

高エネルギーニュートリノで切り開く マルチメッセンジャー天体物理学

村瀬 孔 大



〈ペンシルヴァニア州立大学物理学科（兼 粒子・重力天体物理学センターおよび天文学科） 104 Davey Laboratory, University Park, Pennsylvania 16802, USA〉

e-mail: murase@psu.edu

近年高エネルギー天体物理学は急速な発展を遂げており、電磁波だけでなくニュートリノ、荷電粒子、重力波も用いたマルチメッセンジャー観測に大きな期待が寄せられている。なかでも宇宙起源高エネルギーニュートリノの発見は粒子天体物理における近年最も主要な成果の一つであるといつてよいだろう。高エネルギーニュートリノが新たなメッセンジャーとして加わったことにより、いまだ謎に包まれている高エネルギー宇宙線、特に銀河系外宇宙線の加速天体への有用な知見が得られつつある。関連分野の最近の進展や今後期待される成果について述べる。

1. はじめに

われわれの宇宙は非熱的現象で満ちている。その最たる例の一つであり、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が宇宙線である。宇宙線は主に陽子や原子核などの荷電粒子からなり、 $\text{GeV}=10^9 \text{ eV}$ 程度から 10^{20} eV 程度にわたる非常に広いエネルギーにわたって観測されている。特に $3 \times 10^{18} \text{ eV}$ を超えるような超高エネルギー宇宙線は、人類最大の加速器であるLarge Hadron Colliderを上回る強力な宇宙線加速天体が宇宙に存在することを如実に示している。「宇宙線が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「荷電粒子がどのように加速されているのか」、「天体の非熱的放射はどのように起きているのか」などの物理的諸問題とも関連し、宇宙線の発見以来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続けてきた。

荷電粒子は宇宙空間に存在する磁場で曲げられてしまうため、超高エネルギー陽子など特殊な場

合を除き、宇宙線観測のみで起源天体を同定することは難しい。起源を調べる手段として有効なのは光子やニュートリノなどの中性粒子を用いることである。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、今日では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において、非熱的な粒子が観測されている。特にFermi衛星をはじめとしたガンマ線望遠鏡の活躍により、超新星残骸で宇宙線イオンが加速されていることがほぼ確実になったことは近年の大きな進歩だといえよう。しかしながら、超新星残骸のような銀河系内の天体で宇宙線がどのエネルギーまで加速できるのか、銀河系外で作られているであろう超高エネルギー宇宙線の起源は何か、など多くの謎が未解決のままである。

ニュートリノは電氣的に中性の素粒子でレプトンの一種である。弱い相互作用を介して物質と反応するため、その透過性は光では探ることのできない天体内部を探るにはうってつけといえる。その透過性と直進性を利用すれば、宇宙線の起源や関連する高エネルギー天体物理現象を明らかにす

る強力な手段となる。しかしながらその性質は諸刃の刃でもあり、検出には十分大容量の観測装置が必要になってくる。また宇宙線が大気と相互作用して作る大気ミューオンや大気ニュートリノによる雑音も問題となる。大気ニュートリノ雑音の影響が十分少なくなる高エネルギーで宇宙起源の信号の検出が期待されるため、スーパーカミオカンデやSudbury Neutrino Observatoryなどよりさらに巨大な検出器が望ましい。その困難さゆえに高エネルギーニュートリノ天文学は50年以上夢物語であった¹⁾。状況が変わったのは2012年にIceCubeニュートリノ観測所で高エネルギーニュートリノが検出されたことが報告されてからである²⁾。

荷電粒子観測は宇宙線生成量や非等方性など一定の重要な情報を与えてくれるが、不定性の大きい宇宙磁場により粒子の軌道が変化するため、一つ一つの天体を同定することは難しい。ガンマ線などを含めた電磁波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になるとは限らない。高エネルギーニュートリノはイオン加速のスモッキングガンとなるが、検出そのものが難しい。したがって宇宙線加速天体の解明のうえではこれらの宇宙粒子（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望ましい。しかしながら、観測的な情報が増えたほうがいいのは当たり前なので、マルチメッセンジャーというだけではただ格好つけた言い方をしているだけである。理論を介して観測的情報を有機的に結びつけることができ初めてそれは強力な手段になるのであって、使っている理論が怪しければ得られる情報の信頼度も畢竟下がってしまうだろう。幸い宇宙線イオンが高エネルギーニュートリノとガンマ線を作る場合、三つのメッセンジャーには非常に密接な関係がある。マルチメッセンジャーデータを用いた高エネルギー天体物理の研究は高エネ

ギーニュートリノ発見により新たな一步を踏み出したとっていい。

2. ニュートリノとガンマ線の関係

高エネルギーニュートリノとガンマ線は天体で作られた宇宙線の物質や光との相互作用、もしくは素粒子的暗黒物質の対消滅や崩壊によって作られると考えられている。天体起源の場合、反応の生成物として高エネルギーメソンが作られる。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二つのニュートリノと陽電子もしくは電子を放出する。一方、中性パイオンは二つのガンマ線に崩壊する。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、宇宙線スペクトルがべき型であれば、ニュートリノとガンマ線のスペクトルもべき型となる。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。ガンマ線バースト（GRB）や活動銀河（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ほうが数がずっと多いため、より高エネルギーの宇宙線はより低エネルギーの光子と反応する。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を反映した形になる。

