

2021年度 卒業論文

高エネルギー宇宙ニュートリノ候補天体
ブレーザーのガンマ線観測の検討

広島大学 理学部 物理学科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B183075 森下 皓暁

主査：深澤 泰司
副査：岡部 信広

2022年3月27日

概要

ニュートリノは電荷をもたないため、他の粒子とわずかな反応しか起こさないとともに透過性の高い素粒子である。高エネルギー宇宙ニュートリノは高エネルギーの陽子や宇宙線の存在、その起源の解明に重要な役割を果たすと考えられている。しかしその反応のしにくさから観測は難しく、起源に対応する候補天体が同定されたのは、現在まで天体 TXS 0506+056 の 1 例しかない。

高エネルギーニュートリノ起源の候補天体と考えられているものの 1 つにブレーザーという天体があり、各波長帯で観測されている。ブレーザーは活動銀河核 (AGN) のジェットがほぼ地球を向いているもので、そのなかで硬 X 線では明るく、GeV ガンマ線では暗いものは、MeV 領域で明るい可能性があり、新たなニュートリノの起源と期待される。これは MeV のガンマ線はそれより高エネルギーのガンマ線に比べて低エネルギー光子との反応による吸収が弱く、検出される可能性があるためである。

そこで本研究では、硬 X 線で観測をする Swift 衛星で検出されていて、GeV ガンマ線で観測をする Fermi 衛星では検出されていないブレーザーを選定し、Fermi 衛星のスタック解析でそのような天体のデータをすべて足し合わせて GeV 領域での平均の明るさを求め、その結果から次期 MeV ガンマ線観測衛星 AMEGO-X によるシミュレーションで MeV 領域まで拡張することで、新たなニュートリノ起源の観測の可能性を調べる。

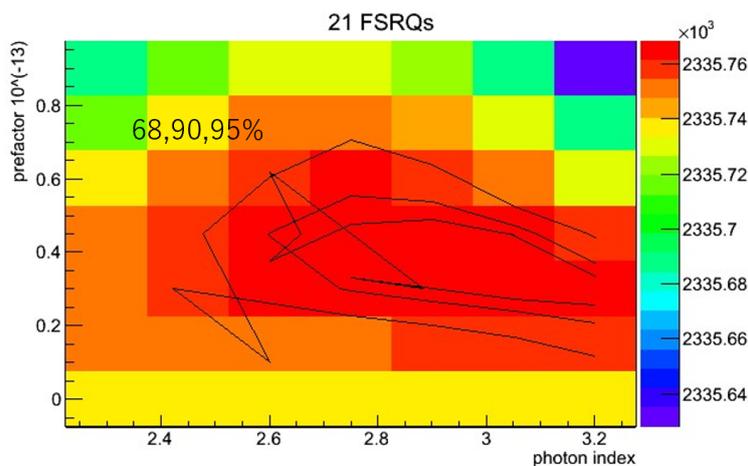


図 1: スタック解析 (横軸:Photon index、縦軸 Prefactor で、黒線は誤差範囲の等高線を示す) (図 4.5 より抜粋)

目次

第 1 章 序論	1
1.1 高エネルギー宇宙ニュートリノ	1
1.1.1 高エネルギーニュートリノ	1
1.1.2 高エネルギーニュートリノ観測の意義	3
1.1.3 高エネルギーニュートリノ起源の候補天体	3
1.2 ブレーザー	4
1.2.1 ブレーザー	4
1.2.2 ブレーザーの放射モデル	5
1.3 研究の目的	6
第 2 章 観測機器と衛星	7
2.1 Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡	7
2.1.1 LAT 検出器	8
2.1.2 Fermi 4FGL-DR2 カタログ	10
2.2 Swift ガンマ線バースト観測衛星	10
2.2.1 BAT 検出器	11
2.2.2 BAT 105 カ月 カタログ	12
2.3 全天 MeV ガンマ線観測衛星 AMEGO-X	12
2.3.1 AMEGO-X 計画	12
2.3.2 AMEGO-X の検出器	13
第 3 章 Fermi LAT 検出器のデータ解析方法の確立	14
3.1 天体の選定	14
3.2 2 天体のデータ解析	15
3.2.1 Fermi Science Tools	16
3.2.2 Fermipy	18
3.2.3 解析結果	18
3.3 2 天体のスタック解析	20
第 4 章 MeV ガンマ線で明るい可能性のある 21 天体の解析	24
4.1 21 天体の選定	24
4.2 21 天体の解析	25
4.3 21 天体のスタック解析	27

第 5 章 MeV 領域でのシミュレーション	31
5.1 解析ツール	31
5.1.1 Geant4	31
5.1.2 MEGAlib (The Medium-Energy Gamma-ray Astronomy library)	31
5.2 シミュレーション方法	32
5.3 21 天体の結果を用いたシミュレーション	33
5.3.1 ジオメトリの設定	33
5.3.2 インプットファイルの作成	33
5.3.3 シミュレーション	34
第 6 章 結論・まとめと今後	37
付録	38

目次

1	スタック解析	1
1.1	IceCube ニュートリノ観測所 [10]	2
1.2	IceCube で観測されたニュートリノの天球分布 ¹	3
1.3	背景放射ニュートリノスペクトル ¹	3
1.4	ブレーザー ²	5
1.5	FSRQ 型のスペクトル	5
2.1	Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡（上段）と検出器（下段左右） [6][14]	7
2.2	LAT 検出器の性能 [6]	8
2.3	LAT 検出器の模式図 ([13] に加筆)。 X_0 は放射長を表す。	9
2.4	カロリメータの模式図 [14]	10
2.5	ACD の模式図 [14]	10
2.6	Swift 衛星 [18]	11
2.7	BAT 検出器の模式図 [18]	11
2.8	コーデッドマスク [17]	11
2.9	AMEGO-X の感度 [16]	12
2.10	AMEGO-X の性能	13
2.11	AMEGO の検出器	13
3.1	ブレーザーのガンマ線スペクトルの概観と選んだ 2 天体のスペクトル	15
3.2	Fermi Science Tools (python) と Fermipy の比較	18
3.3	天体 PKS 0743-006 の SED	20
3.4	天体 PKS B1412-096 の SED	20
3.5	スタック解析のイメージ	21
3.6	スタック解析の結果 (3 次元)	22
3.7	スタック解析の結果 (2 次元)	22
3.8	スタック解析の結果 (2 次元)	22
4.1	4 条件での TS ヒストグラム分布	26
4.2	スタック解析の結果 (条件 ③) (2 次元)	28
4.3	スタック解析の結果 (条件 ④) (2 次元)	28
4.4	スタック解析の結果	29
4.5	スタック解析の結果 (2 次元)	29

4.6	スタック解析の結果	30
5.1	MEGAlib で再現される AMEGO-X の検出器	33
5.2	21 天体のスタック解析から得られた入力フラックス	35
5.3	AMEGO-X のバックグラウンド	35
5.4	21 天体のシミュレーション結果の SED	36
5.5	求めた AMEGO-X の有効面積	36

第1章 序論

1.1 高エネルギー宇宙ニュートリノ

1.1.1 高エネルギーニュートリノ

ニュートリノは電荷を持たず、重力と弱い相互作用しか感じないので、他の粒子とわずかな反応しか起こさないとても透過性の高い素粒子である。陽子が加速されて標的にぶつかると、 π 粒子と呼ばれるハドロンが大量に発生し、それらが μ 粒子とミューニュートリノに崩壊することで発生する(式 1.1,1.2)。また、 μ 粒子もそれぞれ崩壊し、電子ニュートリノ、ミューニュートリノなどが発生する(式 1.3,1.4)。 ν_μ はミューニュートリノ、 ν_e は電子ニュートリノを表し、上付きバーはそれぞれの反粒子のことである。そのためニュートリノは高エネルギーの陽子などの宇宙線が存在していたという証拠になる。表題に「高エネルギー」とつけているのは、太陽や超新星からのニュートリノや加速器実験等で用いられるニュートリノと区別する意図がある。

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.1)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.2)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1.3)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1.4)$$

ミューニュートリノや電子ニュートリノといった分類はニュートリノフレーバーとよばれる。ニュートリノは粒子である一方で波の性質も持ち、フレーバーは質量の決まった波の重ね合わせとなってニュートリノが空間を飛ぶ間に波の位相が変化し、種類が移り変わる。この現象をニュートリノ振動という。負電荷のレプトンである電子 e 、ミューオン μ 、タウオン τ と関係して反応を起こすニュートリノのことをそれぞれ電子ニュートリノ ν_e 、ミューニュートリノ ν_μ 、タウニュートリノ ν_τ とよぶ[8]。

また、検出によって星内部の物理状態や遠方宇宙の現象の解明などが期待される一方、他の物質との相互作用が乏しいために検出が難しい。そこで南極にある IceCube ニュートリノ観測所では、広大な土地があつて風や波の影響もない氷のなか(地下)に作られた観測施設で検出が試みられている(図 1.1)。

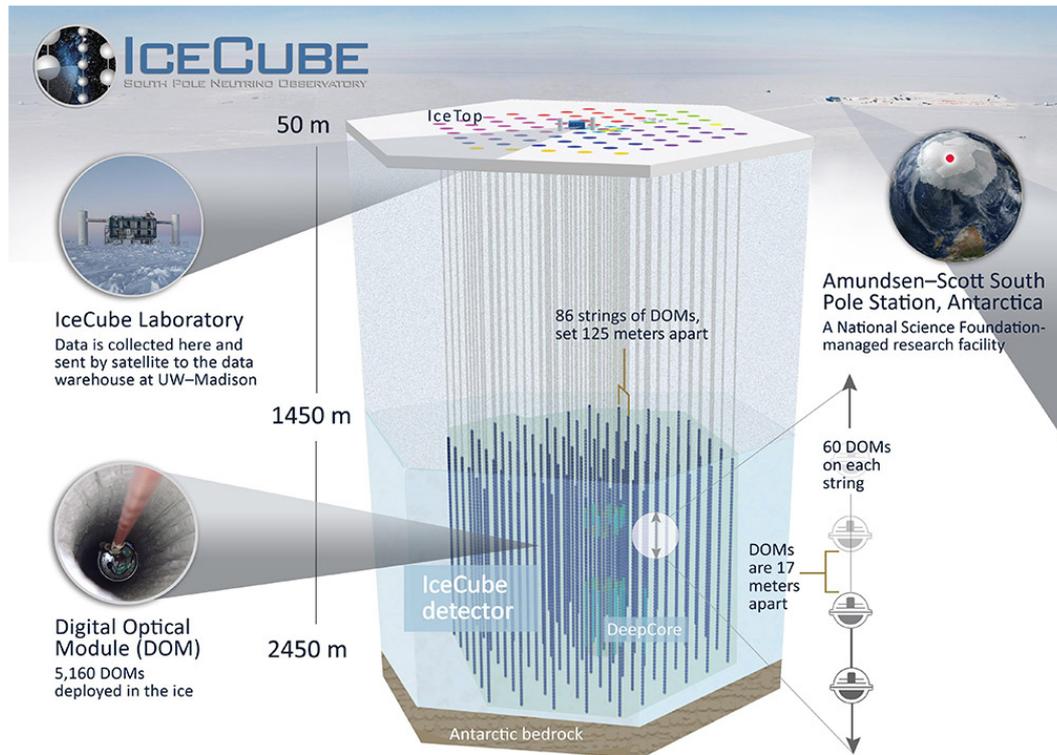


図 1.1: IceCube ニュートリノ観測所 [10]

IceCube では、ニュートリノが氷のなかの水分子に衝突することで生じるチェレンコフ光とよばれる光を検出することで、ニュートリノを捉えている。チェレンコフ光とは、荷電粒子が媒質中を運動するとき、荷電粒子の速度が媒質中の光速より速いときに放出される光である。ニュートリノの衝突頻度を上げるために大量の物質を取り囲むように検出施設を作る必要があり、この IceCube では広大な土地があり、風や波の影響がない南極の氷のなかに 5000 個以上もの検出器が配置されている。

IceCube 実験の前身である AMANDA 実験が 1996 年に開始され、IceCube 観測所は 2004 年に建設され始めた。2005 年からは部分的な観測が始まったが、建設が完了して全面的に観測できるようになったのは 2011 年である。

IceCube の観測が始まると、2011 年 8 月と 2012 年 1 月、それぞれ 1PeV を超える超高エネルギー宇宙ニュートリノの信号で、1 万個にも及ぶ光子が検出器で検出された。この観測を受けてフォローアップ探索が行われた結果、大気起源の背景事象ではない世界初の高エネルギー宇宙ニュートリノを観測したということが証明された [10]。またこの 2 イベントだけでなく、ニュートリノの背景放射（宇宙空間であらゆる方向から一様に降り注ぐ高エネルギーニュートリノ）が観測され、その到来方向分布が銀河面に局在してはいないことから、起源は銀河系外（例えば、節 1.1.3 で挙げる天体）であろうと示唆されている [8]。

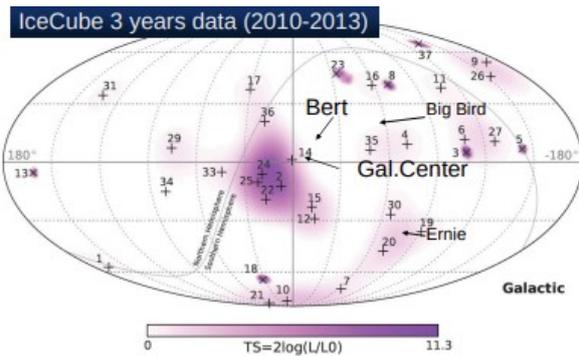


図 1.2: IceCube で観測されたニュートリノの天球分布¹

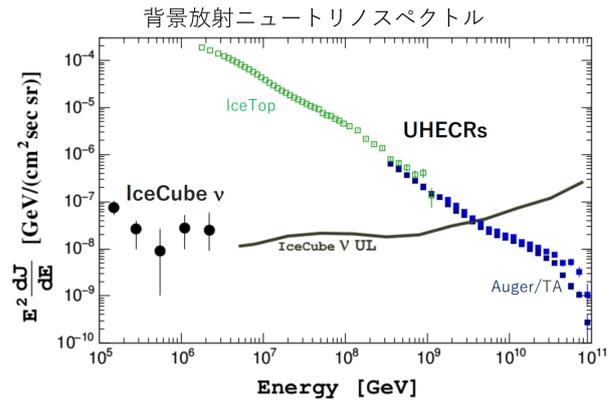


図 1.3: 背景放射ニュートリノスペクトル¹

そして後にも述べるが、2017年に検出されたニュートリノ事象の到来方向の情報をもとに世界中が追尾観測を行った結果、その放射源天体を初めて同定することに成功したのである。

1.1.2 高エネルギーニュートリノ観測の意義

そもそもなぜ高エネルギーニュートリノを観測したいのかということなのだが、ニュートリノは長年解決していない超高エネルギー宇宙線の起源の解明につながると考えられていることが挙げられる。超高エネルギー宇宙線とは、一般的な宇宙線に比べて、非常に高いエネルギー ($10^{19} - 10^{20}$ eV) を持っているものである。 10^{15} eV 程度までの高エネルギー宇宙線は、超新星残骸によって加速されるという説があるが、それ以上のエネルギーに宇宙空間でどのように加速するのかはまだわかっていない [9]。

