

IceCubeによる ニュートリノ天文学の展望

石原 安野¹
吉田 滋²



石原



吉田

〈^{1,2} 千葉大学グローバルプロミネント研究基幹 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33〉

〈^{1,2} 千葉大学大学院理学研究院 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33〉

e-mail: ¹aya@hepburn.s.chiba-u.ac.jp, ²syoshida@hepburn.s.chiba-u.ac.jp

IceCube実験から近年得られた結果と、それらの知見をベースにした次世代ニュートリノ望遠鏡IceCube-Gen2における今後の展望について解説する。

1. ニュートリノ天文学とIceCube

チェレンコフ光検出によるニュートリノ観測に向けた研究が進展した1970年代より、検出器の大型化によるニュートリノ望遠鏡計画が提唱されてきた。しかし、そのような巨大検出器建設の困難さから、実際に宇宙ニュートリノを観測できる能力を持つニュートリノ望遠鏡の完成は2011年まで待つ必要があった。南極点氷河1450 mから2450 mの深さに2011年に完成した一立方キロメートルの容量を持つIceCube検出器(図1)はそのフル稼働開始以来、ニュートリノ天文学を牽引している存在である[1]。IceCube実験では、宇宙ニュートリノが地中原子核と相互作用し作る二次荷電粒子が放出するチェレンコフ光を深氷河に埋設された光電子増倍管の配列により検出することで、ニュートリノを観測する。

それまでは困難であった高エネルギー宇宙ニュートリノや重力波の検出を可能とする検出器の稼働により、電磁波ではないニュートリノや重力波、そして宇宙線を統合的に理解するマルチメッセンジャー天文学が急速に発展している。異なるメッセンジャーを用いた統合理解において重

要なのはそれぞれ手段の長所と短所を考慮し補うような解析であろう。高エネルギーの宇宙線放射といった非熱的放射現象の解明で中心的な役割を果たしている γ 線は放射天体の詳細を調べることができる。しかし放射光の起源が電子起源なのかハドロン起源なのかといった放射起源の解明といった点にはあいまいさが残る。荷電粒子である宇宙線観測からはその生成量、種類、非等方性などが調べられてきたが、宇宙磁場の影響を被るためその起源天体の同定は困難である。天体から放出された宇宙線と光や物質との相互作用によって生成される高エネルギーニュートリノはハドロン放射起源の解明や遠方宇宙や天体内部の探究に強力な手段となる一方で、弱相互作用素粒子であるため高統計での観測が難しい。これらの相補的な観測をどのように進めていくべきか。本稿ではニュートリノ天文学の立場から考えてみたい。

2. ニュートリノ天体探査

ニュートリノを放出している天体は、どこにあるのか、どのような天体なのか。遠方宇宙からまっすぐに飛んでくるニュートリノで天体観測を行おうというアイデアを生み出した根源にある問

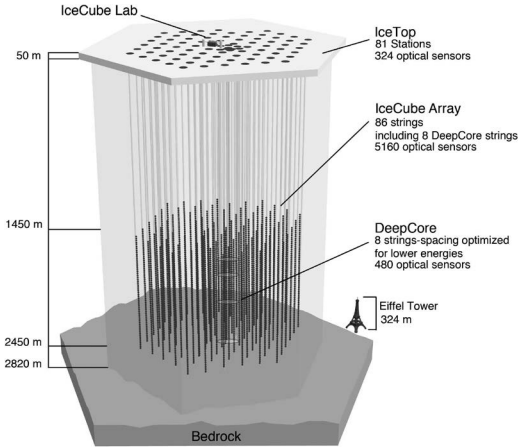


図1 IceCube 検出器の外観図。メインの光検出器配列は深氷河に埋設されている。氷河の表面には空気シャワー検出器IceTopが設置されており、その中心にIceCube実験のコントロールセンター“IceCubeLab”がある。すべての取得データはまずこのIceCubeLabにケーブルをとおして集められ、その後選別されたデータは衛星回線で北半球に送られる。

