

IceCube 実験による銀河面ニュートリノ放射の世界初観測

倉橋 Neilson 尚子 〈Drexel 大学 nn344@drexel.edu〉

石原 安野 〈千葉大学国際高等研究基幹・ハドロン宇宙国際研究センター aya@hepburn.s.chiba-u.ac.jp〉

美しい夜空の象徴ともいえる天の川。我々の太陽系が属し、1,000 億個を超える恒星を擁する天の川銀河はその美しさのみならず、豊かな科学の対象としても人類を魅了してきた。これまで人類が観測してきた数多くの銀河の中で最も身近な存在であり、電波、可視光やX線といった様々な波長の電磁波で観察され続けている。

2023 年、我々国際共同研究チームは、南極点にある **IceCube (アイスキューブ) ニュートリノ望遠鏡** による天の川銀河から放射される高エネルギーニュートリノ観測に成功した。**マルチメッセンジャー観測**は、電磁波観測に加え、重力波やニュートリノといった新たな観測手段を組み合わせることで、天文現象のより深い理解を目指す。今、天の川銀河のマルチメッセンジャー観測が新しいフェーズを迎えている。

銀河系宇宙線の多くは高エネルギーまで加速された陽子である。電荷を持ちその軌道が星間磁場で曲げられる宇宙線は、到来方向観測による発生源の特定が困難だ。そのため宇宙線のみの観測からでは、宇宙線が銀河内のどこで生成され、どのように拡散していくのか、といった基本的な疑問に答えることができない。

一方、宇宙線は、銀河系内の伝搬時にガス等の星間物質や天体内外の光子と衝突することでパイオンを生成し、そのパイオンの崩壊からニュートリノやガンマ線を生成する。

中性パイオン起源の銀河系内ガンマ線はこれまでも衛星や地上のガンマ線望遠鏡により観測されてきた。ただし、同様のエネルギー帯のガンマ線は、電子の運動によっても生成され、また、天体内外の光子場や物質との相互作用による減衰も起こり得る。このため、宇宙線起源の中性パイオンがどこにどの程度存在するのかについては不定性が残っていた。

荷電パイオンの崩壊によって生成される「高エネルギーニュートリノ」は、物質を通過し銀河の深部まで死角がなく、生成機構不定性も小さい素粒子であり、これまで得られなかった重要な情報をもたらす。つまり、ガンマ線によって得られた知見と、新たに高エネルギーニュートリノによってもたらされる情報とを組み合わせることで、より信頼度の高い系内宇宙線のエネルギースペクトルやその位置依存性の推定が期待できる。

南極点にある高エネルギー宇宙ニュートリノ望遠鏡 IceCube は1ギガトン容量の深氷河をチェレンコフ光媒体とする世界初の高エネルギー宇宙ニュートリノ観測装置だ。2011 年より、完成した検出器での観測を開始した IceCube 望遠鏡であるが、その宇宙ニュートリノ観測の中心となるエネルギー帯は、系外宇宙線起源解明に適した 10^{13} eV (=10 TeV) から 10^{16} eV (=10 PeV) といった領域である。これまでに高エネルギー宇宙ニュートリノ発生天体として銀河系外にある二つの活動銀河核の同定に成功している。

天の川銀河放射面の多くは IceCube ニュートリノ望遠鏡のエネルギー閾値が高い南天に属する上に、期待されるニュートリノのエネルギーはこれまで観測されてきた系外宇宙線起源ニュートリノよりも低い。しかし、IceCube 実験は、以前は銀河面観測には不向きと考えられていた観測チャンネルを使用する新たな解析手法を開発し、1 TeV から 10 TeV 領域の感度を大幅に向上させることで、世界初の銀河面からのニュートリノの観測へとつながった。

光では観測が難しい宇宙線の相互作用の現場をより直接的に映し出すことを可能とするニュートリノ。その観測の成功により、銀河内に分布する宇宙線の理解への新たな道が開けた。

用語解説

ニュートリノ天文学：

ニュートリノは電荷を持たず弱い相互作用のみ反応する素粒子であり、発生天体からまっすぐに飛んでくると共に、その生成機構はシンプルでモデル化しやすい。つまり、生成の現場である高エネルギー天体の情報を得やすい。ニュートリノ天文学では宇宙ニュートリノがもたらす情報を用いて天文現象を解明する。

