

宇宙ニュートリノ IceCube-170922A が拓いた 高エネルギー宇宙線起源天体の同定への道

吉田 滋 〈千葉大学大学院理学研究院 syoshida@hepburn.s.chiba-u.ac.jp〉

2017年はまさにマルチメッセンジャー天文学元年ともいえるべき年であった。LIGO実験による重力波観測と電磁波対応天体の同定に続いて、ニュートリノ観測でもブレークスルーが起きたのである。我々 IceCube 実験が検出した高エネルギー宇宙ニュートリノ事象の到来方向を世界中の望遠鏡・宇宙観測衛星が直ちに追観測して、初めて対応天体候補が同定された。宇宙線放射天体がどこにあるのかさえ不明であった状況を一変させたのである。

ニュートリノは弱相互作用にしか関与しない素粒子である。ある種の不安定な粒子がより安定な粒子に崩壊するときに伴って放出される。ベータ崩壊が良い例だ。このような「特殊な」素粒子であるニュートリノがなぜ高エネルギー宇宙の理解に本質的な役割を果たし得るのであるのか。高エネルギー現象を引き起こす動力源のエネルギー輸送の一端は陽子や原子核から構成されるハドロン粒子、すなわち宇宙線が担っている。その最高エネルギーは 10^{20} eV にも達するのだ。こうした極限の環境下では超高エネルギー陽子は周囲のガスや光と衝突し、 π 中間子や K 中間子といった不安定粒子を生み出す。これらの中間子が電子やミュオンに崩壊する際にニュートリノも生成されるのだ。いわば宇宙には天然の加速器が存在し、極めて高いエネルギーに加速された陽子や原子核ビームが光子やガスの海に注入され素粒子反応を引き起こしている。素粒子実験で人工的に作り出している状況が宇宙ではより巨大なスケールで実現していると考えられている。

この「宇宙加速器」の加速能力は桁違いである。地上最大の粒子加速器である LHC は陽子を 10^{13} eV まで加速する。しかし宇宙線の最大エネルギーは 10^{20} eV だ。宇宙といえど、これほどの加速能力を簡単

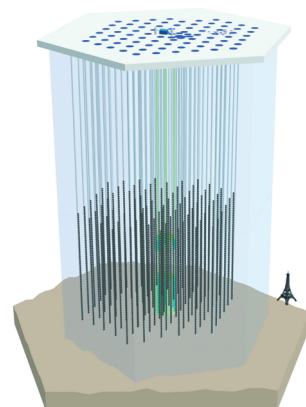
には実現できそうにない。この機構を理解する有力な手段は、加速器の「現場」で起きる粒子衝突から生じる産物を直接測定することだ。この産物の中でも、ニュートリノは電荷を持たず、したがって磁場によって軌道が曲げられることもなく、光も通過できないような厚い雲をも突き抜けて、地球まで直進してくる優れたメッセンジャーである。しかもニュートリノは中間子を生成できる宇宙線ハドロン粒子がなければ生まれにくい。ニュートリノ放射天体イコール宇宙線加速器でもあるのだ。

2013年に IceCube 実験は初めてこの高エネルギー宇宙ニュートリノを発見し、宇宙加速器の現場でニュートリノが作られていることを実証した。観測データから、加速器天体が満たすべき条件が明らかになっている。しかし具体的な候補天体同定にはこれまで至っていなかった。マルチメッセンジャー観測手法を2016年に導入し観測を継続した結果、2017年9月、ついに候補天体の同定に成功したのである。同定された天体 TXS 0506+056 はブレイザーと呼ばれる特殊な銀河で、中心にある巨大ブラックホールの重力を動力源とするプラズマのジェットが我々の銀河方向に吹き出している活動銀河核 (AGN) である。高エネルギー γ 線天体の多数を占め、高エネルギー宇宙の主演の一角を占める。検出した宇宙ニュートリノのエネルギーは約 2.9×10^{14} eV であり、この天体で陽子が少なくとも 10^{15} eV 以上に加速されたことを物語る。電波から γ 線にいたる広大なエネルギー帯で取得された電磁波観測データから 10^{14} eV を超えるニュートリノ放射を説明するには、幾つかの自明でない仮説が必要なことが明らかになった。これを手がかりに宇宙加速器天体の駆動機構を理解するデータを積み上げることが次のステップである。

—Keywords—

IceCube 実験：

高エネルギー宇宙ニュートリノを検出しニュートリノ天文学を開拓することを最重要ミッションとする世界最大のニュートリノ望遠鏡。南極点アムンゼンスコット基地に近接した深氷河の 1 km^3 の容積内に光検出器を埋設し、チェレンコフ光を検出する。12か国国際共同実験。



IceCube 実験装置の概観。深さ 1,500~2,500 m に 5,160 個の光検出器を3次元アレイとして埋設している。

1. 起：IceCube 実験が宇宙ニュートリノを捉えるまで

新たな観測窓で宇宙を覗けば、そこには必ず新たな発見がある。望遠鏡を発明したガリレオ以来の経験則だ。ニュートリノ観測でも同じはずだと IceCube 実験を始めた僕らは自らを鼓舞してきた。高エネルギー宇宙線放射はニュートリノを伴うはずであり、相応の感度を持つ観測実験によって必ず検出されるはずである。そう考えてきた。 10^{20} eV にも達するかもと推定された超高エネルギー宇宙線の検出から 50 年余り、起源はいまだに理解されていない。もううんざりだ、ニュートリノがこの限界を救うのだ。そう心に誓ってきた。

