

超新星残骸は宇宙線の起源か？



内山 泰伸

立教大学理学部物理学科
y.uchiyama@rikkyo.ac.jp



田中 孝明

京都大学理学研究科物理学
第二教室
ttanaka@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp



田島 宏康

名古屋大学・宇宙地球環境
研究所
tajima@nagoya-u.jp

宇宙線とは、宇宙の彼方から地球に飛来する高エネルギー粒子であり、発見以来100年以上経つ現在もその起源は未解決の問題である。数1,000テラ電子ボルト以下のエネルギーの宇宙線は銀河系内に起源を持つと考えられ「銀河宇宙線」と呼ばれている。銀河宇宙線は星間空間において恒星の形成に直接的な影響を与えるなど、銀河の構造とその進化にも重要な役割を果たしている。

銀河宇宙線の大部分は高エネルギー陽子であり、宇宙線陽子1個の平均エネルギー約10ギガ電子ボルトは百兆度の温度に相当する。しかし、宇宙線は通常の意味での温度を持たない。宇宙線のエネルギー分布は、熱的なマクスウェル分布ではなく、ベキ関数分布に従っていて、とてつもなく高いエネルギーを持つ粒子が観測されている。銀河系外から飛来する宇宙線の最高エネルギーは100エクサ電子ボルト (10^{20} eV)にも達し、LHC (大型ハドロン衝突型加速器) よりも7桁も上である。

銀河系外から到来する宇宙線の起源としては、活動銀河核すなわち銀河の中心部にある超巨大ブラックホールが候補天体としてあげられるが、今のところ、説得力のある証拠は得られていない。一方、銀河宇宙線については「超新星残骸起源説」が標準的な学説として広く受け入れられている。超新星残骸の衝撃波において銀河宇宙線が加速されているとする説である。

恒星の壮絶な最期である超新星爆発の結

果、恒星を構成していた物質は超音速で星間空間を膨張し、超新星残骸を形成する。超音速で膨張する爆発放出物によって駆動された無衝突衝撃波が、宇宙線加速の現場だと考えられている。実際、超新星残骸の衝撃波において、少なくとも10テラ電子ボルトまで高エネルギー電子が加速されていることが人工衛星によるX線観測からわかってきた。しかし、これまでは宇宙線の主成分である高エネルギー陽子が加速されている証拠を得ることができていなかった。

2008年に打ち上げられたフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡のLarge Area Telescope (LAT) 検出器によるガンマ線観測の結果、超新星残骸において宇宙線陽子が加速されている明確な証拠がついに得られた。特に分子雲と衝突している超新星残骸からは強いガンマ線放射が検出され、それが中性パイ中間子の崩壊ガンマ線であることが高精度なスペクトル測定から確認された。超新星残骸のガンマ線観測の結果から、宇宙線のエネルギー総量を推定することが可能になり、超新星爆発の運動エネルギーの数パーセントが宇宙線のエネルギーに移行していることがわかった。フェルミ衛星によるガンマ線観測により、銀河宇宙線の超新星残骸起源説を裏付ける結果が得られたが、決定的な検証は2020年代に本格稼働する次世代の大気チェレンコフ望遠鏡 Cherenkov Telescope Array (CTA) によって可能となるだろう。

—Keywords—

超新星残骸：

超新星爆発によって形成される数光年から数十光年の大きさの高速膨張するガス雲。銀河系内では300個程度の超新星残骸が見つかっている。

無衝突衝撃波：

粒子間の運動量・エネルギーの交換がクーロン衝突ではなく、主に電磁場の波動を介して行われる衝撃波を無衝突衝撃波という。宇宙線の生成に重要な役割を果たす。

フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡：

米国、日本、イタリア、スウェーデン、ドイツによる国際共同プロジェクトとして2008年に打ち上げられたガンマ線観測衛星。20メガ電子ボルトから300ギガ電子ボルトのエネルギーを持つガンマ線を測定する大面積望遠鏡 (Large Area Telescope: LAT) が主検出器として搭載されている。LATには広島大学と浜松ホトニクスが開発した大面積半導体シリコンストリップセンサーが使われている。パルサー (高速回転する中性子星) やブラックホールの相対論的ジェットなど様々な天体からの高エネルギーガンマ線を観測し続けている。

中性π中間子の崩壊ガンマ線：

宇宙線原子核 (主に高エネルギーの陽子) と星間空間の原子核の非弾性衝突で生成される中性のπ中間子は直ちにガンマ線に崩壊する。π中間子は宇宙線のエネルギーを反映した大きいエネルギーを持つため、その崩壊ガンマ線は大きなドップラー幅を持ち、ガンマ線スペクトルに連続成分として現れる。日本の早川幸男が星間物質からの中性π中間子崩壊ガンマ線の検出を提唱し、後にガンマ線天文学が生まれることになった。