

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

金谷龍太郎



CHIBA
UNIVERSITY



International Center
for Hadron Astrophysics
ICEHAP CHIBA UNIVERSITY

内容

- インTRODクシヨN
- IceCubeとガンマ線観測チーMによるニュートリノ源特定の現状
- ガンマ線カタログの改良
- 作成したガンマ線カタログの評価
- カタログ作成の現状と展望

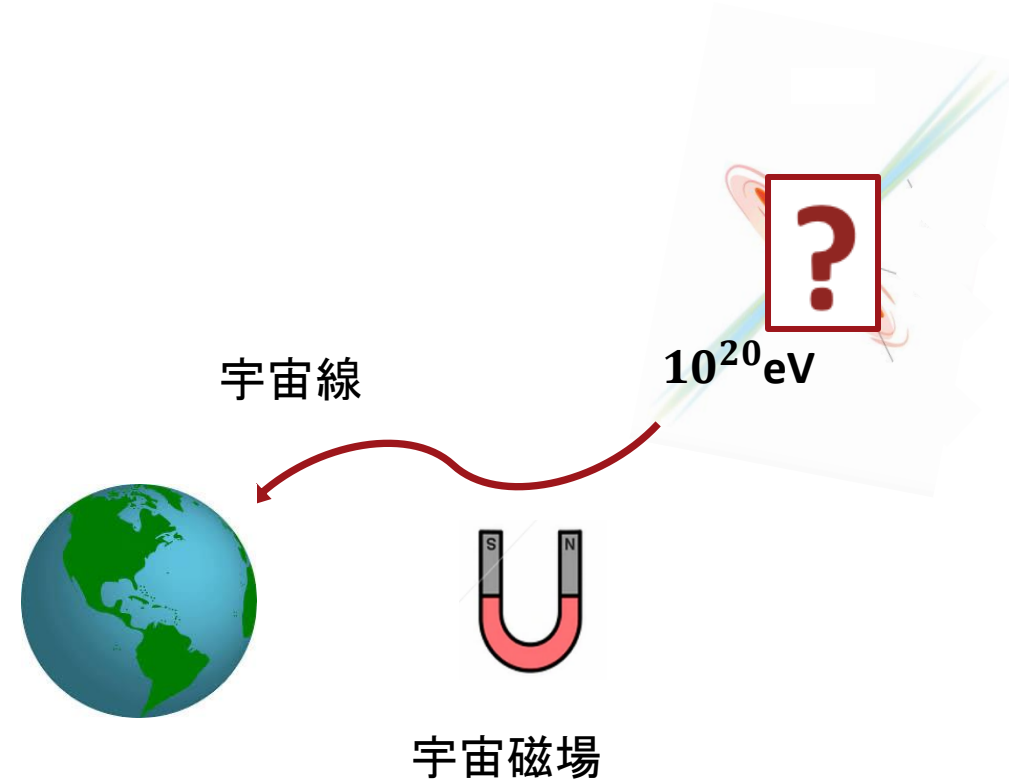
宇宙線の起源

宇宙線：

- 主に陽子や原子核イオンからなる荷電粒子
- 10^{20}eV の高エネルギー領域まで加速される

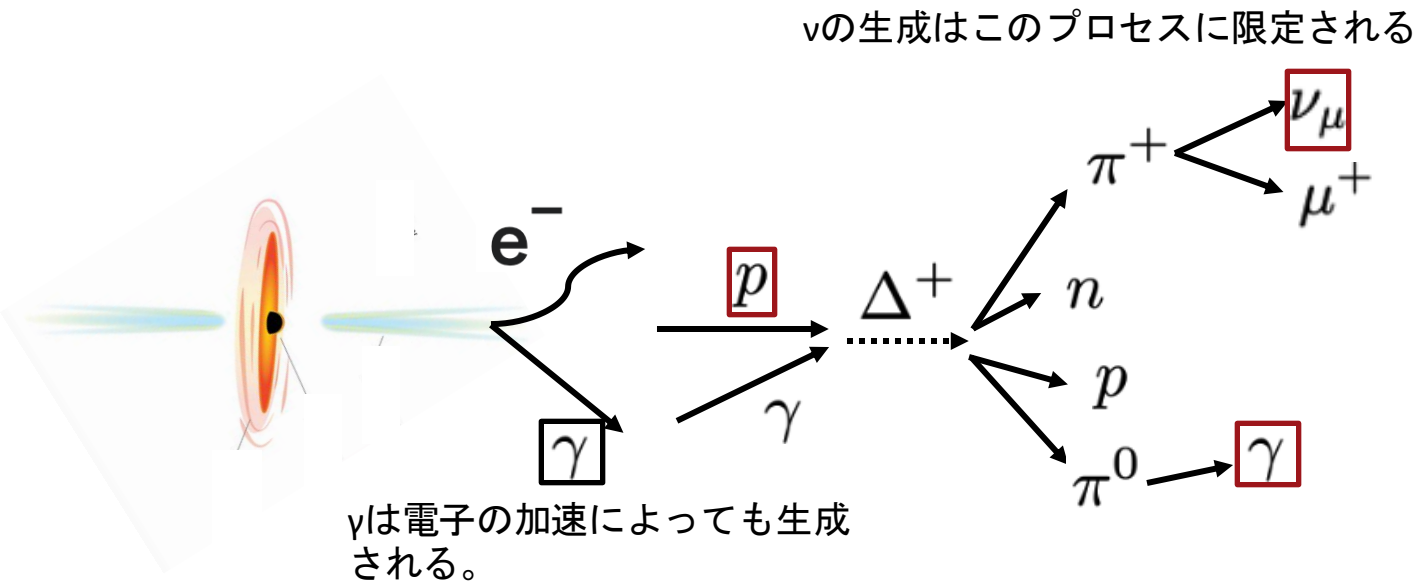
- 加速源の特定
 - 加速機構の理解の手がかり。

- 宇宙線は荷電粒子であり磁場で曲げられる。
 - 直接観測してもどの天体からきているかがわからない



ν と γ 線を組み合わせた観測による ν 源特定

- ν 、 γ は電荷を持たないから到来方向がわかる



- ν の方向にある天体の γ 線を検出することで、その天体がニュートリノ源であることの可能性が高まる。
 - ν と γ を組み合わせた観測が ν 源特定に有効

- ν 源を特定することでハドロン加速の現場がわかる

ν と γ の観測実験

- ν
 - IceCube: 南極における10 GeVから1PeVのニュートリノの観測実験
- γ
 - 地上チェレンコフ望遠鏡を用いた実験 (50 GeV ~ 数百 TeV)
 - MAGIC, HESS, VERITAS: 15年以上前から運用
 - CTA: 2019年より大型望遠鏡LSTの運用、現在も建設中
 - 人工衛星
 - Fermi/LAT: 2008年より運用、約20 MeV ~ 300 GeVのガンマ線を検出



IceCube実験

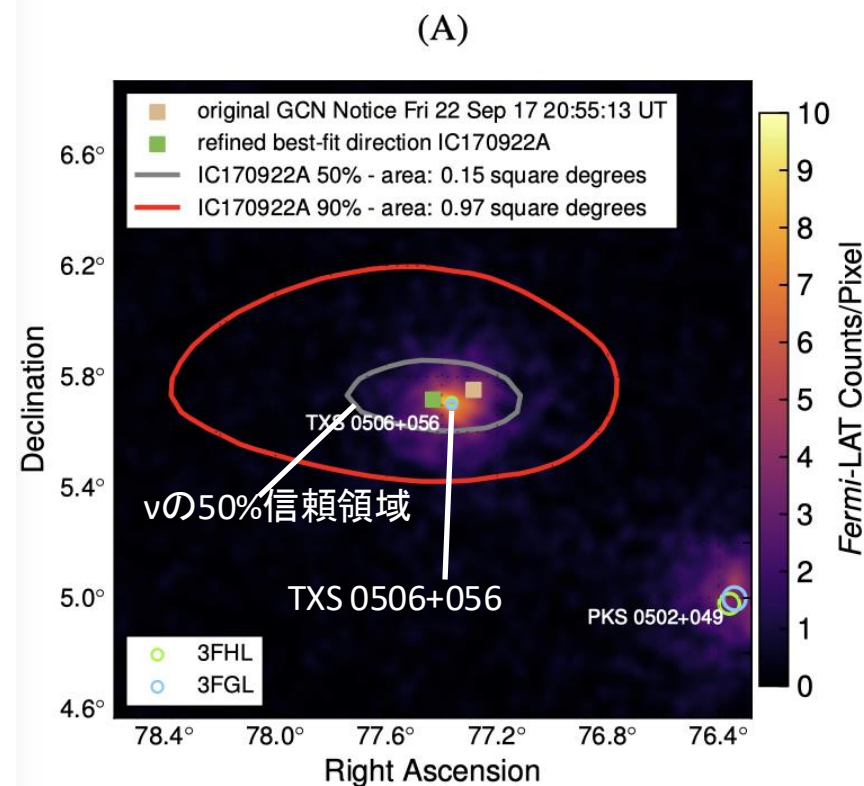


ガンマ線観測のチェレンコフ望遠鏡

ニュートリノの方向のガンマ線望遠鏡による追尾観測が行われてきた

IceCubeによる $>100\text{TeV}$ の単体ニュートリノイベントの起源天体

- IceCubeと γ 線実験により発見された 100TeV 以上のニュートリノ源
 - 2017年9月22日、TXS 0506+056 (ブレーザー)の方向で単体のニュートリノの検出、IC170922
 - MAGICがTXS 0506+056で、ガンマ線フレアを観測
 - Fermi/LATによって位置的相関が取られた (位置的相関の有意度 2.8σ)
- ニュートリノ源として特定される
- ブレーザーが主なニュートリノ源？



ブレーザー以外のニュートリノ源

- 2016年、ブレーザーだけでは全天ニュートリノの説明不可
- 2020年、セイファート銀河NGC 1068の発見、 $<100\text{TeV}$ (右図は有意度map)
- 2023年、銀河面からの ν の発見、主に数 10TeV (右図は銀河面の ν の有意度の分布)