いである。そして高エネルギーニュートリノ放射天体を同定することは、宇宙粒子物理学 (Particle Astrophysics) という観点から見ると、宇宙線起源同定とほぼ同義である。IceCube実験で観測をしている高エネルギー宇宙ニュートリノを作る親粒子は、100 TeV (10^{14} eV) から EeV (10^{18} eV) ものエネルギーを持つ宇宙線陽子である。X線天体や γ 線天体の放射の大半を駆動する、高エネルギー電子ではニュートリノは作られない。(超)高エネルギー陽子の衝突で生成された二次粒子としてのみ、高エネルギー帯でニュートリノは生まれる。すなわち、ニュートリノ天体イコール高エネルギー陽子加速天体である。この天体が陽子にとって「光学的に薄い」環境であれば、陽子もニュートリノとともに放出され、文字通りの宇宙線起源天体である。「光学的に厚ければ」陽子は閉じ込められてしまうが、ニュートリノは弱い相互作用しかしない素粒子だからそのまま放射される。そのようなニュートリノでは「明るい」天体

は当然のことながらニュートリノでしか見つけることができない。どちらにしても高エネルギー宇宙の未踏の領域にあり、高エネルギー宇宙を理解するための重要な研究対象である。

2.1 恒常的にニュートリノを放出する天体

宇宙線放射天体のうち、そこで時間によらずニュートリノが生成されているものが恒常的ニュートリノ放射天体である。この仕組みには、大きく分けて2種類ある。一つは、例えば、活動銀河核 (AGN) の降着円盤近くやトーラスなどで陽子が安定的に加速され、その陽子が周囲の可視光・紫外光といった放射場と衝突して、ニュートリノを作り出す [2]。これはニュートリノ天体がコンパクト天体である場合である。もう一つは、(コンパクト)放射天体から放出された陽子が、銀河・銀河団内を磁場にトラップされて漂い続ける。その間に、塵や星間ガスと高エネルギー陽子が衝突し、じわじわとニュートリノを作る [3, 4]。銀河系内拡散 γ 線放射のアナロジーだ。これは「宇宙貯蔵庫」モデルと呼ばれる。IceCube実験はこれらの機構を念頭に、膨大な量の観測データの到来方向を天空上にマッピングし、天体放射信号を探してきた。やり方は大きく分類すると2種類ある。一方の手法は、高エネルギー γ 線・X線天体などとして知られる天体の中から、有望そうなものを事前に選定してリストアップし、それらの天体との方向相関を見るものである。もう一つは、対応天体のことなど考えず、とにかく地球上の方向分布が一様分布から期待されるものよりも超過している方向を探す。これは全天探索と呼ばれる手法である。

2019年IceCube実験は、完成前約半分の規模で運用していた2008年に取得されたデータから2011年に開始したフル観測を経て、2018年夏までに取得された10年にわたるデータによる天体探査解析の結果を発表した [5]。観測時間をすべて足し上げ、恒常的なニュートリノ放射天体を方向と推定エネルギー情報を基に探査するものであ

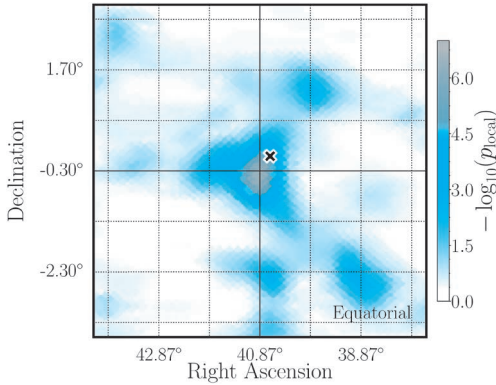


図2 全天探査によって、もっともニュートリノ信号の超過が見られた場所。x軸は赤経、y軸は赤緯である。方向によらず一様に飛来しているとする仮説を支持する p -valueを色で示している。 p -valueが小さい場所ほど、そこからのニュートリノ信号が超過していることを示す。×印はNGC 1068の場所で、0.35度ずれているが、この差はニュートリノ到来方向の角度分解能の大きさで自然に説明される。

