

千葉大学大学院 融合理工学府

修士論文

IceCube ニュートリノ起源天体同定のための
ガンマ線カタログの改良とその評価

2025 年 3 月提出

先進理化学専攻 物理学コース
金谷 龍太郎

概要

高エネルギー宇宙線におけるハドロン加速に対する理解を深めるためには宇宙線ハドロン源の特定をする必要がある。ニュートリノの生成はハドロン加速由来に限定されるため、高エネルギーニュートリノの検出はハドロン加速の直接的な証拠になる。ニュートリノの検出は比較的困難であるが、ニュートリノと相補的な関係にあり検出の比較的容易なガンマ線の観測と組み合わせることでニュートリノ源の特定が期待されてきた。高エネルギーニュートリノを検出する IceCube 実験からガンマ線の観測実験グループの CTA に送られるアラートの一つは、半年までの期間に検出された 100TeV 以下の複数のニュートリノイベントと、事前に作成されたカタログの中にあるガンマ線源の位置的相関の有意性をとり、その有意性が定められた基準を満たせばアラートを出すものである。このアラートを受け取った CTA がニュートリノ放出天体を同定するために、リスト内の対応する天体のガンマ線観測を行う。このアラートシステムにより今までに特定されたニュートリノ源はなく、可能性のある未知のニュートリノ源をガンマ線追尾観測によって特定することが期待されている。本研究ではニュートリノと対応する可能性のあるガンマ線天体を選ぶ上での基準を改良し、既知ニュートリノ源に対するバイアスを減らし、ガンマ線源のリストを作成した。また、作成したリストと過去に IceCube によって検出された単一の高エネルギーニュートリノイベントとの位置的な相関を取りその有意性を計算し、ニュートリノ源としてリストの天体を評価した。

目次

概要	i
第 1 章 序章	1
1.1 宇宙線の起源	1
1.2 宇宙線の起源特定のためのニュートリノ検出	2
1.3 高エネルギーニュートリノとガンマ線の生成	2
第 2 章 IceCube と CTA によるマルチメッセンジャー観測	5
2.1 IceCube	5
2.1.1 ニュートリノイベント	5
2.2 CTA	6
2.2.1 CTA におけるガンマ線の検出	8
2.3 IceCube ニュートリノ源同定のためのアラートの意義と役割	9
2.3.1 これまでの主なニュートリノ源探索	11
第 3 章 ガンマ線源リストの改善	15
3.1 チャンネル 2 のガンマ線フォローアップ用リスト	15
3.1.1 4FGL の改変戦略	15
3.1.2 TeVCat の改変戦略	16
3.2 4FGL 改変の手順	17
3.2.1 赤方偏移の仮定	17
3.2.2 flux の計算方法	22
3.2.3 フレアによるカット	23
3.3 TeVCat 改変の手順	26
3.3.1 GRB の除外	26
3.3.2 リスト内の隣接天体の処理	26
3.3.3 4FGL と TeVCat の天体の重なるの処理	27

3.3.4	TeVCat 内の隣接天体	27
3.3.5	TeVCat 内の銀河系の近傍天体	28
第 4 章	過去に作られたリストとの比較	33
4.1	MAGIC, VERITAS, HESS のリストとの重なり	33
4.1.1	Chiba リスト	34
4.1.2	MAGIC リストとの比較	37
4.1.3	H.E.S.S リストとの比較	40
4.1.4	VERITAS リスト	44
第 5 章	IceCat と作成したリストとの位置的な相関	47
5.1	目的	47
5.2	IceCat	48
5.2.1	IceCat エントリの内容	48
5.3	取られた相関とその評価	49
5.3.1	IceCat におけるニュートリノイベントの信頼領域の定義	49
5.3.2	相関をとった方法とその評価	52
5.3.3	相関の有意性の評価	53
5.4	重みの高い相関が得られた天体の考察	56
5.4.1	MGRO J1908+06	56
5.4.2	Markarian 421	57
5.4.3	NGC 1218	57
5.4.4	3C 454.3	58
第 6 章	リスト改変の現状と今後の展開	61
6.1	複数リストの統合と総天体数	61
6.2	Padova チームによる追尾観測用ガンマ線源リストの作成方法	62
6.2.1	Chiba リストと Padova リストの一致度	63
6.3	IceCube のニュートリノ検出感度の考慮による天体の選定	65
6.3.1	4FGL 天体の選定	66
6.3.2	TeVCat 天体の選定	68
6.4	銀河系天体の扱い	74
6.4.1	Super Nova Remnant、TeV Halo、Pulsar Wind Nebulae	75
6.4.2	個々の天体とそのタイプの詳細な評価	76
第 7 章	まとめと展望	79

謝辞	81
参考文献	83
付録 A 補足	87
A.1 4FGL カタログから選定された天体のリスト	87
A.2 TeVCat カタログから選定された天体のリスト	89

目次

2.1	IceCube の検出器によって記録されたイベントの例。左からトラックイベント、シャワーイベント。球は検出器を示し、赤色が早くトリガーされた検出器、緑と青はそれ以降にトリガーされたもの。[1].	6
2.2	CTA 計画の望遠鏡配置 [2]。(右上) 北サイトおよび(右下) 南サイトの完成予想図.	7
2.3	ガンマ線検出感度 [2]。"Crab" は、カニ星雲のガンマ線強度。	8
2.4	検出された X・ガンマ線源数の推移。CTA 望遠鏡で、約 1000 個のガンマ線源の検出が期待される [2].	9
2.5	シングレットアラートの分類とその位置を示す [3].	10
2.6	TXS0506+056 の方向	11
2.7	全 2LAC ブレーザーにおける 90% 信頼度 (C.L.) のニュートリノフラックスの上限を、観測された宇宙拡散ニュートリノフラックスと比較したもの [4]. スペクトル指数が-2.5 (青色) に基づくべき則で、等重み付けおよびガンマ線重み付けの双方を用いたフラックス上限が示されている。スペクトル指数が-2.2 のより硬いスペクトルを持つフラックスに対する均等加重上限 (緑色) も示されている.	12
2.8	黒いクロスマークで NGC 1068 の方向が示されており、ニュートリノの到来方向における尤度値の負の対数 (-log) が図中の色で示されている。[5]. . . .	13

3.1	ガンマ線エネルギー E_γ に対するガンマ線の減衰を、赤方偏移 $z = 0.03, 0.1, 0.25, 0.5, 1$ の天体について示す。赤の長短破線は観測された EBL のデータ、黒の実線は WMAP5 の Fiducial モデル、青の破線は WMAP5 SAM モデルを示している。低赤方偏移領域 (1–10 TeV) での減衰割合が穏やかになっているのは、EBL スペクトルの中赤外成分の影響を反映している。(右図) は同じモデルに基づくガンマ線のペア生成減衰エッジを示す。ペア生成減衰エッジとは、高エネルギーガンマ線が EBL によって電子・陽電子対を生成し、急激に減衰するエネルギー領域を指す。曲線は、観測されたガンマ線エネルギーの関数として、光学的深さ τ が 1, 3, 10 に達する赤方偏移を表す。光学的深さ τ とは、光 (ガンマ線) が EBL との相互作用によってどの程度減衰するかを示す指標であり、 $\tau = 1$ で約 63%、 $\tau = 3$ で約 95% の減衰が発生する [6]。	18
3.2	MAGIC の 5 時間観測におけるガンマ線に対する感度曲線とガンマ線源の赤方偏移の値に対するフラックスの曲線。MAGIC の感度曲線がオレンジで、各赤方偏移におけるフラックスはプロットに示されている色で識別される。黒色の矢印はガンマ線のフラックスと MAGIC の感度曲線の最小距離。	18
3.3	各赤方偏移における MAGIC 望遠鏡の感度とガンマ線源のフラックスの比率の最小値。ガンマ線源のフラックスが計算される際の index はプロットのラベルを参照。	19
3.4	各赤方偏移における MAGIC 望遠鏡の感度とガンマ線源のフラックスの比率の最小値。ガンマ線源のフラックスが計算される際の index はプロットのラベルを参照。	20
3.5	赤方偏移が 0.5 における EBL モデルが適用されたパワーローモデルによるガンマ線天体のフラックス。index は標準の -2.0。	21
3.6	Dominguez モデルと Finke モデルにおける ratio。横軸は赤方偏移。全ての ratio は $z = 0$ の時の ratio で割られることにより規格化されている。index に対応する色はプロットのラベルを参照。	21
3.7	パワーローカットオフモデル (PLCutoff) とログパラボラモデル (Logpara) の比較。ログパラボラモデルは緑色、パワーローカットオフモデルは橙色でしめた。	23
3.8	異なる EBL モデルの比較	24
3.9	無作為に割り当てられた色で示されている 4FGL の 4505 天体のフラックスと 2.5 時間観測における CTA の感度曲線 (黒の波線)。	25
3.10	4FGL の 69 天体のガンマ線フラックス	25

3.11	HESS J1746+285, MAGIC J1746-2853, VER J1746+289, Galactic Centre の位置エラーの範囲が赤色の楕円で示されている。天体の座標が青の点で示 されている。	29
3.12	TeV J2032+4130, PSR J2032+4127, CygnusX, MGRO J2031+41 の位置 エラーの範囲が赤色の楕円、Extention の範囲が緑色の楕円で示されている。 天体の座標が青の点で示されている。	30
3.13	TeV J2032+4130, PSR J2032+4127 の位置エラーの比較。天体の座標が青 の点、位置エラーの範囲が赤色の楕円で示されている。	31
4.1	以前までのニュートリノイベント検出からガンマ線追尾観測までの流れと今 後の計画の比較図。	34
4.2	Chiba リストの天体種別ヒストグラム	36
4.3	4FGL と TeVCat の天体種別ヒストグラム	36
4.4	Chiba リストの 4505 天体のうち、MAGIC の観測条件 (天頂角 $< 45^\circ$) より 観測可能な天体が赤、それ以外が青でプロットされている。	38
4.5	MAGIC リストの天体のタイプ	38
4.6	MAGIC リストには残っているが、Chiba リストからは除かれた天体のタイ プ。	39
4.7	4FGL 天体 4FGL 内で数の最も多い天体種 7 つにおける赤方偏移のヒスト グラム。	40
4.8	4FGL のうち赤方偏移の情報がある天体のタイプ別 γ 線フラックスと CTA の 2.5 時間観測における感度曲線の比較のプロット。天体のフレアを考慮し て銀河系天外体のフラックスは全て 10 倍されている。	41
4.9	4FGL の 4505 天体のうち、H.E.S.S. の観測条件 (天頂角 $< 45^\circ$) より観測 可能な天体が赤、それ以外が青でプロットされている。	42
4.10	hess リストの天体のタイプ	43
4.11	hess リストにあるが Chiba リストからは除外された天体のタイプ	43
4.12	4FGL の 4505 天体のうち、VERITAS の観測条件 (天頂角 $< 45^\circ$) より観 測可能な天体が赤、それ以外が青でプロットされている。	45
4.13	VERITAS リストの天体のタイプ	45
4.14	VERITAS リストにはあるが Chiba リストからは除かれた天体のタイプ . . .	46
5.1	100,000 個の座標の重みのヒストグラム。両軸とも log スケールでプロット されている。	55

5.2	100,000 個の座標の重みのヒストグラムの縦軸を宇宙の数 402 で割ったもの。 両軸とも log スケールでプロットされている。	55
6.1	両者のリストの共通の天体数	64
6.2	$\gamma = -2$ の場合の IceCube のニュートリノに対する 5σ 検出可能性と感度曲 線。	64
6.3	北半球、南半球それぞれにおける両者の共通する天体数の割合。	66
6.4	IceCube 感度で割られたフラックスの曲線：赤の曲線は IACTs 感度を下回っ たもの。青の曲線は IACTs 感度を上回ったもの。IACTs の 2.5 時間の感度 曲線：黒の波線。横軸はエネルギー。	67
6.5	横軸は赤緯、縦軸は天体毎に計算された FoM の値。	68
6.6	TeVCat の Crab Unit の値を持つ 144 天体に対して計算された FoM。横軸 は赤緯。	69

3.1	4FGL と TeVCat の天体間の分離角が 0.5 度以内のペア	27
4.1	天体のタイプとその説明	34
5.1	50% 信頼領域内で得られた位置的相関	50
5.2	90% 信頼領域内で得られた位置的相関	51
5.3	IceCat の 50% 信頼領域内で得られた位置的相関を持つ重みの値と対応する天体。Assoc1_x が 4FGL 天体の名前、TeVCat_x が TeVCat 天体の名前、weight_50 は相関の重み、NAME、START はそれぞれイベントの名と検出時刻。	54
6.1	チャンネル 2 のニュートリノイベントとあるガンマ線源の相関の有意度と追尾観測用ガンマ線源のリストの天体数の関係。	62
6.2	TeVCat の Crab Unit の値を持つ 144 天体に対して計算された FoM。横軸は赤緯。	69
6.3	Crab Frac のない TeVCat 天体	75
6.4	赤緯が-45 度以下により除かれた天体	76
A.1	5 章の解析に用いた 69 天体からなる 4FGL リスト。	87
A.2	5 章の解析に用いた 1880 天体からなる TeVCat リスト。	89

第 1 章

序章

1.1 宇宙線の起源

宇宙線は狭義には、陽子やヘリウムなどの原子核や電子を意味し、広義にはミュー粒子や中性子などのように、地球上に入ってきた宇宙線が大気と衝突して作る二次宇宙線や、太陽を含む天体から生み出されるニュートリノや高エネルギーガンマ線（短波長の電磁波）なども含むことがある。

宇宙線の発見は、素粒子物理学から宇宙線検出技術の発展まで、物理学の進展において重要な役割を果たしてきた。それ以来、宇宙線は物理学の多くの分野に多大な影響を及ぼし続けている。しかし、その起源に関する我々の理解は依然として十分なものではなく多くの謎が残されている。

宇宙線は主に陽子や原子核エネルギーで構成される荷電粒子であり、広範囲のエネルギー領域、すなわち 10^9 eV から 10^{20} eV にわたって観測される。特に、 3×10^{18} eV を超える超高エネルギー宇宙線は、素粒子物理学の研究を行う世界最大の研究機関であり、全長 27 km の **大型ハドロン衝突型加速器（LHC）** を運用している CERN の Large Hadron Collider を超える加速現象が宇宙内で起こっていることを示唆している。

宇宙線の起源における謎の一つである「宇宙線が宇宙のどこで作られているのか」という問題は、「荷電粒子はどのようなメカニズムで加速されるのか」、「天体の非熱的放射メカニズムは何か」、「宇宙素粒子を用いて未知の物理現象をどのように探ることができるのか」といった多くの疑問と関連している。これらの問いは、宇宙線が発見されてから 100 年以上にわたり、粒子天体物理学における重要な研究テーマとして議論され続けてきた。

宇宙線の起源を特定する上での大きな障壁の一つが、銀河内部に存在する宇宙線は荷電粒子（陽子、原子核）であり銀河磁場によって軌道が曲げられることにある。したがって到来方向から放射天体の位置を特定することは容易ではない。さらに曲げられた軌道を決める銀河系内外の磁場の量や向き、そして宇宙線粒子の電荷量（すなわち原子核の種類）も不定性が大きい。

宇宙線が銀河磁場により曲げられた際の軌道の曲率を決定するのがラーモア半径であり、これは次式で表される。

$$R_L \simeq \frac{E}{ZeB} \quad (1.1)$$

ここで、 E は宇宙線粒子のエネルギー、 Ze はその電荷量、 B は銀河磁場の強さを示す。一般に銀河磁場の強度は $B \sim 3 \mu G$ と見積もられる。

宇宙線のエネルギーが knee 領域 (10^{15} eV 程度) 以下の場合、ラーモア半径は銀河円盤の厚みよりも十分に小さくなる。例えば、陽子の場合、エネルギーが 10^{15} eV であれば、そのラーモア半径は約 0.3 pc となる。

1.2 宇宙線の起源特定のためのニュートリノ検出

これらの問いを解明するためには宇宙線の起源の特定が必要となり、そのためには宇宙線によって生成される高エネルギーニュートリノの検出が重要となる。高エネルギーニュートリノは、陽子が物質や光と相互作用することによって生成される。このニュートリノは、弱い相互作用を持つことによる透過性により、光では観測が困難な天体内部や遠方宇宙の研究において非常に有用である。また、ニュートリノは磁場の影響を受けずに直進するため、その起源の方向を特定することが可能である。

しかし、弱い相互作用を持つことにより他の素粒子との反応がごく僅かで透過性が非常に高いことから、原子核や電子との衝突を利用した観測が難しい。この特性が、ニュートリノ観測の大きな技術的挑戦となっている。

1.3 高エネルギーニュートリノとガンマ線の生成

高エネルギーニュートリノとガンマ線は、共に高エネルギー宇宙線の相互作用によって生成される。

高エネルギー宇宙線陽子 (p) が物質 (他の陽子 (p) や原子核) と相互作用する場合、非弾性散乱が起こり、中間子 (π 中間子や K 中間子) が生成される。非弾性 (pp) 反応により生成された中間子のうち、荷電パイオン (π^+ と π^-) は次のような崩壊を経てニュートリノとガンマ線を生成する。

$$p + p \rightarrow p + n + \pi^+ \quad (1.2)$$

$$p + p \rightarrow p + \pi^0 \quad (1.3)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.4)$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (1.5)$$

高エネルギー宇宙線陽子が光子と相互作用する場合、デルタ共鳴が重要な役割を果たす。この反応は次のように表される。

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0 \quad (1.6)$$

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow n + \pi^+ \quad (1.7)$$

ここで、デルタ共鳴状態 (Δ^+) は荷電パイオンと中性パイオンを生成し、それらが崩壊することで同様にニュートリノとガンマ線が生成される。両者はお互いの観測上の課題を解決する相補的な関係になっている。

弱相互作用粒子であるというニュートリノの性質は、非常に遠方宇宙からエネルギーを失うことなくニュートリノは飛来するという帰結をもたらす一方で、宇宙空間を伝播する高エネルギーガンマ線は、宇宙背景光と相互作用してエネルギーを失うため我々の銀河系程度の大きさしか進むことができず、遠方宇宙を探索することはできない。

また、ガンマ線は宇宙線由来とは限らずに電子から純粋な電磁相互作用過程 (例えばシンクロトロン放射) によって放射される一方で、高エネルギーニュートリノは、荷電パイ中間子の崩壊で生成されるが電磁相互作用過程では作られない。すなわち、高エネルギーニュートリノの存在はハドロンの相互作用に必ず関連しているためハドロン加速の直接的な証拠になる。

ニュートリノは弱い相互作用しか持たないため、検出が非常に難しいが、ガンマ線や X 線などの電磁波観測は、ニュートリノと比較して検出がしやすい。

このため、これらのニュートリノとガンマ線の検出方法をニュートリノ検出とガンマ線観測は相補的な関係にあり、両者を組み合わせることでニュートリノ源の特定における精度が向上することが示されている。特に、ニュートリノの検出時刻と空間位置をガンマ線のフレアの観測データを用いることで、時間的・位置的な相関を評価し、単なる統計的な偶然ではないことを確認できる。これにより、ニュートリノ源である可能性の有意性が向上し、より確実な同定が可能となる。そのため、ニュートリノ天文学においては、ガンマ線との多波長観測を組み合わせた手法が注目され、今後の研究においても多メッセンジャーによるアプローチが中心的な役割を果たすと考えられている。

第 2 章

IceCube と CTA によるマルチメッセンジャー観測

2.1 IceCube

IceCube は、南極大陸の南極点のアムンゼン・スコット基地近くの氷に設置されたニュートリノ検出器であり、約 1 立方キロメートルの氷に光検出器が埋め込まれている。この実験は、宇宙から飛来する高エネルギーニュートリノの観測を目的としている。ニュートリノが氷と相互作用する際に生成される荷電粒子が放射するチェレンコフ光を捉えることにより、そのニュートリノの性質や起源を解明できる。IceCube の建設は 2005 年に開始され、2011 年に完了した。

IceCube 検出器は、深さ 1450m から 2450m の南極の氷の中に約 5000 個の光検出器 (DOM) が設置されており、これらの DOM は 86 本のストリングと呼ばれるケーブルに計 5160 個取り付けられている。各ストリング (ケーブル) の間隔は約 125m であり、各ストリング上の DOM は垂直方向に 17m 間隔で配置されている。この配置により、10GeV から数 PeV に及ぶ広範囲のエネルギーを持つニュートリノの検出が可能となっている。

IceCube の標準配列では、主に 100GeV 以上のエネルギーを持つニュートリノを観測しているが、各ストリングの間隔が 72m、垂直方向では 7m という高密度な配置となっている Deep Core と呼ばれる特別な領域では、より低エネルギー (10GeV から 100GeV) のニュートリノも検出できるように設計されている。

2.1.1 ニュートリノイベント

IceCube で観測された宇宙ニュートリノの観測イベントの例を図 2.1 に示す。図には、ニュートリノが氷と相互作用した際に生成されたチェレンコフ光が DOM によって検出され

た様子が示されている。IceCube で観測されるニュートリノイベントは、トラックとカスケードの2種類に分類される。トラックイベントは、ミューオンニュートリノが CC 反応を起こし、生成されたミューオンが長距離を移動しながらチェレンコフ光を放つことで発生する。直線的な光の軌跡を持ち、到来方向を高精度で決定できるが、エネルギー測定精度は低い。一方、カスケードイベントは、電子ニュートリノの CC 反応や、全てのニュートリノ種による CC 反応によって生じる。球状に広がる光のパターンを示し、エネルギー測定には優れるが、到来方向の決定には不確実性が大きい。トラックは高エネルギーニュートリノの方向決定に、カスケードはエネルギースペクトル解析に有用であり、IceCube-Gen2 では両者の検出精度が向上し、さらなる宇宙ニュートリノの研究が進むと期待される。

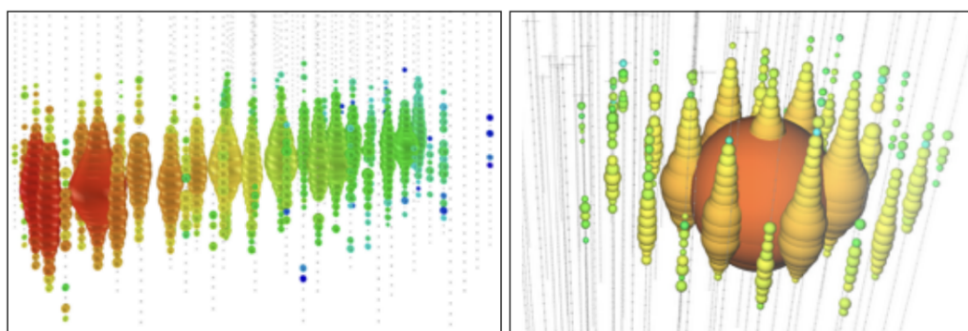


図 2.1 IceCube の検出器によって記録されたイベントの例。左からトラックイベント、シャワーイベント。球は検出器を示し、赤色が早くトリガーされた検出器、緑と青はそれ以降にトリガーされたもの。[1]。

2.2 CTA

CTA (Cherenkov Telescope Array) は、TeV 領域の高エネルギーガンマ線を観測する次世代の地上望遠鏡群で、従来のガンマ線観測装置よりも高い感度と広い視野を持ち、宇宙の高エネルギー現象を詳しく探ることを目的としている。

数十 GeV を超えるガンマ線が地球の大気に到達すると、大気との相互作用によって素粒子のカスケードが発生し、空気シャワーが形成される。TeV のエネルギーを持つガンマ線では特に顕著になる。この空気シャワー内で、超高エネルギー粒子が光よりも速く移動すると、チェレンコフ光と呼ばれる青い閃光が発生する。チェレンコフ光はナノ秒程の非常に短い時間しか持続しないが、これらのガンマ線観測機関の望遠鏡によって検出可能である。これらの望遠鏡は、このチェレンコフ光を鏡で反射し、カメラで捉えることで、ガンマ線の発生位置とエネルギーを特定することができ、その面積が大きいので GeV に比べて高エネルギーの TeV ガンマ線を検出することができる。

しかし、これらの望遠鏡の感度では観測に十分でない未知の高エネルギー現象があるとされている他、今までの観測可能なエネルギー範囲では観測ができなかった低エネルギー領域の遠方ガンマ線源からのガンマ線を観測する必要がある。これらの課題に対処するためには、より高感度かつ広範なエネルギー領域を観測できる装置が必要である。

GeV 領域の観測では、Fermi-LAT が高感度なデータを提供しているが、Fermi-LAT の有効検出面積は地上の大気チェレンコフ望遠鏡と比較すると、1 GeV 付近で約 $8,000 \text{ cm}^2$ (0.8 m^2) と小さく、特に数十 GeV 以上の高エネルギー領域では感度が低下する。そのため、Fermi-LAT は数十 GeV 以上のガンマ線の検出が困難になり、超高エネルギーガンマ線の観測には適していない。一方で、地上のチェレンコフ望遠鏡は、既存技術を発展させることで、より大規模な観測システムを構築し、Fermi-LAT よりもより高エネルギー側における感度を向上させることが可能である。この背景から、Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画が提案された。



図 2.2 CTA 計画の望遠鏡配置 [2]。(右上) 北サイトおよび(右下) 南サイトの完成予想図。

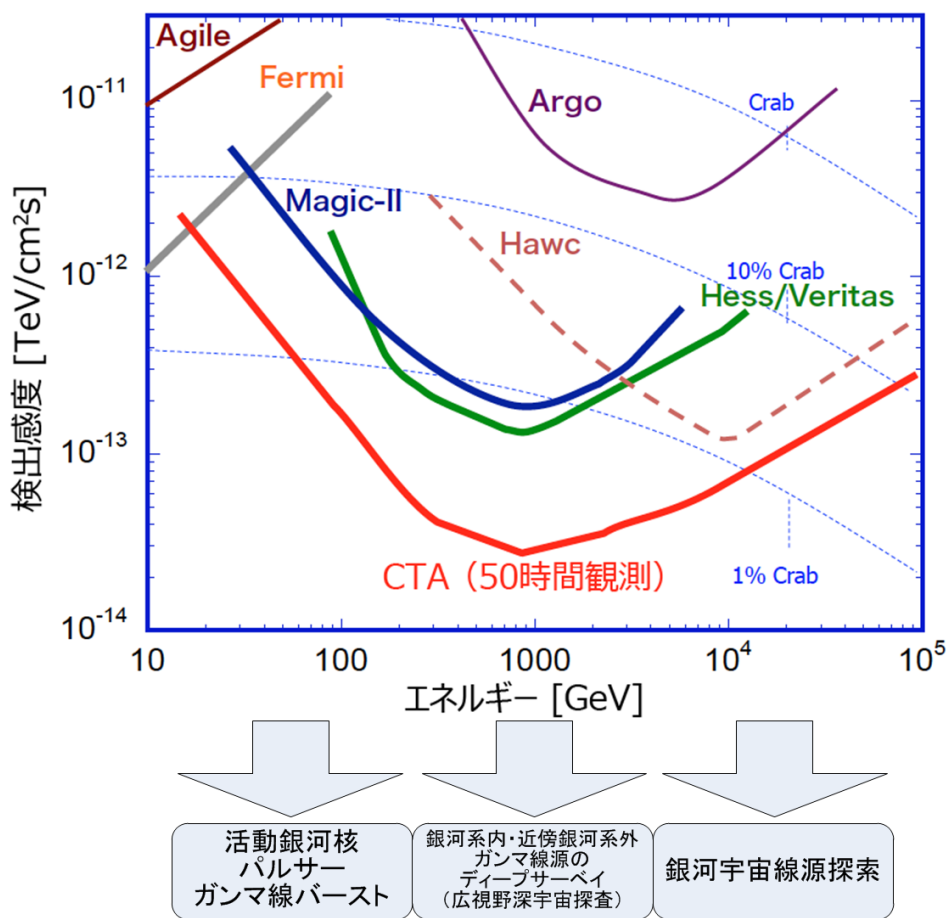


図 2.3 ガンマ線検出感度 [2]。"Crab" は、カニ星雲のガンマ線強度。

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は、南半球（チリ・パラナル）と北半球（スペイン・ラパルマ）に、合計 100 台近くの解像型大気チェレンコフ望遠鏡を設置することで、広範囲にわたる高エネルギーガンマ線の観測を行うものである。

大中小のチェレンコフ望遠鏡を多数配置し、従来の観測装置の 10 倍の感度を達成し、20 GeV から 100 TeV までのエネルギー領域をカバーすることを目指している。

2.2.1 CTA におけるガンマ線の検出

CTA は、以下の 3 種類の望遠鏡から構成される：

1. **LST (Large-Sized Telescope)**: 直径 23m の大口径望遠鏡で、視野は 4-5 度。
2. **MST (Medium-Sized Telescope)**: 直径 10-12m の中型望遠鏡で、視野は 6-8 度。
3. **SST (Small-Sized Telescope)**: 直径 4-6m の小型望遠鏡で、視野は約 10 度。