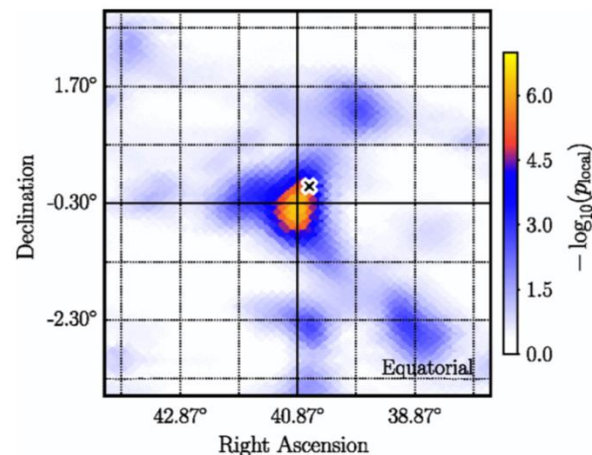


図2: NGC 1068の有意度map

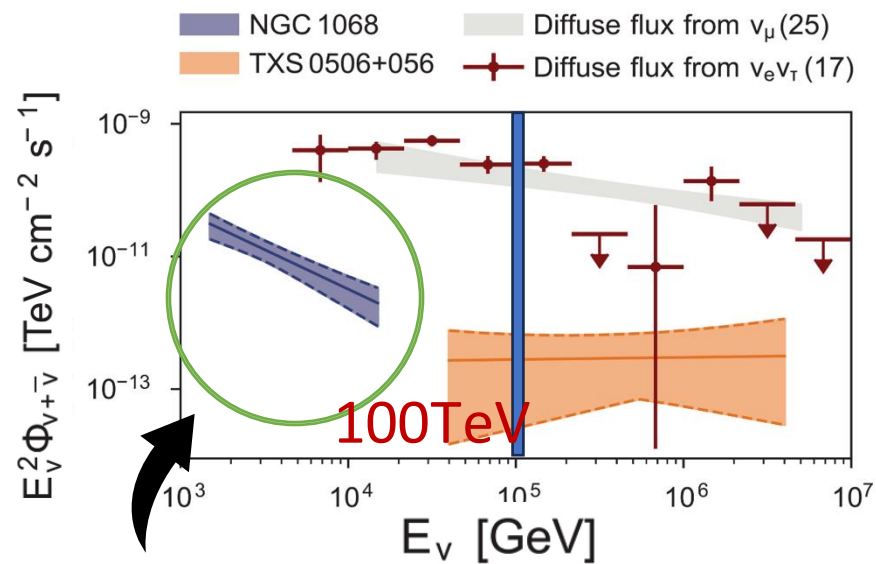
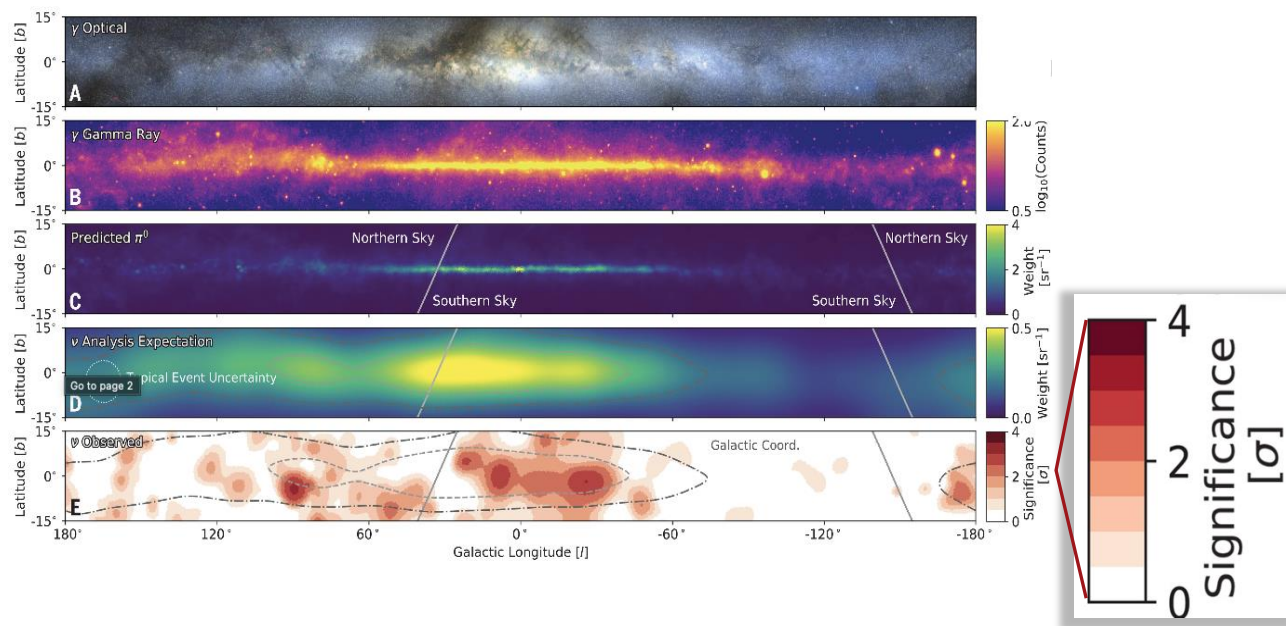


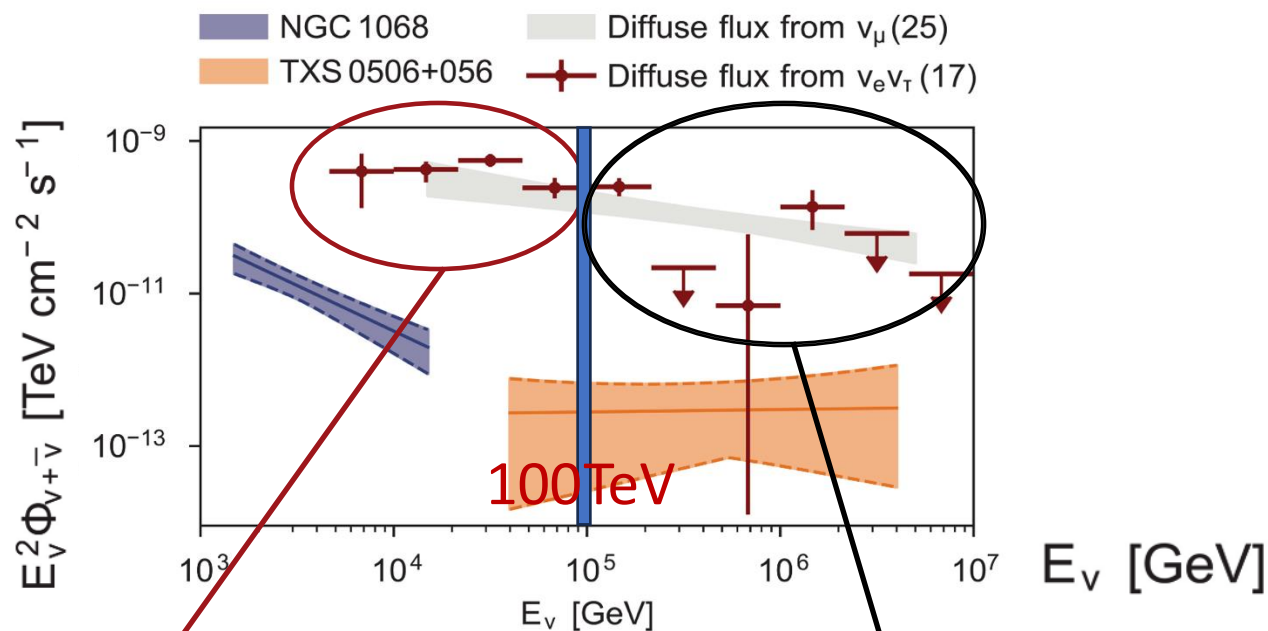
図4: 点源フラックスと全拡散天体物理ニュートリノ・フラックスとの比較。F.G. Saturni et al., PoS-ICRC1474 (2023).



100TeVより低エネルギー側のニュートリノ源の特定の必要性が出てきた。

ニュートリノ源特定の方法の現状

ニュートリノ源を特定するためにIceCubeからガンマ線実験グループに送られるアラートがある



- 100TeV以下の複数のニュートリノ
 - バックグラウンドが多い
 - 複数個検出、既知 γ 線源との位置相関
 - 3σ 以上でアラートが送られる

チャンネル2

- 100TeV以上の単体ニュートリノイベントの起源特定
 - γ 線追尾観測

チャンネル1

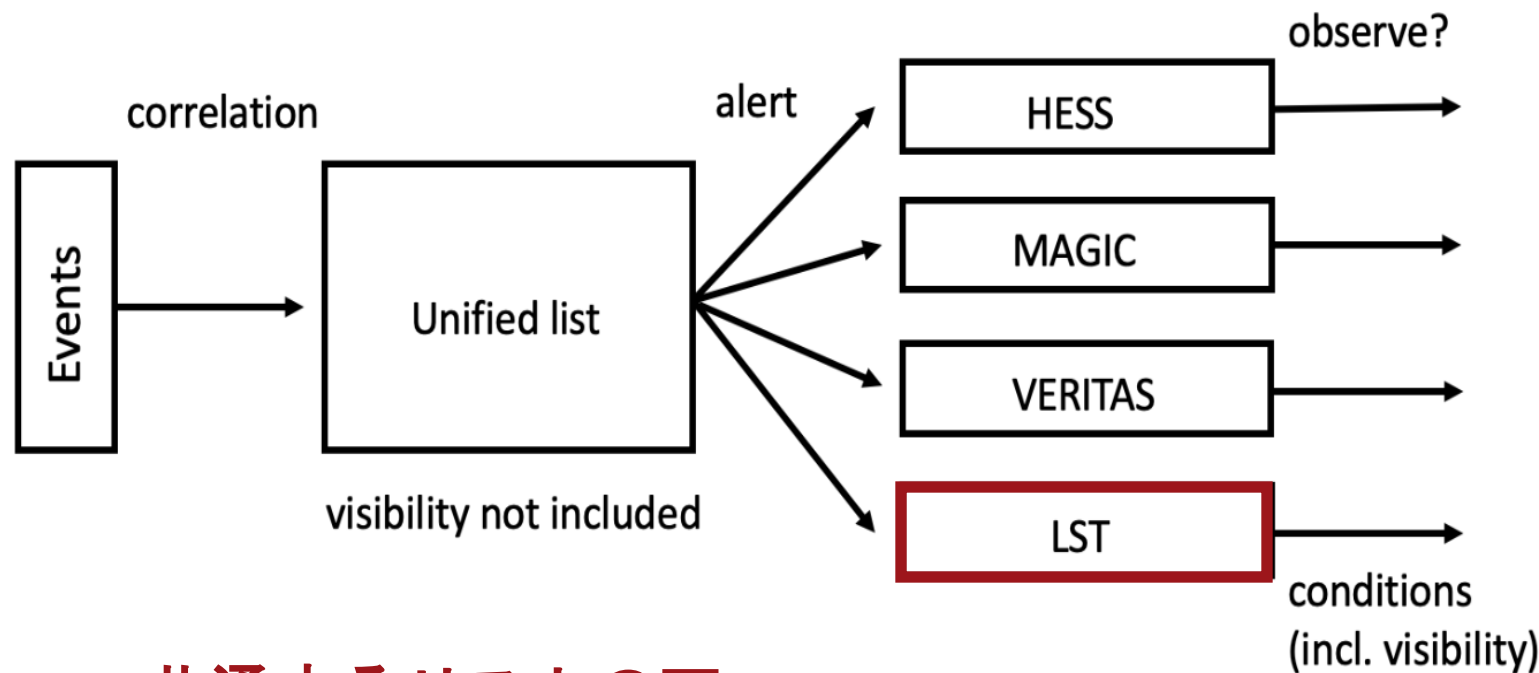
チャンネル2で特定されたニュートリノ源はないため改善が必要

- 既知ガンマ線源を新しいものにアップデートする。
- リスト作成の戦略を改善。

選定するガンマ線源と数の目安

過去に作られた γ 線源のリストは各地点毎に観測できる 約180個のGeVとTeVの γ 線源からなる

今後...