る。全天探査、及びリスト天体解析の両手法で見つかったニュートリノ放出天体候補が、NGC 1068, M77の別名で知られるセイファート銀河だ(図2)。現在はまだ 3σ 程度の統計的有意性であるが、有望な候補であり、今後観測を継続して有意性の増大が確認されれば、恒常的ニュートリノ放射天体第一号の発見となろう。なお、NGC 1068は、コンパクト天体放射説でも、宇宙貯蔵庫説でも、理論的にもっとも有望視されてきた銀河の一つである。

また解析前に事前リストしたニュートリノ天体候補との相関も見え始めている。どのような天体をリストアップするかについては、恣意的な選択が入りこむ余地がある。したがって観測データを見る前に、事前に客観的な指標に基づき選定しなくては信用できる結果とはならない。この解析では、Fermi LATによるGeVエネルギー領域で見ついている天体カタログ(LAT 4FGL)を使い、それぞれの天体に対し、 γ 線放射の強度をその方で期待できるIceCube実験のニュートリノ検出

感度で割ることで、もっとも検出が期待できる上位5%のBlazarをまず選びだした。Blazarはジェットが我々の銀河系方向を向いている活動銀河核の種族で、GeVエネルギー帯の γ 線天体の大多数を占めている。さらに、その中で最低ランクのものを基準値にとって、それを超えるような検出可能性を持つ未同定天体及び、Blazar以外のAGNをリストアップした。結果、4つのスターバースト銀河がリストに加わった。銀河系内天体に対しては、VHE γ 線天体のカタログTeVcatを用い、 γ 線放射が陽子で駆動されたという仮説から、ニュートリノ放射強度を推定し、同様のやり方でもっとも検出可能性がある12天体をリストした。総計110天体を、既知天体の中ではもっともニュートリノ検出が期待できるものとして事前に選定したうえで、観測データとの相関を見たのだ。

上述したように、もっとも相関が高かったのはスターバースト銀河NGC 1068(事前局所有意度 4.1σ)、ついでマルチメッセンジャー観測で同定されたBlazar(BL Lac)であるTXS 0506+016(同 3.6σ) [6]、ついでBL Lac PKS 1424+240(同 3.0σ)、BL Lac GB6 J1542+6129(同 2.9σ)がトップ4である。これら4天体を含め、現在の観測データが事前選定リスト天体の少なくとも一部と何らかの相関がある有意性は 3.3σ で、NGC 1068, TXS 0506+056以外にも、恒常的ニュートリノ放射が見え始めている兆候である可能性がある。より高統計での観測に向け、次世代観測実験IceCube-Gen2に大きな期待がかかっている。

2.2 ニュートリノフレアを起こす天体

時間的変動天体が高エネルギー陽子加速源である可能性は高い。この場合は、宇宙貯蔵庫ではなく、天体本体がニュートリノを生成すれば時間的に変動しているニュートリノ放射として観測される。変動の時間スケールは天体の種類によって大きく変わる。短い時間スケールで突発的に放射される場合は、電磁波により観測されたフレアある

いは爆発の時間とニュートリノ信号観測時間の間の相関を探すことになる。γ線バーストが代表的な例で、Swift衛星やFermi GRBで観測されたバースト検出時間との相関解析が行われ、ニュートリノ放射がγ線と同時に放射されていることはない、という結果を得ている[7]。一方で、活動銀河核で起こり得るフレアは、weekからmonthのスケールであり、しかもその時間スケールは事前には分からないため、同定は難しい。時間幅を変えながら、ニュートリノ信号がある方向から卓越して飛来しているようなイベントの探索が行われているが、現状ではニュートリノ信号の統計量が感度を制限しており、有意な結果は得られていない[8,9]。