宇宙線は電荷を持っていることで銀河間の磁場によって軌道が曲げられるため、到来方向からその起源を特定するのが難しい。超高エネルギー宇宙線の出すガンマ線は、濃い物質や長距離飛行中に吸収されてしまうという弱点がある。一方、ニュートリノは、電荷を持たず弱い相互作用しか起こさないため、磁場に曲げられず、また透過性も高いので、超高エネルギー宇宙線の発生場所を特定することができる。また IceCube で検出された高エネルギーニュートリノの背景放射のフラックスはガンマ線背景放射や超高エネルギー宇宙線フラックスと同程度であることがわかっており、超高エネルギー宇宙線の起源についての手がかりになるとされている。

1.1.3 高エネルギーニュートリノ起源の候補天体

現在まで高エネルギーニュートリノの起源として示唆されているのは 2017 年のブレーザー TXS 0506+056 の観測を除いて他になく、まだよくわかっていないのが現状である。現在、高エネルギーニュートリノ起源の候補として

- 銀河団・銀河群
- ガンマ線バースト (GRB) と超新星

¹<https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/prwps/ss/2017/data/yoshida.pdf>

- (ブレイザーでない) AGN の降着円盤のコロナ+星間物質
- スターバースト銀河 (星生成が活発な銀河)
- ブレイザー天体

などが考えられている [11]。

銀河団や銀河群には、AGN (活動銀河核: とても強い電磁波を放射する銀河中心領域) を含む多くの銀河があり、次節で示すジェットや、アウトフローというガスの流れは、宇宙線加速に適している。また、構成銀河同士の合体や構造形成に伴う宇宙線生成の可能性も考えられる。

GRB は最高エネルギーの爆発現象で、宇宙線を超高エネルギーまで加速できる可能性がある。超高エネルギー宇宙ニュートリノは、GRB のアフターグロー (GRB 後に X 線や可視光でしばらく輝く残光) の間に生成されることが期待されている。また、ある種の超新星は、低光度の GRB に関連し、宇宙線のエネルギー収支に重要であるとされている。

AGN の降着円盤では、高温のプラズマで満たされたコロナによって陽子が加速されて、近くに存在する星間物質に衝突してニュートリノが発生するということが考えられる [12]。

また、超新星爆発によって放出されるエネルギーの一部は爆風として、周囲の星間物質と衝突を起こすことで高エネルギー宇宙線が加速され、高エネルギーニュートリノが発生すると考えられている。

スターバースト銀河は超新星爆発が活発に起きている銀河であり、単独の超新星残骸による加速よりも大規模な粒子加速が起きていると考えられている¹。

このようななかで本研究で着目したのはブレイザー天体だが、その詳細は次節で記述する。

1.2 ブレイザー

1.2.1 ブレイザー

ここでは本研究対象である天体ブレイザーについて記述する。銀河の中には、中心部の非常に狭い領域から、銀河全体をも凌駕するような強い電磁波を放射しているものがあり、このような銀河中心部領域を活動銀河核 (AGN) といい、この核を持つ銀河を活動銀河という。このなかでも電波で強く光っているものは電波銀河とよばれ、そのうち放出されるジェットが我々の視線方向となす角が小さく、ほぼ地球を向いているものがブレイザーとよばれる (図 1.4)。

AGN はジェットを双方向に噴出していて、その速度は光速の 99% にもなる。AGN 自体の大きさは太陽系程度とされているが、ジェットは大きいもので約百万光年もあり、宇宙空間にのびている。AGN のジェットは非常に明るく、その正体は、中心に存在するブラックホールに降着するガスの重力エネルギーを解放することで発生するプラズマの流れであると考えられている。

このジェットのようにほぼ光速の相対論的な速度で観測者に近づく物体は、ビーミング効果により光度は高く観測される。ブレイザーには BL Lac 型と FSRQ 型の 2 種類があり、そのうちの FSRQ 型は、電波スペクトルが平坦で降着円盤からの明るい放射が見られ、スペクトルにはそれぞれが Synchrotron Self-Compton および External Compton 放射に対応すると考えられるピークがある。

¹https://www.ipmu.jp/sites/default/files/webfm/pdfs/news11/J_FEATURE.pdf

ジェットには高エネルギーの陽子が一部含まれていると考えられ、ジェット内の陽子同士の反応あるいは陽子と光子の反応、宇宙空間の星間物質との反応により、高エネルギーニュートリノが発生する。ブレーザーはジェットを正面から見ているため、ニュートリノもビーミングされて明るく見えるため、有力な候補天体として挙げられているのである。

また、ブレーザー天体の中でも FSRQ 型を選んでいるが、これは FSRQ 型は BL Lac 型よりも比較的光度が高いためである。ブレーザーの光度が低いほどスペクトルのピークエネルギーが高くなるというブレーザーシーケンスがわかっている、BL Lac 型は逆コンプトン散乱のピークが TeV 領域程度と非常に高くなっている。本研究でデータを用いる Fermi LAT 検出器は TeV 領域には感度がないため、FSRQ 型に着目した。

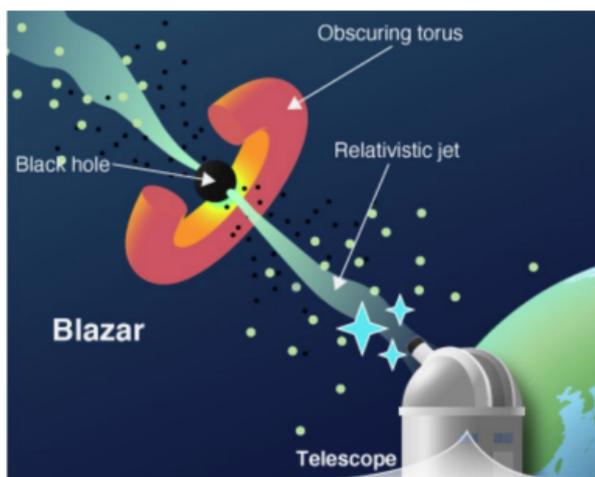


図 1.4: ブレーザー²

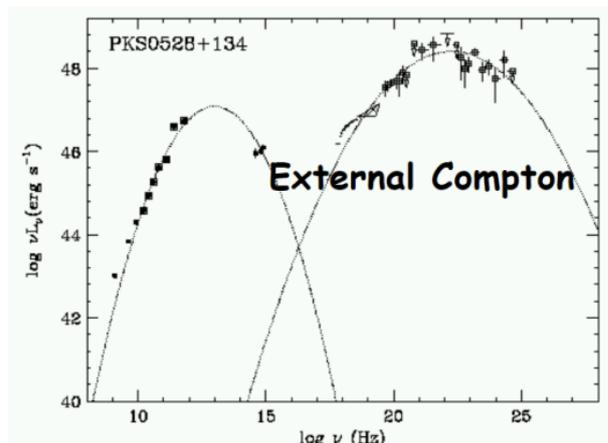


図 1.5: FSRQ 型のスペクトル

1.2.2 ブレーザーの放射モデル

ブレーザーのスペクトルには、以下のような放射モデルによるとされるピークが見られる (図 1.5)。

Synchrotron Self-Compton (SSC)

ジェット内の電子が磁場によって電磁波を放射 (シンクロトロン放射) し、その光子をそばにある電子が逆コンプトン散乱することで、光子にエネルギーを与える。シンクロトロン放射が低エネルギー側、逆コンプトン放射が高エネルギー側のピークに対応する。

External Compton (EC)

降着円盤や分子雲トーラスなど、外部からきた光子をジェット内の電子が逆コンプトン散乱してエネルギーを与える。この場合のピークのエネルギーは、SSC モデルの逆コンプトンより高エネルギー側に現れるとされているが、重なってしまうことがよくある。

²<https://fj.ics.keio.ac.jp/en/timetubesx>

1.3 研究の目的

前述の IceCube の実験により、実際に 2011 年に初めて高エネルギー宇宙ニュートリノが発見された。そして 2017 年には高エネルギー宇宙ニュートリノイベントの方向に、GeV ガンマ線で明るくなっているブレーザー天体 TXS 0506+056 が Fermi 衛星によって確認され、GeV ガンマ線と高エネルギーニュートリノ天体の同期の一例となった。ただ高エネルギーニュートリノイベントは増えているにも関わらず、今のところその起源に対応する候補天体はこの 1 例しかない。1 つの可能性として、GeV や TeV 領域の高エネルギーのガンマ線は、物質や光子の密度の濃い環境では低エネルギーの光と衝突しやすく、検出されにくいためであるということが考えられている。そこで、GeV や TeV のエネルギー帯ではわからなくても、少しエネルギーの低い MeV 領域では光っている可能性が考えられる。

これには 2 つの理由が考えられ、まずは MeV の方が相対的に明るくなるということである。また GeV のガンマ線は低エネルギーの光子と反応して e^+ 、 e^- となり、そこからまたガンマ線が出るが、このときのガンマ線はエネルギーが低い側に出るため MeV 領域になるという可能性である。

ここで、詳細は次章に記すが、GeV ガンマ線領域で観測をする Fermi 衛星 LAT 検出器 (0.1-300 GeV) と、硬 X 線領域で観測をする Swift 衛星 BAT 検出器 (14-195 keV) が、それぞれのエネルギー帯でブレーザー天体 FSRQ を全天で検出している。Fermi 衛星 LAT 検出器では FSRQ 型のブレーザーは約 1500 天体検出されており、暗いブレーザーまで観測できている。一方、Swift 衛星 BAT 検出器では FSRQ は 53 天体しか検出されておらず [4]、明るいものしか見えていないことを意味する。にもかかわらず、この 53 天体のうち 21 天体は、より暗いものまで見える LAT 検出器では検出されていない。

BAT 検出器で観測されていて LAT 検出器で観測されていない FSRQ は、硬 X 線帯では明るく、GeV ガンマ線領域では暗いということがわかり、逆コンプトン散乱のピークが MeV ガンマ線付近にあると考えられる。

これらの BAT 検出器では見つかったり LAT 検出器では見つからない天体について、個々の天体の Fermi での解析では当然検出の有意度 (TS) は低いことが予想されるが、それらの天体のデータをすべて足し合わせてスタック解析という解析を行い、それらの天体がすべて同じ明るさであると仮定すると、平均的な明るさを求めることができる。

そして、GeV ガンマ線での平均的な明るさが求まると、MeV でどのくらい明るいのかということ推測することができる。そして、MEGAlib という MeV ガンマ線検出器のシミュレーションをすることができ、ツールを用いて、次期 MeV ガンマ線観測衛星として提案されている AMEGO-X による観測シミュレーションを行い、Fermi 衛星で見えていないものが実際に見えそうなのかということを調べる。

第2章 観測機器と衛星

本章ではこの研究に関連する観測機器について記述する。

2.1 Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡

Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡は、2008年6月に打ち上げられて現在も観測を続けている GeV ガンマ線観測衛星である。この衛星には、広い視野で 20 MeV-300 GeV のエネルギー帯域のガンマ線を観測する Large Area Telescope (LAT) と、8 keV-30 MeV のエネルギー帯域をカバーし、ガンマ線バーストなどの突発現象を全天から観測することを目的とした Gamma-ray Burst Monitor (GBM) の2つの装置が搭載されている。

軌道周期は95分で1周する間に全天の85%をカバーするため、数年スケールの長期変動から、1日以内の短期変動までを同時に追跡することができる。

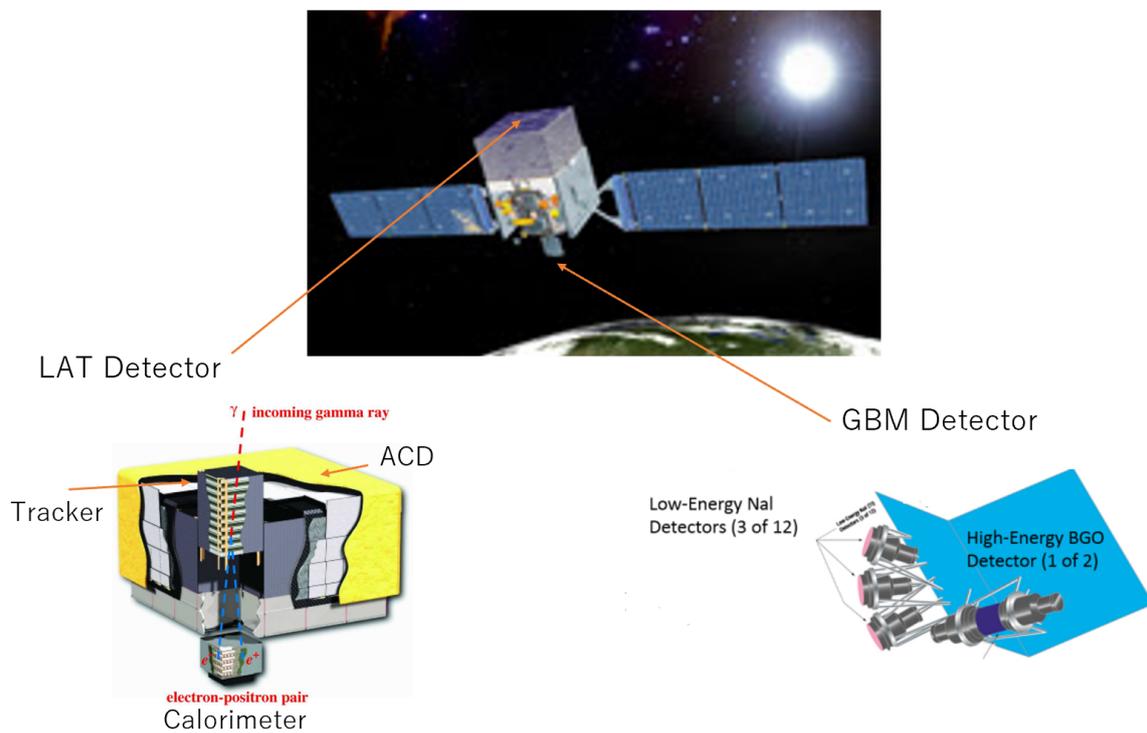


図 2.1: Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡（上段）と検出器（下段左右） [6][14]

2.1.1 LAT 検出器

ここでは、そのうちのLAT 検出器について記述する。ガンマ線のエネルギーが電子の静止質量 (511keV) の2倍を超えると、電子・陽電子対生成が起こるようになる。LAT はシリコンストリップ検出器と CsI シンチレータを用いて、それにより発生する電子陽電子対の飛跡とエネルギーを計測することで、ガンマ線のエネルギーと到来方向を予測する。具体的には以下のような主要な装置が含まれている。

Parameter	Value or Range
Energy Range	~20 MeV to >300 GeV
Energy Resolution	<15% at energies >100 MeV
Effective Area	>8,000 cm ² maximum effective area at normal incidence
Single Photon Angular Resolution	<0.15 $\frac{1}{2}$, on-axis, 68% space angle containment radius for E > 10 GeV; < 3.5 $\frac{1}{2}$, on-axis, 68% space angle containment radius for E = 100 MeV
Field of View	2.4 sr
Source Location Determination	<0.5 arcmin for high-latitude source
Point Source Sensitivity	<6x10 ⁻⁹ ph cm ⁻² s ⁻¹ for E > 100 MeV, 5 σ detection after 1 year sky survey
Time Accuracy	<10 microseconds, relative to spacecraft time
Background Rejection (after analysis)	<10% residual contamination of a high latitude diffuse sample for E = 100 MeV - 300 GeV.
Dead Time	<100 microseconds per event