共通するリストの天
体数の目安を250個に
(GeV, TeV合わせて)

各地点より観測できる天体数を約180個 (以前
作られたリストと同数)

従来のGeVガンマ線源選定における課題と改善

- 古いカタログが使用された
 - 2012年の3FGLから**2022年の4FGL-DR3にアップデート**
- 時間変動の小さい天体が除かれた
 - 時間変動によらずに天体の選定
- Extragalactic background light (EBL)減衰を考慮しなかった
 - EBL減衰を考慮 => 4417天体が除かれて192天体が残った
- 赤方偏移のない天体が除かれた
 - 赤方偏移を仮定: 0.5

$$\exp(-\tau(E, z))$$

EBLモデル(finke 2010)

赤方偏移の値がわかっていない天体がある

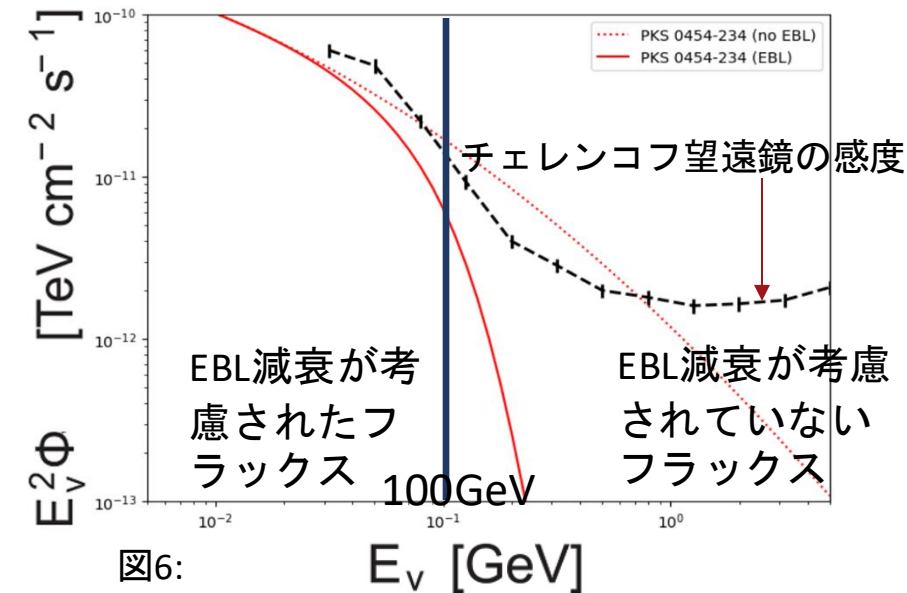


図6:

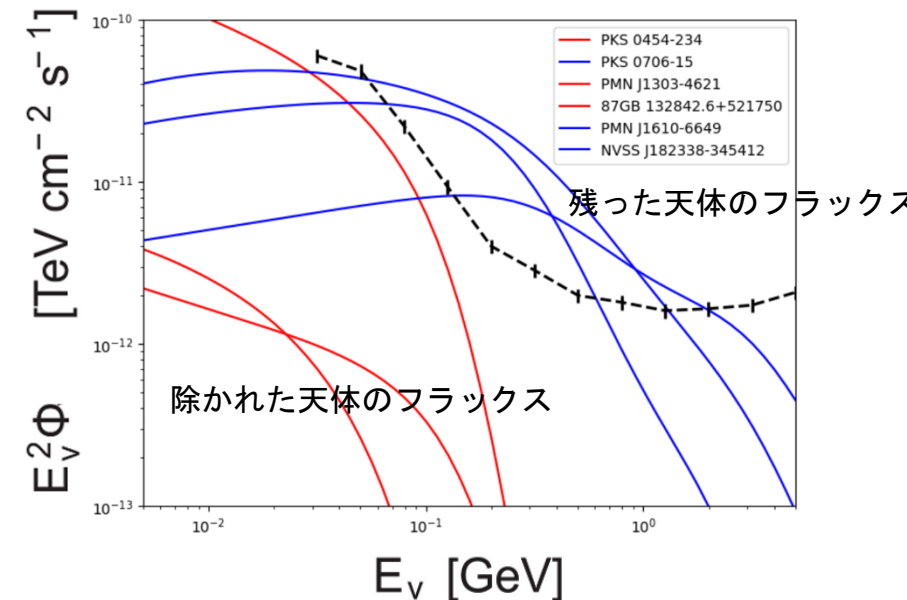


図: EBL減衰を考慮してリストから除かれた3天体、と残った3天体の例 10

従来のTeVガンマ線源選定における課題と改善

課題: Galactic Centre, Crab Nebulaなどが追加されたが、数が少なく体系的ではなかった。

改善: チェレンコフ望遠鏡や地上アレイ型検出器で観測されたすべてのTeVガンマ線源を含む**TeVCat (2024年時点で294個)**を使った。

- 使用にあたって追観測に不適なGRBを7天体除いた。
- 4FGLとの重なりはTeVCatでカウント
- 最近新たに ν 源として期待されるようになった銀河系天体をより多く残した

TeV天体選定の方法とリストの天体数

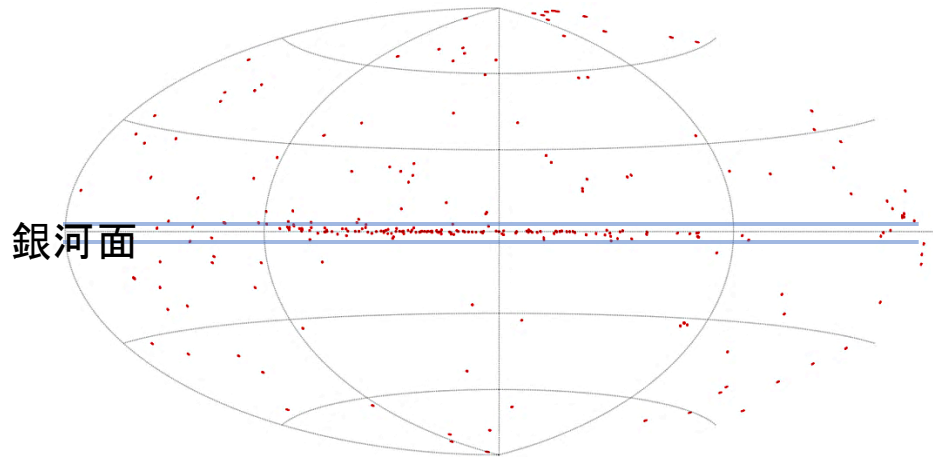


図: TeVCat294天体の銀緯、銀経における座標

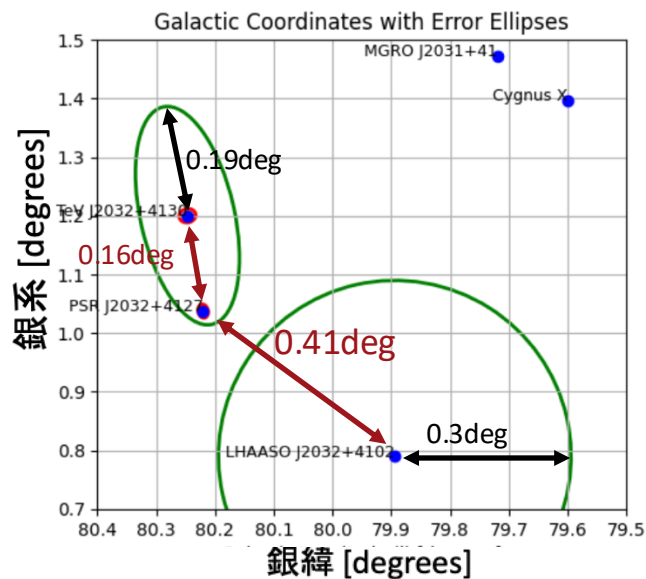


図: 分離角が約0.6度以内に位置する3天体

- TeVCat内で密集する天体
 - 近い方向の複数天体をリストに入れると複数アラートが連続して来てしまう
 - 1.5度以内に近い天体のペアを抽出、観測の位置誤差 (統計、系統) と Extension (広がり) を考慮して選定

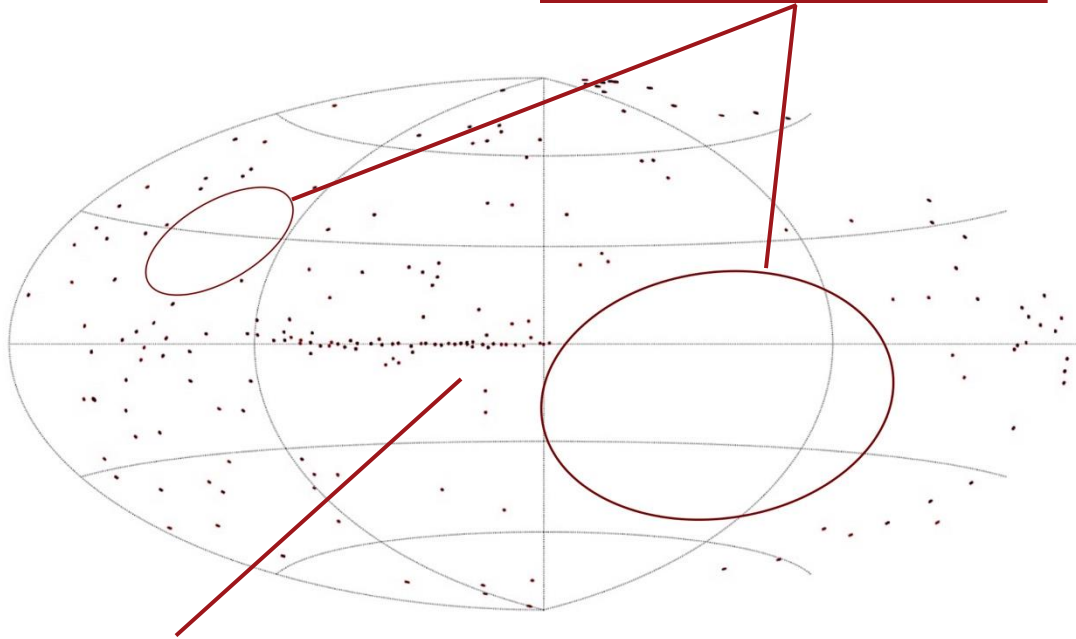
- 例えば...
3つのうちPSR J2032+4127を残した

結果

$$\begin{array}{ccc} 69 & + & 180 = 249 \\ \text{GeV} & & \text{TeV} \end{array}$$