全く別のアプローチが、マルチメッセンジャー観測を組み合わせたものである。宇宙ニュートリノ信号が一発でも受かれば、少なくともその到来方向にある天体の一つが放射元であることは確実である。そこで、ニュートリノ検出と時を同じくして、可視光やX線、γ線観測を実施し、フレアを起こしている天体を探す。このためにIceCube実験では、宇宙ニュートリノ即時同定解析とアラート配信システムを立ち上げてきた[10]。Blazar TXS 0506+056からのニュートリノ放射は、まさにこの手法で同定された[6]。

一方、ニュートリノ検出を引金として、マルチメッセンジャー観測により天体を探索する場合の難点は、到来方向の誤差円内にある天体は非常に多く、データから絞ることが簡単ではない、という点である。超遠方からでも届き得るといふ弱相互作用素粒子ニュートリノの強みがここでは解析の難しさを引き起こすのである。TXS 0506+056は数が限られているBlazar、しかもGeVエネルギーのγ線が検出されているBlazarということから、候補天体の数を絞ることができた。だが、より多く存在している天体種では、絞り込みは簡単ではない。可視光観測者にとって、可視・赤外光域で観測される突発天体など、超新星の例をあげ

るまでもなくありふれた現象であることは常識であると聞く。この困難に対する対応としては3.4節で紹介するマルチプレット信号の検出を提案したい。

2.3 粒子シャワー測定による宇宙ニュートリノ観測

上述したニュートリノ放射天体探索の多くは、トラック事象と呼ばれるミュー型のニュートリノが荷電カレント反応を起こすことで作るミューオン信号を用いて行われた。一方でニュートリノが南極氷河で生み出す信号には、粒子シャワー型と呼ばれるタイプもある。ニュートリノ-核子衝突で作られた電子やメソンがさらに氷河中の核子・電子と相互作用して、多数の二次粒子を生み出すカスケードが起こる。これがチェレンコフ放射により検出されるのがシャワー事象である。ミュー型だけでなく、電子型、タウ型のニュートリノもこのタイプの事象を作るため、シャワー事象の測定は、フレーバーと呼ばれるこれらニュートリノの種類の比率を推定する手がかりを与える[11]。またよりコンパクトなシャワー事象から得られるニュートリノエネルギーの推定はトラック事象よりも高い信頼度で精度よく決定できる。フレーバー比と合わせ、宇宙ニュートリノ放射機構を探る有力な情報をもたらす。また大気ニュートリノ雑音との弁別にも優れ、雑音信号が圧倒的に卓越している~50 TeV以下の低いエネルギー領域においても宇宙ニュートリノの検出に成功している[12]。

これら多くの長所を持つシャワー事象であるが、到来方向の決定精度は悪くIceCube実験における角度分解能は10~15°程度である。また信号毎の誤差の違いも大きい。これは検出器理解の限界、特に南極氷河における光伝搬特性に起因していると考えている。検出器性能を上げ、より多くの校正データを取得することで、深氷河内でのチェレンコフ光散乱・吸収をより詳細に調べることが大幅な改善が期待できる。現在進行中のIce-

Cube実験アップグレード計画 [13] の主要目的の一つである。

近い将来に実現されるこの改善を見据えると、トラック事象と粒子シャワー事象両方を含むデータにより統計量を増やして行うニュートリノ天体の探索は次の重要な方向性を示す可能性がある。特に即時解析において検出アラートの新しいチャンネルとして運用できれば、上述したニュートリノフレア天体を同定する新たなチャンネルとなる。