宇宙からの放射のなかでもっとも高いエネルギー帯を占める宇宙線^{*1}は高エネルギー宇宙現象の主役である。だが陽子等を超高エネルギーに加速する加速機構も加速器天体も分かっていない。しかし加速された陽子が放射場光子 ($p\gamma$ 衝突) や星間ガス (pp 衝突) と相互作用すれば、生成された π 中間子の崩壊によって高エネルギー宇宙ニュートリノが作られる。大きな不定性があるのはその衝突頻度だけだ。ニュートリノ検出には勝算があった。このニュートリノをとらえるために私達は IceCube 実験を始め、 1 km^3 にもおよぶ広大な氷河深部に検出器を設置してきた。

しかし 2006 年から検出器を少しずつ南極に埋設しては観測データを解析してきたが宇宙ニュートリノの兆候は見つからなかった。それみたことか、と冷笑する外野の声も聞こえてくる。私が主戦場と見定めた EeV (10^{18} eV) 領域では、超高エネルギー宇宙線観測実験 Pierre Auger Observatory が感度で先行し、IceCube 実験は TeV (10^{12} eV) の実験だろう、という研究者一般の当時の思い込みを覆すこともできない。さらに当時 IceCube 実験で最も期待されていたのは TeV 領域でニュートリノ点源を探す解析であったが、膨大な大気ニュートリノ雑音に埋もれ、イベントの到来方向分布をいくら解析しても点源の匂いすらしなかった。IceCube グループ内は微妙な雰囲気漂い始めていた。

だが我々日本グループはまだ意気軒昂であった。そもそも点源が検出されるためには、ニュートリノ放射輝度が極めて明るい γ 線天体の輝度に匹敵するほどの天体が近場に必要である。その幸運に賭けるよりは、遠くにある無数の天体からの信号を捉えるほうが確実だという読みがあった。距離 R が遠くなればニュートリノの数は $1/R^2$ で落ちるが、天体の数は R^3 で増える。弱相互作用粒子であるニュートリノは宇宙論的距離をエネルギー損失せずに伝播するので、遠い放射天体全体からの寄与(「背景放射」と呼ばれる)が最初に観測にかかるはずである。¹⁾ PeV (10^{15} eV) を遥かに超えるような超高エネルギー帯では大気 ν, μ 雑音も急速に減るから信号弁別では得をする。日本グループは、とにかくエネルギーが高い信号はどんなものでも網にかかるよ

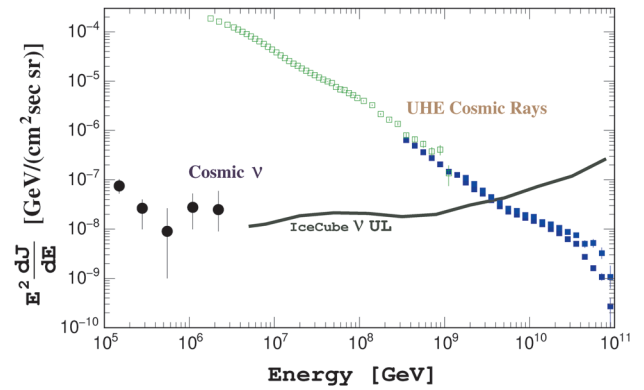


図1 IceCube 実験で測定された高エネルギー宇宙背景ニュートリノのフラックス (黒点)⁴⁾と 5×10^7 GeV 以上のエネルギー帯における上限値 (IceCube ν UL).⁵⁾ 高エネルギー宇宙線のフラックス (緑四角は IceTop 実験、紺四角は Pierre Auger 実験、⁶⁾ 青四角は Telescope Array 実験⁷⁾ による測定点). 背景ニュートリノと 10^{10} GeV 領域の超高エネルギー宇宙線フラックスが同程度であることが分かる。

うな解析手法の構築に脇目もふらず邁進した。EHE (Extremely-High Energy) 解析として世にでるこの探索は、毎年信号探索と流量上限値のアップデートを継続したが、IceCube 実験装置全てが完成し、フル観測に入る 2012 年が勝負どころと見定めていた。

IceCube グループ内の長く厳しい議論を経て^{*2} 2012 年 5 月 24 日、フル観測データを含む最新データの unblind が認められた。主解析者の石原安野氏が、後に Bert & Ernie というニックネームで知られることになる 2 つの PeV ニュートリノ事象を発見し、²⁾ 高エネルギー宇宙ニュートリノ観測が幕を開けた。この発見を手がかりに新しい探索手法も生み出され 10 TeV–PeV 領域で宇宙ニュートリノの存在は確立される。³⁾ 宇宙全体に分布するニュートリノ天体から放射されたニュートリノの寄与を足しあげた「背景放射」の流量やエネルギースペクトルが実測され、単位立体角あたりのエネルギー流量は $\sim 3 \times 10^{-8}$ GeV/cm² sec sr 程度であることも明らかになった。この値は、Fermi 衛星で観測された 100 GeV 領域の拡散等方 γ 線および超高エネルギー宇宙線流量と同程度である (図 1)。また 10 PeV 以上のエネルギーを持つ宇宙ニュートリノはこれまでのところ検出されず、エネルギー流量上限値として 2×10^{-8} GeV/cm² sec sr を EeV 領域で得ている。^{5), *3} この事実からニュートリノ放射モデルおよび超高エネルギー宇宙線起源に様々な制限がついている。