ニュートリノとハドロン由来のガンマ線は、銀河や銀河間空間など宇宙線加速器外部の環境で自然に作られる。例えばわれわれが住む天の川銀河では、超新星残骸などの宇宙線加速天体から逃走した宇宙線が銀河を伝播する間に星間ガスと 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広がったガンマ線源として実際に観測されている。同様に系外銀河や銀河団・銀河群でもニュートリノやガンマ線が作られているだろう。特にスターバースト銀河や銀河団・銀河群では宇宙線拡散時間が長くなり、天体そのものを巨大な宇宙線貯蔵庫とみなす

天体内部でのニュートリノとハドロン由来ガンマ線の生成

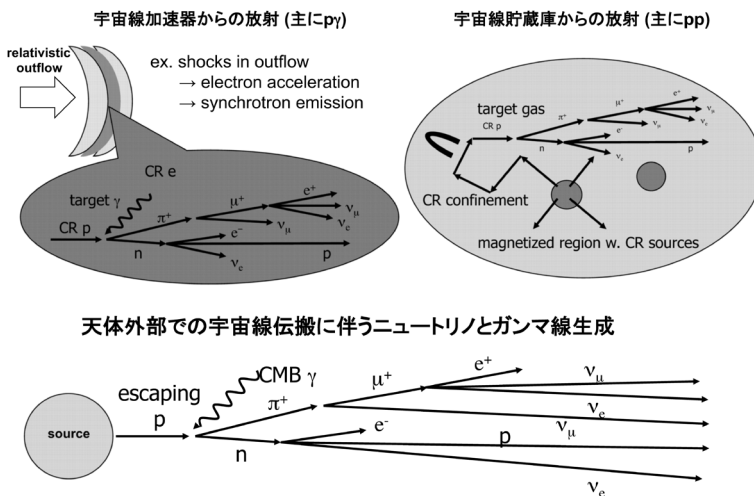


図1 天体内部および外部で高エネルギー宇宙線が周囲の物質や光子と相互作用し、ニュートリノとハドロン由来のガンマ線を作る。

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に緩やか (ハード) になるはずである。M82やNGC253など近傍のスターバースト銀河では、GeV-TeVエネルギー領域で緩やかなガンマ線スペクトルが実際に観測されている。これら宇宙線貯蔵庫天体に対して、理論で期待された拡散ニュートリノフラックスは $E_\nu^2 \Phi_\nu \sim 10^{-9} - 10^{-7} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 程度であり、等方的拡散ガンマ線フラックスおよびニュートリノフラックスに重要な寄与を与えている可能性が以前より指摘されていた³⁾⁻⁵⁾。これらの天体において、100 PeVあたりまでは pp 反応が主なニュートリノとガンマ線の生成過程であるが、非常に高エネルギーになると可視・赤外背景光および宇宙マイクロ波背景放射との py 反応が起きようになる (図1参照)。関連した例でよく知られているものが天体から逃走した超高エネルギー宇宙線陽子が銀河間空間を伝播中に作る cosmogenic ニュートリノであり、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。

もう一つの可能性は宇宙線加速器そのものである天体の内部でニュートリノやガンマ線が作られる場合である。例えば、超新星残骸からのガンマ線は宇宙線イオンとガスとの pp 反応で作られたハドロン由来のガンマ線によってよく説明される。一方、GRBやAGNなどの系外天体は非常に光度が大きいため、 py 反応が重要になってくる。多波長の電磁波観測によって光子スペクトルが観測されていれば、理論を介してニュートリノやガンマ線のスペクトルを計算することができ、GRBの場合は典型的に $\text{PeV} = 10^{15} \text{ eV}$ 程度、AGNでは PeV から EeV のニュートリノが期待される。

宇宙線イオンにより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。

$$\epsilon_\gamma Q_{\text{ev}} \approx \frac{4}{3K} \epsilon_\nu Q_{\text{ev}} \quad (1)$$

ここで Q_e は各粒子の $\ln \epsilon$ あたりのエネルギー生成量であり、 pp 反応では $K=1$ 、 py では $K=2$ である。上の式はパイオンやミュオン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元の生成スペクトルとは異なる。一般には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ことになる（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、一般にはスペクトルの詳細は天体ごとに異なったものになるだろう。最もシンプルかつ自然な可能性は、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。上の関係式をそのまま適用することができ、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い。結果のガンマ線スペクトルはほぼ普遍的なものになり、モデルの詳細には依存しない⁶⁾。

応用として、マルチメッセンジャーデータを用いて、天体で作られた高エネルギー宇宙粒子の量に一般的な上限値をつけることができる。また、重い暗黒物質が崩壊もしくは対消滅して標準模型で記述される粒子を生成する場合は暗黒物質の寿命や対消滅断面積を制限できる。筆者は2008年にオハイオ州立大学を訪問した際に関連研究を始めた。ほかの研究もしていたため、実際に論文を書いたのは2012年になってしまったが、Fermi衛星のデータとIceCubeによる観測の上限値を用いて超高エネルギーガンマ線と宇宙線の生成量、および重い暗黒物質の寿命と対消滅断面積に対する当時最新の制限を得た^{6), 7)}。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. 高エネルギー宇宙ニュートリノ発見

最初に高エネルギー宇宙ニュートリノ発見の報を得たのは、京都で行われたニュートリノ物理において最も権威のある国際会議Neutrino 2012で

のときであった。PeVのエネルギーをもつニュートリノ2事象（BertとEarnie）がIceCubeチームの石原安野氏（現 千葉大）により報告されたのである²⁾。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、われわれ理論家が期待していた値とおおよそ一致しており、非常に重要な結果である可能性を秘めていた。しかしながら、その時点での統計的有意度は3シグマ程度であり、大気ニュートリノによる雑音で説明できると考える研究者は少なくなかった。当時オハイオ州立大学に雇われていた筆者のボスであったJohn Beacom氏も重いクォークを含むメソン由来の即発大気ニュートリノによる寄与などを疑っており、筆者も解釈には慎重であった^{*1)}。