これらの望遠鏡を適切に配置することで、広範囲のエネルギースペクトルにわたるガンマ線

を高感度で観測することが可能となる。ただし、以降本論文で CTA の望遠鏡について述べる際は LST のことに限る。

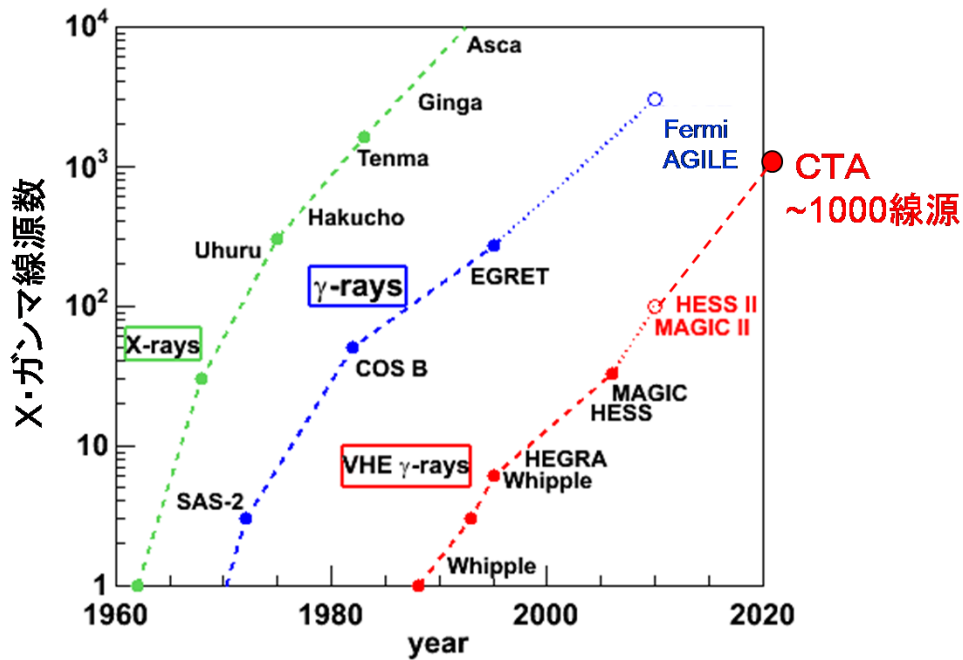


図 2.4 検出された X・ガンマ線源数の推移。CTA 望遠鏡で、約 1000 個のガンマ線源の検出が期待される [2]。

CTA は、従来のガンマ線望遠鏡と比較して約 10 倍深い感度を有しており、50 時間の観測でカニ星雲のガンマ線強度を基準とした crab unit において高感度なガンマ線検出が可能である。また、CTA は約 1000 個のガンマ線源の検出を目指しており、未知の高エネルギー現象や新たな天体の発見が期待される。

2.3 IceCube ニュートリノ源同定のためのアラートの意義と役割

IceCube のニュートリノ検出によって LST に送られるアラートは 4 つのチャンネルに分類される。

1. 単一高エネルギー (> 100 TeV) トラックイベント (シングレット)、典型的に位置誤差が 0.3 度、で天体物理学的起源である確率により Gold / Bronze に分類。このアラートは 2015 年から GCN を通じて公開されている。

このチャンネルの意義は、検出された高エネルギー ($> 100 \text{ TeV}$) トラックイベント (シングレット) のニュートリノの起源天体として可能性のあるものを電磁波観測によって特定することである。

チャンネル 1 の単一高エネルギーイベントは 2015 年当初は EHE と HESE に分類された。EHE は 2015 年から始まった 1 PeV 以上の非常に高いエネルギーを持つニュートリノイベントを指す。ここでの HESE (High-Energy Starting Event) は、高エネルギーのスターティングイベントのうち、特に CC 反応を起こしチェレンコフ光を放つミュオンの移動距離が 200 メートル以上の角度分解能が良いトラックイベントを指す。スターティングイベントは IceCube の検出器内でニュートリノがチェレンコフ光を放つミュオンに変わるイベントのことである。2019 年からこれが再編され、天体物理学的起源である確率が 50% 以上であるニュートリノイベントが Gold、30% から 50% のものが Bronze として分類されている。

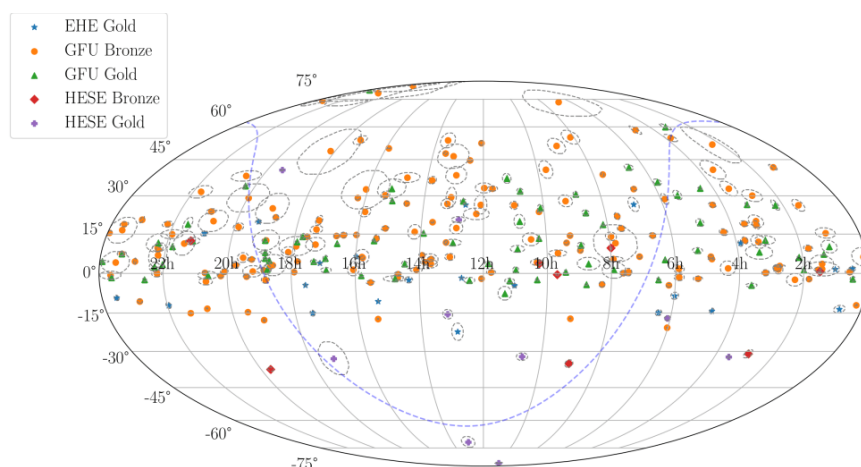


図 2.5 シングレットアラートの分類とその位置を示す [3].

2. 半年間までの期間に検出された約 100 GeV 以上のエネルギーのものを含む複数のニュートリノ事象で、複数のニュートリノ事象の角度分解能を組み合わせ得られた位置と既知のガンマ線源との位置的な相関をとり、その相関の有意性 3σ 以上であればアラートが IceCube より送られる。このアラートは一般公開されず、覚書の下、IACTs との間でのみで利用される。

このチャンネルの意義は、チャンネル 1 に比べて比較的低エネルギーのニュートリノイベントであるためバックグラウンドが多い領域のイベントにはなるが、半年間までの期間内で複数個検出し、既知ガンマ線源との位置的な相関の有意性を条件に課すことで、チャンネル 1 に比べて比較的低エネルギーなニュートリノの起源天体を発見することである。少なくとも 2 年間で 5 件 magic で追尾観測されているというのが公開されている。

3. チャンネル 2 と同じ基準で選択された複数のニュートリノ事象であるが、既知の天体との相関はとらない。ニュートリノ事象の有意性が 4.2σ 以上でアラートが IceCube より送られる。これも MoU のプライベートチャンネルで、”all-sky” アラートと呼ばれ、約 0.5yr^{-1} の低率（約 2 年に一回）で起こる。

このチャンネルの目的は天体に対するバイアスなく検出された複数のニュートリノ事象の起源天体を同定するためにガンマ線の追尾観測をするためのものである。

4. 主に電子ニュートリノによるシングルカスケード事象。 $> 10 \text{ deg.}$ このアラートは 2021 年から GCN を通してに公開されている。

2.3.1 これまでの主なニュートリノ源探索

IceCube は検出したニュートリノ事象に対応するチャンネルからアラートをガンマ線の観測機関、MAGIC、HESS、VERITAS に 2019 年、2020 年にわたり 10 個送った。MAGIC、HESS、VERITAS は IceCube から送られてきたアラートを受けて対応するガンマ線天体観測を行ってきたが、10 年以上にわたり TXS 0506+056 というブレーザーのみしか発見されていない。この時のガンマ線追尾観測は MAGIC により行われた。TXS 0506+056 は 290TeV のエネルギーを持ち、約 0.1 度の位置誤差を伴うシングレットのアラート（チャンネル 1）。

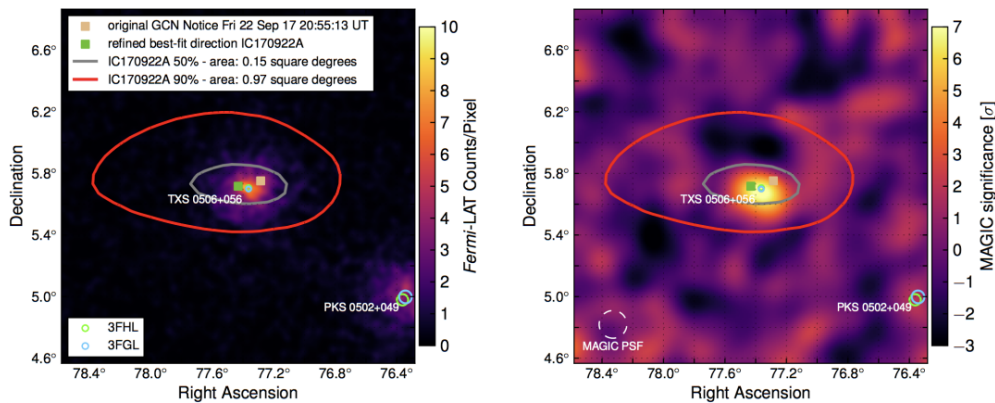


図 2.6 IceCube-170922A の天球上の位置と、それに対応する Fermi-LAT および MAGIC によるガンマ線観測の結果を示している。左の図は、Fermi-LAT による 0.5 年分の積算観測データを基に作成されたマップである。右の図は、MAGIC による観測結果を示し、検出された光子の信号強度が示されている。両図において、赤い楕円はガウス分布に基づく IceCube ニュートリノイベントの 50% および 90% の信頼範囲を示し、白い等高線は 30 GeV 以上のエネルギーを持つガンマ線の分布を示している。緑の四角は、MAGIC のフォローアップ観測に基づいて得られた IceCube-170922A の位置を示し、Fermi-LAT の 3FGL および 3FHL カタログに登録されている既知のガンマ線源の座標がマーカーで記されている。[7].

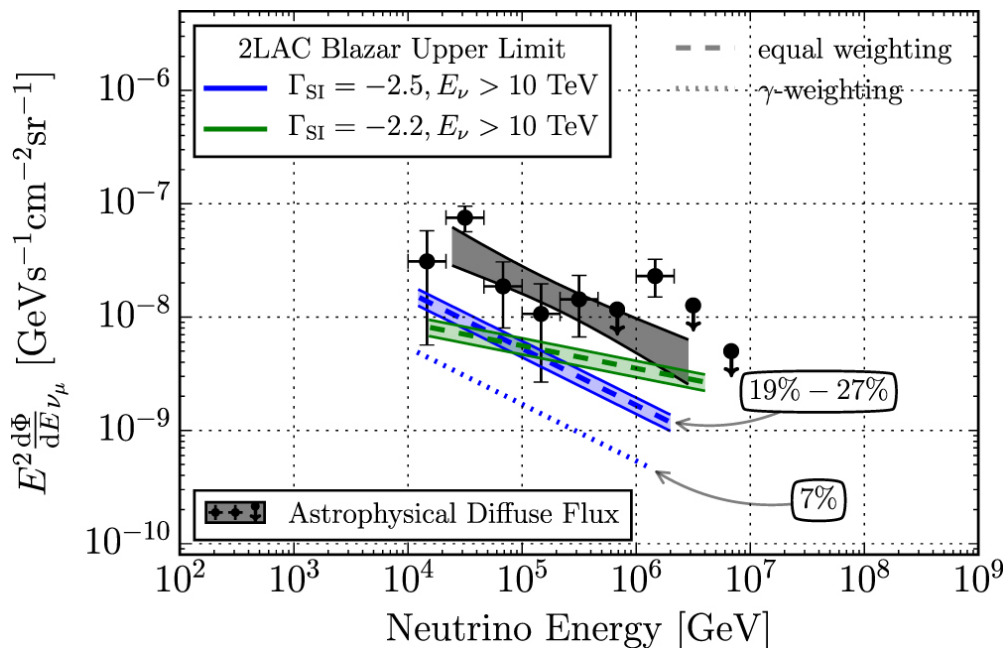


図 2.7 全 2LAC ブレーザーにおける 90% 信頼度 (C.L.) のニュートリノフラックスの上限を、観測された宇宙拡散ニュートリノフラックスと比較したもの [4]. スペクトル指数が-2.5 (青色) に基づくべき則で、等重み付けおよびガンマ線重み付けの双方を用いたフラックス上限が示されている。スペクトル指数が-2.2 のより硬いスペクトルを持つフラックスに対する均等加重上限 (緑色) も示されている。

図 2.7 は 2LAC (カタログ) 内のすべてのブレーザーがニュートリノを放出していると仮定した場合の推定されるニュートリノフラックスの上限値であり、これは 90% の信頼性を持つ (90% の確率でそのニュートリノのフラックスは上限値より低い値を示す)。ガンマ線とニュートリノの明るさが比例していると仮定して、ガンマ線の明るさによる重み付けを用いて推定したニュートリノのフラックスは IceCube で発見されているすべての拡散ニュートリノのフラックスと比較しても 19% から 27% にしかない。また、ガンマ線による重み付けで推定したニュートリノのフラックスの上限は IceCube で発見されているすべての拡散ニュートリノのフラックスと比較しても 7% にしかない。

このような解析はいくつかあり、2020 年以降一般的な合意は、ブレーザーは主要なニュートリノの放出源ではないということである。

さらに、2022 年に IceCube で近傍のセイファート銀河のスターバースト活動の NGC 1068 (ブレーザーとは異なる) ニュートリノとの相関のある天体として発表されている。NGC 1068 はガンマ線の GeV 領域では明るい TeV 領域では明るくない天体であったため、既知の TeV ガンマ線源以外の天体をニュートリノ源の候補として視野に入れていく必要性を示唆している。

このように、既知の TeV ガンマ線源や、ブレーザーに限定せず、他に可能性のあるニュー

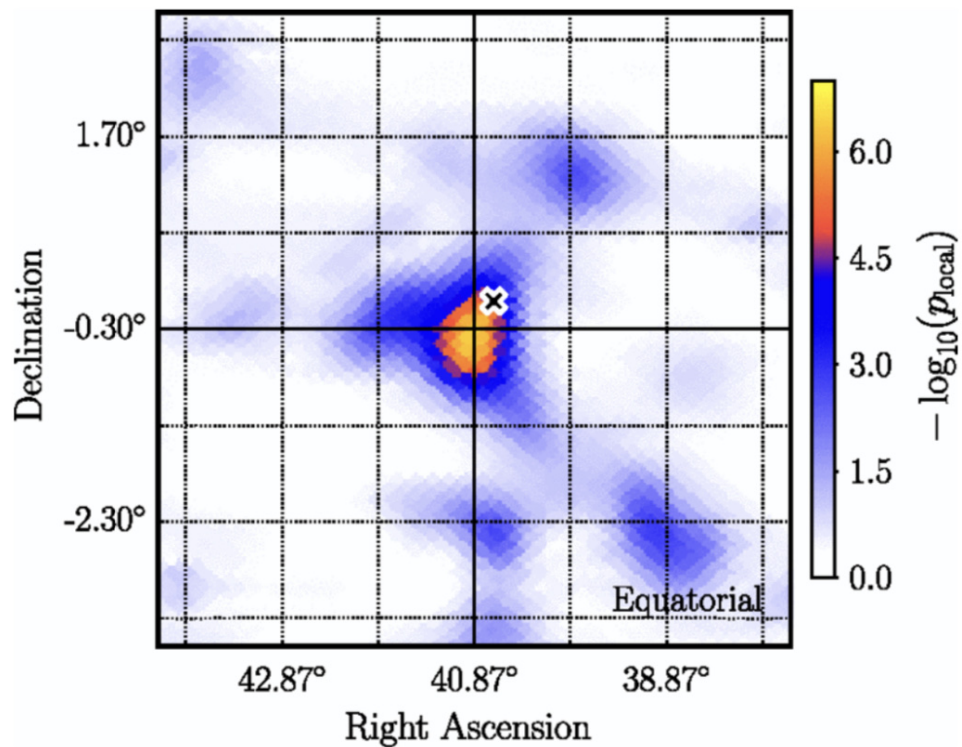


図 2.8 黒いクロスマークで NGC 1068 の方向が示されており、ニュートリノの到来方向における尤度値の負の対数 ($-\log$) が図中の色で示されている。[5].

トリノ源を特定する必要性が生じた。これを受けて、チェレンコフ望遠鏡を用いたニュートリノの観測戦略の改善が LST によって始められ、IceCube が主導する形に変わりつつ共同研究が進められている。

本研究の目的はこの観測戦略の改善の一つであるチャンネル 2 のニュートリノ事象に対応する既知ガンマ線天体のリストの作成であり、次章以降でその詳細について説明していく。

第 3 章

ガンマ線源リストの改善

3.1 チャンネル 2 のガンマ線フォローアップ用リスト

チャンネル 2 はガンマ線フォローアップ (GFU) プログラムと呼ばれ、2012 年から MAGIC と VERITAS と共同で、2015 年から HESS が加わり開始された最も古いプログラムである。マルチプレットのニュートリノイベントの追尾観測のために本研究で作成されたガンマ線天体のリストは 50 MeV-1 TeV のエネルギー領域でフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡の大面积望遠鏡 (Fermi-Lat) によって観測された 6659 個のガンマ線天体のリストからなる 4 FGL [8] と、TeV 以上の領域で観測された 294 個 (2024 年 2/14 時点) ガンマ線天体のリストからなる TeVCat [9] より構成される。

本章ではこれらのカタログからガンマ線源を選定する上での改良戦略及び、改良の具体的な方法について説明する。

3.1.1 4FGL の改変戦略

これまでチャンネル 2 により特定されたニュートリノ源はなく、改善が必要である。

以前までは、20MeV から 300 GeV のエネルギー領域で 2008 年に Fermi-Lat が稼働し始めてから最初の 48 ヶ月間のガンマ線源観測のデータを元に作られたカタログである 3FGL が用いられていたが、本研究ではこれの代わりに、50 MeV から 100 GeV のエネルギー領域の最新 12 年分のガンマ線源カタログである 4FGL-DR3 を用いた。

以前までの 3FGL のガンマ線源の選定過程における以下の点に着目し、今回の 4FGL のリストを改変していく。

3FGL のガンマ線源の選定過程において、赤方偏移の情報がない天体を除外し、赤方偏移のわかっている銀河系外の天体のうち赤方偏移が 1 よりも大きいものを除外していた。結果としてチャンネル 1 のアラートにより追尾観測された TXS 0506+056 の赤方偏移は当時わかって

いなかったためリストに含まれているべきだったのにも関わらず含まれていなかった。

これを踏まえて、今回は 4FGL カタログのうち、赤方偏移の情報がないような天体も本研究で定めた基準である、銀河系外の天体は 0.3、銀河系の天体は 0 と仮定した。この仮定の方法を 3.4.1 で説明する。

3FGL, 4FGL は主に GeV のエネルギー帯域で検出されたガンマ線源のリストであるため、TeV のエネルギー帯域でのガンマ線のフラックスを考慮し、CTA におけるガンマ線源の検出可能性を適切に評価し、リストに入れる天体を選ばなければいけない。その際に PowerLaw モデル、Logparabola モデル、PLCutoff モデルという 3 つのスペクトルモデルのうち天体に適したものがあるが、全ての銀河系外天体に対して、PowerLaw モデルが適用され、フレアの高エネルギー状態を模してフラックスをエネルギー範囲 100GeV に外挿して 10 倍された。しかし、EBL 減衰は外挿に考慮されてないため、10 倍の意味がそれぞれの放出源で異なるという状況になっていた。それを踏まえて、今回の 4FGL のガンマ線源の選定過程においては、天体毎に適したスペクトルモデルを使用し、元々分かっている赤方偏移の値と仮定した赤方偏移の値を EBL 減衰モデルに代入しそれらを掛け合わせることで天体のフラックスを計算した。銀河系外天体においてはフレアの高エネルギー状態を模して 10 倍し、銀河系天体においてはフレアを起こさないためフラックスの値をそのままにした。EBL を考慮したことで、10 倍の意味が放射源に依らず統一された。また、以前までは時間変動のない天体を 3FGL から除いていた。

これは、以前まで時間変動のあるブレーザーがニュートリノの主な放出源だとされてきた事により時間変動のある天体だけを見ていくという理由の元に行われたカットであるが、2020 年に入って一般的な合意は、時間変動のあるブレーザーは主要なニュートリノの放出源ではないということであるとういことを踏まえて時間変動のない天体もリストに残した。

3.1.2 TeVCat の改変戦略

以前までチャンネル 2 に用いる天体リストの TeV ガンマ源が選定された方法は体系的に欠け、実際、銀河系天体の Galactic Centre や Crab Nebula などが追加されたが、現時点でこれらの天体がどのような意図で選ばれたかのかがはっきりしなかった。

今回のリスト作成では、2012 年当時と比較して TeV ガンマ線源の数が増加していることを踏まえ、2024 年 2 月 16 日時点で 292 個の天体が収録されている TeVCat カタログを使用し、より体系的に TeV ガンマ線源を選定する。

ただし、TeVCat はオンラインカタログで不定期にアップデートされるカタログであるため、天体数に対応する日時を記した。

3.2 4FGL 改変の手順

4.1 では 4FGL の天体を選定するために行なった具体的なプロセスについて説明する。

3.2.1 赤方偏移の仮定

宇宙背景光は銀河系外に由来するすべての光を合わせたものであり、星やガスの放射に由来する可視光から赤外線にかけてのピークを持ち、銀河系外、特に遠方のガンマ線源の超高エネルギーガンマ線は宇宙背景光 (Extra-galactic Background Light; EBL) によって吸収される。超高エネルギーガンマ線がこれと衝突すると電子陽電子対生成を起こして吸収される。図 3.1 によってガンマ線エネルギー E_γ に対するガンマ線の減衰が赤方偏移 $z = 0.03, 0.1, 0.25, 0.5, 1$ の天体について示されている。また、図 3.2 によって Powerlaw モデルと EBL モデル (dominguez 2007) を使用して計算された EBL によって減衰した赤方偏移 $z = 0.1$ から $z = 1.0$ におけるガンマ線源のフラックスが示されている。

4FGL リストには赤方偏移が不明なガンマ線源が多く含まれている。ガンマ線のフラックスが EBL によって減衰することを考慮してフラックスを計算するためには赤方偏移の情報が必要である。しかし、4FGL には赤方偏移の情報がない天体が含まれる。以前のリスト作成においてこれらの天体が除かれたことにより、TXS 0506+056 が除かれたこと等を踏まえ、赤方偏移の情報がない天体の赤方偏移の値を仮定し、それらの赤方偏移の値において、EBL 減衰の考慮されたガンマ線源のフラックスと MAGIC の望遠鏡の感度の比率（これを Ratio とする。Ratio=MAGIC の望遠鏡の感度/ガンマ線源のフラックス）を MAGIC の望遠鏡のエネルギーである約 80 GeV~2 TeV

において計算した。更にその比率の最小値と最小値を取るエネルギーの値も求めた。これによって、ガンマ線源のフラックスが MAGIC の望遠鏡で観測可能になるためには、どのエネルギー領域で何倍される必要があるのかを評価することができる。

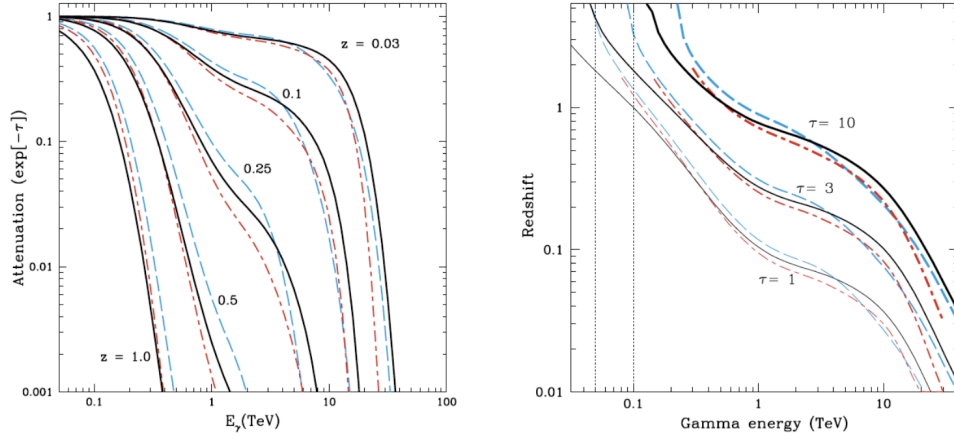


図 3.1 ガンマ線エネルギー E_γ に対するガンマ線の減衰を、赤方偏移 $z = 0.03, 0.1, 0.25, 0.5, 1$ の天体について示す。赤の長短破線は観測された EBL のデータ、黒の実線は WMAP5 の Fiducial モデル、青の破線は WMAP5 SAM モデルを示している。低赤方偏移領域（1–10 TeV）での減衰割合が穏やかになっているのは、EBL スペクトルの中赤外成分の影響を反映している。（右図）は同じモデルに基づくガンマ線のペア生成減衰エッジを示す。ペア生成減衰エッジとは、高エネルギーガンマ線が EBL によって電子・陽電子対を生成し、急激に減衰するエネルギー領域を指す。曲線は、観測されたガンマ線エネルギーの関数として、光学的深さ τ が 1, 3, 10 に達する赤方偏移を表す。光学的深さ τ とは、光（ガンマ線）が EBL との相互作用によってどの程度減衰するかを示す指標であり、 $\tau = 1$ で約 63%、 $\tau = 3$ で約 95% の減衰が発生する [6]。

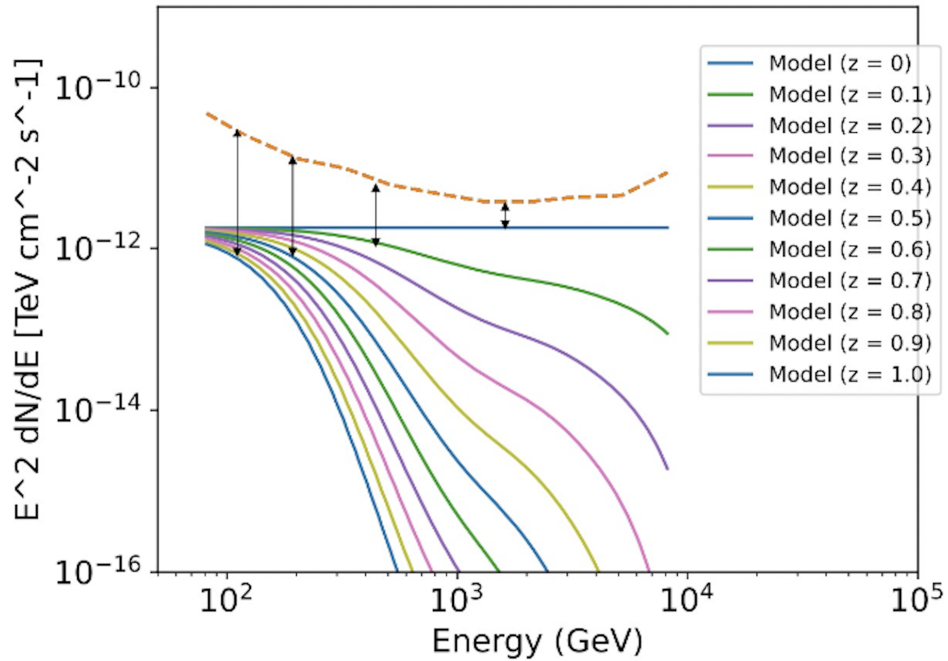


図 3.2 MAGIC の 5 時間観測におけるガンマ線に対する感度曲線とガンマ線源の赤方偏移の値に対するフラックスの曲線。MAGIC の感度曲線がオレンジで、各赤方偏移におけるフラックスはプロットに示されている色で識別される。黒色の矢印はガンマ線のフラックスと MAGIC の感度曲線の最小距離。

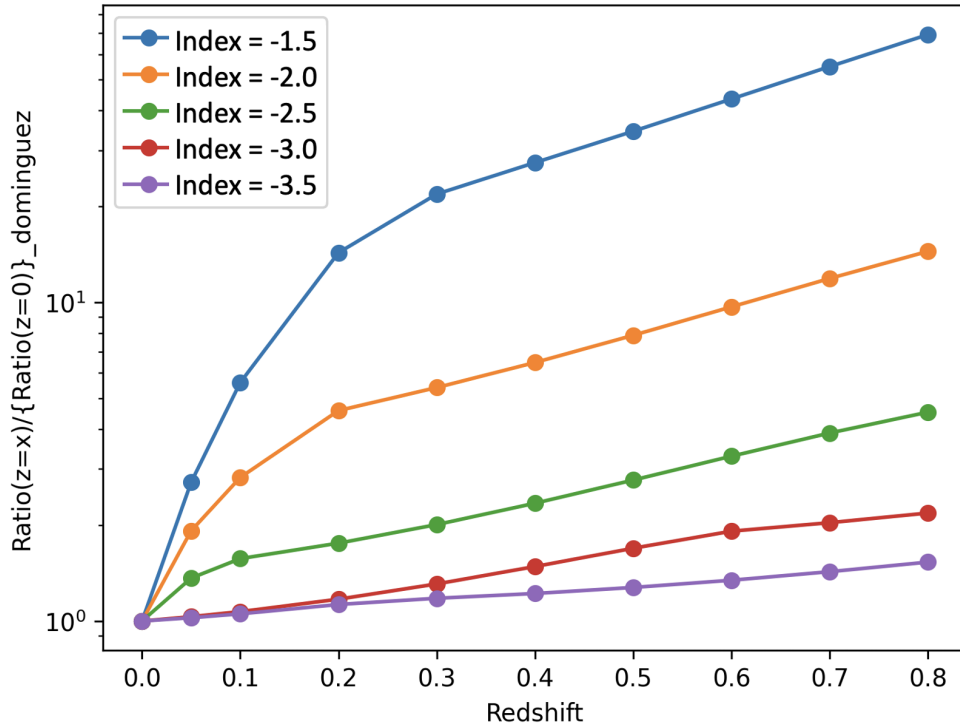


図 3.3 各赤方偏移における MAGIC 望遠鏡の感度とガンマ線源のフラックスの比率の最小値。ガンマ線源のフラックスが計算される際の index はプロットのラベルを参照。

