresentação deste projeto (marcada para 24/06/2016).

Ainda em virtude da escassez de recursos computacionais, neste trabalho, não será realizado nenhum estudo da curva de luz de Sagitário A\* com maior resolução temporal. Porém, os resultados que estão sendo preparados podem ser usados como indicador de períodos em que Sagitário A\* esteve mais ativo e que devem ser estudados com mais detalhes quando as *Fermi Science Tools* forem instaladas no cluster Alphacrucis.

## **Capítulo 7: Próximos passos**

Em algumas etapas deste relatório, foram mencionadas melhorias que poderiam ser feitas no projeto de forma a se aprimorar ou complementar os resultados obtidos. Nesta seção, optou-se por apresentar os principais aperfeiçoamentos que podem ser feitos, uma vez que este projeto será continuado e seus resultados expostos na XL Reunião Anual da Sociedade Astronômica Brasileira, a ser realizado em agosto deste ano.

Na construção do modelo pelo método de *Maximum Likelihood Estimation*, aquelas duas fontes cujos fluxos variaram depois da elaboração do catálogo 3FGL podem ser encaradas com maior cuidado, permitindo que os parâmetros dos modelos que as caracterizam flutuem de forma a se maximizar a *likelihood* (como já foi dito, para se ganhar tempo de processamento, estes parâmetros são mantidos fixos para fontes a mais de 3° de distância do centro da imagem). Aliás, uma análise minuciosa dos resíduos (Figura 9(c)) também pode indicar outras fontes candidatas ao mesmo tratamento.

Outra melhoria que pode ser feita é a de se testar outros modelos, alternativos à lei de potências, para Sagitário A\*. Ainda que este costume ser o melhor modelo e o nível de significância

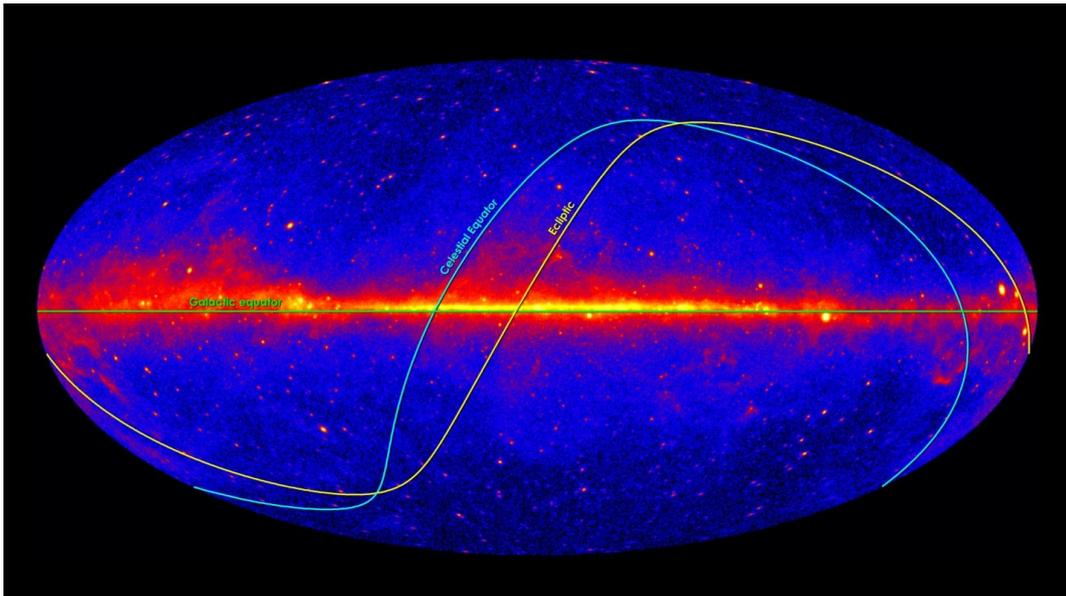
obtido corrobora esta afirmação, é possível que algum outro modelo seja mais adequado. Uma lista dos modelos mais usados se encontra no site do FSSC<sup>[44]</sup>.

Além disso, em todas as análises acima, Sagitário A\* foi encarada como uma fonte pontual de raios gama. Porém, as *Fermi Science Tools* permitem caracterizar uma possível extensão espacial da fonte. As dificuldades de processamento, porém, são bem maiores, neste caso. Por isso, neste projeto, optou-se por não fazê-lo agora.

Também já foi mencionada a importância de se construir um *TS map*, de forma a se localizar a posição da fonte pontual de raios gama detectada pelo *Maximum Likelihood Estimation*. Isso pode ser feito, a princípio, com uma resolução menor (por exemplo, usando um *grid* de 50x 50 pixels sobre a região estudada) e, em seguida, com uma resolução tão grande quanto permitido pela quantidade de dados (100 x 100 pixels pode ser um tamanho próximo do ideal, de acordo com a experiência adquirida com *TS maps* feitos para outras fontes).

Finalmente, quanto à curva de luz, a melhoria mais óbvia é o aumento da resolução dos *bins* temporais. Estudos indicam que a duração de um *flare* de Sagitário A\* em raios-X é da ordem de 3000 segundos<sup>[24][48]</sup>, sendo assim, é importante que os *bins* de tempo utilizados na curva de luz cheguem próximos a este valor. Isso porém, pode ser impossível devido à baixa quantidade de fótons de raios gama detectados. A melhor abordagem, neste caso, pode ser a de se trabalhar inicialmente com *bins* maiores (de algumas dezenas de dias), para se identificar períodos de maior intensidade que, depois, podem ser estudados com maior resolução.

Outra melhoria importante para a curva de luz envolve considerar o impacto da emissão solar sobre os dados. As erupções solares são conhecidas fontes de raios gama<sup>[49]</sup> e, quando ocorrem próximas a uma fonte estudada, elas podem contaminar os resultados. O FSSC indica que esta influência pode chegar a até 10° de distância do sol. Desta forma, um aumento no fluxo de raios gama de uma fonte estudada que esteja dentro desta área de influência do Sol deve ser visto com cautela. Por isso, é importante apontar em qualquer curva de luz feita para Sagitário A\* aqueles momentos em que o Sol, percorrendo sua trajetória anual, exibida na Figura 13, esteja próximo da fonte.



(Crédito: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration)

Figura 13<sup>[50]</sup>: A linha amarela representa o caminho anual do Sol. Sua posição deve ser levada em consideração quando é feita uma curva de luz de alguma região que esteja a menos de  $10^\circ$  de distância.

Todas estas melhorias, entretanto, incrementariam significativamente o tempo necessário de processamento de dados e análise. Por isso, elas só podem ser colocadas em prática após a instalação das *Fermi Science Tools* no cluster Alphacrucis.

## **Capítulo 8: Conclusões**

Neste projeto, ainda que nem todos os objetivos tenham sido atingidos até este momento, foi possível identificar uma fonte pontual de raios gama, com  $158\sigma$  de significância, na região de Sagitário A\*. Este era um dos principais objetivos do projeto. Ainda assim, a identificação desta fonte de tal radiação não significa necessariamente que ele provenha de material que está sendo acretado pelo buraco negro supermassivo presente em Sagitário A\*. Outras fontes presentes na região podem ser as responsáveis pela detecção, tais como: pulsares, AGNs que estejam alinhados com o centro da galáxia, aniquilação de matéria escura, etc..

Os objetivos ainda não alcançados neste projeto poderiam ajudar a correlacionar a fonte aqui identificada com Sagitário A\*. No caso do *TS map*, a determinação mais exata da posição da fonte medida poderia já descartar a hipótese de que ela esteja no centro de Nossa Galáxia. Ou, do contrário, poderia reforçar esta suposição.

No caso da curva de luz, picos de emissão em raios gama poderiam ser relacionados com picos de emissão em outros comprimentos de onda (em particular, raios-X) ocorridos simultaneamente e cuja origem estão bem identificadas<sup>[48]</sup> como sendo Sagitário A\*.

Os próximos passos deste projeto consistem em realizar pelo menos parte das melhorias sugeridas na seção anterior, de forma a se obter resultados bem mais precisos e significativos.

Num prazo mais longo, outros aspectos ajudarão a se obter resultados ainda mais significativos para a astronomia de altas energias. Em primeiro lugar, a simples passagem do tempo propicia a coleta de mais dados e, levando-se em consideração a escassez de fótons de raios gama em boa parte das observações (em particular, para maiores energias), esta é uma notícia bastante bem vinda. Além disso, está em desenvolvimento um novo catálogo de fontes de raios gama (o 4FGL<sup>[51]</sup>), que será feito com dados dos primeiros 7 anos de observações do LAT e, além de possuir muito mais fontes, terá informações bem mais precisas. Estas melhorias contribuirão expressivamente para as investigações apresentadas neste relatório e para se entender melhor o universo em raios gama.

## **Referências**

- [1] Begelman, M.; Rees, M., *Gravity's Fatal Attraction, Black Holes in the Universe, Cambridge University Press*, página 102 (2010)
- [2] Thompson, D. J. et al., *Exploring the Universe With the Fermi GammaRay Space Telescope, Physics Today*, 65, 39, página 40 (2012)
- [3] *Fermi LAT Performance* (acessado em 07/06/2016):  
[http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat\\_Performance.htm](http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat_Performance.htm)
- [4] Atwood et al., *The Large Area Telescope on the Fermi GammaRay Space Telescope Mission, The Astrophysical Journal* (2009)
- [5] Hazard, C.; Mackey, M.B.; & Shimmins, A.J., *Investigation of the Radio Source 3C 273 by the Method of Lunar Occultations, Nature*, Volume 197, Issue 4872, pp. 1037 (1963)
- [6] Schmidt, M., *3C 273: A Star-Like Object with Large Red-Shift, Nature*, Volume 197, Issue 4872, pp. 1040 (1963)
- [7] Lynden-Bell, D., *Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars, Nature*, Volume 223, 690 - 694 (1969)
- [8] Rees, M. J., *Black Hole Models for Active Galactic Nuclei, Annual review of astronomy and astrophysics*, Volume 22 (1984)
- [9] Antonucci, R., *Unified Models for Active Galactic Nuclei and Quasars, Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 31 (1993)
- [10] Urry, P.; Padovani, P., *Unified schemes for radioloud AGN, Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 107, Nº. 715 (1995)

- [11] Begelman, M.; Rees, M., *Gravity's Fatal Attraction, Black Holes in the Universe, Cambridge University Press*, página 123 (2010)
- [12] Netzer, H., *Revisiting the Unified Model of Active Galactic Nuclei, Annual Review of Astronomy and Astrophysics* (2015)
- [13] Lynden-Bell, D.; Rees, M. J., *On quasars, dust and the galactic centre, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 152, p. 461 (1971)
- [14] Begelman, M.; Rees, M., *Gravity's Fatal Attraction, Black Holes in the Universe, Cambridge University Press*, página 180 (2010)
- [15] Begelman, M.; Rees, M., *Gravity's Fatal Attraction, Black Holes in the Universe, Cambridge University Press*, página 116 (2010)
- [16] Eisenhauer, F. et al., *SINFONI in the Galactic Center: Young Stars and Infrared Flares in the Central Light-Month, The Astrophysical Journal*, Vol. 628 (2005)
- [17] Osterbrock, D. E.; Ferland, G. J., *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei, University Science Books*, página 390 (2006)
- [18] Schödel, R. et al., *Closest Star Seen Orbiting the Supermassive Black Hole at the Centre of the Milky Way, Nature*, Volume 419 (2002)
- [19] Ghez, A. M. et al., *Measuring Distance and Properties of the Milky Way's Central Supermassive Black Hole with Stellar Orbits, Astrophysical Journal* (2008)
- [20] Roberts, D. A.; Yusef-Zadeh, F.; Goss W. M., *Kinematics of the ionized gas in Sagittarius A West: Mass estimates of the inner 0.13 parsecs of the Galaxy, Astrophysical Journal*, Vol. 459 (1996)
- [21] Gillessen, S. et. al., *Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center, Astrophysical Journal*, Vol. 692 (2009)
- [22] Reid, M. J.; Brunthaler A., *The proper motion of Sagittarius A\*. II. The mass of Sagittarius A\*, The Astrophysical Journal*, Vol. 616 (2004)
- [23] Yuan, F. et al., *Nonthermal Electrons in Radiatively Inefficient Accretion Flow Models of Sagittarius A\*, The Astrophysical Journal*, 598 (2003)
- [24] Carrol, B. W.; Ostlie, D. A., *An Introduction to Modern Astrophysics, Pearson Addison Wesley*, página 930 (2007)
- [25] Zubovas, K.; King, A.R.; Nayakshin, S., *The Milky Way's Fermi Bubbles: Echoes of the Last Quasar Outburst?* (2011)