その後2012年9月に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とBahcallによる高エネルギー宇宙ニュートリノの有名な論文もここで生まれている^{9), 10)}。素粒子現象論屋を中心に、発見されたPeV領域のニュートリノについての論文はぼつぼつと出始めていたが、新しい観測結果に即座に反応して仕事をやるタイプではない筆者の腰は重かった。むしろ観測でニュートリノが見つかったなら理論屋の筆者は次に行くべきではないかという気分もあり、未発見であるGeV-TeV領域の宇宙ニュートリノ放射について専ら考えていた。

GRBが起きるためにはジェットが親星を突き破る必要があるが、親星の中にあるジェットは電磁波観測で直接見ることはできない。ニュートリノならその透過力のおかげで埋もれたジェットの性質を調べることができる（図2参照）。しかしこのようなシナリオはIceCubeによって制限がつけられていたため問題であった。筆者はKEKの

*1) 投稿中であった重い暗黒物質を制限する論文の中で、BertとEarnieを説明する場合についての議論を加えようとしたが、慎重を期して取りやめた。その後実際に暗黒物質で解釈する論文が発表されている⁸⁾。

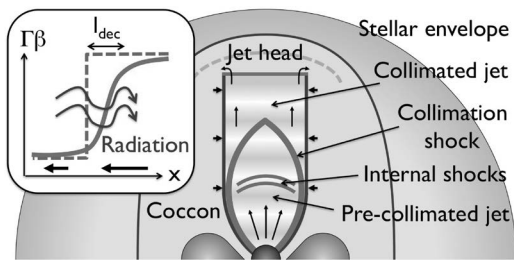


図2 埋もれたGRBジェットの構造と輻射変成衝撃波の概念図¹¹⁾.

井岡邦仁氏と共同で非熱的な高エネルギーニュートリノが効率良く作られるための一般的条件を導き、Physical Review Letter誌に発表した¹¹⁾。星の中のジェットの衝撃波は無衝突衝撃波で粒子加速が起きることを常に仮定していることが問題であり、GRBのようにジェットが強力な場合は輻射による変成が重要になって効率の良い粒子加速が起きず、TeVを超えるニュートリノがほとんど出なくなることを指摘した。このことはIceCubeによる制限とも矛盾せず、親星中での高エネルギーニュートリノ生成には低出力ジェットをもつGRBやGRBになり損ねた超新星のほうが明るいGRBより有利であるという、ナイーブな期待とは逆の示唆が得られた。一方で、GRBジェットに中性子がつままれていれば、必ず10-100 GeV領域でのニュートリノ放射が期待でき、また中性子と陽子間の変換を介して核子が非熱的なエネルギーを得るを見いだした。ペンシルベニア州立大学の樫山和巳氏とPeter Mészáros氏と共同でこの成果をPhysical Review Letter誌に2本発表した^{12), 13)}。これらはハッブルフェローのプロポーザルのテーマであった「マルチメッセンジャーで探る天体爆発現象」に沿うものであったが、当時やがてきていた筆者は高等研究所にひきこもってマニアックな研究を新しく始めようとも思い始めていた。しかしながら、それは結局プリンストンにいる間には果たせなかった。高エネルギーニュートリノが宇宙からやってきていることが確かになってきたからである。

発見されたPeVニュートリノについては暫くは傍観していたが、井岡氏との研究の副産物として低出力GRBが起源となりうる可能性を指摘した¹¹⁾。それとは独立に、当時Johnの学生であったRanjan Laha氏を中心に、オハイオ州立大学の同僚たちとIceCubeデータの検討を始めた。大気ニュートリノや最高エネルギー宇宙線と宇宙マイクロ波背景放射の相互作用で作られるcosmogenicニュートリノでデータを説明することが難しいことを自分たちでも確認し、過去に筆者らが提案したものを含むいくつかの系外天体ニュートリノの理論モデルでIceCubeのデータを無矛盾に説明できることがわかった。一方、反電子型ニュートリノと電子の共鳴反応でデータを説明することは難しく、数PeVを超えるエネルギーをもつニュートリノが見つかっていないことからスペクトルはハードなまま高エネルギーまで伸びていないこと、また100 TeVあたりでもニュートリノ信号がすぐ見つかるであろうことが示唆された¹⁴⁾。

そして2013年5月、マディソンで行われた国際会議に筆者も招待されて参加したのだが、そこでIceCubeの新しい結果が発表された。追解析でさらに26事象のニュートリノが見つかり、有意度が5シグマにいかないまでも4シグマに達したことが報告された¹⁵⁾。数十年間研究者が追い求めていた宇宙ニュートリノの信号がついに見えてきたのである。素晴らしい結果であった。ここで理論モデルを再検討しておくことは、理論家の誰かがやるべきことではあった。以前自分が作った理論モデルが確かめられるかもしれないという期待があったこと、プリンストン高等研究所がかつてBahcallらニュートリノ研究者が多く在籍していたこと、そして日本人の寄与が顕著なニュートリノ関連分野において高エネルギーニュートリノの発見でも千葉大学の吉田滋氏をはじめとした日本チームの貢献が大きかったことなどが励みになり、このタイミングで本腰を入れてIceCubeデータの理論的検討をすることに決めた。