スペクトルモデルとしてパワーロー (PowerLawSpectralModel) モデルを用い、dominguez 2011 の EBL モデルと統合することで EBL 減衰の考慮されたフラックスを計算した [6]。

それぞれの赤方偏移において Ratio の最小値を求めた。

図 3.3 ではそれぞれの赤方偏移における ratio の最小値を $z = 0$ の時の ratio で規格化した値が y 軸に、x 軸は赤方偏移の値が示されている。

index = -1.5 (青)、-2.0 (オレンジ)、-2.5 (赤)、-3.0 (緑)、-3.5 (紫) のものが示されている。ガンマ線フラックスの指数は、ガンマ線源の物理特性を反映するパラメータである。一般的な粒子加速モデルでは、ガンマ線フラックスの指数は -2.0 であるとされるが、本研究ではこれを基準とし、より硬い指数 (-1.5) およびより軟らかい指数 (-3.5) と比較した。

これによって赤方偏移が 0 の時と比べて、それぞれの赤方偏移の値でガンマ線のフラックスがフレア時に何倍されると MAGIC の望遠鏡において観測可能になるのかがわかる。

フラックスが硬い場合において特に、赤方偏移が 0.2 までは ratio は急激に増加し、0.3 で増加が緩やかになっていることがわかる。つまり赤方偏移の値が 0.2 ~ 0.3 までの範囲は、ガンマ線源の MAGIC の望遠鏡における観測可能性が急激に変化する領域だと言える。

これは仮にフラックスが硬い場合でも、観測可能でないガンマ線源をリストに入れすぎることとを避けるためには仮定する赤方偏移を 0.2 以上にする必要がある。

また同様にフラックスが硬い場合に、赤方偏移が 0.2 以上で ratio の増加が緩やかになって

いることから赤方偏移の仮定による最終的なリストの天体数の差を小さくするために赤方偏移を 0.3 と仮定する。

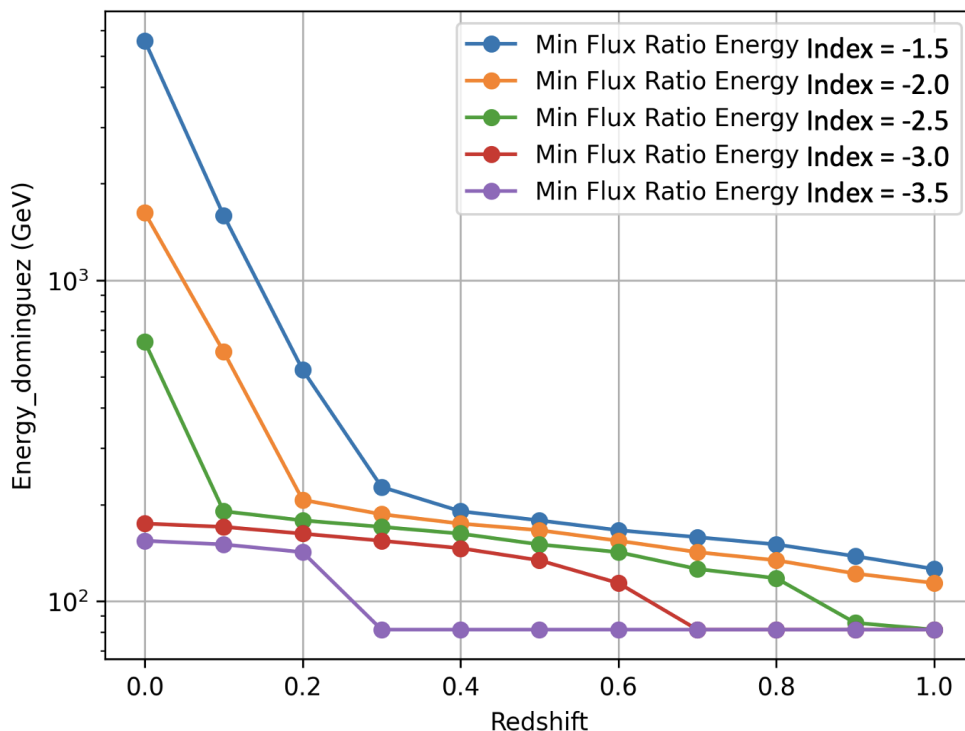


図 3.4 各赤方偏移における MAGIC 望遠鏡の感度とガンマ線源のフラックスの比率の最小値。ガンマ線源のフラックスが計算される際の index はプロットのラベルを参照。

図 3.3 より指数が軟かいほど赤方偏移の増加に伴う規格化された ratio の増加は小さくなっている事がわかる。また、図 3.4 より観測できるエネルギー帯域は 80~100GeV と MAGIC の望遠鏡の観測可能エネルギーの最小値に近づく事がわかる。これより軟かい指数においては比較的赤方偏移の大きいガンマ線源であっても低エネルギー領域で観測することが可能になる。つまり柔らかい指数のフラックスを持つ天体は赤方偏移の大きい天体であっても MAGIC 望遠鏡のエネルギー閾値以下でも観測が可能であり CTA (Cherenkov Telescope Array) の LST 望遠鏡を用いることで観測が期待される。

次に、使用する EBL モデルによりガンマ線の減衰の割合は異なり、その差は各ガンマ線源の観測可能性に影響を及ぼす。本研究では、Dominguez モデルおよび Finke モデルを使用し、それぞれの影響を評価した。

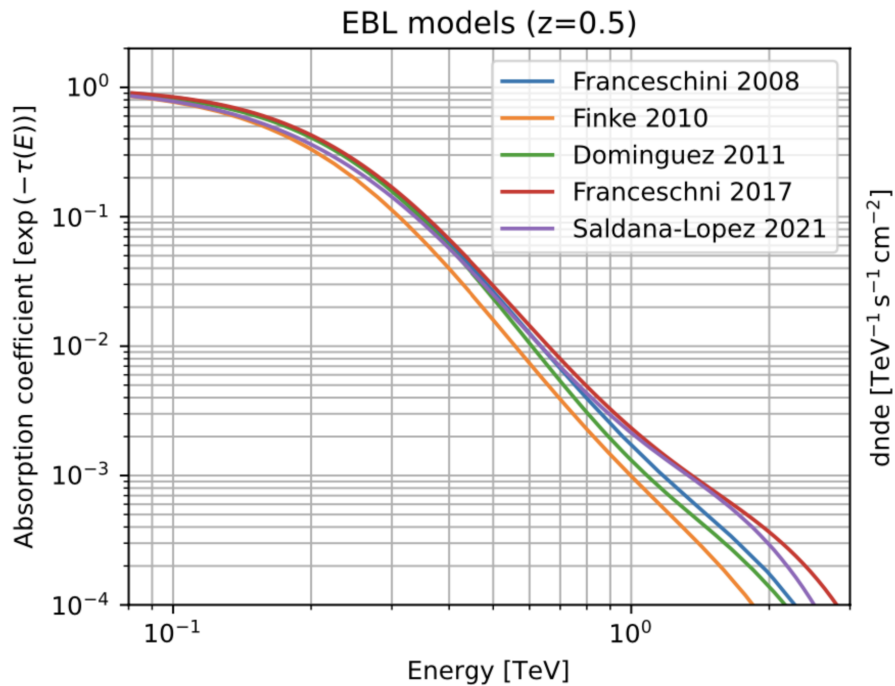


図 3.5 赤方偏移が 0.5 における EBL モデルが適用されたパワーローモデルによるガンマ線天体のフラックス。index は標準の-2.0。

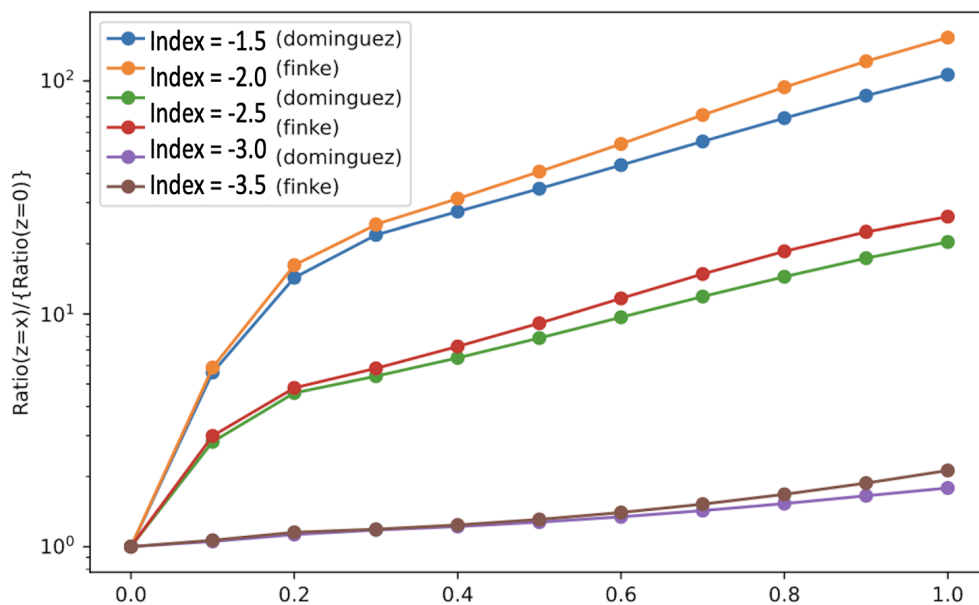


図 3.6 Dominguez モデルと Finke モデルにおける ratio。横軸は赤方偏移。全ての ratio は $z = 0$ の時の ratio で割られることにより規格化されている。index に対応する色はプロットのラベルを参照。

図 3.5 と図 3.6 に示すように、Finke モデルはフラックスの減少が最も大きく、Dominguez

モデルと比較して規格化された ratio はより大きな値を示す。これは赤方偏移を 0.3 に仮定することはより保守的な仮定である事を示す。

3.2.2 flux の計算方法

4FGL にはガンマ線源ごとに最も適したスペクトルモデルの情報がある。モデルは Powerlaw モデル、Logparabola モデル、PLCutoff モデルの 3 つになり、どのモデルが適しているかは 100GeV までのガンマ線の観測データに基づいて決まる。これらを用いて 100GeV 以上のガンマ線源のスペクトラルを推定することで 100GeV 以上におけるチェレンコフ望遠鏡の感度曲線との比較をする必要がある。特に PowerLaw モデルが最適ではないスペクトルを PowerLaw モデルで外挿するとフラックスを多めに見積もってしまうことになるため PowerLaw モデルとそれ以外のモデルを使い分けることは天体のフラックスを 100GeV 以上において見積もる上で重要である。一方、図 3.7 より、ある天体にパワーローカットオフモデルかログパラボラモデルが適しているかは数 GeV の領域で決まるが、今回は数 100 GeV に外挿していて、その領域では急激にフラックスが落ちているため、どちらにせよ望遠鏡の感度には関係がなく、これらのモデルを使い分けることによる結果の差は見られなかった。よって簡単のため Logparabola モデル、PLCutoff モデルと記載のある天体にはどちらも Logparabola モデルを適用した。

パワーローモデル

$$\phi(E) = \phi_0 \cdot \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\Gamma} \quad (3.1)$$

ログパラボラモデル

$$\phi(E) = \phi_0 \cdot \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha - \beta \log\left(\frac{E}{E_0}\right)} \quad (3.2)$$

powerlaw model のフラックスの計算に必要な変数は Γ (index), ϕ_0 (amplitude), E_0 (reference) であり、Logpara model にフラックスの計算に必要な変数は α (alpha), β (beta), ϕ_0 (amplitude), E_0 (reference) であるため、各天体に対応するこれらの変数を 4FGL から取りそれらに対応するモデルに代入した。

次に、EBL によるフラックスの減衰も考慮するため、スペクトルモデルに EBL モデルを掛け合わせてフラックスを計算した。

EBL モデルの比較のために、一般的なものとしてここでは Franceschini 2008、Finke 2010、Dominguez 2011、Franceschini 2017 の 4 つを選び、また最新のものとして、Saldana-Lopez

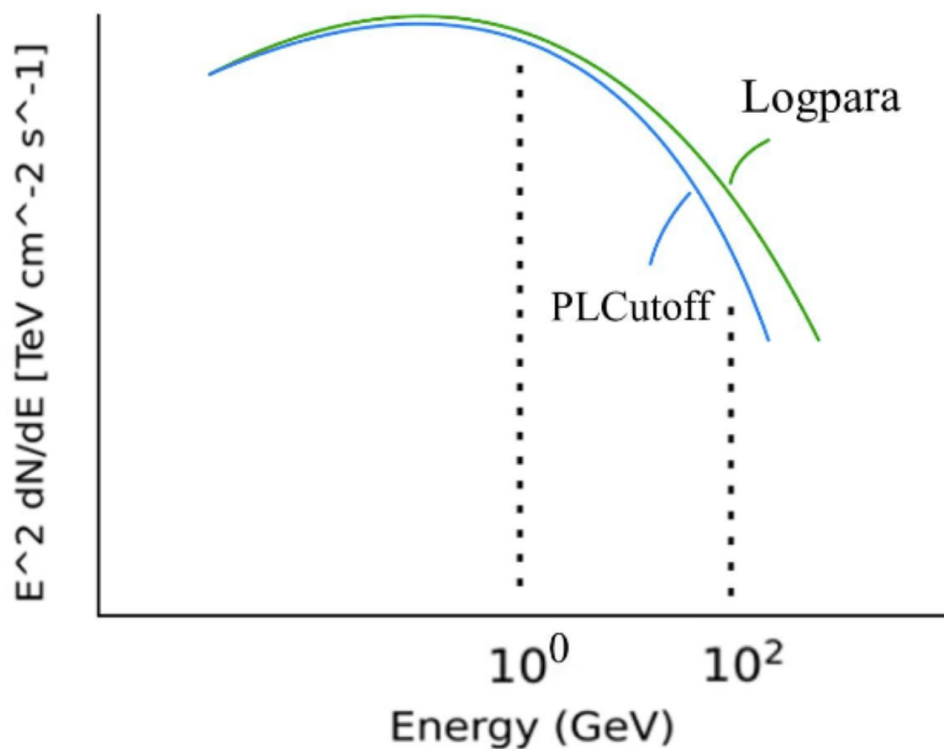


図 3.7 パワーローカットオフモデル (PLCutoff) とログパラボラモデル (Logpara) の比較。ログパラボラモデルは緑色、パワーローカットオフモデルは橙色でしめした。

2021 を追加した。これらの減衰の値を図 3.5 に示す。

今回は CTA のチェレンコフ望遠鏡の感度 [10] と比較をする上で最も保守的にガンマ線源の観測可能性を評価するために、最も EBL 減衰の割合の大きい Finke 2010 を使った。

EBL model にフラックスの計算に必要な変数は z (赤方偏移) であるため、各天体に対応するこの変数を 4FGL から取り代入した。

$$-EBL \Rightarrow \exp(-\tau(E, z)) \quad (3.3)$$

赤方偏移に関してはガンマ線源に対応する赤方偏移の値が与えられていればそれを使い、与えられていなければ前述の通り銀河系外天体に対しては 0.3、銀河系天体に対しては 0 と仮定した。

3.2.3 フレアによるカット

4FGL のガンマ線源のフラックスが計算され、これを用いてリストに残す天体と除く天体を分類する必要がある。以下がその方法である。

銀河系天体に対しては、計算したガンマ線源のフラックスと LST の観測時間 2.5 時間にお

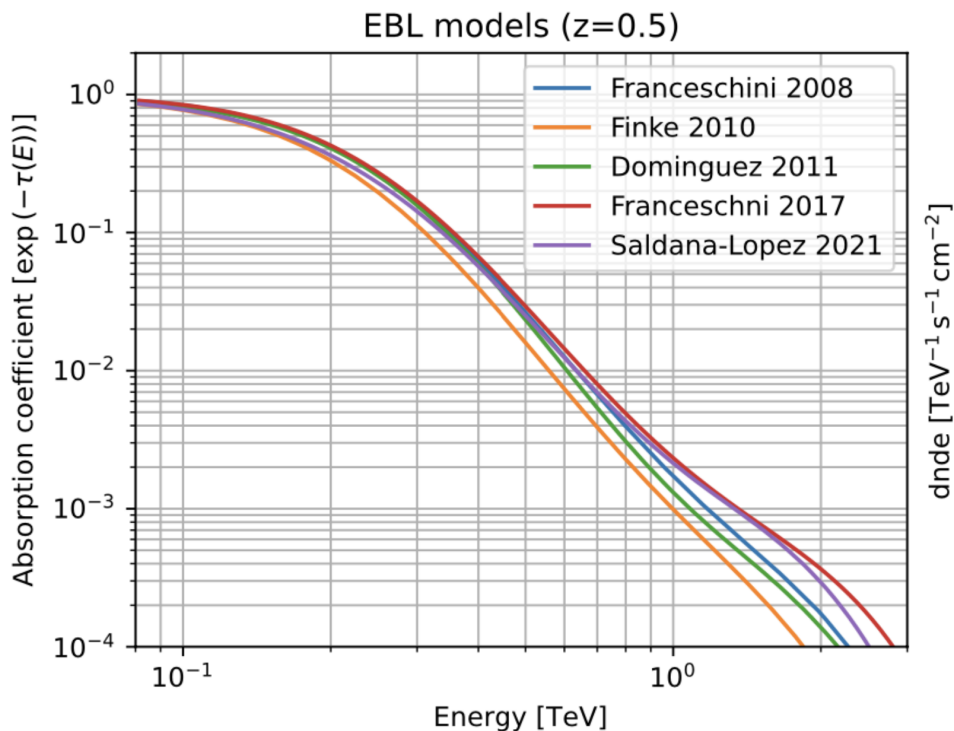


図 3.8 異なる EBL モデルの比較

ける感度曲線を比較し、ガンマ線源のフラックスがチェレンコフ望遠鏡の感度曲線に届かない天体を除いた。

銀河系外の天体に対しては、計算したガンマ線源のフラックスを 10 倍し、CTA の観測時間 2.5 時間におけるチェレンコフ望遠鏡の感度曲線を比較し、10 倍されたガンマ線源のフラックスがチェレンコフ望遠鏡の感度曲線に届かない天体を除いた。

結果として 4FGL の天体 4505 個中 4313 個の天体が除かれ、192 個の天体選ばれた。

図 3.9 では 4504 個の 4FGL 天体のうち CTA の感度曲線を上回るフラックスが青で、下回るものが赤で示されている。

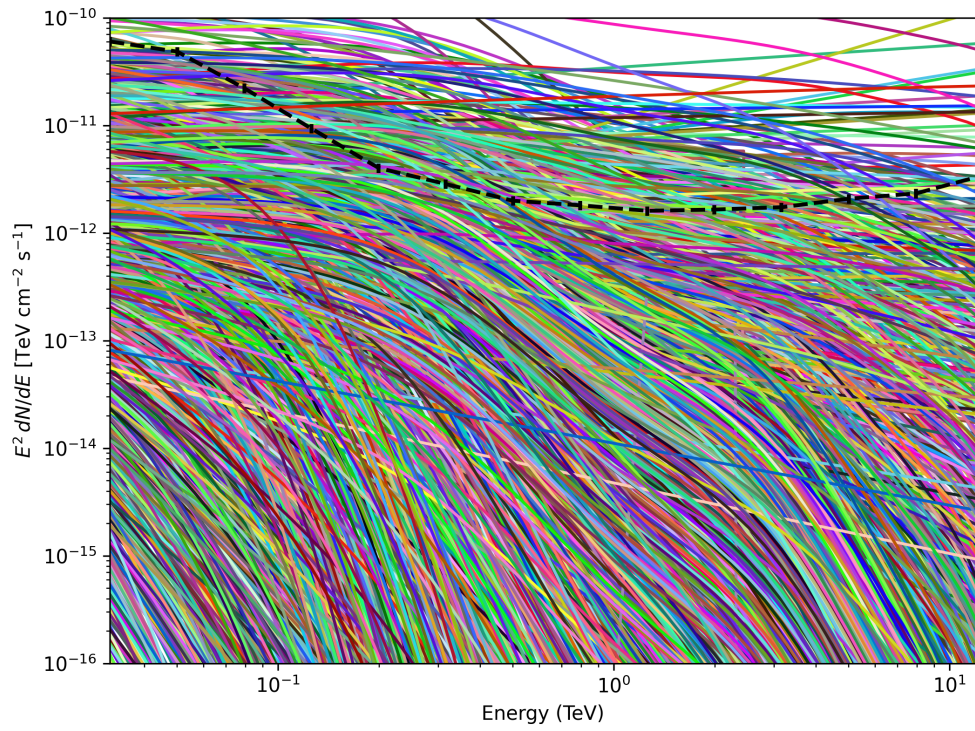


図 3.9 無作為に割り当てられた色で示されている 4FGL の 4505 天体のフラックスと 2.5 時間観測における CTA の感度曲線（黒の波線）。

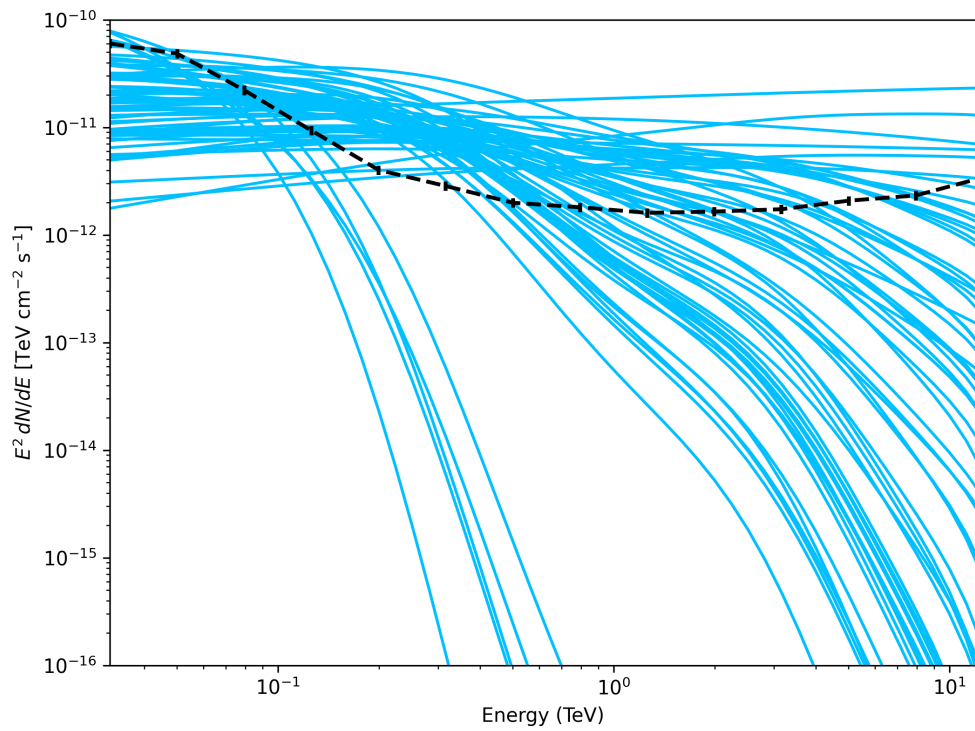


図 3.10 4FGL の 69 天体のガンマ線フラックス

3.3 TeVCat 改変の手順

3.3.1 GRB の除外

ガンマ線バースト (GRB) は、宇宙で最も明るい爆発現象の一つであり、急速に回転する大質量星の崩壊や中性子星の合体によって発生する。このようなイベントは、相対論的ジェットを放出し、光子と粒子の相互作用を通じて高エネルギーニュートリノを生成する可能性があります。

GRB は、内部衝撃波や磁場の再結合による粒子加速を介して、非熱的プロトンを加速する。これらのプロトンは、ジェット内の高エネルギー光子と相互作用してパイ中間子を生成する。生成されたパイ中間子は崩壊し、ニュートリノを放出する。この過程は、以下のように表される。生成されたパイ中間子は崩壊してニュートリノを放出する。これにより、GRB は高エネルギーニュートリノの重要な生成源と考えられている。

一方で GRB は典型的に数秒から数十秒の非常に短い時間スケールでガンマ線を放出する。長い GRB は平均約 10 秒、短い GRB は約 0.3 秒の持続時間を持つとされている。

さらに、GRB は繰り返し放射を行うことがない。この特性と現象の持続時間の短さにより、ニュートリノアラートが送信された時点で、すでに GRB 現象が終了しているため、ガンマ線の追尾観測には不適である。

よって、本研究の追尾観測用のガンマ線源のリスト (TeVCat 部) からは GRB7 天体を除いた。

3.3.2 リスト内の隣接天体の処理

IceCube から CTA に送られるアラートは、IceCube が観測したニュートリノイベントと作成されたリストにあるガンマ線源の位置的な相関をとり、その有意性を評価することで送られる。その都合上、同じ方向に複数のガンマ線源をリストに含むことは、一つのニュートリノイベントに対して対応するガンマ線源の複数のアラートが IceCube から送られることになる。ニュートリノ源を特定する上でこれによって考えられる利点はないため、リストの天体内で式 3.3.2 を用いて分離角を計算し、分離角の上限角度を適宜設定し、その上限角度以内に位置する天体の重なりをなくす必要がある。

$$\Delta\theta = \arccos(\sin(\text{Dec}_1)\sin(\text{Dec}_2) + \cos(\text{Dec}_1)\cos(\text{Dec}_2)\cos(\text{RA}_1 - \text{RA}_2)) \quad (3.4)$$

ここで：

- RA_1, RA_2 : 天体 1 と天体 2 の赤経 (度単位)

- $\text{Dec}_1, \text{Dec}_2$: 天体 1 と天体 2 の赤緯（度単位）
- $\Delta\theta$: 2 天体間の角距離（度単位）

3.3.3 4FGL と TeVCat の天体の重なる処理

最終的に使われる天体のリストは 4FGL と TeVCat のうち選ばれた天体を合わせたものになる想定で本研究は進められたため、4FGL と TeVCat 間の天体の重複を避ける必要がある。それを踏まえ、4FGL には Assoc_1 カラムには天体の天体名が書いてあるためこれを参照し、TeVCat の天体の名前と一致するものを 76 個 4FGL から除き、4FGL の天体数が 192 から 116 になった。同じ天体であっても、4FGL と TeVCat で登録名が異なる場合がある。そのような場合、その天体が 4FGL に含まれているかどうかを確認するには、4FGL 内の f_TeVCat というカラムを参照すればよい。このカラムには、対応する TeVCat の天体情報が記載されており、天体名の違いに関わらず両者の対応関係を把握できる。それを踏まえ 4FGL 内の f_TeVCat のフラグが立っている天体を TeVCat との同一置天体とみなし、4FGL から除いたことによって 4FGL の天体数は 75 個になった。

また、3.3.2 で述べた理由より 4FGL と TeVCat 内において、異なる天体同士であるが、計算された 2 天体間の分離角が一定の角度以内に位置する天体の重なりを避ける必要があるため、4FGL と TeVCat の天体間の分離角を 3.3.2 を用いて計算し、3.1 によって示されている分離角が 0.5 度以内に位置する天体のペアのうち 6 天体が 4FGL から除かれ 69 天体になった。

表 3.1 4FGL と TeVCat の天体間の分離角が 0.5 度以内のペア

4FGL	TeVCat	2 天体間の分離角
J0912.9-2102	MRC 0910-208	0.024667726350123962
J1623.0-5004	Cloud 877	0.2578615461715148
J1709.7-4429	PSR B1706-44	0.0016457475505268944
J1958.3-3010	1RXS J195815.6-301119	0.017451435747546207
J2021.1+3651	VER J2019+368	0.34450344776782105
J2042.1+2427	RGB J2042+244	0.014314151051336215

3.3.4 TeVCat 内の隣接天体

3.3.2 で述べた理由により、TeVCat 内での隣接天体の重なりを除く必要がある。ここで、4FGL に残った 192 天体の位置エラーの大きさは計算した 2 点間の分離角である 1.5 度に比

べて無視できる程度の大きさであるため、2 天体のうち位置エラーを考慮せずに天体が選ばれた。一方で、TeVCat によって観測される天体の位置エラーの大きさは計算した 2 点間の分離角の 1.5 度に比べて無視できない大きさであり考慮する必要がある。そのため間の角度である 3.3.2 が 1.5 度以内に近い天体のペアをリストアップし、そのうちガンマ線観測においてより見える可能性の低いものを、その天体の種類、位置エラーを考慮することによって経験的に選りリストから除いた。2 天体の全ての組み合わせにおける分離角を以下の式を用いて計算し、それが 1.5 度以内のペアを抽出した。

$$\Delta\theta \leq 1.5 \text{ (deg)} \quad (4.2)$$

次に、位置エラーを TeVCat カタログの天体の情報のうち、測定値のばらつきに起因する誤差である統計誤差、測定手法や観測装置、理論モデルの不完全さから生じる誤差である系統誤差を用いて計算した。

赤緯における `stat_error` (統計誤差) と `sys_errorsys_error` (`sys_error`) より `ra_positional error` (赤経における位置エラー) が (4.3) 式を用いて計算される。同様に、赤緯における `stat_error` (統計誤差) と `sys_errorsys_error` (`sys_error`) より `dec_positional error` (赤緯における位置エラー) が (4.4) 式を用いて計算される。`ra_positional error`, `dec_positional error` をそれぞれ位置エラーの楕円における長軸、短軸として位置エラーの楕円を定義した。

$$\text{positional_error}_{\text{ra}} = \sqrt{(\text{ra_stat_error})^2 + (\text{ra_sys_error})^2} \quad (4.3)$$

$$\text{positional_error}_{\text{dec}} = \sqrt{(\text{dec_stat_error})^2 + (\text{dec_sys_error})^2} \quad (4.4)$$