- [26] Zubovas K.; Nayakshin, S., *Fermi Bubbles in the Milky Way: the closest AGN feedback laboratory courtesy of Sgr A\*?* (2012)
- [27] Ruszkowski, M.; Yang, H.-Y. K., Zweibel E., *Fermi bubble simulations: black hole feedback in the Milky Way* (2013)
- [28] Revnivtsev, M.G. et. al., *Hard X-ray view of the past activity of Sgr A\* in a natural Compton mirror*, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 425 (2004)
- [29] Nobukawa, M.; Ryu, S. G.; Tsuru, T. G.; Koyama, K., *New Evidence for High Activity of the Super-Massive Black Hole in our Galaxy* (2011)
- [30] HESS Collaboration, *Letter: Acceleration of petaelectronvolt protons in the Galactic Centre*, *Nature*, Vol. 531 (2016)
- [31] *NASA's Fermi Telescope Finds Giant Structure in our Galaxy* (acessado em 08/06/2016): [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/GLAST/news/new-structure.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/new-structure.html)
- [32] FSSC\_ Fermi Data » Data Analysis » - LAT Analysis Essentials (acessado em 10/06/2016): [http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/LAT\\_essentials.html](http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/LAT_essentials.html)
- [33] Fermi SSC - LAT Photon, Event and Spacecraft Data (acessado em 10/06/2016): <http://fermi.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/ssc/LAT/LATDataQuery.cgi>
- [34] FSSC\_ Fermi Data » Data Analysis » Online Documentation » Cicerone - LAT IRFs (acessado em 10/06/2016): [http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Cicerone/Cicerone\\_LAT\\_IRFs/IRF\\_PSF.html](http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Cicerone/Cicerone_LAT_IRFs/IRF_PSF.html)
- [35] FSSC\_ Fermi Data » Data Analysis » Analysis Threads » Extract LAT Data (acessado em 10/06/2016): [http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/extract\\_latdata.html](http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/extract_latdata.html)
- [36] FSSC\_ Fermi Data » Data Analysis » LAT Data Analysis » Using Pass 8 Data (acessado em 10/06/2016): [http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Pass8\\_usage.html](http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Pass8_usage.html)
- [37] FSSC\_ Fermi Data » Data Analysis » Analysis Threads » Overview (acessado em 10/06/2016): <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/overview.html>
- [38] FSSC\_ Data » Data Access » LAT Third Catalog (acessado em 10/06/2016): [http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/4yr\\_catalog/](http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/4yr_catalog/)
- [39] The Fermi-LAT Collaboration, *Fermi Large Area Telescope Third Source Catalog*, *Astrophysical Journal Supplement Series* (2015)
- [40] Sanchez, D. A.; Deil, C., *Enrico : a Python package to simplify Fermi-LAT analysis* (2013)

- [41] Setup — Enrico 0.1 documentation (acessado em 10/06/2016):  
<https://enrico.readthedocs.io/en/latest/setup.html>
- [42] Tutorial — Enrico 0.1 documentation (acessado em 10/06/2016):  
<https://enrico.readthedocs.io/en/latest/tutorial.html>
- [43] Wall, J. V.; Jenkins, C. R., *Practical Statistics for Astronomers*, Cambridge University Press, página 107 (2003)
- [44] FSSC\_ Fermi Data » Data Analysis » Online Documentation » Science Tools\_ Cicerone - Likelihood (acessado em 10/06/2016): [http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Cicerone/Cicerone\\_Likelihood/Model\\_Selection.html](http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Cicerone/Cicerone_Likelihood/Model_Selection.html)
- [45] FSSC\_ Fermi Data » Data Analysis » Analysis Threads » Source Model Definitions for gtlike (acessado em 10/06/2016): [http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/source\\_models.html](http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/source_models.html)
- [46] Berger, R. L.; Casella, G., *Statistical Inference, Duxbury Press, Second Edition*, página 374 (2001)
- [47] Mattox, J. et al, *The Likelihood Analysis of EGRET Data, Astrophysical Journal*, Vol. 461 (1996)
- [48] Dibi, S. et al, *Exploring plasma evolution during Sagittarius A\* flares, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441 (2014)
- [49] Kopp, G.; Lawrence, G.; Rottman, G., *The Total Irradiance Monitor (TIM): Science Results, Solar Physics*, Volume 230 (2015)
- [50] GMS\_ Fermi's Five-year View of the Gamma-ray Sky (acessado em 16/06/2016):  
<https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=11342>
- [51] Ray, P. S., *Fermi's contribution to understanding the Galactic population of millisecond pulsars*, apresentação disponível em (acessado em 16/06/2016):  
[http://www.phy.ohiou.edu/~SoNS/speakers/Symposium/Ray,PaulS\\_FermiGalacticMSPs.pdf](http://www.phy.ohiou.edu/~SoNS/speakers/Symposium/Ray,PaulS_FermiGalacticMSPs.pdf)

## **Apêndice**

A seguir, minha monografia de Trabalho de Graduação I, na qual o uso de várias das *Fermi Science Tools* é apresentado detalhadamente.

---

**INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**Fábio Muffo Cafardo  
8011549**



**Monografia  
Trabalho de Graduação I**

**Investigação de AGNs através dos dados  
do *Fermi Gamma-Ray Space Telescope***

**Rodrigo Nemmen  
Orientador**

SÃO PAULO  
JUNHO/2015



---

## Índice

- [1. Resumo](#)
- [2. Introdução](#)
- [3. Objetivos](#)
- [4. O \*Fermi Gamma-Ray Space Telescope\*](#)
- [5. AGNs e Blazares](#)
- [6. Elaboração de \*count maps\* e \*exposure map\* para o blazar 3C 279](#)
- [7. Elaboração de \*count map\* para a rádio galáxia M87](#)
- [8. Estudo de um \*gamma-ray burst\*](#)
- [9. Conclusões](#)
- [10. Referências](#)
- [11. Bibliografia](#)



# Monografia

## Trabalho de Graduação I

### 1. Resumo

Este relatório apresenta as etapas iniciais do projeto de iniciação científica realizado pelo autor. Após a apresentação do *Fermi Gamma-Ray Space Telescope*, responsável pela coleta dos dados que serão utilizados no estudo e de uma breve explanação sobre núcleos ativos de galáxias (AGNs), os resultados obtidos com os primeiros contatos do aluno com os dados disponibilizados através das *Fermi Science Tools* são apresentados. Dentre eles, destacam-se os mapas de contagens do blazar 3C 273 e da rádio galáxia M87. Outros resultados apresentados são o mapa de exposição de 3C 273 e a análise preliminar de um *gamma-ray burst*.

### 2. Introdução

O projeto tem como objetivo final a investigação de AGNs de baixa luminosidade usando dados do *Fermi Gamma-Ray Space Telescope*. Mas, objetivos menos ambiciosos foram estabelecidos para esta primeira etapa. Em linhas gerais, o projeto se iniciou com um período de familiarização com a linguagem de programação *Python* e com o estudo de alguns materiais de referência sobre AGNs e da leitura sobre o funcionamento do telescópio.

Neste relatório, as primeiras atividades realizadas pelo aluno em seu projeto de iniciação científica estão apresentadas. Na seção 4, o *Fermi Gamma-Ray Space Telescope* é apresentado. E, a seção 5 traz uma breve discussão sobre AGNs. Após os estudos preliminares, o aluno se dedicou, inicialmente, à construção de *count maps* e de um *exposure map* para uma fonte de raios gamma bem conhecida, o blazar 3C 273. Os resultados são apresentados na seção 6 deste documento.

Após atingir estes objetivos, outros, que não faziam parte do escopo inicial, foram acrescentados: a construção de um *count map* para a rádio galáxia M87, e a análise preliminar de um *gamma-ray burst* (GRB).

A obtenção do *count map* para a M87, encontra-se na seção 7. É interessante observar a grande diferença entre seu *count map* e o do 3C 273, o que evidencia a diferença entre a energia dos fótons emitidos por estas fontes e deixa clara a necessidade de abordagens distintas para estudar os dois corpos.

A análise do GRB apresentada na seção 8 é um estudo bastante preliminar, que teve, como todas as etapas do projeto, objetivos mais didáticos do que científicos. O foco principal das

atividades realizadas até aqui foi o de preparar o aluno a utilizar as *Fermi Science Tools* nas próximas etapas do projeto, que terão objetivos bem mais científicos.

### **3. Objetivos**

Esta monografia aborda as atividades iniciais de um projeto mais amplo, cujo objetivo final é a investigação de AGNs de baixa luminosidade usando dados do *Fermi Gamma-Ray Space Telescope*.

Pretende-se atingir tal objetivo através dos seguintes métodos:

- Seleção e extração dos fótons de raio gamma para as fontes apropriadas
- Processamento de uma amostra de AGNs próximos (selecionada do *Palomar Survey*)
- Modelagem espectral destas fontes
- *Maximum likelihood estimator*
- Processamento paralelizado nos *clusters* alphacrucis e SLAC

A previsão é de que os resultados finais sejam obtidos em cerca de um ano. Muito provavelmente, resultados preliminares estarão disponíveis ao término da disciplina Trabalho de Graduação II, a ser cursada no próximo semestre.

Esta primeira etapa do trabalho, iniciada em meados de março de 2015, teve objetivos menos ambiciosos. Em primeiro lugar, o foco do aluno foi o de se familiarizar com a linguagem de programação *Python*, utilizada para tratamento dos dados; e com as *Fermi Science Tools*, ferramentas de análise disponibilizadas pela equipe do *Fermi Gamma-Ray Space Telescope*.

Depois disso, fazendo uso das *Fermi Science Tools*, o objetivo foi a construção de *count maps* e de um *exposure map* para o objeto 3C 279, um blazar. Este era o objetivo determinado no início do semestre para o projeto e os resultados serão apresentados na seção 6.

Dois objetivos adicionais foram acrescentados a este projeto pelo aluno em comum acordo com o orientador. O primeiro foi o de elaborar um *count map* para um segundo objeto. Foi escolhida a rádio galáxia M87<sup>[1]</sup>. O segundo foi o de continuar a experimentação das *Fermi Science Tools*, através da análise de um GRB. Os resultados obtidos para estes objetivos adicionais serão encontrados nas seções 7 e 8 deste relatório.

### **4. O Fermi Gamma-Ray Space Telescope**

Apesar de o universo ser praticamente transparente para raios gamma com energia da ordem de MeV e GeV, a atmosfera terrestre é uma barreira absorvedora muito eficiente. Desta forma, a observação direta de raios gamma cósmicos é uma atividade que precisa ser realizada diretamente no espaço.

A forma como os raios gamma interagem com a matéria – por espalhamento Compton, produção de pares  $e^+e^-$ , e pelo efeito fotoelétrico – não permite que ocorram reflexão ou refração. Sendo assim, um telescópio para observação de raios gamma trata-se, na prática, de

um detector que se utiliza de técnicas de aceleradores de partículas adaptadas para serem utilizadas no espaço.

Foi neste contexto que o *Fermi Gamma-Ray Space Telescope* foi lançado em 2008.

Ele possui dois instrumentos, ilustrados na Figura 1:

- O *Large Area Telescope* (LAT) é o instrumento principal, desenvolvido para medir a direção, energia e instante de detecção de raios gamma individuais com energia de 20MeV a mais de 300GeV, que, ao interagirem com o instrumento, produzem pares  $e^+e^-$ . Sua resolução angular para um único raio gamma é melhor do que  $1^\circ$ , o que permite a localização da maior parte das fontes com precisão de 10 minutos de arco. Para as fontes mais brilhantes, a precisão é melhor do que 1 minuto de arco.
- O *Gamma-Ray Burst Monitor* (GBM) é um instrumento que pode observar todo o céu (exceto a parte encoberta pela Terra). Ele é sensível a raios-X e raios gamma com energias de 8keV a 40MeV.

