

IceCube ニュートリノイベントの Fermi-LAT および
かなた望遠鏡データの解析パイプライン開発

広島大学 大学院 先進理工系科学研究科
先進理工系科学専攻物理学プログラム
高エネルギー宇宙・可視近赤外線天文学研究室

M203888 間夏子

主査 深沢泰司
副査 木坂将大
副査 藪田ひかる

2022年2月7日

目次

第 1 章	序論	5
1.1	ニュートリノとガンマ線	5
1.1.1	ニュートリノとガンマ線	5
1.1.2	ガンマ線の放射機構	6
1.1.3	天体起源のニュートリノ	8
1.2	活動銀河核	8
1.2.1	ブレーザー天体	9
1.2.2	放射モデル	10
1.2.3	先行研究	10
1.3	本研究の目的	10
第 2 章	観測機器	12
2.1	IceCube ニュートリノ天文台	12
2.1.1	AMON GCN アラート	13
2.2	Fermi-LAT	14
2.2.1	解析方法	16
2.3	かなた望遠鏡	18
2.3.1	HONIR	19
2.3.2	データ解析	20
第 3 章	データ解析パイプライン	23
3.1	開発パイプラインの機能	23
3.2	Fermi-LAT の解析パイプライン	23
3.3	かなた望遠鏡の解析パイプライン	26
3.3.1	観測方法	27
3.3.2	かなた望遠鏡と PS1 の画像の減算	29
第 4 章	系統的解析の結果と考察	31
4.1	ガンマ線解析	31
4.2	可視近赤外線解析	36
第 5 章	まとめ	40
	Appendix	41

表 目 次

2.1 HONIR の仕様	19
2.2 フィルターの波長帯	20
4.1	31
4.2 エラー半径内に 4FGL 天体が存在したイベント	32
4.3 エラー半径内に存在し TS 値が 3σ 以上であった天体	33
4.4 かなた望遠鏡で観測したイベント	36
5.1 IceCube で検出されたイベント一覧	41

目次

1.1	各放射機構の模式図 [1]	6
1.2	TXS 0506+056[4]	9
2.1	IceCube Detector[10]	12
2.2	IceCube ニュートリノイベントの GCN アラートの例	14
2.3	Fermi 衛星 イメージ図 [13]	15
2.4	LAT 内部構造 [14]	16
2.5	Fermi Science tools 解析フローチャート [15]	17
2.6	かなた望遠鏡 [18]	19
2.7	フィルターの透過率 [19]	20
3.1	作成されるパラメータ設定ファイルの例	24
3.2	解析パイプラインで作成される TS マップ。緑色の円がニュートリノの到来方向のエラー領域である。	25
3.3	解析パイプラインで作成されるライトカーブ。ニュートリノの到来方向のエラー領域を解析範囲としている。	26
3.4	ランク付けした BROS 天体を表示した TSmap。水色の円が 高エネルギーニュートリノの到来方向のエラー領域、中央付近の黄色の丸が A ランクの BROS 天体、ピンク色の丸が B ランクの BROS 天体、緑色の丸が 4FGL 天体である。	28
3.5	インプット画像とアウトプット画像の減算例。左からインプット画像、テンプレート画像、減算後のアウトプット画像。アウトプット画像の赤色で囲んであるのは減算後も残ってしまった天体、緑色で囲んであるのはインプット画像に乗っていた宇宙線である。	30
4.1	Fermi-LAT のライトカーブ。赤いラインがトリガー時刻である。	34
4.2	IC211208A のライトカーブ。赤いラインがトリガー時刻 (MJD 59556.83527778) である。	35
4.3	IC170922A の 2017 年 9 月 24 日と 2018 年 3 月 28 日のかなたの観測画像の減算。左からかなたの撮像画像、PS1 の画像、減算後の画像。IC170922A は PS1 の画像上に黄色で印がつけてある。	37
4.4	IC170922A のかなたの撮像画像同士の減算。左から 2018 年 3 月 28 日のかなたの撮像画像、2017 年 9 月 24 日のかなたの撮像画像、減算後の画像。	37
4.5	IC211208A のかなたの観測画像と PS1 画像の減算。左からかなたの撮像画像、PS1 の画像、減算後の画像。IC211208A は PS1 の画像上に黄色で印がつけてある。	38

4.6	IC211208A のかなたの撮像画像同士の減算。左から 2021 年 12 月 10 日のかなたの撮像画像、2021 年 12 月 28 日のかなたの撮像画像、減算後の画像。	38
4.7	IC211208A、IC170922A のライトカーブ。上図が IC211208A、下図が IC170922A。赤線は各イベントのトリガー時刻である。	39
5.1	Fermi-LAT のライトカーブ。赤いラインがトリガー時刻である。	44

第1章 序論

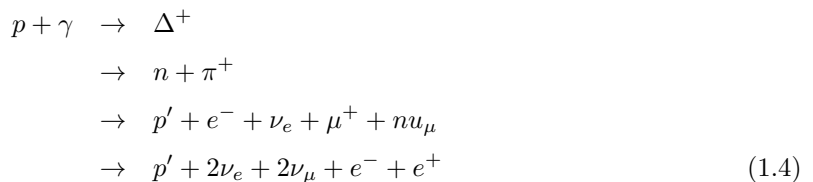
1.1 ニュートリノとガンマ線

以下は [1][2][3] を参考した。

1.1.1 ニュートリノとガンマ線

ニュートリノには電子ニュートリノ (ν_e)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) の3種類がある。ニュートリノは電荷をもたず中性であり、質量が非常に小さく、強い力、電磁力、弱い力のうち弱い力とのみ反応する。よって、ニュートリノと物質との反応断面積は非常に小さく透過率が高い。また、電氣的に中性であるため星間磁場によって曲げられることがなく、質量が非常に小さいためほぼ光速で運動する。そのため、検出は難しいが宇宙から到来したニュートリノは生成源の位置や生成メカニズムの情報を持っているのである。すなわち、電磁波では観測できなかった銀河系外の高エネルギー現象や天体の中心部の情報を得ることができる。

高エネルギー領域でのニュートリノ生成にはミューオン崩壊によってニュートリノを生成する高エネルギーのパイオンが必要であり、親粒子となる原子核が高エネルギーに加速されている必要がある。そのため、高エネルギーニュートリノの起源は高エネルギー宇宙線の起源と密接に関係していると考えられる。高エネルギーニュートリノの生成過程は主に pp 反応（陽子 - 陽子反応）と $p\gamma$ 反応（陽子 - ガンマ反応）によるものである。反応を以下に示す。



pp 反応で生成された重陽子 (${}^2\text{H}$) は陽子と反応してガンマ線が生成され、 $p\gamma$ 反応では π^0 崩壊が起こりガ

ガンマ線が生成されている。ガンマ線はシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱など電子起源でも放射されるため、ガンマ線を観測するだけでは陽子起源であるかどうかの判別は難しい。しかし、ニュートリノは電子起源では発生しないため、高エネルギーニュートリノとガンマ線が同時に同位置から検出されればそこでは陽子が激しく加速されている可能性がある。また、高エネルギーニュートリノの放射源である天体が同定されガンマ線も検出されればその天体では陽子による加速機構が働いているといえるのである。

1.1.2 ガンマ線の放射機構

加速された粒子からの主な放射過程であるシンクロトロン放射、逆コンプトン散乱、中性パイ中間子崩壊、制動放射について述べる。各放射過程の模式図を図 1.1 に示す。

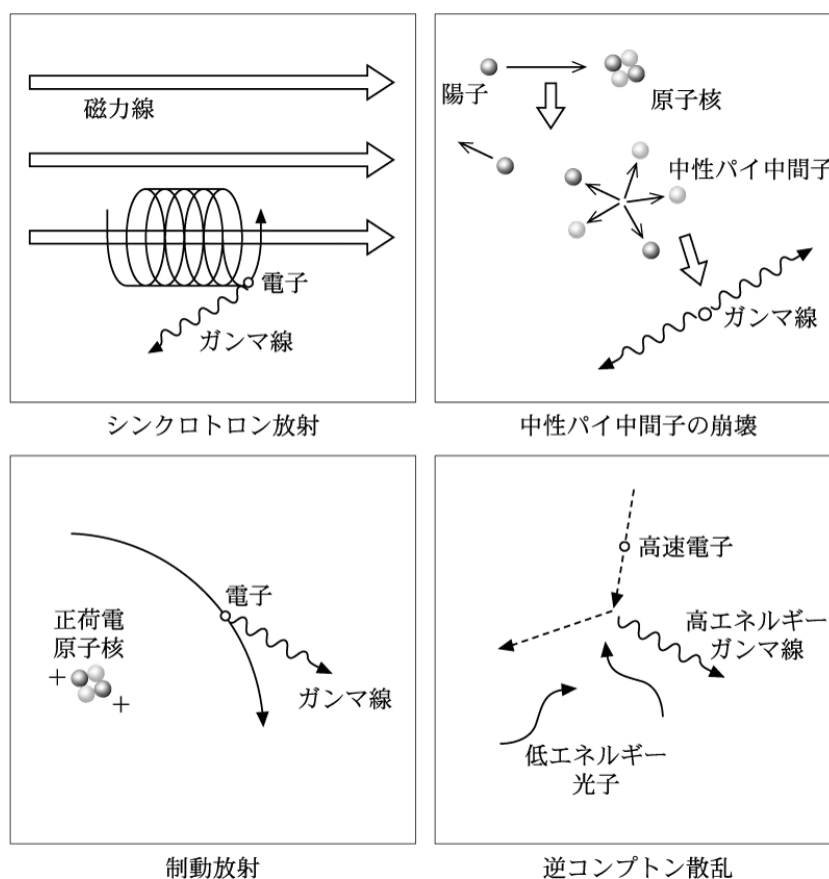


図 1.1: 各放射機構の模式図 [1]

シンクロトロン放射

相対論的な荷電粒子が磁場の中を運動するとローレンツ力によって荷電粒子は進路方向が曲げられ加速度運動する。これにより電磁波が放射される。これをシンクロトロン放射とよぶ。磁場 B の中でシンクロトロン放射による電子のエネルギー損失率 $P_{synch}(\theta)$ は次式のように表される。

$$P_{synch}(\theta) = - \left(\frac{dE}{dt} \right)_{synch}(\theta) \quad (1.5)$$

$$= 2 \sigma_T c \gamma^2 \beta^2 U_B \sin^2 \theta \quad (1.6)$$

ここで、 σ_T はトムソン散乱断面積、 θ は磁場と電子のなす角、 $\beta = \frac{v}{c}$ 、 U_B は磁場のエネルギー密度である。相対論的電子は $\beta \simeq 1$ であり、 θ が一様な場合は $\sin^2(\theta) \simeq 2/3$ なので、

$$\langle P_{synch} \rangle = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma^2 \beta^2 U_B \quad (1.7)$$

となる。よって電子のエネルギー損失は $\gamma^2 U_B$ に比例し、電子のエネルギーが大きいほど、また磁場が大きいほど損失率は大きくなる。

逆コンプトン散乱

光子が静止した自由電子に衝突して散乱されると同時に自由電子にエネルギーを与える現象をコンプトン散乱と呼ぶ。これとは逆に、運動している相対論的電子と低エネルギーの光子が衝突し光子が高エネルギー側にたたき上げられる現象を逆コンプトン散乱と呼ぶ。光子のエネルギー密度を U_I とすると、逆コンプトン散乱による電子のエネルギー損失率 $P_{ic}(\theta)$ は次式のように表される。

$$P_{ic}(\theta) = - \left(\frac{dE}{dt} \right)_{IC}(\theta) \quad (1.8)$$

$$= 2 \sigma_T c \gamma^2 \beta^2 U_I \sin^2 \theta \quad (1.9)$$

π^0 崩壊

相対論的速度まで加速された高エネルギーの宇宙線陽子が星間物質の原子核（主に陽子）と衝突するとパイオンである π^+ 、 π^- 、 π^0 を生成する。各パイオンは同確率で生成され、次式のように崩壊する。

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad (1.10)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.11)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.12)$$

この π^0 崩壊により2つのガンマ線が放射される。 π^0 を生成するために必要な高エネルギーの宇宙線陽子の運動エネルギー $E_p - m_p c^2$ は

$$\begin{aligned} E_p - m_p c^2 &\geq 2m_{\pi^0} c^2 \left(1 + \frac{m_{\pi^0}}{4m_p} \right) \\ &\simeq 280 \text{ MeV} \end{aligned} \quad (1.13)$$

より 280MeV である。 π^0 の静止質量 $m_{\pi^0}^0 = 134.98MeV$ であるので π^0 崩壊によって放射されたガンマ線のエネルギーは重心系で約 67MeV であり、実験室系でのエネルギーはもとの陽子の持っていたエネルギーの分だけ高くなる。

制動放射

相対論的速度で運動している荷電粒子が原子核の電場によって軌道を曲げられ加速度を受けたときに電磁波が放出される現象を制動放射という。この現象が宇宙線電子と星間物質との間で起きるとガンマ線が放射される。原子核の電荷を Z 、数密度を N とすると制動放射による電子のエネルギー損失率 P_{bremss} は

$$\begin{aligned} P_{bremss} &= -\frac{1}{E} \left(\frac{dE}{dt} \right)_{bremss} \\ &= \frac{3}{2\pi} \sigma_T N Z^2 \alpha c \bar{g} \end{aligned} \quad (1.14)$$