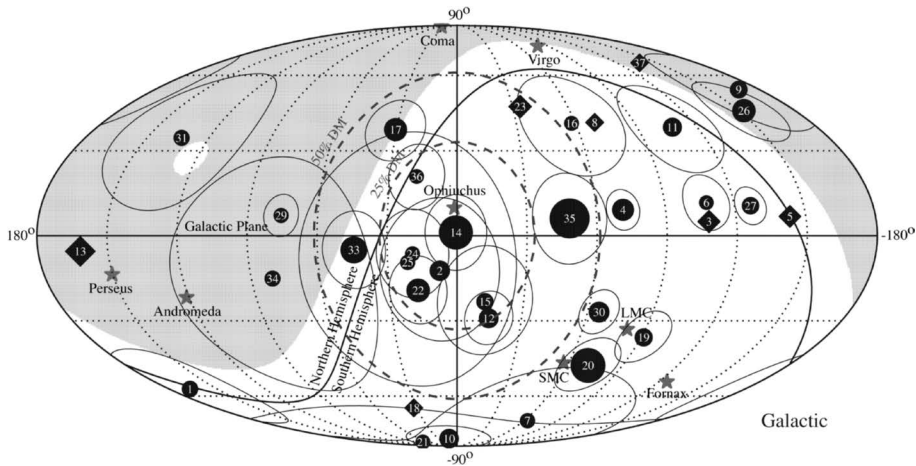


図3 IceCubeで観測された高エネルギー宇宙ニュートリノの到来方向分布^{19), 23)}.

幸運だったのは、ウィスコンシン大学でポストドクをしている Markus Ahlers 氏を以前オハイオ州立大学に招いた縁で、会議後の数日間IceCube チームのお膝元に滞在することができたことである。Francis Halzen 氏だけでなく、IceCube チームの研究者から直接データ解析の詳細などを聞くことができ、Markus と滞在中に始めた sub-PeV ガンマ線で系内起源説を検証する話はすぐに論文にまとまった¹⁶⁾。また帰りの飛行機の中で、以前より重要だと思っていた Fermi 衛星のガンマ線データ¹⁷⁾ が思っていたよりも強力であることに気づき、それもさくっと論文にした¹⁸⁾。必要な数値計算データを過去に作っていたので、機内で結果を得ることができた。その翌週から日本に出張だったが、Ranjan との論文、井岡氏とのレター論文を合わせて4本を書き上げた（うち1本はIceCube グループの許可を得る必要があったために投稿は3カ月後になってしまったが）。うち三つはIceCube の宇宙ニュートリノ発見を受けて発表された理論論文の中でも最も引用が高いものとなり、国際会議やセミナーへ招待される頻度が一気に増え、翌年ボストンで行われた Neutrino 2014 で招待講演をする機会を得ることができた。また時期を同じくしてペンシルヴァニア州立大学

助教のオファーをもらうことができた。

4. これまでに得られた示唆

これまでのIceCubeの観測で得られた結果をまとめると以下ようになる。(a) $\sim 0.1\text{--}3\text{ PeV}$ 領域で拡散ニュートリノスペクトルのエネルギーフラックスは $E_\nu^2 \Phi_\nu \sim 3 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 程度である^{2), 15), 19)}。ニュートリノのべき指数を $\Phi_\nu \propto E_\nu^{-s}$ で定義すると、3年のデータの解析で得られたニュートリノスペクトルのべき指数は $s=2.3$ 程度になる¹⁹⁾。ハードなスペクトル ($s \sim 2$) を仮定すると数PeVあたりでスペクトルの折れ曲がりが必要である。上向きミューオン型ニュートリノについてのデータ解析もこれと無矛盾な結果が得られており、100 TeVを超える高エネルギー側でハードなスペクトルが報告されている²⁰⁾。一方、より低エネルギーのニュートリノに注目した粒子シャワー事象の解析ではソフトなスペクトル ($s \sim 2.5$) が示唆されている²¹⁾。(c) 宇宙ニュートリノの到来方向は等方分布と無矛盾である^{15), 19)} (図3参照)。現時点で有意なニュートリノ源は見つかっていない。1度程度の角度分解能をもつ上向きミューオン型ニュートリノの解析でも同様の結果が得られている^{20), 22)}。(d) ニュートリノの

世代数が3であるとする、電子型ニュートリノ、ミューオン型ニュートリノ、タウ型ニュートリノのフレーバー比は1:1:1と無矛盾である²¹⁾。IceCubeの結果を受けたわれわれによる一連の研究で得られた結果をまとめると以下になる。(a) ニュートリノが宇宙線によって作られているならば、起源天体で陽子が100 PeVくらいまで加速される必要がある。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、普通の超新星残骸よりも強力な宇宙線加速天体が関わっていることを示唆している。またsecond kneeと呼ばれる100 PeV付近の宇宙線スペクトルの折れ曲がりでは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近年盛んに議論されているが、われわれの過去の研究でも期待されたようにニュートリノがそのヒントを与える可能性がある¹⁸⁾。(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もしくは銀河中心への有意な集中が見られないことだけでなく、地上のガンマ線検出器および空気シャワーアレイによる $\text{TeV}=10^{12}$ eVを超えるエネルギーでの拡散ガンマ線フラックス観測からも支持される¹⁶⁾。拡散ニュートリノフラックスは拡散TeV-PeVガンマ線フラックスの上限値と同程度であり、銀河面や銀河ハローに一樣に広がった源のみですべてのニュートリノ信号を説明することは困難である。ただし、現在までに観測された高エネルギーニュートリノの多くは南半球からの粒子シャワー事象であり、拡散ガンマ線の制限の多くは北半球にある検出器によるものであることに留意する必要がある。(c) 拡散ニュートリノフラックスは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¹⁷⁾と同程度である。拡散ニュートリノの起源が宇宙線貯蔵庫天体のようにニュートリノとハドロン由来のガンマ線を共に放射する場合、高エネルギーニュートリノのスペクトルは $s=2.1$ から $s=2.2$ よりもハードでなければならない、ニュートリノ源は等方的拡散ガ