1.5 度以内に近い天体のペアの位置エラーを比較し、その位置エラーの大きい方の天体を 73 天体リストから除き 212 天体が残った。

3.3.5 TeVCat 内の銀河系の近傍天体

その後もまだ銀河面において密集している天体が目立ったため、さらに 1.5 度以内に近い天体のペアをリストアップし、そのうちガンマ線観測においてより見える可能性に低いものを、同様に 4.3、4.4 によって一エラーを計算し、その値の大きい天体をリストから除いた。また、TeVCat には、観測画像やデータで、単一の点 (点源) として認識されるのではなく、一定の空間的広がりを持つ天体か否かが、その天体の広がりの度合いを示す度数である `Extention` として与えられている。これは検出器の検出制度によるものであり、その値が与えられている天体に関しては、1.5 度以内のペアのうち天体毎の `Extention` が小さい方をリストに残した。

最終的にこのプロセスで 30 個の天体が除かれて 180 個の天体が TeVCat に残った。

以下に具体的な例を示す。

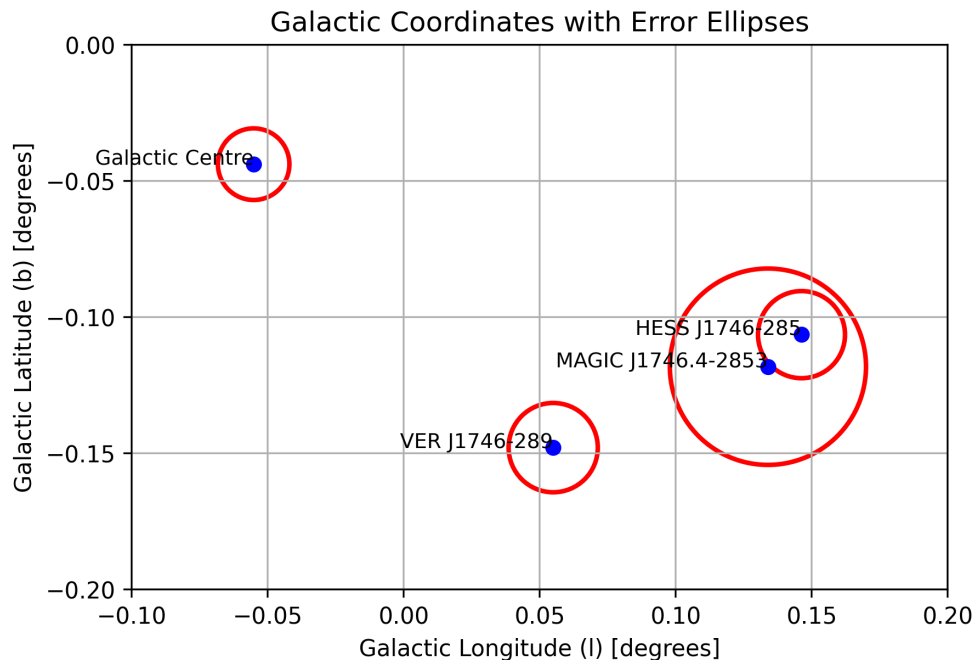


図 3.11 HESS J1746+285, MAGIC J1746-2853, VER J1746+289, Galactic Centre の位置エラーの範囲が赤色の楕円で示されている。天体の座標が青の点で示されている。

MAGIC J1746.4-2853 は HESS J1746-285 と 0.0073 度の分離角を持つ距離に位置していた。図 3.11 からわかるように、MAGIC J1746.4-2853 の位置エラーは HESS J1746-285 と比較して大きいため、HESS J1746-285 をリストに残した。VER J1746-289 は Galactic Centre と 0.151 度の分離角を持つ距離に位置していた。図 3.11 からわかるように VER J1746-289 の位置エラーは Galactic Centre と比較して大きいため、Galactic Centre をリストに残した。このようにして最終的に Galactic Centre がリストに残った。

LHASSO J2032+4102 は TeV J2032+4127 と 0.54 度の分離角を持ち距離に位置し、PSR J2032+4127 と 0.409 度の分離角を持つ距離に位置していた。図 3.12 からわかるように TeV J2032+4127 と PSR J2032+4127 のどちらと比較しても大きな広がりを持つ位置エラーを持つことによって、LHASSO J2032+4102 を除いた。次に、TeV J2032+4127 は PSR J2032+4127 と 0.164 度の分離角を持ち距離に位置していた。図 3.13 からわかるように、PSR J2032+4127 よりも大きな位置エラーを持つ TeV J2032+4127 を除いた。

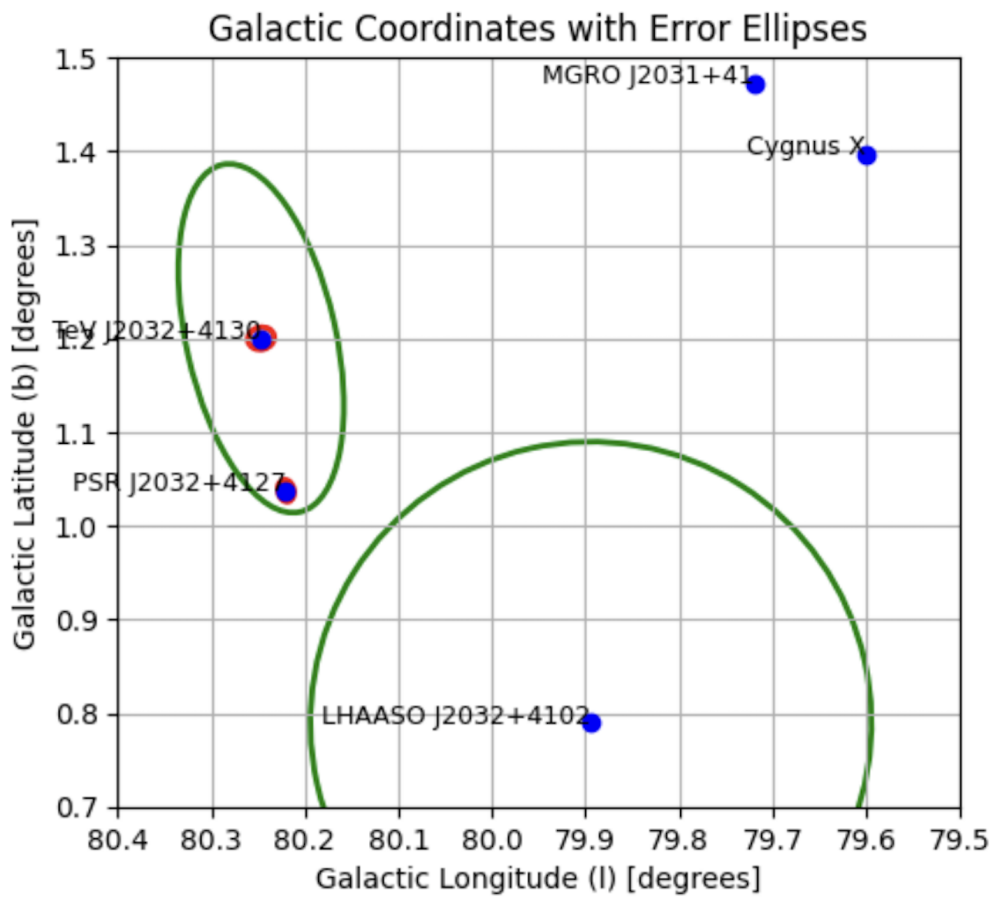


図 3.12 TeV J2032+4130, PSR J2032+4127, CygnusX, MGRO J2031+41 の位置エラーの範囲が赤色の楕円、Extension の範囲が緑色の楕円で示されている。天体の座標が青の点で示されている。

Galactic Coordinates with Error Ellipses

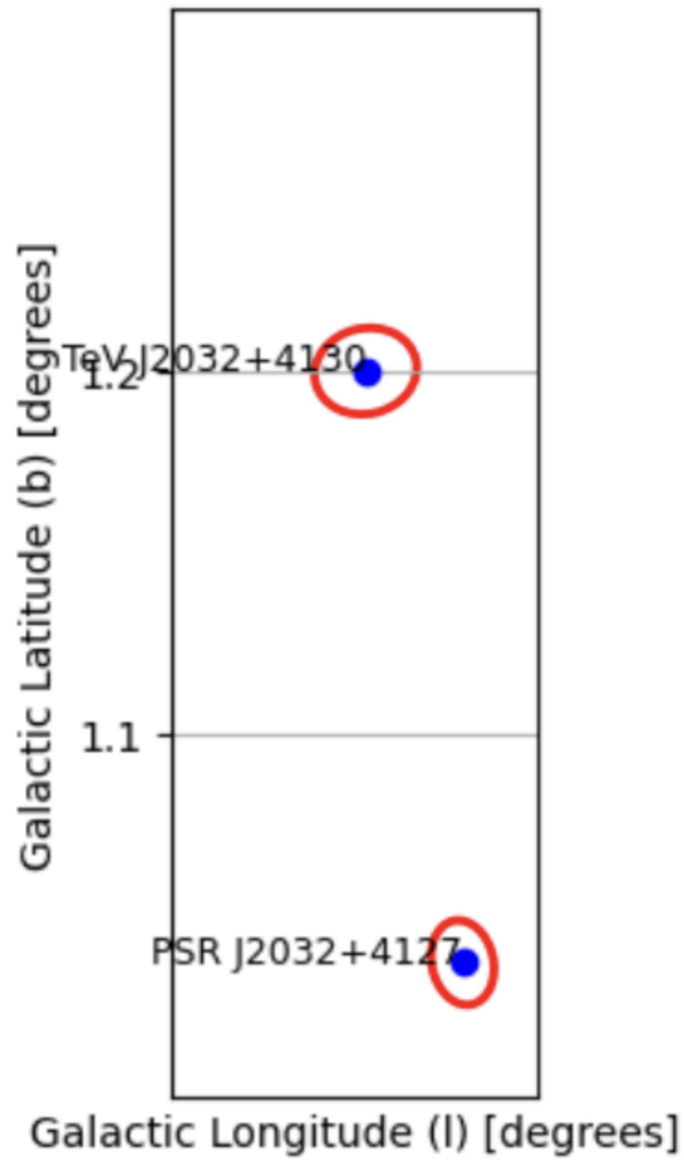


図 3.13 TeV J2032+4130, PSR J2032+4127 の位置エラーの比較。天体の座標が青の点、位置エラーの範囲が赤色の楕円で示されている。

第 4 章

過去に作られたリストとの比較

4.1 MAGIC, VERITAS, HESS のリストとの重なり

GFU プログラムはプライベートチャンネルとして運用されており、IceCube はガンマ線観測グループである MAGIC、H.E.S.S.、VERITAS それぞれと覚書の下結ばれており、それらのガンマ線観測機関に対して別々のアラートを送信していた。それぞれの観測機関における観測可能性が考慮されたガンマ線源リストがあり、それぞれの観測機関における観測可能性が考慮されたガンマ線源リストを基に、GFU プログラムによって検出されたニュートリノイベントとの位置的な相関が取られ、それが 3σ 以上である場合にアラートが送られる仕組みになっていた。図 4.1 を参照。以降、簡単のため H.E.S.S. を HESS と記す。

それに対して今後は、MAGIC, HESS, VERITAS と新たなガンマ線観測グループである CTA に対して IceCube は共有のリストを使い、GFU プログラムのニュートリノイベントとの相関が取られれば各ガンマ線観測グループにアラートを送る。また、各ガンマ線観測グループは送られてきたアラートの天体がそれらの観測地点より観測可能であれば観測を行う予定である。図 4.1 を参照。そしてこの GFU チャンネルのアラートは公開される予定である。

これからそれぞれの観測グループの持つガンマ線源リストを MAGIC リスト、H.E.S.S. リスト、VERITAS リストと本研究で作成されたガンマ線源リストと区別するために Chiba リストと名付けることにする。ただし、MAGIC リスト、VERITAS リスト、HESS リストに含まれている個別の天体の詳細は IceCube と各観測機関の間で結ばれている覚書により公開することはできない。

ここで以下に MAGIC, H.E.S.S., VERITAS についてまとめる。

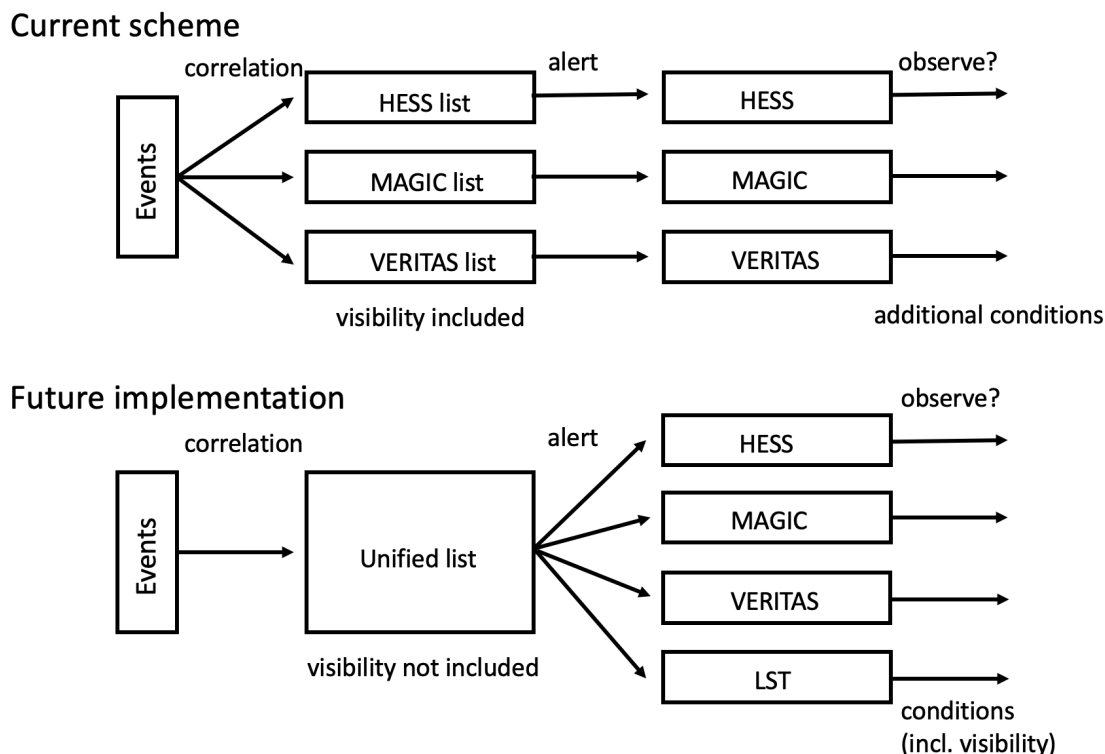


図 4.1 以前までのニュートリノイベント検出からガンマ線追尾観測までの流れと今後の計画の比較図。

4.1.1 Chiba リスト

Chiba リストは各観測地における観測可能性を評価する前の段階で、4FGL の天体 69 個、TeVCat の天体 180 個の合計 249 個からなる。以降、4.1.4 までの天体のタイプとその数をヒストグラムで示すが、それら全てのヒストグラムに示されている天体のタイプ名のうち小文字であるものは 2024 年現在の 4FGL に収録されている天体のタイプ大文字であるものは 2024 年現在の TeVCat に収録されている天体のタイプである。タイプを α に示す。ただし、表の天体タイプは一律小文字で示している。また、表 4.1 に天体のタイプとその簡易的な説明を示す。

表 4.1: 天体のタイプとその説明

天体タイプ	説明
fsrq	強い電波を放つクエーサーで、ジェットが地球方向に向いている。
hbl	bl lac 天体の一種で、x 線での放射が強い。
fsrq	fsrq と同じく、強い電波を持つクエーサーの一種。

bl	光度が変動しやすく、スペクトルに輝線がほとんどない活動銀河核。
blazar	観測者の方向にジェットを持つ活動銀河核の総称。
fri	電波銀河で、ジェットが銀河中心部近くで広がる。
bcu	ブレーザーの候補天体だが、正確な分類が不明。
the extreme blazar	非常に高エネルギーのガンマ線を放つなブレーザー。
agn	活動銀河核の一種だが、正確な分類が不明。
css	電波スペクトルが急峻なコンパクト電波源。
unid	既知の天体タイプと一致しない未確認の天体。
lbl	bl lac 天体の一種で、低エネルギー側の放射が強い。
seiyfert 1 galaxy	活発な活動銀河核を持つ銀河。
psr	高速に回転しながら電波・x 線・ガンマ線を放つ中性子星。
nlsy1	狭い輝線を持つセイファート銀河の一種。
bl lac	bl と同じで、スペクトルに輝線がほとんどない活動銀河核。
gamma-ray source	強いガンマ線を放射するが、詳細な分類が不明な天体。
bl lac (class unclear)	bl lac 天体だが、hbl や lbl の分類が不明。
ssrq	電波スペクトルが急峻なクエーサーで、電波放射が強い。
high mass x-ray binary	高質量星と中性子星またはブラックホールの連星系で、x 線を放つ。
cataclysmic binary	白色矮星と主系列星の相互作用による激変変光星系。
radio source	強い電波放射を持つ天体の総称。
sfr	星形成領域で、新しい星が誕生している領域。
blazar candidate	ブレーザー候補だが、確定的な分類がなされていない天体。
binary	2 つの恒星が重力で結びついた連星系。

その 249 個の天体のタイプのヒストグラムが図 4.2 に示されている。

支配的なタイプはブレーザーであるが、これは図を見てわかるように Chiba リストの作成に用いた 4FGL と TeVCat で支配的な天体がブレーザーであることが原因だと考えられる。

図 4.2 より Chiba リストで 3 番目に多い天体種が UNID となっているが、TeVCat においてその天体種が特定されなかった天体が UNID として分類される。

[11] より銀河系天体面からの新たな可能性のあるニュートリノ源を期待し、以前までに作成された追尾観測用のガンマ線源リストに比べ多くの銀河系天体を残したことから、銀河系天体の Shell が 5 番目、PWN が 6 番目、PSR が 8 番目に多くなっている。

これらの銀河系天体の数の調整に関する議論は後のコラボレーターと追尾観測用ガンマ線源リストの最終版を決定する段階で行なった。

天体が密集している領域、特に銀河面において可能性のある天体が混同してしまったことにより UNID とされる場合がある合と、周りに既知の天体が確認されていないことにより UNID

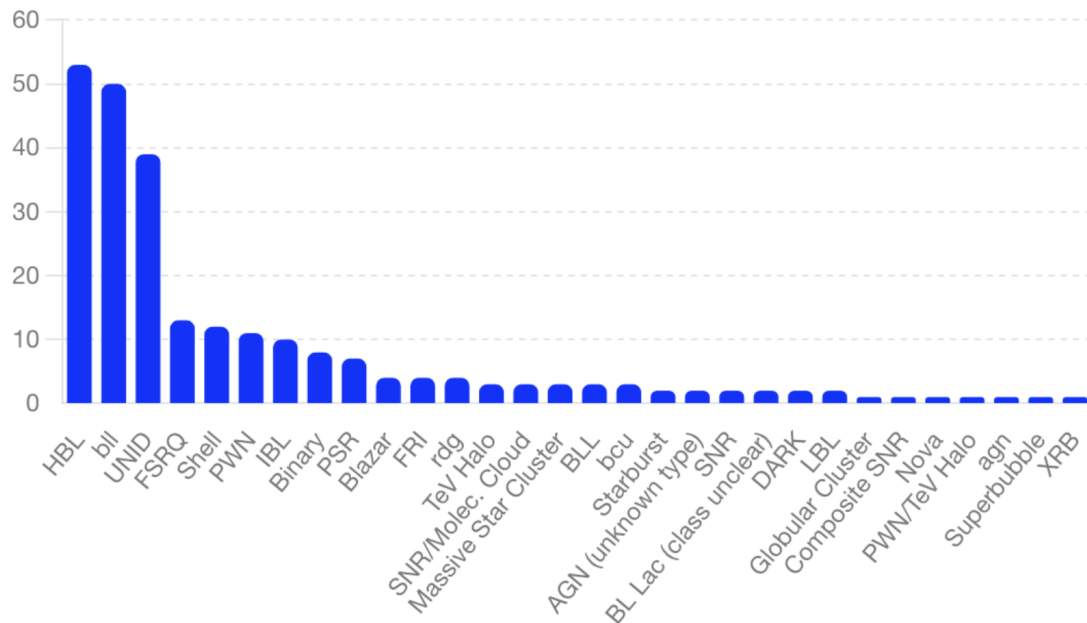


図 4.2 Chiba リストの天体種別ヒストグラム

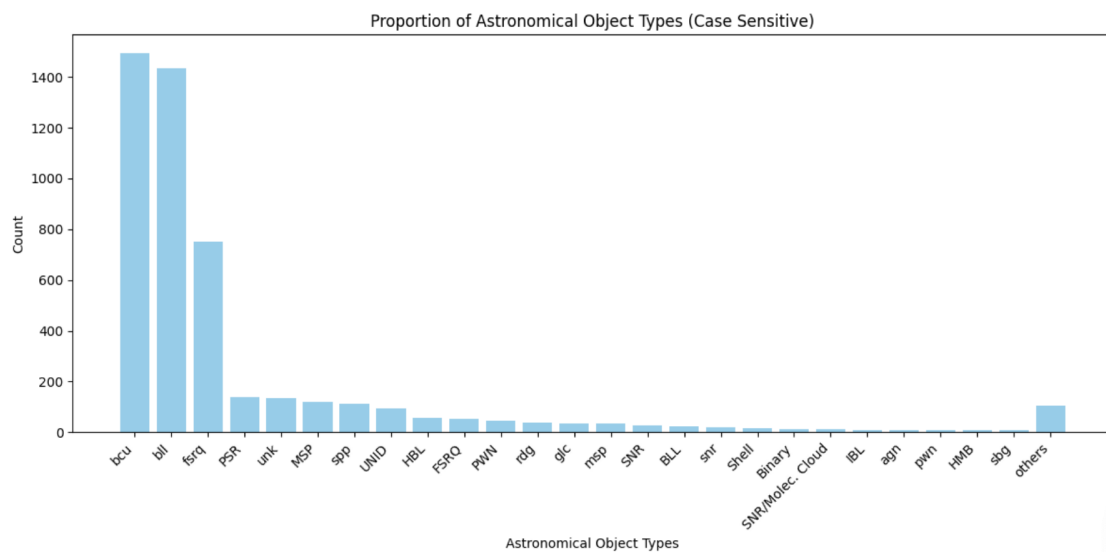


図 4.3 4FGL と TeVCat の天体種別ヒストグラム

とされる場合がある。

UNID は後者の場合、ニュートリノ源候補として不確実性が多いことから、ガンマ線源リストの数の上限を踏まえるとこれらをリストに入れるべきかについては慎重に議論される必要があった。

しかし、TeVCat において UNID とされる場合はほとんど前者が理由となることが多く、後者は比較的稀である。

これより現在銀河面からのニュートリノフラックスに対する寄与が期待されている事を踏まえると、UNID を Chiba リストに多く含めることで、可能性のある新たな銀河面におけるニュートリノ源特定に繋がる事が期待できる。

したがって UNID は Chiba リストから除かずに残した。

4.1.2 MAGIC リストとの比較

MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes) は、スペイン領カナリア諸島のラ・パルマ島に位置し、標高約 2200 メートルのロケ・デ・ロス・ムチャーチョス天文台に設置された IACT システムである。MAGIC は、25 GeV~30 TeV という従来の地上望遠鏡より低いエネルギー閾値を実現している。直径 17 メートルの 2 基の望遠鏡 (MAGIC-I と MAGIC-II) を用いたステレオ観測により、大気中のチェレンコフ光を検出し、ガンマ線の到来方向やエネルギーを高精度に測定する。

本節では MAGIC によって作成された追尾観測用ガンマ線源リストである MAGIC リストと Chiba リストの天体の数分布を比較することによって Chiba リストを評価していく。

MAGIC リストの作成においては MAGIC の位置するラパルマ島における天体の観測可能性を評価するための条件が課された。

チェレンコフ望遠鏡を用いてガンマ線源を観測するためにチェレンコフ光を観測する事から、自然光によってチェレンコフ光を識別できないという事を避ける必要がある。

自然光のうち、太陽光によってチェレンコフ光を識別できないという事を避けるために、観測はラパルマ島にて夜間のみに行われるという条件が課された。

45 度以上の天頂角の範囲において、MAGIC のチェレンコフ望遠鏡は低エネルギー側で観測できるガンマ線のエネルギー閾値が上がり、低エネルギー側での感度が悪くなるため、観測する天頂角の範囲に制限が課された。

以上をまとめると以下の通りである。

- ラパルマ島にて夜間に観測を行う。
- 天頂角が 45 度未満の範囲を観測する。
- 月との分離角が 30 度以上の範囲を観測する。

Chiba リストの 4505 天体のうち、MAGIC の観測条件 (天頂角 < 45 度) より観測可能な天体とそうでない天体を図 4.4 に示す。これにより全天の中で観測可能な領域とそうでない領域を確認することができる。

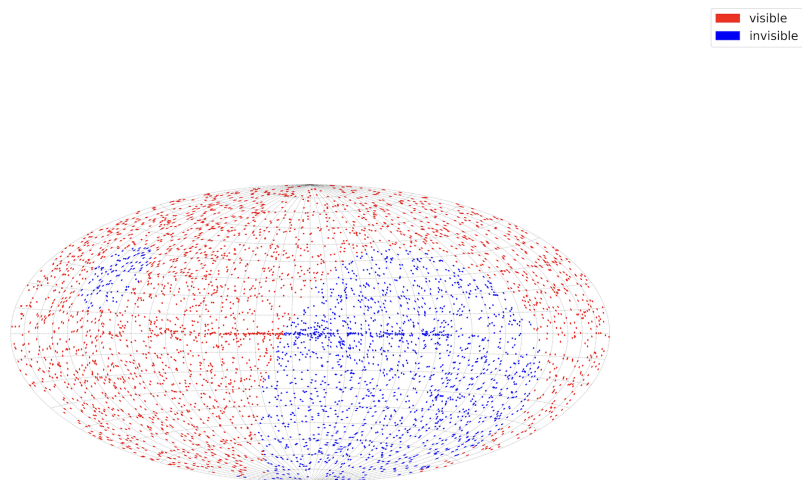


図 4.4 Chiba リストの 4505 天体のうち、MAGIC の観測条件 (天頂角 $< 45^\circ$) より観測可能な天体が赤、それ以外が青でプロットされている。

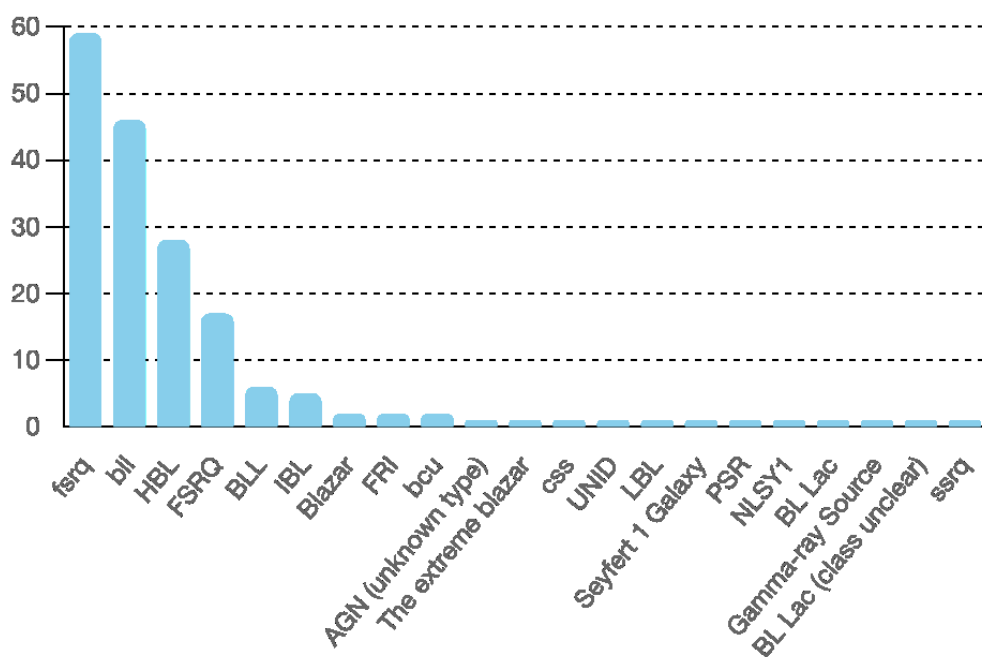


図 4.5 MAGIC リストの天体のタイプ

MAGIC リストの天体のタイプ

図 4.5 より MAGIC リストでは FSRQ が支配的である。これは MAGIC リスト作成において EBL によってガンマ線源のフラックスが減衰されることが考慮されなかったことが原因だと考えられる。

また、ブレーザーが多く残っている。これは MAGIC リストの作成において時間変動が大きいもののみがリストに残されたことで、時間変動が大きい天体であるブレーザーが多くリストに残されたことが原因だと考えられる。