ここで σ_T はトムソン散乱断面積、 α は微細構造定数、 \bar{g} はゴント因子、 N は単位面積あたりの吸収物質原子個数、 Z は吸収物質の原子番号である。この式よりエネルギー損失率は原子核の数密度に比例する。よって物質密度の高い領域でのガンマ線の放射は制動放射によるものである可能性が高い。

1.1.3 天体起源のニュートリノ

宇宙から飛来するニュートリノには宇宙背景ニュートリノや天体ニュートリノなどがある。宇宙背景ニュートリノとはビッグバンの残存ニュートリノのことで、エネルギーは meV 程度でありまだ検出されていない。また、背景高エネルギーニュートリノとは全天から一様にやってくる高エネルギーニュートリノ放射のことである。

天体ニュートリノの主な放射源候補として考えられている天体には活動銀河核、銀河団、超新星残骸やガンマ線バーストなどの突発天体、ガンマ線連星が挙げられる [5]。太陽ニュートリノは pp 過程と炭素、窒素、酸素の原子核を触媒として陽子 4 個からヘリウム 1 個が生成される CNO 過程から生成され、エネルギーは最大で約 19MeV である [6]。超新星ニュートリノは超新星爆発が起こる時、エネルギーの約 99% を持ち去り、平均エネルギーは約 10-20MeV である。これらのニュートリノはスーパーカミオカンデなどで観測される。一方高エネルギー宇宙ニュートリノは主要なエネルギー帯が TeV 以上である。そのため、親粒子となる陽子とガンマ線（光子）は重心系で約 1.25GeV のエネルギーが最低でも必要となる。高エネルギー宇宙ニュートリノはチェレンコフ光を利用する IceCube や ANTARES など観測されている。活動銀河核は超高エネルギー宇宙線の放射源の有力候補として議論のされている天体であり、これまでにジェットの内部分、ブラックホール、降着円盤付近、ホットスポットやブロッブの衝撃波、ローブやバブルでの宇宙線生成などの様々なシナリオが議論されている。

1.2 活動銀河核

銀河の中心部が銀河全体に匹敵するエネルギーを放射しているものを活動銀河核と呼び、その中心エンジン領域は太陽系程度と非常に小さい。活動銀河核からの放射は電波から TeV ガンマ線の幅広いエネルギー

領域にわたる。活動銀河核の中心には太陽の 100 万倍から 10 億倍の質量をもつ超大質量ブラックホール (SMBH) が存在し、その周囲を取り巻くトラスから物質が流れ込み降着円盤を形成すると考えられている。降着円盤からブラックホールに物質が落ち込むときに何らかのメカニズムで重力エネルギーが運動エネルギーに変換されジェットと呼ばれる相対論的な速度のプラズマとして中心核から双方に開放されると考えられている。

1.2.1 ブレーザー天体

活動銀河核の中心からはジェットと呼ばれるガス噴射が起こっている。この相対論的ジェットを進行方向正面から見ていると考えられている活動銀河核がブレーザーである。活動銀河核の中でも特に激しい変動があり、可視光で急速な時間変動がある。ブレーザーは弱い輝線や吸収線を持つ BL Lac 型と、強く幅の広い輝線を持つ FSRQ 型の 2 種類に分類される。ブレーザーは電波からガンマ線までの広い波長領域で観測され、多波長スペクトル (SED: Spectrum Energy Distribution) は 2 つのピークをもつ。このピークを説明するモデルとしてレプトニックモデルとハドロニックモデルが主に提唱されている。ブレーザー天体 TXS 0506+056 の SED を図 1.2 に示す。

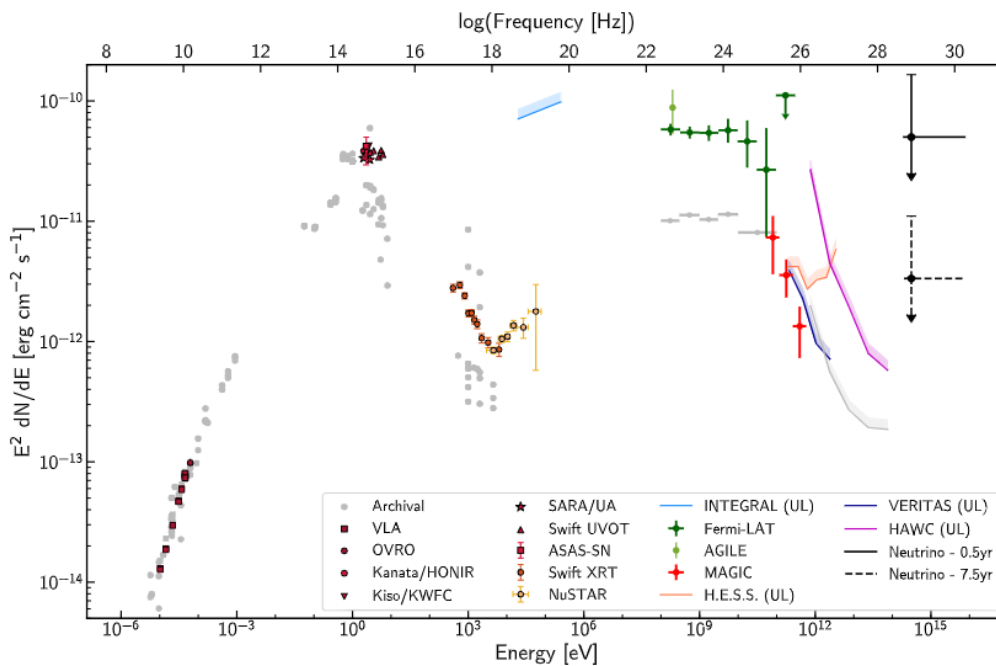


図 1.2: TXS 0506+056[4]

1.2.2 放射モデル

ブレーザーの放射モデルには電子起源のレプトニックモデルと陽子起源のハドロニックモデルがある。レプトニックモデル相対論的な速度で運動している電子が磁場と相互作用してシンクロトロン放射を行い、放射された光子が同じく相対論的な速度で運動している電子と衝突することで光子がさらに高エネルギー側にたたき上げられると考えられている。そのため SED の低エネルギー領域の一つ目の山はシンクロトロン放射、高エネルギー領域の 2 つ目の山は逆コンプトン散乱で説明される。ハドロニックモデルではガンマ線放射は $p\gamma$ 反応によるものであると考えられている。レプトニックモデルでは説明できない高エネルギーガンマ線放射を説明する際にハドロニックモデルが考えられることが多い。ジェットの中に加速陽子がどれだけ存在するかは、ジェットの発生機構を考える上でも重要であり、両モデルを区別することが求められている。

1.2.3 先行研究

現在 IceCube が観測した高エネルギーニュートリノの放射源を同定したイベントは 2017 年 9 月 22 日に観測された 1 イベント (IC170922A) である [7][8]。IC170922A は到来方向が (RA, Dec)=(77.2853, +5.7517)、エラー半径が 14.99arcmin、観測されたエネルギーから計算された親ニュートリノの推定エネルギーは 90% の信頼度で 183TeV-4.3PeV で、最大確定推定値は 290TeV であった。高エネルギーニュートリノ検出後、エラー半径内に存在していたブレーザー TXS 0506+056 をかなた望遠鏡で観測したところ過去に比べて増光していることがわかり、ガンマ線衛星の Fermi-LAT 衛星でもガンマ線フレアが観測された。これを受けて大気チェレンコフ望遠鏡の High-Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.)、Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System (VERITAS)、Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov (MAGIC) Telescopes でフォローアップ観測が実行され MAGIC で超高エネルギーガンマ線が観測された。他にも X 線衛星の Swift 衛星や MAXI Gas Slit Camera、電波望遠鏡の Very Large Array (VLA) など多波長で観測が行われた。これらの多波長観測から TXS 0506+056 のフレア時にとニュートリノが同方向から検出されたことを棄却する有意度は 3σ であった。これより TXS 0506+056 は高エネルギーニュートリノ源と同定された。しかし、検出されたニュートリノから予想される X 線のエネルギー密度が低く、さらに $p\gamma$ 反応で出来たパイ中間子の崩壊による成分が X 線領域に見られると考えられないため、 $p\gamma$ 反応で生成された陽子が荷電変換した中性子が親粒子としてニュートリノをだす 2 段階モデルも考えられている [9]。

IceCube で観測された高エネルギーニュートリノ源はこの TXS 0506+056 以外にはまだ見つかっていない。しかし、先行研究のように高エネルギーニュートリノ検出後の多波長フォローアップ観測は天体ニュートリノの放射源を探す有用な手段と言える。

1.3 本研究の目的

高エネルギーニュートリノの起源は未だ解明されていない。ニュートリノ源である天体を同定することはその場所で陽子起源の粒子加速が起こっていることを意味し、天体の宇宙線加速、放射機構解明の鍵となる。そこで多波長の電磁波でニュートリノ源を探すことで位置決定精度を高くすることができ、ニュートリノ源同定の足がかりにすることができる。また、ニュートリノのみでは天体のメカニズムなどを調べ

るには情報が少ないが、電磁波の情報と合わせることでより深い研究をすることができる。そのため本研究では IceCube で観測された高エネルギーニュートリノの対応天体の電磁波による同定を目的とした。

IceCube のニュートリノアラートに対応する天体の同定には即座の電磁波フォローアップ観測が重要である。そのため、ニュートリノが検出された場所の自動観測が必要であり、さらに即座のデータ解析が必要である。ここでは GeV ガンマ線衛星 Fermi-LAT と広島大学かなた望遠鏡を用いたフォローアップ観測を考える。Fermi 衛星は広い視野で観測を続けており、データも即時公開される。また、かなた望遠鏡はニュートリノの情報アラートを受けて自動的に観測する機能がすでに整っている。そこで、できるだけ多くの人数で即座に、解析の知識がない人でも行える解析システムを作ることが必要となる。したがって、可視近赤外線望遠鏡のかなた望遠鏡とフェルミ衛星のデータ解析パイプラインを作成しニュートリノアラート後の素早いフォローアップ解析実現を目指した。さらに、解析した結果を web 上に公開するシステムもパイプラインに組み込み学内の他の研究者、また学外の研究機関と情報を共有することを目指した。

第2章 観測機器

2.1 IceCube ニュートリノ天文台

IceCube ニュートリノ天文台は南極のアムンゼン・スコット基地の地下に設置されたニュートリノ観測所である。2005年から建設が開始され、2010年12月に工事が終了した。Digital Optical Module(DOM)と呼ばれる球体の光センサーモジュールを氷中1500mから2500mの深さに5160個並べてあり、検出器の総容量は 1km^3 にもなる。IceCube 検出器の全体像を図2.1に示す。

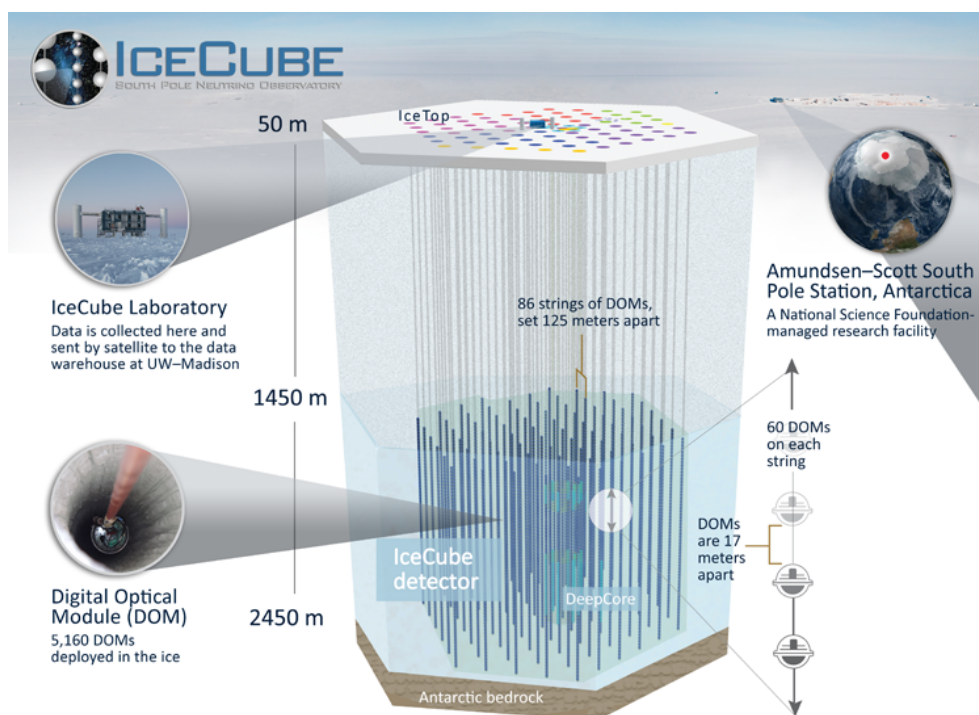


図 2.1: IceCube Detector[10]

ニュートリノが氷の中の水分子に衝突することで荷電粒子が生成される。この荷電粒子が氷の中で光速より速く走るとチェレンコフ光が発生する。IceCube では DOM がこのチェレンコフ光を検出することによってニュートリノを観測している。100TeV-10PeV ものエネルギーを持つ高エネルギーニュートリノを検出