2. 承：放射天体はどこだ？

観測された宇宙ニュートリノ背景放射の到来方向は、一様と考えて矛盾がなく、銀河系外起源が卓越しているということ以外には個々のニュートリノ天体同定につながる直

*1 陽子・原子核から構成される放射線。陽子が主成分である。

*2 この顚末は高エネルギーニュース 31 No. 2 (2012) で読めます。

*3 この上限値は世界で最も厳しいものであり IceCube 実験の重要な達成であるが、EeV 領域でも信号が早い時期に検出されるべきだという私の予測は残念ながら外れた。

接的な手がかりは得られなかった。有力候補天体であった γ 線バーストや、Fermi-LAT 望遠鏡観測によりカタログ化されている γ 線天体との相関はなかった。^{8,9)} ここから、ニュートリノ天体は何であれ、比較的数量の多い天体種が多数を占めるという結論が導かれる。個々の天体は「暗い」ので点源としては観測できないが、数は多くないと背景ニュートリノ観測から推定される宇宙ニュートリノの総量を説明できないからである。この場合、個々の天体から到来するニュートリノ事象数の期待値は $\ll 1$ だが、宇宙空間全体では天体数は多いので、背景放射として有限の数のニュートリノが検出される。この描像では、個々の天体からのニュートリノ事象はせいぜい1つ程度である(多くの場合はゼロであり、ポアソン分布のゆらぎで1事象以上が稀に観測される)。1事象しかなければ到来方向の決定精度は $\sim 1^\circ$ 程度にとどまり、誤差円内には無数の天体が存在する。この条件下で宇宙ニュートリノ事象から天体を同定するには、宇宙ニュートリノ探索・弁別をオンラインで行い、その検出情報をリアルタイムにアラートの形で配信するしか方法がない。アラートを受けて角度分解能の良い既存の電磁波望遠鏡で即時に追観測をしてもらう。ニュートリノの到来方向になにか特異な現象を起こしている天体が見つければ、そこがニュートリノ発生源である可能性は高い。

この実現には、これまで何年もかけていた宇宙ニュートリノ探索をリアルタイムに行う必要がある。日本グループが実施していた超高エネルギー解析(EHE解析)は、比較的アルゴリズムがシンプルで、弁別に使用する種々の観測量のシミュレーションとデータの合いも良いため、リアルタイム解析は可能であると早くから判断していた。記録をみると2010年5月にメリーランド大学で行われたIceCubeコラボレーション会議で、早くも筆者はEHE解析をオンラインで行うことで天体を同定しようという提案をしている。このときは、アラートを配信するインフラの不足、まだ宇宙ニュートリノも見つからないのにというムード、そして我々日本グループのマンパワー不足もあり、実現にはもっていけなかった。しかしこのときに考えたことは将来の卵として心の中であたため続け、6年後に多くの仲間の協力と後押しをうけて実現する。

3. 転: 合わせ技で結果を出す

3.1 検出前夜: オンライン解析の構築

宇宙ニュートリノ検出情報を即時に公開し、他の望遠鏡や天文衛星に追観測してもらうことで天体を同定しようというやり方は、IceCube実験の伝統的な方針の変更を意味した。1つにはニュートリノだけで全ての結果を出すのではなく、合わせ技でも一本は一本だという価値観の変更が求められたこと。また高エネルギー宇宙ニュートリノ信号というIceCube実験にとって最も重要な財産を論文にする前に公表すれば、プロジェクトのクレジットが毀損するリスクを受け入れなくてはならないことだ。超高エネルギー

宇宙線由来のとてつもなく高いエネルギーを持つニュートリノを日本グループが探索していることは、IceCubeグループの皆知っている。何年も苦労した建設期間を経て長年待ち望んだイベントがようやくきても、私達が論文にする前に、公開された検出情報を元に誰でも論文が書けてしまうのだ。「本当にいいのか?」と何度か同僚に聞かれたものである。しかし、そこは割りきるしかない。対応天体同定の可能性を捨てるわけにはいかないのだ。