図 2.2: LAT 検出器の性能 [6]

トラッカー (TKR)

トラッカーは図 2.3 のように、合わせて 16 層からなり、タングステンシートと、シリコンストリップセンサー 2 枚の組を一つの層として構成されている。対生成反応によりタングステンシートで生じた電子陽電子対はシリコンストリップセンサーで電気パルス信号を出すことによって検出される。このセンサーは細い帯状のパターン電極がで作られており、どの位置を通過したのかが数百 μ m の精度でわかる。電子陽電子対の進行方向が追跡され、この方向から光子の飛来方向が特定される。トラッカーは front 部分と back 部分に分かれていて、back 部分のタングステンの厚さは front 部分に比べて約 6 倍厚くなっている。タングステンシートが厚いほうが対生成が起こる確率が高くなって有効面積は大きくなるが、生成された電子・陽電子が多重散乱を起し、角度分解能が悪くなる。そこで、低エネルギーの光子の飛来方向は精度良く割り出すために front 部分は薄くして到来方向の決定精度を上げている。高エネルギーの光子では多重散乱をそこまで考慮する必要がないため、高エネルギーガンマ線に対する有効面積を確保するために back 部分は厚くしているのである。このような構造にすることで、幅広いエネルギー帯域のガンマ線に対応することが可能となる。下の二層にタングステンがないのは、トラッカーがトリガーされる条件が連続する 3 層でシリコンストリップセンサーがヒットすることであり、多重散乱により飛跡がゆがめられることを防ぐためである。

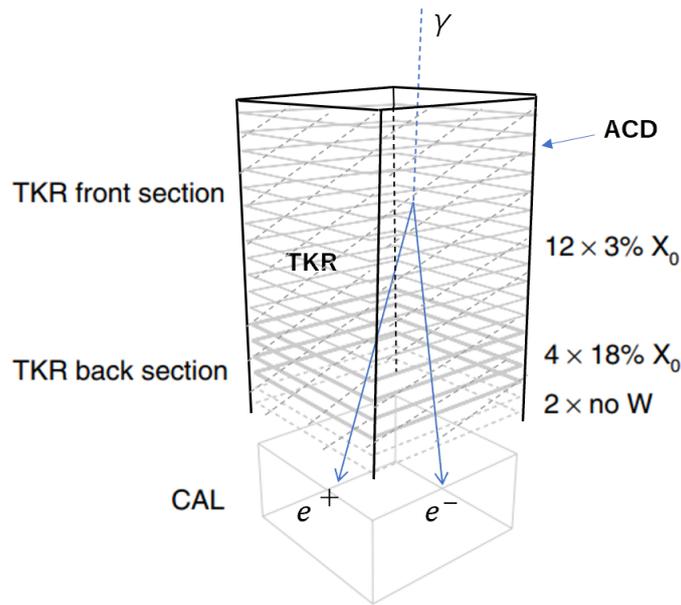


図 2.3: LAT 検出器の模式図 ([13] に加筆)。 X_0 は放射長を表す。

カロリメータ (CAL)

カロリメータは、各トラックのモジュールの下に搭載されていて、ヨウ化セシウム CsI の棒状結晶シンチレータからなる。それぞれの両端にはシンチレーション光を読み出す大小のフォトダイオードが接着され、異なるエネルギー帯に感度を持つ。トラックで生成された荷電粒子がカロリメータを通過するときに電磁カスケードにより多くの荷電粒子が生成され、シンチレータ内の物質が励起される。これらが基底状態に戻るときにシンチレーション光子が放出され、フォトダイオードで検出することで荷電粒子のエネルギーがわかる。トラックと同様に 16 個のモジュールからなる。

反同時計測検出器 (ACD)

以上の説明から、トラックとカロリメータだけでもガンマ線の飛来方向とエネルギーはわかるが、このままでは観測目的のガンマ線と宇宙線との区別がつかない。そのため、トラック全体を覆うように反同時計測検出器がある。これはプラスチックシンチレータでできているためガンマ線とは反応せず宇宙線とは反応するため、ACD とカロリメータが同時に反応するイベントをバックグラウンドとみなすことができる。この結果約 99.97 % 以上もの荷電粒子によるバックグラウンドを除去できる。

データ取得システム (DAQ)

データ取得システムは、LAT の頭脳といわれるようなところで、トラック、カロリメータ、反同時計測検出器からの情報を集めて不要な信号と目的にガンマ線信号を区別して、地上に送るガンマ線信号を決

定する。特殊な電子機器とマイクロプロセッサで構成されている。

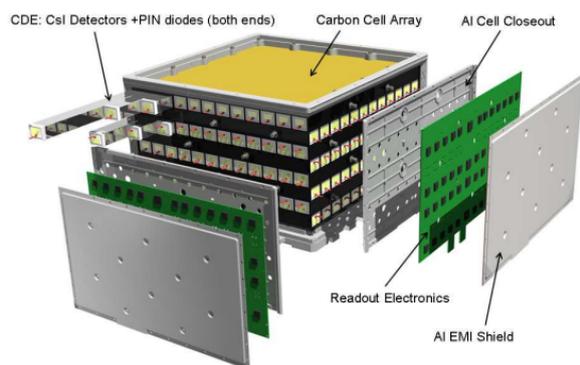


図 2.4: カロリメータの模式図 [14]

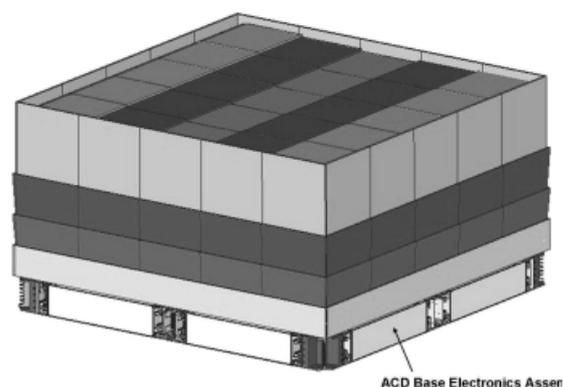


図 2.5: ACD の模式図 [14]

2.1.2 Fermi 4FGL-DR2 カタログ

ここでは、この研究に用いた天体のデータが載せられている天体カタログについて記述する。まず、Fermi 衛星の LAT 検出器が検出した天体の観測量が含まれているものを FGL (Fermi Gamma-ray LAT) カタログとよぶ。カタログには Fermi 衛星で検出された天体のリストがまとめられ、リリースされた順に FGL の名前の前に番号がついている。その中で 4FGL-DR2 (Data Release) カタログは 2008 年からの 10 年間の観測に基づいた合計 5787 天体が掲載されている。データとしてはその天体の種別や赤経赤緯の座標、各エネルギーバンドでのフラックスの値など多くの観測量が含まれている。今回はこの 4FGL-DR2 カタログを用いて研究を進めた¹。

2.2 Swift ガンマ線バースト観測衛星

Swift 衛星は、2004 年 11 月に打ち上げられたガンマ線バースト観測衛星である。

この衛星には、可視光から紫外線でガンマ線バーストの残光を観測する UVOT (UV Optical Telescope) と、硬 X 線で観測する XRT (X-Ray Telescope)、ガンマ線バーストを検出して到来方向を決定する BAT (Burst Alert Telescope) が搭載されていて、それぞれが異なるエネルギー帯を観測できる。この研究ではこのうちの BAT 検出器が取得したデータを用いた。

¹https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/10yr_catalog/gll_psc_v27.fit

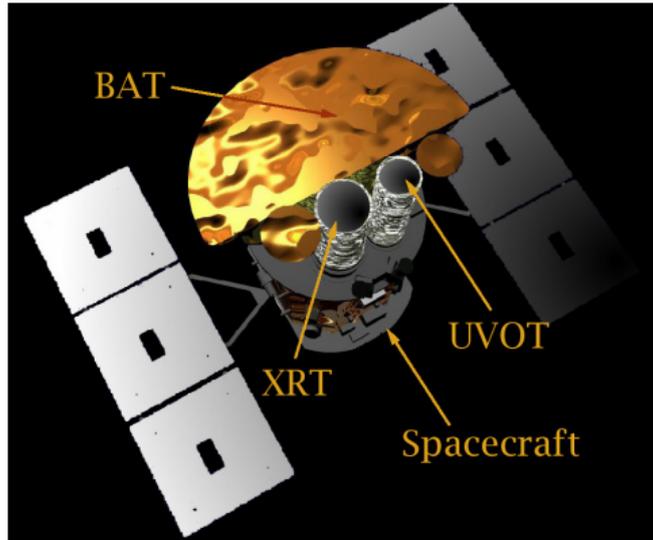


図 2.6: Swift 衛星 [18]

2.2.1 BAT 検出器

BAT 検出器は、15-150 keV のエネルギー領域で天体のイメージや光度曲線、スペクトルを調べることができ、広い視野を活かした硬 X 線全天サーベイマップを提供している。検出器は、CdZnTe の半導体検出器を敷き詰めて、その前方約 1 m のところに 2 次元符号化マスクがある。ガンマ線の飛来方向によってこのマスクにより投影されるパターンが変わるため、それを検出することで方向を決めることができる。このような検出方法はコーデッドマスク法とよばれる。

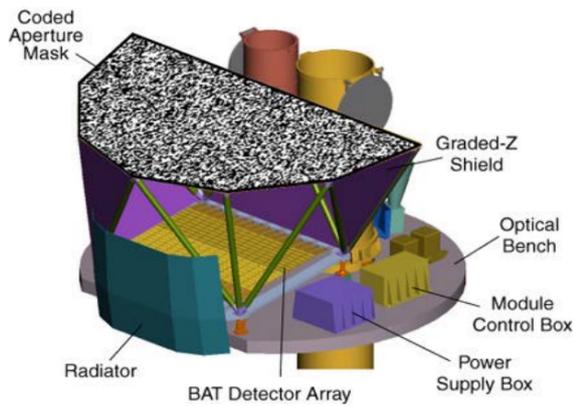


図 2.7: BAT 検出器の模式図 [18]

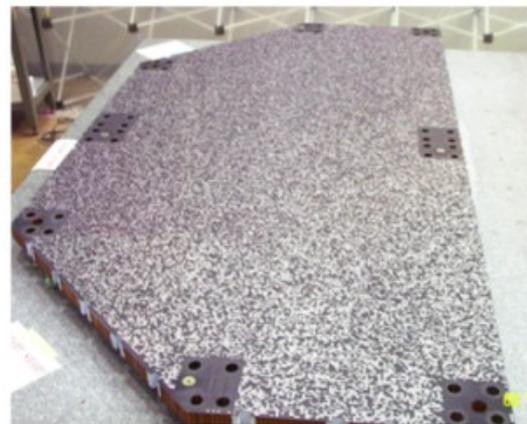


図 2.8: コーデッドマスク [17]

2.2.2 BAT 105 カ月 カタログ

ここで、Swift 衛星 BAT 検出器の観測データが載せられているカタログについて記述する。このカタログは名前にもある通り Swift 衛星が 105 カ月間全天を均一に観測した際の天体カタログである²。このカタログには 1632 個の硬 X 線天体が掲載され、それぞれの天体の名前や赤経赤緯、エネルギーフラックスなどの情報が含まれている。本研究のスタック解析では、先に述べた Fermi 4FGL-DR2 カタログと、このカタログを組み合わせて用いた。

2.3 全天 MeV ガンマ線観測衛星 AMEGO-X

2.3.1 AMEGO-X 計画

AMEGO-X (The All-sky Medium Energy Gamma-ray Observatory eXplorer) とは、2028 年頃の打ち上げを目標として進められている全天 MeV ガンマ線衛星計画のことである。天球の 20% という広い視野を持ち、観測可能なエネルギー帯域が 0.1 MeV-1 GeV であることから、全天ガンマ線モニターであるフェルミ衛星の後継機として、また突発天体であるガンマ線バーストの観測や、ガンマ線偏光観測も可能であることから期待されている。高エネルギーニュートリノ候補天体の探査が大きな目標の 1 つに掲げられており、ブレーザーも主要観測天体となっている。図 2.9 はさまざまな衛星の検出器の感度を比較したものであるが、AMEGO-X は MeV 領域において先代のコンプトンガンマ線観測衛星 CGRO に搭載されていた COMPTEL 検出器に比べてかなり良くなっていることがわかる。

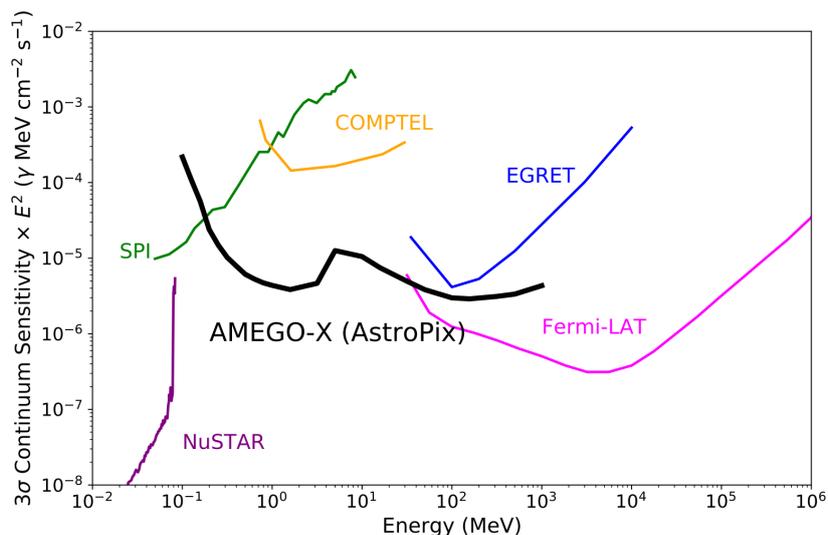


図 2.9: AMEGO-X の感度 [16]

²<https://swift.gsfc.nasa.gov/results/bs105mon/>

Energy Range	100 keV - 1 GeV
Angular Resolution	3° (1 MeV), 2° (100 MeV)
Field of View	2pi sr (50% of the sky)
Transient Sensitivity (ph cm⁻²)	0.5 (100 keV-1 MeV) 1s
Continuum Sensitivity (MeV cm⁻² s⁻¹)	2x10 ⁻⁶ (100 MeV) 3 yr

図 2.10: AMEGO-X の性能

2.3.2 AMEGO-X の検出器

AMEGO-X 衛星に搭載される検出器は、トラッカー、カロリメータ、ACD であり、構成は先述の Fermi 衛星 LAT のものをほぼ踏襲している。それぞれはシリコン検出器、CsI シンチレータ、プラスチックシンチレータで構成されている。上からガンマ線が入射し、トラッカーでコンプトン散乱や電子陽電子対生成が生じる。ガンマ線が落としたエネルギーと反応した位置から、入射ガンマ線光子のエネルギーと飛来方向を求めることができる。この過程はコンプトン再構成とよばれる。