でき、角度分解能は約 0.5° である。

2.1.1 AMON GCN アラート

Astrophysical Multimessenger Observatory Network(AMON) とはマルチメッセンジャー天文台と観測所のデータを利用してリアルタイムで電磁波やニュートリノ、重力波などの放射源と一致する天体を探すことを目的として構築されたネットワークである。AMON の主な目的は3つあり、1つ目は複数の観測所などの同時刻に起こったサブスレッショルドイベントをリアルタイムで探し、他のフォローアップ観測所にプロンプトアラートを配信すること、2つ目はイベントがあった時に GammaRay Coordinates Network(GCN) と Transient Astronomy Network(TAN) を介してフォローアップ観測のためにアラートを配信すること、3つ目はイベントをデータベースに保存してアーカイブデータの時刻や位置の一致を探すことである [11]。

GCN アラートとは、ガンマ線に関する突発イベントが検出されたときに情報がアラートとして流れるシステムである。ガンマ線バースト、重力波とともにニュートリノイベントの情報が流される。GCN アラートは GCN Circulars Archive に購読登録している人や研究所にメールが届き各所での即座のフォローアップ観測を可能とする。

IceCube ニュートリノ天文台でニュートリノが観測された際に発信される GCN アラート内には図 2.2 に示すように、検出されたニュートリノのアラート時刻、アラートタイプ、ランナンバー、イベントナンバー、RA、Dec、エラーサークル、トリガー時刻、検出されたニュートリノのエネルギーなどの詳細な情報が記載されている。アラートタイプには HESE(High Energy Starting Events)、EHE(Extremely High Energy)、GOLD、BRONZE の4種類がある。HESE と EHE が 2019 年 6 月に廃止され GOLD と BRONZE に置き換わっており、検出されたニュートリノが天体ニュートリノである確率が少なくとも 50%であるものが GOLD、30%-50%であるものが BRONZE として報告される [12]。

```

////////////////////////////////////
TITLE:          GCN/AMON NOTICE
NOTICE_DATE:    Wed 17 Nov 21 03:51:51 UT
NOTICE_TYPE:    ICECUBE Astrotrack Gold
STREAM:         24
RUN_NUM:        135908
EVENT_NUM:      43512334
SRC_RA:         225.9338d [+15h 03m 44s] (J2000),
                226.2145d [+15h 04m 51s] (current),
                225.2929d [+15h 01m 10s] (1950)
SRC_DEC:        -0.2016d [-00d 12' 05"] (J2000),
                -0.2861d [-00d 17' 09"] (current),
                -0.0069d [-00d 00' 24"] (1950)
SRC_ERROR:      30.80 [arcmin radius, stat-only, 90% containment]
SRC_ERROR50:    12.00 [arcmin radius, stat-only, 50% containment]
DISCOVERY_DATE: 19535 TJD; 321 DOY; 21/11/17 (yy/mm/dd)
DISCOVERY_TIME: 13857 SOD [03:50:57.18] UT
REVISION:       0
ENERGY:         1.9503e+02 [TeV]
SIGNALNESS:     5.2590e-01 [dn]
FAR:           1.1655 [yr^-1]
SUN_POSTN:     232.67d [+15h 30m 40s] -19.02d [-19d 01' 03"]
SUN_DIST:      19.77 [deg] Sun_angle= 0.4 [hr] (West of Sun)
MOON_POSTN:    29.63d [+01h 58m 31s] +9.21d [+09d 12' 31"]
MOON_DIST:     161.23 [deg]
GAL_COORDS:    357.71, 48.09 [deg] galactic lon, lat of the event
ECL_COORDS:    223.53, 16.41 [deg] ecliptic lon, lat of the event
COMMENTS:      IceCube Gold event.
                The position error is statistical only, there is no systematic added.

```

図 2.2: IceCube ニュートリノイベントの GCN アラートの例

2.2 Fermi-LAT

Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡は 2008 年 6 月 11 日に NASA によって打ち上げられ同年 8 月から運用を開始したガンマ線観測用の天文衛星である。ガンマ線検出器である大面積望遠鏡 LAT と、ガンマ線バーストモニター GBM の 2 つの検出器を搭載している。Fermi 衛星のイメージ図を図 2.3 示す。



図 2.3: Fermi 衛星 イメージ図 [13]

LAT は約 20MeV-300GeV までのエネルギー範囲で天体の長期高感度ガンマ線観測を行うことを目的とする。全天を約 3 時間ごとに観測し、視野は全天の約 20 %である。さらに、観測後数時間で観測データが公開されるため即座にデータを利用した解析等が行える。LAT は主にトラッカー、カロリメーター、反同時計測検出器の 3 つから構成されている。トラッカーとカロリメーターのセットを 1 つのモジュールとして 4×4 の計 16 個のモジュールが組み合わさり、その周りを反同時計測検出器で囲むという構造をしている。LAT に入射したガンマ線がトラッカーに到達するとタングステンコンバーターと相互作用し電子陽電子対が生成し、この電子と陽電子の飛跡が計測される。さらに電子と陽電子がカロリメーター内で電磁カスケードを起こし、このエネルギーが計測される。LAT の内部構造を図 2.4 に示す。

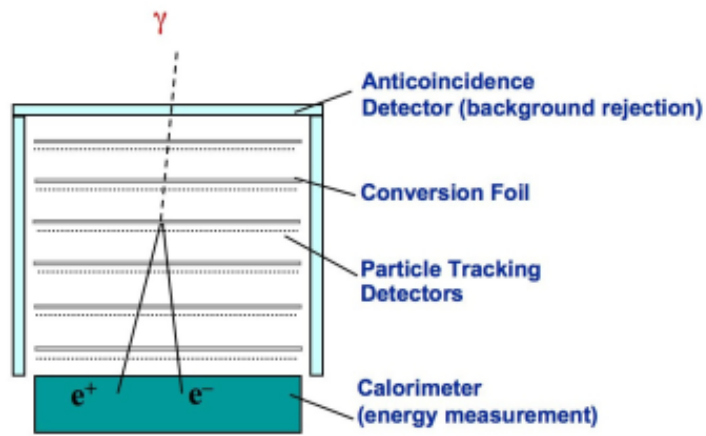


図 2.4: LAT 内部構造 [14]

2.2.1 解析方法

Fermi 衛星のデータおよび解析ツールの Fermi Science Tools は NASA の Fermi Science Support Center のページで提供されており、本研究ではこのデータとツールを使って解析を行った。解析概略図を図 2.5 に示した。Fermi Science Tools のバージョンは作成した解析パイプラインでは v10r0p5、追解析では v11r5p3 を、データは Pass8 Release3 Version2(P8R3_SOURCE_V2) を使用した。また、モデルファイルの作成には 4FGL DR2 カタログを使用した。以下に解析で用いたファイル、コマンドの簡単な説明を記載する。

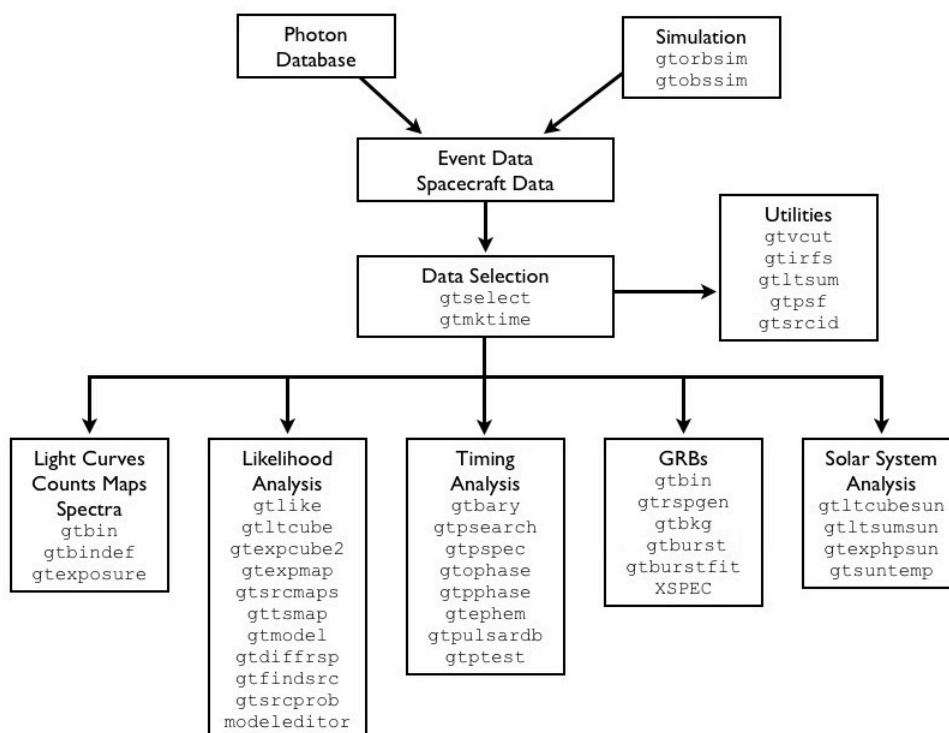


図 2.5: Fermi Science tools 解析フローチャート [15]

PHfits

光子の情報が入っているデータファイル。

SCfits

PHfits に対応する衛星の姿勢や検出器状況などの情報が入っているデータファイル。

gtselect

PHfits のデータを時間、空の領域 ROI(Radius Of Incircle)、エネルギー範囲で切り取ることができるコマンド。

gtmktime

gtmktime は、Good Time Interval(GTI) の更新を fermi 衛星の状態に基づいて行う。GTI はデータが有効であるとみなされる時間範囲のことである。GTI は LAT ではデータの選択した時間範囲の時間のリストで mkttime tool をつかい露出時間を計算する。

gtbin

PH fits からカウントマップ、CCUBE、光度曲線などのファイルを作成する。これらのファイルは gtmktime

で作られたファイルを使用する。ここではカウントマップと CCUBE を作成した。

gtlucube

SC ファイルと PH ファイルを用いて live time を計算する。live time ガンマ線のエネルギーと入射方向に関する 3 次元の関数である。

gtexpcube2

gtexpcube2 は livetime と有効露出面積の積で有効露出量をもとめ、exposure map にする。ここでは解析半径外からの影響も考慮するため解析半径より約 5~10 度大きい範囲をとる。

gtsrcmap

これまでに作った 3D のカウントマップや ltcube、exposure map などを用いて有効露出時間や有効露出量などを考慮した 3 次元のカウントマップを作成する。

gtlike

今回の天体の解析では likelihood 解析を用いた。likelihood 解析とは各天体の強度やスペクトルをモデルとして含んだガンマ線ソース分布を用いて、観測されたガンマ線イベントを最も忠実に再現するモデルパラメータをフィッティングによって探す方法である。フィッティングは初期値を設定し尤度の最大値を探して、最も確からしいパラメータになるまでモデルパラメータ値を変化させながら計算を繰り返す作業である。gtlike で計算を行う際にはオプティマイザと呼ばれるフィッティングのアルゴリズムが複数ある。今回はオプティマイザの DRMNFB と NEWMINUIT を使い 2 回フィッティングを行なった。まず DRMNFB で大まかな値をフィッティングし、その結果を用いて NEWMINUIT で詳細なパラメータの値をフィッティングした。

2.3 かなた望遠鏡

かなた望遠鏡 (図 2.6) は東広島天文台にある可視近赤外線望遠鏡である。主鏡の有効径は 1.5m と国内最大級であり、駆動力は 6 度/秒と同サイズの望遠鏡の中では高い。焦点は第一ナスミス焦点、第二ナスミス焦点およびカセグレン焦点の 3 つがあり、第一ナスミス焦点には一露出型広視野偏光撮像器 HOWpol(Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter)[16] が、カセグレン焦点には可視近赤外線同時カメラ HONIR(Hiroshima Optical Near-InfraRed camera)[17] が取り付けられている。かなた望遠鏡は広島大学の所有であるため、突発天体などに対して即座に対応することが可能であり、また自身での観測が可能であるという利点がある。

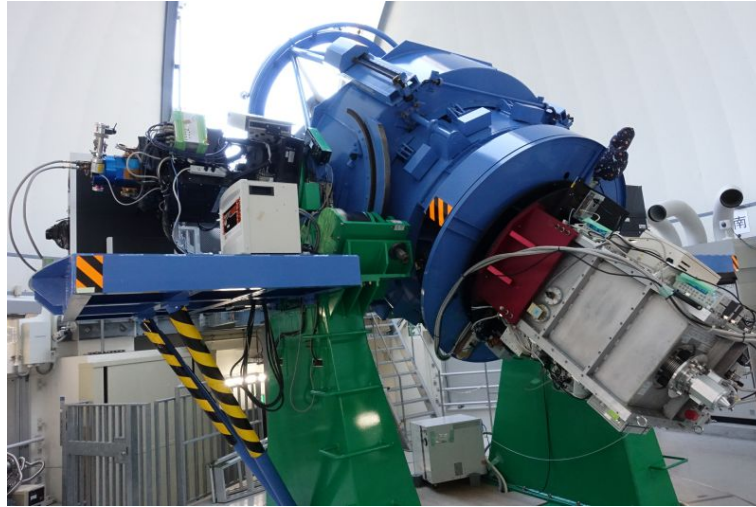


図 2.6: かなた望遠鏡 [18]

