# 超新星残骸は銀河宇宙線の加速源か? ―最新の高エネルギー観測からの示唆-



### 鈴木寛大

〈宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉 e-mail: hiromasa050701@gmail.com

銀河系内で加速されていると考えられる~10<sup>15</sup> eV以下の宇宙線:銀河宇宙線の加速源として有 力視される超新星残骸の高エネルギー放射を捉えることで,本当に銀河宇宙線を説明できるだけの 加速性能があるかどうかを調査している.ガンマ線と非熱的X線放射は主に加速された粒子たちの 情報を示し,熱的X線放射は加速環境の情報を与える.我々は多数の超新星残骸の系統解析によ り,現在の超新星残骸には10<sup>15</sup> eVまで加速できるほど加速性能がよいものはほぼ皆無だが,爆発 からおよそ10年以内のごく短い期間に10<sup>15</sup> eVまで達する高い性能をもっていた可能性があること を示した.また,加速性能の強い環境依存性を明らかにし,どのような物理量が加速性能を決定し ているのか,現在も調査を続けている.これからの精密X線分光撮像や高解像度ガンマ線観測の時 代の展開に期待したい.

# 銀河宇宙線はどこから来るのか? 有力候補としての超新星残骸

NASAの宇宙飛行士が宇宙に滞在できる期間は, 規定により生涯の通算でおよそ2-3年間に制限さ れる.これは宇宙線と呼ばれる高エネルギー荷電 粒子の被曝を受けるためである.宇宙線は~10<sup>9</sup> eV (ギガ電子ボルト:GeV)から~10<sup>20</sup> eVまでべき 関数状のエネルギー分布をもち,~10<sup>15</sup> eV (ペ タ電子ボルト:PeV)を境に,それより低いエネ ルギーのものは銀河系内,高いエネルギーのもの は銀河系外が起源であると考えられている.その ため低エネルギー側の宇宙線は銀河宇宙線と呼ば れる.銀河宇宙線をなす粒子はほとんどが陽子で あり,次にヘリウム,そして太陽組成に近い比率 の重元素(例えば鉄)まで含んでいる.宇宙から 放射線が降り注いでいるという事実が明るみに なったのは1912年,オーストリアの物理学者へ ス(Victor F. Hess)による気球実験にさかのぼ るが,それから100年以上が経過した現在でも, 宇宙線がどこで作られているかははっきりしな い.それゆえ宇宙線起源の問題は,しばしば宇宙 物理学最大の問題のひとつに数えられる[1].

超新星は星の進化の最終段階に起きる大爆発で あり、 $E_{kin} \sim 10^{51} \text{ erg}$ という膨大な運動エネルギー をもつ爆発噴出物が

$$\approx 5000 \,\mathrm{km \, s}^{-1} \left( \frac{E_{\mathrm{kin}}}{10^{51} \,\mathrm{erg}} \right)^{0.5} \left( \frac{M_{\mathrm{ej}}}{1 \,M_{\odot}} \right)^{-0.5} \,(1)$$

 $(M_{ei}$ は噴出物の質量)の速さで飛び出し,星間 空間の音速~ $10 \text{ km s}^{-1}$ を超えて衝撃波を起こす. 衝撃波は星間物質を急激に加熱する一方,荷電粒 子を熱的分布からはるかに逸脱させる「加速器」 としても働くことがわかっているが,それらの物



図1 (左)超新星残骸の宇宙線加速,X線・ガンマ線放射の描像と(右)ガンマ線放射スペクトルの例. 左図の画像 は超新星残骸SN 1006のX線画像.右図では爆発年代が異なる4つの天体について示した [2-4].

理過程には不明な点も多い.加速器として期待さ れる性能や宇宙線の元素組成との整合性の観点か ら、銀河宇宙線起源の有力候補は超新星残骸の衝 撃波面であると広く信じられている. 衝撃波周辺 に存在する光速に近い荷雷粒子は、衝撃波周辺の 磁場に散乱されながら上流側と下流側を行き来 し、そのたびに少しずつエネルギーを獲得してい く(図1左の描像).結果,理想的にはべき関数 状のエネルギー分布が生まれる、観測的にも、超 新星残骸からはべき関数状の放射が電波・X線・ ガンマ線帯域で検出されている(図1右).しか し、超新星残骸の衝撃波が銀河宇宙線の最高エネ ルギーであるPeVまで粒子を加速できるのか. 加速した粒子のエネルギー量は宇宙線を説明でき るのか,加速された粒子たちはどのように衝撃波 を抜け出して宇宙線となっていくのか、といった 謎が未だに残されている.

