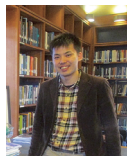


高エネルギー宇宙ニュートリノの起源と マルチメッセンジャー宇宙粒子物理学への展望



村瀬 孔大

ペンシルベニア州立大学物理学科・天文学科・
重力宇宙研究所粒子重力天体物理センター
murase@psu.edu

宇宙線はその発見以来、物理学の発展に多大な貢献をしてきた天恵ともいえる存在である。しかし、その起源に対する私たちの理解はこれまでもたらされた恵みに比べると乏しいものではないだろうか。

宇宙線は主に陽子や原子核イオンからなる荷電粒子であり、 10^9 eV 程度から 10^{20} eV 程度にわたる広いエネルギー領域で観測されている。特に 3×10^{18} eV を超えるような超高エネルギー宇宙線は、CERNにある地上最大の粒子加速器である Large Hadron Collider をも上回る強力な粒子加速天体が宇宙に存在することを示す。「宇宙線が宇宙のどこで作られているのか」といういわゆる「宇宙線の起源」問題は「荷電粒子の加速機構は何か」、「天体の非熱的放射機構は何か」、「宇宙素粒子を用いて未知の物理現象を探れるか」などの物理的諸問題と関連しながら、V. Hess による発見以来 100 年以上粒子天体物理学における主要な問題の一つとして議論されてきた。

高エネルギーニュートリノは宇宙線が天体周辺の物質や光と反応することで作られる。弱い相互作用のおかげで、ニュートリノ観測は光では見ることが難しい天体内部や遠方宇宙を調べることを可能にする。一方で、その透過性が諸刃の剣になり、ニュートリノ検出は荷電粒子や光子に比べて困難なものとなる。高エネルギーニュートリノ信号を捉えるには、スーパーカミオカンデなどよりも巨大な検出器が必要になるため、それを用いた粒子宇宙物理学は 50 年以上の間、夢物語のままであった。

その状況が 2012 年から 2013 年にかけて劇的に変わった。南極に建設された IceCube ニュートリノ観測所で 10^{15} eV に達するエネルギーを持つニュートリノが発見されたのだ。その後の観測で高エネルギーニュー

トリノが地球外からやってきていることは確実になり、見つかったニュートリノのエネルギーフラックスの大きさは

$$E_\nu^2 \Phi_\nu \sim 3 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

であることがわかった。これは銀河系外からの天体に対して理論で期待されていたフラックスにおおよそ一致する。しかし、個々のニュートリノ天体は未だ同定されておらず、その起源はわかっていない。

IceCube の発見によって、「高エネルギー宇宙ニュートリノの起源」という新しい謎が提起された。それだけではない。高エネルギーニュートリノが宇宙を探るメッセンジャーの一つとしてはっきりと加わり、マルチメッセンジャー宇宙粒子物理学が真の意味で可能になった。荷電粒子は宇宙空間にあまねく存在する磁場で曲げられてしまうため、その起源を明らかにすることは宇宙線観測だけでは容易ではない。イオン加速のスモッキングガンとなる高エネルギーニュートリノ、詳細観測が可能な光子の情報と組み合わせるのが理想的な戦略である。

我々は高エネルギー宇宙ニュートリノの起源天体についてマルチメッセンジャーデータを駆使して迫り、個々の天体モデルに依存しない新しい知見を得た。宇宙線がニュートリノを作るときガンマ線も同時に作られる。従って理論的には 3 つのメッセンジャーには密接な関係がある。興味深いことに、IceCube で観測されたニュートリノ背景放射フラックスはガンマ線背景放射や超高エネルギー宇宙線のフラックスと同程度である。このことはニュートリノ、ガンマ線、宇宙線の三者に深い繋がりがあることを示唆しており、高エネルギー宇宙粒子の起源について手がかりを与える。

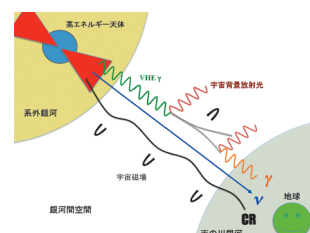
—Keywords—

IceCube ニュートリノ観測所：

南極の氷の中に作られ、2010 年に完成した世界最大のニュートリノ観測所。約 5,000 個の光電子増倍管が 86 本のストリングに沿って埋め込まれており、全体として約 1 km^3 の体積を有する。

系外ニュートリノ背景放射：

天の川銀河の外にある天体で作られたニュートリノフラックスを、宇宙全体にわたって足し上げたもの。慣習的に単位面積、時間、立体角、対数エネルギーあたりのエネルギー量として表すことが多く、ニュートリノ背景放射強度（もしくはフラックス）と呼ばれる。



マルチメッセンジャー宇宙粒子物理学の模式図。ニュートリノ観測、ガンマ線観測、宇宙線観測は相補的な役割を果たす。

1. はじめに

「光以外のメッセンジャーで宇宙を観る」, 電磁波だけでなく宇宙線, ニュートリノや重力波観測に基づいたマルチメッセンジャー宇宙物理学の時代が今まさに花開こうとしている. 2012年に報告されたIceCube ニュートリノ観測所による宇宙由来の高エネルギーニュートリノの発見, そして2016年2月に発表されたAdvanced LIGO 重力波検出器による重力波の直接検出の成功は, 私たちが宇宙を探求していく上で新しい段階に入ったことを如実に示すブレイクスルーといっているだろう.

ニュートリノ天体物理学の幕開けとなったのは, 言うまでもなく R. Davis Jr. 率いるホームステイク実験による太陽ニュートリノ検出と小柴先生率いるカミオカンデによる超新星ニュートリノの検出である.*¹ 超新星1987Aからのニュートリノ (10 MeV 程度) の検出により, 大質量星の最期においてニュートリノが重要な寄与をしていることが確かめられた. 2015年は日本人にとってまた嬉しいニュースが飛び込んできた. 大気ニュートリノ振動の観測によるニュートリノ質量の発見の業績でスーパーカミオカンデグループの梶田先生がノーベル物理学賞を受賞されたのである. 受賞が決まった際, 「ニュートリノに感謝したい. ニュートリノは宇宙線が作るもので, 宇宙線にも感謝したい.」とおっしゃっていたように, 大気ニュートリノを作っているのは宇宙から降り注ぐ宇宙線である. しかし感謝する相手が何者なのか我々は未だよく知らない. 比較的低エネルギーの宇宙線は超新星残骸 (ニュートリノが重要な役割を果たして爆発した超新星の成れの果て) によって作られていると広く信じられているが, 10^{17} eV を超えるような高エネルギー宇宙線の起源については有力な観測の手がかりも万人を納得させるに足る理論的定説も存在しない.

荷電粒子観測は宇宙線生成量, 非等方性, 化学組成などの重要な情報を一定量与えてくれる一方, 個々の宇宙線源を同定することは難しい. ガンマ線やX線の観測を含めた電磁観測は天体を詳細に調べることができる一方, 電子によって電磁放射は容易に作られるために宇宙線イオン加速の直接的証拠となるとは限らない. 高エネルギーニュートリノは陽子加速や原子核加速のスモークンガンとなるが, 検出そのものに困難がつきまとう.¹⁾ 従ってこれらの宇宙粒子 (場合によっては重力波も含めた) の検出を組み合わせた「マルチメッセンジャーアプローチ」が宇宙線加速天体の解明には望ましい. しかしながら, 観測の情報が増えた方がよいのは当たり前である. 理論を介して情報を有機的に結びつけることができ初めてマルチメッセンジャーデータは大きな意味を持つのであって, 根底にある理論が怪しければ得られる示唆の信頼性も下がる. 幸い宇宙線陽子や原子核が高エネルギーニュートリノとガンマ線

を作る場合, 3つのメッセンジャーには理論的に密接な関係が存在する. 本稿では, IceCube の発見によってもたらされた新しい謎, 「高エネルギー宇宙ニュートリノの起源」について解説するが, この発見が今まさに始まりつつあるマルチメッセンジャー宇宙粒子物理学にとっての重要な一歩へ繋がったことが伝われば幸いである.