2.3.1 HONIR

HONIR とはかなた望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けられている装置であり、可視近赤外線同時撮像偏光観測と分光観測が特徴である。HONIR の仕様を以下の表 2.1 に示す。本研究ではこの HONIR を用いてニュートリノ候補天体のフォローアップ観測を行った。

表 2.1: HONIR の仕様

	可視バンド	赤外バンド
検出器	CCD	HgCdTe VIRGO-2K
視野	10' × 10'	
ピクセルスケール	0.30 " / pixel	
波長域	0.5-1.0 μ m	1.15-2.4 μ m
フィルター	B, V, R_C, I_C, Y	Y, J, H, K_S

フィルター

HONIR のフィルターは $B, V, R_C, I_C, Y, J, H, K_S$ バンドが搭載されている。観測の際にこれらのフィルターを選んで使うことで観測波長を制限する。表 2.2 に各バンドの波長帯をまとめた。また、図 2.7 にフィルターの透過曲線を示す。Y バンドの波長帯のみ HONIR についての論文、ホームページに記載がなかったため、同じフィルターを使用しているすばる望遠鏡の MOIRCS (Multi-Object InfraRed Camera and Spectrograph) の波長帯を参考した [20]。

表 2.2: フィルターの波長帯

バンド	中心波長 (μm)	波長幅 (μm)
<i>B</i>	0.44352	0.10174
<i>V</i>	0.54914	0.10703
<i>R_C</i>	0.65344	0.12939
<i>I_C</i>	0.80879	0.13819
<i>Y</i>	1.02	0.10
<i>J</i>	1.2485	0.1593
<i>H</i>	1.6380	0.2862
<i>K_S</i>	2.1455	0.3195

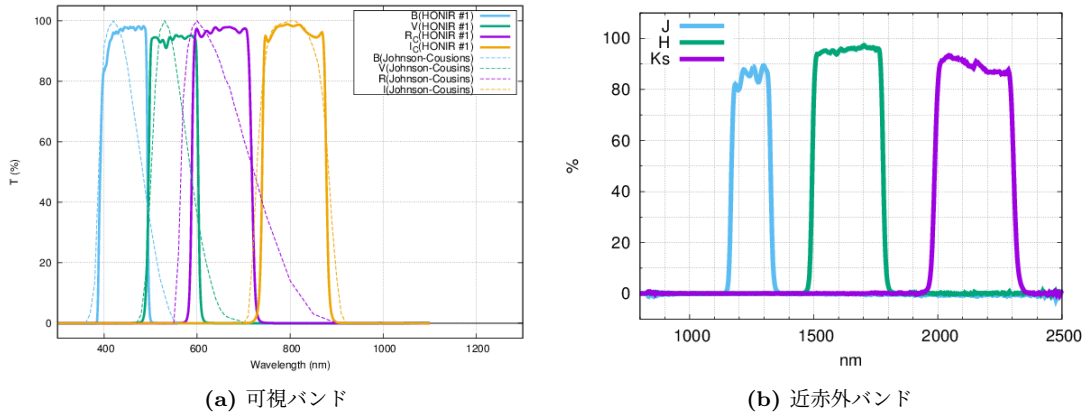


図 2.7: フィルターの透過率 [19]

2.3.2 データ解析

かなた望遠鏡で取得された生画像は fits 形式で取得される。この fits 画像に対して Image Reduction and Analysis Facility (IRAF) および Astropy という画像解析ソフトを用いて画像に乗っているノイズを差し引く1次処理、宇宙線除去、スカイ引きおよび WCS 貼り付けによる座標変換を行った。さらに、High Order Transform of PSF ANd Template Subtraction (HOTPANTS) という画像減算ソフトを用いて1次処理後のかなた望遠鏡の観測画像と Pan-STARRS1 (PS1) のデータの減算を行うことで突発天体、増光天体の有無を確認した。この章では WCS 貼り付けまでを説明する。画像減算については第3章で説明する。

1次処理

かなた望遠鏡で取得された生画像にはノイズやピクセルごとの感度のムラがあるため、そのまま解析することができない。そこで1次処理を行うことでノイズ除去、ムラの補正をすることで解析を行えるよう

にする。

- ・オーバースキャン引き

取得された生画像にはオーバースキャン領域（可視）またはリファレンスピクセル領域（近赤外）という直線領域がある。オーバースキャン領域は電荷の読み出しの際に余分に読み出された領域である。オーバースキャン領域の ADU カウント分布から読み出し時のノイズの分布を推定し、多項式で X 軸方向に近似することで、読み出し領域のノイズ分布を見積もる。見積もられたノイズ量を差し引き、オーバースキャン領域を切り取って画像をつなげることで、読み出しによるノイズを差し引く。

- ・バイアス引き

バイアスとは画像読み出し時にカウントがノイズなどにより 0 にならないように印加されている電圧により生じるオフセットである。IRAF コマンド `imarith` を使用してバイアス画像を減算することでバイアス引きを行う。近赤外画像ではバイアス引きの代わりにダーク引きを行う。

- ・ダーク引き

近赤外画像にはダークと呼ばれる検出器内で熱的に発生した電子によるノイズが乗っている。ダークカウントは時間と共に加算されるため、観測画像と同じ露出時間で光を入れない状態で撮像することにより、ダーク画像群を取得する。得られた複数枚のダーク画像群を足し合わせて中央値を取ることでダーク画像を作成する。IRAF コマンド `imarith` を使用してダーク画像を減算することでダーク引きを行う。このときバイアスも一緒に補正される。

- ・フラット割

一般に、一様な光を望遠鏡に当てても望遠鏡の反射率の場所依存性やカメラ内部の構造によって生画像のカウントには 2 次元平面上でムラが生じる。CCD や近赤外アレイの各ピクセルはそれぞれ感度を持ち、それらは一般的には異なる。ピクセル間の感度ムラを補正するために、フラットフレームで割ることで感度を一様に補正する。フラットフレームを作成するために以下の行程を行う。一様光源（フラットランプおよびフラット板）を用意し、フラット板から来る光の強さは望遠鏡に入社する時に一様であると仮定する。フラット板を複数撮像観測し、それぞれの画像のオーバースキャン処理およびバイアス、ダーク引きを行う。処理された画像群に対して中央値画像を作成する。得られた画像の中心領域（一般的に感度が高い領域）のカウントで割り算することで正規化する。正規化されたフレームをフラット画像として利用する。IRAF コマンド `imarith` を使用してフラット画像で割ることでピクセル間のムラを補正する。

- ・バッドピクセル補正

近赤外画像は可視画像に比べバッドピクセルと呼ばれる感度が著しく低い、または高いピクセルが多い。バッドピクセルが残ったままだと正確な明るさの測定を行うことが難しいため、バッドピクセルの領域をマスクして周辺の感度で補正することによりバッドピクセル領域の感度を補正する必要がある。IRAF 上で

HONIR 用に作成されたコマンド `hnbpxvirgo` を使用することでバッドピクセルを補正する。

- ・宇宙線除去

画像には星の他に宇宙線が乗った部分が明るく点や線のように現れることがある。宇宙線が乗ったピクセルのカウンタ数は高くなるので宇宙線除去を行うことで補正する。Laplacian Cosmic Ray Identification (LA-Cosmic) アルゴリズムにより画像上に点在する宇宙線由来の信号を検出し (PASP 113, 1420 (2001))、隣接するピクセルから値を補間することで宇宙線を画像上から除去する。これにより以降の測光作業で宇宙線による誤検出や誤った値の測定を防ぐ。

- ・スカイ引き

画像の星がない領域にはスカイと呼ばれるバックグラウンド成分が乗っており、その原因は他天体からの光や都市光などである。撮像観測の際にディザリング観測で星の位置をずらしながら観測し、一次処理を行った画像を重ね合わせることでスカイ画像を作成する。このスカイ画像を1次処理画像から引くことでスカイ引きを行い、星がスカイに埋もれないよう補正する。

- ・WCS の貼り付け

かなた望遠鏡のポインティングは一般に数秒角以下で制御することが難しく、指定したポインティング座標に対してずれてしまう。天体や星の同定を行う上で1秒以下の精度で天体位置が決まる必要があり、光度の較正において天体座標位置補正は重要となる。画像上にある星の位置とカタログ位置を比較することで、望遠鏡がどの方向に向いているかを計算することができる。Astrometry engine は天体位置から世界座標システム (World Coordinate System, WCS) を計算するソフトウェアであり、これを用いて各画像上に写る星の位置から WCS を解析し、望遠鏡位置を計算した。得られた WCS 情報を用いてピクセル座標から画像上の位置を赤経赤緯へ変換することでカタログにある赤経赤緯と比較して天体を同定する。

第3章 データ解析パイプライン

3.1 開発パイプラインの機能

データ解析パイプライン開発の主な目的は2つある。1つ目はGCNのニュートリノアラートが出てから即座に解析を行えることである。高エネルギーニュートリノ天体の同定にはトリガー時刻の到来方向の天体の光度変動や突発天体の有無の確認が重要である。そのため即座の観測、解析をスムーズに行うことが求められる。2つ目はFermi-LATやHONIRの観測データの解析方法に慣れていなくてもスクリプトを回せば解析ができ、web上で結果の共有ができることである。パイプラインを作ることによって例えば可視光の観測をメインに行っていてガンマ線解析の詳しい方法がわからない人でもスクリプトを回すだけでガンマ線解析ができ可視光観測の際の観測天体選定の指標にしたり、結果の比較ができる。さらに、web上に共有されるため誰でも結果を確認できる。現在は学内のみ公開のサーバーを用いているが、学外公開サーバーに結果を共有できるようになれば学外の観測機関とすぐに連携をとってフォローアップ観測を行う手助けとなる。

3.2 Fermi-LATの解析パイプライン

2.2節で説明したが、Fermi-LATは衛星である。そのため昼夜問わずガンマ線観測を行っている。かなた望遠鏡の観測時間外にニュートリノアラートが出た場合、Fermi-LATの即時解析を行いエラーサークル内のガンマ線を確認することで望遠鏡での可視近赤外線観測の指標を得ることができる。

以下がFermi-LATの解析の大まかな流れである。

1. ニュートリノアラートを受け取る
2. アラート内の情報から解析のパラメータを設定するテキストファイルを作成する
3. Fermi-LATのデータを解析する
4. 結果をhtmlファイルにまとめる
5. 学内公開サーバー coalsack に結果を共有する

この中で2,3,4を行う即時解析スクリプトを実行する必要がある。本研究ではハンガリー Eotvos 大学の 大野さんが GRB 解析用に作られたプログラム `Fermi_get_data.py`、`FermiGRBAnalysis.csh` を土台にし、これを Ice-Cube 解析用に改良し即時解析スクリプトの中に組み込んだ。`Fermi_get_data.py` は 2 を行うためのスクリプトであり、`FermiGRBAnalysis.csh` は 3 を行うための土台としたスクリプトである。`FermiGRBAnalysis.csh` は大野さんの環境で動くようになっているためスクリプトを回す前に `/net/cluster541/users/ohno/glast/miniconda3/etc/profile`

を source する必要がある。ニュートリノ検出前後でのガンマ線源を比較するため、スクリプト内で 2 と 3 の解析をトリガー時刻前と後の 2 回を行う。

パラメータ設定ファイルの作成

ニュートリノアラートには 2.1.1 節で述べたように検出されたニュートリノの詳細な情報が記載されている。パイプラインの 2. アラート内の情報から解析のパラメータを設定するテキストファイルを作成する、では 2.2 に示した画像の TITLE から最後の行の COMMENTS までをコピー&ペーストしたテキストファイルを元にパラメータ設定ファイルを作成する。パラメータ設定ファイル内にはトリガー名、トリガー時刻 (MET)、RADec、イベントの到来方向のエラー半径、スタート時刻、ストップ時刻、使用する応答関数、イベント名、解析に用いる Fermi-LAT のデータの fits ファイルの名前、TSmap (有意度マップ) 作成の有無、モデルファイルの作成方法、モデルファイルのスレッシュホールドが設定されている。

以下、それぞれの初期設定を説明する。即時解析であるので解析の時間 bin は短いほうがよく、Fermi 衛星の軌道周期は約 5800 秒であるためトリガー時刻の前後 6000 秒にした。使用する関数は P8R3_SOURCEV3、TSmap は作成、モデルファイルの作成方法は 4FGL カタログソースからイベントファイルの解析領域 (ROI) とその周辺のソースを全て使用するように設定した。モデルファイルの作成方法を 4FGL カタログソースからイベントファイルの ROI とその周辺のソースを全て使用し、設定した TS 値以下の天体のパラメータを fix するように設定した際に、モデルファイルのスレッシュホールド設定が使われる。いずれのパラメータも変更可能であり、時間 bin を 12000 秒、1 日、1 週間に設定したスクリプトも作成した。即時解析には時間 bin が 6000 秒のスクリプトを、過去のイベントの解析には時間 bin が 1 週間のスクリプトを使用して解析を行った。

```
TrigName: IceCube21306805
TriggerMET: 660686573.0
RA: 114.5199
DEC: +15.5600
ERROR: 127.79 arcmin
TStart: 0
TStop: 6000
IRF: p8_source
Outname: IceCube21306805
FT1: IceCube21306805_ft1.fits
FT2: IceCube21306805_ft2.fits
TSMAP: 1
SrcModelMode: complete
SrcModelThreshold: 5
```