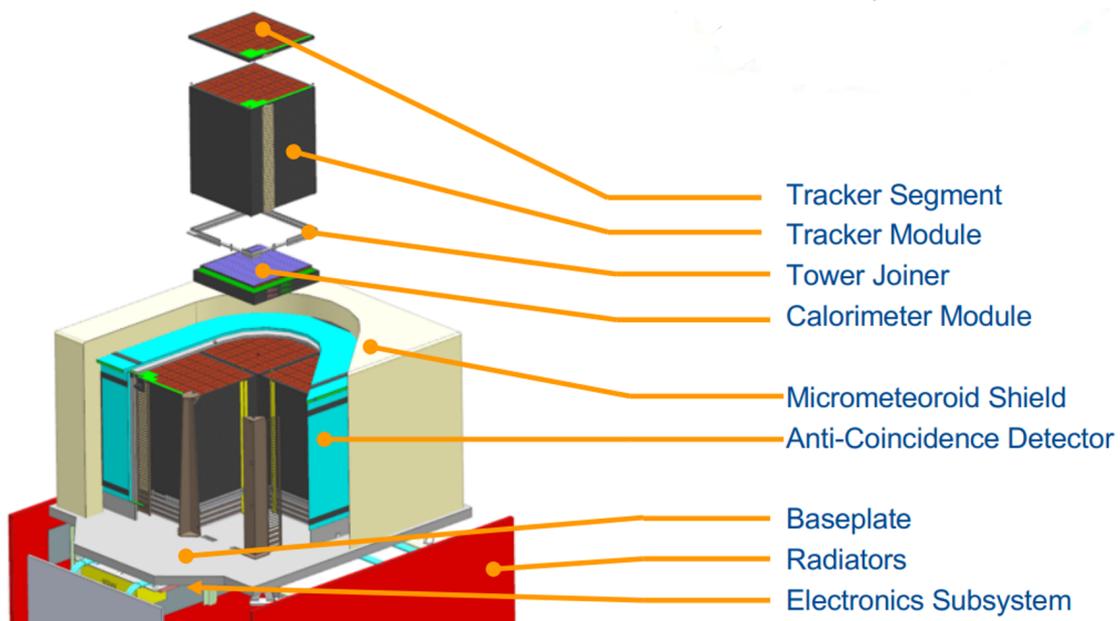


図 2.11: AMEGO の検出器

第3章 Fermi LAT 検出器のデータ解析方法の 確立

Swift 衛星 BAT で検出されているが Fermi 衛星 LAT で検出されていない天体を解析する前に、データ解析の方法を確立させることを目的として、まずは目的の天体と同じようなガンマ線スペクトルを持つが、LAT で検出されている天体を解析した。

3.1 天体の選定

まず、先述の Fermi 4FGL-DR2 カタログの 5787 天体のなかからブレーザー天体を選定した。このカタログの FITS ファイルとよばれるファイルには、各天体についてそれぞれ7つのエネルギーバンド (0.05-0.1, 0.1-0.3, 0.3-1, 1-3, 3-10, 10-30, 30-300 GeV) であらゆる物理パラメータの値が記載されている。その中でフラックスの値とその誤差 (Unc) の値を読みだして、フラックスの値の方が大きいとき ($\text{Flux} > \text{Unc_Flux}$)、そのバンドでは検出されているとして、逆の場合に検出されていないと考えた。そして表 3.1 のように特定のバンドでのみ検出されていた2つの FSRQ 型のブレーザー天体を選択した。一般的なブレーザー天体のスペクトルは図 3.1 の左側のようにになっているのだが、今回選んだ2天体は右側のように GeV 領域のあたりでぎりぎり検出されるかされないかのところになっている。ブレーザーのスペクトルがふた山構造であるという特徴により、このような天体は MeV 領域ではより明るい可能性が考えられる。このような天体がさらに暗いものが、Swift 衛星 BAT 検出されているが Fermi 衛星 LAT で検出されていない天体と考えられるため、まずは LAT で検出されている似たような天体を解析方法の確立と検証に用いた。

選んだ天体名	検出されていたバンド
PKS 0743-006 (4FGL J0746.0-0039)	0.1-0.3, 0.3-1, 3-10 GeV
PKS B1412-096 (4FGL J1415.9-1002)	0.3-1, 1-3 GeV

表 3.1: 選択した天体 (() 内は Fermi 4FGL-DR2 カタログでの名前)

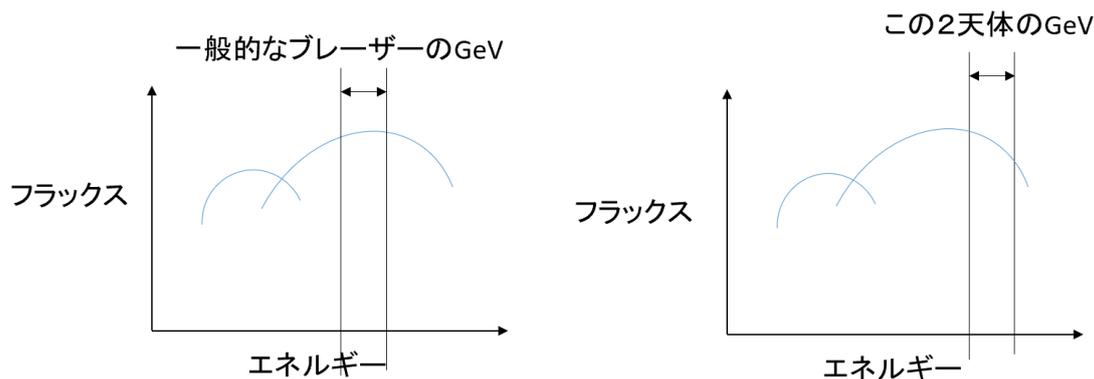


図 3.1: ブレイザーのガンマ線スペクトルの概観と選んだ 2 天体のスペクトル

3.2 2 天体のデータ解析

続いて、行った解析手法や結果について記す。

NASA の Fermi 解析ホームページ [6] を参考にして、選んだ 2 天体のエネルギースペクトル分布 (SED) を作成した。Fermi LAT の解析には以下のように Unbinned 解析と Binned 解析がある。

Unbinned 解析

検出された光子一つひとつに最尤法を適用する。そのため、高い精度での解析が可能だがその分時間もかかってしまうため、短期間のデータを解析する際に用いることが多い。解析領域は円形となる。

Binned 解析

Unbinned 解析に対して Binned 解析は、天空領域とエネルギーで 3 次元ヒストグラムを作成して光子を振り分けてから、それぞれのビンに最尤法を適用する。そのため短時間で解析を行うことができ、長期間のデータを解析する際によく用いる。解析領域は四角形となる。今回は Fermi のミッション開始当初からのデータを用いているため、この Binned 解析の手法を採用した。

最尤法

ここで、解析の際に行われている最尤法とは、観測の尤もらしさが最大になるときのモデル変数を求める方法である。

以下のように天体からのカウントのデータの組 X 、photon index や prefactor といった物理量のモデルパラメータを Θ とする。

$$X = \{x_i\} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (3.1)$$

$$\Theta = \{\theta_i\} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\} \quad (3.2)$$

このパラメータ Θ の値を決めたときにデータ x_i が得られる確率を $P(x_i|\Theta)$ とすると、これは各天体のスペクトルなどによって決まり、全てのデータ x_i が得られる確率は

$$L(\Theta) = P(x_1|\Theta)P(x_2|\Theta)\dots P(x_N|\Theta) = \prod_{i=1}^N P(x_i|\Theta) \quad (3.3)$$

となり、この $L(\Theta)$ を尤度関数という。

この L の最大値を求める方法が最尤法である。実際の計算では、式 3.3 の両辺の自然対数をとったものを最大にする。Fermi の解析においては Test Statistics (TS) という以下の値を用いて、これが最大となるようにパラメータが決められる。

$$TS = -2 \ln \frac{\text{観測天体を含まないときの尤度}}{\text{観測天体を含むときの尤度}} \quad (3.4)$$

この TS の平方根をとった値は検出の有意度 (単位: σ) を表すため、分子の値が小さく、分母の値が大きいが観測天体は有意に検出されているということになる。

一般に、他のエネルギー帯など検出光子数が十分に多い場合は χ^2 検定で最小二乗法を用いることが多いが、Fermi のエネルギー帯である GeV 領域は光子数が少ないため、このような方法が用いられる。

以下では解析手法の手順を説明する。

3.2.1 Fermi Science Tools

Fermi LAT のデータ解析は、NASA が提供する Fermi Science Tools という解析ツールを用いて、python でそれぞれのコマンドを入力して行う。本研究で用いたのは、version : v10r0p5 である。また検出器の応答関数は、P8R3_SOURCE_v2、データは source class というタイプを使用し、2008 年 8 月 4 日から 2021 年 10 月 11 日の間に取得されたものを用いた。

解析に必要なファイル

ここで行う解析に必要なファイルとして、解析したい天体の FT1 (実際に検出された光子の情報で、末尾が 'PH**') ファイル、FT2 (Fermi 衛星の姿勢や位置の情報で、末尾が 'SC**') ファイル、source model (解析領域での天体ガンマ線モデル) ファイル、そして銀河拡散モデル (gll_iem_v07.fits、銀河面放射のバックグラウンド) と等方モデル (iso_P8R3_SOURCE_V3_v1.txt、系外放射のバックグラウンド) のファイルがそれぞれ必要となる。これらのうち source model ファイルは解析の途中で自分で作ることができ、その他は NASA のページ [6] からダウンロードできる。

以下が具体的なコマンドの内容となる。

gtselect

解析に用いる FT1 ファイルから、その天体を中心に任意の領域・時間・エネルギー帯を切り取る。

gtmktime

ガンマ線は宇宙遠方から来るものばかりでなく、宇宙線が地球の大気と衝突してガンマ線を放出し、それが検出されてしまう場合がある。このことを考慮して LAT が目的領域を観測している時間を切り取るのが gtmktime である。

gtlucube

同じ時間、天体からの放射を検出しても、Fermi 衛星の角度によって検出効率が異なる。これを補正するために計算されるのが Livetime で、ここで Livetime cube とよばれるファイルが作られる。

gtbin

検出されたガンマ線をエネルギーと天空領域のビンで区切り、count map を作成する。ここでは通常の count map にエネルギーの次元が加わって、3次元の count map が作られる。

gtexpcube2

点光源を観測していても、実際にはぼんやりと広がって検出される。これを表すものを PSF (Point Spread Function) という。この影響を考慮するために Livetime cube から、エネルギービンごとの exposure map とよばれる、検出器の検出効率の位置依存を補正するためのマップを作成する。ここでははじめに gtselect で決めた範囲の外側の放射まで取り入れる必要がある。

gtsrcmap

exposure map を考慮して、source model 内の各天体が LAT で観測されたときに予想される 3D カウントマップをそれぞれの天体ごとに作成する。

gtlike

srcmap、exposure map、Livetime cube で作られたファイルをもとに最尤法によるフィッティングを行う。

source model ファイルの作成

解析する天体周りの領域に含まれる天体を含む source model は、python スクリプト 'make4FGLxml.py'[6] を用いて作成できる。ここでは TS の値が 10 より大きい天体のパラメータをフリーにするように作成した。

3.2.2 Fermipy

これまで Fermi のデータ解析は、前節のように Fermi Science Tools を用いて python で一つひとつのコマンドを入力することによって行われてきた。それに対して新しい解析ツールである Fermipy は、これらの Fermi Science Tools で行っていたコマンドが python のなかで整理され、その大部分が自動化されたものとなっている。行う解析の内容としては、従来の Fermi Science Tools と変わらないが、自動化によって解析にかかる時間が短く、人為的な間違いも少なくなることから、多数の天体を解析する際に便利であるという特徴がある。以下の図 3.2 は解析の際のコマンドの一例で、Fermi Science Tools ではこのように長いスクリプトでも、Fermipy では実行コマンドとしてはほんの数行になり、かなり少なくなっている。今回 Fermipy は version 1.0.0 を使用した。



図 3.2: Fermi Science Tools (python) と Fermipy の比較

3.2.3 解析結果

ここでは 3.1 節で選択した 2 天体を、前述の Fermi Science Tools (python) と Fermipy を用いてそれぞれ解析した結果の比較を記す。

解析のモデル

解析した 2 天体のスペクトルは、以下の式で表される PowerLaw モデルとよばれる関数を仮定した。

$$\frac{dN}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma} \quad (3.5)$$

ここで N_0 は Prefactor と呼ばれるモデルの normalization、 γ は Photon index、 E_0 は Scale とよばれるエネルギー規格化定数を表している。

以下では、2 天体の 2 つの手法による解析で作成したスペクトル (SED) と、NASA のホームページ [6]

にある、4FGL-DR2 カタログ¹に掲載されている SED の結果の合わせて 3 つの SED をひとつのグラフに表して比較している。

また表 3.2 のように、解析する際は Scale の値をそれぞれの手法で共通に固定し、Photon index と Prefactor の値を free にして解析を行った。

SED の計算

ここで、SED のエネルギーフラックスを求める計算について記述する。

SED を表す関数は式 3.5 で与えられ、次元が $/\text{MeV}/\text{s}/\text{cm}^2$ であるため、これを以下の式でエネルギーフラックス ($\text{MeV}/\text{s}/\text{cm}^2$) に変換した。

$$F = N_0 \int_{E_1}^{E_2} \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma} E dE \quad (3.6)$$

ここで E_1 、 E_2 は解析したエネルギー帯に対応する。式 3.6 右辺の積分の値に対して、Prefactor N_0 の誤差を伝播させた。

TS < 9 となったエネルギー帯については上限値 (ul.flux) を求めた。その際、上限値を求めるツールでは上限値フラックスが得られるので、以下の式でフラックスや上限値のフラックスの値からエネルギーフラックスを求めた。フラックス、エネルギーフラックスの値もスクリプトにより求めることができる。ここで、F_E はエネルギーフラックス、F はフラックス、F_UL は上限値のフラックスである。

$$(F_{(E, UL)}) = \frac{(F_E)}{(F)} \times (F_{UL}) \quad (3.7)$$

天体の解析

図 3.3、3.4 はそれぞれ、解析した 2 天体 PKS 0743-006 と PKS B1412-096 の SED の比較で、点の上下にある黒の線は誤差棒を表し、TS の値が 9 より小さかったエネルギー帯に関しては上限値のエネルギーフラックスの値を計算してプロットしている。ここでアッパーリミットの点は矢印で表しているが、この長さについては結果には関係がなく、見やすくするためのものである。グラフ内の 'eflux' が Fermi Science Tools で解析した場合、'eflux_fermipy' が Fermipy による解析、'eflux_4FGL-DR2' が 4FGL-DR2 カタログに掲載されている SED で、'ul' とついているものがアッパーリミットのエネルギーフラックスである。またグラフ内の直線は、Fermipy で 100 MeV-300 GeV まで (エネルギーを分けずに) 解析して求めた PowerLaw モデルである。