2. 宇宙線, ニュートリノ, ガンマ線の関係

天体起源の高エネルギーニュートリノとガンマ線は, 高エネルギー宇宙線イオンが物質や光と相互作用することで生成される. 特に高エネルギーの非弾性 pp , $p\gamma$ 相互作用によってパイオンやケイオンなどの中間子が作られる. 弱い相互作用を介して荷電パイオンはミューオン型ニュートリノとミューオンに崩壊し, ミューオンはさらに2つのニュートリノと電子もしくは陽電子を放出する. いずれの過程においても, (中間子の冷却が無視できれば) ニュートリノのエネルギー ε_ν は陽子エネルギーの約3%から5%程度となる.

高エネルギー宇宙線と物質との反応 (主に非弾性 pp 反応) では多重パイオン生成が支配的となり, Feynmann スケーリングが近似的に成り立つ. 宇宙線スペクトルがベキ型であれば, ニュートリノとガンマ線のスペクトルもベキ型となる. また荷電パイオンと中性パイオンの生成比も2:1程度となる. 一方, 宇宙線と光の反応 (主に $p\gamma$ 反応) ではデルタ共鳴反応と荷電パイオンの直接生成反応が重要になることが多い. その条件は陽子のエネルギー (ε_p) と標的光子のエネルギー (ε_γ) に対して, $\varepsilon_p \varepsilon_\gamma \sim 0.2 \text{ GeV}^2$ で与えられ, 荷電パイオンと中性パイオンの生成比も1:1程度となることが知られている. ガンマ線バースト (GRB) や活動銀河核 (AGN) などの高エネルギー天体では多くの場合低エネルギー光子の数がずっと多いため, 高エネルギーの宇宙線は低エネルギーの光子とより効率よく反応することになる. 結果, ニュートリノやハドロン由来のガンマ線のスペクトルは標的光子のスペクトルに依存し, 中間子の冷却過程が重要でなければ, ニュートリノや生成ガンマ線のスペクトルのベキ指数はもとの宇宙線のスペクトルのベキ指数よりも小さいものとなる (スペクトルがよりハードになる).

天体起源のニュートリノ背景放射*²は宇宙線が作られた量 (スペクトルの情報を含む), 宇宙線が非弾性 pp もしくは $p\gamma$ 反応によって中間子を生成する効率, 起源天体の宇宙進化の具合で決まる. 3世代のニュートリノエネルギーフラックスの和について近似的に次のように書ける.

$$\sum_i (E_\nu^2 \Phi_{\nu_i}) \approx \frac{c t_H \xi_z}{4\pi} \frac{3K}{4(1+K)} \min[1, f_{\text{mes}}](E_p Q_{E_p}). \quad (1)$$

ここで $E_p Q_{E_p}$ は現在の宇宙 ($z=0$) で単位体積時間あたり作られた宇宙線のエネルギー量 (対数エネルギーあたり),

*¹ 余談であるが, 2002年に小柴先生がノーベル賞を受賞されたとき, 筆者はまだ学部生でちょうど物理学科に進学が決まった頃であり, それがニュートリノに関する研究を始める大きな契機となった.

*² その定義にはしばしば注意する必要があるが, ここでは宇宙全体にわたる天体ニュートリノの寄与の足し上げと考えてもらえばよい.

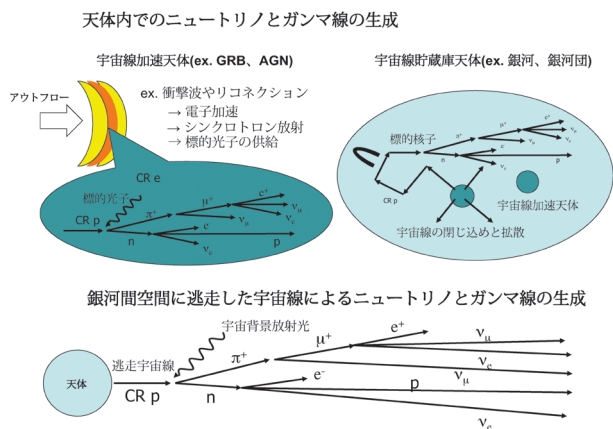


図1 天体内部及び外部で高エネルギー宇宙線が周囲の物質や光子と相互作用し、ニュートリノとハドロン由来のガンマ線を作ることを示す概念図。

f_{mes} は中間子生成効率, ξ_z は宇宙進化の効果であり, K は pp では $K=1$, pp では $K=2$ となる近似的定数である。

中間子生成効率は一般に天体やモデルに依存し, これを可能な限り正確に(観測との比較に耐えうるように)計算することが主要な理論的命題の一つとなる。種々ある可能性のうち, 最も著名なものは cosmogenic ニュートリノと呼ばれるものであろう。^{2,3)} 超高エネルギー宇宙線陽子が銀河間空間を伝搬中に宇宙マイクロ波背景放射と pp 反応するとニュートリノが作られる(図1参照)。典型的なニュートリノのエネルギーは $\text{EeV} = 10^{18} \text{ eV}$ 程度である。

もちろん天体内部でもニュートリノやガンマ線が作られる。例えば, 超新星残骸からのガンマ線は宇宙線イオンと周囲の物質との pp 反応で作られたガンマ線によってよく説明される。一方, GRB や AGN などの系外高エネルギー天体は非常に光度が大きいため, 加速されたイオンと電子由来の非熱的光子との $p\gamma$ 反応が重要になってくる。多波長電磁観測によって光子スペクトルが観測されていれば, 理論的にニュートリノやガンマ線のスペクトルを計算でき, GRB の場合は典型的に $\text{PeV} = 10^{15} \text{ eV}$ 程度のニュートリノ放射,⁴⁾ プレーザー^{*3} と呼ばれるタイプの AGN では PeV から EeV のニュートリノ放射⁵⁾ が予言される。

ニュートリノやガンマ線を放射している天体が宇宙線を加速している天体である必要は全くない。むしろ, そういった高エネルギー放射は銀河や銀河間空間など宇宙線加速器の外でも自然に作られる。例えば我々が住む天の川銀河や近傍の星形成銀河では, 超新星残骸や AGN などの「宇宙線加速天体」から逃走した宇宙線が銀河を伝搬する間に星間物質と pp 反応を起こしてガンマ線を作り, それが Fermi 衛星などのガンマ線望遠鏡によって実際に観測されている。同様に遠方の星形成銀河や銀河団・銀河群でもニュートリノやガンマ線が作られているはずである。特にスターバースト銀河や銀河団・銀河群では宇宙線の閉じ込め時間が十分長くなるため, 天体そのものを巨大な宇宙線

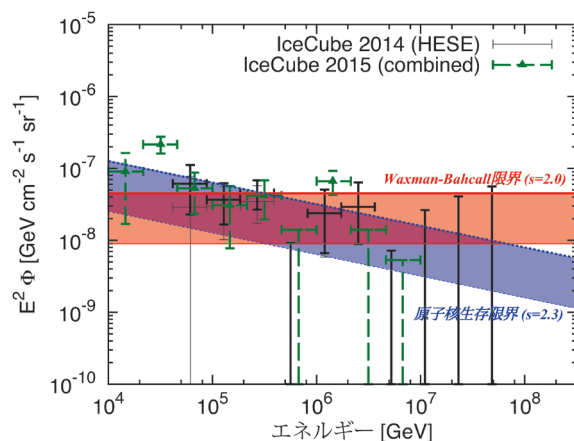


図2 ニュートリノ背景放射に対する Waxman-Bahcall 限界 ($s=2.0$) と原子核生存限界 ($s=2.3$)。IceCube で観測されたニュートリノフラックス (HESE 3 年のデータを示した) と同程度であることがわかる。図には HESE データ¹⁶⁾ だけでなく種々のデータを組み合わせた解析によるデータも示した。²²⁾

貯蔵庫とみなすことができる(図1参照)。これら「宇宙線貯蔵庫天体」のニュートリノやガンマ線のスペクトルは加速器から貯蔵庫に注入された宇宙線のスペクトルと同程度のベキ指数になることが予言される。^{6,7)}

式(1) で $E_p Q_{E_p} (\propto E_p^{2-s})$ をエネルギーに依存しないとし(つまりベキ指数は $s=2$) 観測されている超高エネルギー宇宙線のエネルギーフラックスで規格化することを考える。さらに $\min[1, f_{\text{mes}}] \rightarrow 1$ の極限をとったものがいわゆる Waxman-Bahcall 限界⁸⁾ と呼ばれるものであり, ξ_z を用いて次で与えられる(図2参照)。

$$\sum_i (E_\nu^2 \Phi_\nu) \approx 1.5 \times 10^{-8} \xi_z \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}. \quad (2)$$