筆者だけではなく、IceCubeグループ内の多数が、2014年頃までにはこの認識を共有していた。それまでも、ある一定の時間内に同方向から事象が幾つか検出されれば、あるいは前もってリストしておいた γ 線天体方向からの事象が検出されれば、宇宙ニュートリノ信号の可能性があると、その情報をMoUを結んだパートナーにプライベートアラートとして送ることは行われていた。この手法を発展させ、より宇宙ニュートリノ純度の高い「プレミアム」信号弁別チャンネルをオンライン化し、検出情報を公開アラートとして配信する。プレミアムとして最初のオンライン化を実現したのは、Bert & Ernieを検出したEHE解析と、高エネルギー宇宙ニュートリノの存在を最終的に 5σ の有意性で確証したHESE (High-Energy Starting Event) 解析である。両解析ともオフライン解析ではシャワー事象も信号探索に含め、 ν_e, ν_τ にも感度があるように設計されていたが、^{*4} これらは角度分解能が悪いので、追観測には向かない。 $\nu_\mu \rightarrow \mu$ で生じるミューオントラックを選択するように新たなカットを追加している。シミュレーションデータによるカットの最適化、データ処理に要する計算時間の推定、過去のアーカイブデータを使ったアラートレートのチェックなどのステップを踏む慎重な開発が行われた。EHE解析については石原氏の解析アルゴリズムを元に当時千葉大学の研究員であったMatt Relichが主導してオンライン版の開発を遂行した。並行してGCN (Gamma-ray Coordinates Network) を通じたアラート自動配信のインフラ整備を進めた。インフラ構築とオンライン解析全体の取りまとめはメリーランド大学のErik Blaufussを中心としてアメリカ側が主導した。約半年間のテストランを経て2016年4月にHESEが、同年7月にEHEが運用を始める。¹⁰⁾ 90%信頼度の角度分解能はHESEが 1.9° 、EHEが 0.8° である。運用開始以降、2017年春までに9本のアラートを配信したが、追観測による同定には至らなかった。そもそも宇宙ニュートリノではなく大気ニュートリノ雑音である確率はHESEで70%、EHEで50%である。^{*5} また、可視光による即時追観測を実現するには夜間に観測可能な方角でなければならない。すぐには結果が出ないことは不思議ではない。期待半分の心持ちで2017年秋を迎えた。

^{*4} 例えば ν_e は荷電カレント相互作用で電子とハドロン粒子群を産みだし、それらが電磁・ハドロンシャワー事象として観測される。

^{*5} 原理的に事象ごとに大気由来雑音か宇宙由来信号かを完全に識別することはできない。エネルギーや天頂角などの情報から宇宙ニュートリノの「確からしさ」を評価するしかない。

3.2 IceCube-170922A 検出！

日本時間2017年9月23日早朝にEHEチャンネルにより高エネルギー事象が同定され、トリガー発生から43秒後にアラートが送信された。アラートは筆者の携帯電話も「リアルタイムに」鳴らした。すぐさま、イベントをチェックすると高エネルギーニュートリノの典型的なイベントであることが分かった。水平5.7度下方からIceCube検出器アレイ内を突っ切るミュオントラックである。EHEが対象とする高エネルギー宇宙ニュートリノは水平方向やや

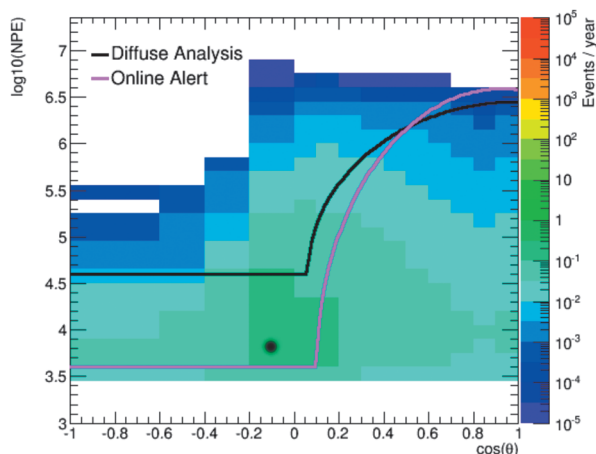


図2 オンライン版EHE解析における最終段階 (Level 4) の信号弁別。Level 3 までのカットを通過した事象を $\cos(\theta)$ -NPE 平面上に置く。ここで θ は天頂角、NPE は検出器に記録されたチェレンコフ光量の総和であり、ほぼエネルギーに比例する。紫色の曲線より上の事象が宇宙ニュートリノ信号候補としてアラート送信される。平面上の色は $\sim E^{-2}$ のエネルギースペクトルと等価な到来方向分布を仮定した宇宙ニュートリノの予想信号レートを示す。大気雑音事象は天頂角が小さいか (大気 μ) エネルギーが低い (大気 ν , 大気 μ) ため図中右と下の方に主として分布する。これを除去するのが Level 4 の弁別である。黒丸が IceCube-170922A の位置である。宇宙ニュートリノ信号レートが高い場所に位置していることが分かる。黒の曲線は、オフラインのEHE解析の弁別ラインである。元来のEHE解析ではより高いエネルギー帯にピークを持つ GZK cosmogenic ニュートリノを想定信号として最適化しているからである。(文献10の図を改変。)

上向きの方向が最もレートが高い。 $\sim 10^{15}$ eV ではニュートリノの荷電カレント反応の標的核子あたりの断面積は $\sigma_{CC} \sim 10^{-33}$ cm² に達する。地球内での平均自由行程は $\sim (N_A \sigma_{CC} \rho)^{-1} \sim 6,000$ km となり地球直径より短い。このため北半球から入射した ν_μ は高確率で荷電カレント反応によりミュオンになるが、高エネルギーミュオンは岩石内を ~ 1 km ほど走るとエネルギーが $1/e$ になるため、IceCube検出器に到達する前に range out してしまう。すなわちニュートリノが地球内を突っ切る距離が長すぎるとミュオンは届かず、短すぎるとそもそもニュートリノ反応の確率が落ちる。ちょうどバランスするのが水平やや下から上向きに検出器に到達する軌道で、高エネルギー宇宙ニュートリノ検出が最も期待できるケースなのだ。IceCube-170922A と名付けられたこの事象はこの条件をストライクに満たしていた (図2の黒丸を参照)。しかも検出器ほぼ中央を横切る長いトラックであるため角度も良く決まった。図3にこの事象を示す。ミュオンはIceCube検出器容量内に 23.7 ± 2.8 TeV のエネルギーを落としている。これがエネルギーに関する直接測定量である。これを親ニュートリノのエネルギーに変換するのは不定性が大きい*6 推定エネルギーは90%信頼度で183 TeV から4.3 PeVの間にあり、最大確率推定値は290 TeVであった。大気由来の雑音ではなく宇宙ニュートリノである確率は56.5%と判定された。