今回のリストから除かれた天体

- 従来のリスト (MAGIC)との比較のため249天体からMAGICのラパルマ島において観測できない領域の81天体を除いた



➤ 168天体が残った

- そのうち64天体がMAGICリスト (179天体)と重なっている

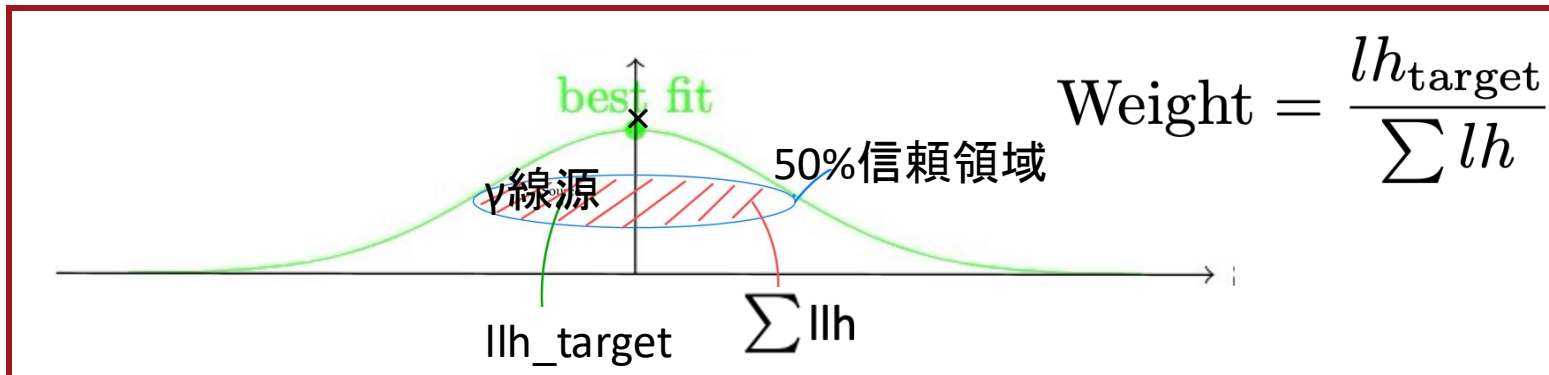
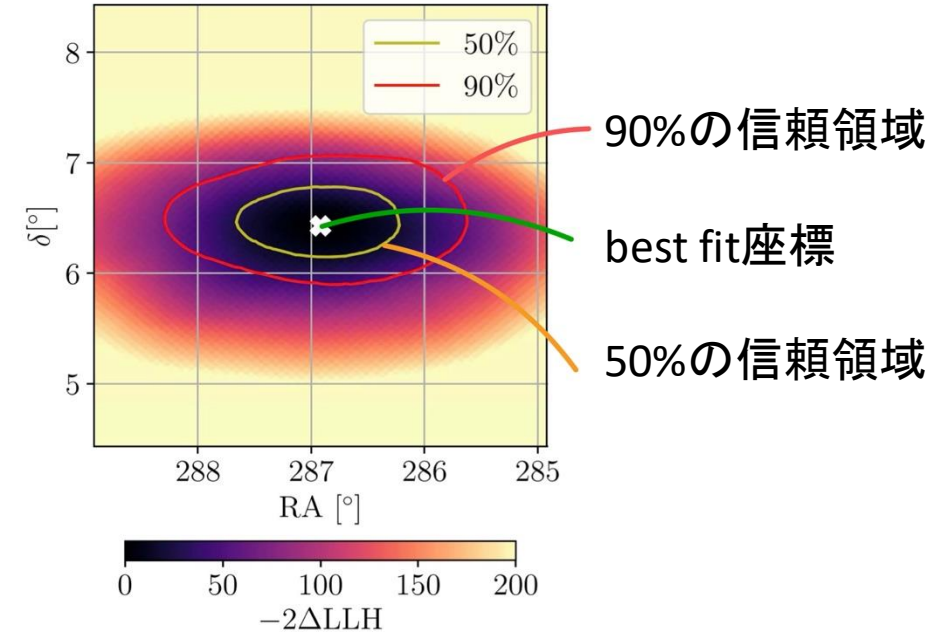
重なっていない115天体のうち、

- FSRQ 67/115
 - 他タイプの天体と比較し大きな赤方偏移の値を持つ
 - EBLを考慮したことにより除かれた
- BL Lac 41/115
 - 時間変動の小さい天体もリストに入れたことで他天体の入る余地ができた
 - 合理的に除かれた

リストを用いたIceCubeアラートの解析

249個の選ばれたガンマ線源に対して、 ν イベントとの位置的な相関をとった場合、得られる相関の有意度を調べ、リスト内の天体と天体数を評価する。

- IceCat-1 (公開)を使用、マルチプレットは非公開
- シングレットイベントのカatalog (12年分、349個)
 - イベントの尤度値 (lh)が座標に対して与えられている
- 249個の γ 線源がイベントの50%、90%の信頼領域内にあるかにおける相関を取った
 - 50%: 14個の相関
 - 90%: 31個の相関、偶然による期待値は32.7個
- 相関の重要度をランクづけするために50%信頼領域の重みを計算 (weight)



相関の重みの有意度

計算された相関のweight

Assoc1_x	TeVCat_x	EVENTID	START	weight_50
	TXS 0506+056	50579430	2017-09-22 20:54:30.436262	0.084384255
	MGRO J1908+06	55750717	2015-01-19 08:50:58.363915	0.0029255594
	Markarian 421	49522606	2011-12-08 17:15:15.376889	0.00037856275
NGC 1218		4701751	2022-03-04 17:44:12.213316	0.00023136126
3C 454.3		1306178	2012-05-23 15:19:39.523361	0.00016755087

- 計算されたweight50の有意度を評価
- 100,000 (=249座標×402天球)個の座標をランダムに生成することで249個の天体をもつ402個の天球をシミュレーション

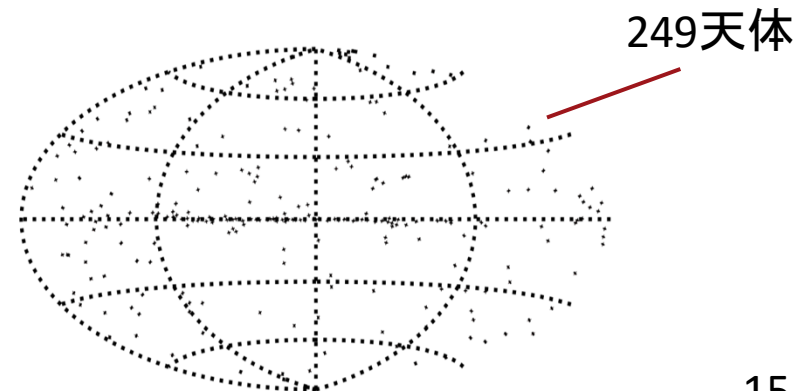
- 100,000個の天体のうち、あるweight50以上の値を持つ天体数をn50とする
- 一つの天体が348イベントとweight50以上の相関を持つ確率plocal

$$p_{\text{local}} = \frac{n_{50}}{100000}$$

- 249個の天体に対して試行回数補正をして一つの天球でそのweightの値以上の相関を偶然持つ確率を計算

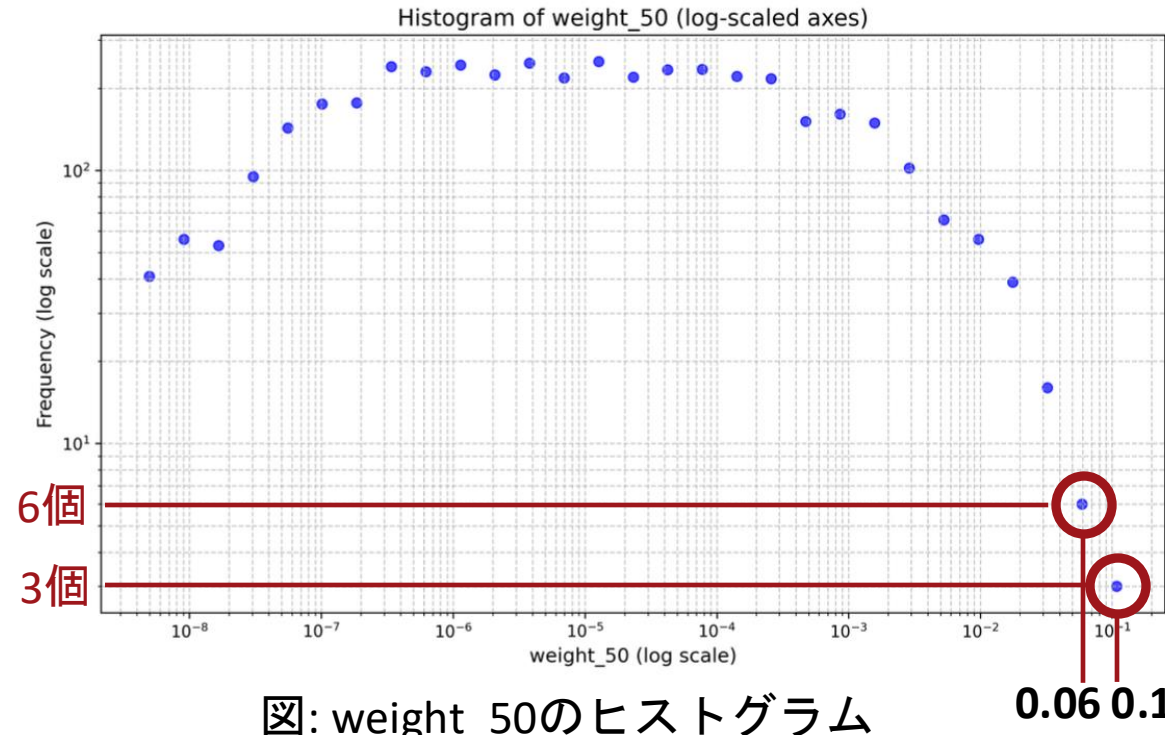
$$p_{\text{global}} = 1 - (1 - p_{\text{local}})^{249}$$

$$\approx \frac{n_{50}}{402} \quad (p_{\text{local}} \ll 1)$$

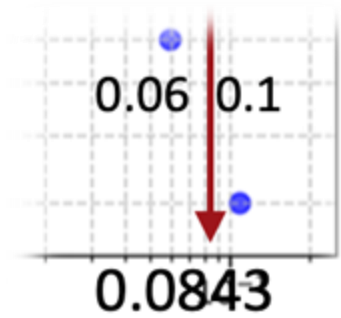


TXS 0506+056とMGRO J1908+06の有意度

- TXSのweight50である0.0843の有意度を評価
 - 0.06のweightを偶然持つ確率を計算
 - $\frac{9}{402} = 0.0075$
 - 2.76σに相当
 - 2.76σ<TXSの相関の有意度
 - Fermi-Latと相関が取られたIC170922の2.8σと同程度
 - 249天体が適切な天体数であると確かめられた
 - MGROのweight50である0.0029の有意度を評価
 - MGROの相関の有意度<1.06σ
 - 2位以下の相関は有意ではなかった
- (MGRO J1908+056: Jian Li et al., 2102.05615v2)



Assoc1_x	TeVCat_x	EVENTID	START	weight_50
nan	TXS 0506+056	50579430	2017-09-22 20:54:30.436262	0.084384255
nan	MGRO J1908+06	55750717	2015-01-19 08:50:58.363915	0.0029255594
nan	Markarian 421	49522606	2011-12-08 17:15:15.376889	0.00037856275
NGC 1218	nan	4701751	2022-03-04 17:44:12.213316	0.00023136126
3C 454.3	nan	1306178	2012-05-23 15:19:39.523361	0.00016755087