3. 次世代ニュートリノ望遠鏡： IceCube-Gen2

IceCube実験が切り拓いた宇宙の新しい観測手法が高エネルギーニュートリノ天文学である。高エネルギーニュートリノ背景放射の流量の観測をはじめとし、さまざまなクラスの候補放射天体のニュートリノ流量に対する制限、そして電磁波や重力波といった異なる観測手段との統合観測を確立した。ここからさらに、より直接的な天体の高エネルギー放射機構理解を進めていくために現在進行中であるのが次世代ニュートリノ望遠鏡計画である。宇宙ニュートリノならではの高エネルギー宇宙の観測、特に PeV (10^{15} eV) から EeV (10^{18} eV) といった超高エネルギー領域の直接探査は、他に代替手段のないユニークな観測であり、その情報が高エネルギー宇宙の描像を描くために重要であることは論を待たない。さらなる高エネルギー放射機構の理解を深めるために必要となるのは高エネルギーニュートリノが宇宙の中のどの部分から発せられているかという情報である。前章で見たように、現状のIceCube解析からはもっともニュートリノを明るく放出する天体が見え始めているという状況である。この先どのような展開を期待し、IceCube-Gen2計画を進めているのか、本章ではその展望について説明する。

3.1 IceCube-Gen2検出器

IceCube-Gen2検出器もIceCube検出器と同様

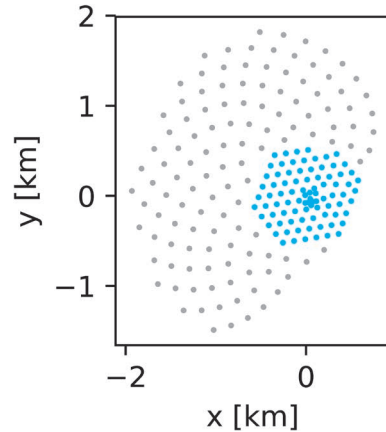


図3 現在性能研究を進めているIceCube-Gen2デザインにおける光検出器の平面配置図。

の南極点深氷河中でニュートリノ起因の二次荷電粒子からのチェレンコフ光の検出を行う。ただし、IceCubeでは面積一平方キロメートルの領域に高さ1 kmの光検出器配列が作られたのに対し、Gen2では埋設面積が約六平方キロメートルで、配列の高さは1.3 kmとなるため、その容量は八立方キロメートルとIceCube検出器の約8倍となる。図3に示すのが、Gen2における光検出器の分布のx-y平面における分布である。青丸で示す125 m間隔で埋設されているIceCube検出器配列の周りにGen2の240 m間隔で光検出器を埋めていく。この検出器間隔の違いはターゲットとするエネルギー範囲のニュートリノに対して、効率的に最適化を行っていることから生じている。IceCubeではどのようなエネルギー領域で確実に宇宙ニュートリノの観測ができるかが確立していなかったため、より低エネルギーの大気ニュートリノから、宇宙ニュートリノがその流量を凌駕するエネルギー領域までを着実に観測することを目指した。宇宙ニュートリノの流量が確立しているGen2では、雑音事象の確実な除去を可能とし、解析レベルで宇宙ニュートリノが確実に卓越しているエネルギー領域における感度の向上を狙う。これが100 TeVから10 PeVといった他の手段で

は観測が難しい超高エネルギー領域である。Gen2では横間隔はIceCubeよりも疎になるが、一つの埋設孔あたりの実効チェレンコフ光検出面積は約3倍となるように高感度検出器を間隔を詰めて設置することで事象あたりの光電子信号数を確保し、エネルギー閾値の大幅な増大や事象再構築精度の低下を避けることができる。