MAGIC リストと Chiba リストの比較

Chiba リストは以前作られた IACTs の追尾観測用ガンマ線源リストの作成方法に基づきそれを改良することで作成されたリストであることから、IACTs のガンマ線源リストと比較し Chiba リストで成されたリスト作成の変更点がその中身としてどのように反映されているかを知る必要がある。比較のために Chiba リストの天体に対して MAGIC が課したものと同様の観測条件を課したものを検討した。結果、249 個あった Chiba リストの天体数は 168 個になった。

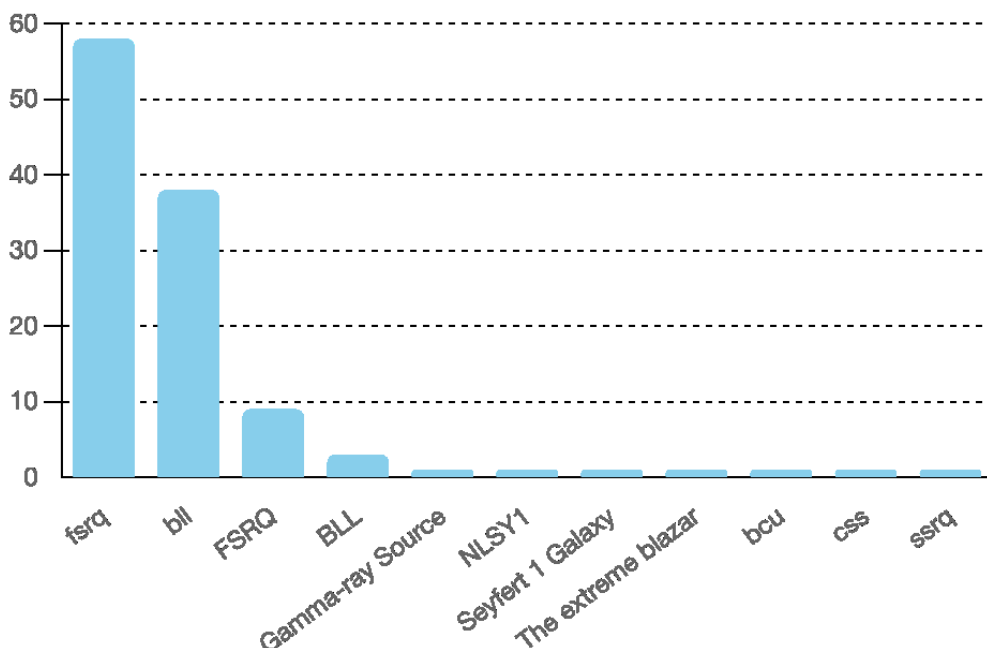


図 4.6 MAGIC リストには残っているが、Chiba リストからは除かれた天体のタイプ。

図 4.6 は、MAGIC リストには残っているが観測条件が課せられた後の Chiba リストからは除外された天体のタイプを示している。ヒストグラムから FSRQ が最も多くなっている事がわかる。

これは MAGIC リスト作成時に EBL によるガンマ線源のフラックス減衰が考慮されていなかったため残った FSRQ が、Chiba リスト作成時には既に EBL による減衰が考慮されたために除かれた事によると考えられる。

FSRQ は他の天体タイプに比べて大きな赤方偏移の値を持つことで知られていて、そのことは 4FGL のうち赤方偏移の値がわかっている全ての 2207 天体の赤方偏移の値をヒストグラ

ムにした図 4.7 により確認できる。

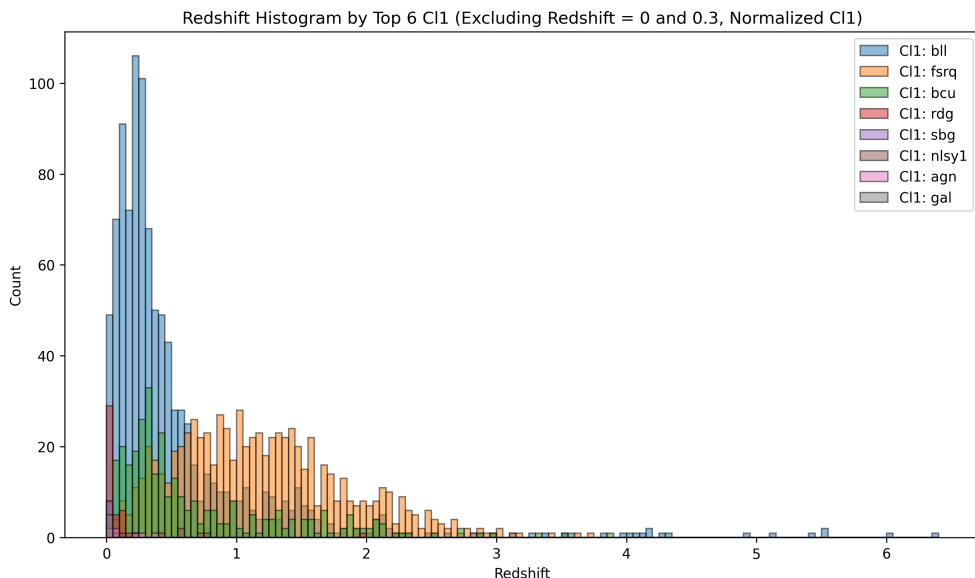


図 4.7 4FGL 天体 4FGL 内で数の最も多い天体種 7 つにおける赤方偏移のヒストグラム。

これより EBL を考慮した 4FGL の FSRQ のフラックスは CTA の感度曲線を全て下回っている事が確かに図 4.8 より確認できる。

ブレーザーが FSRQ の次に多いのは、MAGIC リストの作成において時間変動性が大きい為に残った天体が、今回の Chiba リスト作成の際には時間変動の条件を外した事により、時間変動のない天体がリストに含まれる余地が増えた事によると考えられる。

4.1.3 H.E.S.S リストとの比較

H.E.S.S. (**H**igh **E**nergy **S**tereoscopic **S**ystem) は、ナミビアのコマス高地に位置し、標高 1800 メートルに設置された IACT システムである。H.E.S.S. は 5 基の望遠鏡から構成され、4 基の直径 12 メートル望遠鏡が正方形に配置され、中央に直径 28 メートルの H.E.S.S. II 望遠鏡が追加されている。H.E.S.S. は、0.03~100 TeV というエネルギー範囲をカバーする。

H.E.S.S. によって作成された追尾観測用ガンマ線源リストである H.E.S.S. リストと Chiba リストの天体数の数分布を比較することによって Chiba リストを評価していく。

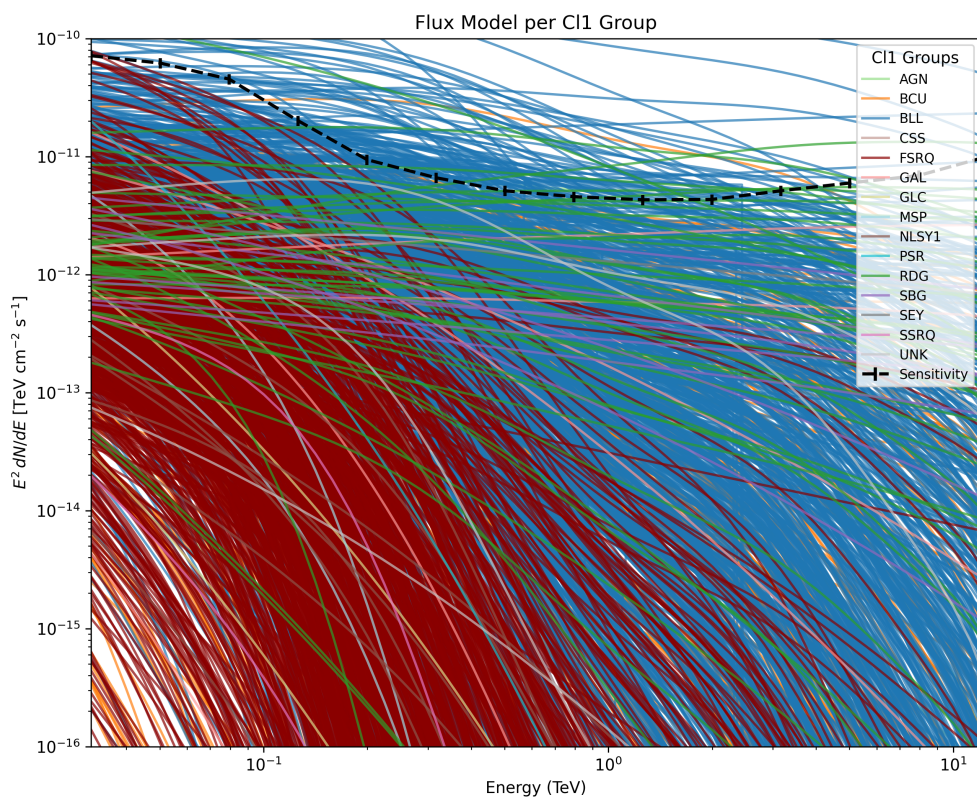


図 4.8 4FGL のうち赤方偏移の情報がある天体のタイプ別 γ 線フラックスと CTA の 2.5 時間観測における感度曲線の比較のプロット。天体のフレアを考慮して銀河系天外体のフラックスは全て 10 倍されている。

HESS リストの作成においては HESS の位置するナミビアのコマス高地における天体の観測可能性を評価するための条件が課された。

MAGIC の時と同様、太陽光によってチェレンコフ光を識別できないという事を避けるために、観測はナミビアのコマス高地にて夜間にのみ行われるという条件が課せられた。

45 度以上の天頂角において、HESS の望遠鏡も MAGIC のものと同様、低エネルギー側で観測できるガンマ線のエネルギーにおける閾値が上がることに加え、低エネルギー側での感度が悪くなるため、観測する天頂角の範囲に制限が課された。また、月光によってチェレンコフ光が識別できないという事を避けるために月との分離角が 30 度以内に位置する天体が除かれた。

以上をまとめると以下の通りである。

- ナミビアのコマス高地にて夜間に観測を行う。
- 天頂角が 45 度未満の範囲を観測する。
- 月との分離角が 30 度以上の範囲を観測する。

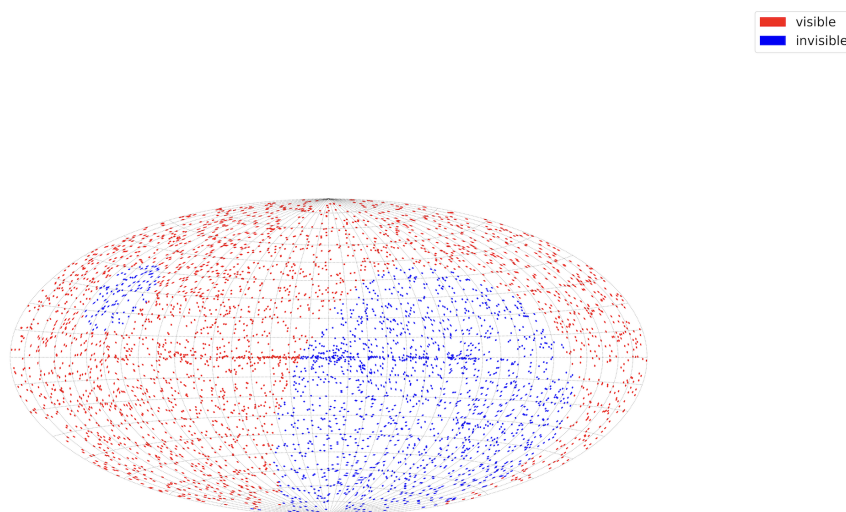


図 4.9 4FGL の 4505 天体のうち、H.E.S.S. の観測条件（天頂角 < 45 度）より観測可能な天体が赤、それ以外が青でプロットされている。

以下、HESS リストと Chiba リストの天体のタイプ別の比較である。

HESS リストの天体タイプ

図 4.22 の HESS のヒストグラムによると、FSRQ が支配的である。これには MAGIC リストの作成時と同様、HESS リストの作成においても EBL によってガンマ線源のフラックスが減衰されることが考慮されたことが原因だと考えられる。また、ブレーザーが多く残っている

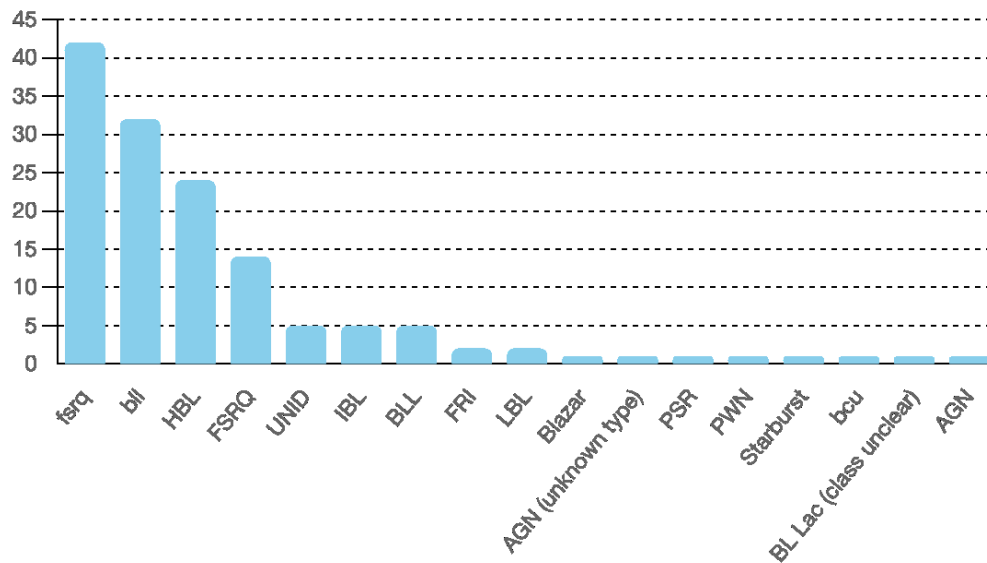


図 4.10 hess リストの天体のタイプ

が、これも MAGIC リストの作成におけるプロセスと同様に時間変動の大きい天体のみがリストに残されたことで、時間変動のある天体であるブレーザーが多くリストに残されたことが原因だと考えられる。

HESS リストと Chiba リストの天体タイプの比較

HESS が課したものと同様の観測条件を課したものを Chiba リストに課した結果、249 個あった Chiba リストの天体数は 154 個になった。これを HESS リストとの比較に用いた。

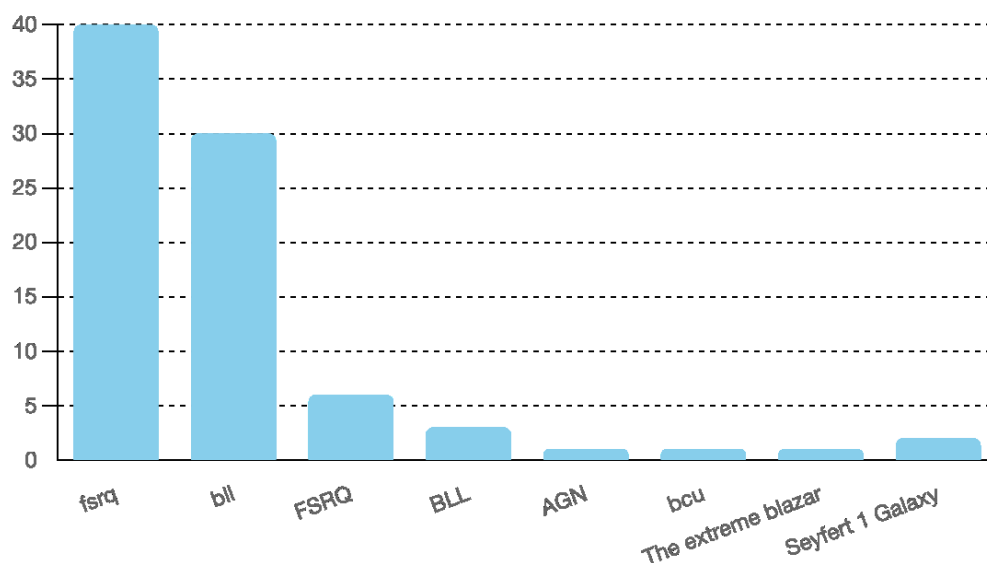


図 4.11 hess リストにあるが Chiba リストからは除外された天体のタイプ

4.1.3 より fsrq が最も多くなっている事がわかる。

これは MAGIC リスト作成時と同様に、HESS リスト作成時にも EBL によるガンマ線源のフラックス減衰が考慮されていなかったため残った fsrq が、Chiba リスト作成時には EBL による減衰が考慮されたために除かれた事によると考えられる。

ブレザーが fsrq の次に多いのは、は MAGIC リスト作成時と同様に、HESS リスト作成時にも 時間変動が大きい天体であるという条件が課された結果残った時間変動性のある天体が、今回の Chiba リスト作成の際には時間変動の条件を外した事により、時間変動の小さい天体がリストに含まれる余地が増えた事によると考えられる。

4.1.4 VERITAS リスト

VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) は、アメリカ合衆国アリゾナ州にあるフレッド・ローレンス・ウィップル天文台に設置された IACT システムである。4 基の望遠鏡から構成され、それぞれ直径 12 メートルの反射鏡を搭載している。VERITAS は、50 GeV から 50 TeV のエネルギーバンドで観測が可能であり、100 GeV ～ 10 TeV の範囲で最高の感度を持つ。

本章では VERITAS によって作成された追尾観測用ガンマ線源リストである VERITAS リストと Chiba リストの天体種の数分布を比較することによって Chiba リストを評価していく。

VERITAS リストの作成においては VERITAS の位置するナミビアのコマス高地における天体の観測可能性を評価するための条件が課された。

MAGIC、H.E.S.S. の時と同様、太陽光によってチェレンコフ光を識別できないという事を避けるために、観測は、アメリカ合衆国アリゾナ州にあるフレッド・ローレンス・ウィップル天文台にて夜間にのみ行われるという条件が課せられた。また、45 度以上の天頂角の範囲において、VERITAS の望遠鏡も MAGIC のものと同様、低エネルギー側で観測できるガンマ線のエネルギーにおける閾値が上がり、低エネルギー側での感度が悪くなるため、観測する天頂角の範囲に制限が課された。

また、月光によりチェレンコフ光が識別できないという事を避けるために月との分離角が 30 度以内に位置する天体が除かれた。

以上をまとめると以下の通りである。

- ナミビアのコマス高地にて夜間に観測を行う。
- 天頂角が 45 度以内の範囲を観測する。
- 月との分離角が 30 度以上の範囲を観測する。

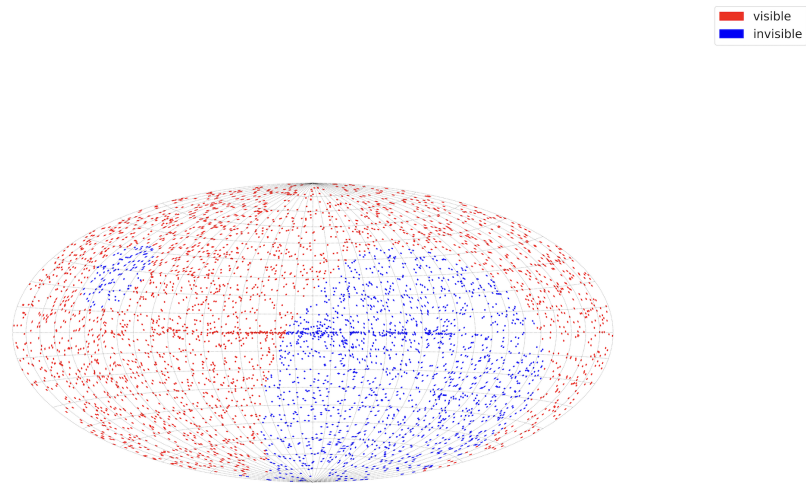


図 4.12 4FGL の 4505 天体のうち、VERITAS の観測条件（天頂角 $< 45^\circ$ ）より観測可能な天体が赤、それ以外が青でプロットされている。

VERITAS リストの天体タイプ

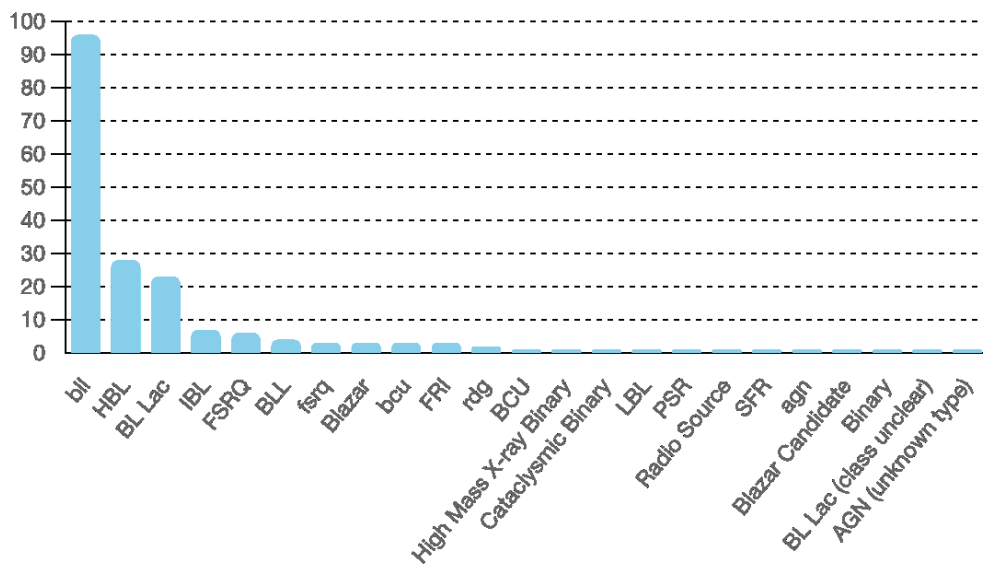


図 4.13 VERITAS リストの天体のタイプ

HESS リストと Chiba リストの天体タイプの比較

図 4.13 のヒストグラムによるとブレーザーである BL Lac が支配的であるが、VERITAS は EBL を考慮し 100 GeV 以上のガンマ線のフラックスを計算することで GeV ガンマ線源を選定していることにより、MAGIC, HESS のものと比較して fsrq が少なくなっている。

VERITAS が課したものと同様の観測条件を課したものを Chiba リストに課した結果、249 個あった Chiba リストの天体数は 164 個になった。これを VERITAS リストとの比較に用いた。

以下、VERITAS リストと Chiba リストの天体のタイプ別の数を比較する。

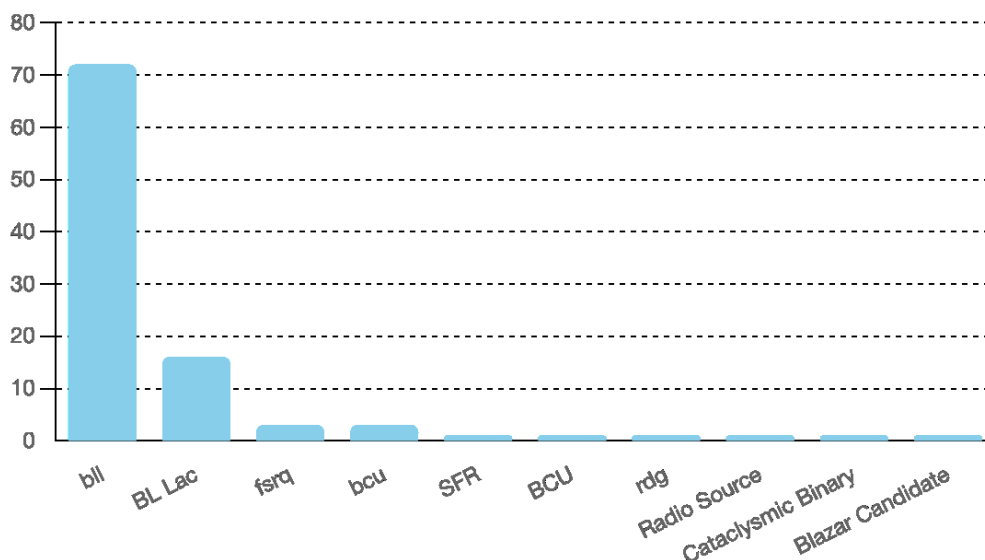


図 4.14 VERITAS リストにはあるが Chiba リストからは除かれた天体のタイプ

図 4.14 は VERITAS リストには残っているが、Chiba リストからは除かれた天体のタイプ別のヒストグラムである。ここでの Chiba リストは、比較のために VERITAS が課したものと同一条件で観測可能性の条件を課した後の合計 164 個の天体からなるものを指す。

図 4.14 のヒストグラムによると BL Lac が最も多くなっている事がわかる。VERITAS は GeV ガンマ線源選定において時間変動がある天体であるということを条件として課していないため、MAGIC、HESS の時とは異なる原因が考えられる。これは恐らく VERITAS が GeV ガンマ線源選定において使用したカタログは 3FHL と FL8Y であり、これらが 4FGL にアップデートされる前のものであったという原因が考えられる。ここで 3FHL は 3FGL の高エネルギー版で、50 GeV 以上 2TeV 以下のガンマ線源に特化したものであり、FL8Y は 4FGL の暫定版で、4FGL 公開前に 8 年間の Fermi-LAT データをまとめたプレカタログである。

第 5 章

IceCat と作成したリストとの位置的な相関

5.1 目的

作成した Chiba リストのガンマ線源を評価する手段として、実際に検出されたニュートリノイベントとの位置的な相関を取り、その有意度を調べるということが有効である。その場合 Chiba リストに対応する IceCube のニュートリノイベントはチャンネル 2 のマルチプレットイベントであるからマルチプレットのニュートリノイベントとの位置的な相関を取ることが Chiba リストの評価において適している。しかし、マルチプレットのニュートリノイベントは公開されていないため使用することができなかった。その理由は、IceCube における解析ルールに基づいている。このルールでは、ニュートリノ信号の中から超高エネルギー宇宙ニュートリノ信号を特定する基準を、実際の観測データを確認する前にあらかじめ決定する必要がある。このルールにより、観測データを基に基準を設定することができなくなり、解析者の主観的なバイアスを排除するとともに、統計的な独立性を確保することができる。一般的に、この方法は「ブラインド解析」と呼ばれる。ブラインド解析では、観測データを隠して解析基準を変更することが禁止されており、基準を設定した後に初めてデータを確認することが許可される。このプロセスを「アンブラインド」という。一方で超高エネルギー宇宙ニュートリノ信号を特定する基準がすでに定められている EHE (Extremely High Energy) および HESE (High-Energy Starting Events) イベントについては、解析が完了しているため、IceCat として公開されている。このような事情により今回 Chiba リストの評価においては IceCat というシングレットのニュートリノイベントからなるカタログを用いた。本研究ではこの IceCat に含まれる IceCube によるシングレットの高エネルギーニュートリノイベント (100TeV 以上) 計 348 個と Chiba リストのガンマ線源計 249 個の位置的な相関をとる事で Chiba リストをチャンネル 2 用のガンマ線源リストとして多角的に評価した。

以下がその目的である。

- Chiba リストの 249 個の天体と IceCat の 348 イベントの位置的な相関を調べ、天体数とニュートリノイベント数に対する相関数と統計的に有意である相関数の指標を得る。
- Chiba リストの 249 個の天体と IceCat の 348 イベントの位置的な相関を見て、上記の位置相関が取れた天体・イベントのうち、統計的な有意度の比較的高い天体を詳しく調べ、ニュートリノ源としてふさわしいか評価し、今後のリスト改善への判断材料とする。

5.2 IceCat

IceCat は、IceCube のシングレットアラートのうち高エネルギーニュートリノ源である可能性が 50% 以上の “Gold” と 30% 以上の “Bronze” のトラックアラートイベントからなるカタログである。このカタログは、天体物理学的起源の可能性のあるニュートリノイベントを収録しており、IceCube がリアルタイムで発行する GCN (General Coordination Network) に基づいている。また、2011 年に IceCube 観測装置が完成して以降、アラートプログラムが実施されていれば発生していたであろうイベントから 2019 年にアラートシステムを更新してからの最新 2023 年までのものを含む。

5.2.1 IceCat エントリの内容

IceCat の各アラートエントリに含まれるデータ項目について説明する。

CSV テーブルのデータ項目

- **NAME**
 - 各アラートに付けられた名前。
- **RUNID, EVENTID**
 - IceCube のデータ収集システムによって割り当てられたイベントの識別番号。
- **START, EVENTMJD**
 - イベントが検出された日時。
- **TYPE**
 - イベントの種類を示す識別子。以下のような種類が含まれる：
 - * gfu-gold
 - * gfu-bronze
 - * ehe-gold

- * hese-gold
- * hese-bronze

gfu は機械学習アルゴリズムを使用し、天体物理学的起源が予想されるミューオンニュートリノ由来のトラックイベントをリアルタイムで特定するこの gfu アラートのニュートリノイベントのうち singlet として扱ってよい十分な良質なイベントが IceCat に含まれている。同じアルゴリズムで選ばれたイベントのうち、複数を組み合わせることで一定の有意度となったものがマルチプレットとして扱われ、それがチャンネル 2 と 3 に対応するニュートリノイベントのアラートに対応する。

ehe は PeV エネルギー領域のニュートリノイベントをターゲットとした選択基準で、ミューオンニュートリノのトラックイベントに使われる。

hese は IceCube 内で発生する高エネルギーイベントを対象とし、そのなかでも、再構成精度が悪いものを除去するためにトラックの長さが 200m 以上を要求するなどの条件が課されている。このうち信号確率が高いものが gold アラートに使用され、それ以外のは bronze アラートに使用される。