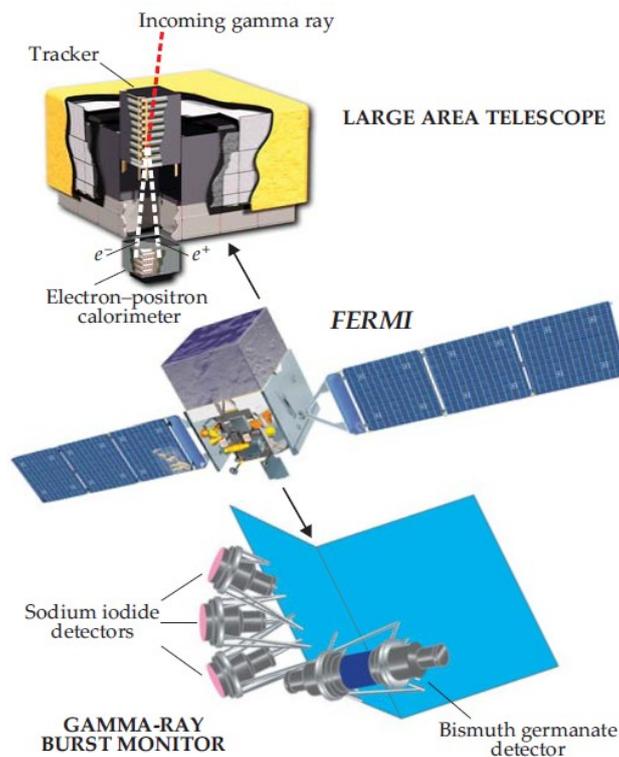


Figura 1<sup>[2]</sup>: O *Fermi Gamma-Ray Space Telescope* e seus dois instrumentos científicos. O *Large Area Telescope* mede a direção e energia de fótons com energias de 20MeV a mais de 300GeV. O *Gamma-Ray Burst Monitor*, foi desenhado para detectar fótons de menores energias (entre 8keV to 40MeV) originários de *gamma-ray bursts*.

O telescópio se aproveita dos grandes campos de visão de seus instrumentos para observar todo o céu a cada três horas. Com isso, a astrofísica de raios gamma pode ser abordada em duas frentes:

- Exposição continuamente aprofundada do céu em raios gamma. Os instrumentos são capazes de detectar mais fótons a cada órbita, obtendo, assim, imagens cada vez mais profundas e nítidas das fontes perenes de raios gamma.
- Astronomia de raios gamma ao longo do tempo. Por monitorar o cosmos continuamente, os instrumentos são sensíveis a variações no céu de raios gamma, em escalas de tempo que podem ir de microssegundos a anos.

A primeira abordagem é particularmente interessante uma vez que cerca de um terço das fontes de raios gamma catalogadas não possuem nenhuma emissão em outros comprimentos de onda. A observação continuada destas fontes pode levar a uma maior compreensão deste fenômeno.

Já a segunda abordagem, pode ser utilizada para o estudo dos *gamma-ray bursts* (GRB). Acredita-se que estes jatos sejam resultados de eventos estelares cataclísmicos. Estas erupções, comumente descritas como as explosões mais violentas do universo desde o *Big Bang*, têm duração de frações de segundos a alguns minutos. Mas os seus *afterglows* em fótons de menores energias persistem por muito mais tempo. Observações feitas pelo GBM permitem a detecção destas emissões efêmeras. E o uso em conjunto do LAT possibilita o detalhamento temporal e a variação dos espectros dos GRBs por até sete ordens de grandeza de níveis de energia dos fótons.

Todos os dados obtidos pelo *Fermi Gamma-Ray Space Telescope* são disponibilizados para a comunidade científica imediatamente, em conjunto com softwares de análise e documentação. Tudo coordenado pelo *Fermi Science Support Center* do *Goddard Space Flight Center* da NASA.

## **5. AGNs e Blazares**

Evidências de que algum tipo de atividade violenta estava ocorrendo nos centros de galáxias já eram conhecidas há quase meio século quando, finalmente, os quasares foram descobertos em 1963.

Utilizando o *Parkes Radio Telescope*, na Austrália, Cyril Hazard, M. B. Mackie, e John Shimmins, conseguiram determinar a localização de uma fonte de rádio, 3C 273, com precisão de alguns arcos de segundo, um grande feito para a época que só foi alcançado observando-se o momento em que a fonte era ocultada pela lua para determinar sua localização. Este resultado foi, então, combinado com imagens obtidas no visível e o único objeto coincidente com a emissão de rádio era algo parecido com uma estrela de magnitude 13.

A próxima etapa da análise foi a extração de seu espectro de luz. Isso foi feito por Maarten Schmidt, utilizando o telescópio Hale, de 200 polegadas, do Monte Palomar. Schmidt percebeu, ao comparar o espectro obtido com o do Hidrogênio, que as linhas de emissão de 3C 273 estavam defasadas em 16% (*redshift*). Isso significava que o objeto estava a cerca de 2 bilhões de anos luz de distância. A esta distância, mesmo uma galáxia inteira seria bem menos luminosa. Este era o objeto mais luminoso até então observado. Logo, a análise do espectro de objetos semelhantes mostrou que estes também apresentavam grandes *redshifts*.

O estudo dos arquivos fotográficos mantidos pela *Harvard College Observatory* desde o século XIX, revelaram que a luminosidade de 3C 273 flutuava em uma escala de tempo menor do que um mês. Isso colocava um limite máximo ao seu tamanho;

Assim, foi descoberta uma classe de objetos que, a primeira vista se pareciam com estrelas comuns, mas possuíam espectro com altos *redshifts*. Estes foram chamados de *quasi-stellar objects*, ou objetos quase-estelares. O brilho dos quasares poderia superar o de uma galáxia por um fator de 100.

Hoje, sabe-se que os quasares são versões mais luminosas dos núcleos de galáxias observados por Seyfert no centro de galáxias espirais próximas. Isso não pôde ser percebido na época pois, como os quasares estão muito distantes, eles se parecem com estrelas isoladas e, por serem tão luminosos, tornavam suas galáxias hospedeiras praticamente invisíveis.

Os primeiros quasares detectados têm grande emissão em rádio, uma vez que os astrônomos da época utilizavam este tipo de emissão como indicativo de qual objeto estudar. Hoje, porém, sabe-se que a emissão em rádio é mais uma exceção do que uma regra para os quasares, presente em cerca de apenas 10% dos casos.

Estas dificuldades de classificação inicial levaram ao surgimento de diversas categorias diferentes para os núcleos ativos de galáxias (AGNs). As similaridades entre diferentes AGNs sugerem que se tratam de diferentes manifestações de um mesmo fenômeno. As características genéricas destes fenômenos podem ser agrupadas em 4 categorias:

- Os AGNs podem emitir energia a uma taxa altíssima. Evidências apontam que os períodos de atividade podem se manter por muitos milhões de anos. Os AGNs são o mais poderoso processo sustentável de geração de energia do universo.
- Os AGNs são extremamente compactos. Como já mencionado, a luminosidade do quasar 3C 273 varia em um intervalo de cerca de um mês. A variabilidade rápida (em alguns casos, em intervalos de poucas horas) determina um limite máximo para o seu tamanho.
- A radiação emitida pelos AGNs é diferente daquela normalmente produzida por estrelas ou gás. Apesar dos AGNs emitirem mais fortemente em algumas partes do espectro, eles costumam emitir em um espectro amplo de comprimentos de onda. Enquanto isso, estrelas e gás tendem a emitir em bandas bem mais estreitas. A radiação caracterizada por um pico bem definido é chamada de radiação térmica, pois pode ser usada para se inferir a temperatura do objeto. Isso não pode ser feito para os AGNs, uma vez que seu espectro está distribuído ao longo de vários comprimentos de onda e, portanto, não pode ser associada a uma temperatura específica.
- Os AGNs contém gás se movendo a velocidades extremamente rápidas, algumas vezes relativísticas. Esta velocidade pode ser deduzida medindo-se o efeito Doppler sobre as linhas de emissão.

Todas estas características podem ser explicadas como manifestações de buracos negros maciços nos centros das galáxias.

Uma vez que a luminosidade dos AGNs varia rapidamente, pode-se estabelecer um limite superior para seus tamanhos ( $R$ ). Ao mesmo tempo, podem-se estabelecer limites mínimos para a quantidade de massa contida dentro da região onde a luminosidade é produzida ( $M$ ). Isso significa que é possível se definir uma razão entre a massa e o raio, que será chamada de “compactação de massa”:

$$M/R \tag{equação 1}$$

Este índice é uma medida direta do campo gravitacional de um objeto e, para um buraco negro, ela alcança um limite máximo que depende apenas da constante de gravitação universal de Newton ( $G$ ):

$$c^2/G \tag{equação 2}$$

onde  $G$  é a constante de gravitação universal de Newton e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo

Assim, ao se comparar a equação 1, estimada através de observações, com a equação 2, prevista pela teoria, pode-se determinar o quão “próximo” um objeto está de ser um buraco negro.

O tamanho ( $R$ ) pode ser estimado de acordo com a variação de sua luminosidade. Por exemplo, se a luminosidade de objeto astronômico varia rotineiramente de um fator de 2 em um intervalo de tempo típico ( $t$ ), então pode-se assumir com segurança que a fonte não é maior do que a distância que poderia ser percorrida pela luz neste mesmo intervalo. Isso significa que:

$$R < ct \tag{equação 3}$$

onde  $t$  é o tempo típico de variação da luminosidade do objeto observado

A massa pode ser estimada de várias formas. Uma delas é através da equivalência massa-energia de Einstein:

$$E = mc^2 \tag{equação 4}$$

onde  $E$  é energia e  $m$  é a massa disponível para ser convertida

Estimando-se a quantidade total de energia emitida pelo AGN em seu tempo de vida, a equação pode ser usada para se calcular a massa convertida em energia. Nenhum processo realista para explicar os AGNs pode converter energia com eficiência total. A eficiência pode variar entre 1% (para reações nucleares) e 40% (para matéria espiralando enquanto é atraída por um buraco negro). Assim, pelo menos metade da matéria atraída por um AGN não se transforma em energia e se acumula no centro da galáxia. Dessa forma, conhecendo-se o tempo de atividade de um AGN, pode-se estimar um limite mínimo para a massa.

As técnicas para se estimar o tempo de vida ativa de um AGN são variadas. Porém, nenhuma delas ainda é bastante confiável. Mas, a utilização de argumentos estatísticos permite

estabelecer um limite mínimo para esta medida. O argumento é de se que pode observar que cerca de 1% de todas as galáxias são ou foram ativas em algum momento. Se a duração típica do período de atividade fosse mais curta do que cerca de 100 milhões de anos, então não existiriam galáxias suficientes para explicar todos os AGNs observáveis (uma vez que 100 milhões de anos é cerca de 1% da idade do Universo).

Com a estimativa da idade do AGN, pode-se realizar a sequência de passos para se calcular a massa mínima: o produto entre a idade e a luminosidade fornece o total de energia gerado; supondo-se eficiência de conversão de massa em energia de cerca de 10%, pode-se determinar a massa total “processada” pelo AGN da qual, assume-se, cerca de metade permanece no AGN.

Independentemente do método utilizado para se determinar a massa, os valores obtidos estão de acordo entre si. Um quasar típico deve ter uma massa central da ordem de 100 milhões a alguns bilhões de massas solares.

Tendo obtido o tamanho e a massa, pode-se finalmente calcular a “compactação de massa” (equação 1). E os resultados obtidos apontam que este índice deve ser maior do que  $0,001c^2/G$  para um AGN típico. Este valor indica uma compactação muitas ordens de grandeza maior do que a de uma estrela comum ou de um aglomerado estelar. A única classe de objetos compatíveis com estas características são buracos negros supermassivos. Vale a pena lembrar que o processo aqui descrito leva ao cálculo da menor “compactação de massa” possível, o que reforça o argumento de que os AGNs são gerados por buracos negros supermassivos.

Toda a argumentação acima foi baseada quase que exclusivamente nas duas primeiras características dos AGNs mencionadas anteriormente. Resta, agora, tentar explicar como a interação entre um buraco negro supermassivo e a matéria pode causar os fenômenos observados nos AGNs. Ainda se está distante de um modelo detalhado para explicar este fenômeno, mas alguns detalhes já começam a ser bem determinados pelos pesquisadores.

Os buracos negros supermassivos podem gerar luminosidade através de dois processos, que podem operar simultaneamente: através de um disco de acreção ou por processos eletromagnéticos que retira energia cinética rotacional do buraco negro. Como analogia para este processo, pode-se imaginar o buraco negro como a roda de um carro e a matéria que o cerca atuando como um freio que ganha energia enquanto diminui a rotação do buraco negro. Este mecanismo parece ser chave na explicação dos jatos emitidos pelos AGNs.