我々は主に多数の超新星残骸の系統解析により,着実に真相に迫ってきた.解明したと言える までにはまだまだ時間がかかりそうであるが,本 稿では我々の研究成果を概説し,近未来の展望に 触れる.

## 2. 超新星残骸の熱的X線プラズマの 観測からわかること

衝撃波が星間物質を急加熱して生成する熱的プ ラズマは、主にX線帯域で放射(主に電子の熱制

動放射とイオンの輝線放射)をする. 放射のエネ ルギー分布をもとに、荷電粒子の温度、電離状 態、組成、密度などを知ることができる、これら をもとにして、 超新星を起こした星や星周環境の 情報, 衝撃波のダイナミクス, 爆発からの経過時 間(超新星の年代)などが推定できる. 異なる元 素、さらに異なる遷移ごとの輝線強度比がわかれ ば、 プラズマの電子温度や電離状態が推定でき る. 熱制動放射の強度(スペクトルの連続成分)  $\propto n_e^2 k T_e^{0.5}$  ( $n_e$ は電子密度,  $T_e$ は電子温度, kはボ ルツマン定数), 折れ曲がりエネルギー~kT。から はプラズマ密度と電子温度が導ける.一般に、超 新星爆発による衝撃波が星間プラズマを通過する と、衝撃波によりイオンと電子がまず加熱され、 高温の電子との衝突によりイオンの電離が徐々に 進んでいく、時間経過とともに電離が進行し、  $n_{st} \sim 10^{12} \text{ s cm}^{-3}$  (tは衝撃波加熱からの経過時間) で 雷離平衡に 達する. 典型的な 星間密度 である n.~1 cm<sup>-3</sup>を仮定すれば、およそ3万年で電離平 衡に達することになる. つまり, 爆発から数万年 以内の超新星残骸の熱的プラズマはまだ非平衡状 態であり、その非平衡の具合(電子温度と電離状 態の関係)から、年代を推定することが可能であ る.また、衝撃波面のサイズや速度、プラズマ密 度が分かれば、仮定は必要なものの、衝撃波の運 動を過去にさかのぼることでも年代推定ができる. ここでは超新星残骸G359.1-0.5を例に、熱的



図2 超新星残骸G359.1-0.5のX線スペクトルと理論 モデル.着目する天体の放射に混ざり込む検 出器由来/宇宙由来のバックグラウンド成分 も示した.

X線のスペクトル分析の方法を概観する [5]. 図2 に,X線天文衛星チャンドラによって観測したス ペクトルを示した.スペクトルにはケイ素や硫黄 の水素状/ヘリウム状原子からのK殻輝線が見ら れる.バックグラウンド信号(宇宙由来と検出器 由来)の寄与を差し引くと,G359.1-0.5本体の 放射は連続成分が低く,また低エネルギー側に集 中しているため,低密度で低温なプラズマである ことがわかる.その割に例えば硫黄の水素状輝線 (≈2.46 keV)が強いことは,プラズマの電離度 が高く,非平衡状態にあることを示している.\*1 また,主に熱核暴走型(Ia型)超新星で作られる 鉄のL殻輝線群(~1 keV)の寄与が比較的小さ いことから,重力崩壊型の超新星が起源だったの ではないかと推測できる.

やや脱線するが,超新星残骸のように暗く広 がった天体の観測では,着目する天体の放射と バックグラウンド信号をいかに綺麗に区別できる かが科学成果の質を左右する.図2からもバック グラウンドの影響が見て取れるだろう.検出器由 来のバックグラウンドはそれぞれの機器に固有の ものである.打ち上げ後20年が経過したチャン ドラ衛星に未だ検出器由来バックグラウンドを推 定する公式の手法やツールが存在しないことに 困った私は,チャンドラ衛星チームの本拠地であ るハーバード・スミソニアン天体物理学研究所に て過去のデータの徹底調査から始め,ツール開発 まで取り組んだ [7].検出器由来バックグラウン ドは一般に衛星の座標や姿勢,検出器面上の座 標,太陽活動のレベルなどに応じて変動するた め,超新星残骸のような天体の研究では細心の注 意を払わなければならない.