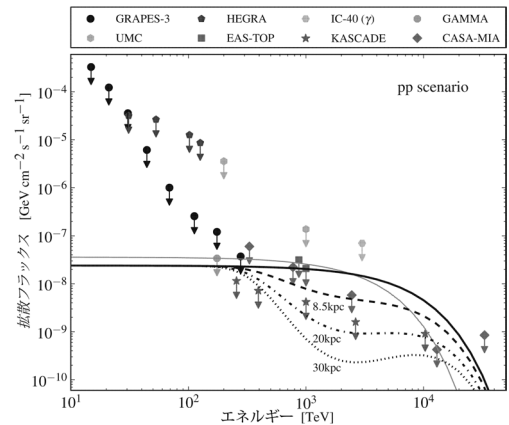


図4 系内起源の場合の拡散ニュートリノと等方的拡散ガンマ線のフラックス¹⁶⁾。ニュートリノとガンマ線は pp 反応で作られるとし、銀河ハローなどほぼ等方的な源を仮定した。

ンマ線フラックスに30%以上の寄与を与える¹⁸⁾。(d) 高エネルギーミューオン型ニュートリノのデータに自己相関も既知の天体との相関が見られないことから、起源天体は銀河やあまり重くない銀河団のような比較的ありふれた天体でなければならない(数密度にして $\geq 10^{-7} \text{ Mpc}^{-3}$)。例えばクエーサー型のブレイザーや $10^{15} M_{\odot}$ を超える重い銀河団だけで観測されたニュートリノをすべて説明しようとする点源が見つからないことと矛盾する。(e) 拡散ニュートリノフラックスの大きさは最高エネルギー宇宙線を加速する天体が最大効率でニュートリノを生成した場合に期待される拡散ニュートリノフラックス^{10), 24)}と同程度である。これは超高エネルギー宇宙線の起源との関連を示唆しているかもしれないし全くの偶然かもしれない。(f) ニュートリノフレーバー比は天体内での pp 反応や py 反応により作られたニュートリノが真空伝搬中に混合した結果と矛盾しない。ニュートリノの素粒子的性質にも制限を与える。例えば、ニュートリノの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播中に崩壊しているというようなことは起きていない。

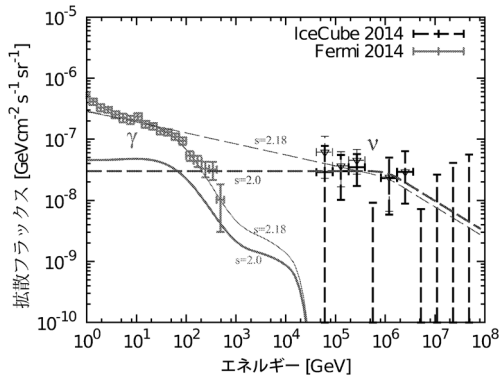


図5 系外起源の場合の拡散ニュートリノと等方的拡散ガンマ線のフラックス¹⁸⁾。ニュートリノとガンマ線は pp 反応で作られると仮定し、ガンマ線については電磁カスケードの効果を考慮してある。宇宙線貯蔵庫シナリオにおいて許されるパラメーター領域は僅かであることがわかる。

拡散フラックスが見つかったとき、素朴の疑問の一つはそれが系内か系外という問いであろう。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一番自然であるが、それは拡散ガンマ線の観測からも支持されることがわかった¹⁶⁾。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 $\gamma\gamma$ 反応で遮られることなく、地球まで到達できる。したがって観測された拡散ニュートリノフラックスと同程度の拡散ガンマ線フラックスが期待されるが、現在まで拡散TeV-PeVガンマ線は見つかっていない(図4参照)。IceCubeのミュオン型ニュートリノの解析からも系内天体の拡散ニュートリノフラックスへの寄与が部分的であるという結果が得られている²²⁾(もちろん系内天体の寄与が全くないという意味ではない)。応用として重い暗黒物質の崩壊がある。高エネルギーニュートリノの起源についての論文は数だけでいうなら、暗黒物質関連が一番多いかもしれない。われわれはマルチメッセンジャーデータを用いた暗黒物質の崩壊シナリオの検証方法について調べ、結果はPhysical Review Letters誌のEditors' Suggestions

にも選ばれた²³⁾。

次に起源として系外天体を考える。ニュートリノとハドロン由来のガンマ線をそのまま放射するような「自然な」源では、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で観測された拡散ガンマ線フラックスデータと直ちに矛盾する¹⁸⁾。一方で宇宙線貯蔵庫天体からのニュートリノはLoebとWaxman, そしてわれわれのグループによってハードなスペクトルを持つことが予測されていた³⁾⁻⁵⁾。不定性は大きいだが、観測された0.1 PeV以上の拡散ニュートリノフラックスはこれらのモデルと矛盾しない。スターバースト銀河ではボーム極限に近い乱流が必要になる、銀河群銀河団ではVirgo中心のM87くらいしか対応するガンマ線候補天体が見えていないなど、理論的な問題は多々あるが、数PeVでのニュートリノスペクトルの折れ曲がりが見られていたことは魅力的な点である。低エネルギーの宇宙線では拡散が無視でき、ハードなスペクトルが予言される一方、高エネルギーでは拡散が効き、拡散係数に依存してスペクトルが急になる。ニュートリノとガンマ線を同時に説明してしまうという過激なモデルも作ることができる¹⁸⁾。