図 3.1: 作成されるパラメータ設定ファイルの例

Fermi-LAT の解析

3.Fermi-LAT のデータの解析では 2 で作成したパラメータ設定ファイルを元にして、unbinned 解析を用いて解析を行う。まず、設定した RADec 周辺、トリガー時刻のデータを Fermi 衛星のページからダウン

ロードする。次に Fermi-LAT のナビゲーションプロット作成、ライトカーブ作成、カウントマップ作成、Likelihood 解析、SED 作成、TS マップ作成の順に解析を行う。ライトカーブ解析の設定 ROI 半径はイベントのエラー半径である。また、作成した TS マップにはイベントのエラー半径と 4FGL カタログに乗っている天体が表示される。使用したコマンド等に関しては 2.2.1 節のとおりである。これらの結果と 2 で設定したパラメータを html ファイルにまとめ、学内公開サーバーにコピーし index.html を書き換える。

まとめられた結果のうち、まず TS マップを確認することで TS 値の高いガンマ線源およびイベントのエラー半径内の 4FGL 天体の有無が確認できる。また、ライトカーブからはトリガー時刻に光子が検出されたかが確認できる。この 2 つが特に他のフォローアップ観測をする際の指標にすることができる。解析で作成される TS マップとライトカーブを図 3.2 と図 3.3 に示す。

解析が途中で失敗してしまうことがあるが、主に解析する時間のデータがまだ公開されていないこと、あるいは設定した時間が短いこと、のどちらかが原因である。前者に関しては Fermi 衛星の観測データが公開されるのを待ってから再度解析を回すことで解決できる。後者に関しては解析時間 bin を長くする（例えば 1200 秒や 1 日）ことで解決できる。

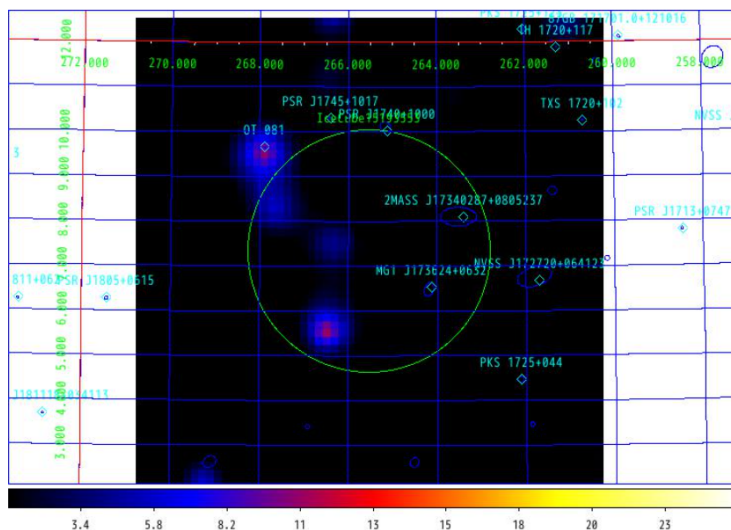


図 3.2: 解析パイプラインで作成される TS マップ。緑色の円がニュートリノの到来方向のエラー領域である。

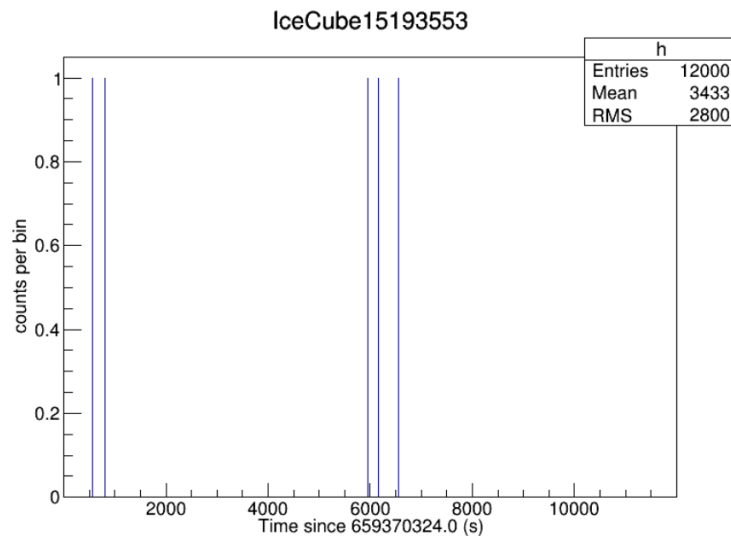


図 3.3: 解析パイプラインで作成されるライトカーブ。ニュートリノの到来方向のエラー領域を解析範囲としている。

3.3 かなた望遠鏡の解析パイプライン

以下がかなた望遠鏡での解析の大まかな流れである。

1. ニュートリノアラートを受け取る
2. フォローアップ観測を行う
3. 1次処理、宇宙線除去、スカイ引き、WCS 貼り付けを行う
4. かなた望遠鏡の観測画像と PS1 の画像の減算を行う
5. 結果を html ファイルにまとめる
6. 学内公開サーバー coalsack に結果を共有する

この中で 2 についてはすでに整備されており、次節で説明する。よって、3 を行う自動 1 次処理スクリプトと 4、5、6 を行う減算スクリプトの 2 つのスクリプトを回す必要があり、本研究では後者を開発した。3 での詳細な解析の流れ、方法は 2.3.3 節のとおりである。4 の減算過程では画像減算のためのプログラム `ev_FoV7.py` を土台にし、改良してスクリプトの中に組み込んだ。主な変更点は画像減算を行う際に `for` 文を使用して複数のパラメータの組み合わせを一度に計算することである。これはパラメータの組み合わせを 1 つずつ試し結果を確認して適切なパラメータを見つけることは時間がかかり即時解析をする際に目的にそぐわないからである。3、4 で作成したインプット画像、テンプレート画像、減算のアウトプット画像を 5 で html ファイルにまとめ、6 で html ファイルを 4 で学内公開サーバーにコピーし、`index.html` を書き換え結果を共有する。

3.3.1 観測方法

かなた望遠鏡ではカセグレン焦点に取り付けられている HONIR を用いて、ニュートリノアラートを受けた際に自動撮像観測を行っている。フィルターは可視光は R_C バンド、近赤外は J バンドを用いている。

ニュートリノ放射候補天体の選定、自動フォローアップ観測

GCN を介して、ニュートリノ検出アラートが IceCube チームから発信されると、ニュートリノ検出の詳細も同時に報告される (https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/amon_icecube_gold_bronze_events.html)。アラートにある検出位置 (RA, Dec) とエラーサークルによって天球面上の検出誤差領域を特定することができる。ただし、誤差領域はかなた望遠鏡の視野に対してかなり大きいため、その誤差領域をかなた望遠鏡で覆うようにタイリング観測すると非効率的である。ニュートリノがブレーザー天体から放射されていると仮定した場合、電波および可視光カタログにリストされている可能性が高い。そこで、ブレーザー候補天体のカタログである BROS カタログ [22] (詳細は以下を参照) を用いて、検出誤差領域内に存在するブレーザー候補天体を選出する。ニュートリノの検出誤差領域において検出確率は同一ではない。そこで検出確率が正規分布に従うと仮定して、リストされたブレーザー候補天体それぞれの天球面上の位置から検出確率を算出し、確率に従ってランキングする。GCN の情報抽出からランキングまでの行程は planner と呼ばれる Web システムによって実行される。planner は J-GEM (Japanese collaboration of Gravitational wave Electro-Magnetic follow-up) によって構築された重力波源の電磁波対応天体探査用の Web システムである [21]。このシステムをニュートリノアラート用に改良し、ランキングされたリストを生成する。planner からダウンロードした候補天体リストを確率で整列させたのち、かなた望遠鏡でその晩に観測していないもっとも確率の高い天体を A, 上位 10 天体を B, それ以外を C としてランクづけし、ランクに従って自動で撮像観測を行う。撮像の露出時間は可視 95 秒、近赤外 80 秒で行い、観測する位置を 60 秒角づつずらしながら 7 点ディザリングにより 1 天体あたりの撮像観測を行なった。ランク付けした天体を TS マップに表示した例を図 3.4 に示す。IceCube イベント以外の観測天体もあるため、他の観測者と観測時間を調整し可能な時間内でエラー領域内にある BROS 天体をランクが高い順に撮像観測する。近傍の天体であることや変動が観測される可能性がある重要候補天体については手動でフォローアップ観測も行い、上記の方法または 1 天体ずつ露光時間を天体の明るさ、天候、シーイングによって可視 30-135 秒、近赤外 15-120 秒で設定し撮像観測を行なう。

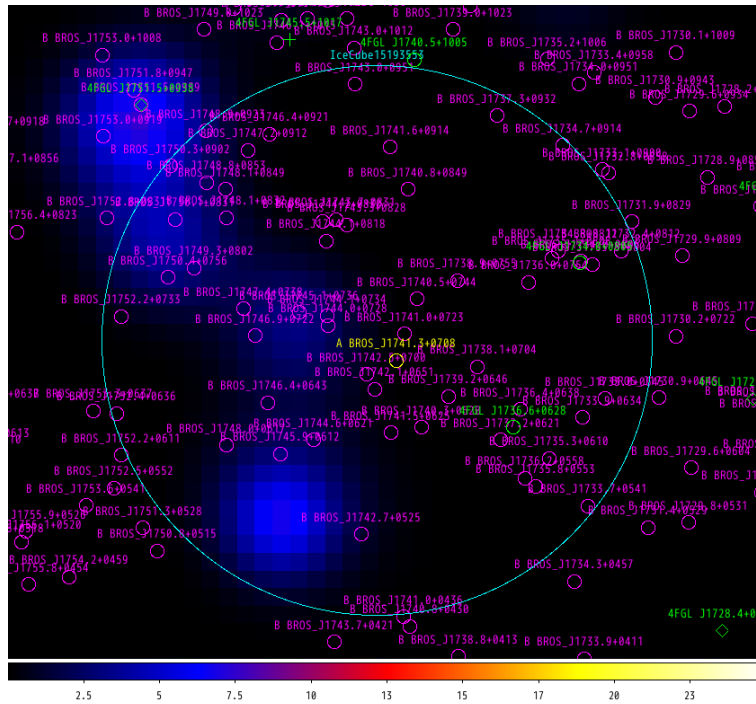


図 3.4: ランク付けした BROS 天体を表示した TSMAP。水色の円が 高エネルギーニュートリノの到来方向のエラー領域、中央付近の黄色の丸が A ランクの BROS 天体、ピンク色の丸が B ランクの BROS 天体、緑色の丸が 4FGL 天体である。

BROS catalog

Blazar Radio and Optical Survey(BROS) カタログとは、電波観測カタログの 0.15GHz TIFR GMRT Sky Survey(TGSS)[23]、1.4GHz NRAO VLA Sky Survey(NVSS)[24] および光学観測カタログの Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System(Pan-STARRS) を用いて作成された新しいブレーザー候補天体カタログである。BROS カタログ以前のカタログ、例えば Fermi-LAT の 4FGL カタログではブレーザー天体は 5065 個であり既知の天体と関連付けられていないブレーザー天体は 657 個であった。これに比べて BROS カタログは TGSS-NVSS カタログの 88211 個の天体をもちいている。そのうち、PS1 の観測データとのクロスマッチにより特定された BROS 天体は 42757 個である。このカタログを用いることで Fermi-LAT の 4FGL カタログには記載のないブレーザー天体を観測、識別することが容易になった。

Pan-STARRS

Pan-STARRS とはハワイ大学によって開発、運用されている可視光サーベイプロジェクトである。Pan-STARRS1(PS1) の観測は口径 1.8m の望遠鏡と 1.4 ギガピクセルカメラを用いて g, r, i, z, y の 5つのバンドで行われ、データは The Pan-STARRS1 data archive home page で公開されており、カタログとともに取得された画像もウェブ経由で取得することができる。今回はニュートリノイベント後にかなた望遠鏡で

フォローアップ観測を行いニュートリノ天体に対応する明るくなっている天体や突発天体を探す。そのためには、明るい天体が現れていない過去の画像が必要であり、そのためにPS1の公開画像データを利用しかなた望遠鏡の画像からPS1のデータを差し引くことで残差天体が残らないかを確認する。

3.3.2 かなた望遠鏡とPS1の画像の減算

かなた望遠鏡で観測した範囲の突発天体、増光天体の有無の確認のために解析ツールHOTPANTSを用いて1次処理を行ったかなた望遠鏡の撮像観測画像（インプット画像）からPS1の画像（テンプレート画像）の減算を行った。異なる望遠鏡で得られた画像は異なるPSFやシーイングを持つため、画像をそのまま減算することは出来ない。そのための処理をHOTPANTSを用いて行う。