IceCube ニュートリノ望遠鏡：

南極点深氷河にチェレンコフ光検出器を埋設しニュートリノを観測する巨大検出器。光検出器は南極点の氷河の 1.45 km から 2.45 km の深さに、1 km³ の容量にわたり埋設されている。その巨大さゆえ 10^{12} eV (=1 TeV) から 10^{16} eV (=10 PeV) を超えるエネルギーの宇宙ニュートリノにまで感度を持つ。2013 年に高エネルギー宇宙ニュートリノを発見し、恒常的な観測を続けている。



IceCube 望遠鏡のコントロールセンターの前に立つ南極点越冬隊員。背後にオーロラと天の川銀河が見える。Credit: Josh Veitch-Michaelis, IceCube/NSF

マルチメッセンジャー観測：

長い歴史を持つ電磁波観測に、重力波やニュートリノといった近年大きく発展している新たな観測手段を組み合わせることで、天文現象のより深い理解を目指す。

1. なぜ銀河面からのニュートリノなのか

古代より天文学には可視光が用いられてきた。何といってもその波長の光が人間の目に捉えられるのであるから当然である。その初期天文学の時代においても、そしてまた現在も、天の川は夜空に現れる最大の特徴の一つであり、何千年もの間、人類の科学的好奇心を刺激し続けている。古代バビロニアの詩にも登場する天の川は、ギリシャの学者たちによって偉大な“ミルクの円”と呼ばれ、17世紀にガリレオが望遠鏡で観察すると、天の川は重なり合うように分布した無数の星の集合であることが明らかになった。望遠鏡を通して見る夜空には、肉眼では見ることでできない星が数多く存在していた。多波長天文学が進展する現代においても、電波からガンマ線までの様々な波長で天の川を観測し理解することは、重要な科学目標であり続けている。

このように長い歴史を持つ人類の天の川観測であるが、これまでは電磁波のみが用いられてきた。銀河面からの可視光での放射画像を図1(A)に、Fermi望遠鏡¹⁾によって観測された1 GeV以上のガンマ線の積分流量の分布を図1(B)に示す。高画像の可視光写真では、吸収するガスと塵の雲に光の一部が遮られていることが見て取れる。そして、ガンマ線の分布図からは、一見、静的に見える銀河でも、その内部では電子や陽子といった粒子が運動し、放射を起こすことで、高エネルギー帯においても明るく輝いているということがわかる。

一方、地球には宇宙空間から高いエネルギーを持った宇宙線が降り注いでいる。²⁾ 宇宙線のスペクトルは 10^{20} eVと

いう人類の観測史上最も高いエネルギー領域にまで伸びる。そのうちエネルギーが $10^{15} \sim 10^{16}$ eV程度までの宇宙線（主に陽子）は、銀河系内に星間磁場により閉じ込められたものが観測されているということが、理論的にも、近年の高エネルギーガンマ線の観測からも^{3,4)} 強く示唆されている。このような宇宙線は地球に届いたときには到来方向の情報をほとんど失っておりランダムな方向から到来するように観測される。つまり、大量の宇宙線が地上で観測されているにもかかわらず、宇宙線が銀河のどこから来たのかという情報は失われている。我々の銀河の主要な構成要素の一つである宇宙線であるが、宇宙線の観測のみからでは地上で観測されている宇宙線の内のどれくらいが銀河系内起源であるのか、それらが、どこに、どれだけ分布しているかを調べることは難しい。

宇宙線が銀河系内でどのような分布を持つのかを調べる方法の一つが、宇宙線がつくる二次生成粒子の観測である。星間空間は何もない空間ではない。星の光はもちろん、新たな星を作る材料である星間ガスなどで満たされている。そのような空間を宇宙線が伝搬する時、高いエネルギーを持つ宇宙線陽子は、星間ガスと衝突、核反応を起こし二次粒子を生成する。このとき生成される中性パイオンは、ガンマ線に崩壊し、また、荷電パイオンは崩壊するとニュートリノを作る。したがって二次粒子の観測から宇宙線の分布に焼き直すことで、宇宙線についての知見を得ることが可能となる。宇宙線起源のガンマ線はこれまでに衛星や地上のガンマ線望遠鏡により観測されてきた。ただし、同様のエネルギー帯のガンマ線は電子の運動に伴う制動放射や