Waxman-Bahcall 限界は一般的なニュートリノ背景放射フラックスの上限を与えるわけではないが(原理的には宇宙線の殆どがニュートリノ生成に使われるような天体があれば超えられる), 宇宙線起源天体からの高エネルギーニュートリノ背景放射に対する有益な指標を与える。実際, 超高エネルギー宇宙線を説明するモデルの殆どで, 期待されるニュートリノフラックスは Waxman-Bahcall 限界を超えない。また地上で観測される宇宙線の化学組成が陽子ではなく重い原子核優勢ならば, 原子核が光と反応して壊れてしまわないという条件を課すことで Waxman-Bahcall 限界の原子核版に相当するものも導くことができる。⁹⁾ 我々は原子核生存限界を導出し, Waxman-Bahcall 限界と同じ仮定に基づいた場合, そのニュートリノ背景放射フラックスが約一桁低いものになることを示した。

荷電パイオンがニュートリノを作る一方, 中性パイオンは2つのガンマ線に崩壊する。宇宙線によって作られた荷電パイオン由来のニュートリノと中性パイオン由来のガンマ線の生成量には次のような関係がある。

$$\varepsilon_\gamma Q_{\varepsilon_\gamma} \approx \frac{4}{3K} \varepsilon_\nu Q_{\varepsilon_\nu}. \quad (3)$$

ここでニュートリノ生成量は以下のように書ける。

*3 AGN が持つ相対論的ジェットが観測者の方向を向いている場合に相当する。GeV-TeV ガンマ線背景放射には主要な寄与をする。

$$\varepsilon_\nu Q_\nu \approx \frac{3K}{4(1+K)} \min[1, f_{pp/py}] \varepsilon_p Q_p, \quad (4)$$

ここで εQ_ν は各粒子の $\ln \varepsilon$ あたりのエネルギー生成量であり、以前と同様、 pp 反応では $K=2$ 、 py 反応では $K=1$ である。上の式(3)はパイオンやミューオンの冷却が重要でないときに正しい。ガンマ線は宇宙背景放射や天体内部の光子場と相互作用するため、地球で観測されるスペクトルは天体で作られた際の生成スペクトルとは異なる。エネルギー保存より、十分に高エネルギーのガンマ線はより低いエネルギー光子として放射される(電磁カスケード)。電磁カスケードを考慮した光子スペクトルはボルツマン方程式を解くことによって得ることができるが、その詳細は天体ごとに異なる。最も単純な可能性は、銀河や銀河間空間など宇宙線加速器外部の密度が低い環境でニュートリノやガンマ線が作られる場合だろう。銀河間空間での宇宙背景放射との相互作用による電磁カスケードを主に考慮すればよく、結果のガンマ線スペクトルはほぼ普遍的な形になる。^{10, 11)}

応用として、マルチメッセンジャーデータを用いて、宇宙に存在する高エネルギー粒子の生成量や、暗黒物質の寿命及び対消滅断面積を制限できる。筆者は、オハイオ州立大学に在籍中、Fermi衛星によるガンマ線データとIceCubeによるニュートリノ観測の上限値を用いて、高エネルギー宇宙粒子の生成量、及びTeVより重い暗黒物質の寿命と対消滅断面積に対する制限を計算した。^{11, 12)} 高エネルギーニュートリノ発見の報を得たのはちょうどその頃であった。

3. 高エネルギーニュートリノの発見

京都で行われた国際会議 Neutrino 2012 において、PeVのエネルギーを持つニュートリノ2事象がIceCubeチームの石原安野氏(現千葉大)により報告された。これらのニュートリノは吉田滋氏を中心とする千葉大学グループによる超高エネルギーニュートリノ探索で見つかった。^{13, 14)} 超高エネルギー領域では大気ニュートリノ及びミューオンの影響は十分小さくなるため、少数事象でも宇宙起源である可能性が高くなる。ニュートリノエネルギーフラックスの大きさは $E_\nu^2 \Phi_\nu \sim 3 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 程度で、我々理論家が期待していた値とおおよそ一致しており、非常に興奮させる結果であった。しかしながら、その時点での統計的有意度は 3σ 程度であり、大気雑音で説明できると考える研究者は少なくなかった。素粒子現象論屋を中心に、関連論文が出始めたが、新しい観測に即座に反応して仕事をするのが不得手な筆者はしばらく様子見をしていた。

その後2012年9月よりプリンストン高等研究所に異動した。太陽ニュートリノの研究で世界的に著名なBahcallがかつて在籍していた場所であり、宇宙ニュートリノ研究には縁の地である。Waxman-Bahcall限界についての論文もここで生まれている。異動してしばらく経った2013年5月にマディソンでIceCubeグループが主催するIPA2013国際

会議が行われた。そこで、新たな高エネルギーニュートリノデータ解析の結果が報告されたのである。その発表はインパクトのあるものであった。その後のhigh-energy staring event (HESE) の解析でさらに26事象が見つかり、大気雑音だけでデータを説明できる可能性は4シグマで棄却された。¹⁵⁾ 当時、GRBや超新星からのGeV-TeVニュートリノ放射や高速電波バースト(発見の情報を発表前に得ていた)などについて調べていたが、この時点で高エネルギーニュートリノに関する研究にしばらく集中することに決めた。それまでにニュートリノの研究を続けていたことが幸いし、研究に必要な道具と知識はほぼ揃っていた。

これまでのIceCubeの観測で得られた結果をまとめる。

(i)「ニュートリノ背景放射のエネルギーフラックスは $0.1\text{--}1 \text{ PeV}$ あたりで $E_\nu^2 \Phi_\nu \sim 3 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 程度である。¹⁵⁻¹⁸⁾」ニュートリノのベキ指数を $\Phi_\nu \propto E_\nu^{-s}$ で定義すると、3年のHESEデータの解析で得られたスペクトルのベキ指数は $s=2.3$ 程度になる。¹⁶⁾ 100 TeVを超える高エネルギーの向上きミューオン型ニュートリノ事象のデータ解析でも同程度のフラックスが得られているが、6年のデータの解析ではハードなスペクトル ($s=2.13$) が報告されている。¹⁸⁾ ハードなスペクトル ($s \sim 2$) を外挿すると数PeVあたりでスペクトルの折れ曲がりが必要になる。¹⁹⁾ これは高エネルギーでニュートリノ核子散乱の断面積が増大することと標準模型において反電子ニュートリノが6.3 PeVで起こすGlashow共鳴の存在が効いている。これは7年間のデータから得られた超高エネルギーニュートリノフラックスへの上限値とも矛盾しない。²⁰⁾

(ii)「100 TeV 以下の中間エネルギーのニュートリノの探索に適したmedium-energy starting event (MESE) の解析や標準的なシャワー事象の解析ではソフトなスペクトル ($s \sim 2.5\text{--}2.7$) が示唆される。^{21, 22)}」これは10 TeVから100 TeVあたりのニュートリノフラックスが、Waxman-Bahcall限界よりも高いことを示唆し、4年のHESEデータの結果 ($s=2.58$) とも無矛盾である。大気即発ニュートリノ*4のフラックスにも上限値がついており、この30 TeVあたりの超過成分を大気即発ニュートリノで説明することは難しい。向上きミューオンニュートリノ事象の解析結果とは2シグマから3シグマ程度の食い違いがある。¹⁸⁾

(iii)「宇宙ニュートリノの到来方向分布(図3参照)は等方分布と無矛盾である。^{16, 18, 22)}」(北半球からのニュートリノ事象がやや少ないように見えるが、これは十分高エネルギーのニュートリノは地球伝搬中に減衰するからである。)

(iv)「2016年現在、有意なニュートリノ源は見つからない。」HESE、向上きミューオンニュートリノの解析で、統計的に有意なクラスタリングや、GRBやブレーザーなど天体との有意な相関は報告されていない。^{16, 18, 24-26)}