¹Plots of spectral fits for 4FGL-DR2 sources:Gzipped file と書かれているファイル

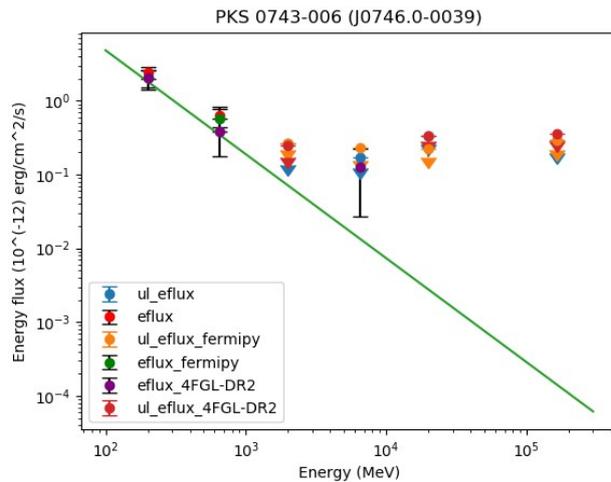


図 3.3: 天体 PKS 0743-006 の SED

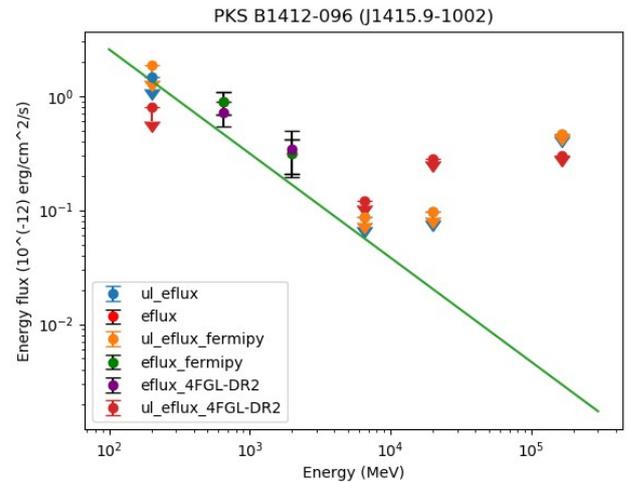


図 3.4: 天体 PKS B1412-096 の SED

上の2つのように、多少のずれはあるものの誤差棒の範囲内におさまっていることから、おおむね解析結果は 4FGL-DR2 カタログと一致していると言える。上限値のずれの原因としては、Fermi Science Tools と Fermipy では 2008 年から 2021 年までの約 13 年間であるのに対し、NASA の 4FGL-DR2 カタログは 10 年分であったこと、解析の際に用いたモデルに含まれる周囲の天体のパラメータが free になっていた度合いが異なることによるものと考えている。表 3.2 は各手法で求めたパラメータだが、4FGL-DR2 カタログについては Photon index の値しか記載がなかったため、空欄がある。

PKS 0743-006	Fermi Science Tools	Fermipy	4FGL-DR2
Photon index	3.63 ± 0.22	3.41 ± 0.26	2.88 ± 0.20
Prefactor	$5.64e-13$ (5.12-6.17)	$7.05e-13$ (4.83-9.20)	
Scale	591.86	591.86	
PKS B1412-096	Fermi Science Tools	Fermipy	4FGL-DR2
Photon index	3.04 ± 0.2	2.91 ± 0.15	2.74 ± 0.16
Prefactor	$3.42e-13$ (2.51-4.33)	$4.09e-13$ (3.25-4.93)	
Scale	776.77	776.77	

表 3.2: 2 天体のスペクトルパラメータ

この 2 天体の解析は Fermi Science Tools を用いた解析手法の習得と、Fermipy を用いた手法の習得を目的として行った。以上によりこれらの解析ツールを正しく使えていると考えられるため、以降の解析で Fermi 衛星 LAT のデータを扱う際はすべて、所要時間が短く間違いも少なくなる Fermipy を使用している。

3.3 2 天体のスタック解析

これまで Fermi 衛星 LAT のデータを用いた 2 天体個別の解析を行い、その結果を示してきた。ここでは、この 2 天体を用いたスタック解析という解析手法の確立を行う。

スタック解析とは、検出されていない複数の天体の解析領域の対数尤度を足し合わせて、それが最大となるような天体共通のパラメータを求めることにより、検出限界以下の同種の天体の平均的なスペクトルやフラックスを求める手法である [5]。

これまで解析した2天体にはそれぞれにモデルファイルがあり、そのモデルファイルにはさまざまな4FGLカタログの天体のスペクトルパラメータが書かれている。そのファイル内の（解析天体以外の）他の4FGL天体のパラメータはfreeにして、この2天体だけPhoton indexとPrefactorの値を共通に固定して解析を行った。この解析は図3.5のようなイメージで、まず2天体のパラメータは共通にする。これは、パラメータを共通して、同じパラメータのときの尤度を足し合わせることで、平均的にどのパラメータが尤もらしいのかを知るためである。それぞれの周囲の天体のスペクトルはエネルギーやPhoton index、Prefactorの関数になっていて、それらと背景放射などのバックグラウンドのモデルをすべて考慮して尤度を計算したものをどうしを足し（図3.5において、尤度1+尤度2）、その和が最大となるパラメータを求める。

$$\begin{array}{ll}
 \text{尤度1} & \leftarrow \text{天体1のモデル} \quad M(E, \gamma, N_0) + \sum_i M_i(E, \gamma, N_0) + BG(E, \gamma, N_0) \\
 \text{尤度2} & \leftarrow \text{天体2のモデル} \quad N(E, \gamma, N_0) + \sum_i N_i(E, \gamma, N_0) + BG(E, \gamma, N_0)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{cc}
 M(E, \gamma, N_0) = N(E, \gamma, N_0) \\
 \text{天体1} \qquad \qquad \text{天体2}
 \end{array}$$

図 3.5: スタック解析のイメージ

スタック解析の誤差

ここで、スタック解析の際に考慮する誤差について記述する。まず、統計の検定方法に χ^2 検定とよばれるものがあり、これは、帰無仮説が正しいときに統計量が χ^2 分布に従う検定法の総称である。観測データ X_1, X_2, \dots, X_n がモデル値の周りで誤差 σ で揺らぐ場合は、 $(X_i - m)/\sigma$ の分布は標準正規分布になる。ここで m は平均値である。そのとき $(X_i - m)^2/\sigma^2$ の分布は、自由度1の χ^2 分布に従い

$$\chi^2 = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n (X_i - m)^2 \tag{3.8}$$

は自由度nの χ^2 分布に従う [19]。

ここで、Wilksの定理により、最尤法と χ^2 検定の関係について、最大尤度Lの2倍の値は χ^2 分布を自由度で割ったものに近似的に従い [20]、自由度をd.o.f.とすると、以下の式3.9が成り立つ。

$$2 \log L \sim \frac{\chi^2}{\text{d.o.f.}} \tag{3.9}$$

よって本研究では、対数をとった最大尤度の2倍の値を考慮し、以下の表3.3 エラーレベルをもとにして誤差を求めた。

エラーレベル	最大対数尤度との差
68%	2.30
90%	4.61
95%	9.21

表 3.3: スタック解析の尤度のエラーレベル

以下に 2 天体についてスタック解析を行った結果を記す。

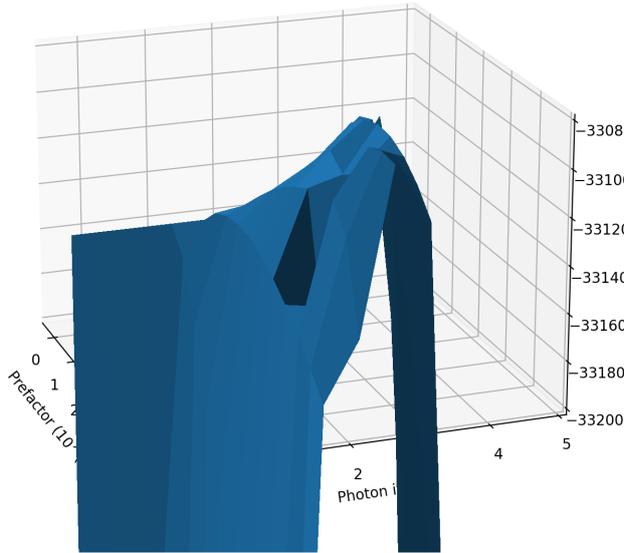


図 3.6: スタック解析の結果 (縦軸:2logL)

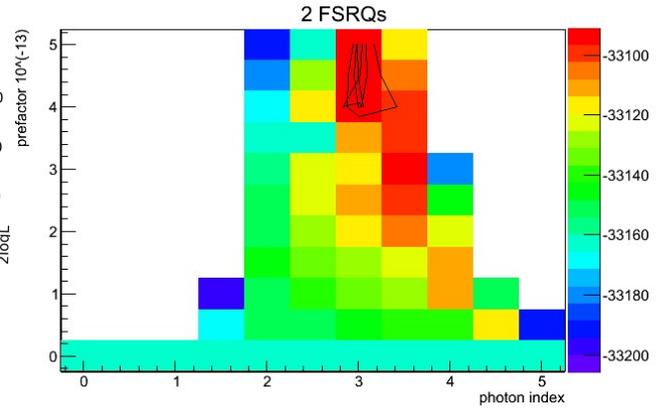


図 3.7: スタック解析の結果 (横軸: Photon index、縦軸: Prefactor、黒線は尤度が等しくなる等高線 (68%、90%、95%の誤差) を表し、明るい色ほど尤度が高い) 解体値 (最大値との差) は 297977.04 である。

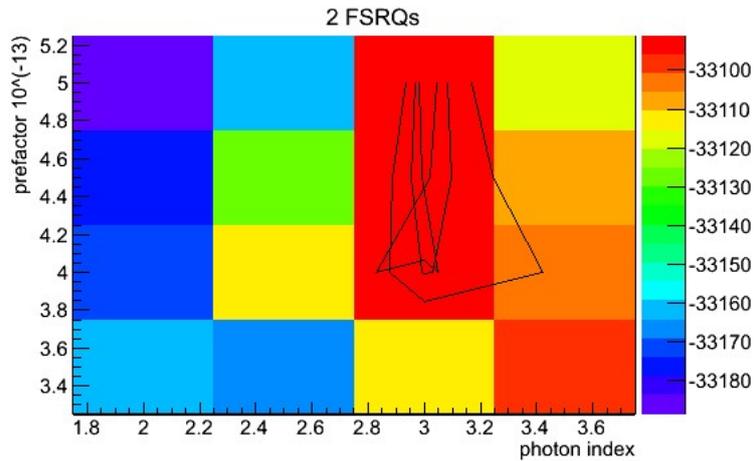


図 3.8: スタック解析の結果 (図 3.7 と同じだが、描くパラメータの範囲を狭めたもの)

解析において、Photon index は 0 から 5 まで 0.5 ずつ、Prefactor は 0 から 5×10^{-13} まで 0.5×10^{-13} ず

つ変化させていき、各天体で $11 \times 11 = 121$ 通りずつの尤度を求めて足し合わせた。図 3.6 は横軸をそれぞれ Photon index、Prefactor にとり、縦軸をそのときの尤度の和としている。図 3.7 は図 3.6 と同じであるが $2\log L$ を表す Z 軸方向を色で表し、同じ尤度の値（最大対数尤度からエラーレベルを引いた値）のところに等高線を引いたものである。また図 3.7 では尤度が高いところがわかりにくいため、同じプロットを範囲を狭めて描いたものが図 3.8 である。

スタック解析の結果から、90%の誤差を考慮すると、対数尤度が最大となったのは、Photon index が $3.0^{+0.1}_{-0.05}$ 、prefactor が $5.0^{+0.15}_{-1.0} \times 10^{-13}$ となった。この誤差は図 3.7、3.8 の等高線を目視で確認して求めた。また、表 3.4 内の 2 天体のパラメータは、それぞれの Scale の値をスタック解析のものと同通にして Fermipy で解析をし直した結果である。スタック解析の結果とこの表 3.4 から、パラメータは 2 天体のベストフィットの値に近いことがうかがえる。

	PKS 0743-006	PKS B1412-096
Photon index	3.23 ± 0.31	2.78 ± 0.19
Prefactor	$3.77 \times 10^{-13} (2.41-5.13)$	$4.25 \times 10^{-13} (3.14-5.36)$
Scale	700	700

表 3.4: スタック解析のために、Scale を共通に固定して解析し直した 2 天体のパラメータ)

よってこれにより Fermipy によるスタック解析の手法を確立できたとして、次章では本研究の目的である Swift 衛星 BAT で検出されているが Fermi 衛星 LAT では検出されていない天体を用いて解析を行う。

第4章 MeVガンマ線で明るい可能性のある21天体の解析

前章では、Fermi 衛星 LAT で検出されている天体を解析した。この手法を踏まえて本章では、新たなニュートリノの起源と期待される、硬 X 線では明るく Swift 衛星 BAT で検出されていて、GeV ガンマ線では暗く LAT では検出されていない天体を解析する。

4.1 21 天体の選定

Toda et al.2020[4] の論文では、Swift 衛星 BAT 検出器による 105 カ月カタログから 53 個の FSRQ 型のブレーザーをリストしている。研究の目的に沿うように、この 53 天体の中から Fermi LAT 検出器で見つからない (4FGL-DR2 カタログに掲載されていない) 天体を探した。

選定の方法について、両者のカタログで天体の名前の付け方が異なり単純な比較ができないため、それぞれのカatalogに記載されている赤経 α と赤緯 δ の値を用いた。まず、4FGL-DR2 天体のファイル¹には、各天体の 4FGL 天体名と赤経赤緯の値 (単位: degree)、そして赤経赤緯の誤差の値が記載されている。また Swift 衛星 BAT 検出器のカタログには天体名と赤経赤緯の値 (degree) が記載されている。これらの値を用いて、LAT と BAT それぞれで以下の式 4.1、4.2、4.3 のように 3 次元直交座標における x、y、z の座標を計算した (ここで天球面を考えることにより、中心からの距離 r は 1 とした)。そして求めた 2 つの座標のベクトル (それぞれ \mathbf{a} 、 \mathbf{b} とする) の内積をとり、式 4.4 でベクトルのなす角 θ を degree の単位で求めた。そしてその θ と、Fermi LAT 記載の赤経赤緯の誤差のうち小さいほうの値を比較して θ が誤差より小さい (誤差内にある) ときはそれらは同天体であり両カタログで検出されているものとみなした。すなわち、BAT の FSRQ で LAT 4FGL-DR2 天体と同じとみなせるものがひとつもなかった 21 天体を選定した。選んだ 21 天体は表 4.2 で示す。

$$x = \cos\left(\delta \frac{\pi}{180}\right) \cos\left(\alpha \frac{\pi}{180}\right) \quad (4.1)$$

$$y = \cos\left(\delta \frac{\pi}{180}\right) \sin\left(\alpha \frac{\pi}{180}\right) \quad (4.2)$$

$$z = \sin\left(\delta \frac{\pi}{180}\right) \quad (4.3)$$

$$\cos \theta = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \quad (4.4)$$

$$\theta = \arccos(\cos \theta)$$

¹DS9 Region Files: と書かれたところの 2 つのファイル

4.2 21天体の解析

前節で選び出した21天体について、Fermipyを用いて第3章と同じように解析を行った。ただし解析する際のパラメータは、以下の表4.1のように4種類の条件を課して、特定の値に固定したり、freeにしたりした。これは、有意に検出されていない天体はパラメータがきちんとフィットで求められないためであり、Photon indexをある値に固定して有意度を確認することにした。4番目の条件ではPhoton indexもfreeにしているが、これは参考のためである。今回は、Fermi衛星の観測エネルギー帯では、Photon indexが大きいと考えられる天体であるため、固定値は2、2.5、3とした。