展望

- コラボレーターの作成するリストと合わせて約500天体=>350ぐらいまで減らしたい
- IceCubeの感度で γ 天体のフラックスを割り天体をランク付け
 - ランクの高いものを選ぶ方法を提案中
- リストの銀河系天体の数を減らすという提案を受けている
 - 銀河系天体のどのタイプの天体を除くかを議論中
- 完成したものは公開予定

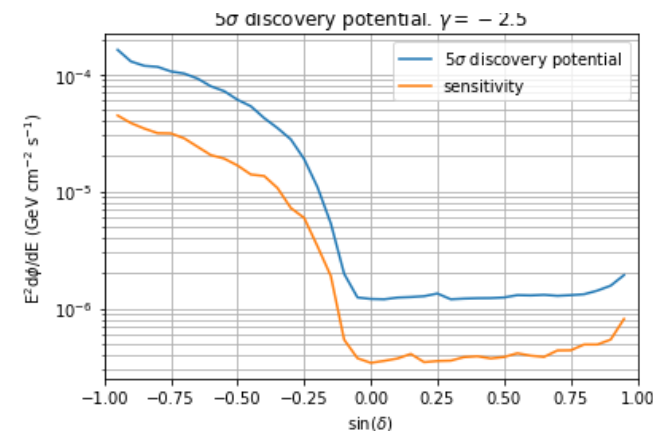
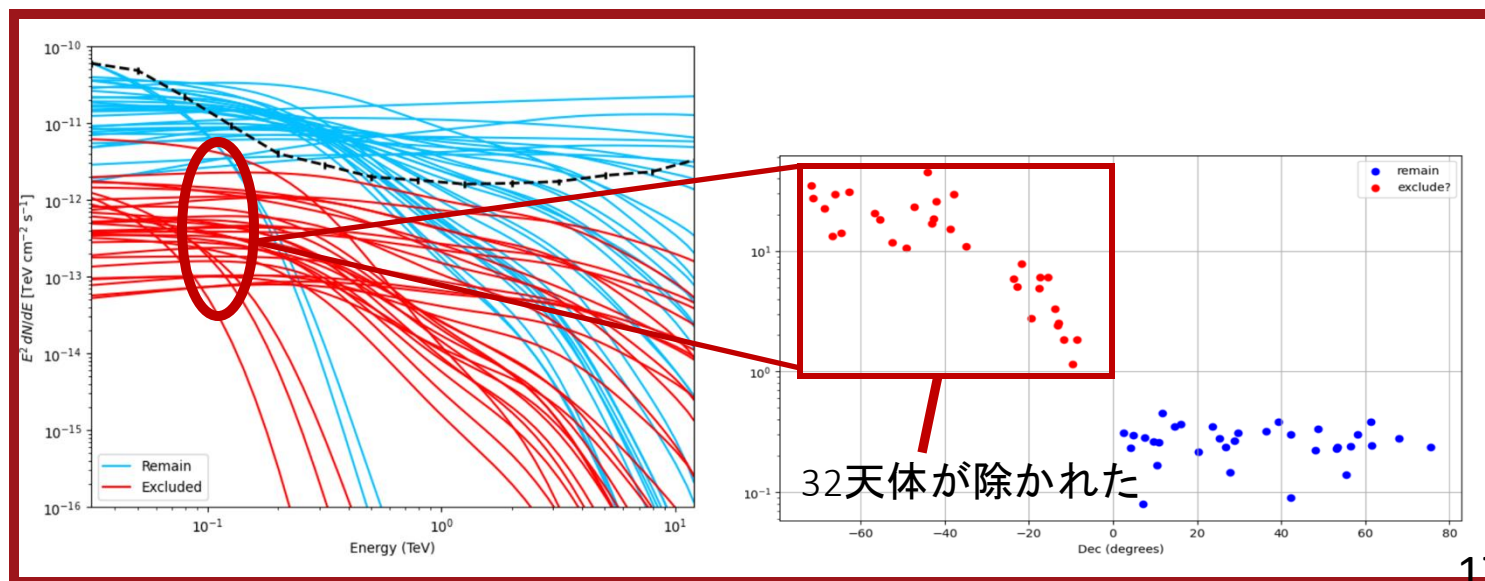
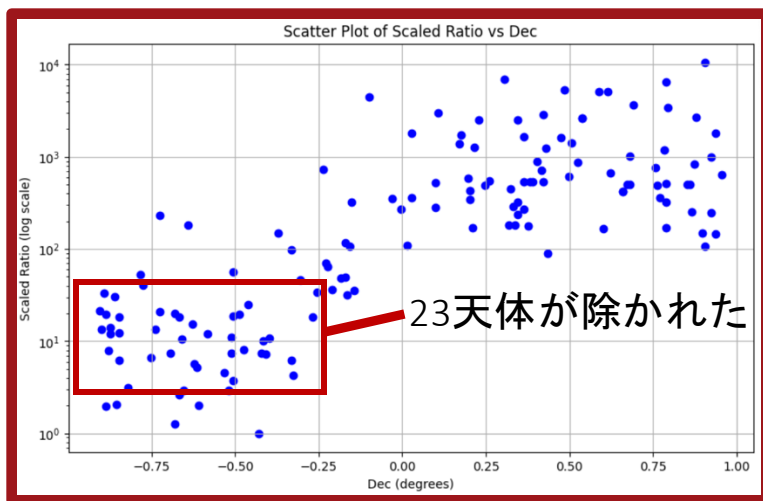


図: IceCubeの感度

4FGL



TeVCat



まとめと展望

- 過去に作られたガンマ線源リストの課題を踏まえて新たに249天体からなるリストを作った
- 以前のリストと比較
 - EBLを考慮したことでFSRQ、時間変動によらない選定をしたことでBL Lacが多く除かれた。
 - 銀河系天体の数は以前のものより多く残した。
- IceCatを用いた解析の結果
 - リストの天体数249が妥当であると評価した。

Backup

磁場によって曲がる陽子

- 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
 - 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 $B \sim 3 \mu\text{G}$
- 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。

$$R_L \simeq \frac{E}{ZeB}$$

IceCubeによるニュートリノの検出

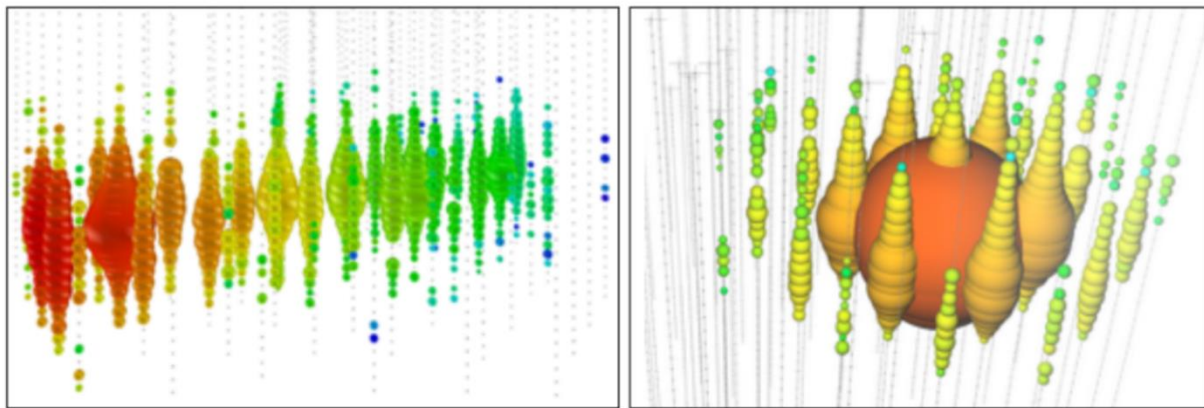


図 2.1 IceCube の検出器によって記録されたイベントの例。左からトラックイベント、シャワーイベント。球は検出器を示し、赤色が早くトリガーされた検出器、緑と青はそれ以降にトリガーされたもの。[1]。

- **トラックイベント**
 - 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
- **シャワーイベント**
 - 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
- **HESE**
 - High energy starting eventのうちトラックイベントのトラックが200m以上、エネルギーがESEほど高くない分位置決定の精度に厳しい条件
- **ESE**
 - 1PeV以上

TXS 空間的相関

1ESがFermi-LATのガンマ線源と空間的に一致している確率 (p_{local} 値)

IceCubeが過去に発したアラート (リアルタイム10件 + アーカイブ41件 = 計51件) **をした後の**試行回数補正をした **p_{global} 値 (p_{global}) を算出**

そのp値を標準正規分布に変換して**シグマ(σ)を求める。**

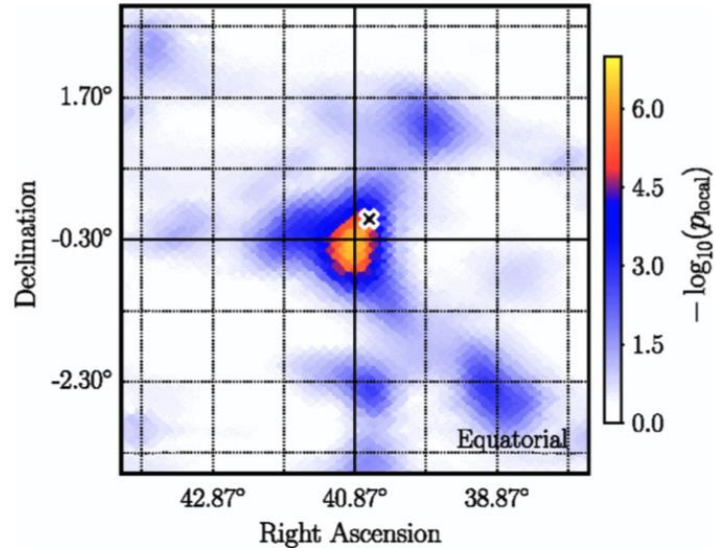
=> リアルタイム: 3.0σ 、計51件: 2.8σ

$$p_{\text{global}} = 1 - (1 - p_{\text{local}})^N$$

$$p_{\text{global}} \approx p_{\text{local}} \times N$$

*Nがイベント数

NGC 1068



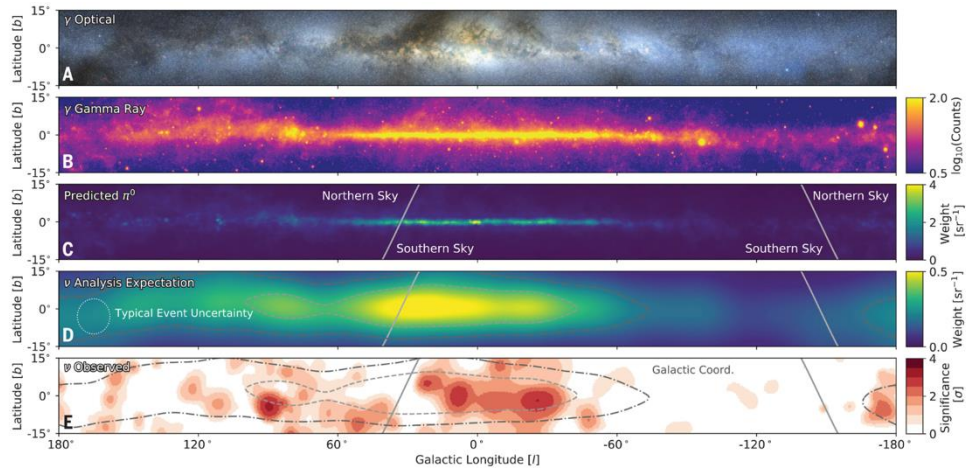
NGC 1068の方向にニュートリノが集中しているのが偶然である確率

Pre trialで 5.2σ

110個の候補天体どれか一つで空間的に相関が取れる。110個中どれでもいい。

Post trialで 4.2σ

銀河面からのニュートリノ



- Fermi latの γ 観測データより pion decayモデルを用いてTS値を計算...(c)
- (C)の予測にIceCubeニュートリノの検出効率を考慮した ν フラックス...(d)
- 過去10年分実際の観測データによるp値の分布...(e)