(v)「電子型ニュートリノ、ミューオン型ニュートリノ、

*4 D中間子など、チャームを含むような重い中間子は寿命が短く、相互作用でエネルギーを失う前に速やかに崩壊するのでこう呼ばれる。

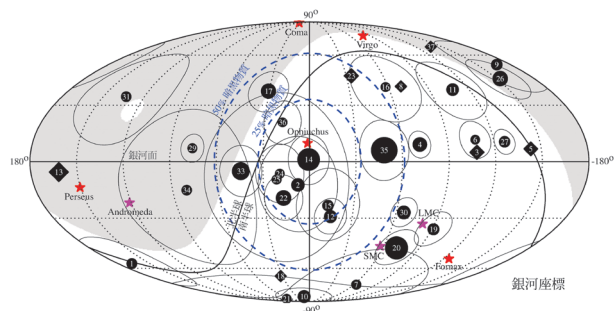


図3 銀河座標における高エネルギー宇宙ニュートリノの到来方向分布。²³⁾ IceCubeによるHESE3年の観測データに基づく。¹⁶⁾ ●印はシャワー型事象、◆印はミューオントラック型事象を表し、それぞれの印の大きさはニュートリノが検出器に残したエネルギー、番号は時系列を表している。シャワー型事象を囲む線はニュートリノ到来方向の不定性を示す。(トラック型についてはこの図では見えない。) 事象28と32は大気雑音の可能性が高いので除外、一部の近傍銀河と銀河団の位置★印で示した。

タウ型ニュートリノのフレーバー比は天体由来のニュートリノが真空伝搬中に混合した結果1:1:1と無矛盾である。²²⁾ IceCubeで観測されるのは主にシャワー型事象とトラック型事象である。シャワー型事象は電子ニュートリノやタウニュートリノが起こす荷電カレント相互作用、それぞれの型のニュートリノが起こす中性カレント相互作用に由来し、トラック型事象は主にミューオンニュートリノの荷電カレント相互作用に由来する。その比から、フレーバー比の情報が得られる。

4. 起源への示唆

IceCubeで観測された高エネルギー宇宙ニュートリノ背景放射の起源は何か？ この新しい謎への示唆を述べる。

(a)「ニュートリノが天体起源ならば、観測されたニュートリノのエネルギーが少なくとも数PeVあることから陽子が100 PeVくらいまで加速されている必要がある。」これは宇宙線スペクトルのkneeに相当するエネルギー(〜3 PeV)をはるかに超えており、通常の超新星残骸よりも強力な宇宙線加速器の存在を示唆する。²⁷⁾ またsecond kneeと呼ばれる100 PeV付近の折れ曲がり付近で宇宙線が系内起源から系外起源へ移り変わっている可能性があるが、ニュートリノがその手がかりを与えるかもしれない。⁷⁾

背景放射が見つかったときの基本的な疑問の一つはそれが銀河系内か系外という問いである。現在までニュートリノの到来方向は等方分布と無矛盾であるので、系外起源が最も自然であろう。ミューオン型ニュートリノによるトラック型事象の解析から系内天体のニュートリノフラックスへの寄与は支配的でないという示唆が得られている。¹⁸⁾ 同様の結論が地上の空気シャワーアレイや広視野ガンマ線検出器による観測で得られた拡散ガンマ線フラックスへの上限値からも間接的に支持される。²⁸⁾ 超新星残骸など銀河面に分布した多数の系内天体や銀河ハローで作られたPeV以下のガンマ線は、宇宙マイクロ波背景放射との光子対消滅反応($\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$)の影響がほぼ無視できて地球まで到達できる。よって、ニュートリノフラックスに対応する

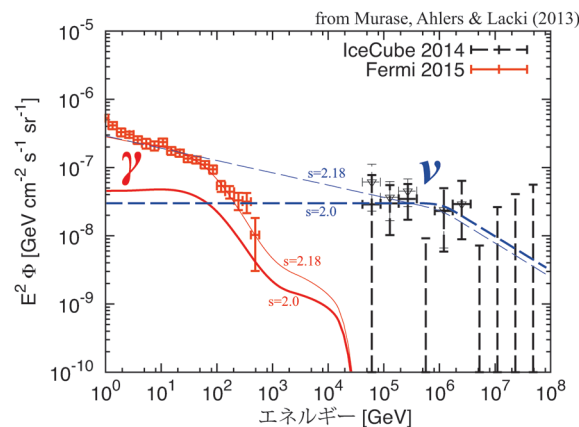


図4 系外天体からのニュートリノと等方的拡散ガンマ線の背景放射フラックス。宇宙線スペクトルはベキ型、ニュートリノとガンマ線は pp 反応で作られると仮定し、ガンマ線については電磁カスケードの効果を考慮してある。²⁷⁾ 許されるベキ指数の範囲は限られる。

TeV-PeVガンマ線放射の観測から制限がつく。まとめると、

(b)「系外のニュートリノ源がある。」ニュートリノ到来方向分布に銀河面及び銀河中心への有意な集中が見られないこと、TeV=10¹² eVを超えるエネルギーでの拡散ガンマ線の観測結果から支持される。²⁸⁾ ただし定量的な制限は強いものではなく、系内天体の寄与が多少あってもよい。

ニュートリノとガンマ線の比較はマルチメッセンジャーアプローチの一例である。GeV-TeVガンマ線背景放射フラックスはFermi衛星で、超高エネルギー宇宙線フラックスはPierre Auger観測所やテレスコープアレイなどで観測されており、次のような新しい示唆が得られる。

(c)「ニュートリノ背景放射のエネルギーフラックスはFermi衛星で観測された100 GeV領域の等方的拡散ガンマ線フラックスと同程度である。特に、宇宙線貯蔵庫シナリオが正しく、 pp 反応によってニュートリノとハドロン由来のガンマ線が作られているならば、GeV-TeVガンマ線がそのまま放射されるような自然な源に対してニュートリノスペクトルのベキ指数は $s=2.1-2.2$ よりも小さくしなければならず、そのようなニュートリノ源は等方的拡散ガンマ線フラックスに30%以上の寄与をする。²⁷⁾」

(d)「ニュートリノ背景放射のエネルギーフラックスの大きさは、超高エネルギー宇宙線フラックスと同程度である。特に0.1-3 PeVあたりのエネルギー領域で、 $s=2.0$ におけるWaxman-Bahcall限界及び $s=2.3$ における原子核生存限界に(少なくとも見かけ上は)ほぼ一致する。」

系外天体についてももう少し個別の議論を行おう。ニュートリノが作られればそれに伴うガンマ線が必ず作られる。ニュートリノとハドロン由来のガンマ線が天体からそのまま放射されるような「自然な」源では、 $s \leq 2.1-2.2$ であるようなハードなスペクトルしか許されない。例えば、銀河宇宙線のスペクトルは $s=2.7$ 程度だが、そのようなソフトなスペクトルはFermi衛星で観測されたガンマ線背景放射のデータ²⁹⁾と直ちに矛盾する(図4参照)。一方で、スターバースト銀河や銀河団・銀河群などの宇宙線貯蔵庫天体か

らのニュートリノやガンマ線放射はハードなスペクトルを持つことがIceCubeの発見前から予測されていた。^{6,7,30)} 理論で期待される pp 反応由来のニュートリノ背景放射フラックスは $E_\nu^2\Phi_\nu \sim 10^{-9} \sim 10^{-7} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 程度であり、不定性は大きいものの、0.1 PeV以上のニュートリノデータを上手く説明できる。²⁷⁾ 宇宙線貯蔵庫シナリオの魅力的な点は数PeVでのニュートリノスペクトルの折れ曲がり予測されていたことである。低エネルギーの宇宙線は閉じ込めが効いてハードなスペクトルが期待される一方、高エネルギーでは拡散による逃走が効き、拡散係数に依存してスペクトルがソフトになる。またFermi衛星で観測されているガンマ線背景放射に大きな寄与をすることが予想され、実際にガンマ線背景放射中の非ブレイザー成分を同時に説明することが可能である。³¹⁾ 特にスターバースト銀河モデルの場合、M82やNGC253などの近傍の源からGeV–TeVガンマ線が実際に観測されている。また、十分高エネルギーの宇宙線は銀河間空間に逃走するので、貯蔵庫の中に含まれる宇宙線加速器が超高エネルギー宇宙線を作っていれば、地球で観測される宇宙線にも寄与できる。