3.3 進展につながった追観測は日本発だった

IceCube-170922A はこのように「筋のよい」事象と言えた。天空上での方向を調べると北半球でも可視光観測ができそうである。日本で追観測すれば良い結果が出るかもしれない。IceCube ニュートリノのフォローアップに関心を持ち関連する研究会にも参加していた日本の天文研究者のグループ*7 に、この事象は価値があり真剣にうけとるよ

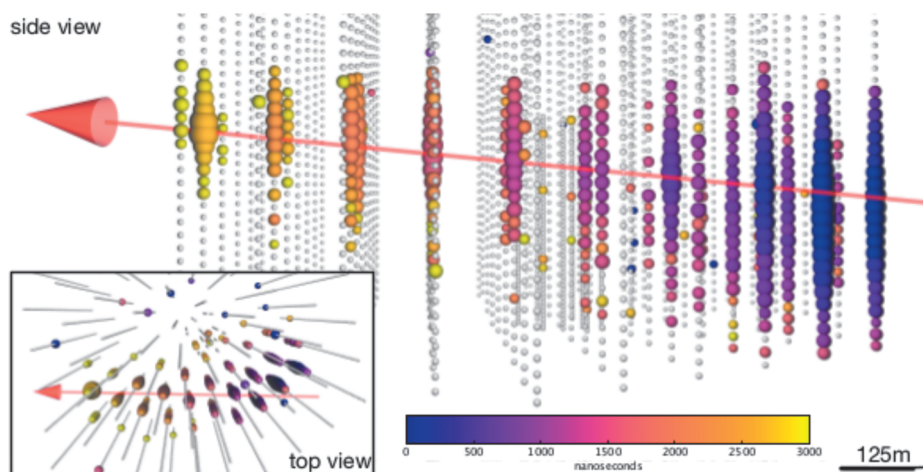


図3 IceCube-170922A のイベントディスプレイ。氷河内の各検出器に信号が記録された時間を色で示している。色のついた円の大きさは、検出器に記録されたチェレンコフ光子数の対数に比例している。約3マイクロ秒の長さをかけて、このミュオンは ~ 1 km の長さのIceCube検出器アレイを横切った。矢印は推定されたトラックの方向である。90%信頼度で $0.97^{+0.02}_{-0.01}$ の精度で到来方向が決まった。(文献11より転載。)

*6 地球内のどこで $\nu_\mu \rightarrow \mu$ の反応が起きたか分からないため。

*7 OISTER と呼ばれる光赤外大学間連携事業が母体である。

う呼びかけた。当時広島大の田中康之氏がかなた望遠鏡で、東大の諸隈智貴氏が木曽観測所のシュミット望遠鏡ですぐに観測することを請け合ってくれた。ここから菌車が急速に回り出す。

彼ら日本の天文研究者は、ニュートリノ天体候補の1つであったブレーザーに着目していた。ブレーザー銀河は活動銀河核 (AGN) と呼ばれる高エネルギー天体の一種で、中心にある巨大ブラックホールから吹き出すプラズマジェットがたまたま我々の銀河方向に向いているものである。AGN の中でも数は限られているため、ニュートリノ事象の到来方向誤差円内に存在するブレーザーは数個程度であり、1つ1つを限られた時間内に観測することが可能である。彼らは事前に独自のブレーザー銀河候補のカタログを電波・光学観測データ等の情報から作成し、追観測に備えていた。これが功を奏する。独自カタログでリストされ、かつ IceCube-170922A 近傍に入っていたブレーザー天体候補は7つあった。かなた望遠鏡は日本時間の9月23日、24日の2日間観測を実施し、これら7つのうち、TXS 0506+056 と呼ばれる天体が過去に比べ極めて明るく、しかも輝度が減光フェーズにあることを明らかにした。この天体を第一候補として、Fermi-LAT γ 線望遠鏡チームのメンバーでもある田中氏は GeV γ 線の観測データを調べた。そこで、TXS 0506+056 が γ 線でもフレアを起こしていることを発見する。この発見を速報する ATel は田中氏を筆頭著者とする Fermi-LAT チームから9月28日に配信され、触発された世界中の多数の天文観測施設が更なる観測を実施することになる。100 GeV 以上の高エネルギー γ 線に感度を持つチェレンコフ望遠鏡は H.E.S.S. が9月23日と24日に3時間強、VERITAS が23日に1時間、MAGIC が24日に2時間の観測をすでに実施していたが、Fermi-LAT の速報をうけて追加観測に踏み切っている。このうち、MAGIC が28日以降総計約13時間にも及ぶ観測の結果、100 GeV 以上の高エネルギー帯においても 6.2σ の有意性で、TXS 0506+056 からの信号を検出する。史上初めてニュートリノの検出をうけて γ 線フレア信号が GeV 領域 (Fermi-LAT) および 100 GeV 領域 (MAGIC) で確認されたことで、高エネルギーニュートリノ天体候補が同定されたのだ。¹¹⁾