Photon indexが大きくなると、式3.5の γ の値が大きくなることより、対数軸でSEDを描いた場合の直線の傾きの絶対値が大きくなる。これは高エネルギー帯において、よりエネルギーフラックスの値が小さくなることを意味し、より検出されにくいということになる。

条件	Photon index	Prefactor
①	2	free
②	2.5	free
③	3	free
④	free	free

表 4.1: 21 天体の解析の条件

各条件で天体ごとにTSを求め、その個数を表すヒストグラム分布を図4.1に示す。

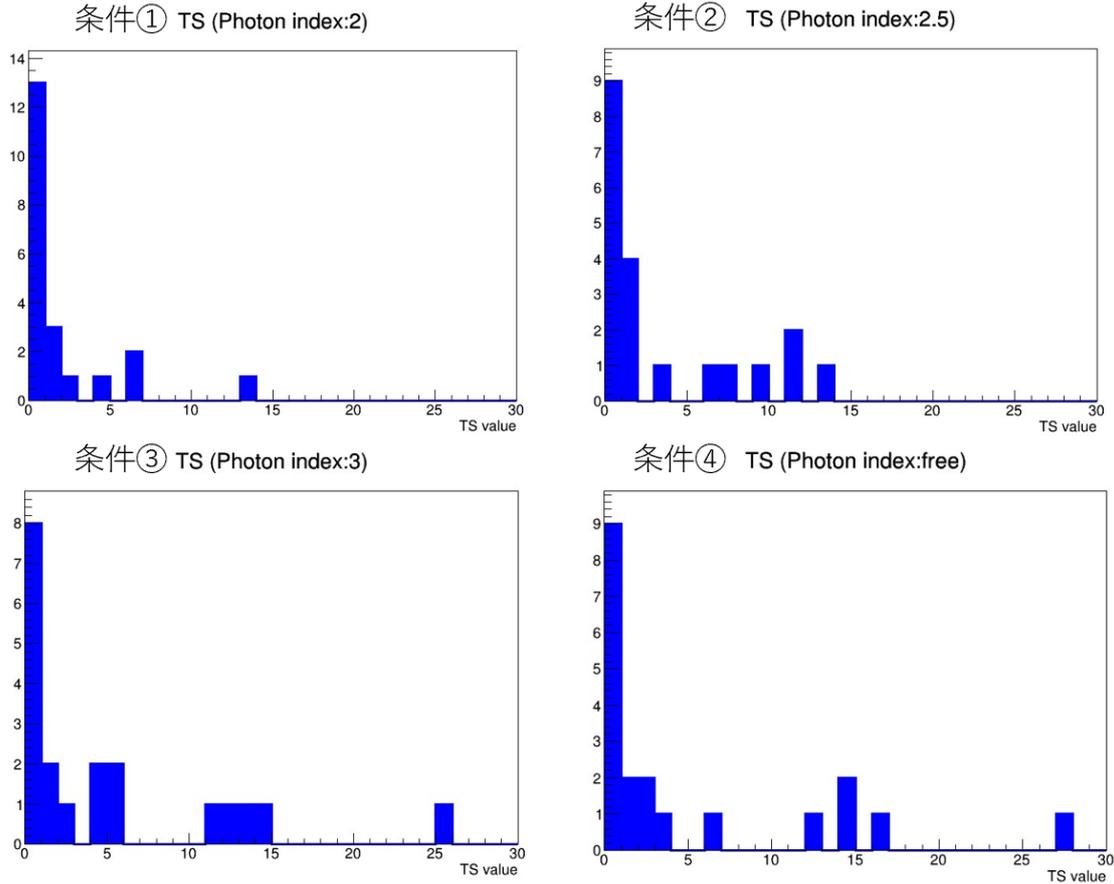


図 4.1: 4 条件での TS ヒストグラム分布 (左上: 条件①、右上: 条件②、左下: 条件③、右下: 条件④、各条件で横軸を揃えている。)

Fermi 衛星 LAT の解析では、 $TS = 25$ (有意度 5σ) を有意な検出の基準としている。これらの TS の分布について、多くの天体でこの値を下回っていることから、そもそも LAT 検出器で検出されていない天体を対象としたこの解析においては、フィットがうまくいかない場合があると考えられ、適切な結果であるといえる。また、Photon index を指定した 3 条件のなかでも Photon index の値が大きいほうが TS 値の分布が大きい方に広がっていることから、これらの天体は Photon index が大きい、すなわちスペクトルの傾きが大きく、GeV 領域では暗い天体であるということがいえる。Photon index をフリーにしたものは、これらの 3 条件の解析と比較すると、よりフィットがうまくいったことにより、さらに TS の分布は広がったと考えられる。

ただ、数天体 TS 値が 25 より大きいものが見られたが、これは Fermi 4FGL-DR2 カタログは 10 年間のデータであるのに対して、本研究では 13 年間のデータを用いて解析を行ったため、10 年では検出されていなかったが 13 年ではデータ統計の向上により検出されたものであると考える。

以下の表 4.2 では、この解析での各天体ごとの TS の値の詳細を示す。ここで天体の名前は、Swift 衛星 BAT 検出器でのものと、BZCAT カタログにおける名前を載せた。BZCAT カタログは、今まで行われた多

波長観測によってブレーザーであると判明した天体が数多く載っているカタログである。

SWIFT name	BZCAT name	TS(①)	TS(②)	TS(③)	TS(④)
J0010.5+1057	5BZQJ0010+1058	0.12	1.80	5.40	14.95
J0017.1+8134	5BZQJ0017+8135	0.13	1.81	2.05	2.32
J0311.8-7653	5BZQJ0311-7651	0	0	0.22	0
J0336.6+3217	5BZQJ0336+3218	2.06	7.44	13.05	16.30
J0525.1-2339	5BZQJ0525-2338	1.69	3.12	1.98	3.12
J0635.8-7514	5BZQJ0635-7516	0	0	4.80	0
J1130.1-1447	5BZQJ1130-1449	13.14	514.50	0	984.61
J1222.4+0414	5BZQJ1222+0413	0	0	12.48	0
J1305.4-1034	5BZQJ1305-1033	4.33	11.04	11.63	12.11
J1557.8-7913	5BZQJ1556-7914	0	0	0.11	0
J1928.0+7356	5BZQJ1927+7358	6.51	13.26	14.65	14.91
J2129.1-1538	5BZQJ2129-1538	0.08	11.78	25.45	27.58
J2148.0+0657	5BZQJ2148+0657	0	9.24	84.34	0
J2203.0+3146	5BZQJ2203+3145	1.96	0.43	0.09	2.26
J2211.7+1843	5BZQJ2211+1841	6.01	6.07	5.86	6.24
J2251.9+2215	5BZQJ2251+2217	0	0	0	0
J0233.8+0243	5BZQJ0233+0229	0.41	0	0	0.87
J0547.1-6427	5BZQJ0546-6415	0	0	0.27	0
J0842.0+4021	5BZQJ0842+4018	1.17	0.70	0.78	1.49
J1430.6+4211	5BZQJ1430+4204	0.28	1.45	1.95	1.94
J1658.5+0518	5BZQJ1658+0515	0	1.28	4.99	0

表 4.2: 21 天体の各条件の解析における TS の値

4.3 21 天体のスタック解析

3.3 節で示した 2 天体のスタック解析と同様に、ここではこの 21 天体の尤度をそれぞれの Photon index や Prefactor のときで求め、同じパラメータのときの尤度を足し合わせた。Paliya et al. 2019[5] では、Fermi LAT で検出されていない天体をすべて考慮してスタック解析していたため、ここでも同様に、21 天体すべてを考慮した。

3.3 節と同じパラメータの振り方である、Photon index は 0 から 5 まで 0.5 ずつ、Prefactor は 0 から 5×10^{-13} まで 0.5×10^{-13} ずつ変化させて 121 通りの尤度を求める解析を条件 ③ とし、解析を行った。結果を以下に示す。

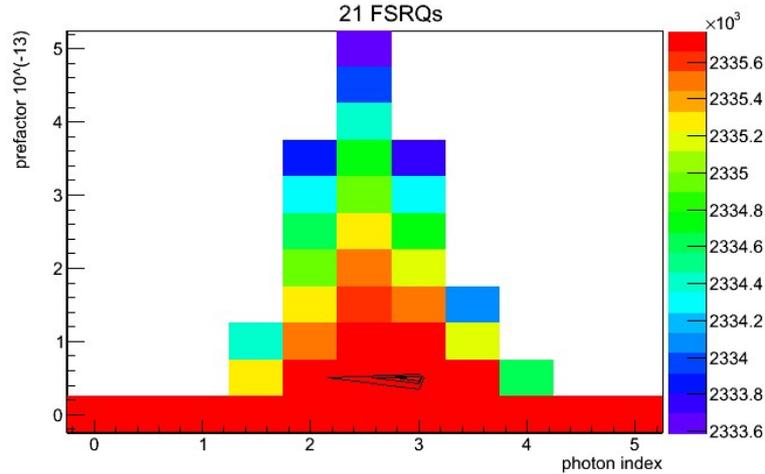


図 4.2: スタック解析の結果 (条件 ①、横軸:Photon index、縦軸:Prefactor で、等高線は内側から順に最大対数尤度の 68%、90%、95%の誤差領域を表し、解体値は 6734390.1。)

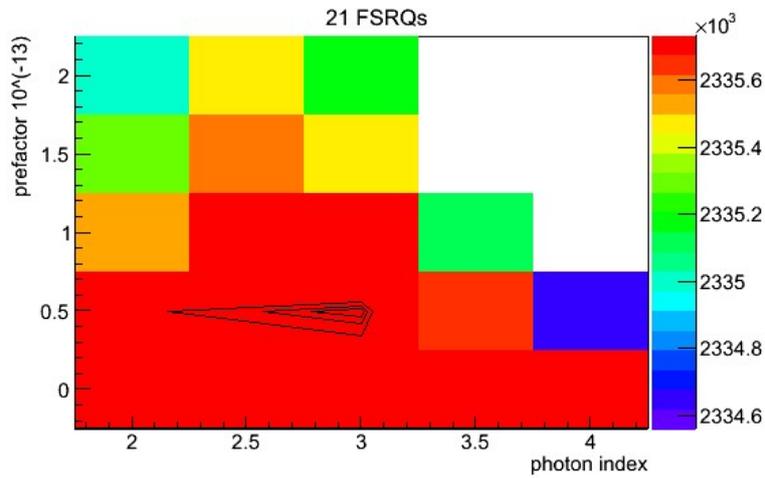


図 4.3: スタック解析の結果 (条件 ①、図 4.4 と同じだが、描くパラメータの範囲を狭めたもの)

またここでも図 4.4 では尤度が高いところがわかりにくいため、プロットするパラメータの範囲を狭めて描いたものが図 4.3 である。

この図 4.4、4.3 から、対数尤度が最大となったのは Photon index が $3.0^{+0.1}_{-0.85}$ 、Prefactor が $0.5^{+0.05}_{-0.05} \times 10^{-13}$ となった。この誤差は 90%の誤差を考慮したものである。

さらに、尤度が最大となるパラメータをより詳細に求めるため、図 4.4、4.3 の結果を踏まえて、ここまですら尤度が最大となった Photon index と Prefactor の値の近くでさらに表 4.3 のようにパラメータを振り直し、改めて $11 \times 11 = 121$ 通りのスタック解析を実行した (条件 ② とする)。

結果を以下に示す。図 4.5 は図 4.4 を狭い範囲で見たものである。

条件	Photon index	Prefactor
㊸	2から3.5まで0.15ずつ	0から 1.5×10^{-13} まで 0.15×10^{-13} ずつ

表 4.3: 21 天体のスタック解析の際のパラメータを振る範囲

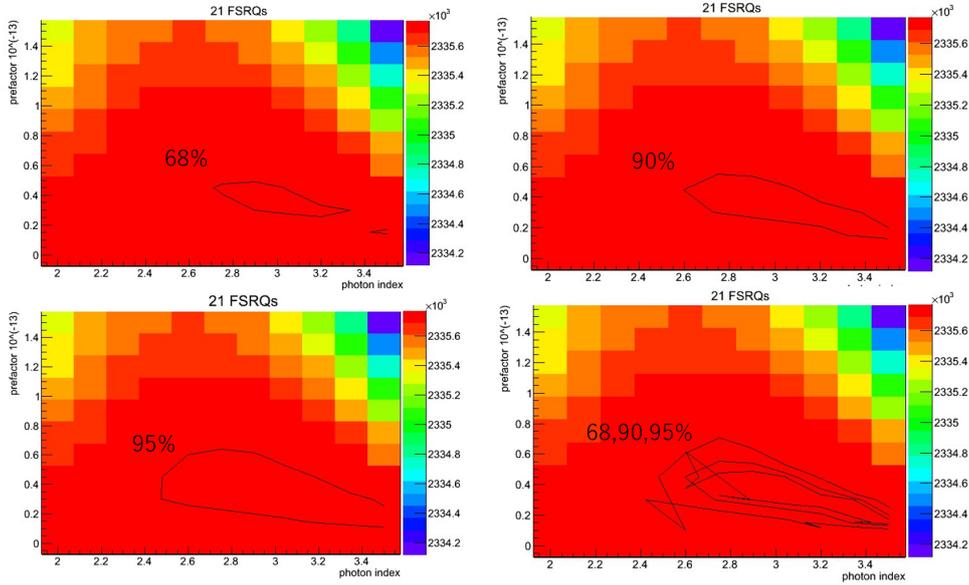


図 4.4: スタック解析の結果 (条件 ㊸、横軸:Photon index、縦軸:Prefactor で、解体値は 1650.5。左上が 68%、右上が 90%、左下が 95%の誤差領域の線、右下が 3つの誤差領域を合わせて描いたものである。)

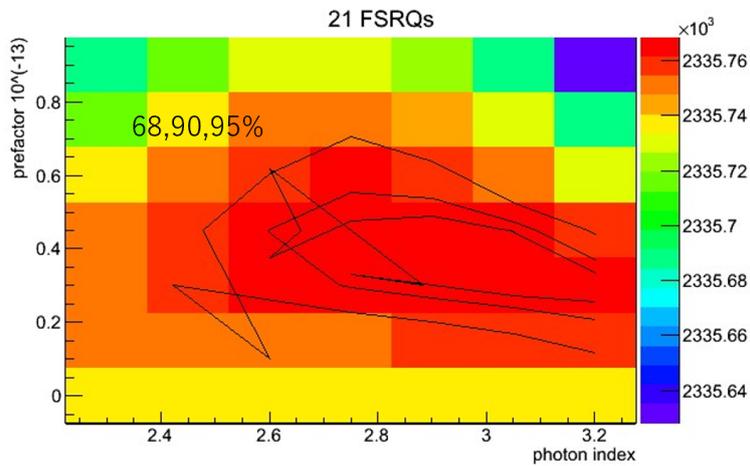


図 4.5: スタック解析の結果 (条件 ㊸、図 4.4 と同じだが、描くパラメータの範囲を狭めたもの)

この解析により、対数尤度が最大となったのは、Photon index が $3.2^{+0.325}_{-0.6}$ 、Prefactor が $0.3^{+0.275}_{-0.125} \times 10^{-13}$ のときであるという結果が得られた。この誤差は 90%の誤差を考慮したものである。