しかし、理論的な問題も多い。星形成銀河で100 PeV近い宇宙線を閉じ込めるためには天の川銀河よりも強い乱流が必要になるが、その機構が不明である。また加速天体も普通の超新星残骸では役不足である。³²⁾ 不定性の大きい遠方宇宙の星形成銀河の性質、星形成銀河におけるAGNの影響などの理解も必要だろう。また、銀河群・銀河団の場合、近傍銀河団からガンマ線は観測されていない。

GRBやAGNのような pp 反応が主要な過程となるような宇宙線加速器シナリオでは、(c)と(d)を説明することはより非自明となる。ガンマ線は天体から出る前に $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 反応で吸収される可能性があるため、Fermi衛星で観測されたガンマ線背景放射に寄与するとは限らない。(むしろ天体内部での吸収が無視できない。³³⁾) また、エネルギーが高い宇宙線ほど中間子生成効率が高くなるので、10 PeVを超えるエネルギーでニュートリノが見つからないことを説明するためには、中間子冷却などの別な物理的理由が必要となる。そして超高エネルギー宇宙線加速器の代表格である、GRBやブレイザーなどの明るい天体が宇宙ニュートリノの起源である可能性は既に強く制限されている。^{*5)}

GRBは非常に明るく継続時間が短いため、時間的、空間的な相関をとることで大気ニュートリノ雑音を除去できる。GRBからのニュートリノ探査は精力的に行われているが、未だ検出には至っていない。その結果 $E_\nu^2\Phi_\nu \sim 0.6 \times 10^{-9} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ という強い制限がついている。²⁴⁾ 従って、現時点でGRBがニュートリノ背景放射の主要な起源である可能性は既に棄却されている。¹⁹⁾ (ただしGRB

が超高エネルギー宇宙線の起源である可能性はまだ残されている。) しかしながら、このことは他の突発天体の可能性は否定しない。近年のガンマ線及びX線観測で、通常の明るいGRBとは異なる、暗くて継続時間の長いGRBの種族が見つかった。これら暗いGRBには通常のGRBに対する制限は適用されず、過去に予言されたニュートリノ背景放射フラックスもIceCubeデータと無矛盾である。³⁴⁾ 理論的には、GRBを作る相対論的ジェットが弱かったりするなどして星を突き破ることができなければ、電磁観測ではGRBとして観測されずに超新星として観測されることになる。不定性は大きい、このような埋もれたジェットを持つ超新星も「隠れたニュートリノ源」としてニュートリノ背景放射に寄与している可能性がある。³⁵⁾

AGNのうち、ブレイザーはガンマ線では宇宙で最も明るい天体の一つで、有力なニュートリノ源と考えられてきた。しかし、IceCubeのデータと無矛盾に説明することは難しい。第一に、最も単純な理論モデルは $s \sim 2$ よりハードなスペクトルを予言するが、これは観測データと合わない。^{5,36)} IceCubeによる発見以前に提案された理論モデルの多くが、これまで得られたデータによって強く制限されてしまった。第二に、ミューオン型ニュートリノの到来方向とFermi衛星で観測されているブレイザーに有意な相関が見られない。²⁶⁾ ガンマ線で見えないブレイザーが主要な源となっていない限り、ブレイザーはニュートリノ背景放射を説明できない。一方、AGN中心にある大質量ブラックホール近傍でニュートリノが作られている可能性^{37,38)} や大質量ブラックホールによってフレアが起きた際に効率よくニュートリノが作られている可能性^{39,40)} は残されている。これらの隠れたニュートリノ源モデルでもニュートリノ背景放射を説明することはできるが、不定性が大きく検証には硬X線からMeVガンマ線での観測の進展が待たれる。

天体との相関解析は強力であるが、使うカタログにも依存し、万能ではない。一方で、ミューオン型ニュートリノの到来方向分布におけるクラスタリング(マルチプレット解析)や自己相関を調べることで、天体の種類に依存しない制限を得ることができる。ある光度を持つ天体がニュートリノ検出器で距離 d_{lim} まで検出可能としよう。すると視野 $\Delta\Omega$ 内で、多重度 m 以上のマルチプレットとして観測される天体が存在しない条件は、 $N_s = b_{m,L}(\Delta\Omega/3)n_0^{\text{eff}}d_{\text{lim}}^3 < 1$ と書ける。ここで b_m は解析に依存する因子、 n_0^{eff} は有効的な天体数密度である。ニュートリノ背景放射のエネルギーフラックスが既知なので、その起源となるような天体の数密度に対し、次のような下限が得られる。³¹⁾

$$n_0^{\text{eff}} \gtrsim 0.8 \times 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3} \left(\frac{b_{m,L}}{5} \right)^2 \left(\frac{\xi_z}{0.6} \right)^{-3} \times \left(\frac{F_{\text{lim}}}{10^{-9} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}} \right)^{-3} \left(\frac{\Delta\Omega}{2\pi} \right)^2. \quad (5)$$

*5) もし f_{pp} が既知であれば、宇宙線フラックスからもこれらのシナリオについて制限を与えることができる。しかし多くのモデルにおいて、 f_{pp} の不定性は大きく、一桁以上の不定性があることもしばしばである。

ただし F_{lim} はニュートリノ検出器の点源に対する感度である。単純な見積もりであるが、宇宙進化が弱い ($\xi_z \sim 0.6$) 天体に対しては強力な制限になる。³¹⁾ まとめると、

(e) 「十分高エネルギーでミューオン型ニュートリノのクラスタリングが見つかっていないことより、起源天体は星形成銀河やブレーザー以外の AGN のような宇宙でもありふれた天体でなければならない。特に、超高エネルギー宇宙線の有力な起源候補である GRB やブレーザーはニュートリノ背景放射の主要な源ではないだろう。」(ガンマ線で暗い GRB や AGN など可能性として残される。)

IceCube で観測されたニュートリノフラックスを説明するために標準模型を超えるような物理を導入する積極的な理由は今の所存在しない。しかしながら、新しい素粒子で説明することも原理的には可能である。一つの例として 100 TeV を超えるような重い、長寿命を持つ暗黒物質の崩壊があり、R パリティをわずかに破ったり、重い右巻きニュートリノを導入するなど様々な素粒子的な模型が提案されている。⁴¹⁻⁴⁵⁾ 標準模型粒子への分岐比に依存するが、この場合もマルチメッセンジャーデータを用いた制限は重要となる^{23, 46)} (図5参照)。また、高エネルギーニュートリノが伝搬中に標準模型には存在しない数 MeV 程度の新粒子を媒介して宇宙ニュートリノ背景放射と相互作用する可能性やニュートリノそのものが崩壊する可能性も議論されている。⁴⁷⁻⁵²⁾ この場合ニュートリノは天体起源であるが、新しい物理の効果がニュートリノスペクトル中の吸収線やフレーバー比の異常として現れる。まとめると、

(f) 「高エネルギーニュートリノ観測から、重い暗黒物質粒子の寿命、新粒子を媒介としたニュートリノ自己散乱、ニュートリノ崩壊などの標準模型を超える物理への新たな制限が得られている。」例えば、ニュートリノ質量階層が正常階層である場合、重い質量固有状態のニュートリノが

伝搬中に崩壊しているというようなことは起きていない。

5. 系外宇宙線の起源が隠れたニュートリノ源か？

5.1 隠れたニュートリノ源

宇宙ニュートリノの起源が宇宙線貯蔵庫天体のような「自然な」源ならば、ハードなスペクトルしか許されない。100 TeV 以下でのニュートリノスペクトルはソフトであるという IceCube の最新の結果は予想外のものであり興味深い。大気雑音の影響について議論の余地はまだあるが、もしこの結果が正しいとすると、 pp 反応由来であれ $p\gamma$ 反応由来であれ宇宙ニュートリノの起源はガンマ線が天体からそのまま抜け出すような自然な源ではないと考えられる。³³⁾

現在まで Fermi 衛星によって多数のブレーザーが見つかっており、sub-TeV 領域における等方的拡散ガンマ線フラックスの主要な起源は点源として分解できなかったブレーザーであると広く信じられている。仮にブレーザーで等方的拡散ガンマ線フラックスがほぼ説明できるならば、そこにスターバースト銀河や銀河群・銀河団などの別の天体の寄与が入り込む余地は殆どなくなり、ベキ指数への制限はさらに厳しいものとなる。我々の論文での指摘以降、実際に定量的な解析が進んでいる。Fermi 衛星で得られたガンマ線データに対する 50 GeV 以上の点源の寄与についての詳細解析⁵³⁾ 及びガンマ線背景放射と銀河との相関解析⁵⁴⁾ の結果は、30 TeV あたりの中間エネルギーニュートリノを宇宙線貯蔵庫シナリオで説明することが困難であることを示している。