#### 3. 超新星の年代推定

超新星残骸の研究には50年以上の歴史がある にもかかわらず,驚くべきことに,年代推定には 一般に定量性が欠けていた.年代推定には上述の 非平衡プラズマを用いた方法や衝撃波のダイナミ クスをもとにした方法を含め,いくつかが広く使 われているが,「どれくらい信じていいのか?」 という疑問に答えられなかったのである.我々は たくさんの超新星残骸を比較検証するために,何 とかして推定年代に誤差棒をつける方法を考え出 した.アイデアは,「信頼性が高い代わりに適用 範囲が狭い」年代推定法を用いて計算した年代 と,「信頼性が不明な代わりに汎用な」推定法で 導かれる年代とを比較することで,汎用な手法の 「較正」をするということである.

汎用な手法というのは、上述の非平衡プラズマの 電離具合を用いた方法と衝撃波のダイナミクスを 用いた手法の2つである.非熱的プラズマの電離 具合とプラズマ密度から求められる推定年齢はお よそ数万年まで適用可能であり、それ以上になると 電離平衡状態に達するため年齢の下限値のみが決 まる.熱的X線放射のスペクトル分解ができれば この手法が適用でき、現在およそ100天体に適用 可能である.衝撃波の速度、サイズ、周辺密度を 用いた推定手法は、超新星残骸の進化モデルをも とに年齢を導く.衝撃波面は初め等速度運動をし、

<sup>\*1</sup> これは「過電離」状態と呼ばれ,通常の超新星残骸で期待される電離状態とは大きく乖離する.この特殊な部類の超 新星残骸の熱的プラズマの進化過程は明らかでない [6].

通過した物質の質量が爆発噴出物の質量に対して 無視できなくなると減速を始める.この時期の運 動は半径Rが時間tの関数として $R \propto t^{(n-3)/(n-s)}$ (nは噴出物外側の密度分布のべき指数, sは星間 物質の密度分布のべき指数)と書ける. n.sは爆 発した星の性質によるが、R∞t<sup>0.57-0.88</sup>と期待され る. 観測的には爆発後数100年から1000年程度 の残骸がこの時期にあるとみられる [8]. 衝撃波 面が通過した物質の質量が爆発噴出物の質量を超 えると、セドフ期と呼ばれる時期に入る、セドフ 期の運動は周辺物質が一様な場合。半径Rが時間 *t*と周辺密度*n*。の関数として、 $R \propto n_{o}^{-0.2} t^{0.4}$ と表さ れる. セドフ期は一般に数万年間継続するため, 多くの超新星残骸はセドフ期にあると考えられて いる. 周辺密度はX線プラズマの密度から推定で き、また、最低限サイズさえわかれば、平均的な 星間密度とセドフ解を仮定することで大まかな年 齢推定が可能である、そのため、この手法はほぼ 全ての超新星残骸に適用できる.現在ではおよそ 300の天体に適用できることになる.

以上の推定法はプラズマ密度や衝撃波面の進化 モデルの不定性の影響を受ける.プラズマ密度を 推定するにはプラズマが一様に広がっているのか, 濃淡をもつのか,さらに視線方向にどれだけ広がっ ているのかを知らなければならず,それを知る術 は今のところない.また,星間物質の空間分布が 非一様であれば,衝撃波面の膨張過程も複雑にな り,上述の進化モデルに従わなくなる.このよう な不定性を定量評価することが困難であるのが, 上記の手法の信頼性が不明である所以である.

信頼できる年代推定法にはいくつかあり,最も わかりやすいのは歴史文書に残された記録である. 平安時代の日本で書かれた明月記には,およそ 1000年前に起きた3つの超新星の記録がある[9]. このような歴史的な超新星の残骸は,やや同定が 不確定なものも含めて9つが報告されているが, 爆発から約2000年以内という比較的新しいもの に限られる.そのほかにも,超新星爆発時の可視 光が周辺のダストで散乱されたリング状の放射を 数百年遅れて観測する「光エコー」という現象を 用いた方法もある.光は宇宙空間で方向を変える ことはほとんどなく,速度が一定のため,超新星 残骸の衝撃波面と違って,正確に爆発時期を推測 できる.ただし,この方法も現状では爆発から 1000年以内の新しい天体のみに適用可能である.