3.2 角度分解能向上によるニュートリノ天体同定

検出器が大きくなるということが、単純に8×IceCubeを意味するわけではない。異なる光検出器の配置により異なる感度特性を持つ検出器が建設される。大型化のメリットの一つとして重要な特徴は、検出器体積の拡張により検出器内を横断する飛跡の長さが伸びることによる角度分解能の向上である。図4はシミュレーション研究による横向きミュオン事象の角度再構築精度の向上を示す。IceCubeでミュオン事象の再構築精度では大きな到来方依存性はなく約0.5度程度であった。角度分解能の向上は対応天体の同定可能性が上がるのと同時にニュートリノ天体探査における背景事象数の減少を可能とする。これに検出器体積の増大による断面積の拡大の効果を加えたものがミュオンニュートリノ観測における感度向上となる。例えばTXS0506+056方向からのミュオンニュートリノ事象の解析では、2014年から2015年にかけてニュートリノ流量が158

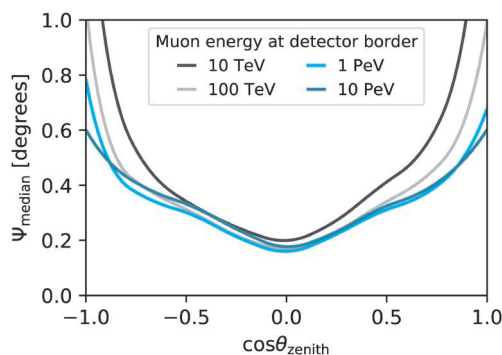


図4 IceCube-Gen2によるミュオントラック事象再構築精度の到来角依存性。横軸は天頂角のコサイン、縦軸は角度決定誤差である。

日にわたって増大しているという現象を観測した[14]。この時期に観測されたニュートリノは13±5事象が3.5σの有意度で観測されたが、Gen2で同じ現象が観測されれば、38事象の、より角度分解能のよいミュオンニュートリノとして、5σを超える有意度で観測されることが期待できる。

IceCube実験で観測された宇宙背景ニュートリノ放射の大部分がある一つの数密度を持つ天体由来であると仮定すると、数密度と個々の天体から放射される平均的なニュートリノルミノシティとを関連付けることができる。図5に示したのは、さまざまなクラスの天体をその数密度とニュートリノ放射の明るさ（ニュートリノルミノシティ）の平面上にプロットしたものである。背景放射流量は数密度とルミノシティの掛け算で決まる。流量観測データから期待できる領域が灰色のベルトである。これに対し、IceCube実験によるニュートリノ天体探査解析から得られた制限からもニュートリノルミノシティに対しての制限が得られ、これが同図では水色領域で示されている。灰色のベルトの領域のうち、低密度・高ニュートリノルミノシティ領域から制限がついていることが分かる。一方、星印で示されているのがそれぞれの天体クラスの典型的な光度であり、ニュートリノルミノシティと光度が近い値であると仮定すると密度の低いBlazarやGRBに相当する光度に制限がついていることに相当する。青色のバンドで示すGen2のニュートリノ天体探査感度は、ニュートリノ放射天体候補の多くの光度に相当するニュートリノルミノシティに対し感度を持つことを示している。

3.3 粒子シャワー情報による新たな天体物理

ニュートリノのフレーバー情報は今後ニュートリノ天文学を新しい方向に導く可能性がある。ニュートリノ起因のミュオン信号はほぼミュオンニュートリノの荷電カレント相互作用 (W^\pm ボゾンの交換による弱相互作用) によって生成されるものである。これに対しニュートリノ起因の