3.4 ヤマ場：同期観測の偶然性の評価

ブレーザー天体 TXS 0506+056 は、2017年4月頃から γ 線の輝度を急速に増し、7月には Fermi-LAT の観測データが存在する 2008年8月以降の平均輝度の7倍の明るさにも達している。IceCube-170922A が検出された時も平均輝度の約4倍の明るさを持っていた。このフレアとニュートリノ信号検出が相関しているのか、単なる偶然なのかの評価は TXS 0506+056 が対応天体なのか否かを判断する最重要指標である。Fermi-LAT によって検出されている銀河系外 γ 線天体は全部で2,257天体ある。Fermi-LAT チームよりこれら全ての 2008年8月以降9年間の1 GeV 以上の γ 線輝度の時間変動^{*8} データの提供をうけ、IceCube グループでは

偶然仮説を棄却する統計的有意性の検討に入った。時間・空間相関を評価する仮説検定では、考慮されない、あるいは考慮できない隠れたパラメータの自由度の影響を見積もることは容易なことではない。そのため、甘い見積もりで発表されたものの後の観測で誤りと分かった「有意な結果」は過去に多く存在する。我々は、likelihood ratio の手法を使ったが、パラメータの不定性・自由度をできるだけ考慮し信頼性の高い検定を目指した。

筆者は、Fermi-LAT で γ 線フレアが見つかったと聞いた直後からこの有意性計算が肝であると判断して、千葉大グループでも解析に参入することを決断した。コトがおいしくなってくると、いきなりこの手の解析に参入し、クレジットを取る手合いは IceCube グループにもいる。何年もかけて EHE チャンネルの構築に汗をかいてきた我々が指をくわえているわけにはいかなかった。

有意性検定では、偶然仮説に対して対立仮説を設定し、どちらの仮説がよりあり得るのかを検定する。対立仮説に何を持ってくるかは自明には決まらない。今回は、1) ニュートリノ検出頻度は、 γ 線の輝度に比例する、2) ニュートリノ検出頻度は γ 線輝度の変動と強く関係する、という2つの場合が自然に考えられた。^{*9} 「いきなり参入組」は、過去に IceCube 実験で行われたブレーザー天体相関解析のやり方をそのまま適用することが予想され、その場合は1) の方である。そこで日本側は2) の場合をゼロから構築することにした。筆者は10月にベルリンで開催されたコラボレーション会議に向かう途中、成田空港で数学的手法の大枠を走り書きし、それをそのまま関係者が集まった打ち合わせで発表して千葉大グループ参入の道をつけておいた。帰国後、それぞれの解析の進行具合を報告し結果をまとめるための電話会議が連日深夜に行われ、「集中解析週間」は1か月にも及んだ。Bert & Ernie 発見時の再来である。千葉大グループの解析は研究員の Lu Lu が遂行し、ゼロからプログラムを組んだにもかかわらず「いきなり参入組」より早く計算準備を終えてしまった。p-value^{*10} として 1.9×10^{-4} (one side で 3.6σ 相当) を得た。一方仮説1) の p-value は当初かなり異なり、この違いは対立仮説の違いだけでは説明がつかなかった。この違いを理解するためのレビューも行われ、「いきなり参入組」の Likelihood 構築のやり方にミスがあったこと、ニュートリノ角度分解能の確率密度関数をどこまで信頼するかによって 0.5σ 程度の違いが現れること、両チームの数学的手法は一見異なるが、本質的には数学的に同等であることなどが明らかになった。このことから、グループ内部で切磋琢磨することが結果的に深い理解につながり、数字の信頼度が上がっていくことが分かる。

^{*8} light curve と呼ばれる。

^{*9} 輝度の二乗に比例するという理論的な予想もあるが、1) の場合のほうがより保守的であるため、今回は考慮されていない。

^{*10} 仮説の統計的有意性を測る数値。値が小さいほど仮説を棄却する統計的有意性が高い。

IceCube実験で同定した宇宙ニュートリノは170922Aだけではない。EHEとHESEの2つの同定手法で過去にアラートを計9本送信している。このぶんだけ試行因数を考慮し、いわゆるpost-trialのp-valueを計算する必要もある。今回はさらに徹底して、オンラインシステム運用以前の過去の全てのアーカイブデータに、EHE、HESE同定フィルターをかけて信号事象候補を抽出し、それらのFermi-LAT天体との相関の有無を確認した。EHEについてはLuおよび石原氏が担当し、突貫工事で解析を遂行した。総力戦である。2010年以降のデータからEHEで24事象、HESEで17事象が同定されたが、TXS 0506+056レベルの輝度を持つ天体は到来方向には存在しなかった。

こうして、試行因数、対立仮説の違い、角度分解能の扱いなど、一意的には決まらない部分において保守的な見積もりをしても、統計的有意性は $\sim 3\sigma$ であった。すなわちTXS 0506+056のフレア時に同じ方向からニュートリノが検出されたのが偶然であるという仮説を棄却する有意度は 3σ レベルということになる。