我々は爆発から数10万年といった古い天体も 研究対象としたいので、別の方法を考慮に入れ た.特に着目したのは、超新星爆発の際に同時に 生まれることがある中性子星を用いた方法であ る.爆発の非対称性により、中性子星は生まれな がらにして100-1000 km s<sup>-1</sup>といった速さをもっ ている. 宇宙空間の中性子星の運動はほぼ等速度 運動であるため、ある時点での速度と爆発地点が わかれば、中性子星が旅してきた時間がわかる. ありがたいことに、中性子星は電波やX線で100 万年以上光り続けるので、古い超新星残骸にまで 適用できる.この方法は少なくとも15年以上前 から知られているものの、爆発地点の推定に定量 性が欠けていたため,我々はこれを定量化し,適 用可能な全てである8つの超新星残骸-中性子星 系で年代推定をした.図3にこのような系の例を 示す. 同様に、中性子星の代わりに爆発噴出物の 塊の運動を使った方法もある. この方法が使える かどうかは噴出物の純粋な放射がどれだけ長く続



図3 超新星残骸と中性子星が共存している系の例. 画像は電波帯域での電子シンクロトロン放射 の強さを示し、白線は推測される衝撃波面の 位置を示す.中性子星が超新星残骸を飛び出 していると考えられるW41のような系もある.

天文月報 2024年8月



図4 超新星残骸の複数の年齢推定法の比較.各 データ点は、1つの超新星残骸に対する1つの 「信頼できる推定年齢」と「信頼性が不明な推 定年齢」のセットに対応する.y=xの直線は縦 軸と横軸の数値が一致する理想的なケースを 示す.信頼できる推定年齢の種類を異なる マークで示した.

くかに依存すると思われ,現状では爆発から1万 年以内くらいの天体に適用されている.

計24の超新星残骸を対象に推定年代の較正を実施した結果が図4である.我々は従来信頼性が不明だった年代推定法が5桁に近い年代範囲にわたり,およそ1桁程度の系統誤差をもつことを明らかにした[10].決してよい精度とは言えないが,超新星残骸の放射が続くタイムスケールであるおよそ100万年と比較すれば悪くはない.何より,信頼性が定量化できたことがまずは大事であろう.

#### 4. 超新星残骸の宇宙線加速の歴史

ガンマ線放射を観測すると、そこで加速された 粒子のエネルギー分布を推定することができる. 放射過程にはいくつか種類があり、超新星残骸で は主に電子を由来とする逆コンプトン放射と陽子 を由来とする中性パイ粒子崩壊の放射とが見られ る.原理的にはスペクトルの形の違いから見分け ることができ、観測的にもいくつかの超新星残骸 でははっきりと区別がついている.宇宙線加速の 文脈で我々が着目するのは陽子であり、幸運に も、区別がついているものは陽子由来の放射ばか りである [3, 11].理論的にも、典型的な星周環 境では陽子由来が電子由来に勝るという示唆があ る [12, 13]. 観測データの統計不足によりスペク トルの形を区別することは一般に容易でないが, そのような背景から,我々は多くの超新星残骸で ガンマ線放射は陽子由来であろうという仮定をお き,系統的な調査に進んだ.

ガンマ線放射のエネルギー分布から得られる情 報はX線や可視光での観測と比較するとかなり少 ないものの、その明るさから加速された粒子のエ ネルギー量, 高エネルギー側のスペクトルの折れ 曲がりから最高加速エネルギー、などを推測する ことができる. 結果を図5に示した [14]. すぐに わかることは、現在の最高加速エネルギーが銀河 宇宙線の最高加速エネルギーであるPeVに届く超 新星残骸はほとんどいないということだ、ちなみ に我々が用いた観測データはフェルミ衛星による GeV帯域のデータと、H.E.S.S., MAGIC, VERITAS というガンマ線観測所による TeV (テラ電子ボル ト)帯域のデータであるが、近年本格稼働を始め た中国の巨大なガンマ線観測所LHAASOによる PeV 帯域の観測データでも、やはり超新星残骸か らのガンマ線の検出例はわずかである [15]. しか し諦めずに「爆発したての頃にはもっと活力に溢 れていたんじゃないか?」と考え、定量化した年 代推定の結果を用いて宇宙線加速の歴史を探って みると、やはり、爆発からの時間経過にともなっ て最高加速エネルギーが減少していくことがわ かった(図5左). 測定された最高加速エネルギー 推定値 $E_{max}(t)$ の時間発展は $E_{max}(t) \propto t^{-0.8 \pm 0.2}$ と 書ける.理論的には、最も単純であるボーム極限 (乱流磁場が最大のケース)は∝t<sup>-0.2</sup>, 衝撃波と 星間物質の相互作用が乱流磁場を制限するケース では∞t<sup>-0.8</sup>, 衝撃波と中性物質の相互作用が乱流 磁場を制限するケースでは∝t<sup>-1.8</sup>という時間依存 性が予想される. 乱流磁場の強さはどれだけ高い エネルギーの粒子まで加速器の中に保持できるか. つまり加速器の性能に直結する.空間的に一様な 物質と衝撃波が相互作用すると乱流が減衰してい