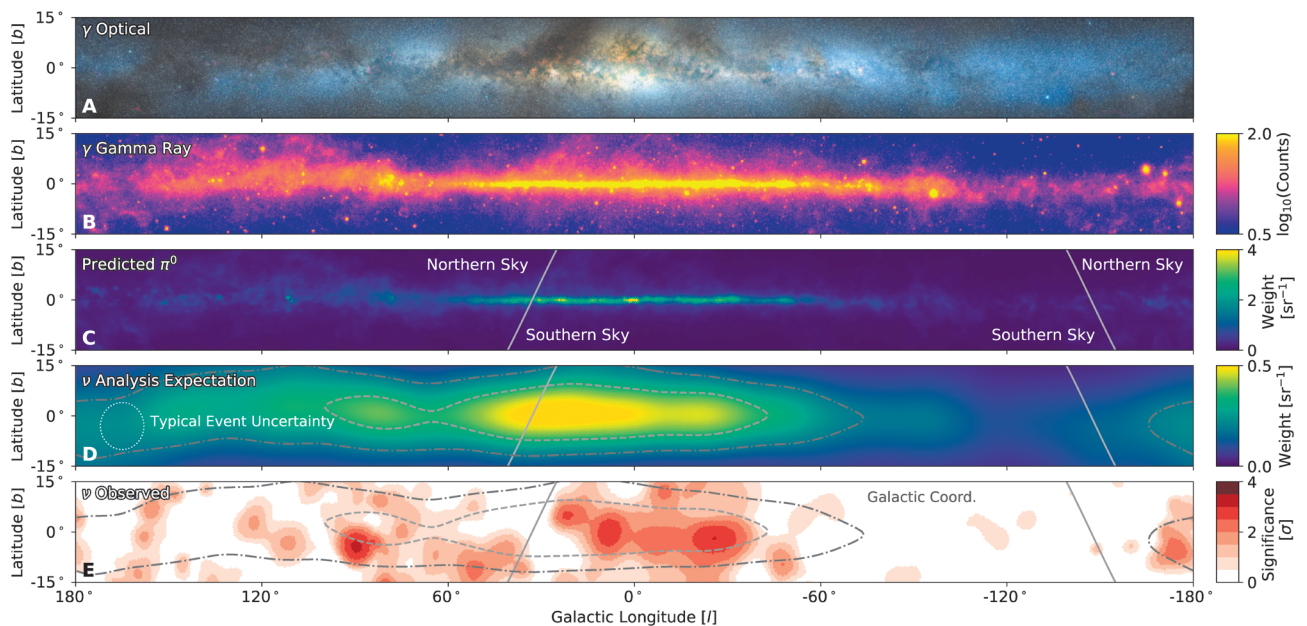


図1 光とニュートリノの観測による天の川銀河の平面分布。全て銀河座標で描かれており、原点は銀河中心にある。緯度 $\pm 15^\circ$ および経度 $\pm 180^\circ$ の範囲を表している。文献6より転載。(A) 光学的カラー画像[クレジット: A. Mellinger]。(B) 1 GeVよりも高いエネルギーのFermi Large Area Telescope (Fermi-LAT) ガンマ線の12年間データによる積分流量。¹⁾ (C) (B)のガンマ線によって推定された中性パイオン分布が高エネルギーまで外挿できるものとして見積もった銀河面ニュートリノ分布。(D) ニュートリノ放射モデルに検出器の感度と角度分解能(約 7° , 白い点線円で表す)を組み入れたもの。等高線は、予測されるニュートリノ信号の20%および50%を含む領域を示す。(E) IceCube実験によるニュートリノ観測の有意度地図。等高線は(D)と同じもの。(C)-(E)の灰色の線は、IceCube検出器からみた時の南天北天の境を表す。

逆コンプトン放射によっても生成され、また、高エネルギー帯では、宇宙背景放射や天体内外の光子場との相互作用による電子・陽電子対生成減衰も起こり得る。このため、宇宙線起源の中性パイオンが銀河内のどこにどの程度存在するのかについての不定性の減少を目指し新たな観測手段が求められてきた。