3.5 2014年12月のニュートリノフレア

3σ レベルという有意性は、TXS 0506+056がニュートリノ放射天体であることを強く示唆するものの、万人が疑問の余地なく結論するには至らないとも言える。しかし、ここに更なる傍証が登場する。輝度が変動する天体を対象に点源探索解析を行ってきたスイスとドイツのグループは、TXS 0506+056方向の過去のアーカイブデータをあたり、2008年からの9年半分の期間に相当するサンプルを詳細解析した。そして2014年12月を中心とする約110日間の期間にニュートリノ事象数が大気ニュートリノ雑音から

13 ± 5 事象超過していることを発見する。¹²⁾ 偶然仮説の場合、超過が現れる時期やその期間に、9年半の時間軸内であらゆる値が許される自由度を勘案した、post trialの統計的有意性は 3.5σ である。この超過はTXS 0506+056がニュートリノ放射天体であることを示唆する統計的に独立な観測である、という点が大事である。マルチメッセンジャー観測と合わせ、2つの独立した結果が、TXS 0506+056がニュートリノ天体であることを支持している。

4. 結：分かったこととこれからの展望

TXS 0506+056はこれまで脚光を浴びてこなかった天体である。Fermi-LAT γ 線天体の3rdカタログにリストされている1,773天体の中で明るさトップ50にはランクするがファーストクラスではない。しかし、今回可視光域での集中的な観測によりイタリアのグループがこの天体の赤方偏移を測定することに成功し、¹³⁾ 距離が約40億光年とかなり遠いことが分かったことで、絶対輝度を算出することができた。ニュートリノが検出されたときの γ 線輝度は $\sim 1.3 \times 10^{47}$ erg/sであり、これはトップクラスの明るさである。^{*11} 超高エネルギー宇宙線放射源としても遜色ない。また過去の γ 線衛星の観測で、この天体から最も高いエネルギーの光子が見つかったことが知られている。¹⁴⁾

しかし詳細をみると問題もある。図4に、今回のマルチメッセンジャー観測で測定されたTXS 0506+056のエネルギースペクトルを示した。可視光域(~ 1 eV)と γ 線帯($\sim 10^9$ eV)の2箇所にピークを持ち、これは高エネルギー電子のシンクロン放射と逆コンプトン散乱の寄与として完全に説明できる。PeV以上のエネルギーを持つ高エネルギー

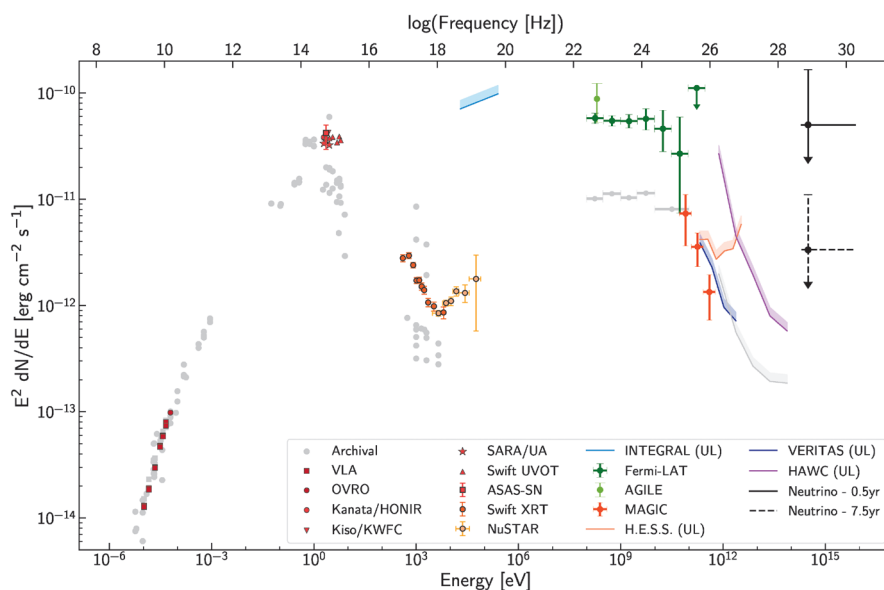


図4 多波長帯の追観測で測定されたTXS 0506+056のエネルギースペクトル (SED)。グレーの点は、 γ 線フレア前に測定された過去のデータ。IceCube-170922Aから得られたニュートリノエネルギー流量の上限値は、右の黒線で示されている。実線が期間0.5年 (γ 線フレアの期間)、破線が期間9.5年 (Fermi-LATの全観測時間) で平均したものである。(文献11より転載。)

*11 つまり距離が遠いので見かけの明るさは暗かったに過ぎない。

ギー宇宙線陽子がジェット内で衝突する光子の主要なエネルギー帯は、 $p\gamma$ 衝突断面積を考慮すると X 線 ($\sim 10^3$ eV) であるが、図 4 をみれば明らかなように X 線帯のエネルギー密度は低く、衝突頻度が少なすぎてニュートリノの量が観測からの示唆よりも大幅に足りない。また $p\gamma$ 衝突でできた π 中間子の崩壊は、ニュートリノだけでなく電子や γ 線も作る。これら電磁成分はカスケード効果によって最終的に X 線領域に現れるはずだが、観測データにはその兆候は全く見当たらない。¹⁵⁻¹⁷⁾ この問題を回避するために $p\gamma$ 衝突で生成された陽子から荷電変換した中性子がニュートリノ生成の親粒子とする 2 段階モデル¹⁸⁾ が提唱されている。