- **OTHER_I3TYPES**

- このイベントがさらに該当する他の I3TYPE の種類。

- **RA, DEC [deg] (and _ERR)**

- イベントの方向を示す座標 (J2000 赤道座標) とその誤差範囲 (90% の信頼区間)。

- **ENERGY [TeV]**

- イベントを引き起こした可能性が最も高いニュートリノのエネルギー ($E^{-2.19}$) の天体物理学的ニュートリノフラックスを仮定して計算される。

5.3 取られた相関とその評価

5.3.1 IceCat におけるニュートリノイベントの信頼領域の定義

IceCat には Healpix 形式でピン分けされたニュートリノイベントの方向ごとの再構成尤度値である 2LLH が含まれ、最適フィット位置に対応するピクセルが尤度差 (Delta-LLH) が 0 となるよう調整されている。[12]

再構成尤度値 LLH は尤度値である lh を用いて

$$-2\Delta \ln(lh) \quad (5.1)$$

として与えられている。

また、Delta-LLH 値に基づき、50% 信頼領域は尤度値が 22.2 未満である領域、90% 信頼

領域は尤度値が 64.2 未満である領域と定義されている。この定義を基に、Chiba リストの天体の座標が 50% および 90% 信頼領域内にそれぞれ含まれるかを調べた。

表 5.1 50% 信頼領域内で得られた位置的相関

Assoc1_x	TeVCat_x	EVENTID	START
NGC 1218 3C 454.3 1H 0323+022 GB6 J0601+5315 TXS 2324+068	TXS 0506+056	50579430	2017-09-22 20:54:30.436262
	MGRO J1908+06	55750717	2015-01-19 08:50:58.363915
	Markarian 421	49522606	2011-12-08 17:15:15.376889
		4701751	2022-03-04 17:44:12.213316
		1306178	2012-05-23 15:19:39.523361
	PSR J2032+4127	65785778	2020-11-20 09:44:40.556529
	PG 1553+113	24635982	2020-04-10 23:19:55.489386
		4701751	2022-03-04 17:44:12.213316
	RBS 0413	82361476	2019-12-31 11:00:06.079026
	GB6 J1058+2817	52726834	2013-04-09 23:34:38.727742
		9739584	2016-08-12 16:25:10.852722
		80686964	2015-01-29 05:27:30.695663
	OJ 287	29513102	2023-07-07 18:56:51.435389

表 5.2 90% 信頼領域内で得られた位置的相関

Assoc1_x	TeVCat_x	EVENTID	START
NGC 1218	TXS 0506+056	50579430	2017-09-22 20:54:30.436262
	MGRO J1908+06	55750717	2015-01-19 08:50:58.363915
	Markarian 421	49522606	2011-12-08 17:15:15.376889
		4701751	2022-03-04 17:44:12.213316
		1306178	2012-05-23 15:19:39.523361
3C 454.3	PSR J2032+4127	65785778	2020-11-20 09:44:40.556529
1H 0323+022	PG 1553+113	24635982	2020-04-10 23:19:55.489386
		4701751	2022-03-04 17:44:12.213316
	RBS 0413	82361476	2019-12-31 11:00:06.079026
GB6 J0601+5315	GB6 J1058+2817	52726834	2013-04-09 23:34:38.727742
		9739584	2016-08-12 16:25:10.852722
TXS 2324+068		80686964	2015-01-29 05:27:30.695663
NGC 2329	OJ 287	29513102	2023-07-07 18:56:51.435389
	PSR J0631+1036	57649537	2018-08-07 04:51:19.876356
	3HWC J2022+431	65785778	2020-11-20 09:44:40.556529
	RBS 0958	30701331	2013-04-08 04:31:50.097918
	Geminga Pulsar	11436007	2017-02-08 03:04:29.923171
	1ES 1101-232	81419	2017-09-22 09:42:45.628765
	2HWC J0819+157	29513102	2023-07-07 18:56:51.435389
	PSR J2021+4026	65785778	2020-11-20 09:44:40.556529
	TXS 0506+056	22012496	2022-09-18 12:46:05.322758
	OT 081	35302784	2023-07-08 08:17:05.211280
	HESS J1848-018	51402681	2019-12-31 11:00:06.079026
	VER J0521+211	56963417	2013-01-25 15:48:58.165501
	MG3 J022021+2336	8332254	2017-06-21 04:35:20.519171
	4C +39.12	27754576	2020-09-11 14:19:46.231447
	PSR J0631+1036	18431575	2016-03-07 16:43:11.247718
NGC 2329		9739584	2016-08-12 16:25:10.852722

5.3.2 相関をとった方法とその評価

Delta-LLH 値に基づいた信頼領域の定義を基に、Chiba リストの天体の座標が 50% および 90% 信頼領域内にそれぞれ含まれるかを調べた。ガンマ線源とニュートリノイベントの相関数について、90% 信頼領域内での相関数は 31 個、50% 信頼領域内での相関数は 13 個であることが確認された。今回の解析に使用したガンマ線源リストには 249 個の天体が含まれており、これらは追尾観測用に選定されたものである。しかし、この相関が偶然によるものである可能性が考えられるため、249 個の天体の座標がランダムに選ばれた場合、それらが 348 個のニュートリノイベントの 90% 信頼領域内に位置する相関数が 31 となる可能性を評価した。

このため、まず各ニュートリノイベントの 90% 信頼領域の立体角を計算し、それらを合計した値を全天の立体角で割ることで、1 つのランダムな天体が 90% 信頼領域内に位置する確率を求めた。その結果、90% 信頼領域が全天に占める割合は 13% であることが分かった。

以下、IceCat のニュートリノイベントの 90% の信頼領域における位置エラーを用いて 1 つのランダムな天体が 90% 信頼領域内に位置する確率を求める方法を示す。

$$\text{ra_error} = \frac{\text{ra_error_plus} + \text{ra_error_minus}}{2} \quad [\text{deg}] \quad (5.2)$$

$$\text{dec_error} = \frac{\text{dec_error_plus} + \text{dec_error_minus}}{2} \quad [\text{deg}] \quad (5.3)$$

$$\theta = \frac{\text{ra_error} \times \cos(\text{dec}) \times \text{dec_error}}{180} \times \pi \quad (5.4)$$

$$\sum_i \frac{1 - \cos(\theta_i)}{2} \quad (5.5)$$

5.5 を用い計算をした結果、90% 信頼領域が全天に占める割合は 13% であることが分かった。

この割合にガンマ線源リストの天体数 249 を掛けることで、ランダムに選択された場合でも期待される相関数が 32.7 件であることが計算された。この期待値は、実際に観測された相関数 31 件を上回っていた。

相関の重みの計算

得られた一つづつの重みの値を評価するために、重みの計算を行った。ニュートリノイベントの 50% 信頼領域内にガンマ線源が位置している場合、その座標がニュートリノイベントの

最尤点に近いほど、相関の価値が高いと考えられる。また、信頼領域のサイズが大きい場合特に、ガンマ線源がその中のどこに位置しているかによって相関の価値がより大きく変わる。

重みの計算は、ガンマ線源の座標における尤度値を、信頼領域全体における尤度値の合計で割ることで行なった。この手法により、最尤点に近い座標ほど高い重みが与えられ、また信頼領域が小さい場合も重みが大きくなるように重みの式を定義した。この重みは、各相関の重要性を相対的に定量的に評価する指標として使用される。

重みを $weight$ 、相関の取られた天体の座標における lh の値を lh_{target} と定義し、 $weight$ を計算する式を以下に示す。

$$Weight = \frac{lh_{target}}{\sum lh} \quad (5.6)$$

50% 信頼領域で得られた相関を表 5.3 に示す。

5.3.3 相関の有意性の評価

Chiba リストの 249 個の天体のそれぞれの $weight_{50}$ の値の有意度を評価するために、それぞれの天体が偶然計算された $weight_{50}$ の値を持つ確率を計算した。

そのために 100,000 ($= 249 \times 402$) 個の座標をランダムに生成することによって、249 個の天体を持つ 402 個の天球をシミュレーションした。

100,000 個の座標のうち、評価したい $weight_{50}$ を持つ個数を n_{50} とする。100,000 個のうちある一つの天体が評価したい $weight_{50}$ 値を持つ確率は

$$\frac{n_{50}}{100000} \quad (5.7)$$

で与えられる。

次に、100,000 個のうち、ある一つの天体が評価したい $weight_{50}$ の値を持たない確率は式 (5.7) の余事象で与えられるから

$$1 - \frac{n_{50}}{100000} \quad (5.8)$$

次に、249 個からなる一つの天球の 249 天体全てが評価したい $weight_{50}$ の値を持たない確率は

$$\left(1 - \frac{n_{50}}{100000}\right)^{249} \quad (5.9)$$

で与えられる。

求めたい確率は 249 個の天体からなる一つの天球に評価したい $weight_{50}$ の値を持つ座標が存在する確率は式 (5.9) の余事象であるから、

表 5.3 IceCat の 50% 信頼領域内で得られた位置的相関を持つ重みの値と対応する天体。
Assoc1_x が 4FGL 天体の名前、TeVCat_x が TeVCat 天体の名前、weight_50 は相関の
重み、NAME、START はそれぞれイベントの名と検出時刻。

Assoc1_x	TeVCat_x	NAME	START	weight_50
nan	TXS 0506+056	IC170922A	2017-09-22 20:54:30.436262	0.084384255
nan	MGRO J1908+06	IC150119A	2015-01-19 08:50:58.363915	0.0029255594
nan	Markarian 421	IC111208A	2011-12-08 17:15:15.376889	0.00037856275
NGC 1218	nan	IC220304A	2022-03-04 17:44:12.213316	0.0002136126
3C 454.3	nan	IC120523B	2012-05-23 15:19:39.523361	0.00016755087
nan	PSR J2032+4127	IC201120A	2020-11-20 09:44:40.556529	3.8039256e-05
nan	PG 1553+113	IC200410A	2020-04-10 23:19:55.489386	1.9149915e-05
1H 0323+022	nan	IC220304A	2022-03-04 17:44:12.213316	7.5153976e-06
nan	RBS 0413	IC191231A	2019-12-31 11:00:06.079026	1.1218511e-06
nan	GB6 J1058+2817	IC130409A	2013-04-09 23:34:38.727742	1.0249548e-06
nan	GB6 J0601+5315	IC160812A	2016-08-12 16:25:10.852722	9.916797e-07
nan	TXS 2344+068	IC150129A	2015-01-29 05:27:30.695663	1.7983955e-07
nan	OJ 287	IC230707B	2023-07-07 18:56:51.435389	3.650169e-08

$$1 - \left(1 - \frac{n_{50}}{100000}\right)^{249} \quad (5.10)$$

で与えられる。

実際に 249 個の天体と 348 個のニュートリノイベントの位置的な相関をとり、その重みが計算されたとし、249 個中 10^{-1} の重みを持つ天体が存在する確率を

$$1 - \left(1 - \frac{3}{402} \times \frac{1}{249}\right)^{250} \quad (5.11)$$

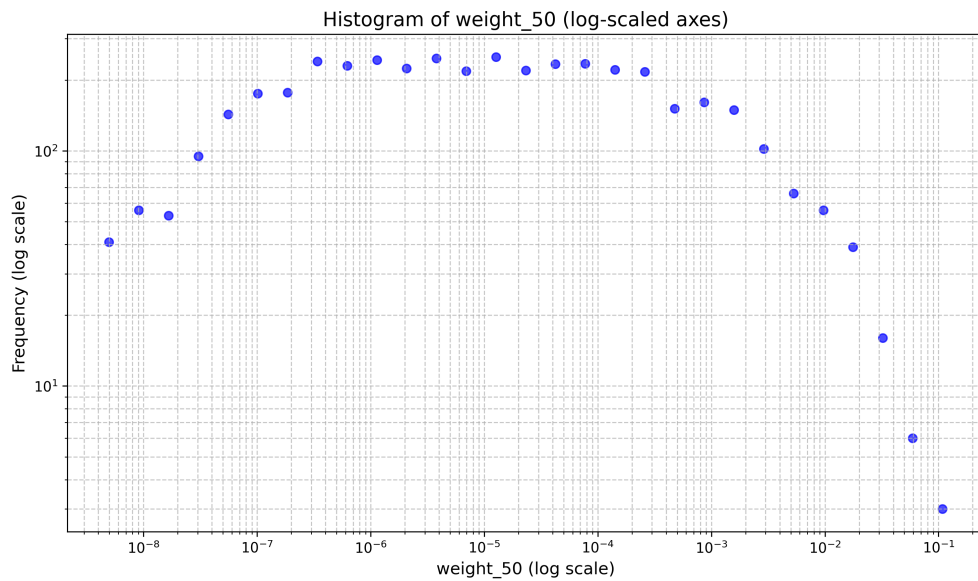


図 5.1 100,000 個の座標の重みのヒストグラム。両軸とも log スケールでプロットされている。

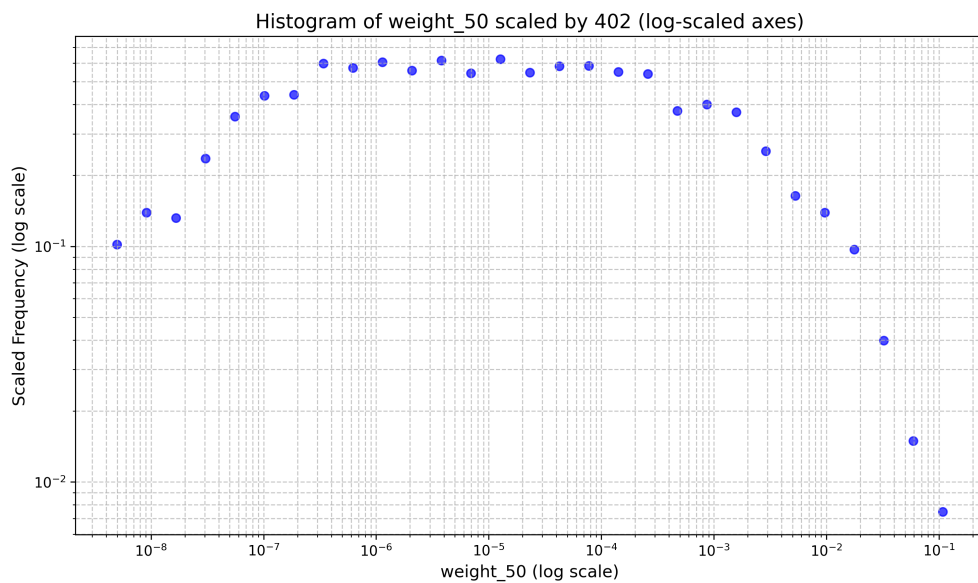


図 5.2 100,000 個の座標の重みのヒストグラムの縦軸を宇宙の数 402 で割ったもの。両軸とも log スケールでプロットされている。

として計算される。

結果から得られた値は 0.00225 であり、これは 3.06σ に相当する。ため統計的に有意と言える。

また、同様に 249 個の天体と 348 個のニュートリノイベントの位置的な相関をとり、その重みが計算されたとし、249 個中 0.06 の重みを持つ天体が存在する確率を計算したところ、その値は 0.0075 となり、これは 2.67σ に相当する。

Chiba リストを用いて取られた相関の持つ重みの持つ重みを TXS 0506+056 の相関の重み 0.0843 と比較すると、その相関は統計的に有意だと言える。

次に、 10^{-2} の重みを持つ天体が存在する確率も同様に計算したところ、結果は 0.31 となり、これは 1.02σ に相当するため統計的に有意とは言えない。

表 5.3 より TXS 0506+056 の次に重みの大きい天体は MGRO J1908+06 であり、TXS 0506+056 以降の天体の IceCat のニュートリノイベントと取られた相関は統計的に有意ではないと言える。

5.4 重みの高い相関が得られた天体の考察

TXS 0506+056 は、複数のニュートリノ事象とガンマ線フレアの空間的および時間的一致により、初めてニュートリノ源として特定された天体であり [7]、今回の解析において TXS 0506+056 と IceCat のニュートリノイベントの相関に有意性が確認されたことは妥当な結果と言える。

TXS 0506+056 以外の天体において IceCat との位置的な相関に統計的な有意性は見られなかったが、計算された重みをもつ天体の順番にそれらのニュートリノ源としての特性と現状の研究で明らかになっていることを以下にまとめた。

5.4.1 MGRO J1908+06

MGRO J1908+06 は、Milagro 望遠鏡による初期観測で発見され、その後、H.E.S.S.、VERITAS、HAWC など複数の観測装置によってガンマ線の TeV 領域での放射が確認された。特に、HAWC の観測では、100 TeV を超える領域での放射が検出され、粒子を PeV エネルギーまで加速する能力が示唆されている。さらに、この天体は中性子星 PSR J1907+0602 や SNR G40.5-0.5（超新星残骸）との空間的な関連性が報告されており、それぞれの放射が重なる複合的な放射メカニズムが提案されている。

IceCube の観測では、MGRO J1908+06 の方向でニュートリノ放射のホットスポットが確認されたものの、統計的な有意性は低い。これによって 5.3.3 において評価した MGRO の有意度が追認された [13]。しかし、ガンマ線スペクトルの一部がパイ中間子崩壊（陽子-陽子衝突）によるニュートリノ生成と整合すると示唆されており、この天体がニュートリノ源である可能性を支持している。

放射メカニズムの解釈

MGRO J1908+06 のガンマ線放射は、以下の 2 つの主要なメカニズムによって説明される。

- **パイ中間子崩壊**：陽子-陽子衝突や中性子星付近でのガンマ線放射。この過程は、特に

SNR G40.5-0.5 周辺の分子雲 (MC) での宇宙線と物質の相互作用に関連すると考えられる。

- **レプトン放射**：パルサー PSR J1907+0602 から放出された電子・陽電子が逆コンプトン散乱を通じて高エネルギーフォトンを生成するプロセス。このプロセスは、観測された高エネルギー (30 GeV 以上) のスペクトルと一致する。

5.4.2 Markarian 421

Markarian 421 (Mrk 421) は、地球に近く、最も明るい BL Lac 天体の一つであり、高エネルギー (TeV) ガンマ線領域での強力なフレア活動が特徴である。この天体の非常に高エネルギー (VHE) 放射の起源については、レプトンモデルとハドロンのモデルが提案されているが、そのいずれも決定的であるかは未だ結論が得られていない。ここでは、Mrk 421 におけるハドロンプロセスによるニュートリノ放射の可能性とその観測結果について考察する。

Mrk 421 のハドロンプレアとニュートリノ放射

Mrk 421 のフレア活動は、通常のベースライン状態 (baseline state) と、比較的短期間のフレア状態に分けられる。ハドロンのモデルでは、ガンマ線とニュートリノ放射のスペクトル指数が同じになると予測され、観測期間 (Tobs) の約 9% がハドロンプレア状態 (Hadr.flare) に分類されると示唆されている。

ニュートリノ生成は、Fermi 加速された陽子がシンクロトロン自己コンプトン (SSC) 光子と相互作用し、中性パイ中間子の崩壊を通して生じる。このプロセスによれば、ニュートリノとガンマ線が同時に生成され、それぞれのスペクトル指数が類似的に一致すると考えられる ($\alpha \approx \alpha_\nu$)。

ニュートリノ放射の可能性と結果

Km3 スケールのチェレンコフニュートリノ望遠鏡 (例: IceCube) によるモンテカルロシミュレーションを用いて、Mrk 421 のニュートリノフラックスが評価された [14]。ガンマ線スペクトル指数をニュートリノ放射モデルに代入すると、ニュートリノが持つエネルギーは初期電子エネルギーの約 5% であり、検出のためには長期間の観測が必要となる。

5.4.3 NGC 1218

現在、NGC 1218 は電波波長で強い放射を示す活動銀河核 (Radio-Loud AGN; RL AGN) の一つであると予想されていた天体であり、そうであればニュートリノ源であるという説がかつては有力であった [15]。RL AGN は、強力な相対的ジェットを持ち、宇宙線の加速とそれ

に伴うハドロンの相互作用によるニュートリノ放射が理論的に予測されている天体である。しかし、NGC 1218 におけるニュートリノの検出が予想よりも少ない場合、同天体のガンマ線放射が宇宙線陽子の相互作用ではなく、電子や陽電子による逆コンプトン散乱によって支配されている可能性が高まる。この違いを明らかにすることは、RL AGN における高エネルギー粒子の加速機構を理解する上で重要であり、今後のニュートリノ観測とガンマ線観測の比較を通じて、NGC 1218 の宇宙線加速環境やニュートリノ生成の有無を調査する必要がある。

5.4.4 3C 454.3

3C 454.3 は、最も明るいガンマ線源の一つであり、フレア活動時に多波長で顕著な変動を示すことから、ニュートリノ源として注目されているフラットスペクトル電波クエーサー (FSRQ) である。高エネルギーガンマ線放射とニュートリノ放射の関連性を探ることは、宇宙線の起源解明において重要である。ここでは、最新の観測とモデル解析に基づき、3C 454.3 のニュートリノ放射の特徴とその意義を考察する。

多波長観測とニュートリノ放射モデル

3C 454.3 は赤方偏移 $z = 0.86$ に位置し、ジェットの視線角はわずか 0.7° と非常に小さい。このジェットの相対論的効果により、ドップラー因子 $\delta = 27$ が得られ、フレア活動時には極めて高い光度を示す。特に、フレア時の光度は静穏状態に比べて大幅に増加し、ニュートリノ生成の重要な条件を満たす可能性がある。

ニュートリノ生成の主なメカニズムは、加速された陽子が光子と相互作用して中性パイ中間子を生成し、その崩壊過程でニュートリノが放出される「光子-パイオン相互作用 ($p \gamma$ プロセス)」である。このモデルでは、ガンマ線とニュートリノのエネルギーフラックスが比例関係にあることが期待される。

IceCube と KM3NeT による検出の可能性

フレア時のスペクトルエネルギー分布 (SED) を基に、IceCube および KM3NeT によるニュートリノ検出の可能性が評価された [16]。3C 454.3 のフレア期間中、IceCube でのニュートリノ検出率は 1% 未満であり、現行の観測機器では決定的な検出は困難であるとされた。一方、KM3NeT では約 10% の検出確率が示されており、より高感度な次世代観測装置による検出の可能性が期待される。

特に、フレア期間が長期化するほど、ニュートリノ生成量が増加し、検出の可能性が高まることが示唆された。実際、3C 454.3 の月単位のフレアでは、IceCube や KM3NeT での検出が現実的な範囲内に入る可能性があることによりチャンネル 2 での追尾観測によりニュートリノ源として特定されることが期待され、本研究で作成したリストに優先的に残すべき天体であ

と考える。

第 6 章

リスト改変の現状と今後の展開

6.1 複数リストの統合と総天体数

Chiba リストの天体数が 249 天体まで絞られた後、我々は Padova 大学の IceCube 研究チームと共同で追尾観測用ガンマ線源リストの作成に取り組むことになった。Padova 大学の IceCube 研究チームを以下 Padova チームとする。

最終的に Chiba リストと Padova 大学による追尾観測用ガンマ線源リストは統合され、一つのガンマ線源リストとして公開されるものとなる。

Chiba リスト作成において、観測可能性を考慮した天体数の目安が 180 とされていた背景には、チャンネル 2 のマルチプレットニュートリノイベントが非公開（プライベート）であり、ニュートリノイベントのアラートが IACT（大気チェレンコフ望遠鏡）にメールで送信される仕組みが存在していたことが影響している。このプロセスに伴う手間を考慮し、実際の運用上適当な数として 180 が設定された。

今回作成される GFU チャンネルのマルチプレットのニュートリノイベントはパブリックに GCN の下で公開される予定であるため、天体数の上限が増えた。

ここで、天体数の上限を考慮する基準を説明する。

ガンマ線源リストに含まれる天体が 1 つであり、その天体がチャンネルのマルチプレットニュートリノイベントと 5 シグマの有意性を持つ相関を示したと仮定する。この条件のもとで、GFU リストに含まれる天体数が増加した場合に、特定の天体がニュートリノイベントとシグマの有意性を持つ相関を示した際の有意性がどのように変化するかを計算した結果を示している。

この有意性を確保するために上限の天体数は約 500 程度と考えられている。

表 6.1 チャンネル 2 のニュートリノイベントとあるガンマ線源の相関の有意度と追尾観測用ガンマ線源のリストの天体数の関係。

N Sources	Trial corrected P-value	Significance
1	2.9×10^{-7}	5.00 sigma
200	5.7×10^{-5}	3.86 sigma
350	1.00×10^{-4}	3.71 sigma
400	1.147×10^{-4}	3.68 sigma
450	1.290×10^{-4}	3.65 sigma
500	1.434×10^{-4}	3.62 sigma
600	1.720×10^{-4}	3.59 sigma

6.2 Padova チームによる追尾観測用ガンマ線源リストの作成方法

以降、Padova チームの作成するリストを Padova リストとする。

Padova チームは既知のガンマ線源を選定する際に、Fermi-LAT による観測データを基にした 4LAC カタログを利用した。4LAC は、2008 年から 8 年間にわたる観測で得られた活動銀河核 (AGN) のデータを収録しており、主に高エネルギーガンマ線 (50 MeV \sim 1 TeV)

における AGN のフラックス、変動性、スペクトル特性を網羅している。ここで、AGN について説明する。AGN は中心に超大質量ブラックホールを持ち、その周囲に降着円盤を伴う天体であり、その降着円盤やジェット内で粒子が加速され、高エネルギーの放射を生成する。この過程で、宇宙線の生成やニュートリノ、そしてガンマ線が共生成される。Padova チームは、宇宙線のハドロン加速プロセスにおいて、ニュートリノと GeV 領域で観測されるガンマ線が相互に関連し合うという仮説に基づき解析を行っている。この解析手法を採用している背景には、Padova 大学が GeV 領域のガンマ線とニュートリノの相関性に注目し、AGN を主要対象としてリストの作成を進めているという方針がある。そのため、特に AGN を対象とする 4LAC カタログがリスト作成の基盤として選ばれた。これに加えてジェットで生成されたガンマ線が吸収されていて直接観測されていない AGN もリストに加えるという目的の下、Swift-BAT (X 線観測衛星) によって X 線で観測され BASS (BAT AGN Spectroscopic Survey) にカタログ化される天体が追加として加えられた。次に、ガンマ線で直接観測されていない AGN 以外の天体 (銀河系内の X 線連星や赤外銀河など) もニュートリノの発生源として考慮されたため、これらもリストに入れるために Swift-BAT のデータから天体が選定された。

6.2.1 Chiba リストと Padova リストの一致度

この時点において、Padova リストの天体数は 350 個で、Chiba リストの 249 個の天体と Padova リストの 350 個の天体において共通しているものの数を調べたところ結果は 70 個であった。

そのうち 53 個は Chiba リストの 4FGL 天体と padova リストの共通する天体の数で、17 個は Chiba リストの TeVCat 天体と padova リストの共通する天体の数であった。

最終的に Chiba リストと Padova リストを統合したリストを作ることを考慮すると両者のリストにおいて共通する天体数を大きくする必要があったため双方によるリスト作成の手法において相互の調整と妥協が求められる状況であった。

意見の相違は主に以下の 2 点において生じた。

- IceCube の感度を天体選定に考慮すべきかどうか

Padova チームは使用したカタログの天体の中からリストの天体が選定される際に天体のフラックスと IceCube の感度におけるニュートリノに対する感度を考慮した。

図 6.2 から、特に南半球で $\sin(\delta)$ が -0.5 以下になる領域では、IceCube のニュートリノ感度が著しく低下していることが分かる。Padova チームは使用したカタログの天体のフラックスを天体の赤緯における IceCube の感度で割りこれを FoM として定義した (式 6.1)。そして、Figure of Merit (以下 FoM) の値に閾値を設定し、これを超える値を持つ天体をリスト