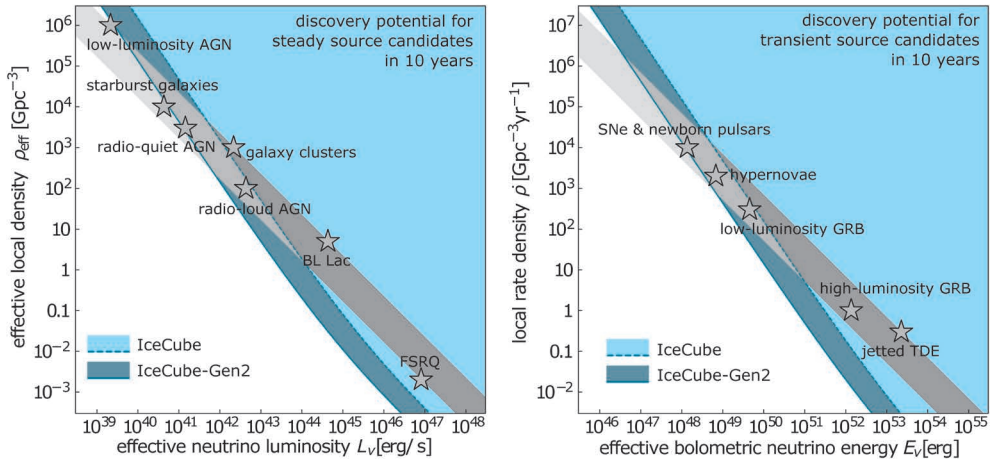


図5 ニュートリノ定常(左)及び突発放出天体(右)の局所密度分布及びニュートリノルミノシティに対するIceCubeで得られた制限(水色領域)とGen2で期待される感度(青領域). 横軸は理論的に期待されるニュートリノルミノシティ, 縦軸は数密度である. 灰色のバンドは背景宇宙ニュートリノ流量から期待されるパラメーター領域を表している.

粒子シャワー事象はすべてのフレーバーの中性カレント相互作用 (Z_0 ボゾンの交換による弱相互作用), 電子及びタウニュートリノの荷電カレント相互作用による生成に加え, 6.3 PeV 付近のニュートリノに感度を持つ反電子ニュートリノのグラシヨウ共鳴 (反電子ニュートリノと電子の衝突の仕方の1種. 断面積が W ボゾンの質量に相当するエネルギーでピークを持つ) からの寄与がある. IceCubeではこれまでに2事象のタウニュートリノ候補事象及び1事象のグラシヨウ共鳴の特徴を持つ事象を観測してきた. 粒子シャワー事象の観測感度はほぼ検出器体積に比例して増大するため, Gen2では統計的に解析可能となる量のフレーバー同定事象検出が可能となる. また, タウニュートリノ事象と電子ニュートリノ事象の区別に向けた, ハドロンシャワーの識別手法も新たな試みとして進められており, ニュートリノ放射分布に新たな尺度をもたらす可能性がある. 宇宙論的な距離を伝搬する宇宙ニュートリノは, 遠方宇宙における素粒子標準模型の試験粒子としての役割も果たす.

さらには, ニュートリノ起因の粒子シャワーは

ニュートリノ突発天体探査で重要な役割を果たしうる. ニュートリノ突発天体探査では角度分解能が悪くても大気ニュートリノ雑音事象を抑えることができるため, 天体同定に重要な統計量に寄与することが可能であるからである. 特に, ガンマ線バーストのように電磁情報で選択された事象からニュートリノが来ているかどうかを確かめるためには, トラックと粒子シャワーという多くのニュートリノを用いた統合解析により強い制限をつけることができる. また, エネルギー分解能が高いシャワー粒子事象はその再構築エネルギーを宇宙ニュートリノらしさの指標として考えることができる.

3.4 マルチプレット信号—より効率的な天体同定目指して

ニュートリノのメッセンジャーとしての特徴は遠方からそのエネルギーを失わずに届くという点にある. $z=2$ 程度までの天体が, IceCubeで観測された宇宙ニュートリノ背景放射に寄与していることが分かっている [15]. 遠方の天体から期待されるニュートリノ検出の数は1よりも遥かに小さいが, 天体の莫大な数を考えればそのような遠方