図5 38個の超新星残骸について,現時刻での最高加速エネルギー推定値を(左)超新星残骸の年齢と(右)ガンマ 線スペクトルのハードネス比に対してプロットしたもの.左図の曲線は解析計算/数値計算の結果を示す(n は周辺密度(cm<sup>-3</sup>),Tは温度(K)).右図の曲線はガンマ線スペクトルの時間発展の解析モデルからデータと 同様にパラメータを求め,複数のケースでプロットしたもの.多くの場合,時間が進むごとに図上を右上から 左下へ移動するが,青線のように最高エネルギー推定値が再上昇する特異なケースもある.

き,加速性能が落ちる.その効果は完全に中性な 物質と相互作用するケースで特に強い.観測結果 は衝撃波と星間物質の相互作用を仮定した理論計 算と一致し,それは実際の環境とも整合してい る.時間をさかのぼって最高加速エネルギーの変 化を追っていくと,単純な外挿では爆発からおよ そ10年以内という短期間であれば,最高加速エ ネルギーがPeVに届きうることがわかった.従 来,最高加速エネルギーが生涯最高値に到達する のは爆発から数100年(セドフ期に入る頃)と思 われていたため,それには反する仮説である.一 方で近年の理論研究では,このようにごく短い期 間だけPeVまでの宇宙線加速が可能であるとい う描像も提案されている [16, 17].

図5右に示したのは最高加速エネルギー推定値 とガンマ線スペクトルのハードネス比(スペクト ルの形の指標)の関係であり、一般的には右上か ら左下に進化していく.つまり、最高加速エネル ギーが減少し、スペクトルの形全体としても高エ ネルギー側が欠けていく.しかし中には外れ値が あり、例えば最高加速エネルギーが高いままスペ クトルの高エネルギー側が欠けたものが存在する. これは、現在の最高加速エネルギーは低いが、過 去に加速されて衝撃波周辺から拡散しつつある粒 子が放射に寄与しているという描像で説明できる. つまり,スペクトル全体は低エネルギー側に偏っ ているものの,高エネルギー側まで伸びた成分が 残っている状態である.例えばW28がこの最たる ケースで,GeV以上のガンマ線放射のほとんど が拡散中の粒子によるのではないかと思われる. 拡散中の粒子の寄与はこのようにガンマ線研究を 邪魔するとも言えるが,過去の宇宙線加速の情報 を示してくれる有用な存在と捉えることもできる.

我々の研究結果でもう一つ大事だったのは,爆 発時期が同じでも現時刻での加速性能が大きく異 なる場合があることだ.これは宇宙線加速の性能 が環境依存するということで,ごく自然なことで あろうが,それを定量的に示すことができたこと には意義がある.例えば超新星を起こす星の種類 によって爆発時のエネルギーや噴出物の質量,星 周物質の空間分布が異なるので,衝撃波の速度や 進み方が異なったり,宇宙線加速に投入される粒 子の数が変わったりすると期待される.具体例を 挙げると,衝撃波と星間物質の相互作用が乱流磁 場を制限するケースでの最高加速エネルギーは, 近似的に $\infty \xi v_{sh}^3$  ( $\xi$ は衝撃波に流入する粒子のうち 加速過程に投入される割合, $v_{sh}$ は衝撃波速度)と いう依存性を示すと予想されている [18].



図6 (左)超新星残骸 RCW 86のX線画像 [19]. (右) RCW 86 北東部と南西部での非熱的X 線の強度とプラズマ密度の関係の比較.両者は北東・南西でそれぞれ負・正の相関を示す.

#### 5. 衝撃波加速の素過程に迫る

宇宙線加速がどのように環境依存するかを調べ るには、別々の超新星残骸を比べるよりも、1つ の超新星残骸の中で比較した方が不定性が小さい 議論ができる.注目するパラメータ以外をなるべ く共通にすることができるからである.例えば初 期状態、すなわち超新星爆発とそれ以前の情報は 共通であるし、空間的に十分近い場所を選べば星 周環境もだいたい同じだと思ってよいだろう. 1つの超新星残骸を詳しく調べる場合、加速され た粒子の情報に加えて加速環境、つまり衝撃波速 度やプラズマ密度、乱流磁場などの情報が得られ ることが大事である.さらに言えば、実際の観測 のことを考えると、明るくて視直径が大きい方が 有利である.こうした研究に適した超新星残骸は 多くない.その1つがRCW 86である.