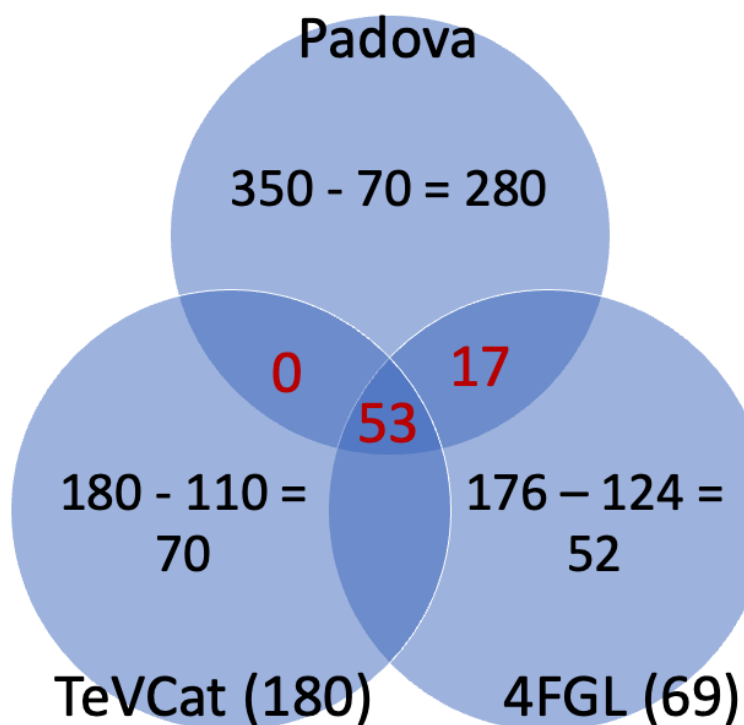
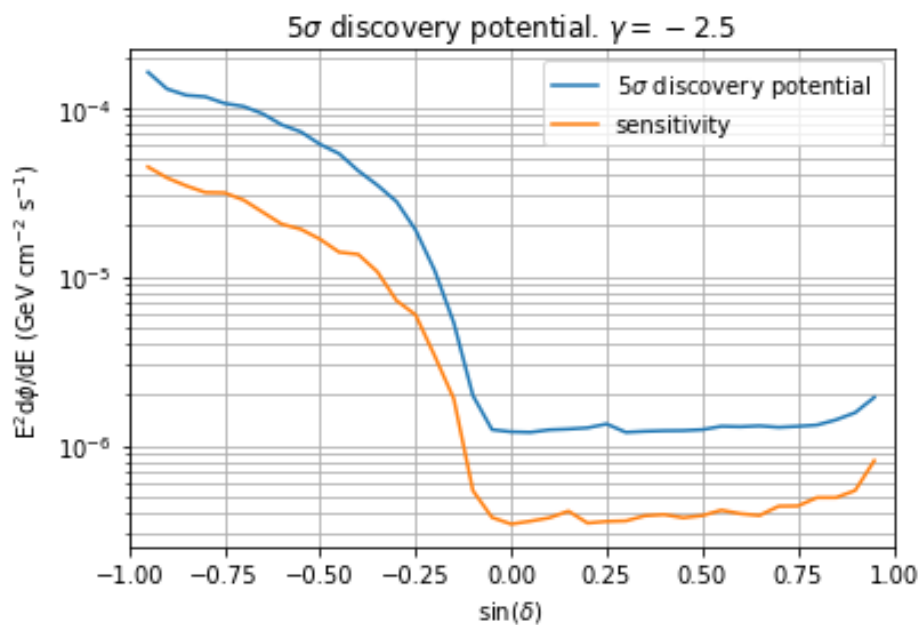


図 6.1 両者のリストの共通の天体数

図 6.2 $\gamma = -2$ の場合の IceCube のニュートリノに対する 5σ 検出可能性と感度曲線。

に残した。この手法によって、ガンマ線フラックスの強度と IceCube のニュートリノに対する感度に基づいてリストに残す天体の優先順位をランク付けすることを目的としている。具体的には、IceCube の感度が高い領域に位置する天体は FoM の値が大きくなり、優先的に選定される。一方で、IceCube の感度が低い領域にある天体は、ガンマ線フラックスが高い場合でも相対順位が低下する。ガンマ線源リストの天体数には上限が設定されており、アラートが比較的多くなる赤緯の領域に残った天体数を割り当てることが手法の目的である。IceCube のニュートリノに対する感度は、IACTs に送られるアラート数を決める際に影響を与える要素の一つである。しかし、ガンマ線リストを作成する過程でこの感度を考慮したとしても、実際にアラートが発生する数自体には影響を与えない。そのため、私たちはガンマ線源リストの作成において、IceCube のニュートリノ感度を必ずしも考慮に入れる必要はないと判断した。一方で、Padova チームは感度を基に FoM を算出し、アラートの数が比較的多くなる座標に位置する天体をリストに入れることを重視していた。

$$\text{FoM} = \frac{\gamma\text{-flux}}{\text{IC-sensitivity}} \quad (6.1)$$

ただし $\gamma\text{-flux}$ はガンマ線源のフラックス、IC-sensitivity は IceCube のニュートリノに対する感度である。

- 銀河系天体と UnID をリストに含むべきかどうか

我々は Chiba リストに銀河系天体をリストに含むべきであると考えた。これは、UnID 天体がニュートリノ源として期待される天体との関連性が指摘されている他、放射のメカニズムは未だ未解明であり、未知のニュートリノ源である可能性を持っているからである。また、LHAASO や HAWC が観測した多くの PeV ガンマ線源が UnID に分類されていることから、これを除外すると PeV コミュニティ全体を無視することになるという懸念があった。

一方、Padova チームは、UnID 天体については放射のエネルギー源や加速プロセスが未解明でないため、ニュートリノや高エネルギーガンマ線と関連しているかどうかを評価するのは困難であると主張した。また、これらの天体がニュートリノ放射に寄与している可能性を裏付ける理論モデルが不足している点も指摘し、不確実性の高い天体をリストに含めることへの慎重な姿勢を示した。

以上のように、UnID 天体をリストに含めるべきかについては、未知のニュートリノ源としての可能性を重視するか、不確実性の高さを重視するかで見解が分かれる結果となった。

6.3 IceCube のニュートリノ検出感度の考慮による天体の選定

議論を重ねる中で、特に南半球では両者のリストに共通する天体数が少なく、さらにアラートが比較的少ない赤緯に対応する領域で感度が低い天体数を割り当てることが適切ではないと

いう意見が出された。これを踏まえて、IceCube の赤緯ごとの感度を考慮し、Chiba リストに含まれる天体数を減らす方針を採用した。これにより、南半球域の天体を Chiba リストから減らすことで両者のリストで共通の天体数の割合を増やすことができると思われる。

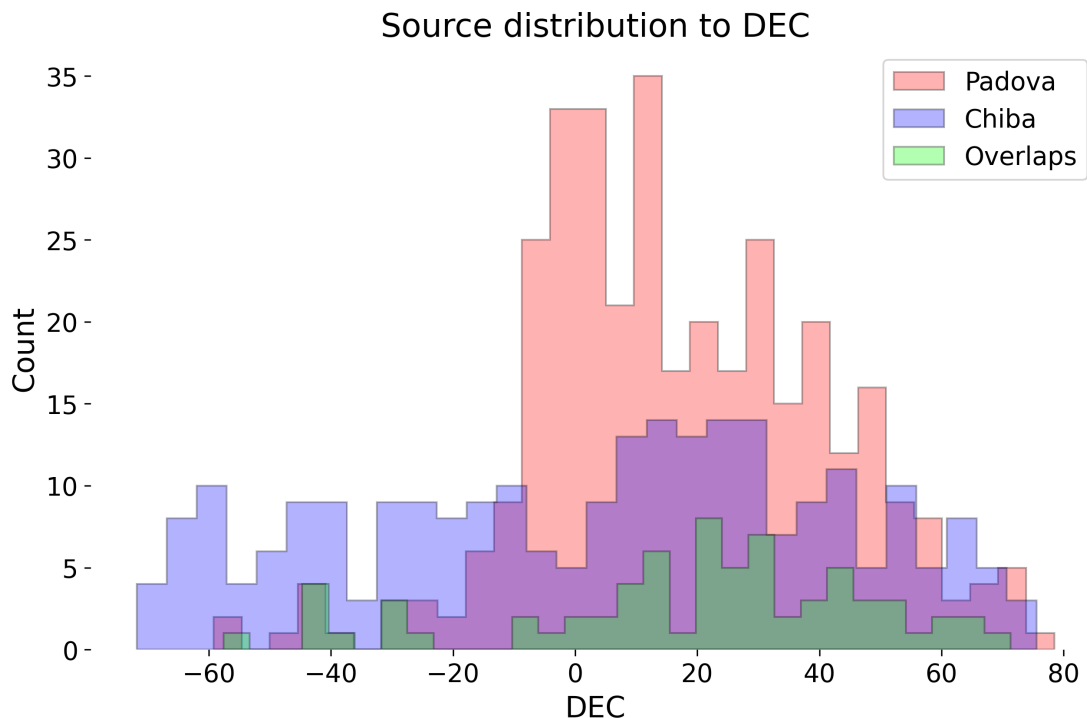


図 6.3 北半球、南半球それぞれにおける両者の共通する天体数の割合。

6.3.1 4FGL 天体の選定

Chiba リストのうち、4FGL カタログからは 69 天体が選ばれた。

以下、赤緯における IceCube の感度を考慮し、感度が比較的悪い領域における 4FGL から選ばれた天体の数を減らした方法を説明する。

まず、4FGL カタログに収録されている天体のガンマ線フラックスを計算した。この際、各天体に適したスペクトラルモデルと EBL モデルを適用した。この方法は、4.1.2 節で採用された計算手法と同様である。フラックスはガンマ線のエネルギーに依存する。

次に、IceCube のニュートリノ感度を規格化するため、感度の全ての値をその最小値で割った。

ガンマ線のフラックスを規格化し IceCube の感度で割った。IceCube の感度は対応するガンマ線源の赤緯における感度を用いている。

チェレンコフ望遠鏡のすべてのエネルギー領域においての感度をフラックス (規格化された IceCube 感度で割られた) の値で割り算した値を計算し、この値の最小値を天体ごとに調べた。

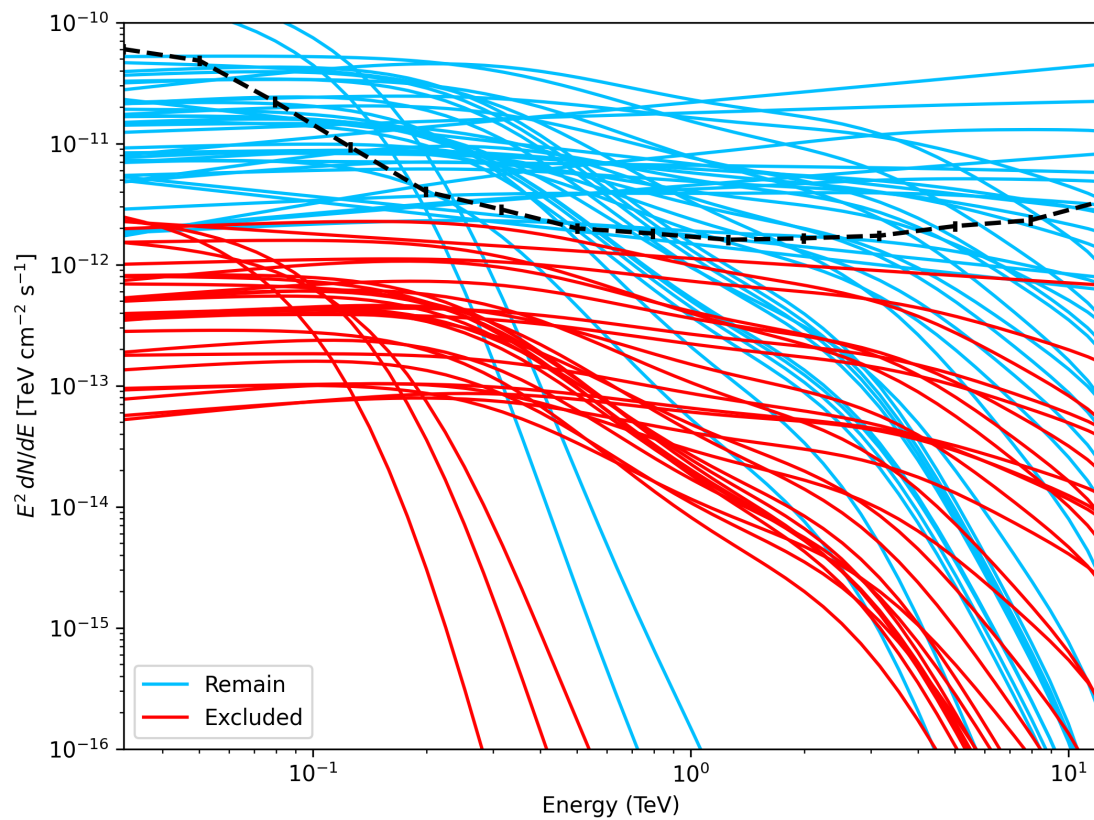


図 6.4 IceCube 感度で割られたフラックスの曲線：赤の曲線は IACTs 感度を下回ったもの。青の曲線は IACTs 感度を上回ったもの。IACTs の 2.5 時間の感度曲線：黒の波線。横軸はエネルギー。

この値が 6.5 における ratio norm であり、IceCube 感度で割られたガンマ線源のフラックスがフレア時に何倍されることで IACTs の感度曲線に届くかを示している。

図 6.5 の縦軸が 1 以上の天体、つまり FoM が 1 以下であり、IceCube 感度で割られたフラックスが IACTs の感度曲線に届かなかった天体 32 天体をリストから除いた。

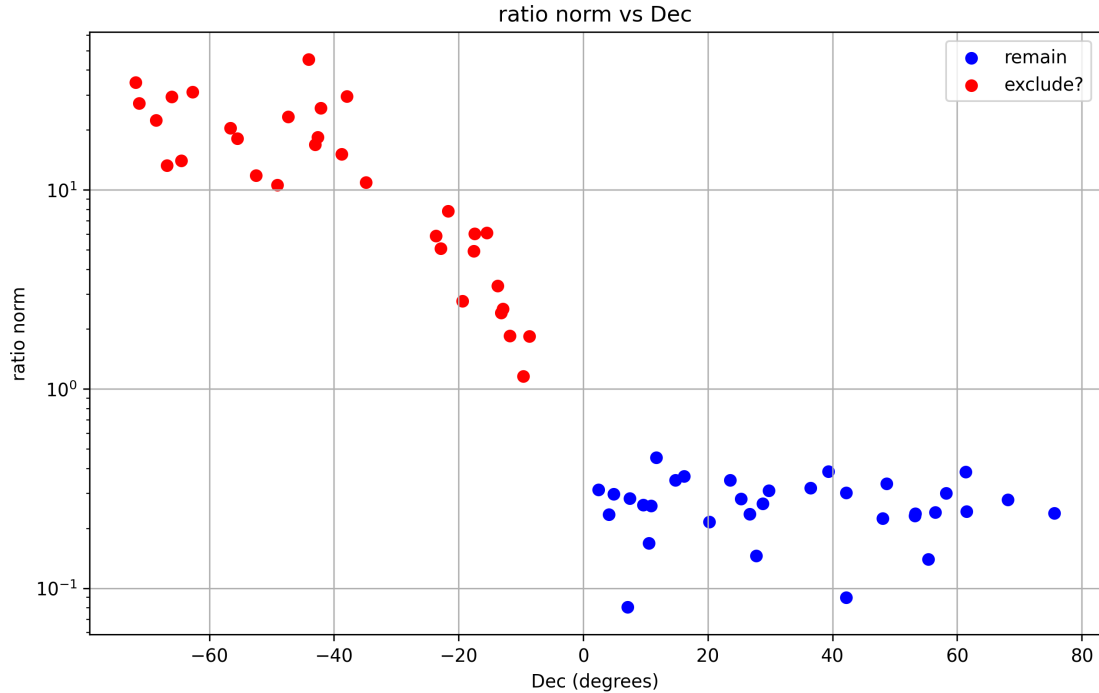


図 6.5 横軸は赤緯、縦軸は天体毎に計算された FoM の値。

図 6.5 により、これによって除かれた天体の赤緯の全てが -30 度以下であり、天体数の絞り込みにおいて IceCube の感度が考慮されていることがわかる。

6.3.2 TeVCat 天体の選定

3.3.5 までで述べてきたように、Chiba リストのうち、TeVCat カタログからは 180 天体が選ばれた。

以下、赤緯における IceCube の感度を考慮して TeVCat から選ばれた天体の数を更に減らした方法を説明する。

3.3.4 のプロセスにおいて位置エラーを考慮し銀河面にある天体の数を減らす前の 212 天体からなる TeVCat を用いた。銀河系天体は IceCube の感度が比較的悪い南天により多く、IceCube の感度を考慮して天体数を減らすことにより、密集している銀河面にある天体を 3.3.2 で説明した位置エラーを考慮して銀河系天体を減らす方法よりも体系的に銀河系天体を減らすことができるという提案を受けた為である。

各天体のフラックスを、その天体が位置する赤緯における IceCube の感度で割ることで FoM を算出した。その結果を図 6.6 と表 6.2 に示した。FoM の値に基づいて閾値を設定し、この閾値を超える天体のみをリストに残した。また、FoM の値はすべて最小値で割ることで規格化されている。

TeVCat カタログにはフラックス値が記載されていないため、代わりに Crab Unit を用い

た。ただし、Crab Unit の値がない天体が 68 天体あったため FoM の値はそれ以外の 144 天体に対して計算されている。Crab Unit の値がない天体が 68 天体は、表 6.3 で示した。

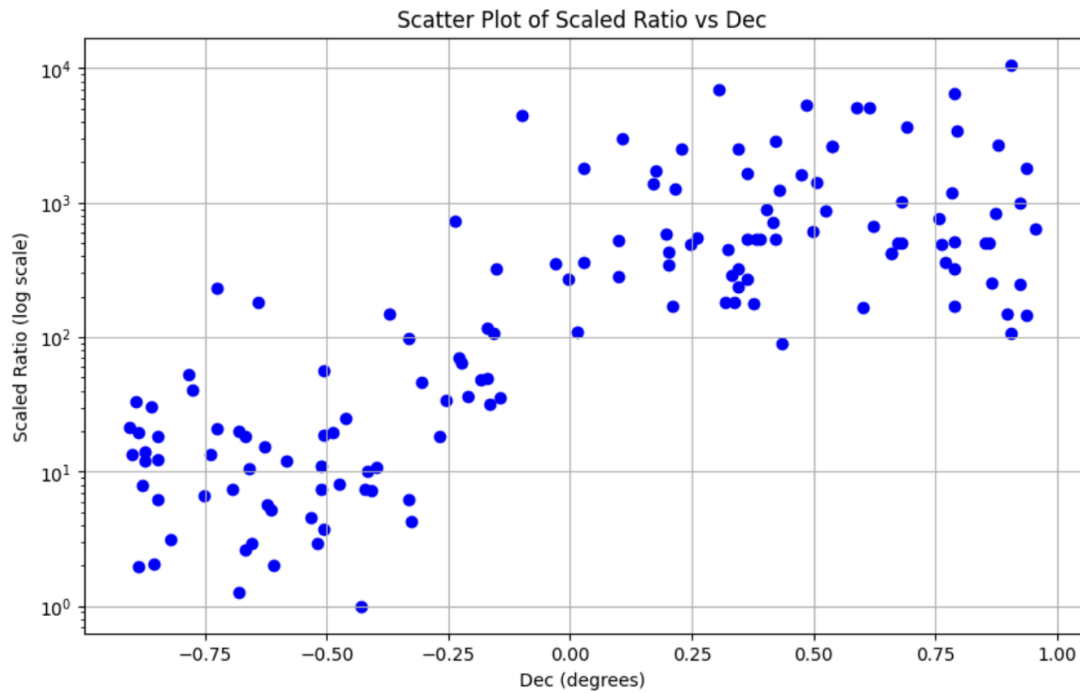


図 6.6 TeVCat の Crab Unit の値を持つ 144 天体に対して計算された FoM。横軸は赤緯。

表 6.2: TeVCat の Crab Unit の値を持つ 144 天体に対して計算された FoM。横軸は赤緯。

Name	DEC	Crab Frac	FoM
NGC 253	-25.29038888888889	0.0021	1.0
1ES 1312-423	-42.596944444444446	0.005	1.2594735147452043
HESS J1507-622	-62.35	0.01	1.965025304341115
SNR G349.7+00.2	-37.44433333333333	0.007	2.031081450074514
HESS J1018-589 A	-58.945277777777775	0.01	2.0399175165486736
SN 1006 NE	-41.803055555555555	0.01	2.5969350082980887
1RXS J101015.9-311909	-31.305111111111112	0.008	2.9000544942968296
1ES 2322-409	-40.66	0.011	2.947897014254589
SNR G327.1-01.1	-55.090833333333336	0.015	3.127197014993859
HESS J1741-302	-30.377055555555556	0.01	3.7274924688973

(次ページへ続く)

(続き)

Name	DEC	Crab Frac	FoM
SHBL J001355.9-185406	-18.891388888888887	0.006	4.278034771762454
PKS 0548-322	-32.27025	0.013	4.549656604949955
CTB 37B	-38.2	0.018	5.170298601498283
HESS J1718-385	-38.55	0.02	5.687622885850408
HESS J1026-582	-58.2	0.03	6.163831583812548
KUV 00311-1938	-19.35	0.009	6.24400010978308
PKS 2005-489	-48.83111111111111	0.03	6.653776243797672
PKS 0301-243	-24.126627777777777	0.014	7.260292968693419
PKS 0447-439	-43.836666666666666	0.03	7.336519693985639
Terzan 5	-24.808333333333334	0.015	7.350914250952918
H 2356-309	-30.622972222222224	0.02	7.351133771231171
SNR G292.2-00.5	-61.4	0.04	7.918242262284866
SNR G000.9+00.1	-28.151666666666664	0.02	8.021599922343409
AP Librae	-24.371944444444445	0.02	10.095274096009543
HESS J1708-410	-41.09	0.04	10.551073539205037
1ES 1101-232	-23.495833333333334	0.02	10.837506708593184
HESS J1746-308	-30.841118	0.03	11.026700656846756
HESS J1458-608	-60.780277777777776	0.06	11.965874780736382
PKS 0625-35	-35.497222222222222	0.04	12.09736784599139
HESS J1503-582	-58.26111111111111	0.06	12.327663167625095
PSR B1259-63	-63.831388888888895	0.07	13.556101158649804
HESS J1634-472	-47.27	0.06	13.560940537762674
Kookaburra (PWN)	-60.76	0.07	13.960187244192449
PKS 1440-389	-39.139166666666667	0.054	15.205307995576169
HESS J1702-420	-42.015833333333333	0.07	18.178545058086623
SNR G015.4+00.1	-15.466944444444444	0.018	18.308176624512026
Westerlund 2	-57.79	0.09	18.49149475143764
HESS J1745-303	-30.370555555555555	0.05	18.6374623444865
Galactic Centre	-29.00611111111111	0.05	19.462307916920004
RCW 86	-62.44888888888889	0.1	19.65025304341115
Centaurus A	-43.004166666666667	0.08	20.151576235923272

(次ページへ続く)

(続き)

Name	DEC	Crab Frac	FoM
HESS J1640-465	-46.57305555555556	0.09	20.7362480592812
HESS J1356-645	-64.5	0.11	21.14939913204573
TXS 1515-273	-27.52622222222222	0.06	25.0293315230385
MSH 15-52	-59.1575	0.15	30.36728752635208
HESS J1832-093	-9.376666666666669	0.01	31.93313834594784
HESS J1303-631	-63.1775	0.17	33.16193302208035
LS 5039	-14.825	0.03	34.03661049566281
HESS J1832-085	-8.511388888888888	0.008	35.17964205807401
1ES 0347-121	-11.977222222222222	0.02	35.957787732237165
HESS J1616-508	-50.9	0.19	40.65652163956452
HESS J1813-178	-17.84	0.06	46.65987360047718
HESS J1833-105	-10.571666666666667	0.02	48.805026321948645
HESS J1828-099	-9.992722222222222	0.017	49.222929986258045
HESS J1614-518	-51.82	0.25	53.29449893581136
PKS 2155-304	-30.221666666666664	0.15	55.912387033459495
HESS J1813-126	-12.687111111111111	0.042	64.74030396893225
HESS J1826-130	-13.066666666666666	0.049	70.50209363409668
RBS 1366	25.72395	0.005	89.08473911274434
HESS J1809-193	-19.3	0.14	97.1288905966257
PKS 1510-089	-9.106	0.03	106.78393669665464
3C 58	64.85	0.0065	107.77859375335572
1ES 0414+009	1.089	0.006	108.79104648808038
HESS J1831-098	-9.9	0.04	115.81865879119542
M 82	69.67944444444444	0.009	147.2489065983507
HESS J1804-216	-21.7	0.25	148.83299425690595
Tycho	64.13	0.009	149.44684686533233
VER J2016+371	37.19777777777777	0.01	168.1769024046701
PGC 2402248	51.89830555555555	0.01	169.72657275600716
1ES 1440+122	12.003055555555555	0.01	169.9801027667561
Crab Pulsar	22.0145	0.01	179.20871250881905
3C 264	19.60638888888889	0.01	180.5960842612613

(次ページへ続く)

(続き)

Name	DEC	Crab Frac	FoM
RBS 0413	18.761666666666667	0.01	181.50491306250672
RX J1713.7-3946	-39.76	0.66	182.2520164090637
RX J0852.0-4622	-46.36666666666667	1.0	230.4027562142356
OJ 287	20.099691666666665	0.013	234.38370862328355
RX J1136.5+6737	67.61777777777777	0.015	247.65124920623657
1ES 0033+595	59.79	0.015	250.88490237839704
HESS J1943+213	21.302222222222223	0.015	269.3010286989976
IGR J18490-0000	-0.04111111111111111	0.015	270.8695495417379
TXS 0506+056	5.7025000000000001	0.016	281.87325776127665
1ES 1741+196	19.546388888888889	0.016	289.43682278930856
HESS J1834-087	-8.76	0.08	321.6365511109351
1ES 0806+524	52.316666666666667	0.019	322.4804882364136
1ES 0229+200	20.2725	0.018	324.53128886300794
H 1722+119	11.870833333333334	0.02	342.2709885785212
HESS J1848-018	-1.7923055555555555	0.02	355.7946451728866
1ES 1727+502	50.219444444444445	0.021	356.76300441416544
RGB J0152+017	1.7778611111111111	0.02	363.27568897257294
NGC 1275	41.511666666666666	0.025	420.8393680211132
IC 310	41.324722222222223	0.025	420.8393680211132
RBS 0723	11.563888888888889	0.025	427.8387357231514
SNR G054.1+00.3	18.87	0.025	453.0023887018117
W 51	14.191	0.03	490.087851016684
RGB J2056+496	49.66861111111111	0.029	491.7661848764309
RGB J0710+591	59.15	0.03	502.4988348642418
Cassiopeia A	58.80722222222222	0.03	503.229986495224
H 1426+428	42.6725	0.03	503.2407291589658
BL Lacertae	42.27777777777778	0.03	503.8281918779799
1ES 2037+521	52.33055555555556	0.03	509.17971826802153
HESS J0632+057	5.7941666666666665	0.03	528.5123583023936
1ES 0647+250	25.05	0.03	534.7924989357824
S2 0109+22	22.744166666666667	0.03	536.6537478938681

(次ページへ続く)

(続き)

Name	DEC	Crab Frac	FoM
IC 443	22.503055555555555	0.03	537.1395026285738
4C +21.35	21.379444444444445	0.03	538.6020573979952
RX J0648.7+1516	15.27	0.033	545.9409174804762
PG 1553+113	11.194722222222222	0.034	583.7678106884962
1ES 1215+303	30.101666666666667	0.035	618.3783960409256
CTA 1	72.98361111111112	0.04	644.1483492215817
B3 2247+381	38.43277777777777	0.04	673.9831625155836
MS 1221.8+2452	24.606666666666667	0.04	713.2461924265323
HESS J1825-137	-13.77638888888889	0.54	728.465893725138
1ES 1011+496	49.43361111111111	0.0453	766.7618263794158
SNR G106.3+02.7	60.87694444444445	0.05	835.0714782541298
B2 1811+31	31.73822777777778	0.05	877.7017834562163
PKS 1424+240	23.794444444444448	0.05	892.8081156327867
1ES 0502+675	67.62333333333332	0.06	990.6049968249462
3C 66A	43.043194444444445	0.06	1006.4814583179316
1ES 2344+514	51.71361111111111	0.07	1189.4589164858462
S3 1227+25	25.301944444444445	0.07	1247.5176678409568
M 87	12.3975	0.075	1266.3015560545848
OT 081	9.650202777777778	0.08	1385.2120403534627
1ES 1218+304	30.191388888888888	0.08	1411.466050892372
W Comae	28.233055555555556	0.09	1599.0443788263087
VER J0521+211	21.214277777777777	0.092	1651.7129760205185
HESS J1912+101	10.151666666666667	0.1	1727.854252282559
Markarian 180	70.1575	0.11	1799.7088584242863
PKS 0736+017	1.6033333333333335	0.1	1816.3784448628649
PKS 1413+135	13.339916666666667	0.15	2499.085125886487
RGB J2243+203	20.32	0.14	2524.132246712285
OP 313	32.34549527777778	0.15	2606.202258697393
B2 1420+32	32.38623333333333	0.15	2606.202258697393
LS I +61 303	61.25694444444444	0.16	2668.363052182635
PKS 1441+25	25.028888888888886	0.16	2852.22666099084

(次ページへ続く)

(続き)

Name	DEC	Crab Frac	FoM
MGRO J1908+06	6.268611111111111	0.17	2990.491299433161
LHAASO J0341+5258	52.97	0.2	3390.617907831912
MAGIC J2001+435	43.879	0.22	3681.8459629711656
HESS J1841-055	-5.55	0.4	4423.518413194593
S3 0218+35	35.93722222222222	0.3	5038.949399464871
Markarian 421	38.19472222222222	0.3	5051.680808109969
TON 0599	29.245555555555555	0.3	5315.225429596103
LHAASO J2108+5157	51.95	0.38	6449.609764728272
LHAASO J1929+1745	17.75	0.38	6920.404115890952
1ES 1959+650	65.14861111111112	0.64	10612.046154176562

TeVCat のガンマ線源選定において天体のフレアによってそのフラックスが 10 倍されることが考慮されていなかったため、4FGL の FoM を 1 としたことに対応するように、TeVCat の FoM を 10 と設定した。これにより FoM が 10 より小さい天体が除かれた。

Crab Unit の値がない天体のうち、Markarian 501、Vela pulsar、Geminga pulsar、RS Oph、Cyg X-1、SS 433、PSR J2032 といくつかの HAWC 天体はニュートリノ源として可能性の高い天体であるためリストに残す必要がある。それを踏まえ、IceCube の感度が悪くなる赤緯が -45 度以下に位置する天体を 12 個除いた。それらの天体を表 6.4 に示した。これによって Markarian 501 をはじめとするニュートリノ源として可能性の高い天体を除く事にはならなかった。