もう一方の二次生成粒子である高エネルギーニュートリノは、その起源が宇宙線の相互作用によって生成されたパイオンの崩壊に限られており、その親粒子である宇宙線の情報をより直接的に抽出することが可能である。また、弱い相互作用のみをうけるニュートリノは銀河系内に分布するガスなどの物質や光子場も容易く通過し死角となる部分がない。つまり、ニュートリノは天の川で起こる高エネルギー相互作用をより深くまで見通す手段となる。ただし、これらの天文学的メッセンジャーとしてのメリットは、その検出の難しさと表裏一体であり、宇宙ニュートリノの高統計観測は巨大な観測装置を必要とする。異なる特徴を持つ「ニュートリノ」と「ガンマ線」観測。これらを組み合わせたマルチメッセンジャー天文学により、これまでは難しかった宇宙線相互作用の現場の同定およびその量の推定が期待できる。

他方、カミオカンデやスーパーカミオカンデ実験は、地球外ニュートリノとして太陽と超新星 1987A という 2 つの天文学的近傍源からのニュートリノを観測してきた。しかしどちらも、MeV 領域のエネルギーを持つニュートリノでの観測だ。本研究では、IceCube 実験により、TeV というさらに 6 桁ほど高いエネルギー領域のニュートリノによる銀河の観測に挑戦する。

2. IceCube ニュートリノ望遠鏡

IceCube 実験⁵⁾は、南極点の透明性の高い深氷河をチェレンコフ光媒体として利用し 1 立方キロメートルという検出器容量を達成した、2023 年現在、世界唯一の高エネルギーニュートリノ望遠鏡である。IceCube ニュートリノ検出器は、宇宙から飛来する高エネルギーニュートリノが、原子核や電子と相互作用し生成する二次荷電粒子が放つチェレンコフ光を、南極点直下の水中 1,450 m から 2,450 m の深さに三次元的に埋設されている光検出器配列により観測する。

その大きな容量は太陽ニュートリノや大気ニュートリノと比較して、量の少ない高エネルギー宇宙ニュートリノ観測に最適化されている。IceCube 検出器は、2004 年からその建設を開始し 2010 年 12 月にその建設を終了、完成した検出器での観測は 2011 年 5 月 13 日に開始した。その観測の開始からすでに 12 年が経っており、現在、2025 年建設予定の IceCube 実験のアップグレードに向けて準備が進んでいる。

3. 高エネルギー宇宙ニュートリノ信号

IceCube 実験では、1 TeV を超えるような高エネルギーのニュートリノ相互作用起因の二次粒子が作るチェレンコフ光を、氷河に縦 17 m 間隔、横 125 m 間隔で埋設された 5,160 個の光検出器から成る配列により記録する。記録された光のパターンは、大きく二種類に分けられる。

一つは、トラック事象と呼ばれる観測チャンネルで、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生成されるミューオンがその軌跡（トラック）に沿って放つチェレンコフ光によって同定される。IceCube 実験により、線状に分布するチェレンコフ光から再構築されるニュートリノの角度分解能は、エネルギーや氷の条件にもよるが $0.5^\circ \sim 1^\circ$ 程度である。

もう一つは、粒子シャワー事象と呼ばれる観測チャンネルである。電子型およびタウ型ニュートリノが荷電カレント反応を起こすか、三種のニュートリノが中性カレント反応を起こすかで作られた電子や中間子が、さらに氷河中の核子・電子と相互作用し多数の二次粒子を生み出すカスケード（粒子シャワー）現象を起こす。その粒子シャワー中の粒子が放出するチェレンコフ光を観測する。この粒子シャワーの大きさに比べ、光検出器の埋設間隔が大きいため、IceCube 実験では粒子シャワーは点源に見える。この点源から、チェレンコフ光が水中の光速 ($v = 2.19 \times 10^8$ m/s) で伝搬し、球形の光の分布として観測される。荷電カレント反応の断面積は、中性カレント反応のものよりも大きいので、粒子シャワー信号を作るニュートリノは電子型、タウ型が格段に多い。この粒子シャワー事象の観測はフレーバーと呼ばれるニュートリノの種類の比率を推定する手がかりを与えてくれる。カスケード発生点は検出器内となるため有効検出容量はトラック事象のものより小さい。粒子シャワー事象では、エネルギーの大部分が検出器内部に放出されるので、ニュートリノのエネルギーの推定はトラック事象よりも高精度で決定できるが、到来方向の角度分解能は $10^\circ \sim 15^\circ$ 程度である。