As propriedades dos AGNs dependem, entre outros fatores, da contribuição destes dois mecanismos de geração de energia os quais, por sua vez, dependem da taxa de acreção, do momento angular deste material, dos campos magnéticos, da rotação do buraco negro, da sua massa, de sua posição relativa à linha de visada do observador, dentre vários outros fatores. Idealmente, existe a busca por um modelo unificado que permita explicar todas as faces dos AGNs.

Os modelos existentes atualmente preveem que o pico de emissão por um AGN da energia gerada pela acreção se daria no ultravioleta. Esta faixa do espectro, porém, é de difícil detecção devido à absorção causada pelas nuvens de poeira e gás. Mesmo assim, pode-se identificar no espectro dos quasares uma concentração em torno do azul (“*big blue bump*”).

Mas um disco de acreção não pode explicar todas as características do espectro de um AGN. Isso porque se acredita que vários fenômenos físicos diferentes contribuem: a radiação infravermelha é emitida pelo aquecimento das nuvens de gás ao redor do buraco negro, os raios-X podem vir de uma espécie de “atmosfera” ao redor do disco (da mesma forma que a coroa solar emite raios-X), rádio e raios gamma provavelmente são emitidos por jatos de radiação paralelos ao eixo de rotação do buraco negro, dentre outros. Modelos mais recentes passaram a considerar um fenômeno conhecido como “reprocessamento”: radiação emitida em um comprimento de onda pode ser interceptada pela matéria do próprio AGN e ser reemitida em outros comprimentos de onda. Estes fenômenos dão aos AGNs seu espectro não térmico, que pode ser visto na Figura 2.

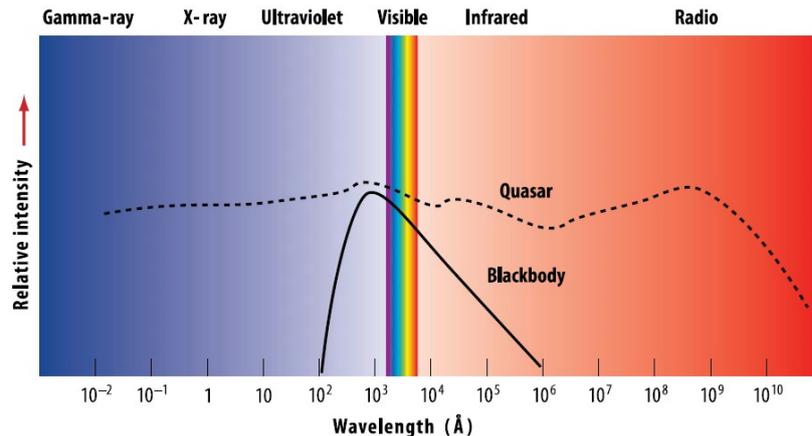


Figura 2<sup>[3]</sup>: Comparação entre o espectro de um corpo negro com o de um quasar típico. O formato da curva do quasar mostra que a energia está distribuída sobre ao longo de vários comprimentos de onda distintos. Isso ocorre porque regiões com diferentes temperaturas contribuem para o espectro e, também, devido ao processo de reprocessamento. Já o espectro do corpo negro é aquela que o quasar teria caso fossem detectados apenas os fótons emitidos pela região imediatamente ao redor do buraco negro.

Um tema recorrente no estudo dos AGNs é o desenvolvimento de um modelo unificado. Esta ideia é baseada na existência de diversas classes de AGNs. Acredita-se que as diferenças entre elas sejam oriundas da posição relativa entre o observador e o eixo de acreção do buraco negro. De acordo com sua orientação, o observador pode ser incapaz de observar algum aspecto do AGN, ou estar em posição que favoreça a observação de outro. A Figura 3 ilustra algumas destas possibilidades.

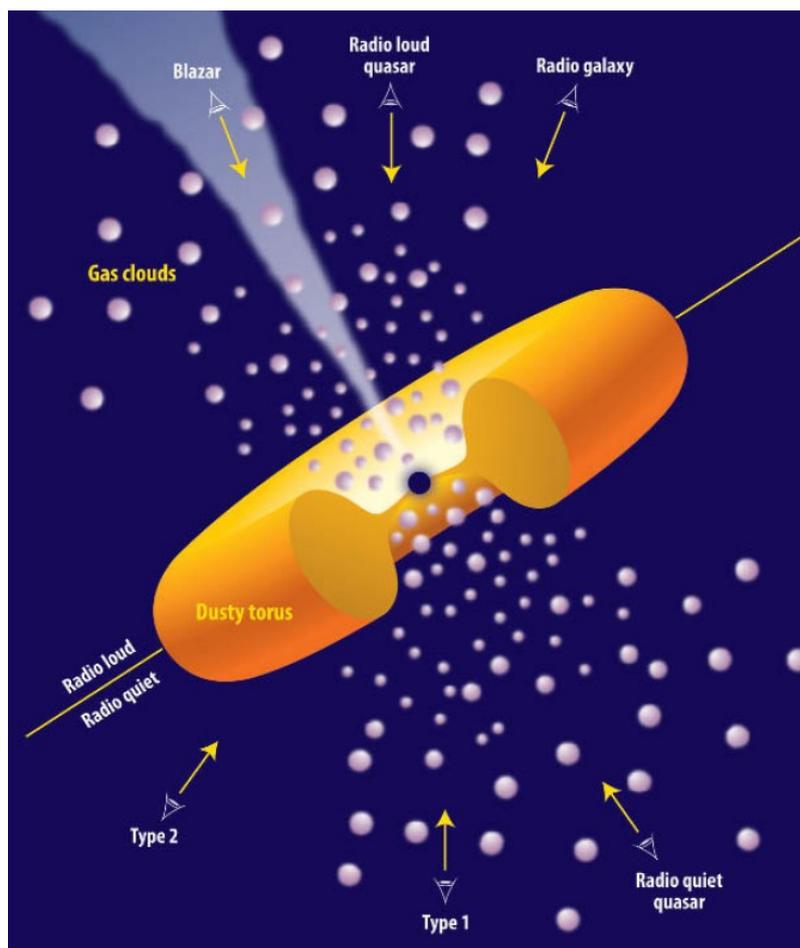


Figura 3<sup>141</sup>: Representação esquemática de um AGN, exibindo suas componentes mais importantes, as diferentes fontes de radiação e o impacto da geometria na concepção de um modelo unificado.

Por exemplo, em quasares cujo jato esteja diretamente alinhado com a Terra, pode-se observar uma flutuação violenta da fonte, que, de tão intensa, ofusca a radiação do disco de acreção e das nuvens que cercam o AGN. Estes objetos são conhecidos como “blazares”.

O sucesso dos modelos de classificação em função das posições leva a crer que as diferentes categorias de AGNs são, na verdade, formadas por objetos bastante similares. Estudar estas classes individualmente, porém, é bastante relevante para que se possam conhecer as diferentes características destes objetos. A seguir, algumas das classes de AGN são apresentadas.

### Galáxias Seyfert:

As galáxias Seyfert possuem um núcleo ativo muito luminoso (entre  $10^8$  e  $10^{11} L_{\odot}$ ), cujo espectro revela fortes linhas de emissão. Algumas são comuns, como as linhas de Balmer do Hidrogênio, mas outras são mais raras, como as do Oxigênio duplamente ionizados. Este fato só pode ocorrer em regiões com gás extremamente quente. O espectro formado por linhas largas pode ser explicado pela grande velocidade do gás.

A luminosidade do núcleo varia em escala de tempo de meses, o que garante que elas possuem menos de 1 parsec de raio.

Uma galáxia Seyfert emite, no visível, luminosidade comparável à da soma das estrelas de sua galáxia. Como consequência, em uma galáxia Seyfert, a galáxia hospedeira é claramente detectável.

A galáxia M87, exibida na Figura 4, é um exemplo de uma galáxia Seyfert. Esta é uma galáxia elíptica localizada a aproximadamente  $15,9 \pm 1,0$  Mpc de distância na direção da constelação de Virgem. Possui pouco mais de cento e vinte cinco mil anos-luz de diâmetro, sendo assim uma das maiores galáxias elípticas conhecidas. Sua magnitude aparente é de +9,6 e a absoluta de -22. No centro desta galáxia encontra-se um dos maiores buracos negros supermassivos de que se tem conhecimento, com 6,4 bilhões de massas solares. Essa galáxia também é conhecida pela forte emissão de ondas de rádio. A elaboração de um *count map* de sua emissão foi incluída como um objetivo adicional neste relatório e os resultados obtidos encontram-se na seção 7.

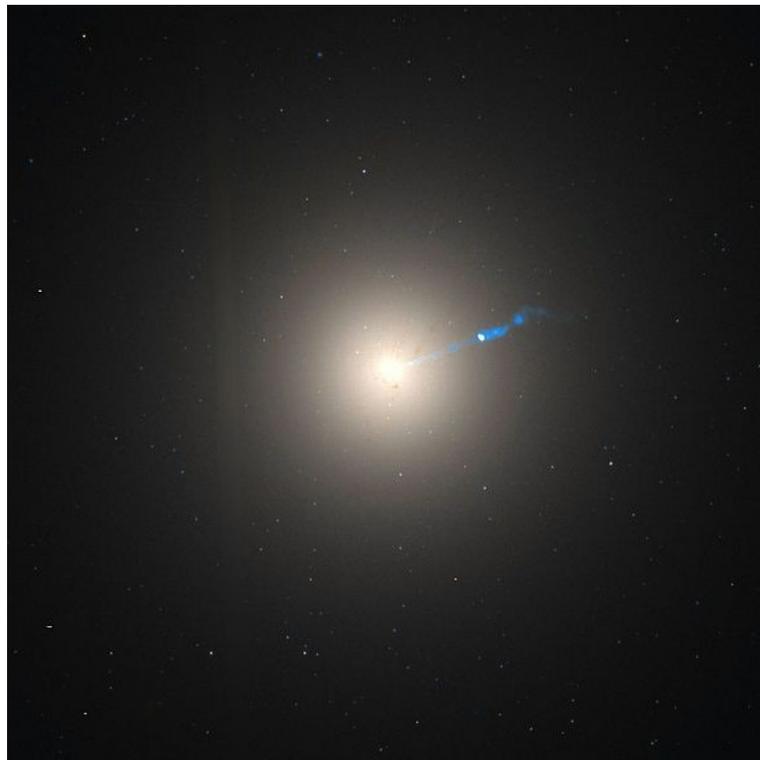


Figura 4<sup>[5]</sup>: Imagem da galáxia Seyfert M87 obtida pelo *Hubble Space Telescope*.

### Quasares:

Os quasares são os mais energéticos e distantes membros do grupo dos AGNs. Eles são caracterizados como fortes fontes de energia eletromagnética, incluindo rádio, com altos *redshifts*. Quando detectados, eles foram classificados como objetos quase estelares, uma vez que eram similares a estrelas, ao contrário de fontes extensas (como a galáxias).

Sua luminosidade pode ser cerca de  $10^{12} L_{\odot}$  e seu espectro, como ocorre com o das galáxias Seyfert, apresenta linhas de emissão bastante largas. A luminosidade de um quasar é cerca

de 100 vezes mais brilhante do que as estrelas da galáxia que o hospeda. Por isso, suas galáxias hospedeiras são de difícil detecção.

### Blazares:

AGNs que possuem energias muito altas (maiores do que 100 MeV) formam a subcategoria dos blazares. Acredita-se que os blazares são AGNs cujos jatos relativísticos estão apontados diretamente para a Terra, de forma que a emissão observada é dominada pelos fenômenos que ocorrem na região dos jatos. De todos os AGNs, os blazares são aqueles que emitem nas mais diversas frequências, desde rádio até raios gamma.

O principal objeto de estudo deste relatório, o 3C 279, exibido na Figura 5, é um exemplo de um blazar. Ele é conhecido por ter espectro que varia entre comprimentos de onda de rádio, visível, raios-X e raios gamma. Este objeto encontra-se na direção da constelação de Virgem, tem *redshift* de  $0,5362 \pm 0,0004$ <sup>[6]</sup> e magnitude aparente de 17,8.