宇宙線貯蔵庫天体のような「自然な」源が宇宙ニュートリノの起源であるならば、統計を増やしたときハードなニュートリノスペクトルが得られるかどうかを見ればよく、それには10-100 TeV領域のデータが重要となる。われわれの予測どおり、ニュートリノスペクトルのべき指数決定が可能になるに従い、宇宙線貯蔵庫シナリオの検証がされるようになってきた。IceCubeによる最新の解析結果を信じてその解釈を単純にすると、100 TeV以下でニュートリノスペクトルはソフトであり、 pp であれ py であれ拡散ニュートリノの起源はガンマ線が源からそのまま抜け出すようなタイプの天体ではないという示唆が得られる²⁵⁾。特に高エネルギーニュートリノが py 反応で作られているな

らば、 py 反応の標的光子は $\gamma\gamma$ 反応の標的光子にもなるため、GeV–TeV領域のガンマ線は源から抜け出ることを妨げられる。つまり、マルチメッセンジャーデータからは高エネルギーニュートリノ起源としてGeV–TeVガンマ線では暗い、「隠れた」宇宙線加速器が好まれることになる²⁵⁾。現状では100 TeV以下で系内天体の寄与が無視できない可能性も完全には否定できない。宇宙線スペクトルのknee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の起源が移り変わっていてもよい。しかし、拡散ガンマ線観測やミュオン型ニュートリノ観測の制限もあるため、フェルミバブルのような広がった源が何か謀ったように系外天体と同程度の寄与を与えるというようなモデルを考える必要がある。

以上は一般的な議論であるが、GRBやブレーザーのような明るい天体ではさらに強い制限が得られている。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、その結果 $E_{\nu}^2\Phi_{\nu}\sim 3\times 10^{-9}\text{ GeV cm}^{-2}\text{ s}^{-1}\text{ sr}^{-1}$ という強い制限がついている²⁶⁾。したがって、現時点で拡散ニュートリノの主要な起源である可能性はすでに棄却されている^{11), 14)}。しかしながら、近年の観測で低光度GRBや超長時間GRBなど、通常の高光度GRBとは異なる種族に属すると考えられるGRBが見つかってきた。これら比較的暗いGRBの大部分は現在稼働中のGRB衛星では検出できないため、通常の高光度GRBに対する制限は適用されない。実際、IceCubeの発見以前にわれわれが提案した低光度GRBのモデルが予言する拡散ニュートリノフラックスはIceCubeデータと無矛盾である²⁷⁾。また埋もれたジェットも隠れた宇宙線加速器の一つとして拡散ニュートリノフラックスを説明することができる¹¹⁾。しかし、これらの理論モデルは不定性が大きく、検証にはこれらのGRBや超新星を多数観測して理解することが不可欠であるため、広視野のX線モニターが待ち望まれる。

AGNはどうだろう？ ブレーザーはガンマ線で見た空では最も明るい天体の一つで、有力なニュートリノ源と考えるのはある意味自然な発想であるといえよう。しかし、これまでに提案されている理論モデルの多くは近傍AGNとの相関やニュートリノイベントの自己相関解析から棄却されたり強く制限されている。またかなりハードなスペクトルが理論的に予言されているため、数PeV以上でニュートリノが見つかっていないことと矛盾する²⁸⁾。そして100 TeV以下のニュートリノデータを上手く説明できない²⁹⁾。また議論の余地はあるが、以上三つのことから拡散ニュートリノフラックスをブレーザーだけで説明するのは無理があるように思われる。一方でAGNのコア領域でニュートリノが作られている可能性は残されている^{30), 31)}。AGNコロナや低光度AGNの降着円盤中で起きた磁気リコネクションや乱流加速、ブラックホール近傍のギャップでの電場加速で高エネルギー粒子が加速されている可能性があり、 pp 反応や py 反応によってニュートリノが効率良く作られている可能性がある。これらコア領域も隠れた宇宙線加速器の一つとして拡散ニュートリノフラックスを説明することはできるがモデルの不定性が大きく、検証には硬X線からMeVガンマ線での観測の進展が必要になるだろう。

5. 新しい謎と古い謎：今後の期待

高エネルギーニュートリノが発見されたことにより、「宇宙ニュートリノの起源」という新しい問題が提起された。これまでに提案されていた理論モデルもニュートリノのデータと突き合わせて検証する段階に入った。上限値ではなく観測された高エネルギーニュートリノデータを用い、マルチメッセンジャーアプローチが有効であることをわれわれは示した。その後定量的な議論が急速に進みつつある。

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、100 GeV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の寄与が入り込む余地は必然的に少なくなり、べき指数への制限はさらに厳しくなると予測された。われわれの指摘以降、実際にこのような解析が進んでいる。Fermi チームによる拡散ガンマ線フラックスの見積もりを信じると、 $s \sim 2$ より急なスペクトルは許されない。同様の結果が、等方的拡散ガンマ線フラックスの非等方性の解析からも示唆されている。また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もつガンマ線源として観測されるはずである¹⁸⁾。これらのことから宇宙線貯蔵庫天体が拡散 PeV ニュートリノの主要な起源であるかどうかは今後の研究で確実に検証できるだろう。