ここまで行ってきたスタック解析は、 $11 \times 11 = 121$ 通りであったため、追加としてより細かく $21 \times 21 = 441$ 通りでパラメータを振ることで、尤度が最大となるパラメータをより細かく求め直した（条件 ㉔ とする）。

条件	Photon index	Prefactor
㉔	2 から 4 まで 0.1 ずつ	0 から 0.2×10^{-13} まで 0.01×10^{-13} ずつ

表 4.4: 21 天体のスタック解析の際のパラメータを振る範囲

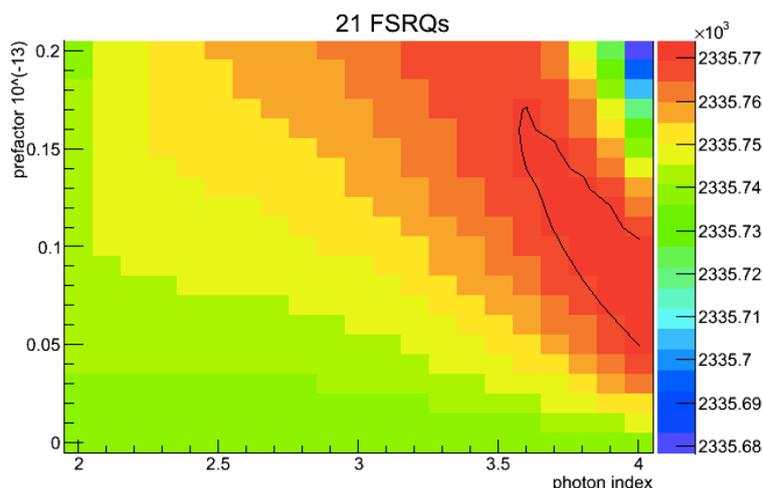


図 4.6: スタック解析の結果（条件 ㉔、横軸:Photon index、縦軸:Prefactor で、解体値は 95.81。黒線は 90% の誤差領域を表す。）

この図において、Photon index がより大きい（より天体が暗い）方に最大があるように見えるが、解析している天体の性質から、どこまでも暗くなりうると判断をし、Photon index は 4 を最大とした。この結果より、対数尤度が最大となったのは、Photon index が $4.0_{-0.4}$ 、Prefactor が $0.08^{+0.1} \times 10^{-13}$ のときであるという結果が得られた。この誤差は 90% の誤差を考慮したものである。

これまでの解析により、硬 X 線では明るく、GeV ガンマ線で暗い 21 天体の平均のフラックスのパラメータが求まった。この結果を用いて、次章で MeV ガンマ線領域でのシミュレーションを行う。ただし、ここでのシミュレーションは、条件 ㉔ の結果を用いて行った結果を示す（次節のシミュレーションでは、有効面積の計算などの課題がまだ解決していないため、スタック解析をやり直す前の結果を用いて行ったものを載せている）。

第5章 MeV領域でのシミュレーション

本章はまだ研究の途中段階であるため、未完成です。申し訳ありません。

5.1 解析ツール

5.1.1 Geant4

Geant4 はモンテカルロ法という、シミュレーションや数値計算を乱数を用いて行う手法を用いて、物質における粒子の反応をシミュレーションをするためのプラットフォームである。高エネルギー宇宙物理学だけでなく、多くの高エネルギー実験や放射線医療の分野で使用されている。

5.1.2 MEGAlib (The Medium-Energy Gamma-ray Astronomy library)

MEGAlib は Geant4 に基づいている、MeV ガンマ線検出器のシミュレーション・解析するソフトであり、次のようなツールが含まれている。

ツール名	内容
Geomega	検出器の形状と特性をモデル化する
Cosima	Geant4 のシミュレーションを行う
Revan	イベントを再構成する
Mimrec	再構成したイベントから SED や Light Curve を作成する

表 5.1: MEGAlib のツールの一例

以下でそれぞれ詳しく説明する。

Geomega

Geomega は検出器の形状や特徴を記載したジオメトリファイルを読み込み、モデル化するツールであり、主な機能として検出器の構造を決めたり、その検出器の分解能などを決めることができる。

また、Geomega で構成した検出器を後に示す Cosima や Revan、Mimrec を使用する際に用いることで、その検出器を想定したシミュレーションを行うことができ、MEGAlib のシミュレーションのあらゆる場合に使用される。

Cosima

Cosima は Geant4 に基づいて、Geometa で決めたジオメトリと検出器の情報を利用してシミュレーションを行うツールである。光電効果やコンプトン散乱、電子・陽電子対生成によるガンマ線の検出を目的としている。この Cosima のアウトプットファイルである Sim-file には、各ガンマ線の反応の座標やエネルギーなどの情報が記載されていて、Revan を使う際に用いられる。

Revan

Revan は、Cosima の出力結果を読み込んで、イベントの再構成を行うツールで、コンプトン散乱や電子・陽電子対生成、ミューオンなどの高エネルギー荷電粒子のイベントを処理できる。Revan のアウトプットファイルである tra-file には、再構成された入射ガンマ線と 2 次粒子の相互作用の座標や散乱方向などの情報が記載されていて、エネルギースペクトルを描いたり、Mimrec を使ったりする場合に用いられる。

Mimrec

Mimrec は MEGAlib のデータ解析をするツールで、tra-file を用いてエネルギースペクトルを描いたり、ライトカーブを見たりすることができる。また、天体から角度分解能の範囲内にある光子のみをイベントセレクションして取り出す。

これらを用いて次期 MeV ガンマ線観測衛星として提案されている AMEGO-X による観測のシミュレーションを行う。

5.2 シミュレーション方法

シミュレーションは、プログラムコードが世界中に公開されているサイトである GitHub の "ckarwin/AMEGO_X.Simulations"[21] を参考にした。

はじめに、Chris Karwin さんにより作成されたこのコード [21] について記す。このスクリプトは、client_code.py というコードの中で 2 つの python ファイル "Run_MEGAlib_module.py"、"Process_MEGAlib_module.py" を呼び出すという構成になっている。それぞれについて以下で簡単に説明する。

Run_MEGAlib_module.py

このスクリプトでは、はじめにジオメトリファイルを定義し、source ファイルで指定したインプットファイルをもとに Cosima でシミュレーション、その出力結果をもとに Revan でイベントを再構成し、Mimrec で天体のスペクトル、background のスペクトルを計算する。ただここで、シミュレーションする半径の範囲に対して、検出器の角度分解能にはエネルギー依存性があるため、"energy_dependent_mimrec" という関数を定義してあらかじめ角度分解能の値をファイルとして読み込み、エネルギービンごとにイベントセレクションを行い、mimrec を実行するようになっている。

Process_MEGAlib_module.py

このスクリプトでは、ガンマ線の各反応（コンプトン散乱、電子・陽電子対生成）に対する有効面積の値をファイルから呼び出し、またシミュレーションを行った全イベントの有効面積を計算してプロットする。そしてそれをもとに、MEGAlibにより AMEGO でシミュレーションされた SED など作成される。

5.3 21天体の結果を用いたシミュレーション

5.3.1 ジオメトリの設定

はじめはジオメトリが AMEGO のものとなっているため、本研究で使用するために AMEGO-X 用のものに変更する¹。AMEGO-X は Fermi 衛星 LAT に基づいており、また複雑な構造をしている AMEGO に対して、CZT（低エネルギーカロリメータ）がないなど規模を落としているため、シミュレーションを簡略化することができる。

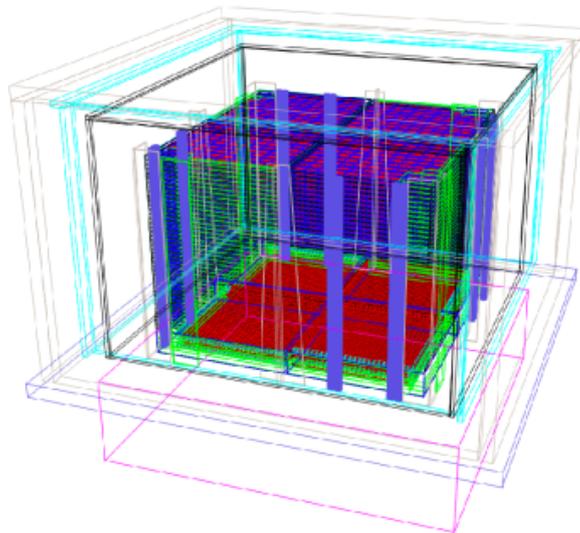


図 5.1: MEGAlib で再現される AMEGO-X の検出器

5.3.2 インプットファイルの作成

ここで、前章で解析した 21 天体の平均スペクトルの結果を用いたシミュレーションを行うための、インプットファイルについて記述する。まず、Toda et al.2020[4] を参考にして、解析した 21 天体の X 線領域での Flux、Photon index の平均値を計算した。

¹https://github.com/ComPair/Geometry/blob/master/AMEGO_Midex/AmegoXBase.geo.setup

Flux($10^{-12} \text{erg/cm}^2/\text{s}^{-1}$)	Photon index
16.849	1.978

表 5.2: 21 天体の平均フラックス・パラメータ (BAT 14-195 keV)

この平均の Flux を F_{ave} 、Photon index を γ とおく。そして式 5.1 が成り立つことから、 A を求める。ここで、 F_{ave} の次元を $/\text{keV}/\text{s}/\text{cm}^2$ に直して計算をする必要がある。

$$F_{\text{ave}} = \int_{14}^{195} (AE^{-\gamma} \times E) dE \quad (5.1)$$

ここで、式 5.2 がこの領域でのエネルギーフラックスとなるため、この F_1 を 14 keV-195 keV の範囲でプロットする。

$$F_1 = AE^{-(\gamma-2)} \quad (5.2)$$

Prefactor (N_0)	Photon index (γ)	Scale (E_0)
0.3×10^{-13}	3.2	1000

表 5.3: 前章で求めた 21 天体のスタック解析での平均フラックス・パラメータ

同様に、前章で求めた 21 天体のスタック解析の平均のフラックスパラメータ (表 5.3) を用いて、式 5.3 によりエネルギーフラックス F_2 を計算し、Fermi 衛星 LAT のエネルギー範囲 (100 MeV-300 GeV) で F_1 と同じグラフにプロットする。 F_2 の次元は $\text{MeV}/\text{s}/\text{cm}^2$ である。ここで、 $A = 3.65 \times 10^{-3} (\text{keV}^{\gamma-1}/\text{cm}^2/\text{s})$ と求まった。

$$\begin{aligned} F_2 &= E^2 \frac{dN}{dE} \\ &= E^2 N_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma} \end{aligned} \quad (5.3)$$

この式 F_1 と F_2 をプロットしたグラフにおいて、2 直線がなめらかにつながるような曲線を引き、そのときのピークのフラックスを求め、これを F とする。これをピークの領域の 100-10000 keV で積分したものが本研究の MeV 領域での 21 天体でのインプットフラックス F' である。

$F (\text{keV}/\text{cm}^2/\text{s})$	$F' (\text{ph}/\text{cm}^2/\text{s})$
9.36×10^{-2}	9.27×10^{-4}

表 5.4: ピークのフラックス F とインプットのフラックス F'

また、シミュレーションの際にインプットモデルとしてスペクトルを指定する必要があり、この F を用いて式 5.4 により求めた。

$$FE^{-2} \quad (5.4)$$

5.3.3 シミュレーション

前節で示した方法で作成したフラックスが以下の図 5.2 である。5.2 節で示したコード、python ファイルを用いてシミュレーションを行った。

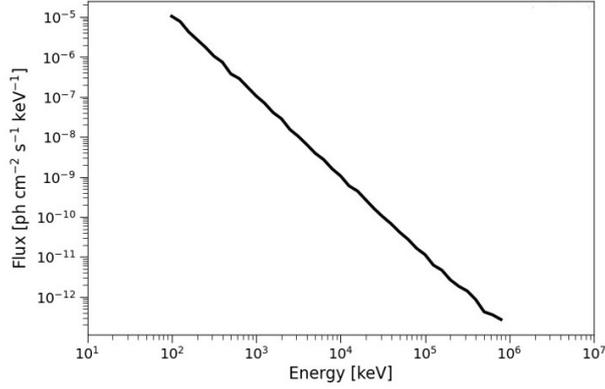


図 5.2: 21 天体のスタック解析から得られたインプットフラックス

これをインプットモデルとして Cosima を用いる。このとき、ジオメトリとして図 5.2 の検出器に光子を入射させてシミュレーションを行う。このシミュレーションが終わると、次に Revan によってイベントの再構成を行う。そして最後に Mimrec により、エネルギーごとの角度分解能を考慮してイベントの選別を行い、アウトプットのフラックスを求める。

この一連の流れで求めたアウトプットのフラックスと、AMEGO チームがシミュレーションを行ったバックグラウンドの結果²を用いて、目的のスペクトルと有効面積を作成する。

有効面積は以下の式 5.5 で求める。また有効面積 $A(E)$ は検出器の実面積 A と検出効率 $Q(E)$ を用いて、式 5.6 で表される。ここで $F_{in}(E)$ はインプット、 $F_{out}(E)$ はアウトプットのフラックスを表す。

$$F_{out}(E) = A(E) \cdot F_{in}(E) \quad (5.5)$$

$$A(E) = Q(E) \cdot A \quad (5.6)$$

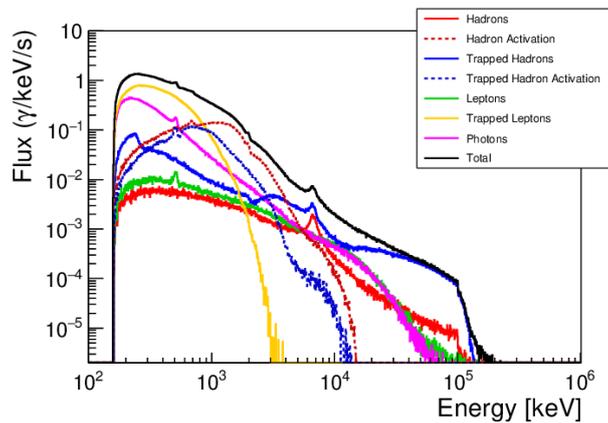


図 5.3: AMEGO-X のバックグラウンド

²<https://github.com/ComPair/AMEGO-X-AstroPix-backgrounds>

結果

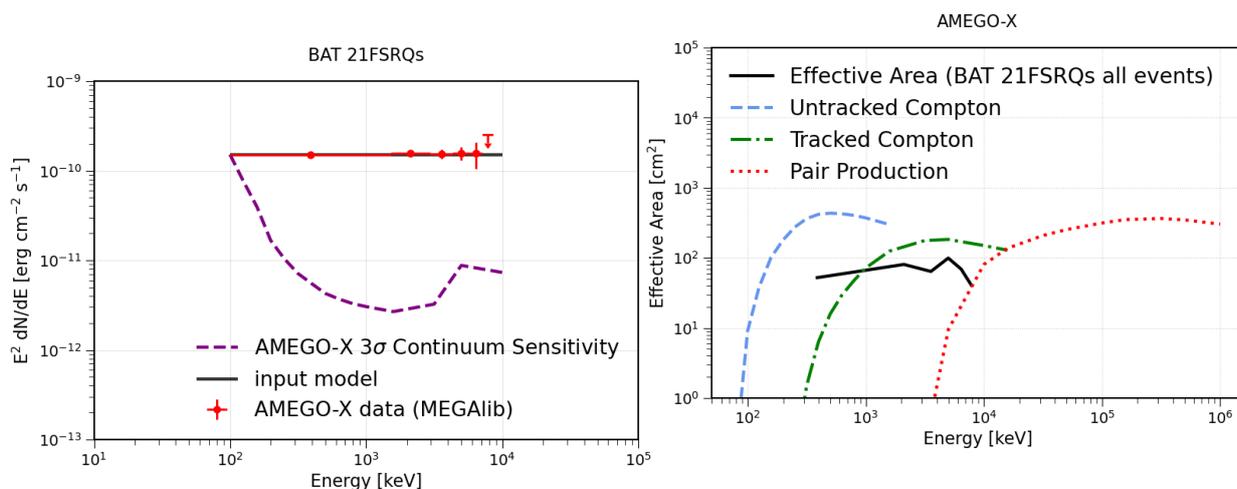


図 5.4: 21 天体のシミュレーション結果の SED

図 5.5: 求めた AMEGO-X の有効面積（各イベントの有効面積はすでにあったものを引用した。）

図 5.4 から、MeV 領域でにおいてシミュレーションで出したスペクトルを表す点が、紫の曲線で表される AMEGO-X の感度よりも高い位置にあるため、この領域での観測の実現性はあると考えられる。