これまで IceCube 実験ではニュートリノ放出天体の探索解析においては、主にトラック事象を使用してきた。前述の通りトラック事象の方が、角度分解能がはるかに優れているためだ。結局のところ、天文学の基盤はなんと言ってもポインティング（天体の位置を特定すること）だ。

4. 宇宙ニュートリノと背景事象

天の川は近くて大きい天体だ。にもかかわらず、これまで IceCube 実験は銀河面ニュートリノの観測には成功してこなかった。なぜか。その理由は大量の背景事象の存在にある。

地球には宇宙線が常に降り注いでいることはすでに述べた。これらが大気中の原子と衝突するとパイオンやケイオンが生成され、その崩壊により高エネルギーの大気ミューオンや大気ニュートリノが生成される。高いエネルギーを

持つミューオンはそのエネルギーを失うまでに地中を数十キロにわたり伝搬することが可能である。ニュートリノに至ってはPeVエネルギー以下であれば地球を丸々通り抜けることが可能だ。これら大気起因の背景事象が氷河中に埋設された検出器の深さ1.5 kmから2.5 kmにまでたどり着き、宇宙ニュートリノ信号を覆い隠してしまう。背景事象数は莫大だ。一つの宇宙ニュートリノ事象の観測に対しIceCube実験では、検出器のトリガーレベルで、 10^9 個もの大気ミューオンと 10^3 個の大気ニュートリノを背景事象として取り除かないとならない。正確な除去能力が必要なのである。

大気ミューオン背景事象除去の手法としては一般に、トラック事象のうち南天方向から飛来する、つまり南極点にあるIceCube実験から見て下向きのトラック一天頂角で $0^\circ \sim 85^\circ$ の間にある一事象を除去することでニュートリノ事象を抽出する。つまり、地球をフィルターとして利用するのだ。しかし、天の川のように、南半球にある天体からのニュートリノを観測するときにはこの手法を使うことは難しい。フィルターの役割を果たす地球が存在しないため、大量のミューオンが天の川方向からやってくる。

それではどのような手法であれば銀河面起因のニュートリノと背景事象とを区別することが可能になるのだろうか。トラック事象ではなく粒子シャワー事象チャンネルを利用することで得られるメリットに気が付いたのは2017年頃であった。トラック事象が提供する鮮明な画像を、粒子シャワー事象のぼやけた画像と交換することにはなるが、その代わり背景事象を大幅に削減できるのではないかと考えたのだ。

まずは大気ミューオン事象を方向情報を用いることなく除去をしなくてはならない。これは粒子シャワー事象を信号として選択することで達成できる。もちろん実際には、 10^9 倍も頻度が多い大気ミューオンのすべてを除去することは不可能であり、誤ってシャワー事象と認識されたミューオンがサンプルの中に残ることも当然ある。しかし、初期段階で大幅なミューオン背景事象の除去が達成できることは大きなアドバンテージだ。

次に、大気ニュートリノの除去においては、ニュートリノのフレーバーが重要な役割を果たす。生成段階でどのようなフレーバー比を持っていようとも、天体由来のニュートリノは遠方宇宙から伝搬してくる間のニュートリノ振動により、三種類のニュートリノがほぼ同じ割合で地球にやってくることになる。一方、TeVエネルギー領域の大気ニュートリノはミュー型ニュートリノが電子ニュートリノの20倍以上と圧倒的に多い。²⁾ 生成時にはタウ型ニュートリノは大気ニュートリノには含まれない。つまり、トラック事象を除去することで大気ニュートリノ事象の大部分を除去することができるのである。