からのニュートリノを検出することが確率的に高くなるためである。エディントンバイアスと呼ばれる効果である [16]。この状況では、数密度の高い天体種は電磁波観測対応による同定が難しい。有効な方法の一つは、近隣の天体から放射されたことが分かるようなニュートリノ検出を行うことである。複数のニュートリノが角度及び時間相関を持って到来する事象をマルチプレット事象と呼ぶ。一つの天体から2個以上、3個以上のニュートリノ観測を要求することで、IceCubeにおける1以上の事象期待値に相当するニュートリノ流量を放出していること、つまり比較的近傍にある天体からの事象を選択することが可能となる。こうした事象を引き起こした天体の距離の確率分布は計算できるため、この分布と矛盾しない、近傍天体のフレア、または突発現象を探索する。このようにして対応天体候補数を絞ることができる。

マルチプレット信号を検出するには統計量の増大が必須である。IceCube実験の8倍の容量を持つGen2では、意味のあるマルチプレット信号探索感度を達成できることが期待できる。この信号探索アルゴリズムの開発は、近い将来の大きなテーマの一つである。

4. 最後 に

1970年代から議論されてきた高エネルギーニュートリノ天文学は、IceCube実験によって2010年代について観測科学の仲間入りを果たした。本稿では、宇宙線物理から素粒子物理にわたる幅広い領域の進展の中で、特に天文学的な成果に絞ってその概観を解説してきた。天文学としては後発分野であるが、近年に大きな発見があった。ただ何よりも本質的な疑問である、ニュートリノ放射をつかさどる天体の多数派はどこにありどのような種類に属するのか、という問いにはまだ答えられていない。ニュートリノ天文学の方向性はIceCube実験によって示されたが、疑問に対する解は将来計画IceCube-Gen2によって与えら

れるだろう。探査手法や検出器開発において、これからも多くの進展が求められている。本稿の後半で紹介したGen2計画では、ニュートリノ宇宙探査の主役として、マルチメッセンジャー天文学の大きな一翼を担うことを期待している。

参考文献

- [1] Aartsen, M.G., et al., 2017, JINST, 12, P03012
- [2] Murase, K., et al., 2014, Phys. Rev. D, 90, 023007
- [3] Murase, K., & Waxman, E., 2016, Phys. Rev. D, 94, 103006
- [4] Fang, K., & Murase, K., 2018, Nature Phys., 14, 396
- [5] Aartsen, M.G., et al., 2020, Phys. Rev. Lett., 124, 051103
- [6] Aartsen, M.G., et al., 2018, Science, 361, eaat1378
- [7] Aartsen, M.G., et al., 2016, ApJ, 824, 115
- [8] Aartsen, M.G., et al., 2019, Phys. Rev. Lett., 122, 051102
- [9] Aartsen, M.G., et al., 2016, ApJ, 816, 75
- [10] Aartsen, M.G., et al., 2017, Astropart. Phys., 92, 30
- [11] Aartsen, M.G., et al., 2015, Phys. Rev. Lett., 114, 171102
- [12] Aartsen, M.G., et al., 2015, Phys. Rev. D, 91, 022001
- [13] Ishihara, A., 2020, PoS, ICRC2019, 1031
- [14] Aartsen, M.G., et al., 2018, Science, 361, 147
- [15] Yoshida, S., & Ishihara, A., 2012, Phys. Rev. D, 85, 063002
- [16] Strotjohann, N. L., et al., 2019, A&A, 622, L9

High Energy Neutrino Astronomy driven by IceCube Neutrino Observatory

Aya ISHIHARA^{1,2} and Shigeru YOSHIDA^{1,2}

¹ Institute for Global Prominent Research, Chiba University, 1-33 Yayoicho, Inage-ku, Chiba, Chiba 263-8522, Japan

² Graduate School of Science, Department of Physics, Chiba University, 1-33 Yayoicho, Inage-ku, Chiba, Chiba 263-8522, Japan

Abstract: The neutrino measurements with the IceCube Neutrino Observatory have brought us new insights on high energy radiation from the universe and the underlying physics that drives the extreme phenomena in our cosmos. We review the recent results obtained by IceCube with a focus on the astronomical aspects. We also discuss the prospective developments of the neutrino astronomy by the IceCube-Gen2, the post-IceCube observatory.