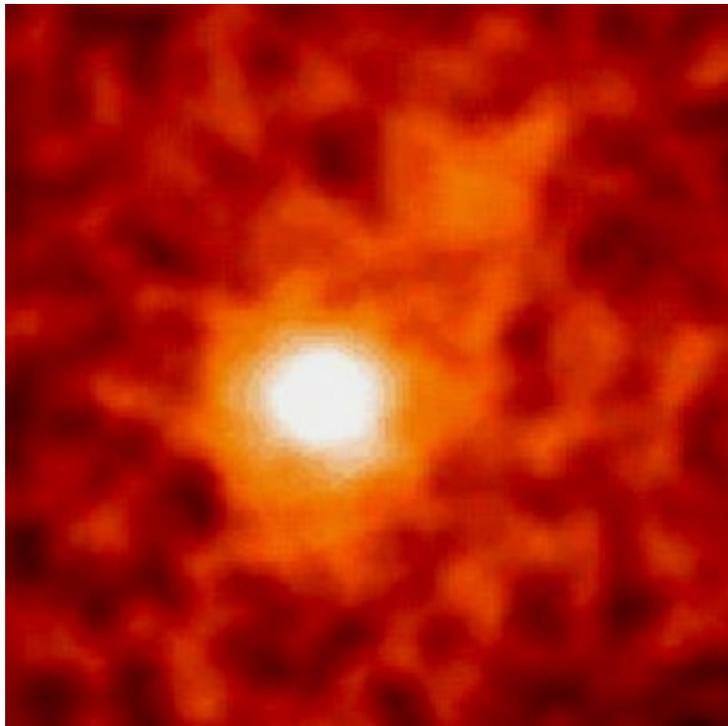


Figura 5<sup>[7]</sup>: Imagem em raios gamma do quasar 3C 279 obtida pelo *Compton Observatory*, NASA.

## **6. Elaboração de *count maps* e *exposure map* para o blazar 3C 279**

Nesta seção, os passos para acesso e tratamento dos dados coletados pelo *Fermi Gamma-Ray Space Telescope* serão apresentados, bem como os resultados obtidos durante o processo na tentativa de se construir *count maps* e *exposure maps* para o blazar 3C 279.

Para iniciar os trabalhos, os dados podem ser facilmente acessados através da página do *Fermi Science Support Center* (FSSC) na internet<sup>[8]</sup>.

Nesta página, o usuário pode identificar a fonte que deseja estudar. Isso pode ser feito inserindo-se tanto as coordenadas do objeto, quanto seu nome nos principais catálogos (Ex: 3C 279, M87, etc.).

Depois disso, o usuário precisa identificar qual o raio de interesse ao redor da fonte que deve constar nos dados baixados. Obviamente, esta decisão precisa ser tomada levando-se em conta a densidade de fontes existentes na proximidade do objeto, bem como suas luminosidades, além, é claro, do tipo de análise que será feita. No caso das atividades deste relatório, optou-se por usar 20° como região de interesse, seguindo recomendação da própria equipe do *Fermi*.

Em seguida, o usuário escolhe o período de tempo para o qual deseja informações. Estão disponíveis dados desde o lançamento do satélite. No caso deste relatório, optou-se por usar os dados desde o lançamento do satélite até aqueles obtidos antes da meia noite do dia 4 de fevereiro de 2009, totalizando 6 meses de observações. Esta escolha foi feita para que os resultados obtidos pudessem ser comparados com resultados já disponíveis, de forma a garantir que os procedimentos tivessem sido corretamente realizados.

Em seguida, pode-se escolher o intervalo de energias estudado. Foram escolhidos para a análise os fótons de 100 MeV a 100000 MeV, mas, como já foi dito, o *Fermi Gamma-Ray Space Telescope* consegue coletar informações para fótons ainda mais energéticos. Novamente, a escolha foi feita com o objetivo de conseguir comparar os resultados aqui obtidos com outras referências.

Finalmente, o usuário precisa escolher o tipo de eventos contidos nos arquivos. São duas as opções:

- *Photon Data*, que contém toda informação necessária para a grande maioria das análises. Foi esta a escolha feita nesta seção.
- *Extended Data*, que contém todas as informações existentes na opção anterior, além de dados adicionais sobre os eventos. Esta é a opção que se deve fazer para o estudo de *Gamma-ray Bursts*, conforme será visto na seção 8.

Depois de selecionar estes parâmetros, o usuário tem acesso, além dos dados sobre a fonte, a um arquivo que contém informações sobre a posição e a orientação do satélite a cada 30 segundos durante o período da análise. Esta informação será importante para o tratamento dos dados.

Depois de baixados, os dados precisam ser trabalhados fazendo-se uso das *Fermi Science Tools*. Nesta seção, foram usadas 5 ferramentas, que serão apresentadas a seguir.

A primeira etapa de tratamento dos dados é feita com uso da ferramenta *gtselect*. Esta ferramenta é usada para se fazer cortes na base de dados de acordo com o momento da tomada de cada dado, a energia dos fótons, a posição do objeto com relação ao satélite, etc.

Alguns dos parâmetros utilizados nesta ferramenta foram exatamente os mesmos já incluídos na solicitação dos dados (tempo, energia dos fótons, posição da fonte e raio de interesse). Mas, o uso desta ferramenta permite que o usuário possa baixar dados mais abrangentes e fazer cortes de acordo com sua necessidade.

Outro parâmetro utilizado por esta ferramenta é o ângulo zenital (*zenith angle value*). Esta é uma medida, em graus, feita a partir do zênite do satélite. As informações obtidas pelo satélite para ângulos maiores do que o informado neste campo (no caso, 100°) são descartadas da análise. O objetivo deste corte é o de minimizar os efeitos causados por fótons emitidos na atmosfera da Terra (que surgem da interação entre os raios cósmicos e a atmosfera) que formam uma fonte intensa de ruído nas imagens. Utilizando-se o valor de 100°, sugerido pela equipe do FSSC, acaba-se criando uma região de *buffer* com 13° de extensão, o suficiente para garantir a qualidade dos dados.

Feitos os cortes em energia, tempo e posição, a próxima etapa serve para garantir a qualidade dos dados. Isso é feito de acordo com um parâmetro chamado de *Good Time Interval* (GTI). Este é o intervalo de tempo para o qual os dados podem ser considerados válidos. Por exemplo, os dados coletados quando o satélite está sobre a Anomalia do Atlântico Sul (uma região onde a parte mais interna do cinturão de Van Allen tem máxima aproximação com a superfície da Terra, com o resultado de que, para uma dada altitude, a intensidade de radiação é mais alta nesta região do que em qualquer outra) não fazem parte do GTI. Também não fazem parte os dados coletados durante a atualização de softwares ou a realização de manobras pelo satélite.

Nesta etapa o arquivo com as informações sobre a posição e a orientação do satélite a cada 30 segundos durante o período da análise é levado em consideração pela ferramenta *gtmktime*.

Após o uso destas ferramentas, os dados podem ser explorados.

Geralmente, a primeira ação do pesquisador é a de gerar um *count map* com os dados obtidos. Assim, ele pode entender melhor como os cortes realizados afetaram seus dados. Um *count map* pode ser facilmente compreendido como um histograma em duas dimensões. Neste caso, o histograma relaciona uma posição no céu (as coordenadas x e y do histograma) com uma contagem do total de fótons, com energia dentro do intervalo previamente determinado, recebidos durante o período da análise. A contagem dos fótons, que seria representada como a altura das colunas em um histograma unidimensional, é determinada de acordo com uma escala de cores.

Dois softwares podem ser utilizados para geração destes *count maps*: o ds9, que é um visualizador de imagens geradas a partir de um banco de dados; e o fv, que, além de exibir imagens, também permite a criação de gráficos e histogramas com os dados. Cada programa tem suas peculiaridades e a escolha sobre qual deles usar depende muito do tipo de análise que se deseja realizar. No caso deste relatório, foram gerados *count maps* com ambos. Aquele gerado pelo ds9 está exibido na Figura 6 e o gerado pelo fv pode ser visto na Figura 7.

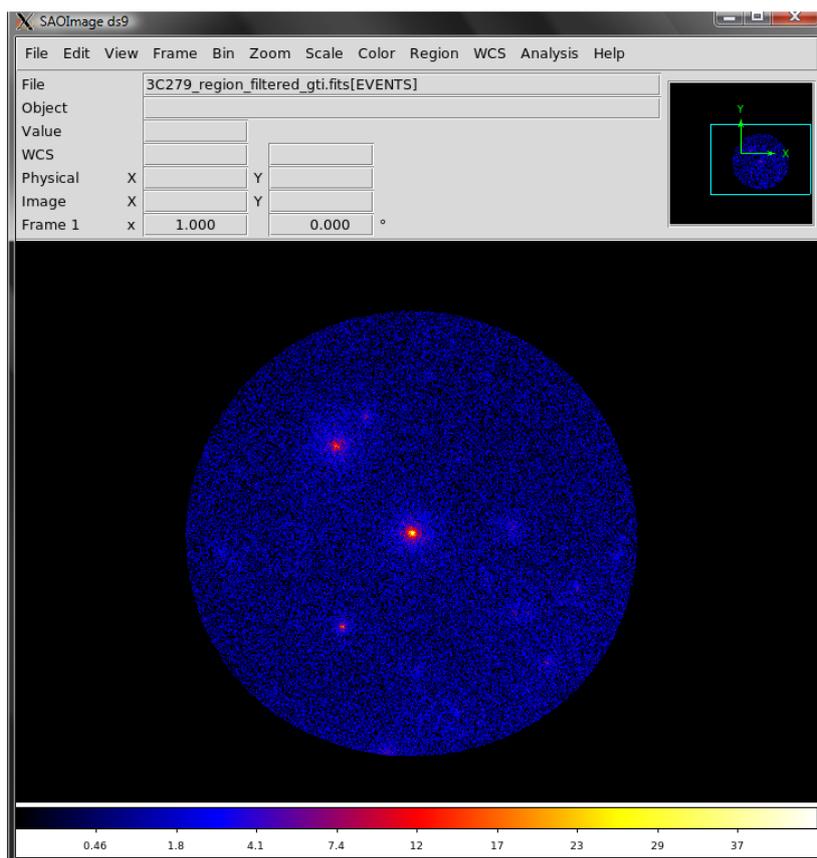


Figura 6: *count map* gerado pelo software ds9 para o blazar 3C 279.

Como pode ser visto nas Figuras 6 e 7, ambas as imagens representam claramente a mesma região do céu. A principal diferença entre elas está no esquema de cores escolhido. Existem outras diferenças quanto à funcionalidade e a facilidade de uso de cada *software*, mas os resultados são essencialmente os mesmos.

Estes resultados apresentados nas Figuras 6 e 7 são, porém, preliminares. A equipe do FSSC recomenda que mais ferramentas sejam utilizadas sobre os dados antes que eles possam ser aproveitados para pesquisas científicas.

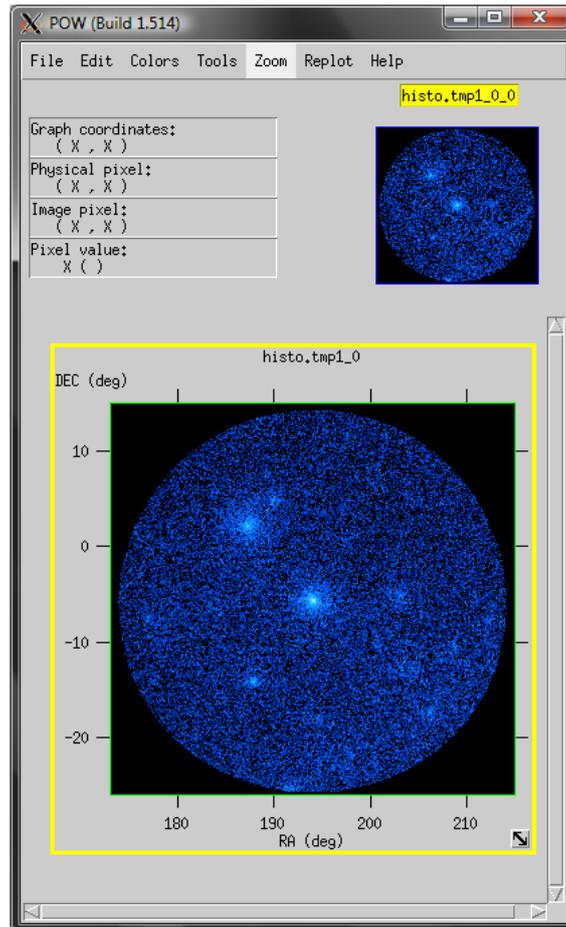


Figura 7: *count map* gerado pelo software ds9 para o blazar 3C 279.