選定するガンマ線源と数の目安

- 後にコラボレーターの作成したリストと統合する
 - 有意度を考慮しコラボレーターの作成したリストと合わせて500天体程度が目安
- MAGICの作成したリストは**GeVガンマ線源、TeVガンマ線源合わせて179天体**。(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=>ニュートリノイベントのアラートがメールで送信されていた。=>手間を考慮)
- 比較、評価のために、まず180天体程度を目安にした。

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

表1: リストの γ 線源が一つで ν 源である有意度が 5σ と仮定した際のリストに含まれる天体数とその有意度

時間変動

- 今までは γ フレアと ν は同じ時刻で観測できると考えられてきた
- ニュートリノの検出時刻と γ 線のフレアが一致している天体があるか過去10年間のIceCubeのデータで調べた
 - ガンマ線フレアがない時にもニュートリノが検出される可能性がある
 - **ハドロニック過程（ $p\gamma$ 相互作用）で発生するはずのガンマ線が、天体内で吸収されてしまう可能性がある。**
 - **光学的に厚い環境**では、生成された高エネルギーガンマ線が電子対生成などで吸収され、可視化できなくなる。
 - ニュートリノは生成されているが、対応するガンマ線が観測されないケースが発生する。

EBL

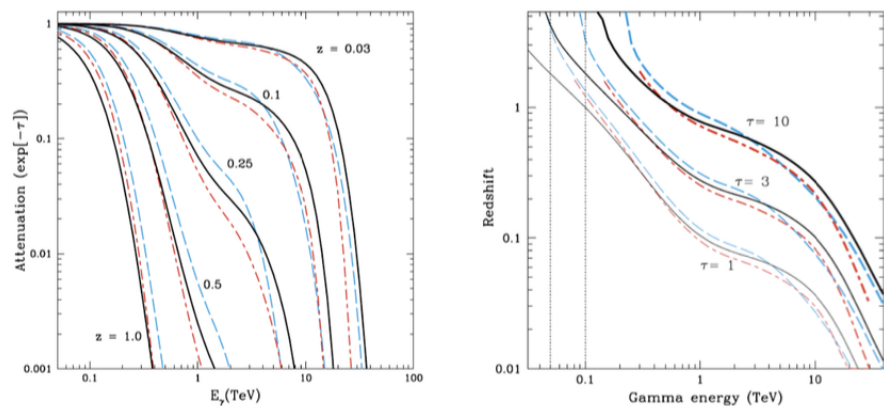
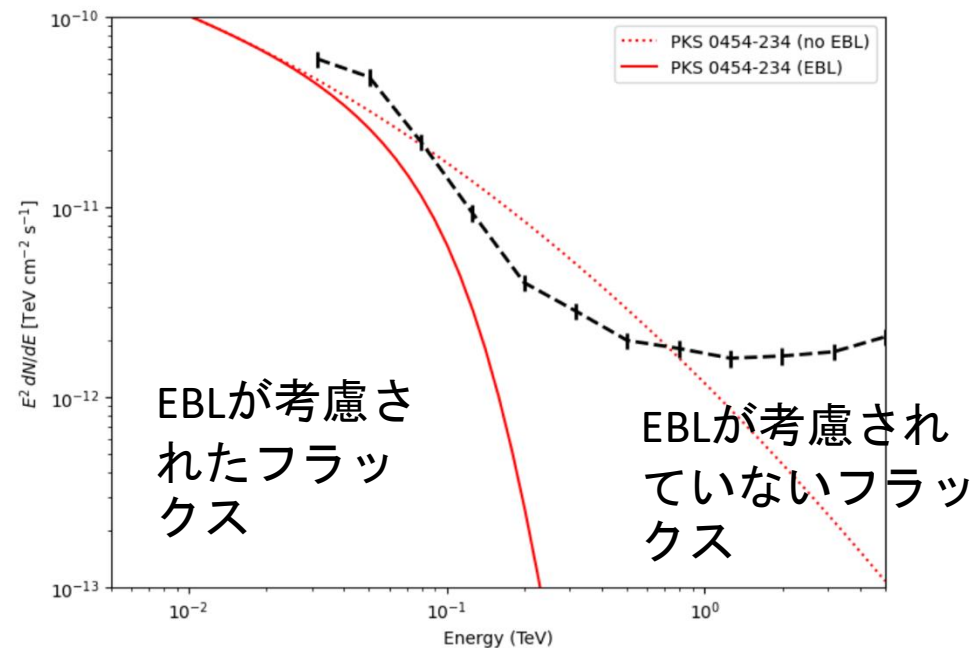
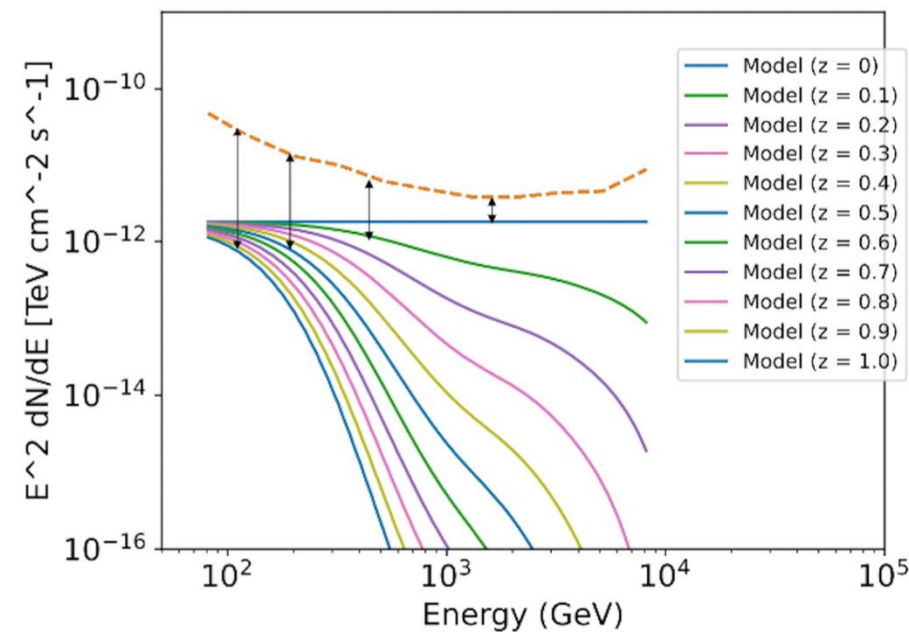


図 3.1 ガンマ線エネルギー E_γ に対するガンマ線の減衰を、赤方偏移 $z = 0.03, 0.1, 0.25, 0.5, 1$ の天体について示す。赤の長短破線は観測された EBL のデータ、黒の実線は WMAP5 の Fiducial モデル、青の破線は WMAP5 SAM モデルを示している。低赤方偏移領域 (1–10 TeV) での減衰割合が穏やかになっているのは、EBL スペクトルの中赤外成分の影響を反映している。(右図) は同じモデルに基づくガンマ線のペア生成減衰エッジを示す。ペア生成減衰エッジとは、高エネルギーガンマ線が EBL によって電子・陽電子対を生成し、急激に減衰す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]。

γ が ebl と相互作用すると電子と陽電子の対生成が起こり
 γ が吸収される
 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$



赤方偏移の仮定

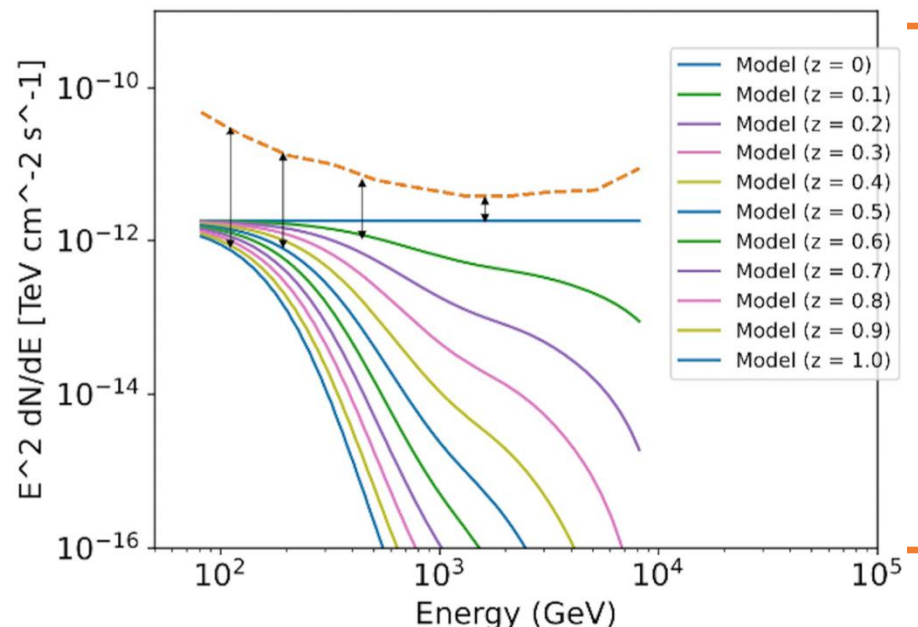
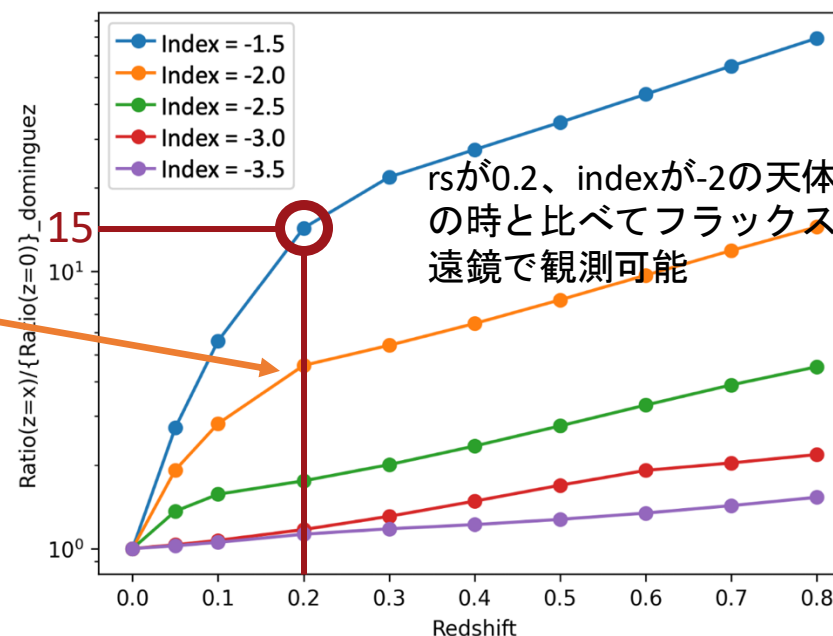