三番目の要因が、大気ニュートリノに伴う大気ミューオンの存在だ。大気で作られるニュートリノとミューオンは

どちらも宇宙線が大気で空気シャワーを起こし、その中のパイオンやケイオンの崩壊によって生成される。IceCube検出器では同じ空気シャワーで作られる一つの事象としてとらえられるのだ。つまり、大気ミューオン事象を除去するときに、実は大気ニュートリノ事象も同時に除去されている。⁷⁾ この効果によって電子型大気ニュートリノも除去することができる。

5. 銀河面からのニュートリノ放射の証拠

南天からの信号に対して、各段に高い背景事象の除去率を達成できる粒子シャワー事象であるが、角度分解能は大幅に低下する。それが有利に転じるような観測対象とはどのようなものであろうか。視野がぼやけてくると見えてくるのは最も大きな特徴だ。天空の場合、それが天の川銀河である。図1(C)に期待される銀河面ニュートリノの分布を示し、図1(D)に検出器のシャワー事象に対する角度分解能を考慮に入れた信号分布テンプレートを示す。

著者(倉橋)のグループは、2011年から2021年までの10年分のIceCubeデータを用い銀河面からのニュートリノ探査を行った。そして、その結果銀河面からニュートリノが 4.7σ の有意度で観測されたのである。この有意度は、角度情報をランダム化した観測データを用いて均一な背景事象分布を模擬実験により再現し、実験データから得られた結果と比較することで計算している。今回の解析では、3種類のテンプレートに対して有意度検定を行ったため試行因子を3とし、最終的な有意度は 4.5σ である。図1(E)にニュートリノ放射の有意度地図を示す。銀河地図上で視覚的に点光源のように見える場所があるとしても、これまでのところは統計的な有意度が不足しているため、それを点光源として観測したと主張するには十分な根拠がない。したがって、現在の段階では、点源からの放射ではなく、銀河面からの拡散ニュートリノ放射、つまり銀河系内で宇宙線が伝搬する際にガスなどの物質と衝突し生成されるニュートリノ成分のみが統計的に有意な観測結果として主張できる状況であることに注意してほしい。

IceCube実験による観測の結果を最もよく説明するよう、スペクトルの形状は変えずにそのニュートリノ信号事象量を変化させたときの、各銀河面ニュートリノモデル流量を図2に示す。解析に使用した信号モデルの一つであるFermi「 π^0 」モデルは、Fermi望遠鏡による銀河面ガンマ線観測¹⁾において推定された中性パイオン成分が高エネルギー領域まで分布すると仮定し、同様の分布の荷電パイオンからのニュートリノ放射を考える。銀河面全体に宇宙線が一様に分布するモデルである(図1(C))。もう一つの「 KRA_γ 」モデルは、同じFermi望遠鏡による銀河面ガンマ線観測¹⁾を基にしているが、銀河内の宇宙線源の分布と放射スペクトル、星間媒質内での宇宙線拡散特性、および標的ガスの空間分布が異なる。 KRA_γ モデルは、空間領域ごとに変化するスペクトルを持ち、平均的に π^0 モデルと比較

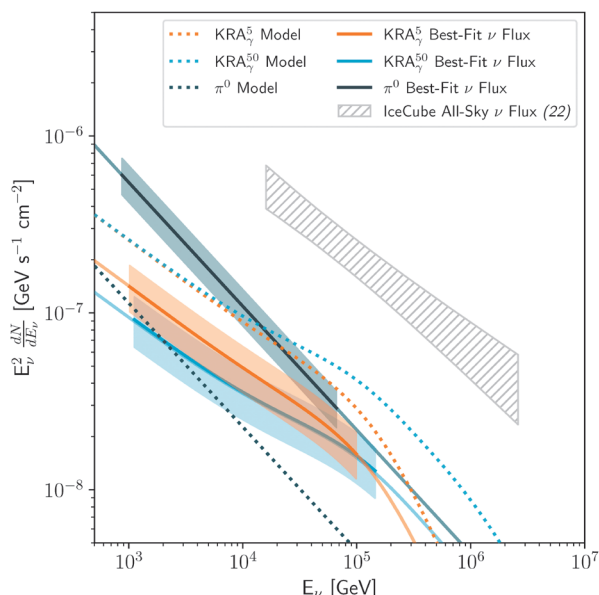


図2 銀河面ニュートリノモデルを点線で示すと共に、そのスペクトルの形状は変えずにIceCube実験による観測の結果を最もよく説明するよう信号量を変化させた銀河面ニュートリノの流量を実線で示す。また、IceCube実験による全天からの背景放射宇宙ニュートリノの流量 (IceCube All-Sky ν Flux) も比較のため載せている。文献6より転載。