Uma delas é chamada de *gtbin*. Ela manipula os dados de forma a organizar as informações de maneira que elas possam ser usadas por várias outras ferramentas. Além disso, ela organiza os dados dos sistemas de coordenadas contidos nos arquivos de forma que eles possam ser corretamente interpretados pelos visualizadores de imagens (tais como o ds9 e o fv). Este último item terá efeitos bastante evidentes sobre a qualidade dos *count maps*.

Além disso, outro resultado obtido por esta ferramenta é o de agilizar bastante o processamento dos arquivos. Uma das formas como isso é feito é através da transformação de variáveis contínuas em variáveis discretas. Por exemplo, em uma base de dados, a informação sobre a energia dos fótons pode ser comparada como uma variável contínua (ainda que a energia seja quantizada, o intervalo de valores de energia é tão grande, de 100 MeV a 100000 MeV no caso deste estudo, que a variação é praticamente um contínuo). Após o uso da ferramenta, esta informação é discretizada. As energias são separadas em pequenos intervalos (*bins*) que são definidos de forma a não se perder definição na qualidade das informações. Assim, o tempo de processamento dos arquivos cai muito, sem nenhum impacto relevante sobre a qualidade da análise. Obviamente, a decisão sobre como discretizar os dados precisa ser tomada por cada pesquisador de acordo com seus objetivos.

Depois que os dados foram tratados pela *gtbin*, um novo *count map* foi gerado, desta vez apenas pelo ds9. O resultado está exibido na Figura 8.

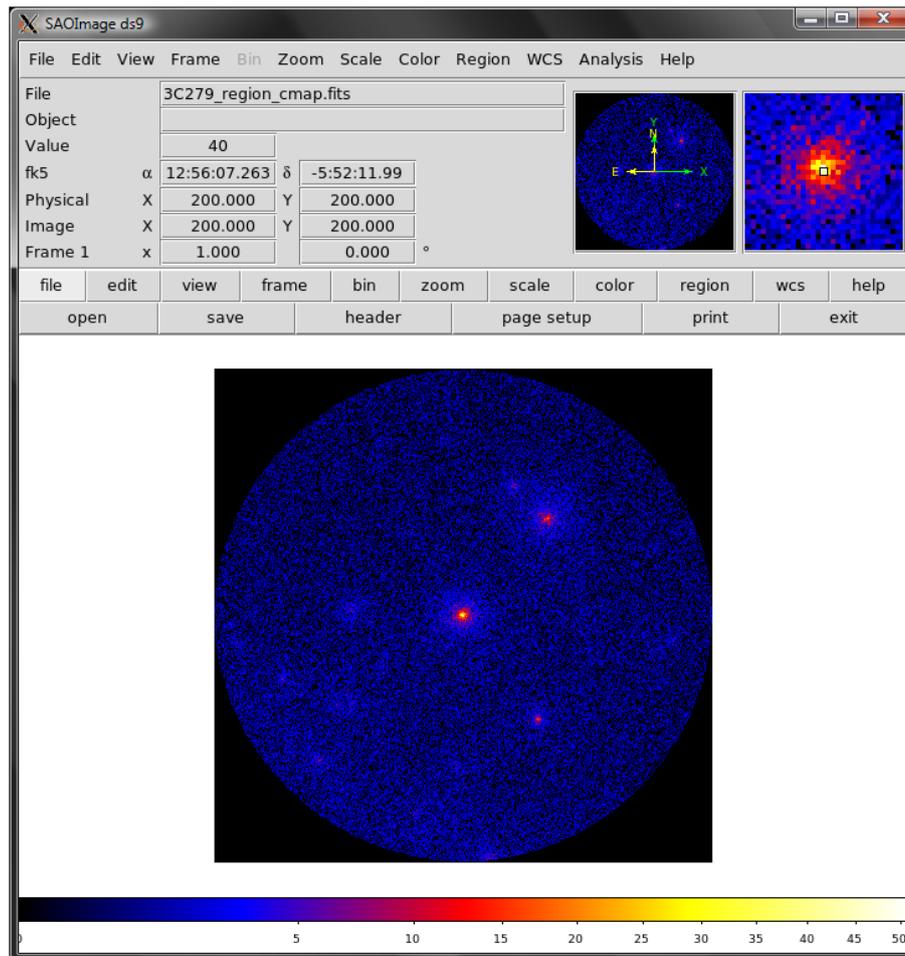


Figura 8: *count map* gerado pelo software ds9 para o blazar 3C 279 depois de novos tratamentos dos dados. Observe que o eixo horizontal nesta imagem está invertido com relação aos eixos das Figuras 6 e 7. Isso é resultado do uso da ferramenta *gtbin*, que organiza os dados dos sistemas de coordenadas contidos nos arquivos de forma que eles possam ser corretamente interpretados pelos visualizadores de imagens.

Como ambos foram gerados pelo o mesmo software, o *count map* da Figura 6 e o da Figura 8 podem ser comparados. A observação mais evidente é a de que o eixo horizontal está invertido nas duas imagens. Isso ocorre porque, após o uso da Ferramenta *gtbin*, o sistema de coordenadas foi corretamente acrescentado ao banco de dados utilizado e a ascensão reta, na verdade, aumenta da direita para a esquerda, conforme exibido na Figura 8.

Após a análise dos dados pelos *count maps*, a próxima etapa é a de gerar os *exposure maps*. Estes apresentam a exposição total de uma região do céu dentro da região de interesse, para determinados níveis de energia.

Estes resultados são dependentes da posição relativa entre o satélite e a fonte estudada e dos níveis de energia. À medida que o nível de energia dos fótons captados pelo telescópio aumenta, sua área efetiva (ou seja, a capacidade do telescópio de gerar imagens com nitidez) aumenta. Isso pode ser visto no gráfico da Figura 9. Do contrário, à medida que o ângulo entre a normal do telescópio e o objeto estudado aumenta, a área efetiva é reduzida. Isso está exibido no gráfico da Figura 10. Assim, estes dois fatores (dentre outros) precisam ser levados em conta na análise.

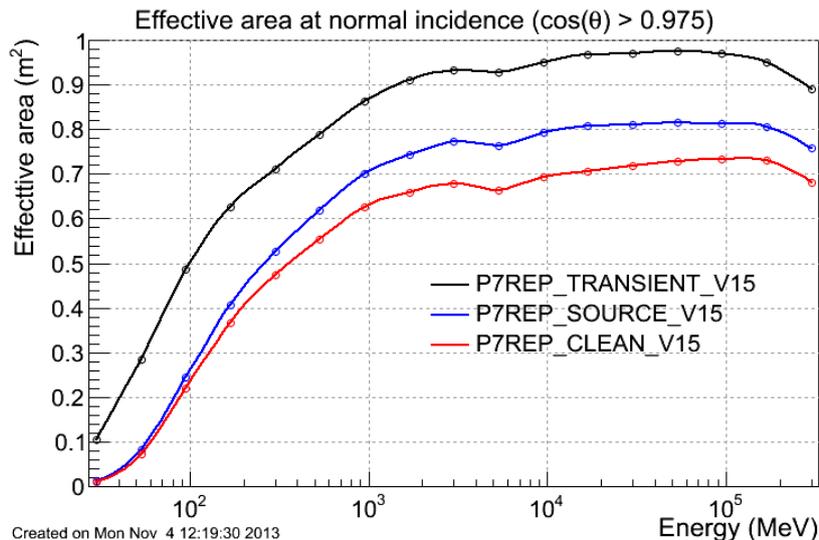


Figura 9<sup>[9]</sup>: Variação da área efetiva do *Fermi Gamma-Ray Space Telescope* em função do nível de energia dos fótons captados.

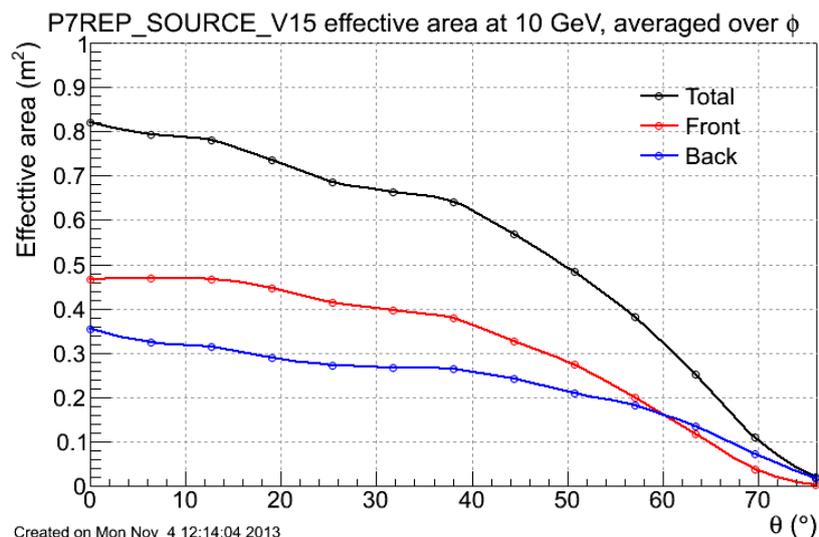


Figura 10<sup>[9]</sup>: Variação da área efetiva do *Fermi Gamma-Ray Space Telescope* em função do ângulo de incidência dos fótons captados.

Para levar em consideração a influência do ângulo de visada do telescópio sobre os resultados medidos, é necessário que seja calculado o *livetime* dos dados obtidos. O *livetime* é um parâmetro que indica o tempo que o telescópio observou certa região do céu em determinado ângulo de inclinação. Para que este fator seja levado em consideração, os

dados precisam ser tratados pela ferramenta *gtlcube* que utiliza como principal insumo o arquivo com as posições do satélite ao longo do período de observação.

Finalmente, os dados tratados por esta ferramenta são utilizados pela ferramenta *gtexpmap* que é a responsável por gerar o *exposure map*. Nesta análise, a recomendação do FSSC é que seja escolhida uma região de análise maior do que a região de interesse (aquela definida em 20° no início desta seção). Isso ocorre porque toda região do céu possui regiões adjacentes que também têm suas fontes. Assim, se as fontes das regiões adjacentes àquela que está

sendo estudada não forem levadas em consideração, os dados podem levar o pesquisador a conclusões erradas. Por isso, para a geração do *exposure map*, a área considerada foi expandida para 25°.

Como já foi dito, cada *exposure map* é gerado para um determinado nível de energia. Então, para que os dados possam fornecer informações úteis, é necessário que sejam estabelecidos cortes de energia nos dados. Aqueles *bins* criados pela ferramenta *gtbin* apesar de discretizados, ainda formam uma gama enorme de níveis de energia. Na criação do *exposure maps*, é conveniente agrupar tais níveis em menos categorias. Para fontes que emitem em um nível de energia relativamente constante, pode-se usar uma quantidade pequena (cerca de 5) de níveis de energia. Porém, para fontes como pulsares, cujo fluxo de energia varia significativamente ao longo do tempo, recomenda-se o uso de mais categorias. No caso desta análise, apesar da fonte não se tratar de um pulsar, a recomendação do FSSC foi de que se agrupassem os níveis de energia em 20 camadas, apenas com fins didáticos.

Os resultados obtidos com a ferramenta *gtexpmap* foram utilizados para geração de um *exposure map* composto por 20 camadas de diferentes níveis de energia. Elas podem ser vistas na Figura 11.

A análise da Figura 11 deixa claro que à medida que os níveis de energia estudados aumentam, a nitidez também cresce. Isso pode ser notado pelas bordas “esfumaçadas” das imagens para níveis de energia mais baixos em comparação com as bordas bem mais definidas para as energias mais altas.

Um *exposure map*, porém, não é uma ferramenta a ser utilizada apenas para se apurar a nitidez do instrumento. Na verdade, ele é bastante útil para a análise de fontes extensas, como, por exemplo, a emissão difusa de raios gamma pela via láctea, de forma a se analisar a distribuição da geração de energia em diferentes pontos do objeto de estudo. No caso da análise aqui apresentada, apesar da fonte ser pontual, o *exposure map* foi elaborado para fins didáticos.

## **7. Elaboração de *count map* para a rádio galáxia M87**

Os mesmos procedimentos executados na seção anterior para o blazar 3C 279 também foram realizados para a galáxia Seyfert M87. Foram utilizados os mesmos intervalos de tempo e de energias.