図: index=-2.0の γ 線のフラックス。赤方偏移は0.1から1.0

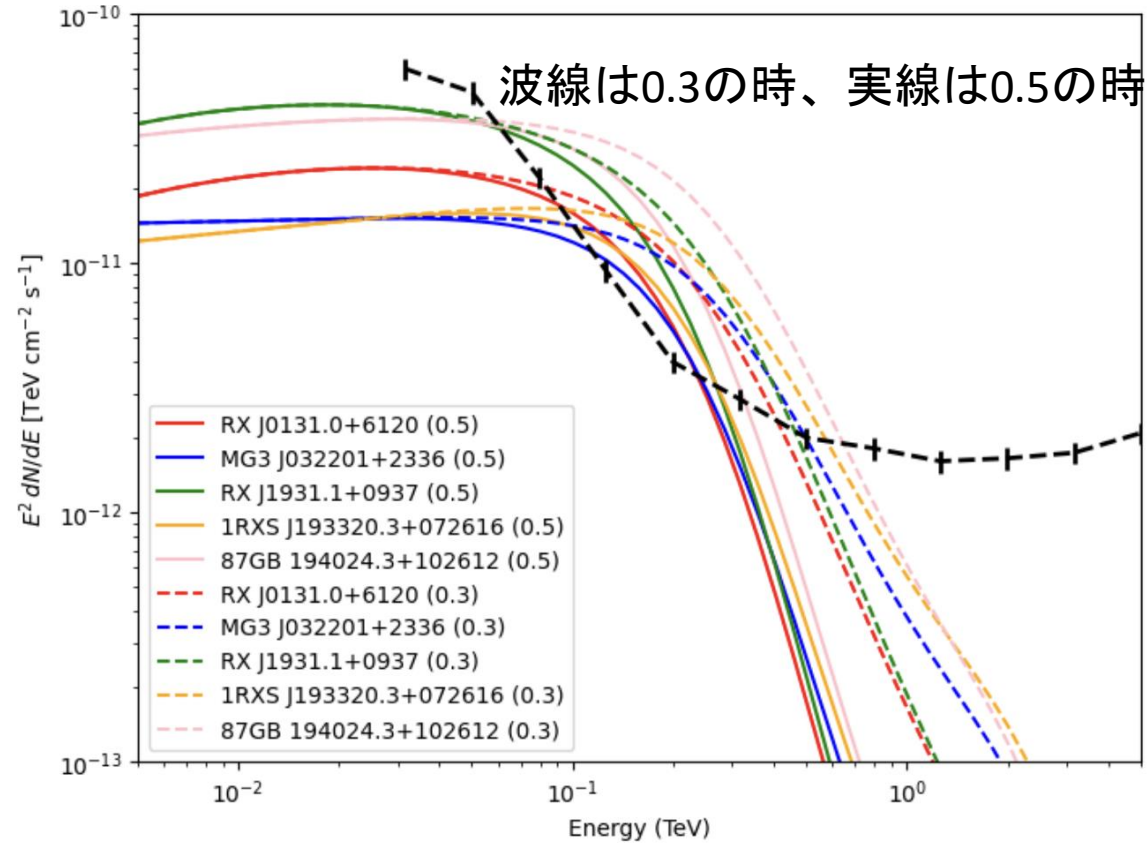


rsが0.2、indexが-2の天体はrsが0の
のときと比べてフラックスが15倍されたらmagicの望
遠鏡で観測可能

図: index=-2.0のフラックスが何倍されればmagicの望遠鏡に届くか。Z=0.1の時の値で規格化。

- Index=-1.5の時: 赤方偏移が 0.2 までは ratio は急激に増加、0.3 で緩やかに。
- 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。
- 観測可能でないガンマ線源をリストに入れすぎること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
- 0.2 以上で ratio の増加が緩やかになって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。

赤方偏移の仮定

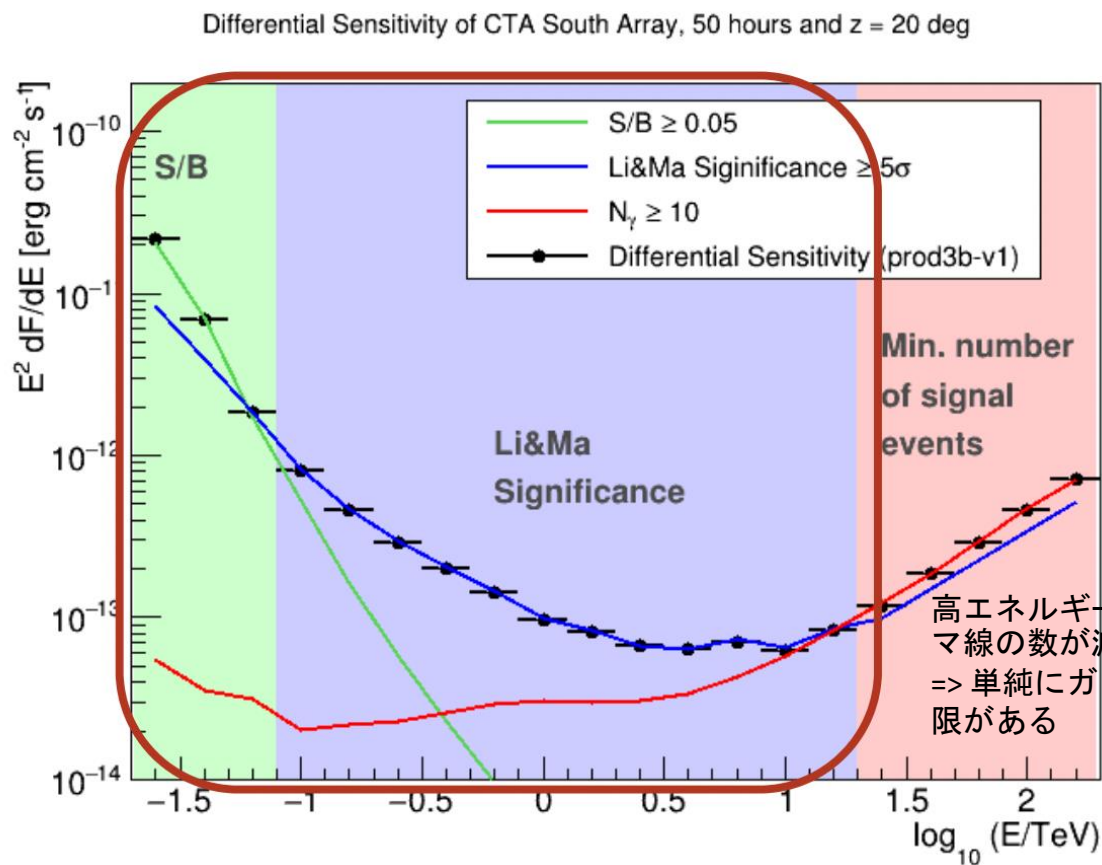


- 69天体のうち0.3と仮定したものは全てBL Lacだった。
- BL Lacの赤方偏移の平均値0.5を取り0.5で感度と比較。
- 結果全て感度より上なので0.5と仮定しても結果が変わらなかったと言える。

感度

$$S = \phi \times A_{\text{eff}} \times T_{\text{obs}}$$

どれだけの数のガンマ線が観測できるか



•有効面積 $A_{\text{eff}} = \text{約} 400 \text{ m}^2$

•観測時間 $T_{\text{obs}} = 50 \text{ 時間}$

•背景ノイズ $B = \text{たとえば } 10,000 \text{ イベント}$

•シグナルが 5σ で検出されるための最小値を計算 → これが「感度」となる

例えば「50時間観測したとき、最低でも 1 m^2 あたり 0.01 個/秒 のガンマ線が来ないと検出できない」**という結果になれば、CTA-LSTの感度は「 $0.01 \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 」となる。

天体のタイプの説明

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。
bll	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。
seyfert 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	bll 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。

なぜIceCatか

- Chiba リストのガンマ線源を評価する
 - 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。
 - 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
 - IceCat として公開
 - Chiba リストの評価においては IceCat を用いた。
 - IceCat のニュートリノイベント(100TeV 以上)348 個とリストのガンマ線源計 249 個の位置的な相関をとる
 - 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。

IceCat有意度の計算

249 個の天体のそれぞれの **weight50** 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 **weight50** の値を持つ確率を計算した。

そのために 100,000 (= 249 × 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 **weight50** を持つ個数を **n50** とする。100,000 個のう ちある一つの天体 が評価したい **weight50** 値を持つ確率は

$$\frac{n_{50}}{100000}$$

100,000 個のうち、ある一つの天体が評価したい **weight50** の値を持たない確率

$$1 - \frac{n_{50}}{100000}$$

249 個からなる一つの天球の 249 天体全てが評価したい **weight50** の値を持たない確率は

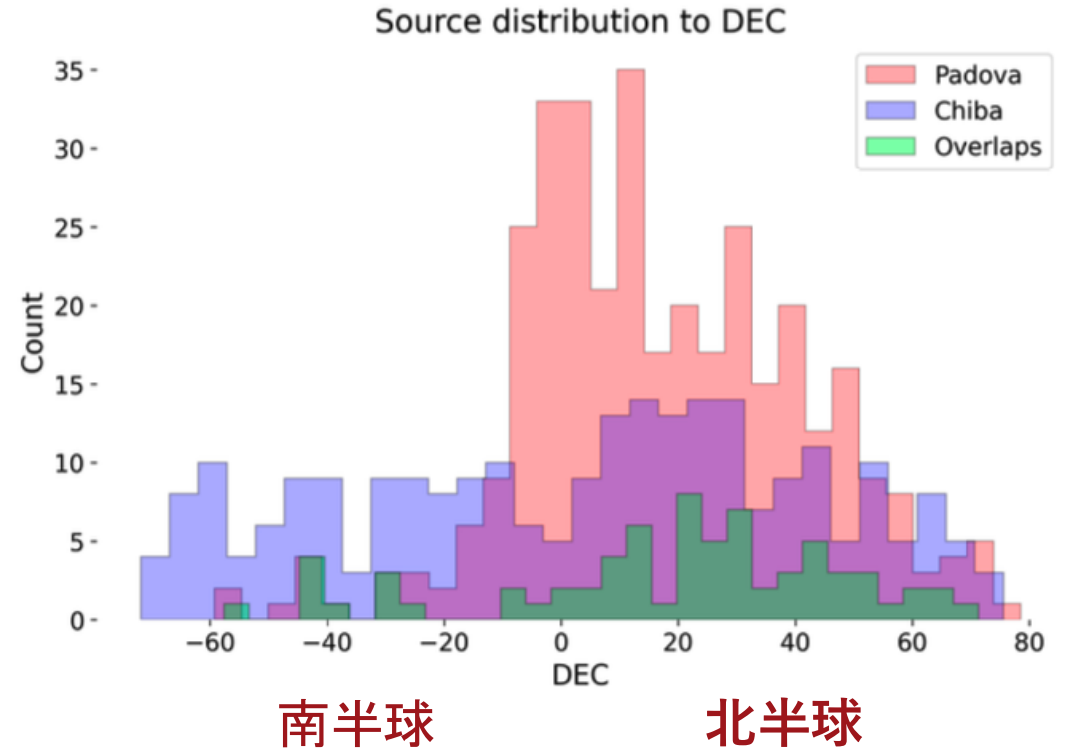
$$\left(1 - \frac{n_{50}}{100000}\right)^{249}$$

