

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、それを生かし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。イオン加速のスモー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を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。

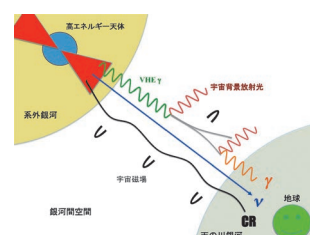
—Keywords—

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。