TeV-PeV エネルギーでの広視野ガンマ線観測も重要である。フェルミバブルなど空間的に広がった系内天体が拡散ニュートリノに無視できない寄与をしていれば、High-Altitude Water Cherenkov Observatory (HAWC) やチベット空気シャワーアレイなどの広視野ガンマ線望遠鏡で近い将来検出することができる¹⁶⁾。またわれわれの研究によって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であることが示された。いずれにせよ、拡散ニュートリノの起源が自然な源ならばガンマ線のデータで検証でき、その証拠が見つからなければ隠れた宇宙線加速器起源説をさらに支持することになる²⁵⁾。この場合は天体内部のプローブとしてのニュートリノの重要性がいっそう増すと期待される。

マルチメッセンジャーアプローチがその真価を発揮し、高エネルギーニュートリノ天文学が本当の意味で始まるためにはやはり個々のニュートリノ源を見つけてやる必要がある。もちろん拡散ニュートリノの起源天体が IceCube で見つかる保

証はないが、体積にして IceCube を約 10 倍拡張した IceCube-Gen2 が提案されており、これが実現すればニュートリノ源が見えてくる可能性は高い。またヨーロッパで計画されている KM3Net は、南半球からの上向きミュオン型ニュートリノを通して、100 TeV 以下での系内成分の寄与を調べたり、knee エネルギーまで陽子を加速する系内天体を探すのに有効である。楽観的かもしれないが、ガンマ線天文学の黎明期がそうであったように、ニュートリノ源が見つかって「あの天体で宇宙線イオンが加速されているのね…」と言い合える日はそう遠くないと筆者は信じている。

運に左右される要素が大きいものの、GRB や AGN のフレアに伴うニュートリノが IceCube で見つかる可能性もありうる。この場合大気ニュートリノや大気ミュオンの雑音を大幅に取り除くことができるため、TeV 領域のニュートリノ信号を捕まえられる可能性がある。IceCube にある Deep-Core 検出器、現在計画中のハイパーカミオカンデや PINGU 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。筆者自身は、超新星のショックブレイクアウト前後での粒子加速³²⁾、隠れたジェット¹¹⁾ や誕生直後のパルサー風³³⁾ についての研究に最近は力を入れている。ニュートリノをトリガーとして積極的に用いることで電磁波でフォローアップ観測を行う野心的な試みも始まっている。PeV を超えるニュートリノはたった 1 事象でも統計的有意度が高くそれが大気雑音である確率は低い。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は近年急速に進んでおり、筆者の所属するペンシルヴァニア州立大学を中心に、Astrophysical Multi-messenger Observatory Network (AMON) というネットワークが構築されつつある。IceCube だけでなく、Advanced LIGO などの重力波観測とも連携しており、今後の成果が期待される。

さて、冒頭に述べたように、高エネルギー

ニュートリノ観測の大きな動機の一つは「宇宙線の起源」という古い謎の解明であった。そして、観測された拡散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拡散ニュートリノフラックスの自然な上限値に近い。これはニュートリノ、ガンマ線、宇宙線すべてが同一の起源であることを示唆しているのではあるだろうか？ 実際このような大統一モデルを作ることは可能であるのだが、データを定量的に見ていくと事はそう単純ではない。超高エネルギー宇宙線源由来のニュートリノについて、 $s=2$ における拡散フラックスへの上限値はいわゆる Waxman-Bahcall 上限と呼ばれるものである¹⁰⁾。しかし、観測されたニュートリノスペクトルは $s=2$ で高エネルギーまで伸びてはいないため、宇宙線加速器天体では上手くいかない。また、超高エネルギー宇宙線は陽子とは限らず、原子核が支配的である可能性が Auger の観測で示唆されている。この場合の拡散ニュートリノフラックスにはわれわれが2010年に導いた原子核生存上限に従う²⁴⁾。 $s=2.3$ (3年の IceCube データでの最適値) の場合の原子核生存上限は観測された拡散ニュートリノフラックスとほぼ一致するが、これが単なる偶然か理由があるのかも明らかではない。

超高エネルギー宇宙線起源の同定には、100 PeV から $EeV=10^{18}$ eV に達する超高エネルギーニュートリノの観測をするほうがより直接的である。千葉大学の吉田滋氏らのグループを中心に IceCube チームによって cosmogenic ニュートリノ探索が精力的に進められている。また、Askaryan Radio Array (ARA) や Giant Radio Array Neutrino Detector (GRAND) など電波観測を利用した計画が進んでおり、超高エネルギーニュートリノ検出器の感度は今後大幅に改善されていくだろう。筆者自身、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計算を行ってきたが、それらのモデルも近い将来検証できる。超高エネルギー宇宙線は GRB や AGN をはじめかなり

強力な天体でないと作ることができないため、ニュートリノ源の数も限られていると考えられる。信号が cosmogenic ニュートリノでなければ、超高エネルギー宇宙線の起源天体を同定することも夢ではない。

6. おわりに

本稿では高エネルギーニュートリノ発見を巡る最近の話題を式などを使わずに簡単に紹介した。高エネルギーニュートリノの起源はまだわかっておらず、高エネルギーニュートリノ天文学が始まった、とはっきり言い切るにはもう少し時を待たねばならないかもしれない。しかし、理論屋が期待したレベルの拡散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さまざまな天体物理学的な議論ができるようになった意義は非常に大きい。そして、ニュートリノの起源という新しい謎の解明は宇宙線起源という古い謎の解明にもつながっている。今までの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 (気が早すぎると思われるかもしれないが、筆者は「多エネルギーニュートリノ観測」が可能になることも期待している)。HAWC や CTA などによるガンマ線天文学の成熟と合わせて、宇宙線加速天体への興味深い知見が得られていくだろう。そしてそれはおそらく驚きとともに。