249 個の天体からなる一つの天球に評価したい **weight50** の値を持つ座標が存在する確率

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

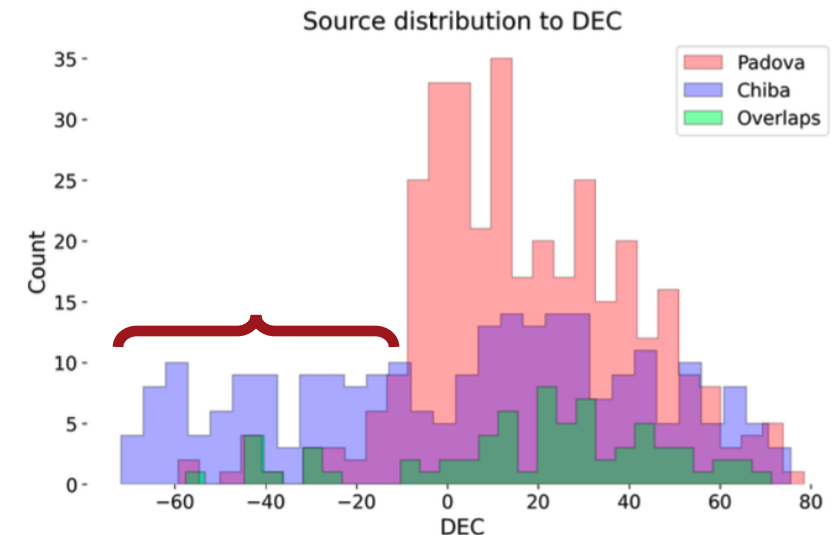
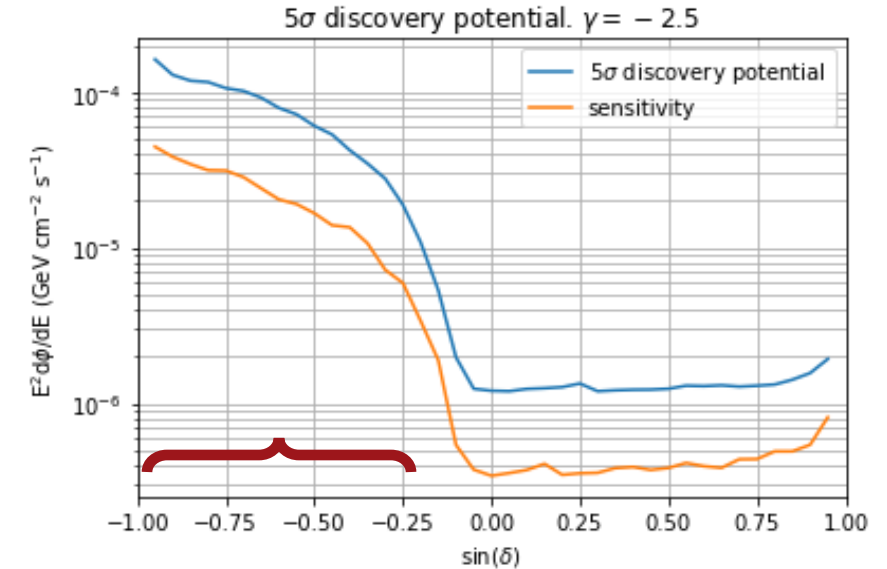
コラボレーターのリストとの統合

- Padova大学の作成するリストと合わせて約500天体が目安
- リストの作成方法が異なる
- 共通する天体の数が特に南半球において少なすぎる

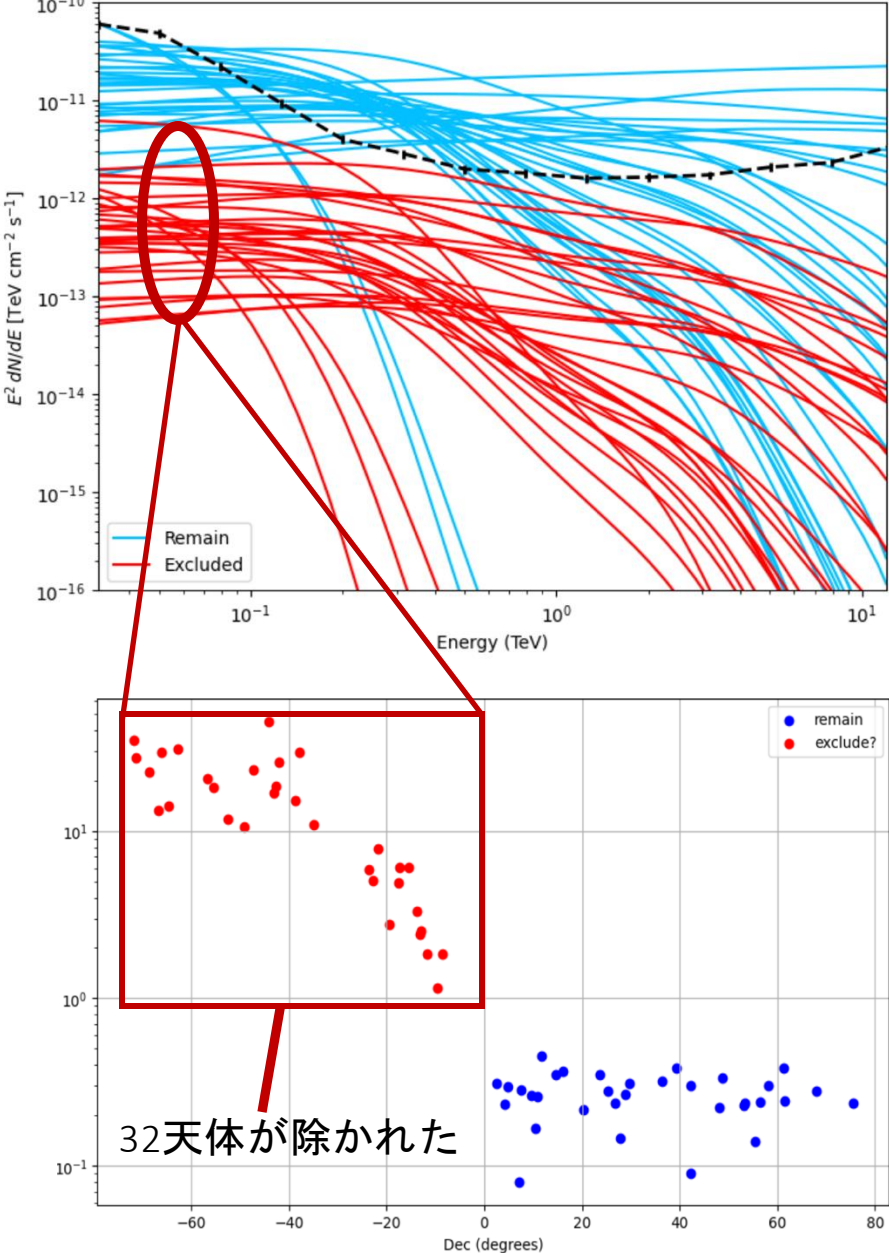
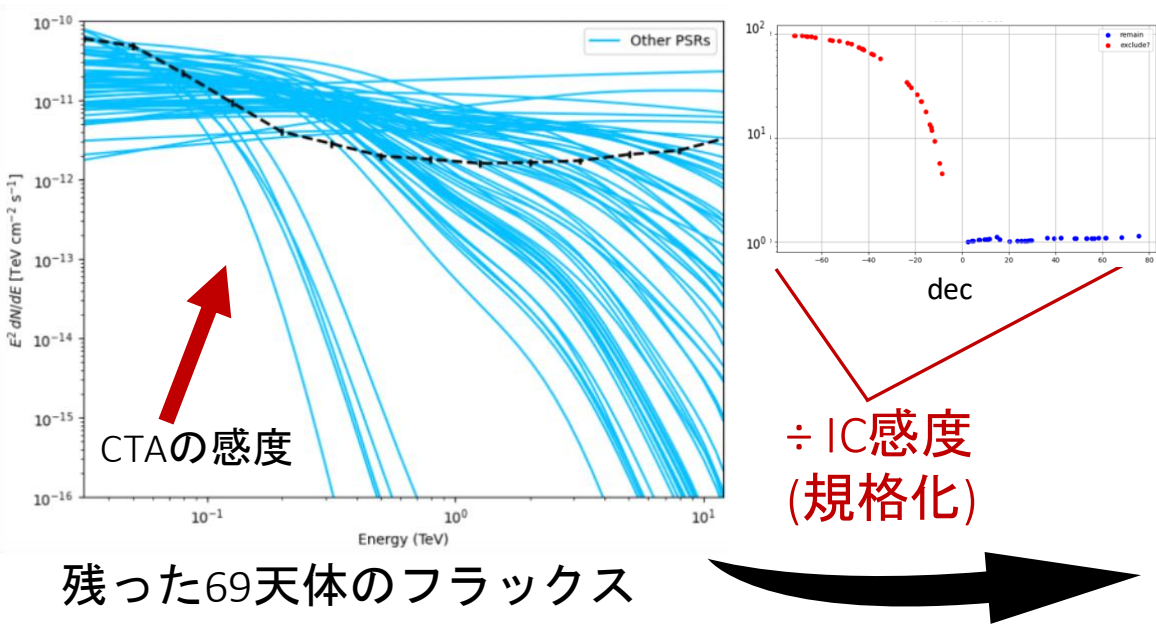


IceCubeのニュートリノ検出感度を考慮した天体数の削減

- IceCubeの感度が良くアラート数が増える領域に限られた天体数を割きたい？
 - Padova大学がIceCubeのニュートリノ検出感度で天体のフラックスを割った値 (FoM) で天体をランクづけ
 - ランクの高い最初のN天体を選んだ
 - 千葉大学のリストも南半球の天体を減らす
 - 全体における共通する天体数の割合が高くなると期待される



IceCubeのニュートリノ検出感度を考慮した天体数の削減 (4FGL)



❖ ICの感度でフラックスが割られICの感度が悪い領域のフラックスが32天体CTAの感度曲線に届かなかった

IceCubeのニュートリノ検出感度を考慮した天体数の削減 (TeVCat)

- 銀河系天体の数を減らす前の214天体からなるTeVCatを使用
- フラックスの情報がTeVCatにないためCrab Nebulaのを基準にしフラックス強度の指標であるCrab Unitを使用
- 214天体中68天体はCrab Unitの値がなかった
 - そのうち赤緯が-45度以下の天体を除いた (Markarian 501など重要な天体は除いていない)