HOTPANTSには複数のパラメータがありこれらを自身で設定することができる。それらのパラメータのうち、本研究では主にiu, tu, il, tl, nsx, nsyを設定して減算を行った。iu, tuはインプット画像、テンプレート画像の有効カウントの上限、il, tlはインプット画像、テンプレート画像の有効カウントの下限、nsx, nsyはx方向、y方向の各領域のスタンプ数である。スタンプ数とは画像の領域分割数のことであり、HOTPANTSは分割した領域ごとにシーイング合わせやスケージングを行う。これらのパラメータを設定する際、最初il, tlの値を0以上にしていたため他のパラメータを変えてもアウトプット画像が全ピクセルでカウントが0となり全く減算が出来ていなかったがこの値をマイナスにしたところ減算されたアウトプット画像が得られるようになった。しかし、様々なパラメータを試しても画像内のすべての星を減算することはできなかった。増光天体、突発天体以外で減算がうまくいかずに残ったものは以下の3つである。

- ・元から明るい天体
- ・PS1のテンプレート画像に写っているがかなたの観測では等級が足りずに写らなかった天体
- ・かなたの観測画像に乗っている宇宙線

元から明るい天体は減算後、引かれすぎてアウトプット画像では天体の全体、もしくは一部分がピクセルカウントが低く（本論文内の画像では黒く）残っている一方、かなたで観測されなかった天体、宇宙線はピクセルカウントが高く（本論文内の画像では白く）残った。突発天体はアウトプット画像にピクセルカウントが高く残る。また、増光天体は他の明るい天体と比べるとピクセルカウントが高い部分が多く残る傾向がある。そのため、パラメータを変えても残る天体についてはピクセルカウント（画像上の明るさ）を目安にし、インプット画像とテンプレート画像を確認して突発天体であるかどうかを直接判断した。図3.5は減算の一例である。明るい天体が多い場合には減算がうまくいかず画像内に残る天体が多くなり、突発天体の判断に時間がかかる。また、元から明るい天体であるため減算がうまくいかなかったのか増光している天体なのかの区別が画像からはわかりにくい。そのため今後も様々なパラメータの組み合わせを試し、うまく減算ができる組み合わせ、変化させるべきパラメータを見つけることが課題である。各パラメータの説明は付録の表にまとめた。

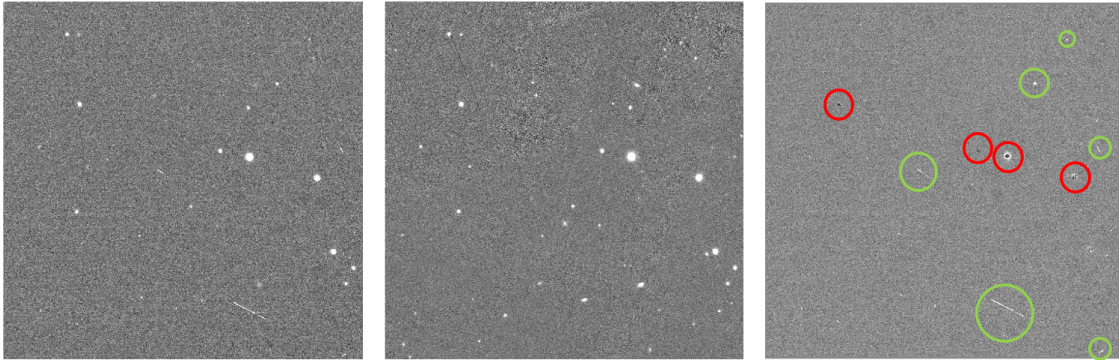


図 3.5: インพุット画像とアウトプット画像の減算例。左からインพุット画像、テンプレート画像、減算後のアウトプット画像。アウトプット画像の赤色で囲んであるのは減算後も残ってしまった天体、緑色で囲んであるのはインพุット画像に乗っていた宇宙線である。

第4章 系統的解析の結果と考察

付録Aの表A.1にこれまでにIceCubeで検出されGCNアラートが流れたEHE, HESE, GOLD, BRONZEニュートリノイベントをまとめた。これまでのイベント数は93でそのうちEHEイベントは9、HESEイベントは20、GOLDイベントは23、BRONZEイベントは42であった。

4.1 ガンマ線解析

2022年1月17日までに来たニュートリノアラートを作成したガンマ線解析パイプラインを利用して解析した。解析したうちニュートリノの到来方向のエラー半径内に4FGL天体があったのは以下の表4.2にまとめた22イベントでありHESEイベントが4、EHEイベントが1、GOLDイベントが9、BRONZEイベントが8であった。また、そのうち、時間binをトリガー時刻から1週間で設定して解析を行ったところ、TS値が 3σ 以上の4FGL天体が存在したイベントは8イベントでEHEイベントが1、HESEイベントが1、GOLDイベントが3、BRONZEイベントが2であった。これらのエラー半径内に存在しTS値が 3σ 以上であった4FGL天体を unbinned 解析で追解析した。

表 4.1

タイプ	総イベント数	エラー半径内に	
		4FGL 天体が存在したイベント数	エラー半径内に 3σ 以上の 4FGL 天体が存在したイベント数
EHE	9	1	1
HESE	20	4	1
GOLD	23	9	3
BRONZE	42	8	2

表 4.2: エラー半径内に 4FGL 天体が存在したイベント

イベント	タイプ	3σ 以上の天体の有無
IC170506A	HESE	×
IC170922A	EHE	○
IC171028A	HESE	×
IC190331A	HESE	×
IC190504A	HESE	○
IC190529A	GOLD	○
IC190619A	GOLD	○
IC190730A	GOLD	○
IC190922A	GOLD	×
IC191001A	GOLD	×
IC191119A	GOLD	×
IC191215A	BRONZE	×
IC200530A	GOLD	×
IC200614A	BRONZE	×
IC201130A	GOLD	×
IC201221A	GOLD	×
IC210608A	BRONZE	○
IC211023A	BRONZE	×
IC211123A	BRONZE	×
IC211125A	BRONZE	×
IC211208A	BRONZE	○
IC211216A	BRONZE	×

Flux

時間 bin を各イベントのトリガー時刻を中心として 1 週間、エネルギーを 100MeV 300GeV と設定して解析を行いフラックスを求めた。以下の表に天体とフラックス、TS 値、検出されたニュートリノのエネルギーまたは電荷をまとめた。検出されたニュートリノのエネルギーは Power Law を仮定し、天体ニュートリノ信号であるという仮説の下、観測されたパラメータを用いて計算された最も可能性の高いエネルギー値である。また検出されたニュートリノの電荷は、ニュートリノ検出時に検出器に蓄積された総電荷である。

表 4.3: エラー半径内に存在し TS 値が 3 σ 以上であった天体

イベント	4FGL 名	同定されている天体名	フラックス [$photons/cm^2/s$]	TS 値	エネルギー [TeV] / 電荷 [p.e.]	ニュートリノの エネルギー [TeV] / 電荷 [p.e.]
IC170922A	4FGL J0509.4+0542	TXS 0506+056	4.10e-07 +/- 6.69e-08	240.5		1.1998e+02[TeV]
IC190331A	4FGL J0007.0+7303	PSR J0007+7303	3.30e-07 +/- 9.93e-10	379.6		198736.44 [p.e.]
	4FGL J2300.9+7108		2.25e-09 +/- 4.11e-11	9.9		
IC190504A	4FGL J0428.6-3756	PKS 0426-380	1.90e-07 +/- 3.79e-08	168.7		7328.35 [p.e.]
IC190529A	4FGL J1949.5+7311		7.22e-08 +/- 2.10e-09	13.5		
	4FGL J1800.6+7828	S5 1803+784	4.59e-08 +/- 1.13e-09	29.58		11121.70 [p.e.]
	4FGL J2010.0+7229	4C +72.28	6.32e-08 +/- 2.10e-09	15.76		
IC210608A	4FGL J2243.9+2021	RGB J2243+203	3.07e-08 +/- 1.57e-08	37.08		1.0517e+02[TeV]
IC211208A	4FGL J0738.1+1742	PKS 0735+17	3.55e-07 +/- 1.69e-08	240.3		1.7108e+02[TeV]

ライトカーブ

各天体について、2008年8月から2020年12月までをエネルギーが100MeV – 100GeV、時間 bin が1ヶ月のライトカーブを Fermi LAT Light Curve Repository[27] のデータを使用して作成した。そのうちトリガー時刻付近で平常時より増光している天体は IC170922A の 4FGL J0509.4+0542、IC190529A の 4FGL J1949.5+7311、IC210608A の 4FGL J2242.9+2021、IC211208A の 4FGL J0738.1+1742 の4天体であった。IC190529A のエラーサークル内に位置する有意な天体は 4FGL J1949.5+7311、4FGL J1800.6+7828、4FGL J2010.0+7229 の3天体があるが、ライトカーブより 4FGL J1949.5+7311 のみが増光していたためこれを対応天体とした。以後これらの天体をイベント名 (IC) で引用する。このうち IC170922A は先行研究で高エネルギーニュートリノ源であると同定された TXS 0506+056 である。これら4天体のライトカーブを図 5.1 にまとめた。また、他の増光が見られなかった天体のライトカーブは付録にまとめた。