6.4 銀河系天体の扱い

IceCube の感度を考慮し、FoM の値を計算することで Chiba リストと Padova リストの共通する天体数の割合を増やしたが、依然として Chiba リストに含まれる銀河系天体の数を減らすべきか否かの議論が続いている。

我々は銀河系天体のさらなる削減については現段階で以下のものを提案した：

- 時間変動の振幅が小さい銀河系の低光度の天体を除外する。
- UNID 天体を 1 つ 1 つ確認し、多波長観測に基づく対応が存在するかを検討する。
- 特に PeV 領域（主に HAWC による観測）の天体を選別する。

表 6.3 Crab Frac のない TeVCat 天体

天体名	天体名	天体名
LMC N132D	HAWC J0635+070	3HWC J1739+099
30 Dor C	2HWC J1829+070	2HWC J1914+117*
LMC P3	W49A	2HWC J0700+143
HESS J1427-608	3HWC J1743+149	2HWC J0819+157
Eta Carinae	3HWC J1935+213	3HWC J1936+223
SNR G318.2+00.1	2HWC J1918+159	HAWC J0543+233
PKS 0903-57	2HWC J1938+238	2HWC J1949+244
HESS J1534-571	3HWC J1951+266	GB6 J1058+2817
HESS J1626-490	2HWC J1040+308	3HWC J2005+311
HESS J1632-478	3HWC J2023+324	3HWC J2010+345
Westerlund 1	Cygnus X-1	LHAASO J0621+3755
Vela Pulsar	MilagroDiffuse	RGB J0136+391
HESS J1731-347	Markarian 501	PSR J2032+4127
1RXS J023832.6-311658	3HWC J2022+431	3HWC J2043+443
VER J1746-289	TXS 0210+515	S4 0954+65
MAGIC J1746.4-2853	S5 0716+714	VER J2019+368

6.4.1 Super Nova Remnant、TeV Halo、Pulsar Wind Nebulae

このうち特に変動性の指標に着目し Super Nova Remnant、Pulsar Wind Nebulae、TeV Halo を比較する。以下、Super Nova Remnant を SNR、Pulsar Wind Nebulae を PWN とする。まず、SNR は、超新星爆発によって生じた非常に広がった構造を持つ天体である。爆発の衝撃波が星間ガスに衝突し、その過程で電子が加速される。この衝撃波加速により、高エネルギー宇宙線やシンクロトロン放射（シンクロ X 線）、さらには中間子崩壊によるガンマ線が生成される。SNR の広大な構造から、時間スケールは数千年に及び、比較的長周期における時間変動性を持つ。

一方、PWN は SNR の中心部に形成される領域であり、爆発後に残った伴性天体、すなわ

天体名	赤緯
LMC N132D	-69.64722222222220
30 Dor C	-69.18611111111110
LMC P3	-67.58638888888890
HESS J1427-608	-60.85
Eta Carinae	-59.66572222222220
SNR G318.2+00.1	-59.46666666666670
PKS 0903-57	-57.58493972222200
HESS J1534-571	-57.1
HESS J1626-490	-49.08694444444450
HESS J1632-478	-47.82

表 6.4 赤緯が-45 度以下により除かれた天体

ちパルサーによって駆動されている。パルサーの自転と磁場によって、高エネルギー粒子が放出され、それが周囲の星間物質や磁場と相互作用して電波の構造を形成する。PWM はシンクロトロン放射が主体なメカニズムであり、ラジオ波から X 線まで幅広いエネルギー帯域で観測される。PWM は SNR から中心部の磁気に近いいため、変動の時間スケールは比較的短く、数年から数十年程度で変動が観測されることが特徴である。

これに対し、TeV Halo は、PWM と SNR の中間的な性質を持つ広がった領域であり、特に TeV エネルギー帯で輝く領域として特徴づけられる。PWM から外側に広がった高エネルギー粒子一群が、星間磁場や周囲の光子との相互作用によって、逆コンプトン散乱や中間子崩壊を通じてガンマ線を生成する。TeV Halo は SNR よりも小さな時間変動を持つ。また普通の PWN よりも、TeV において観測された PWN のほうが時間的に大きな変動を示す可能性があるということが考えられるが、一般に PWM と TeV Halo の時間変動性は個別の天体に依存し、比較することが難しいため今後議論していく方針である。以上より、少なくとも長期的にしか変動しない SNR を除くことになった。

6.4.2 個々の天体とそのタイプの詳細な評価

銀河系天体のうち、SNR を Chiba リストから除外することに合意した後、他のタイプの天体について、ニュートリノ源としての評価とそれに関する議論が行われた。

我々の見解は以下のものである。

PWM は、一部のパルサーと関連する天体群であり、高エネルギー放射やニュートリノの発生源として注目されている。Chiba リストでは、13 個の PWM が含まれているが、PWM の

時間変動は TeV 領域で観測されたものの方がそれよりも低エネルギー側で観測されたものに比べて時間変動が大きくなる可能性があり、これがよってニュートリノ源である可能性に影響する可能性があるがまだよくわかっていない。

TeV Halo は比較的広い分類であり、Geminga や Vela のような有名な TeV Pulsar を含む 3 つの天体が含まれる。PWM/TeV Halo カテゴリに分類される HESS J1825-137 や LHAASO J0621+3755 も、リストに残るべき天体と考える。また、これらのうち 3 つの TeV Halo はすべて HAWC 観測による天体であり、リストに残すべき天体として議論されている。これらの天体はニュートリノ源としての可能性があり、特に TeV コミュニティにおける重要度が高い。

Dark 天体は UNID 以上にその放射のメカニズム、理論モデルに未解明な点が多い。未解明の放射源としてさらなる調査が必要とされる。

UNID 天体については、47 個のうち 21 個程度が多波長観測 (MWL) に基づく明確な対応天体を欠いているため、議論を経てリストから除外された。さらに 10 個の天体がリストから除外される候補となり、合計で 31 個が除外可能とされた。一方で、13 個の天体についてはリストに残すべきだと議論された。これには Galactic Centre が含まれる。これらの天体は、たとえ UNID として分類されていても、TeV や PeV の高エネルギー天体物理学を研究するコミュニティにおいて、これらをリストから完全に削除することは難しいと考える。

リスト全体から 40 個程度の天体が削減される見込みとなった。この中には 9 つの PeV 天体 (5 つの HAWC、3 つの LHAASO、1 つの Milagro) が含まれた。これらの天体を含めることについては IceCube や TeV コミュニティ間で意見が分かれる可能性があるが、TeV Halo や DARK、PWM を中心にした評価が妥当であると考えた。

第 7 章

まとめと展望

本研究ではニュートリノ源特定のためのガンマ線追尾観測に使用されるガンマ線源のリストの作成をした。以前までに作られたガンマ線源のリストの作成過程における課題と現状のニュートリノ源発見をする上での課題を踏まえてリストの作成方法を改善した。これによって新たなニュートリノ起源天体の特定につながると期待している。今後はリストの中の個々の天体を可能性のあるニュートリノ源として評価し、リストの内容をアップデートして公に公開する計画である。

謝辞

本研究は、千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターニュートリノ天文学研究室 (ICEHAP) にて行われました。本研究を遂行するにあたり、日頃から御支援と御指導をいただきました指導教官である野田准教授、解析方法や実験について御指導を頂いた岩切助教に感謝申し上げます。吉田教授、石原教授、清水助教、岩切助教、研究員の方々には、定期ミーティングなどで適切なアドバイスを頂きました。また、同研究室の学生メンバーの皆さん、ICEHAP グループの高橋恵さんにも多くのご支援をいただきました。皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] I.-G. C. M. G. A. et al., “IceCube-Gen2: The Window to the Extreme Universe,” *Journal of Physics G*, vol. 48, no. 6, p. 060501, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.04323>
- [2] 研究概要 — cta-japan へようこそ！ [Online]. Available: <http://www.cta-observatory.jp/overview.html>
- [3] Icecat-1, icecube’s first event catalog of neutrino “track” alerts. [Online]. Available: <https://icecube.wisc.edu/news/research/2023/04/icecat-1-icecubes-first-event-catalog-of-neutrino-track-alerts/>
- [4] M. G. Aartsen *et al.*, “The Contribution of *Fermi*-2LAC Blazars to Diffuse TeV-PeV Neutrino Flux,” *The Astrophysical Journal*, vol. 835, no. 1, p. 45, 2017. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/835/1/45>
- [5] T. Yuan, “Neutrinos from near and far: Results from the IceCube Neutrino Observatory,” *ISVHE- CRI 2022*, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2208.01226>
- [6] A. D. A. D. D. H. H. V. S. P. A. S.-L. Justin D. Finke, Marco Ajello, “Modeling the Extragalactic Background Light and the Cosmic Star Formation History,” *Astrophysics of Galaxies*, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac9843>
- [7] T. IceCube, “Multi-messenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A,” *Science* 361, eaat1378 (2018), 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1807.08816>
- [8] LAT 8-year Source Catalog (4FGL). The Large Area Telescope (LAT) on board NASA’s Fermi Gamma-ray Space Telescope provides the fourth full catalog of LAT sources, based on 8 years of survey data and the 50 MeV-1 TeV range. [Online]. Available: https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/8yr_catalog/
- [9] Tevcat - tev gamma-ray source catalog. An online, interactive catalog for

- very-high-energy (VHE) gamma-ray astronomy, maintained by Scott Wakely and Deirdre Horan. Last updated on 23 January 2025. [Online]. Available: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/w3browse/all/tevcats.html>
- [10] S. A. A. A.-C. I. A. N. A. C. L. A. A.-C. A. A. A.-E. C. A. e. a. H. Abe, K. Abe, “Observations of the Crab Nebula and Pulsar with the Large-sized Telescope Prototype of the Cherenkov Telescope Array,” *The Astrophysical Journal*, vol. 956, no. 2, p. 80, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ace89d>
- [11] R. A. et al., “Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane,” *Science*, vol. 380, no. 6652, pp. 1338–1343, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/science.adc9818>
- [12] I. Collaboration. (2023) Icecat-1: Icecube event catalog of alert tracks. Harvard Dataverse, Version 4.0. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7910/DVN/SCRUCD>
- [13] E. d. O. W. D. F. T. Q.-C. L. M. K.-R. B. Y. S.-H.-N. H. M.-Y. X. Jian Li, Ruo-Yu Liu, “Investigating the Nature of MGRO J1908+06 with Multiwavelength Observations,” *The Astrophysical Journal Letters (ApJL)*, in press, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2102.05615>
- [14] N. F. A. Marinelli, B. Patricelli, “Hadronic flares and associated neutrinos for Markarian 421,” in *Extragalactic jets from every angle, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*, vol. 313, 2015, pp. 177–178. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/S174392131500215X>
- [15] K. Murase and E. Waxman, “Constraining High-Energy Cosmic Neutrino Sources: Implications and Prospects,” *Physical Review D*, vol. 94, no. 10, p. 103006, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.94.103006>
- [16] J. Robinson and M. Böttcher, “Neutrino Detection Rates from Lepto-hadronic Model Simulations of Bright Blazar Flares,” *The Astrophysical Journal*, vol. 977, no. 1, p. 42, December 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad8dce>
- [17] (2024) Cosmic ray spectra of various experiment. Accessed on January 16, 2025. [Online]. Available: <https://web.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html>
- [18] K. Greisen. (1966) End to the cosmic-ray spectrum?
- [19] Detection of a particle shower at the glashow resonance with icecube. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03256-1>
- [20] J. Li, R.-Y. Liu, E. de Ona Wilhelmi, D. F. Torres, Q.-C. Liu, M. Kerr, R. Buehler, Y. Su, H.-N. He, and M.-Y. Xiao, “Investigating the Nature of MGRO J1908+06 with Multiwavelength Observations,” *The Astrophysical Journal Letters (ApJL)*, in press, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2102.05615>

-
- [21] A. Marinelli, B. Patricelli, and N. Fraija, “Hadronic flares and associated neutrinos for Markarian 421,” *Extragalactic jets from every angle, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*, vol. 313, pp. 177–178, 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1505.03165>
- [22] J. Robinson and M. Böttcher, “Neutrino Detection Rates from Lepto-hadronic Model Simulations of Bright Blazar Flares,” *The Astrophysical Journal*, vol. 977, no. 1, p. 42, 2024. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ad8dce>
- [23] C. L. P. Collaboration and K. Noda, “Improvement of the follow-up observations of IceCube neutrinos by CTA LST,” *PoS ICRC2023*, vol. 2023, p. 1474, 2023. [Online]. Available: <https://pos.sissa.it/444/1474/>

付録 A

補足

A.1 4FGL カタログから選定された天体のリスト

表 A.1: 5 章の解析に用いた 69 天体からなる 4FGL リスト。

天体名	赤経	赤緯	タイプ
RBS 0042	4.6151	29.7792	bll
1RXS J005117.7-624154	12.8243	-62.7037	bll
TXS 0053-098	14.0874	-9.5997	bll
4C +67.04	17.5454	68.0973	bll
RX J0115.7+2519	18.9539	25.3324	bll
RX J0131.0+6120	22.7924	61.3372	bll
TXS 0134+579	24.4957	58.2494	bll
PMN J0209-5229	32.3493	-52.4799	bll
MG1 J021114+1051	32.8091	10.8569	BLL
NGC 1218	47.1105	4.1177	rdg
MG3 J032201+2336	50.5021	23.5993	bll
1RXS J032521.8-563543	51.3794	-56.591	bll
1H 0323+022	51.5724	2.4228	bll
4C +39.12	53.5823	39.3389	rdg
PKS 0336-177	54.8119	-17.6003	bll
PKS 0352-686	58.2738	-68.5282	bll
SNR G150.3+04.5	66.425	55.371	SNR

(次ページへ続く)

(続き)

天体名	赤経	赤緯	タイプ
PKS 0426-380	67.173	-37.9403	bll
PKS 0537-441	84.7089	-44.0862	BLL
1RXS J054357.3-553206	85.9814	-55.5327	bll
GB6 J0601+5315	90.5148	53.2657	bll
RX J0620.6+2644	95.1766	26.7291	bll
TXS 0637-128	100.0213	-12.896	bll
NGC 2329	107.2472	48.6558	rdg
PKS 0706-15	107.3095	-15.4512	bll
PMN J0730-6602	112.6943	-66.0464	bll
RX J0805.4+7534	121.3616	75.5766	bll
PMN J0816-1311	124.1123	-13.1973	bll
NVSS J084411+531250	131.0509	53.2141	bll
PMN J0847-2337	131.7567	-23.6141	bll
PMN J0953-0840	148.2628	-8.6695	bll
TXS 1055+567	164.6652	56.4634	BLL
RBS 0958	169.2708	20.2294	bll
RBS 0970	170.2006	42.2039	bll
B2 1229+29	187.9349	28.7917	bll
2MASS J12402118-7148578	190.116	-71.8156	bcu
PMN J1256-1146	194.0632	-11.7755	bll
1RXS J130737.8-425940	196.9096	-42.995	bll
PKS 1424-41	216.9866	-42.106	FSRQ
1RXS J144037.4-384658	220.1549	-38.7797	bll
B2 1447+27	222.3956	27.7686	rdg
GB6 J1542+6129	235.755	61.5033	bll
CGCG 050-083	235.906	4.8689	agn
PMN J1548-2251	237.2011	-22.8471	bll
PMN J1558-6432	239.7377	-64.5404	bll
PMN J1603-4904	240.9665	-49.0617	bll
PMN J1610-6649	242.6919	-66.8147	bll
1RXS J174459.5-172640	266.235	-17.4514	bcu

(次ページへ続く)

(続き)

天体名	赤経	赤緯	タイプ
NVSS J182338-345412	275.9109	-34.8952	bcu
GB6 J1838+4802	279.7141	48.0412	bll
MG2 J190411+3627	286.0343	36.4526	bll
1H 1914-194	289.4384	-19.3628	bll
RX J1931.1+0937	292.784	9.6314	bll
1RXS J193320.3+072616	293.341	7.44	bll
PMN J1936-4719	294.2416	-47.34	bll
87GB 194024.3+102612	295.696	10.5584	bll
1RXS J194455.3-214318	296.2295	-21.7216	bll
PKS 2035-714	310.0655	-71.2642	bll
MH 2136-428	324.8546	-42.5895	bll
NVSS J214637-134359	326.6449	-13.7347	bll
CTA 102	338.1525	11.7306	FSRQ
3C 454.3	343.4963	16.1506	FSRQ
RGB J2313+147	348.5081	14.7532	bll
1ES 2321+419	350.9749	42.1826	bll
TXS 2344+068	356.6786	7.0931	bll
PSR J0631+1036	97.8765	10.6046	PSR
PSR J1954+2836	298.5854	28.6026	PSR
PSR J1958+2846	299.6761	28.7704	PSR
PSR J2021+4026	305.3851	40.4445	PSR

A.2 TeVCat カタログから選定された天体のリスト

表 A.2: 5 章の解析に用いた 1880 天体からなる TeVCat リスト。

天体名	赤経	赤緯	タイプ
CTA 1	1.6083333333333334	72.98361111111112	PWN

(次ページへ続く)

(続き)

天体名	赤経	赤緯	タイプ
SHBL J001355.9-185406	3.4666666666666663	-18.891388888888887	HBL
Tycho	6.34	64.13	Shell
KUV 00311-1938	8.4	-19.35	HBL
1ES 0033+595	8.82	59.79	HBL
NGC 253	11.885583333333331	-25.29038888888889	Starburst
S2 0109+22	18.024166666666662	22.744166666666667	IBL
RGB J0136+391	24.135416666666668	39.1	HBL
RGB J0152+017	28.139583333333327	1.7778611111111111	HBL
3C 58	31.379166666666663	64.85	PWN
TXS 0210+515	33.574583333333333	51.747777777777778	HBL
S3 0218+35	35.272916666666666	35.937222222222222	FSRQ
3C 66A	35.673333333333333	43.043194444444445	IBL
1ES 0229+200	38.221666666666666	20.2725	HBL
1RXS J023832.6-311658	39.635416666666666	-31.282777777777778	HBL
LS I +61 303	40.141666666666666	61.256944444444444	Binary
PKS 0301-243	45.847874999999999	-24.126627777777777	HBL
IC 310	49.179166666666666	41.324722222222223	AGN (unknown type)
RBS 0413	49.945833333333332	18.761666666666667	HBL
NGC 1275	49.950416666666655	41.511666666666666	FRI
LHAASO J0341+5258	55.34	52.97	UNID
PKS 0346-27	57.158333333333333	-27.820555555555556	FSRQ
1ES 0347-121	57.345833333333333	-11.977222222222222	HBL
ARGO J0409-0627	62.35	-6.45	UNID
1ES 0414+009	64.220666666666665	1.089	HBL
PKS 0447-439	72.367499999999998	-43.836666666666666	HBL
1ES 0502+675	76.984166666666665	67.623333333333332	HBL
TXS 0506+056	77.354166666666667	5.7025000000000001	Blazar
VER J0521+211	80.437499999999999	21.214277777777777	IBL
Crab Pulsar	83.632916666666665	22.0145	PSR
30 Dor C	83.979166666666664	-69.186111111111112	Superbubble
HAWC J0543+233	85.779999999999999	23.4	TeV Halo

(次ページへ続く)

(続き)

天体名	赤経	赤緯	タイプ
PKS 0548-322	87.65999999999998	-32.27025	HBL
IC 443	94.2125	22.503055555555555	Shell
LHAASO J0621+3755	95.46999999999998	37.92	PWN/TeV Halo
PKS 0625-35	96.7425	-35.49722222222222	AGN (unknown type)
HESS J0632+057	98.25333333333332	5.7941666666666665	Binary
Geminga Pulsar	98.47563749999998	17.770252777777777	PSR
HAWC J0635+070	98.71	7.0	TeV Halo
RX J0648.7+1516	102.19	15.27	HBL
1ES 0647+250	102.69374999999998	25.05	HBL
2HWC J0700+143	105.12	14.32	TeV Halo
RGB J0710+591	107.61	59.15	HBL
S5 0716+714	110.47249999999998	71.34333333333333	IBL
PGC 2402248	113.36124999999998	51.89830555555555	HBL
PKS 0736+017	114.82083333333333	1.6033333333333335	FSRQ
1ES 0806+524	122.49583333333332	52.31666666666667	HBL
1RXS J081201.8+023735	123.00774999999996	2.625861111111111	HBL
2HWC J0819+157	124.97999999999998	15.79	UNID
Vela Pulsar	128.83625	-45.17644444444444	PSR
RBS 0723	131.80374999999998	11.56388888888889	HBL
RX J0852.0-4622	133.0	-46.36666666666667	Shell
OJ 287	133.70458333333332	20.099691666666665	BL Lac (class unclear)
PKS 0903-57	136.22157916666663	-57.58493972222222	IBL
M 82	148.96958333333333	69.67944444444444	Starburst
S4 0954+65	149.69583333333333	65.56527777777778	Blazar
1RXS J101015.9-311909	152.56262499999997	-31.30511111111111	HBL
1ES 1011+496	153.76708333333332	49.43361111111111	HBL
HESS J1018-589 A	154.74166666666667	-58.945277777777775	Binary
Westerlund 2	155.84999999999997	-57.79	Massive Star Cluster
2HWC J1040+308	160.21999999999997	30.87	UNID
Eta Carinae	161.14583333333331	-59.66572222222222	Binary
GB6 J1058+2817	164.62456208333333	28.29617	BL Lac (class unclear)

(次ページへ続く)

(続き)

天体名	赤経	赤緯	タイプ
1ES 1101-232	165.90208333333334	-23.495833333333334	HBL
Markarian 421	166.07916666666665	38.19472222222222	HBL
SNR G292.2-00.5	169.74999999999997	-61.4	PWN
Markarian 180	174.11	70.1575	HBL
RX J1136.5+6737	174.12541666666664	67.61777777777777	HBL
3C 264	176.27083333333331	19.60638888888889	FRI
TON 0599	179.88249999999996	29.245555555555555	FSRQ
1ES 1215+303	184.45208333333333	30.101666666666667	HBL
1ES 1218+304	185.35958333333333	30.191388888888888	HBL
W Comae	185.38208333333333	28.233055555555556	IBL
MS 1221.8+2452	186.10083333333333	24.606666666666667	HBL
4C +21.35	186.22666666666663	21.379444444444445	FSRQ
S3 1227+25	187.55875	25.301944444444445	IBL
M 87	187.69666666666663	12.3975	FRI
3C 279	194.04625	-5.7894444444444444	FSRQ
PSR B1259-63	195.70541666666665	-63.831388888888895	Binary
2HWC J1309-054	197.31	-5.49	UNID
OP 313	197.6194325	32.34549527777778	FSRQ
1ES 1312-423	198.74374999999995	-42.596944444444446	HBL
Centaurus A	201.37625	-43.004166666666667	FRI
HESS J1356-645	209.0	-64.5	PWN
PKS 1413+135	213.995	13.339916666666667	Blazar
RBS 1366	214.4861125	25.72395	HBL
B2 1420+32	215.62658333333333	32.386233333333333	FSRQ
PKS 1424+240	216.75	23.794444444444448	HBL
HESS J1427-608	216.96666666666664	-60.85	UNID
H 1426+428	217.13583333333333	42.6725	HBL
RCW 86	220.759	-62.44888888888889	Shell
1ES 1440+122	220.8125	12.003055555555555	HBL
PKS 1441+25	220.98708333333333	25.028888888888886	FSRQ
PKS 1440-389	221.00083333333328	-39.13916666666667	HBL

(次ページへ続く)

(続き)

天体名	赤経	赤緯	タイプ
HESS J1458-608	224.9125	-60.780277777777776	PWN
HESS J1503-582	225.82916666666665	-58.261111111111111	DARK
SN 1006 NE	226.01416666666665	-41.803055555555555	Shell
HESS J1507-622	226.72	-62.35	UNID
PKS 1510-089	228.2175	-9.106	FSRQ
MSH 15-52	228.52916666666666	-59.1575	PWN
AP Librae	229.42416666666665	-24.371944444444445	LBL
TXS 1515-273	229.51504166666663	-27.526222222222222	HBL
HESS J1534-571	233.5	-57.1	Shell
SNR G327.1-01.1	238.65416666666667	-55.090833333333336	PWN
PG 1553+113	238.93625	11.194722222222222	HBL
HESS J1614-518	243.58	-51.82	Shell
HESS J1626-490	246.51666666666665	-49.086944444444445	UNID
HESS J1634-472	248.73999999999995	-47.27	UNID
Westerlund 1	251.70833333333333	-45.82	Massive Star Cluster
Markarian 501	253.4675	39.760277777777778	HBL
HESS J1702-420	255.68333333333333	-42.015833333333333	UNID
RX J1713.7-3946	258.39	-39.76	Shell
SNR G349.7+00.2	259.49083333333334	-37.444333333333333	SNR/Molec. Cloud
H 1722+119	261.26791666666666	11.870833333333334	HBL
1ES 1727+502	262.0775	50.219444444444445	HBL
Kepler's SNR	262.67	-21.486388888888889	SNR
HESS J1731-347	263.0125	-34.755	Shell
3HWC J1739+099	264.99291666666666	9.930277777777777	UNID
HESS J1741-302	265.31416666666666	-30.377055555555556	UNID
3HWC J1743+149	265.82583333333326	14.936111111111112	UNID
1ES 1741+196	266.005	19.546388888888889	HBL
Galactic Centre	266.415	-29.006111111111111	UNID
SNR G000.9+00.1	266.84666666666664	-28.151666666666664	PWN
Terzan 5	266.95416666666665	-24.808333333333334	Globular Cluster
RS Ophiuchi	267.55483333333333	-6.707911111111112	Nova

(次ページへ続く)

(続き)

天体名	赤経	赤緯	タイプ
OT 081	267.88675	9.650202777777778	LBL
HESS J1800-240B	270.11	-24.039	SNR/Molec. Cloud
HESS J1804-216	271.12999999999994	-21.7	UNID
HESS J1809-193	272.62916666666666	-19.3	UNID
HESS J1813-126	273.34025	-12.687111111111111	UNID
B2 1811+31	273.39667791666665	31.738227777777778	IBL
HESS J1813-178	273.4	-17.84	PWN
SNR G015.4+00.1	274.52	-15.466944444444444	Composite SNR
HESS J1826-130	276.509	-13.066666666666666	UNID
LS 5039	276.56249999999994	-14.825	Binary
HESS J1828-099	277.24466666666666	-9.992722222222222	UNID
2HWC J1829+070	277.34	7.03	UNID
HESS J1832-085	278.125	-8.511388888888888	UNID
HESS J1833-105	278.39583333333333	-10.571666666666667	PWN
HESS J1834-087	278.69	-8.76	UNID
HESS J1841-055	280.22916666666667	-5.55	UNID
HESS J1848-018	282.12083333333333	-1.7923055555555554	Massive Star Cluster
HESS J1852-000	283.05833333333333	0.09888888888888888	UNID
HESS J1857+026	284.29583333333333	2.6666666666666665	UNID
MGRO J1908+06	286.975	6.268611111111111	UNID
HESS J1912+101	288.20416666666666	10.151666666666667	Shell
SS 433 e1	288.40416666666666	4.9300000000000001	Binary
2HWC J1914+117*	288.68	11.72	UNID
3HWC J1918+159	289.68875	15.908611111111112	UNID
W 51	290.73	14.191	SNR/Molec. Cloud
LHAASO J1929+1745	292.25	17.75	UNID
3HWC J1935+213	293.95333333333326	21.385	UNID
2HWC J1938+238	294.74166666666666	23.81	UNID
HESS J1943+213	295.97916666666663	21.302222222222223	HBL
2HWC J1949+244	297.42	24.46	UNID
3HWC J1951+266	297.90333333333333	26.613055555555556	UNID

(次ページへ続く)

(続き)

天体名	赤経	赤緯	タイプ
Cygnus X-1	299.59041666666666	35.201411111111111	XRB
1ES 1959+650	299.99916666666667	65.148611111111112	HBL
MAGIC J2001+435	300.315	43.879	IBL
3HWC J2005+311	301.46374999999995	31.165555555555556	UNID
PKS 2005-489	302.36249999999995	-48.831111111111111	HBL
3HWC J2010+345	302.6975	34.543055555555554	UNID
3HWC J2022+431	305.52125	43.156388888888888	UNID
3HWC J2023+324	305.81291666666664	32.439444444444444	UNID
PSR J2032+4127	308.04166666666663	41.459444444444445	Binary
1ES 2037+521	309.84791666666666	52.330555555555556	HBL
3HWC J2043+443	310.88166666666666	44.298611111111111	UNID
RGB J2056+496	314.17791666666665	49.668611111111111	Blazar
LHAASO J2108+5157	317.15	51.95	DARK
PKS 2155-304	329.71958333333333	-30.221666666666664	HBL
BL Lacertae	330.68041666666664	42.277777777777778	IBL
SNR G106.3+02.7	336.99583333333333	60.876944444444445	Shell
RGB J2243+203	340.96666666666666	20.32	HBL
B3 2247+381	342.5275	38.432777777777777	HBL
Cassiopeia A	350.80749999999995	58.807222222222222	Shell
1ES 2322-409	351.19999999999993	-40.66	HBL
1ES 2344+514	356.76666666666665	51.713611111111111	HBL
H 2356-309	359.78925	-30.622972222222224	HBL
HESS J1837-069	279.41	-6.95	PWN
VER J2019+368	304.85416666666663	36.803888888888885	UNID