Assim que o primeiro *count map* para a M87 foi elaborado, suspeitou-se que teria havido algum erro no procedimento. Isso porque ele parecia não existir nenhuma fonte em sua região central (onde estaria a M87). Ao invés disso, havia uma forte fonte emissora bem próxima ao limite do gráfico. A desconfiança era de que, por algum motivo, as coordenadas da fonte estudada não estavam bem alinhadas com o centro da região estudada. Esta hipótese, felizmente, pôde ser investigada.

Utilizando o ds9, é possível identificar as coordenadas dos pontos do *count map* apenas colocando o cursor sobre uma posição. Este procedimento foi feito para a região central da imagem e as coordenadas exibidas (RA:  $\sim 187,8^\circ$  e DEC:  $\sim 12,4^\circ$ ) eram compatíveis com a da M87, dentro das incertezas oriundas do movimento do cursor pela tela. Isso comprovou que a região visualizada, de fato, continha o objeto desejado em seu centro.

Então, o mesmo procedimento foi realizado para o ponto brilhante no canto da imagem e suas coordenadas (RA:  $\sim 194,0^\circ$  e DEC:  $\sim -5,9^\circ$ ) eram compatíveis com o blazar 3C 279. Este resultado, a princípio, foi surpreendente. Porém, após considerar que a abertura angular do raio da região observada era de  $20^\circ$ , percebeu-se o quão grande era a região do céu estudada.

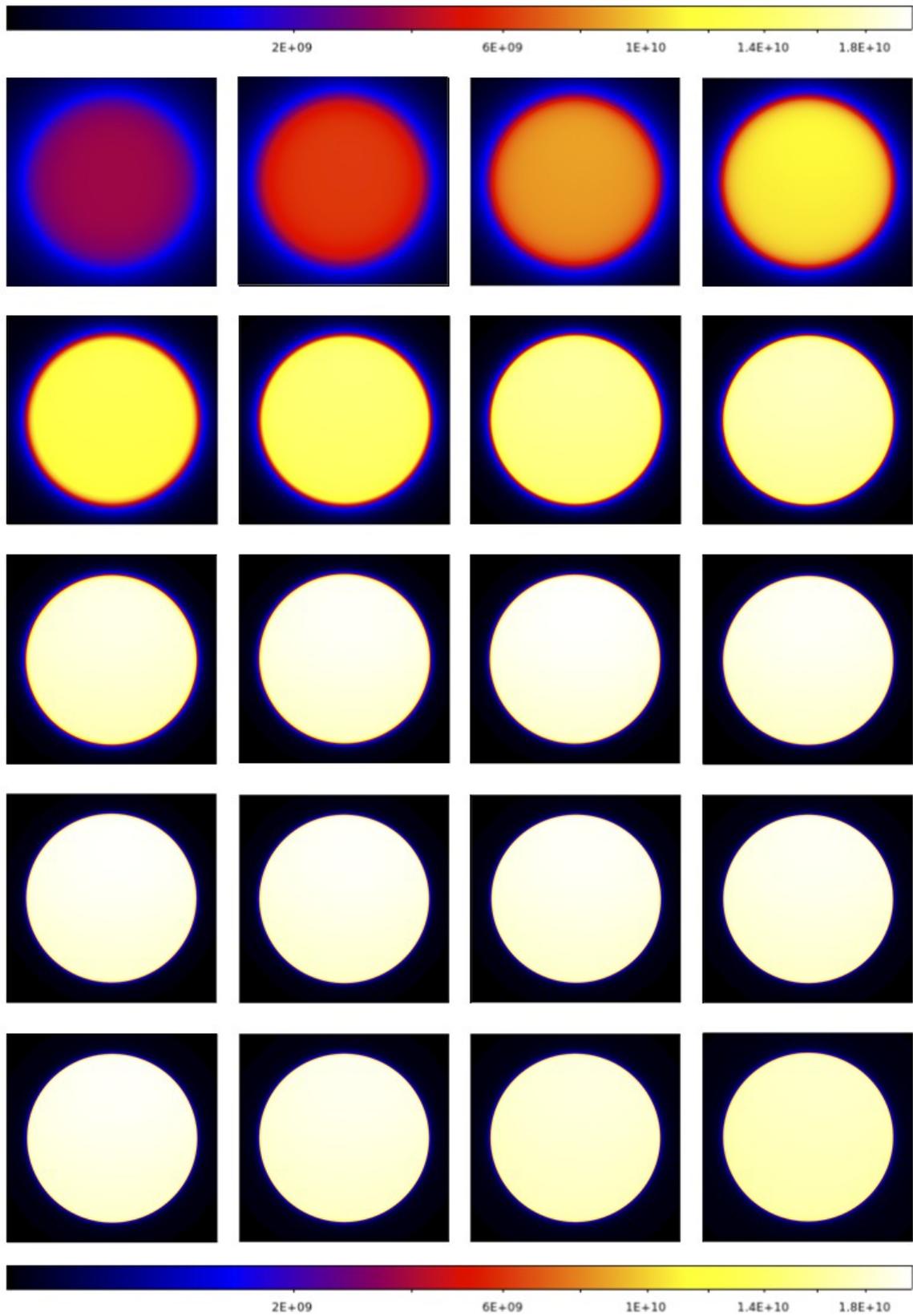


Figura 11: Exposure map composto por 20 camadas de diferentes níveis de energia para o blazar 3C 279.

Dando continuidade à análise, decidiu-se extrair novos dados da plataforma, desta vez com  $35^\circ$  para o raio da região de interesse, centrado na galáxia M87. Desta forma, tanto a região com a M87 quanto a com o 3C 279 poderiam ser bem visualizadas simultaneamente. O *count map* obtido pode ser observado na Figura 12.

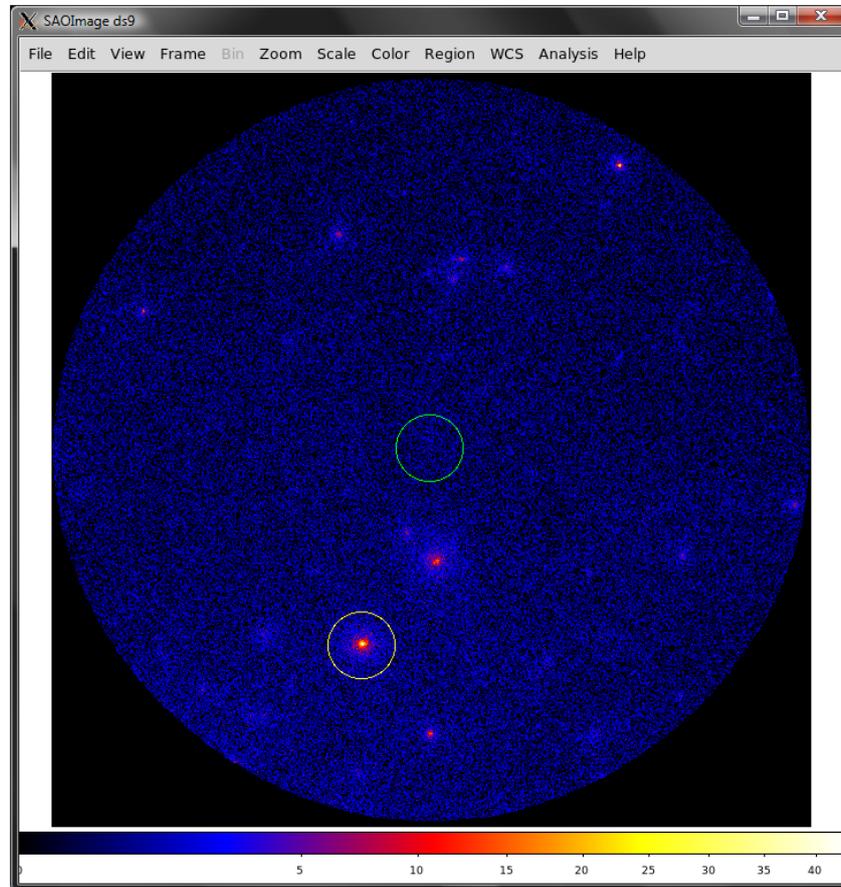


Figura 12: *Count map* centralizado nas coordenadas da M87, região marcada com o círculo verde. Observe que nesta região não há qualquer prevalência de fótons com o nível de energia selecionado (de 100 MeV a 100000 MeV). Com o aumento do raio da região de interesse para  $35^\circ$ , a região do 3C 279 (círculo amarelo) passa a fazer parte do *count map*. A diferença entre a frequência de fótons de alta energia nas duas regiões é evidente.

O ponto central da Figura 12, sinalizado com o círculo verde cujo centro tem coordenadas RA:  $\sim 187,8^\circ$  e DEC:  $\sim 12,4^\circ$ , é a região onde se encontra a M87. Já o círculo amarelo, cujas coordenadas do centro são RA:  $\sim 194,0^\circ$  e DEC:  $\sim -5,9^\circ$ , é a região onde se encontra o 3C 279. Repare como a região da imagem em torno do círculo amarelo é a mesma exibida na Figura 8.

A Figura 12 deixa claro como as energias emitidas pelos dois objetos se encontram em pontos distantes do espectro de radiação eletromagnética. Enquanto o AGN M87 emite principalmente na região do rádio do espectro (que não faz parte do range de energia exibido no *count map*), o blazar 3C 279 emite fótons significativamente mais energéticos, no outro extremo do espectro. Tais fótons foram recebidos pelo *Fermi Gamma-Ray Space Telescope* e estão presentes no *count map*.

## 8. Estudo de um *gamma-ray burst*

Além da obtenção dos *count maps* e das fontes estudadas e de um *exposure map* do 3C 279, também foi feita uma análise de um *gamma-ray burst* (GRB), tendo como base a posição e o tempo obtidos por um *GBM trigger* que é gerido pelo FSSC. Esta atividade não fazia parte do escopo inicial do projeto, mas foi incorporada como forma de agilizar a familiaridade do aluno com as *Fermi Science Tools*. Sendo assim, os resultados exibidos abaixo permitem uma avaliação superficial sobre as propriedades do *burst*.

A extração dos dados desta seção foi feita de forma bastante similar à já realizada para as seções anteriores, com duas diferenças significativas: o raio de interesse usado foi de 40° e foi usada a opção *extended data*. O período dos dados solicitados abrange dos 500s anteriores ao evento detectado pelo *GBM trigger* até 2000s depois.

Assim, o arquivo obtido continha todas as informações de fótons a até 40° da posição do GBM dentro do período indicado. Muitos desses eventos correspondem a emissões da própria atmosfera da Terra, uma vez que nenhum filtro foi aplicado. A Figura 13 mostra um gráfico com a relação entre o ângulo medido a partir do zênite do satélite e a distribuição de eventos. Ele foi criado através do software fv.

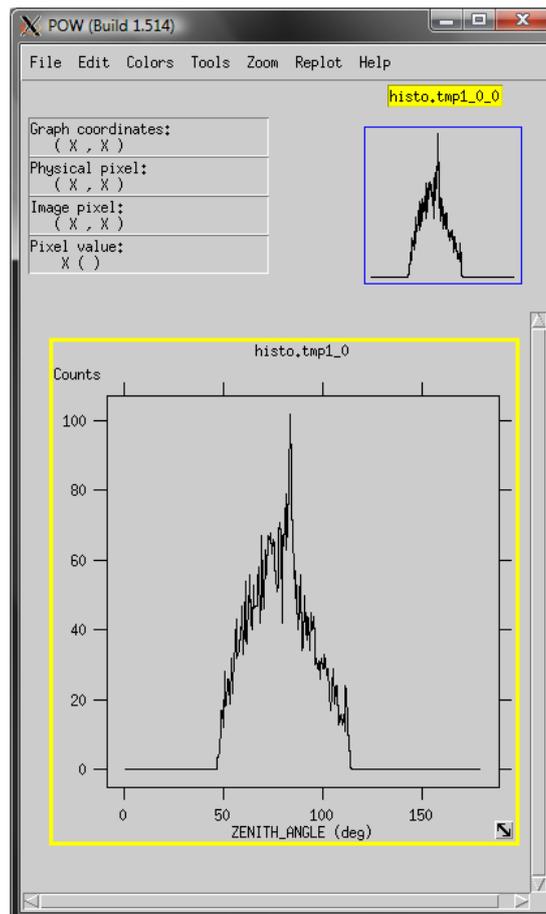


Figura 13: Relação entre o ângulo medido a partir do zênite do satélite e a distribuição de fótons detectados dentro do intervalo de energia estudado.