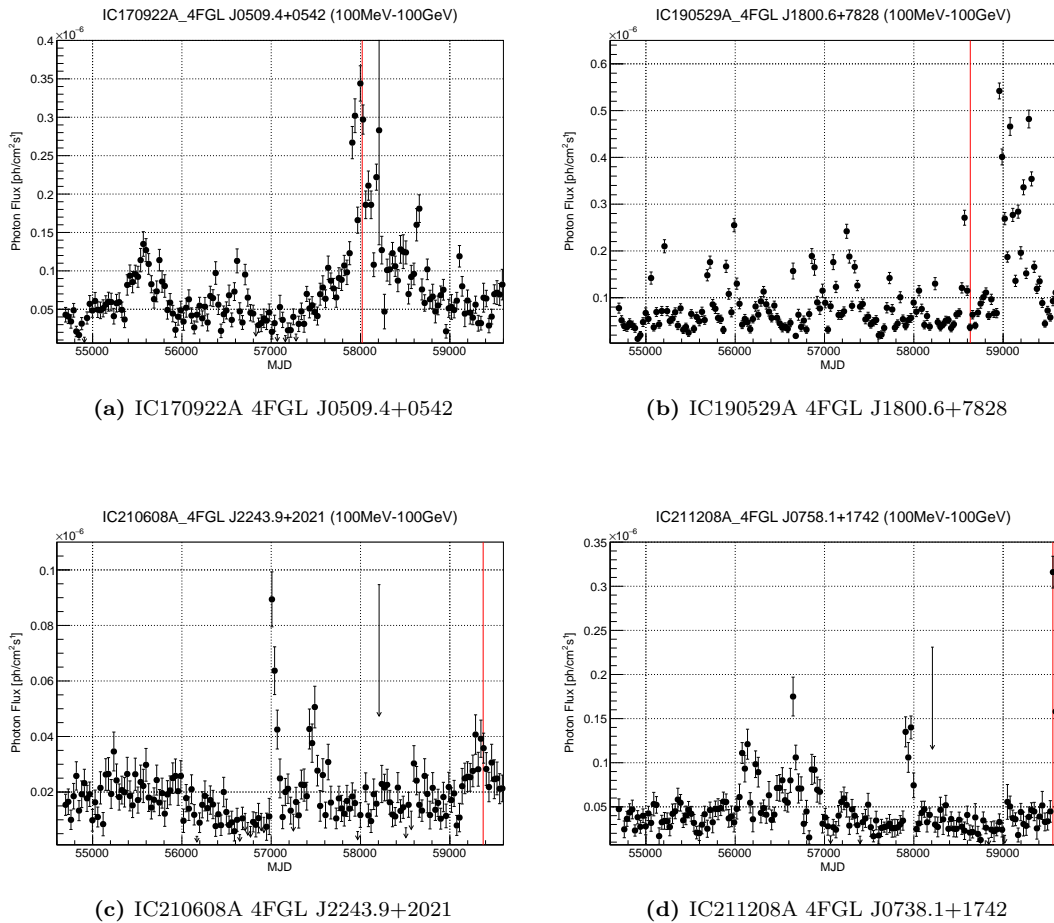


図 4.1: Fermi-LAT のライトカーブ。赤いラインがトリガー時刻である。

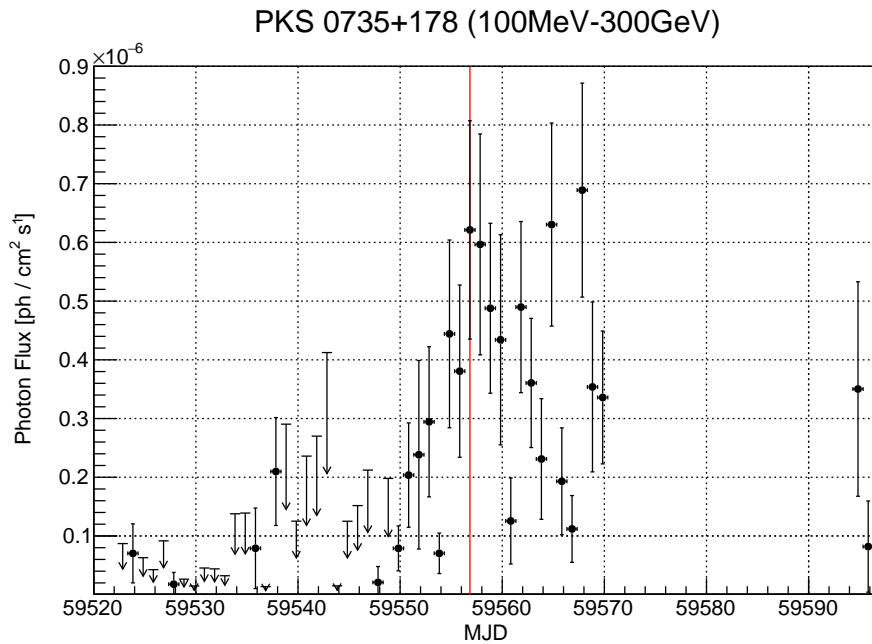


図 4.2: IC211208A のライトカーブ。赤いラインがトリガー時刻 (MJD 59556.83527778) である。

IC210608A は長期的に増光している途中でニュートリノが検出されているが、IC170922A、IC190529A および IC211208A はニュートリノ検出後に急激に増光している。しかし、IC190529A と IC210608A はフラックスが IC170922A、IC211208A に比べ 1 桁低い。IC170922A はニュートリノエネルギーが 119.98TeV であるが先行研究より親ニュートリノの最大確定推定値は 290TeV であった。本研究で求めたガンマ線フラックスは $4.10e-07+/-6.69e-08$ である。これに比べて IC211208A のニュートリノエネルギーが 171.08TeV、ガンマ線フラックスは $3.55e-07+/-1.69e-08$ であった。一方、IC190529A と IC210608A のニュートリノのエネルギーは IC170922A、IC211208A に比べて 1 桁低い。IC170922A ではニュートリノとガンマ線は同じプロセスで生成されると予想されており [7]、他のブレイザーからのニュートリノ放射がこれと同じようにガンマ線と同じプロセスで放射されていると仮定してフラックスとエネルギーの値を考えると IC211208A もガンマ線放射源である可能性があると予想する。そこで、IC211208 にの 2021 年 11 月 25 日 - 2022 年 1 月 17 日の 100MeV - 300GeV のライトカーブを 1 日 bin で作成した。このライトカーブを図 4.2 に示す。MJD59571 - MJD59594 までのプロットがない期間はおそらく Fermi-LAT で正常なデータが取得できていない、またはデータ処理出来ていない期間であり、解析が出来なかった。ライトカーブからわかるようにフラックスはトリガー時刻前 2 週間で増光しトリガー時刻に一度フラックスが最高となっている。その後変動しているが平常時に比べ高いフラックスのままである。フラックスのピークと高エネルギーニュートリノの検出が同日であることから、IC211208A は高エネルギーニュートリノ源の候補になると考えられる。IC211208A は 2021 年 12 月 8 日に検出された天体であり Swift/UVOT やかなた望遠鏡の観測で過去のフラックスに比べて増光していることが確認されている。ニュートリノ検出からまだ時間立っていないため今後さらに多波長研究を進めていくことが重要である。

4.2 可視近赤外線解析

表 A.1 に示したニュートリノイベントのうち、かなた望遠鏡で観測したイベントとタイプを表にまとめた。これらの観測画像を作成した撮像観測データ解析パイプラインを使用してかなたでの撮像画像と PS1 の画像減算を行い突発天体、増光天体の有無を確認した。また、同じ望遠鏡で観測した画像の方が減算が成功しやすいため、同一天体を複数日観測したものに関してはかなたの撮像画像同士の減算を行った。減算を行った結果、IC170922A のエラーサークル内に位置する 4FGL J0509.4+0542(ブレイザー名 TXS 0506+056) が 2018 年 3 月 28 日に観測された画像内に PS1 には存在しない天体があることがわかった。また、IC211208A のエラーサークル内に位置する 4FGL J0738.1+172(ブレイザー名 PKS 0735+17) の増光がはっきりと見られた。しかし、他の観測画像内には突発天体は見られなかった。また、ガンマ線でトリガー時刻に増光傾向にあった IC190529A と IC210608A はフォローアップ観測されておらず、増光していたかはわからなかった。ここでは IC170922A、4FGL J0738.1+172 の結果について詳しく述べ、他の天体の差分画像は付録にまとめる。

表 4.4: かなた望遠鏡で観測したイベント

イベント	タイプ
IC170922A	EHE
IC190503A	EHE
IC200109A	GOLD
IC200929A	GOLD
IC201130A	GOLD
IC211116A	BRONZE
IC211208A	BRONZE

IC170922A

IC170922A のかなたの撮像画像と PS1 の減算結果を図 4.3 に示す。減算後のアウトプット画像より IC170922A と右下の 1 番明るい天体が他の天体にピクセルカウントが高く比べ引き残っていた。画像から天体を自動で検出して測光を行うソフトウェア Source-Extractor(SExtractor)[26] を用いて測光したところ 2017 年 9 月 23 日の R_C バンド等級は 14.21 ± 0.025 等であり、 R バンド等級の文献値 15.12 等 [25] より 0.91 等明るくなっていた。

2018 年 3 月 28 日に観測された画像には IC170922A の左隣に PS1 には映っていない天体があった。以下、この天体を天体 A と呼ぶ。この日の前後の 2018 年 3 月 27、29 日にも IC170922A はかなたで観測されているが、天体 A が映っていたのは 28 日だけであった。28 日の撮像画像から 2017 年 9 月 24 日の撮像画像を引いた減算結果を図 4.4 に示す。テンプレート画像はシーイングサイズの小さいものを選んだ。アウトプット画像より、IC170922A や他の明るい天体は全体、または中心がピクセルカウントが低くなっているが、天体 A だけがピクセルカウントが高く引き残った。

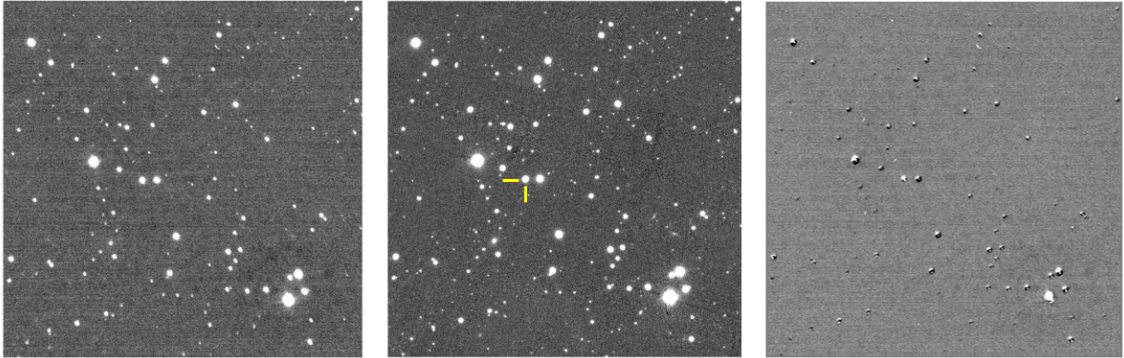


図 4.3: IC170922A の 2017 年 9 月 24 日と 2018 年 3 月 28 日のかなたの観測画像の減算。左からかなたの撮像画像、PS1 の画像、減算後の画像。IC170922A は PS1 の画像上に黄色で印がつけてある。

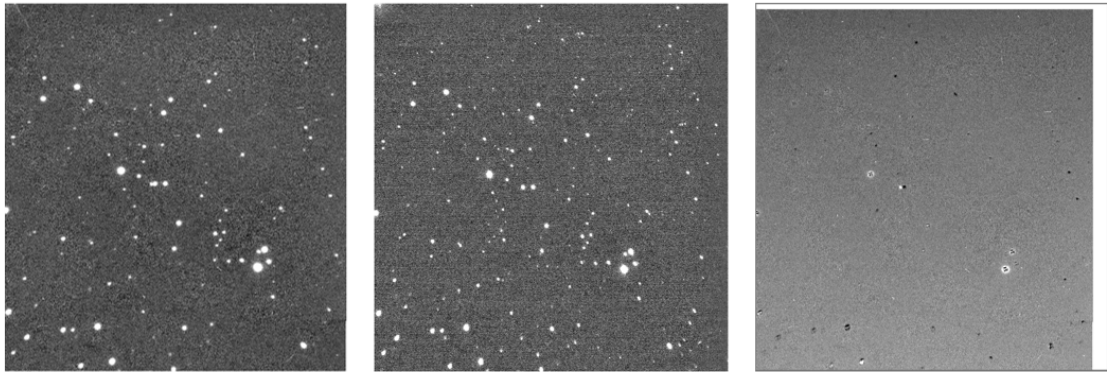


図 4.4: IC170922A のかなたの撮像画像同士の減算。左から 2018 年 3 月 28 日のかなたの撮像画像、2017 年 9 月 24 日のかなたの撮像画像、減算後の画像。

IC211208A

IC211208A はイベント IC211208A のエラーサークル内に位置している BL Lac 天体である。IC211208A のかなたの撮像画像と PS1 の減算結果を図 4.5 に示す。PS1 の画像にノイズのような線が入っているため減算後のアウトプット画像にもその後が残った。アウトプット画像画像より IC211208A のみははっきりとピクセルカウントが高く引き残った。測光より 2021 年 12 月 28 日の R_C 等級は 14.22 ± 0.019 等であり、 R バンド等級の文献値 15.78 等 [25] より 1.56 等明るくなっていた。IC211208A は複数日観測を行ったため、観測した内シーイングサイズの小さい 2021 年 12 月 10 日と 2021 年 12 月 28 日の撮像画像同士を減算した。結果を図 4.6 に示す。かなた同士の減算でも IC211208A がピクセルカウントが高く引き残り、トリガーから 2 日後の 12 月 10 日から 12 月 28 日までで減光していることが分かった。測光より、12 月 28 日の R_C 等級は 15.48 ± 0.025 等であり、18 日間で 1.24 等減光していた。IC211208A の R_C バンドのライトカーブを図 4.7 に示す。ライトカーブより、IC211208A は 2021 年 12 月 28 日 (MJD5976) まで徐々に減光してお

り、その後再度増光していることがわかる。IC211208A は電波 [28] 及び X 線 [29] でもフレアが報告されており、多波長で増光している。本研究で行った系統的解析で、高エネルギーニュートリノ源であると同定された IC170922A を除いて最も高エネルギーニュートリノの検出と電磁波の急増光のタイミングがコンシステントである。また、ガンマ線の解析結果からわかるように増光天体のうち、平常時と比べフラックスが数倍になっているものも IC170922A と IC211208A だけである。これと TXS0506+056 のニュートリノ検出時のフラックスとの比較より、IC211208A は過去のニュートリノイベントの中で IC170922A を除き最も高エネルギーニュートリノ源である可能性が高いと考える。

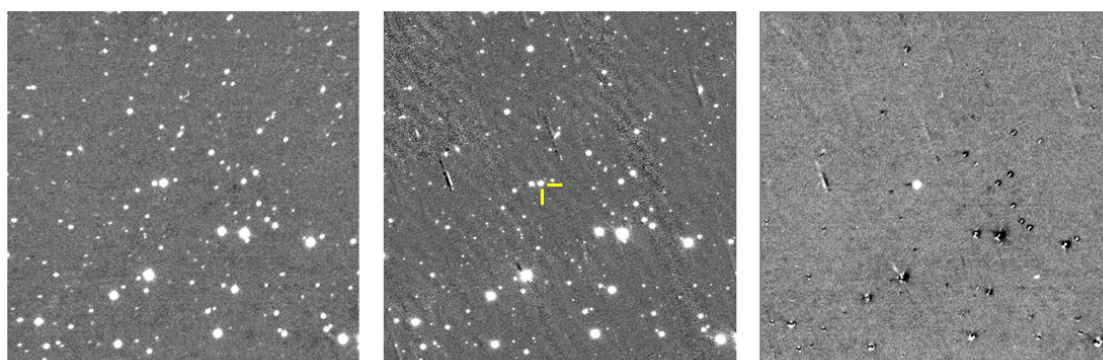


図 4.5: IC211208A のかなたの観測画像と PS1 画像の減算。左からかなたの撮像画像、PS1 の画像、減算後の画像。IC211208A は PS1 の画像上に黄色で印がつけてある。

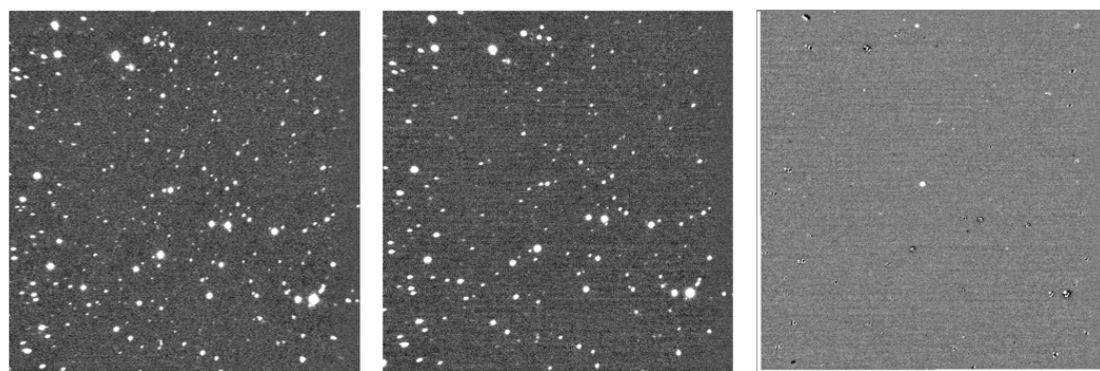


図 4.6: IC211208A のかなたの撮像画像同士の減算。左から 2021 年 12 月 10 日のかなたの撮像画像、2021 年 12 月 28 日のかなたの撮像画像、減算後の画像。