高エネルギーニュートリノが $p\gamma$ 反応で作られているならば、この結論はさらに強いものとなる。天体で起きる $p\gamma$ 反応の標的光子は $\gamma\gamma$ 反応の標的光子にもなる。中間子生成反応の断面積と光子対消滅断面積を比べることで、GeV-TeV エネルギーのガンマ線は天体内部で効率よく吸収されてしまうことがわかる。詳細な議論は断面積のエネルギー依存性を考慮する必要があるが、基本的にはガンマ線の反応効率 (τ_γ) は中間子生成効率 ($f_{p\gamma}$) と以下のように結び付けることができる。³³⁾

$$\tau_\gamma(\epsilon_\gamma^c) \approx \frac{\hat{\sigma}_\gamma}{\hat{\sigma}_{p\gamma}} f_{p\gamma}(\epsilon_p) \sim 10 \left(\frac{f_{p\gamma}(\epsilon_p)}{0.01} \right), \quad (6)$$

ここで $\hat{\sigma}$ は非弾性度などの情報を含む有効断面積である。地上で観測される宇宙線フラックスや各天体で作られている非熱的な電磁放射のエネルギー生成量と矛盾しないためには $f_{p\gamma}$ はあまり小さくなることはできず ($f_{p\gamma} \geq 0.01$)、 $\tau_\gamma \geq 10$ が導かれる。両者の関係は標的光子のスペクトルに依存するが、一般的な場合でも同様の結論が成り立つことを示すことができる (図6参照)。つまり、30 TeV あたりの中間エネルギーのニュートリノは (GeV-TeV ガンマ線では暗いという意味での) 隠れたニュートリノ源で作られていることがマルチメッセンジャーデータからは示唆される。

もっとも、100 TeV 以下で何かしらの系内天体が寄与している可能性は否定できない。宇宙線スペクトルの knee

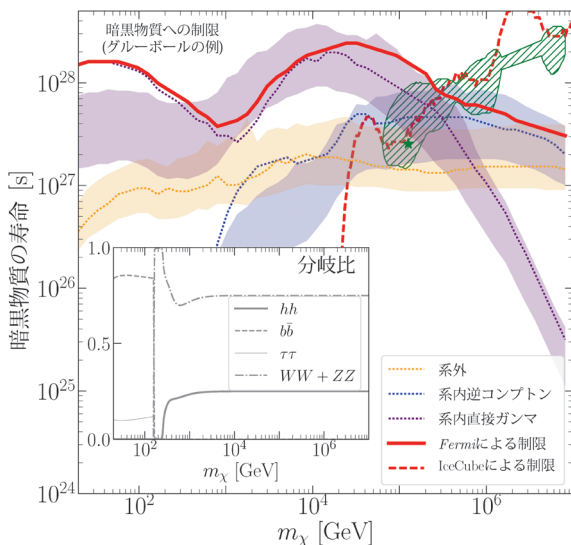


図5 Fermi衛星で観測されたガンマ線データを用いた重い暗黒物質の寿命への制限。IceCubeデータを説明可能なパラメータ領域を斜線領域で示す。例として隠れたセクターでのグローバル暗黒物質を仮定した。⁴⁶⁾

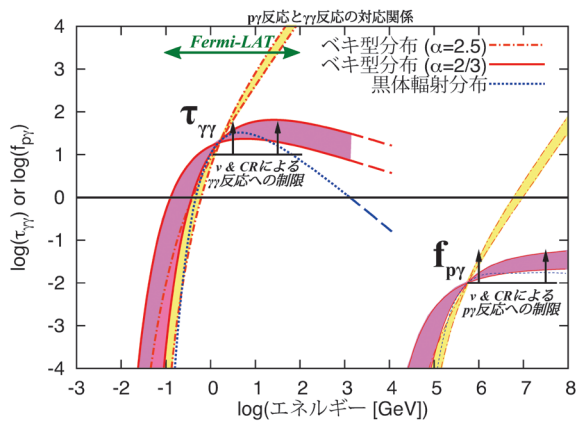


図6 光子対消滅反応効率 $\tau_{\gamma\gamma}$ と $p\gamma$ 中間子生成反応効率 $f_{p\gamma}$ の対応関係。³³⁾ IceCubeで観測された拡散ニュートリノフラックスを天体内部で起きた $p\gamma$ 反応由来で説明するには $f_{p\gamma}$ はある程度大きくないといけないが、対応する $\tau_{\gamma\gamma}$ はGeV-TeV領域で1を超える、つまりFermi衛星で観測できるエネルギーのガンマ線は天体内部で吸収される。

に対応するニュートリノエネルギーあたりでニュートリノスペクトルのankleがあってもよいだろう。しかし、拡散ガンマ線やミューオン型ニュートリノの制限を逃れつつ、系内天体が系外天体と同程度に寄与するというような、かなり微調整されたモデルを考える必要があると思われる。

5.2 高エネルギー宇宙粒子の大統一モデル

冒頭に述べたように、高エネルギーニュートリノ観測のそもそもの動機の一つは「宇宙線の起源」という古い謎の解明であった。そして、IceCubeで観測されたニュートリノフラックスは超高エネルギー宇宙線源が作るニュートリノ背景放射の自然な上限値、Waxman-Bahcall 限界に近い。ただし、単純にベキ指数 $s \sim 2$ で超高エネルギーまでニュートリノスペクトルが伸びていると数PeVを超えるニュートリノが見つかっていない事実と矛盾するので、スペクトルに折れ曲がりが必要となる。ニュートリノが pp 反応由来ならば、ニュートリノフラックスが等方的拡散ガンマ線フラックスと同程度になることは自然に説明できた。また宇宙線貯蔵庫シナリオではスペクトルの折れ曲がりも予言されており、源から逃走した宇宙線が観測される宇宙線フラックスに寄与するので、超高エネルギー宇宙線をも同時に説明するような「高エネルギー天体粒子の大統一モデル」も構築することが可能である。³¹⁾ 加速された宇宙線のベキ指数が $s \sim 2$ かつ pp 反応の効率が $f_{pp} \geq 1$ であれば、ニュートリノ、ガンマ線、超高エネルギー宇宙線のエネルギーフラックスが同程度である事実を上手く説明できる(図7参照)。

この提案は非常に魅力的である。しかし、データを詳しく見ていくとそう単純でないように思えてくる。単純な宇宙線貯蔵庫シナリオでは、ガンマ線背景放射からの制限を避けるために、スペクトルは $s \sim 2$ 程度でなければならない。(逆に言えばFermi加速機構によって理論的に期待される値、 $s \sim 2$ で非常に上手くいく)。しかしながら、前述したように10-100 TeVあたりの中間エネルギーニュートリノ

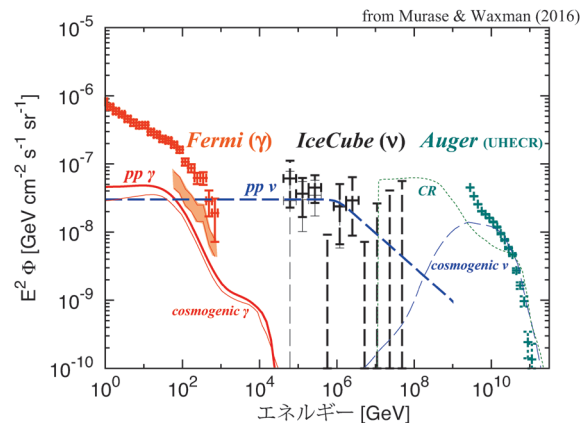


図7 超高エネルギー宇宙線(但し $\sim 10^{19}$ eV以上の系外成分)、PeV ニュートリノ、sub-TeV ガンマ線の大統一モデル。³¹⁾ 非弾性 pp 反応による中間子生成効率が $\min[1, f_{pp}] \sim 1$ であれば、Pierre Auger観測所やテレスコープアレ実験で得られた超高エネルギー宇宙線フラックス、IceCubeによる観測で得られたニュートリノフラックス、Fermi衛星によって観測されたガンマ線背景放射の非ブレイザー成分をベキ指数 $s=2.0$ で大まかに説明することができる。

