

観測史上最高エネルギー宇宙ガンマ線の検出 ——銀河系宇宙線の加速限界にせまる

川田 和正 〈東京大学宇宙線研究所 kawata@icrr.u-tokyo.ac.jp〉

大西 宗博 〈東京大学宇宙線研究所 ohnishi@icrr.u-tokyo.ac.jp〉

佐古 崇志 〈東京大学宇宙線研究所 tsako@icrr.u-tokyo.ac.jp〉

瀧田 正人 〈東京大学宇宙線研究所 takita@icrr.u-tokyo.ac.jp〉

宇宙線は宇宙から等方的にやって来る陽子を主成分とする高エネルギーの原子核である。1912年の宇宙線発見以来、そのエネルギースペクトルは10桁以上にわたり観測されてきたが、その起源、加速機構や伝播など多くの謎が残されている。宇宙線スペクトルは冪関数で表されるが、最も顕著な特徴は4 PeV (=4,000 TeV) 付近の折れ曲がりであり、そのエネルギー以上で宇宙線フラックスの減少割合が高くなる。

この観測結果から、少なくともPeV付近までの宇宙線は銀河系内の天体、例えば超新星残骸で加速されていると考えられてきた。しかし、宇宙線をPeV付近に加速できる「ペバトロン」と名付けられた天体の探索が長年続けられてきたが、そのような天体の正体はいまだ不明である。

荷電粒子である宇宙線は銀河磁場によって曲げられ到来方向を失うため起源の特定は難しいが、直進するガンマ線はそれを可能にする。PeV宇宙線は起源天体近くの分子雲と衝突すると、宇宙線エネルギーの約10% (=100 TeV) をもつガンマ線を放射するため、100 TeV以上のガンマ線観測はペバトロン特定の強力な手段となる。しかし、これまでに実験的に知られている銀河系内天体における宇宙線の加速限界は、超新星残骸のガンマ線観測から0.01 PeV程度であり、ペバトロンの加速エネルギーには全く達していない。

Tibet ASy 実験は、中国チベット自治区の高原(標高4,300 m)に設置された空気シャワー観測装置により広視野で宇宙線・ガンマ線の観測を行っている。高エネルギーガンマ線(または宇宙線)は、大気中

で「空気シャワー」と呼ばれる粒子カスケードを起こし、シャワー状に粒子が地上に降り注ぐ。この空気シャワー中の粒子を、多数の粒子検出器からなる空気シャワー観測装置で捉え、元のガンマ線のエネルギーと到来方向を決定する。また、ガンマ線信号に対して雑音となる宇宙線を排除するために、空気シャワーに含まれるミュオンを利用する。空気シャワー中に含まれるミュオン数を測定するために、ミュオン以外の粒子が十分吸収される地下に、約3,400 m²の水チェレンコフ型ミュオン観測装置が建設された。ガンマ線起源の空気シャワー中のミュオン数は、宇宙線起源のそれと比べて極端に少ないため、ガンマ線と宇宙線の選別が高精度で可能になった。

これにより、100 TeV以上で宇宙線雑音を1,000分の1に減らすことに成功し、超新星残骸/パルサー星雲である「かに星雲」から世界で初めて100 TeVを超えるガンマ線を統計的有意に観測した。ガンマ線の最高エネルギーは450 TeVにも達し、当時観測史上最も高いエネルギーのガンマ線の検出に成功した。これは、PeV近くまで加速された電子が低エネルギーの光子を叩き上げる逆コンプトン散乱によってガンマ線が放射されていると考えて矛盾がなく、宇宙線の起源とは言えなかった。しかしその後、超新星残骸「G106.3+2.7」と分子雲の方向が重なる場所からも100 TeVを超えるガンマ線の観測に成功した。これは、PeV宇宙線が分子雲と衝突して発生した中性パイ中間子の崩壊を通してガンマ線が発生したと考えるのが自然であり、ペバトロンの有力な候補の発見となった。

用語解説

ペバトロン (PeVatron) :

PeV (=10¹⁵ eV) 以上に宇宙線陽子を加速できる宇宙に存在する天然粒子加速器。いくつかの超新星残骸や星形成領域などが候補となっている。TeV (=10¹² eV) の陽子を生成できるアメリカの人工粒子加速器「テバトロン (Tevatron)」に因んで名付けられた。

空気シャワー (Air Shower) :

宇宙線は、大気上層の窒素原子核などと衝突して多数のパイ中間子を発生させる。これら中性/荷電パイ中間子を起点として、大気中で電子・陽電子・ガンマ線・ミュオンなど多数の二次粒子が発生し、地上にシャワー状に降り注ぐ。一方で、ガンマ線の場合は、原子核の近くで電子対生成を起こし純度の高い電子・陽電子・ガンマ線の空気シャワーとなる。図はモンテカルロ (MC) シミュレーションで再現された宇宙線起源の空気シャワー粒子の飛跡 (Tibet ASy 実験グループ提供)。