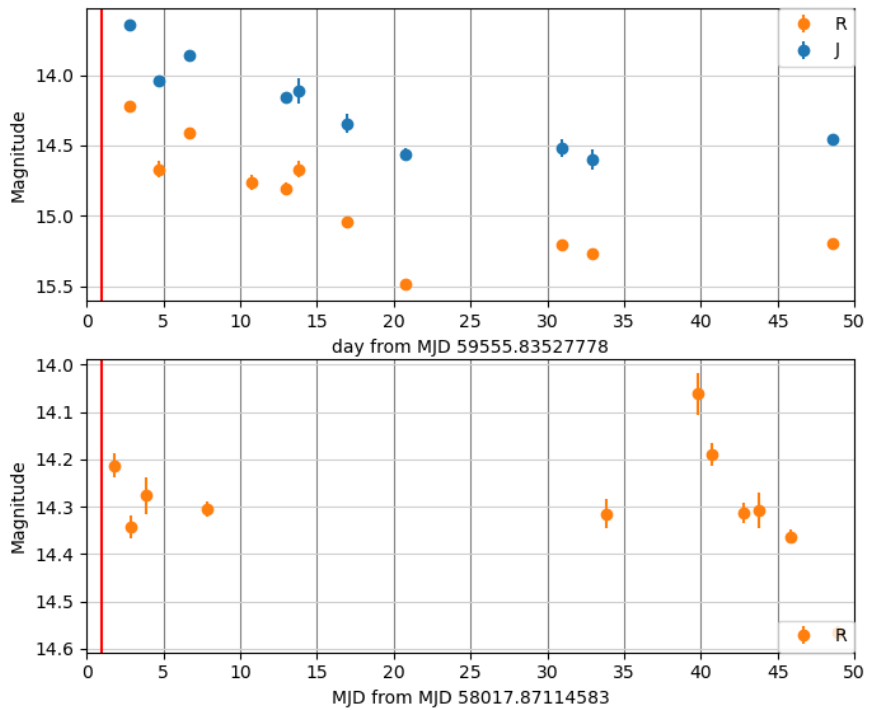


図 4.7: IC211208A、IC170922A のライトカーブ。上図が IC211208A、下図が IC170922A。赤線は各イベントのトリガー時刻である。

第5章 まとめ

本研究では高エネルギーニュートリノ源である天体の同定を目的とし、かなた望遠鏡の可視近赤外線データおよび、Fermi 衛星のガンマ線データの解析パイプラインを開発した。さらに、開発したパイプラインを使用して過去の IceCube ニュートリノイベントの系統的解析を行った。今回開発したパイプラインはおおむね完成したが、可視近赤外線データ解析のうち、HOTPANTS を用いたかなた望遠鏡と PS1 の画像の減算がうまく行われなかったことがあるため、より良いパラメータの組み合わせを見つけることが課題となる。また現在、web ページでの解析結果の共有は学内公開サーバーで行われているため、これを学外公開サーバーに移すためにホームページの中身をより整備する必要がある。開発したパイプラインを使用した系統的解析より、これまでの IceCube で検出され GCN アラートが流れたニュートリノイベント数は 93 であり、そのうち EHE イベントが 9、HESE イベントが 20、GOLD イベントが 23、BRONZE イベントが 42 であり、BRONZE イベントが GOLD イベントの約 2 倍であった。しかし、ニュートリノの到来方向のエラー領域内にガンマ線で 3σ 以上であったイベントは EHE が 1、HESE が 1、GOLD が 3、BRONZE が 2 であり GOLD アラートの方が多く結果となった。このことから、かなた望遠鏡でのフォローアップ観測の観測天体数や、継続期間などの指標にアラートの種類を用いることは有用であると考えられる。また、ガンマ線の解析結果よりエラー領域内に位置し、ガンマ線で 3σ 以上であった天体のうちトリガー時刻に増光している天体は 4 天体であった。このうち高エネルギーニュートリノ源であると同定された TXS 0506+056 と 2021 年 12 月 8 日にニュートリノが検出された 4FGL J0738.1+1742 の 2 天体はガンマ線フラックスが平常時の数倍になっており、可視光の画像減算からも増光していることが確認された。よって、過去のニュートリノイベントの中で TXS 0506+056 を除き最も高エネルギーニュートリノ源である可能性が高いと考えられる。4FGL J0738.1+1742 はニュートリノ検出から時間が経っていないため今後のさらなるフォローアップ観測、解析、またニュートリノの親粒子のエネルギーの導出などが高エネルギーニュートリノ源であるかの判断に必要となっていく。

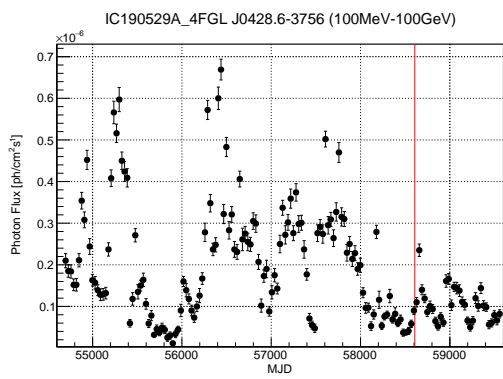
付録 A

表 5.1: IceCube で検出されたイベント一覧

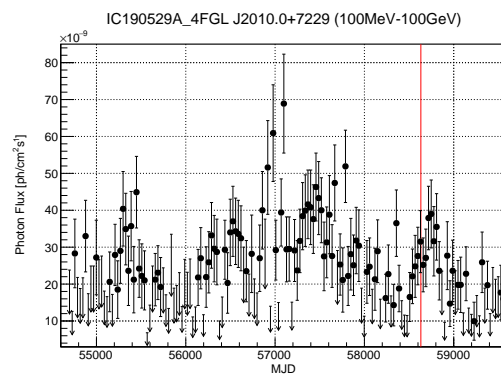
イベント	タイプ
IceCube-160427A	HESE
IceCube-160731A	HESE&EHE
IceCube-160806A	ESE
IceCube-160814A	HESE
IceCube-161103A	HESE
IceCube-161210A	ESE
IceCube-170312A	HESE
IceCube-170321A	ESE
IceCube-170506A	HESE
IceCube-170922A	ESE
IceCube-171015A	HESE
IceCube-171015A	HESE
IceCube-171028A	HESE
IceCube-171106A	ESE
IceCube-180423A	HESE
IceCube-180908A	ESE
IceCube-181014A	HESE
IceCube-181023A	ESE
IceCube-181031A	HESE
IceCube-190104A	HESE
IceCube-190124A	HESE
IceCube-190205A	HESE
IceCube-190205A	HESE
IceCube-190221A	HESE
IceCube-190331A	HESE
IceCube-190503A	ESE
IceCube-190504A	HESE
IceCube-190529A	HESE

IceCube-190619A	GOLD
IceCube-190619A	GOLD
IceCube-190629A	BRONZE
IceCube-190704A	BRONZE
IceCube-190712A	BRONZE
IceCube-190730A	GOLD
IceCube-190819A	BRONZE
IceCube-190922A	GOLD
IceCube-190922B	GOLD
IceCube-191001A	GOLD
IceCube-191119A	GOLD
IceCube-191122A	BRONZE
IceCube-191204A	BRONZE
IceCube-191215A	BRONZE
IceCube-191231A	BRONZE
IceCube-200101A	BRONZE
IceCube-200109A	GOLD
IceCube-200117A	BRONZE
IceCube-200120A	BRONZE
IceCube-200227A	BRONZE
IceCube-200410A	BRONZE
IceCube-200421A	BRONZE
IceCube-200425A	BRONZE
IceCube-200512A	BRONZE
IceCube-200523A	BRONZE
IceCube-200530A	GOLD
IceCube-200614A	BRONZE
IceCube-200615A	GOLD
IceCube-200620A	BRONZE
IceCube-200728A	GOLD
IceCube-200806A	BRONZE
IceCube-200911A	BRONZE
IceCube-200916A	BRONZE
IceCube-200921A	BRONZE
IceCube-200926A	GOLD
IceCube-200926B	BRONZE
IceCube-200929A	GOLD
IceCube-201007A	GOLD
IceCube-201014A	BRONZE
IceCube-201021A	BRONZE

IceCube-201114A	GOLD
IceCube-201115A	GOLD
IceCube-201120A	BRONZE
IceCube-201130A	GOLD
IceCube-201209A	GOLD
IceCube-201221A	GOLD
IceCube-201222A	GOLD
IceCube-210210A	GOLD
IceCube-210213A	GOLD
IceCube-210322A	BRONZE
IceCube-210510A	BRONZE
IceCube-210516A	BRONZE
IceCube-210519A	BRONZE
IceCube-210608A	BRONZE
IceCube-210629A	BRONZE
IceCube-210730A	BRONZE
IceCube-210811A	GOLD
IceCube-210922A	GOLD
IceCube-211023A	BRONZE
IceCube-211116A	BRONZE
IceCube-211117A	GOLD
IceCube-211123A	BRONZE
IceCube-211125A	BRONZE
IceCube-211208A	BRONZE
IceCube-211216A	BRONZE
IceCube-211216B	BRONZE



(a) IC190504A 4FGL 0428.6-3756



(b) IC190529A 4FGL J2010.0+7229

図 5.1: Fermi-LAT のライトカーブ。赤いラインがトリガー時刻である。

参考文献

- [1] 井上一, 小山勝二, 高橋忠幸, 水本好彦 2019, 『宇宙の観測III-高エネルギー天文学』 日本評論社
- [2] Bradley M. Peterson 2010, 『ピーターソン活動銀河核：巨大ブラックホールが引き起こす AGN 現象のすべて』 和田桂一・他訳 丸善株式会社
- [3] 桜井邦朋 1996, 『高エネルギー宇宙物理学—宇宙の高エネルギー現象を探る』 朝倉書店
- [4] IceCube, Fermi et al. 2018, Science 361, eaat 1378
- [5] Kohta Murase. 2015, AIP Conference Proceedings, Vol.1666, No.1, p.040006
- [6] Bahcall, John N., Aldo M. Serenelli and Sarbani Basu. 2005, The Astrophysical Journal Letters, 621.1, L85
- [7] Aartsen, Mark, et al. 2018, Science 361.6398, 147-151
- [8] Telescope, Liverpool et al. 2018, Science 361.6398
- [9] Kohta Murase,
- [10] ICECUBE NEUTRINO OBSERVATORY, <https://icecube.wisc.edu/science/icecube/detector>
- [11] Solares, Hugo A. Ayala, et al. 2020, Astroparticle Physics, 114, 68-76
- [12] The IceCube Collaboration 2019, arXiv:1908.04884v1
- [13] NASA <https://fermi.gsfc.nasa.gov/>
- [14] <https://glast.sites.stanford.edu/instrument>
- [15] <https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/overview.html>
- [16] Koji Kawabata, Osamu Nagae, et al. 2008, Proc. SPIE, Vol. 7014
- [17] Hiroshi Akitaya, Yuki Moritani, et al. 2014, Proc. SPIE, Vol. 9147
- [18] 広島大学 HP 宇宙科学センター, <https://www.hiroshima-u.ac.jp/hasc/introduction>
- [19] HONIR ホームページ, <http://hasc.hiroshima-u.ac.jp/instruments/honir/filters-e.html>
- [20] MOIRCS (Multi-Object InfraRed Camera and Spectrograph) ホームページ, https://subarutelescope.org/Observing/Instruments/MOIRCS/imag_sensitivity.html

- [21] Sasada Mahito, Yousuke Utsumi, et al. 2021, PTEP, Vol.2021, 05A104
- [22] Ryosuke Itoh, Yousuke Utsumi, et al. 2020, ApJ, 901, 3
- [23] Intema H. T., Jagannathan P., Mooley K. P. and Frail D. A. 2017, A&A, 598, A78
- [24] Condon J. J., Cotton W. D., et al. 1998 AJ 115 1693
- [25] Healey, Stephen E., et al. 2008, ApJS, 175, 97-104
- [26] Bertin, Emmanuel, and Stephane Arnouts. 1996, Astronomy and astrophysics supplement series 117.2, 393-404
- [27] Daniel Kocevski. 2021, Atel, #15110
- [28] Matthias Kadler, Petra Benke et al. 2021, Atel #15105
- [29] Marcos Santander and Sara Buson. 2021, ATel #15102

The LCR is currently maintained by Daniel Kocevski (NASA MSFC), with additional support from Janeth Valverde (GSFC/CRESST), Simone Garrappa (DESY), Michela Negro (GSFC/CRESST), Jean Ballet (CEA Saclay) and Benoit Lott (CNRS/IN2P3, Universite ´ de Bordeaux), on behalf of NASA and the Fermi Large Area Telescope Collaboration. The website interface was designed by Daniel Kocevski, using Olaf Frohn’s D3-Celestial sky map code, the Highcharts javascript plotting library, and the Bootstrap toolkit. The development of the LCR has been funded in part through the Fermi Guest Investigator Program (NASA Research Announcements NNH19ZDA001N and NNH20ZDA001N).