ただ、現時点での問題点として、図 5.5 から全体のイベントでの有効面積が小さいことがわかり、これは入射イベントに対して、観測されたイベントが少ないということを表す。この原因として以下のようなことが考えられる。

- シミュレーションやイベント再構成の可否
- バックグラウンドが大きすぎる
- 角度分解能の問題

シミュレーションやイベント再構成については、Cosima や Revan を用いた際に何らかの不備があって正しく実行されなかったという可能性がある。またバックグラウンドは基本的には観測天体によらず一様で、シミュレーションに多くの時間を要するため、今回は AMEGO チームの結果を用いたが、これが大きすぎて天体が見えにくくなってしまった可能性もある。さらに Mimrec では、エネルギーに依存した角度分解能以内のイベントを選び出すようになっており、何らかの原因で出力された点源の像がぼやけてしまい、すりぬけてしまったという可能性が考えられる。よってより詳細なシミュレーションを行うにはこの有効面積を改善することが必要だと考える。

第6章 結論・まとめと今後

ニュートリノは電荷を持たず、弱い相互作用しか起こさないために高エネルギー陽子・宇宙線の存在や起源の解明に重要な役割を果たすと考えられている一方、その透過性から観測は難しい。そのような現状を踏まえて、本研究では硬 X 線で明るく、GeV ガンマ線で暗いブレーザー天体を対象にして、新たな高エネルギーニュートリノの起源の観測の可能性を探った。Fermi 衛星 LAT 検出器で見つからない天体を選定して解析を行ったため、天体個別ではパラメータが定まらない。そこで、天体のデータをすべて足し合わせることで平均のフラックスパラメータを求める、スタック解析という手法を用いた。これにより、GeV で暗い天体の平均のフラックスの値を求めることができた。

また、その結果をインプットのフラックスとしてシミュレーションを行ったことで、MeV 領域での感度より上にスペクトルが確認できたため、現時点でこの領域での観測の実現性は少なからずあると考える。

ただ今後の課題として、まずは前章で記した有効面積などシミュレーションの問題点を検討する必要がある。より詳細な解析のためには、4 章で 21 天体を選定した際、その条件として GeV 領域で暗いということのみ考慮したため、それぞれの天体の性質を調べることが重要だと考える。またインプットファイルの作成で MeV 付近でのフラックスピークを求めた際、ブレーザーのモデルを単純化していたため、より現実的な結果を得るためにはブレーザーの詳細な SED を考慮するべきである。

付録

Fermi Science Tools を用いた Fermi-LAT の具体的な解析については、先輩方の論文に詳しく記載されているため、ここでは同じ解析を Fermipy で行う際の方法について記録を残しておく。詳しくは Fermipy の公式ホームページ [7] を参照。

おおまかな流れとしては、Linux 上で Fermipy を使える環境にしたうえで、“anan1218.sh”という名前の c-shell 言語で書かれたスクリプトを実行する。このシェルスクリプトの中で、“ana.icecube.py”という名前の python ファイルを実行したり、さらにその中で“config_n1218.yaml”という名前の設定ファイルを読み込んだりということを行う。以下に、第3章で天体 PKS 0743-006 を Fermipy で解析した際に用いた3つのスクリプトを載せる。

① anan1218.sh

```
#!/bin/csh
#### conda activate fermipy2 ####
#goto FLDUMP
mkdir J0746.0-0039
cd J0746.0-0039

set tar = J0746.0-0039
set ra = 116.5246
set dec = -0.6543

set aa = 13

mkdir t$aa
cd t$aa

set ft1lst = ../../alldata/ft1.lst

set ts0 = 239557417
set te0 = 655609345
```

```
echo $ra $dec $ts0 $te0
```

```
echo gtselect
```

```
gtselect infile=@$ft1lst outfile=r30.fits zmax=90 ra=$ra dec=$dec rad=30 tmin=$ts0 tmax=$te0 emin=100  
emax=300000 evclass=128 evtype=3  
ln -s r30.fits ft1.fits
```

```
ANA:
```

```
cat ../config_n1218.yaml |sed s/RARA/$ra/g |sed s/DECDEC/$dec/g |sed s/STIME/$ts0/g |sed s/ETIME/$te0/g  
>config_$star.yaml
```

```
/net/cluster522/users/fuka/anaconda3/envs/fermipy2/bin/python ../ana_icecube.py
```

```
FLDUMP:
```

```
fdump fit_model.fits+4 STDOUT "source_name name type " - prhead=no pagewidth=200 page=no >fit_model_norm1.log  
fdump fit_model.fits+4 STDOUT "value error " - prhead=no pagewidth=200 page=no >fit_model_norm2.log
```

```
cd ..
```

```
exit
```

② ana_icecube.py

```
#!/bin/env python
```

```
from fermipy.gtanalysis import GTAnalysis
```

```
gta = GTAnalysis('config_J0746.0-0039.yaml', logging='verbosity' : 3)
```

```
gta.setup()
```

```
gta.optimize()
```

```
gta.print_roi()
```

```
# Free Normalization of all Sources within 3 deg of ROI center
```

```
gta.free_sources(distance=3.0, pars='norm')
```

```
# Free all parameters of isotropic and galactic diffuse components
```

```

gta.free_source('galdiff')
gta.free_source('isodiff')

# Free sources with TS >100
gta.free_sources(minmax_ts=[100,None],pars='norm')

# Fix sources with TS <100
gta.free_sources(minmax_ts=[None,100],free=False,pars='norm')

# Fix sources with 10 <Npred <1000
gta.free_sources(minmax_npred=[10,1000],free=False,pars='norm')

gta.print_params(True)

gta.fit()

gta.write_roi('fit_model')

# Dictionary defining the spatial/spectral parameters of the test source
model = 'SpatialModel' : 'PointSource', 'Index' : 2.0,'SpectrumType' : 'PowerLaw'

# Both methods return a dictionary with the maps
m0 = gta.residmap('fit_model', model=model)
m1 = gta.tsmmap('fit_model', model=model)

```

③ config_n1218.yaml

```

data:
  evfile : ft1.fits
  scfile : /net/cluster441/users/fuka/fermi/ana2108/cena/data/L210810215313E6D68C7A63_SC00.fits
  ltcube : null

binning:
  roiwidth : 10.0
  binsz : 0.1
  binsperdec : 8

selection :
  emin : 100

```

```
emax : 300000
zmax : 90
evclass : 128
evtype : 3
tmin : STIME
tmax : ETIME
filter : null
ra : RARA
dec : DECDEC
```

gtlike:

```
edisp : True
irfs : 'P8R3_SOURCE_V2'
edisp_disable : ['isodiff','galdiff']
```

model:

```
src_roiwidth : 15.0
galdiff : '/net/cluster542/users/morisita/fermi/PKS_0743-006/binned/gll_iem_v07.fits'
isodiff : '/net/cluster542/users/morisita/fermi/PKS_0743-006/binned/iso_P8R3_SOURCE_V3_v1.txt'
catalogs : ['4FGL']
```

カタログにない天体を解析する場合

上述の天体 PKS 0743-006 は、Fermi 4FGL カタログに記載されているため、config ファイルでカタログの名前を指定して、赤経赤緯の値を入力することで解析できた。しかし、もう一つの天体 PKS B1412-096 のように Fermi 4FGL-DR2 カタログで新たに搭載された天体や、そもそも Fermi LAT で見つかっていない天体を Fermipy で解析したい場合は、自分で天体の座標などの情報を追加する必要がある。以下にその方法を記す。

基本的には、上述の config (設定) ファイルの下の部分に以下のように”source”として赤経赤緯の値やパラメータの値を追加することで解析できる。

- config ファイル

model:

```
src_roiwidth : 15.0
galdiff : '/net/cluster542/users/morisita/fermi/fermipy2/gll_iem_v07.fits'
isodiff : '/net/cluster542/users/morisita/fermi/fermipy2/iso_P8R3_SOURCE_V3_v1.txt'
catalogs : ['4FGL']
sources :
```

```
- { name: 'J1556-7914', ra : RARA, dec : DECDEC,  
  SpectrumType : 'PowerLaw', Index : 2.0, Scale : 1000, Prefactor : !!float 1e-13,  
  SpatialModel: 'PointSource' }
```

また、今回の研究でのスタック解析のように、同じの天体を条件だけ変えて解析し直したい場合、モデルファイルは同じものを使うことができるため、それを読み込むことで解析にかかる時間を短縮することができる。

以下では #1 と #2 で 2 つの条件の解析のスキプトを示していて、”gta.write_roi”で以前のフィットの状態を読み込んで解析することができる。またその後のコマンドの”gta.free_source”や”free=False”で、その天体のパラメータの固定具合を決めることができる。

- ana_icecube.py (python ファイル)

#1

```
gta = GTAnalysis('./config_J1556-7914.yaml', logging='verbosity' : 3)  
gta.load_roi('fit_model')
```

```
gta.delete_source('J1556-7914')  
gta.add_source('J1556-7914', 'ra' : 239.24529, 'dec' : -79.23453,  
              'SpectrumType' : 'PowerLaw', 'Index' : 0.0,  
              'Scale' : 1000, 'Prefactor' : 0.0e-13,  
              'SpatialModel' : 'PointSource' )
```

```
gta.free_source('J1556-7914', free=False)  
gta.print_params(True)
```

```
gta.fit()
```

```
gta.write_roi('fit_model1')  
model = {'SpatialModel' : 'PointSource', 'Index' : 2.0, 'SpectrumType' : 'PowerLaw'}
```

```
m0 = gta.residmap('fit_model1', model=model)  
m1 = gta.tsmmap('fit_model1', model=model)
```

#2

```
gta = GTAnalysis('./config_J1556-7914.yaml', logging='verbosity' : 3)  
gta.load_roi('fit_model')
```

```
gta.delete_source('J1556-7914')
```

```
gta.add_source('J1556-7914', 'ra' : 239.24529, 'dec' : -79.23453,  
              'SpectrumType' : 'PowerLaw', 'Index' : 0.0,  
              'Scale' : 1000, 'Prefactor' : 0.5e-13,  
              'SpatialModel' : 'PointSource' )
```

```
gta.free_source('J1556-7914', free=False)  
gta.print_params(True)
```

```
gta.fit()
```

```
gta.write_roi('fit_model1')  
model = {'SpatialModel' : 'PointSource', 'Index' : 2.0, 'SpectrumType' : 'PowerLaw'}
```

```
m0 = gta.residmap('fit_model1', model=model)  
m1 = gta.tsmmap('fit_model1', model=model)
```

謝辞

本研究を行うにあたり指導していただいた、担当の深沢先生に大変感謝いたします。研究のはじめから通して、基本的な部分からさまざまな指示をいただきました。ときには精神的な側面でも話を聴いていただき、心強かったです。ありがとうございました。また須田先生は直接の指導教員ではなかったにもかかわらず、プログラミングの基礎的な部分など、質問に伺うたびに丁寧に教えていただきました。夏休みの試行研究も含めて、多くのことを学ばせていただきました。また、研究室の先輩方には、初めての研究でわからないことばかりの私に、本当に些細なことから教えていただきました。そして同じ状況で研究に取り組んだ4年生の皆さんなくしては、最後まで乗り切ることができなかったと思います。最後に、遠くから見守って応援してくれた家族には、研究の話はできないながらも悩みをたくさん聴いてもらってとても心配をかけたことと思います。

ここまでたくさんの人に支えられ、無事に学部を卒業することができました。関わってくださったすべての皆さまに、この場を借りて感謝いたします。これからも精進していきます。

2022年3月

参考文献

- [1] 今澤遼 広島大学 2019 年
卒業論文「電波銀河からの GeV/TeV ガンマ線の時間変動の研究」
- [2] 志岐健成 広島大学 2016 年
修士論文「多波長観測で探るガンマ線を放射する電波銀河のジェット放射機構の研究」
- [3] 戸田皓陽 広島大学 2017 年
修士論文「ブレーザー天体の宇宙論的進化と MeV ガンマ線背景放射への寄与」
- [4] Toda et al. 2020, ApJ 896, 172
"Cosmological Evolution of Flat-Spectrum Radio Quasars based on the Swift/BAT 105-month Catalog and Their Contribution to the Cosmic MeV Gamma-ray Background Radiation"
- [5] Paliya et al. 2019, ApJL 882, L3
"Fermi-LAT Stacking Analysis Technique: An Application to Extreme Blazars and Prospects for their CTA Detection"
- [6] 解析手順、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡
<https://fermi.gsfc.nasa.gov/>
- [7] Fermipy
<https://fermipy.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- [8] ニュートリノ
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/neutrino.html>
- [9] ニュートリノ
https://www.jstage.jst.go.jp/article/butsuri/72/7/72_482/_pdf
- [10] ニュートリノ
<http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/icecube.html>
- [11] Murase 2014
"On the Origin of High-Energy Cosmic Neutrinos"

- [12] Inoue et al. 2019, ApJ 880, 40
”On High-energy Particles in Accretion Disk Coronae of Supermassive Black Holes: Implications for MeV Gamma-rays and High-energy Neutrinos from AGN Cores”
- [13] Ackermann et al. 2012, APJS 203, 4
”THE FERMI LARGE AREA TELESCOPE ON ORBIT: EVENT CLASSIFICATION, INSTRUMENT RESPONSE FUNCTIONS, AND CALIBRATION”
- [14] Atwood et al. 2009, ApJ 697, 1071
”The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission”
- [15] AMEGO
<https://asd.gsfc.nasa.gov/amego/>
- [16] Fleischhack, H et al. 2021
”AMEGO-X: MeV gamma-ray Astronomy in the Multimessenger Era”
- [17] SWIFT 衛星
<http://www.yoshida-agu.net/research/swift?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>
- [18] SWIFT 衛星
<https://www.swift.psu.edu/>
- [19] 物理学実験法 I -誤差論- 2019 年度版 梅尾 和則
- [20] 最尤法と χ^2 検定
<https://genkuroki.github.io/documents/IntroMLE.pdf>
- [21] MEGALib でのシミュレーション
https://github.com/ckarwin/AMEGO_X_Simulations/tree/master/TXS_0506%2B056