リノの起源は隠れたニュートリノ源など別の可能性に求めなければならないだろう。超高エネルギー宇宙線との関連はより非自明である。特に、超高エネルギー宇宙線は陽子より重い原子核が卓越している可能性があることがPierre Auger観測所の超高エネルギー宇宙線観測で示唆されているが、この結果はモデルに更なる制限を課す。例えば、原子核の光分解反応の断面積が $p\gamma$ 反応のそれよりも大きい場合、原子核が生き残って地球で観測されるためにはニュートリノを作る効率は高くなってはいけ(原子核生存問題)。図2で示したように、ベキ指数 $s=2.3$ の場合の原子核生存上限は観測されたニュートリノ背景放射とほぼ一致するが、その理由は明らかではない。図7に示したcosmogenicニュートリノのフラックス(宇宙線陽子を仮定)はIceCubeの最新の上限値²⁰⁾とも無矛盾である。しかしながら、今後の観測でこの上限値がさらに厳しくなれば、宇宙線が原子核の場合の議論がさらに重要となるだろう。

6. 今後の期待

真の意味で高エネルギーニュートリノ天文学が始まるためにはやはり個々のニュートリノ源を同定する必要がある。高エネルギー宇宙ニュートリノの起源天体がIceCubeで見つかる保証はない。しかし、悲観する必要はないと筆者は考える。体積にしてIceCubeを約10倍拡張したIceCube-Gen2が提案されている。この規模の検出器が実現すれば、スターバースト銀河や銀河団・銀河群、重い暗黒物質の崩壊など、現在提案されている殆どのモデルは検証可能であり、高エネルギーニュートリノ源が見えてくる可能性は非常に高い。³¹⁾ またヨーロッパの地中海ではKM3Netというニュートリノ検出器の建設が始まっている。南半球からの上向きミューオン型ニュートリノを観測することで、銀河系内にある天体の寄与を調べたり、kneeエネルギーまで陽子を加速している天体を探ことができると期待されて

いる。

ニュートリノは中性粒子でありその到来方向には必ず源がある。ガンマ線天文学の黎明期がそうであったように、統計さえ増やせばPeV領域のニュートリノの起源天体が見つかるのは時間(とお金)の問題だろう。個人的には、多エネルギーでのニュートリノ観測、特にEeV領域を含んだ超高エネルギーニュートリノ観測と、GeV-TeV領域を含む時間領域ニュートリノ天体物理学の将来性にハイパーカミオカンデによるニュートリノ観測と合わせて期待したい。

超高エネルギー宇宙線を加速している天体の同定には、100 PeVを超える超高エネルギーニュートリノを検出する方が直接的である。Pierre Auger観測所やテレスコープアレイなどの宇宙線検出器を用いたタウニュートリノ由来の空気シャワー観測やANITAなどのニュートリノ由来の電波信号探索に加え、千葉大学の吉田滋氏らのグループを中心にIceCubeチームによるcosmogenicニュートリノ探索が精力的に進められている。IceCubeの後継検出器IceCube-Gen2だけでなく、Askaryan Radio Array (ARA)やExavolt Antenna (EVA)、Neutrino Telescope Array (NTA)など電波やチェレンコフ光を利用した多数の計画が進行しており、超高エネルギーニュートリノ検出器の感度は将来的に大幅に改善されていくことが期待できる。筆者自身もGRBやAGNなどが作る超高エネルギーニュートリノについての理論的な研究を精力的に行っている。これまで楽観的な場合しか検出できる見込みがなかったが、多くのモデルが最ももらしいパラメータのもとで検証できるようになるだろう。超高エネルギー宇宙線はGRBやAGNのような宇宙でもかなり強力な天体でないと作ることができないため、超高エネルギーニュートリノ源の数も限られていると考えられる。信号を観測できさえすれば、超高エネルギー宇宙線の加速天体を同定することは比較的容易かもしれない。

時間領域ニュートリノ天体物理学にも進展が期待される。GRBやAGNのフレアなどの突発天体からのニュートリノ探索では、時間及び空間的情報を利用することで大気雑音を大幅に取り除くことができる。運よく明るい突発天体現象が起きればIceCubeやKM3Netでもニュートリノ天体を見つけられる可能性が十分ある。IceCube中にあるDeepCore検出器、現在計画中のハイパーカミオカンデ、PINGUやORCAがあれば天体起源のGeV-TeVニュートリノの検出も夢ではないだろう。筆者自身も、4章で述べたようなGRBや超新星に伴う親星に埋もれたジェットからのニュートリノ放射^{55,56)}、超新星のショックブレイクアウト前後での高エネルギー放射、誕生直後のパルサー風からのニュートリノ放射や電磁放射についての研究を最近行っている。

ニュートリノや重力波を含むマルチメッセンジャーデータをリアルタイムで組み合わせる野心的な試みも始まっている。2016年にAdvanced LIGOによってブラックホール

連星からの重力波が世界で初めて検出されたが、重力波天文学の創出も強力な後押しとなって、時間領域でのマルチメッセンジャー天文学を可能にするためのパイプラインの整備が急速に進んでいる。筆者の所属するペンシルベニア州立大学を中心に、Astrophysical Multimessenger Observatory Network (AMON)⁵⁷⁾というネットワークが構築されつつある。IceCubeによるニュートリノ観測、Advanced LIGOによる重力波観測、Pierre Auger観測所による超高エネルギー粒子観測、Swift衛星を用いたX線及びガンマ線観測、All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN)などの可視光観測も巻き込んで突発天体からのマルチメッセンジャー信号を逃さないための体制が作られつつある。

7. おわりに

高エネルギー宇宙ニュートリノの発見により、マルチメッセンジャーデータを用いた宇宙粒子物理学が可能になった。理論屋が期待したレベルの宇宙ニュートリノフラックスが実際に観測され、質的に異なる粒子の観測データを組み合わせて様々な天体物理学的な議論ができるようになった意義は大きい。我々は、もはや上限値ではなくなった高エネルギーニュートリノデータを用い、ニュートリノ起源の解明の上でマルチメッセンジャーアプローチが非常に強力であることを実際に示した。宇宙における高エネルギーニュートリノの生成量はガンマ線や宇宙線のそれと同じくらい大きいこともわかった。これまでは机上の空論に近かった理論モデルもニュートリノのデータとつぎ合わせて検証する段階に入り、定量的かつ予言能力の高いモデルの構築が求められるようになった。これまでの10年が多波長観測の10年とするなら、今後10年はマルチメッセンジャー観測の10年となるだろう。MeV領域やGeV-TeV領域、超高エネルギー領域も含めて、多エネルギーニュートリノ観測すら可能になるかもしれない。X線天文学やガンマ線天文学はめざましい進歩を続けており、超新星爆発による衝撃波、ブラックホールから放出される高速ジェットなどの様々な天体で、非熱的な高エネルギー粒子が存在することが確認されてきた。この10年に限っても、SwiftやFermiなどの全天監視型ガンマ線衛星に加え、MAGIC, HESS, VERITASなどのチェレンコフガンマ線望遠鏡による成果で我々の高エネルギー宇宙に対する理解はかなり深化したといえる。現在計画中の次世代ガンマ線望遠鏡Cherenkov Telescope Arrayが完成すれば、個々のニュートリノ起源天体がハードなスペクトルを持つガンマ線源として観測されるはずである。例えば、宇宙線貯蔵庫天体がニュートリノ背景放射の主要な起源であるかどうかは今後の研究で検証できるだろう。TeV-PeVエネルギーでの広視野ガンマ線観測も重要である。星形成領域やフェルミバブルなど空間的に広がった系内天体がニュートリノフラックスに無視できない寄与をしていればチベット空気シャワーアレイやHigh-Altitude Water Cherenkov Observato-

ry (HAWC) で近い将来検出することができる。我々の研究でも示されたように南半球に広視野のガンマ線検出器もしくは空気シャワーアレイを作ることが重要だが、そのような計画も進みつつある。また IceCube-Gen2 などの次世代ニュートリノ検出器による高エネルギーニュートリノ観測を通して素粒子的暗黒物質や新しい相互作用などの標準模型を超える物理を探索する試みもますます面白くなるだろう。今後、驚きとともに高エネルギー宇宙への更なる知見が得られ、高エネルギーニュートリノの起源という新しい謎の解明が宇宙線の起源という古い謎の解明にも繋がることを期待して本稿の結びとしたい。