一方で観測データと矛盾しない最も単純な考え方は、電磁波スペクトルの主要部分は電子で決まっているのだから、観測データと矛盾しないように宇宙線陽子の輝度を暗くしてしまえというものだ。この場合、ニュートリノの流量は $\sim 10^{-13}$ erg/cm² s 程度となり¹⁵⁾ IceCube で O(100 TeV) のエネルギーのニュートリノを 9.5 年の期間に 1 事象検出したことから推定される流量 $\sim 1.2 \times 10^{-11}$ erg/cm² s よりふた桁低い。この差は一見大きいように思えるが、第 1 章で述べたように、個々の天体からのニュートリノ数は $\ll 1$ でも、数多くの天体があるのでポアソン分布のゆらぎで 1 事象を運良く検出しているという描像とは合う。いずれにせよ、具体的な天体観測データを元に高エネルギー宇宙線陽子放射を論ずる時代が来たのである。

ニュートリノ放射天体有力候補の第 1 号はブレーザーであったが、実は主要な放射源は γ 線ブレーザー天体以外であることが分かっている。Fermi-LAT で同定しているブレーザー天体は 1,000 近くあるが、それらとの方向の相関は見えていないこと、⁹⁾ 多くの理論は 1 PeV 以上のさらに高エネルギー領域にピークを持つニュートリノスペクトルを予言しているが、¹⁹⁾ 10 PeV 以上での IceCube 実験による流量上限値からブレーザーの寄与に制限がついている²⁰⁾ ためだ。多数派は別の天体だ。多分 γ 線ブレーザーよりも数が多い天体だろう。となると対応天体同定のためにはニュートリノアラートの数を増やすと共に角度分解能を上げることが鍵となる。IceCube 実験は 2021-22 年に次世代実験 IceCube-Gen2 の第一フェーズとして新型検出器を新たに埋設することが決まり、この目標を達成する手段ができた。日本グループでは D-Egg と呼ばれる小型高性能検出器を製作し南極に埋設する。氷河内のチェレンコフ光散乱を理解して到来方向決定精度を上げることがミッションで

ある。次の一手を目指す実験の努力はもう始まっている。

本稿の内容は、IceCube 実験グループの多くの同僚の成果によります。素晴らしい同僚達に感謝します。また極めて有意義な追観測結果をもたらした日本の可視・赤外・電波観測の研究者の方々にも深く感謝します。村瀬孔大氏との有益な議論が本稿にも一部反映されています。氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) A. Silvestri and S. W. Barwick, Phys. Rev. D **81**, 023001 (2010).
- 2) M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Phys. Rev. Lett. **111**, 021103 (2013); 石原安野, 吉田 滋, 日本物理学会誌 **68**, 738 (2013).
- 3) M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Science **342**, 1242856 (2013).
- 4) The IceCube Collaboration, PoS ICRC2015, 1081 (2015).
- 5) M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Phys. Rev. D **98**, 062003 (2018).
- 6) The Pierre Auger Collaboration, PoS ICRC2017, 486 (2017).
- 7) T. Abu-Zayyad et al., Astrophys. J. **768**, L1 (2013).
- 8) M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Astrophys. J. **835**, 151 (2017).
- 9) M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Astrophys. J. **835**, 45 (2017).
- 10) M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Astropart. Phys. **92**, 30 (2017).
- 11) IceCube, Fermi-LAT, MAGIC, et al., Science **361**, eaat 1378 (2018).
- 12) IceCube Collaboration, Science **361**, 147 (2018).
- 13) S. Paiano et al., Astrophys. J. **854**, L32 (2018).
- 14) B. L. Dingus and D. L. Bertsch, arXiv:astro-ph/0107053 (2001).
- 15) A. Keivani et al., Astrophys. J. **864**, 84 (2018).
- 16) S. Ansoldi et al., Astrophys. J. **863**, L10 (2018).
- 17) S. Gao et al., arXiv:1807.04275 (2018).
- 18) K. Murase, F. Oikonomou, and M. Petropoulou, Astrophys. J. **865**, 124 (2018).
- 19) K. Murase, Y. Inoue, and C. D. Dermer, Phys. Rev. D **90**, 023007 (2014).
- 20) M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Phys. Rev. Lett. **117**, 241101 (2016); M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), *ibid.* **119**, 259902 (2017).

(2018 年 11 月 5 日原稿受付)

The Identification of a Likely Source of High Energy Cosmic Rays Prompted by the Astrophysical Neutrino IceCube-170922A

Shigeru Yoshida

abstract: IceCube Neutrino Observatory has launched the program of a realtime analysis framework to enable rapid follow-up observations. A ~ 290 TeV neutrino event identified by this framework on September 22 2017 prompted various follow-up observations which revealed that this neutrino is suggested to originate in the flaring γ -ray blazar TXS0506+056 at the statistical significance of $\sim 3\sigma$ level. This is a first identification of a likely source accelerating cosmic rays to at least several PeV. We describe how we have made these observations with IceCube Observatory in a multiwavelength follow-up campaign.