今年はスーパーカミオカンデによる成果で梶田先生がノーベル賞を受賞されたという非常に嬉しいニュースが飛び込んできた。ニュートリノといえば、2002年にもカミオカンデの成果で小柴先生がノーベル賞を受賞されている。筆者はそのとき学部生で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興味をもち研究を始める大きな動機の一つとなった。そのミステリアスな性質やイオン加速のスモッキングガンとしての明快さが気に入って高エネルギーニュートリノの研究を始めたはいいが、大気ニュートリノではない宇宙

起源の信号が見つかる保証はなく、(就職的な意味で)この先大丈夫? と心配してくれる方もいた。学会で発表しても質問が出ないことが多かった。もちろんほかの研究もしていたが、プリンストンでの任期が終わった時点で次がなければ潔く業界から身を引くべきかと考え始めていた。そういった時期に高エネルギーニュートリノが発見され、状況が一気に変わった。しかるべきときに場所にも人にも恵まれていたのは幸運であったように思う。

梶田先生が「ニュートリノに感謝したい。ニュートリノは宇宙線がつくるもので、宇宙線にも感謝したい。」とおっしゃっていた。その宇宙線をつくったものがある。しかし感謝する相手が何者なのかわれわれはいまだよく知らない。それでは寂しいものがあるのでいつかは直接お礼が言いたいものだ。今後関連分野に貢献できることを期待して、本稿の結びとしたい。

謝 辞

本稿は2014年度の研究奨励賞の受賞により執筆をさせていただきました。ここで紹介させていただいた筆者の研究は、数々の共同研究者の皆さまの協力なくては到底なしえなかったものです。この場を借りてすべての共同研究者の皆さまに深く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Reines F., 1960, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 10, 1
- 2) IceCube Collaboration, 2013, Phys. Rev. Lett. 111, 021103
- 3) Loeb, A., Waxman, E., 2006, JCAP 05, 003
- 4) Murase K., Inoue S., Nagataki S., 2008, Astrophys. J. 689, L105
- 5) Kotera K., et al., 2009, Astrophys. J. 707, 370
- 6) Murase K., Beacom J. F., Takami, H., 2012, JCAP 08, 030
- 7) Murase K., Beacom J. F., 2012, JCAP 10, 043
- 8) Feldstein B., et al., 2013, Phys. Rev. D 88, 015004
- 9) Waxman E., Bahcall J. N., 1997, Phys. Rev. Lett. 78, 2292
- 10) Waxman E., Bahcall J. N., 1998, Phys. Rev. D 59, 023002
- 11) Murase K., Ioka K., 2013, Phys. Rev. Lett. 111, 121102
- 12) Murase K., Kashiyama K., Mészáros P., 2013, Phys. Rev. Lett. 111, 131102
- 13) Kashiyama K., Murase K., Mészáros P., 2013, Phys. Rev. Lett. 111, 131103
- 14) Laha R., et al., 2013, Phys. Rev. D 88, 043009
- 15) IceCube Collaboration, 2013, Science 342, 1242856
- 16) Ahlers M., Murase K., 2014, Phys. Rev. D 90, 023010
- 17) Ackermann M., 2015, Astrophys. J. 799, 86
- 18) Murase K., Ahlers M., Lacki B. C., 2013, Phys. Rev. D 88, 121301
- 19) IceCube Collaboration, 2014, Phys. Rev. Lett. 113, 101101
- 20) IceCube Collaboration, 2015, Phys. Rev. Lett. 115, 081102
- 21) IceCube Collaboration, 2015, Astrophys. J. 809, 98
- 22) Ahlers M., et al., 2015, arXiv: 1505.03156
- 23) Murase K., et al., 2015, Phys. Rev. Lett. 115, 071301
- 24) Murase K., Beacom J. F., 2010, Phys. Rev. D 81, 123001
- 25) Murase K., Guetta D., Ahlers M., 2015, arXiv: 1509.00805
- 26) IceCube Collaboration, 2012, Nature 484, 351
- 27) Murase K., et al., 2006, Astrophys. J. 651, L5
- 28) Murase K., Inoue Y., Dermer C. D., 2014, Phys. Rev. D 90, 023007
- 29) Dermer C. D., Murase K., Inoue Y., 2014, JHEAp 3, 29
- 30) Stecker F. W., 2013, Phys. Rev. D 88, 047301
- 31) Kimura S. S., Murase K., Toma, K., 2013, Astrophys. J. 806, 159
- 32) Murase K., Thompson T. A., Lacki B. C., Beacom J. F., 2011, Phys. Rev. D 84, 043003
- 33) Murase K., Dasgupta B., Thompson T. A., Phys. Rev. D 89, 043012

High-Energy Cosmic Neutrinos and Dawn of Multimessenger Particle Astrophysics Kohta MURASE

Department of Physics; Department of Astronomy & Astrophysics, Penn State University, University Park, PA 16802, USA

Abstract: The field of high-energy particle astrophysics has rapidly grown in the recent years. Multimessenger approaches, using photon, neutrino, charged particle, and gravitational wave observations, have become feasible. The discovery of high-energy cosmic neutrinos in IceCube is one of the major achievements in astroparticle physics. Since neutrinos can now be used as one of the cosmic messengers, we start to obtain important clues to various mysteries of cosmic rays including ones about extragalactic cosmic-ray accelerators. In this article, I summarize the latest developments and future prospects of high-energy particle astrophysics.