参考文献

- 1) F. Reines: Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **10** (1960) 1.
- 2) V. Berezinsky and G. Zatsepin: Phys. Lett. B **28** (1969) 423.
- 3) S. Yoshida and M. Teshima: Prog. Theor. Phys. **89** (1993) 833.
- 4) E. Waxman and J. N. Bahcall: Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 2292.
- 5) K. Mannheim: Astropart. Phys. **3** (1995) 295.
- 6) A. Loeb and E. Waxman: J. Cosmol. Astropart. Phys. **05** (2006) 003.
- 7) K. Murase, S. Inoue and S. Nagataki: Astrophys. J. **689** (2008) L105.
- 8) E. Waxman and J. N. Bahcall: Phys. Rev. D **59** (1998) 023002.
- 9) K. Murase and J. F. Beacom: Phys. Rev. D **81** (2010) 123001.
- 10) V. S. Berezinsky and A. Yu. Smirnov: Astrophys. Space Sci. **32** (1975) 461.
- 11) K. Murase, J. F. Beacom and H. Takami: J. Cosmol. Astropart. Phys. **08** (2012) 030.
- 12) K. Murase and J. F. Beacom: J. Cosmol. Astropart. Phys. **10** (2012) 043.
- 13) 石原安野, 吉田 滋: 日本物理学会誌 **68** (2013) 738.
- 14) M. Aartsen, *et al.* (IceCube Collaboration): Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 021103.
- 15) M. Aartsen, *et al.* (IceCube Collaboration): Science **342** (2013) 1242856.
- 16) M. Aartsen, *et al.* (IceCube Collaboration): Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 101101.
- 17) M. G. Aartsen, *et al.* (IceCube Collaboration): Phys. Rev. Lett. **115** (2015) 081102.
- 18) M. G. Aartsen, *et al.* (IceCube Collaboration): Astrophys. J. **833** (2016) 3.
- 19) R. Laha, J. F. Beacom, B. Dasgupta, S. Horiuchi and K. Murase: Phys. Rev. D **88** (2013) 043009.
- 20) M. G. Aartsen, *et al.* (IceCube Collaboration): Phys. Rev. Lett. **117** (2016) 241101.
- 21) M. Aartsen, *et al.* (IceCube Collaboration): Phys. Rev. D **91** (2015) 022001.
- 22) M. G. Aartsen, *et al.* (IceCube Collaboration): Astrophys. J. **809** (2015) 98.
- 23) K. Murase, R. Laha, S. Ando and M. Ahlers: Phys. Rev. Lett. **115** (2015) 071301.
- 24) M. G. Aartsen, *et al.* (IceCube Collaboration): Astrophys. J. **805** (2015) L5.
- 25) M. G. Aartsen, *et al.* (IceCube Collaboration): arXiv: 1609.04981.
- 26) M. G. Aartsen, *et al.* (IceCube Collaboration): arXiv: 1611.03874.
- 27) K. Murase, M. Ahlers and B. C. Lacki: Phys. Rev. D **88** (2013) 121301(R).
- 28) M. Ahlers and K. Murase: Phys. Rev. D **90** (2014) 023010.
- 29) M. Ackermann, *et al.* (Fermi LAT Collaboration): Astrophys. J. **799** (2015) 86.
- 30) K. Kotera, D. Allard, K. Murase, J. Aoi, Y. Dubois, T. Pierog and S. Nagataki: Astrophys. J. **707** (2009) 370.
- 31) K. Murase and E. Waxman: Phys. Rev. D **94** (2016) 103006.
- 32) N. Senno, P. Mészáros, K. Murase, P. Baerwald and M. J. Rees: Astrophys. J. **806** (2015) 24.
- 33) K. Murase, D. Guetta and M. Ahlers: Phys. Rev. Lett. **116** (2016) 071101.
- 34) K. Murase, K. Ioka, S. Nagataki and T. Nakamura: Astrophys. J. **651** (2006) L5.
- 35) K. Murase and K. Ioka: Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 121102.
- 36) K. Murase, Y. Inoue and C. D. Dermer: Phys. Rev. D **90** (2014) 023007.
- 37) F. W. Stecker: Phys. Rev. D **88** (2013) 047301.
- 38) S. S. Kimura, K. Murase and K. Toma: Astrophys. J. **806** (2015) 159.
- 39) C. D. Dermer, K. Murase and Y. Inoue: J. High Energy Astrophys. **3-4** (2014) 29.
- 40) M. Kadler, *et al.*: Nat. Phys. **12** (2016) 807.
- 41) B. Feldstein, A. Kusenko, S. Matsumoto and T. T. Yanagida: Phys. Rev. D **88** (2013) 015004.
- 42) T. Higaki, R. Kitano and R. Sato: J. High Energy Phys. **07** (2014) 044.
- 43) Y. Ema, R. Jinno and T. Moroi: Phys. Lett. B **733** (2014) 120.
- 44) C. Rott, K. Kohri and S. C. Park: Phys. Rev. D **92** (2015) 023529.
- 45) C. S. Fong, H. Minakata, B. Panes and R. Z. Funchal: J. High Energy Phys. **02** (2015) 189.
- 46) T. Cohen, K. Murase, N. L. Rodd, B. R. Safdi and Y. Soreq: arXiv: 1612.05638.
- 47) K. Ioka and K. Murase: Prog. Theor. Exp. Phys. (2014) 061E01.
- 48) K. C. Y. Ng and J. F. Beacom: Phys. Rev. D **90** (2014) 065035.
- 49) M. Ibe and K. Kaneta: Phys. Rev. D **90** (2014) 053011.
- 50) T. Araki, F. Kaneko, Y. Konishi, T. Ota, J. Sato and T. Shimomura: Phys. Rev. D **91** (2015) 037301.
- 51) K. Blum, A. Hook and K. Murase: arXiv: 1408.3799.
- 52) I. M. Shoemaker and K. Murase: Phys. Rev. D **93** (2016) 085004.
- 53) M. Ackermann, *et al.* (Fermi Collaboration): Phys. Rev. Lett. **116** (2016) 151105.
- 54) S. Ando, I. Tamborra and F. Zandanel: Phys. Rev. Lett. **115** (2015) 221101.
- 55) K. Murase, K. Kashiyama and P. Meszaros: Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 131102.
- 56) K. Kashiyama, K. Murase and P. Meszaros: Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 131103.
- 57) M. W. E. Smith, *et al.* (AMON Collaboration): Astropart. Phys. **45** (2013) 56.

著者紹介

村瀬孔大氏: 2010年京都大学大学院理学系研究科博士課程修了(物理学宇宙物理学専攻), オハイオ州立大学宇宙論天体粒子物理センター研究員(日本学術振興会海外特別研究員, 宇宙論天体粒子物理センター上級研究員), 2012年プリンストン高等研究所自然科学部門研究員(ハッブル特別研究員), 2015年ペンシルベニア州立大学助教授, 2016年基礎物理学研究所特任准教授(併任). 2015年日本天文学会研究奨励賞, 2016年日本物理学会若手奨励賞, 2017年アルフレッドスローン財団研究奨励賞. 博士(理学). 最近の研究はニュートリノ, 暗黒物質, 宇宙線, ガンマ線, 高エネルギー天体物理.

(2016年12月24日原稿受付)

The Origin of High-Energy Cosmic Neutrinos and Prospects for Multimessenger Particle Astrophysics

Kohta Murase

abstract: The discovery of high-energy cosmic neutrinos has opened up a new window on the Universe, and led to the dawn of high-energy neutrino astrophysics. Their origin is a new mystery in astroparticle physics, and solving this problem allows us not only to understand the physics of astrophysical sources but also to obtain important clues about the old mystery, the origin of cosmic rays, and to utilize neutrinos as probes of neutrino properties, dark matter, and fundamental physics. I summarize the latest results of IceCube observations and consider their implications for the sources of high-energy cosmic neutrinos. In particular, I show the importance of multi-messenger approaches, and discuss mysterious cosmic particle connections among neutrinos, gamma rays, and cosmic rays.