Mesmo havendo interferência dos fótons gerados na atmosfera terrestre que ainda não foram filtrados, o gráfico é importante por mostrar em torno de qual ângulo há maior concentração de

eventos. Isso ocorre ao redor de  $80^\circ$ . Para filtrar a interferência terrestre, a ferramenta *gtselect* foi utilizada. Como feito anteriormente, o parâmetro *zenith angle value* foi ajustado para  $100^\circ$ .

Para que se tenha uma ideia de como se parece a região de emissão, foi elaborado um *count map* dos dados filtrados. Como feito anteriormente, utilizou-se a ferramenta *gtbin* pra geração dos dados e o software ds9 para elaborar o *count map* exibido na Figura 14.

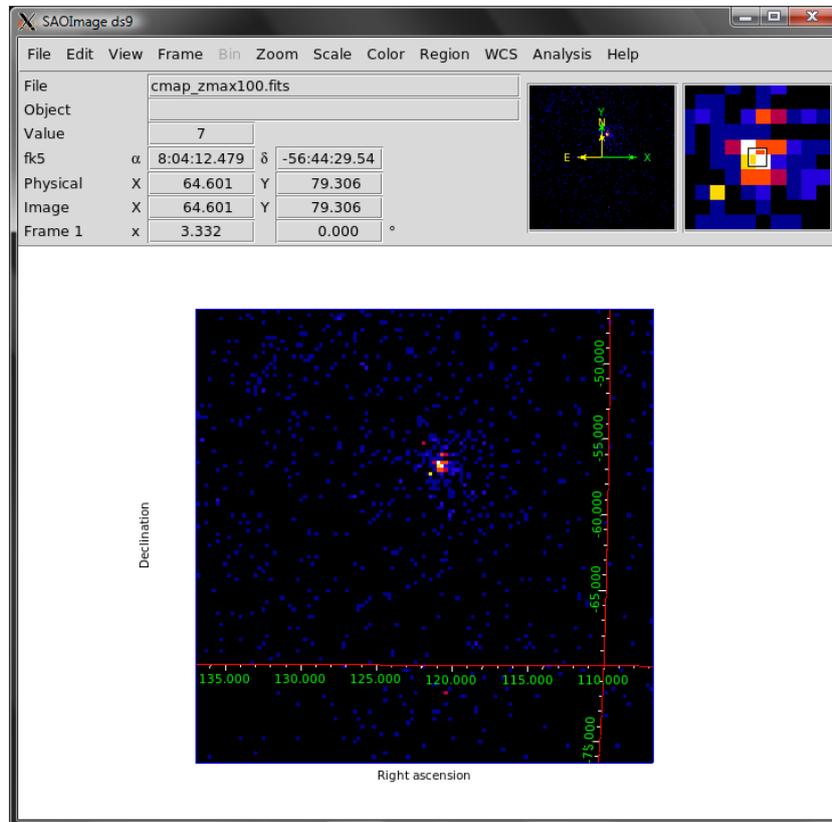


Figura 14: *Count map* da região onde ocorreu o GRB.

Esta imagem pode ser usada para que a localização do *burst* seja determinada, ainda que de forma não muito precisa.

Também é possível gerar uma curva de luz, através do software fv, utilizando-se estes dados filtrados. O resultado pode ser observado no gráfico da Figura 15.

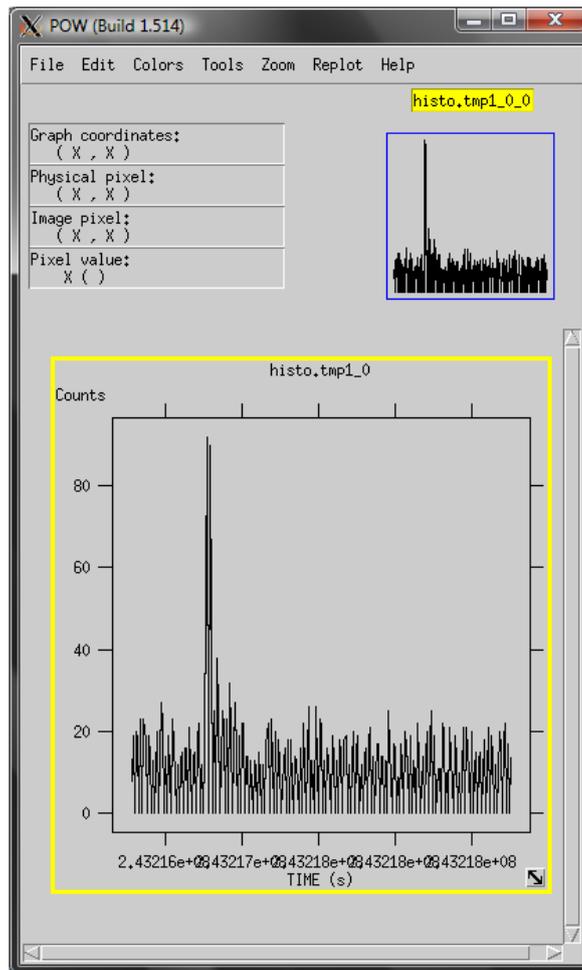


Figura 15: Curva de luz preliminar do GRB estudado.

Neste gráfico, que nada mais é do que um histograma, os dados foram agrupados em intervalos de 10 segundos de largura. Este agrupamento, porém, foi feito diretamente dentro do *software* *fv*, através da determinação de uma largura para as classes do histograma. Assim, pode-se facilmente conseguir uma idéia de como a emissão se comportou ao longo do tempo. Esta informação é útil ao se determinar os parâmetros de tempo a serem usados com a ferramenta *gtbin*. Através desta ferramenta, escolheu-se montar as curvas de luz exibidas nos gráficos das Figuras 16 e 17 iniciando a contagem 50s antes do burst e encerrando 100s depois.

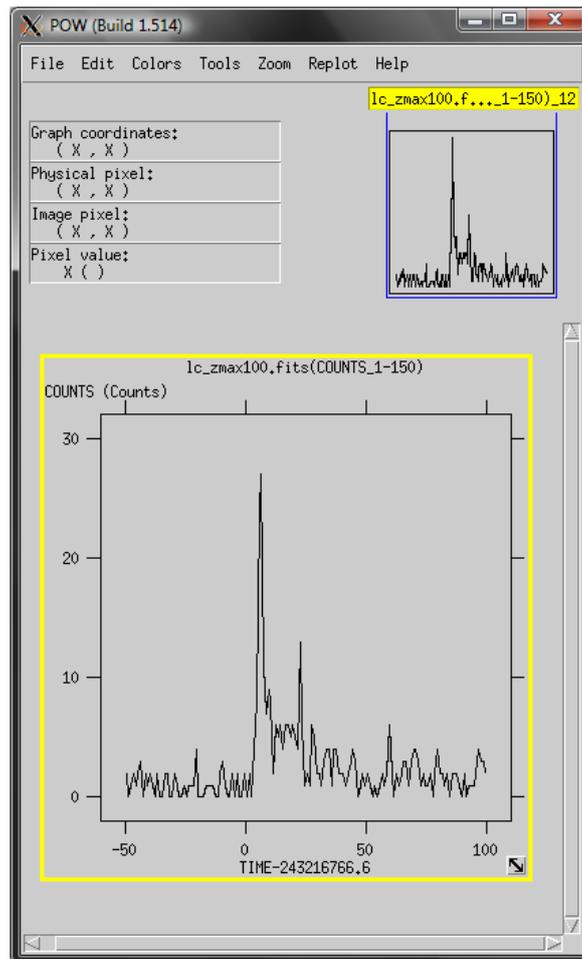


Figura 16: Curva de luz do GRB estudado após a utilização da ferramenta *gtbin*.

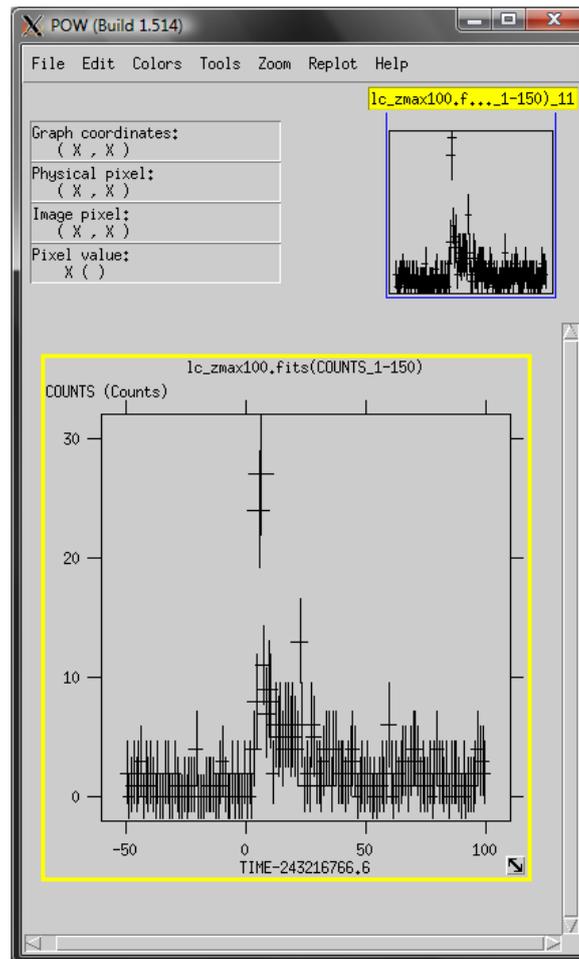


Figura 17: Curva de luz, com barras de erro, do GRB estudado após a utilização da ferramenta *gtbin*.

Os gráficos acima foram gerados a partir do mesmo banco de dados. A diferença entre eles é que o gráfico da Figura 17 foi gerado com barras de erro. Uma observação interessante é de que, exceto durante o burst, as contagens de fótons ficam entre 0 e 5 durante todo o período analisado. Isso mostra que há muito pouca interferência do *background* para observações em raios gamma.

## 9. Conclusões

Nesta etapa do projeto, o caminho percorrido foi mais importante do que o destino alcançado. O foco principal das atividades foi na familiarização do aluno com as ferramentas de pesquisa, e não nos resultados que foram obtidos com elas até aqui. Assim, apesar de nenhum objetivo científico original ter sido alcançado, os objetivos didáticos podem ser considerados superados.

O estudo dos *count maps* das diferentes fontes estudadas, por exemplo, deixou claro que abordagens distintas precisam ser utilizadas no estudo de objetos que, apesar de pertencerem a uma mesma categoria de corpos (AGNs), possuem características observacionais bastante diversas.

O aluno encontra-se preparado para começar a mergulhar nos dados coletados pelo *Fermi Gamma-Ray Space Telescope*, o que será imprescindível para que os próximos passos deste projeto possam ser dados.

## **10. Referências**

[1] Fermi Large Area Telescope Gamma-Ray Detection of the Radio Galaxy M87, *The Astrophysical Journal*, Volume 707, dezembro de 2009

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2009ApJ...707...55A>

[2] Thompson, D. J. et al., *Exploring the Universe With the Fermi Gamma-Ray Space Telescope*, *Physics Today*, 65, 39, página 40

[3] Begelman, M., & Rees, M. Gravity's Fatal Attraction, *Black Holes in the Universe*. 2010, Cambridge University Press, página 116

[4] Begelman, M., & Rees, M. Gravity's Fatal Attraction, *Black Holes in the Universe*. 2010, Cambridge University Press, página 123

[5] Messier object 87 por Hubble space telescope, disponível em [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Messier\\_87\\_Hubble\\_WikiSky.jpg#/media/File:Messier\\_87\\_Hubble\\_WikiSky.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Messier_87_Hubble_WikiSky.jpg#/media/File:Messier_87_Hubble_WikiSky.jpg)

[6] NASA/IPAC Extragalactic Database por EGRET team, Compton Observatory, NASA. Results for 3C 279. Retrieved 2006-12-04

[7] EGRET team, Compton Observatory, NASA, disponível em [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gamma-Ray\\_Quasar\\_3C\\_279.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gamma-Ray_Quasar_3C_279.jpg)

[8] <http://fermi.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/ssc/LAT/LATDataQuery.cgi>

[9] [http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat\\_Performance.htm](http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat_Performance.htm)