してニュートリノスペクトルの傾きが緩やか（ハード）で、高エネルギー成分が多い。このモデルにおける宇宙線スペクトルは上限エネルギーであるカットオフを持ち、 KRA_γ^5 モデルと KRA_γ^{50} モデルはそれぞれ、5 PeV および 50 PeV の宇宙線エネルギーカットオフに対応する。図2に示すように、二つのモデルは数万 GeV までは共通のニュートリノスペクトルを持つが、高エネルギー領域における分布が異なる。

6. 銀河ニュートリノの起源解明へ

本解析は世界初の銀河面からのニュートリノの発見を目指したものであり、銀河面ニュートリノ放射モデルを限定して有意度検定を行うことで解析を簡素化することを目指した。それにより銀河面からのニュートリノ放射の存在が確かめられたことで、現在はさらに銀河内のニュートリノ放射に関するより高度な問いに答えるための研究を進めている。問いの具体的な例としては、ニュートリノ放射のより詳細な位置依存性、観測した銀河面ニュートリノのうち、ニュートリノ点源からの寄与はどれほどで、我々の銀河ではどの天体がニュートリノで最も明るいのか、それらの天体はどのようなスペクトルを持つのか、といったものがある。様々な興味深い問いがある一方で、これまでに説明したように、南極点にあるIceCube実験によって、南天に横たわる天の川の中にあるニュートリノ放射天体観測の高精

度を達成することは、容易ではないということもまた事実である。この問題に満足できる答えを見つけるためには、KM3Net⁸⁾のような北半球の検出器が必要だという可能性もある。

銀河系内ニュートリノ天文学はまさに今始まったばかりである。IceCubeによって観測されている高エネルギーニュートリノの成分を理解するには、銀河系内ニュートリノ天文学、銀河系外ニュートリノ天文学、そしてさらにエネルギーの高い領域で期待される極超高エネルギーニュートリノ天文学といった異なるテーマそれぞれに最適化した解析の深化が求められる。新たな発見により宇宙ニュートリノについての理解が進むことでまた、新たな課題が浮かび上がってくるという現在の状況は、急速に発展している分野の副産物ともいえる。今後もニュートリノ天文学は、困難な課題を我々に突き付けながら発展することでその可能性を広げていくに違いない。

参考文献

- 1) M. Ackermann et al., *Astrophys. J.* **750**, 3 (2012).
- 2) T. K. Gaisser, *Cosmic Rays and Particle Physics* (Cambridge Univ. Press, 1990).
- 3) Tibet AS γ Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 141101 (2021).
- 4) LHAASO Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 151001 (2023).
- 5) <https://icecube.wisc.edu>; M. G. Aartsen et al., *J. Instrum.* **12**, P03012 (2017).
- 6) IceCube Collaboration, *Science* **380**, 1338 (2023).
- 7) T. K. Gaisser et al., *Phys. Rev. D* **90**, 023009 (2014).
- 8) <https://www.km3net.org>

非会員著者の紹介

倉橋Neilson 尚子氏： 専門はニュートリノ天文学。IceCube実験の解析コーディネーター。日本生まれ、アメリカ育ち。3人の幼い子供の子育て中で、出張になかなか行けないのが悩み。

(2023年11月3日原稿受付)

High-Energy Neutrinos from the Galactic Plane

Naoko Kurahasi Neilson and Aya Ishihara

abstract: The Milky Way, the largest feature in the sky, has been studied by humans for millennia, always observed in light or other wavelengths of the electromagnetic spectrum. For the first time, the IceCube collaboration has observed the Milky Way in high energy neutrinos. The observation of our Galaxy comes after observations of extragalactic neutrinos. Galactic neutrinos are difficult to observe at IceCube for two reasons; most of the emission is in the Southern sky and has a softer energy spectrum. To overcome this, a novel analysis was developed. A feat of innovative data analysis by using data previously thought unusable provided a milestone observation in multi-messenger astronomy.