RCW 86は爆発からおよそ2000年と比較的新 しく明るい超新星残骸であり,視直径は40分角 と大きい(図6左).さらに,X線帯域では加速 された粒子の放射と加速環境の情報をもつ熱的放 射の両方が見られる.我々はチャンドラ衛星の高 い空間分解能力を活かし,衝撃波速度やプラズマ

密度、そして加速された電子の性質を場所ごとに 細かく測定した、すると、加速された電子の性質 がプラズマ密度と綺麗に相関すること. さらに相 関の仕方が場所ごとに全く異なることがわかった (図6右) [20]. 爆発したての頃は宇宙線加速の 性能は均一だったかもしれないが、周辺密度の濃 淡による衝撃波面や乱流磁場の擾乱を反映して. 場所依存するようになったのだと考えられる.近 年、衝撃波と空間的に一様な物質が相互作用する 場合には乱流は減衰するが, 濃淡が強い物質と相 互作用する場合は逆に乱流が増幅するという証拠 が得られつつある [21]. 分子雲・原子雲の観測 により、RCW 86北東領域は周辺物質が「のっぺ り」しているが、南西領域では「ブツブツ」して いて濃淡が強いと思われており.加速環境は対照 的だと想像できる. 陽子の最高加速エネルギー は.

$$3 \operatorname{PeV} \eta^{-1} \left( \frac{v_{\rm sh}}{10^4 \,\mathrm{km \, s}^{-1}} \right)^2 \times \left( \frac{B}{50 \,\mu \mathrm{G}} \right) \left( \frac{t}{10^3 \,\mathrm{fm}} \right)$$
(2)

(ηは乱流磁場の強さを表すパラメータ, Bは磁場

強度)と書ける [22, 23].\*<sup>2</sup>この式をもとにする と,定性的には,(1)北東では周辺物質が濃い 場所で衝撃波が局所的に減速し,それに応じて加 速性能が落ちる一方,(2)南西では周辺物質が 濃い場所で衝撃波は減速するものの,濃淡が強い せいで乱流が励起され,磁場や乱流磁場が強まる ことで加速性能が上昇する,と理解できると考え ている.いまだ定量的な理解には至っていないも のの,周辺密度が宇宙線加速の性能を決定づける 重要なパラメータであることははっきりした.

X線データを多方面から見ることで,宇宙線加 速の性能を決定づける磁場や乱流磁場の強さなど のパラメータを導出することもできる.例えば電 子シンクロトロン放射のX線帯域の明るさは磁場 強度を反映し,数年おきの観測によって磁場強度 の測定が可能である.導出した数値を式(2) に 代入すると,この天体の現在の最高加速エネル ギーが場所ごとに推定でき,およそ100-200 TeV となる.これはガンマ線観測で独立に求められる 値と一致する.このように,X線放射の詳細な解 析は宇宙線加速の素過程を探究するうえで強力で ある.

#### 6. 将来に向けて

超新星残骸は銀河宇宙線の加速源なのか? こ の問に対する最近の研究結果をいくつか紹介す る.中国のLHAASO,チベット大気ガンマ線観 測所は~0.1-1 PeVの放射をする天体が銀河面に 集中していることを示し,やはり銀河宇宙線源は 銀河系内を起源とすることを示した [15,24].た だし,個々の放射源の場所に対応する天体はパル サー風星雲が多く,超新星残骸はわずかである. PeV粒子を加速することが現状で唯一確かめられ ている超新星残骸は,LHAASOやMAGICチー ムが報告したG106.3-2.7である [25].この天体 を生んだ爆発はおよそ1万年前と考えられてお り、なぜこの天体だけが未だにPeV粒子を留め ておけるのかは明らかになっていない.理論研究 からは、上述のように爆発直後または特殊な星周 環境の超新星残骸だけがPeVまで加速する性能 をもつという結果がいくつかのチームから報告さ れた [16, 17]. ごく最近では、銀河宇宙線起源の 別の可能性として大質量星団の恒星風が観測と理 論の両面で浮上しつつある印象がある [26, 27]. 以上を概観すると、超新星残骸を起源とする説は どちらかというと押され気味かもしれない. 個人 的にはやはり、爆発直後の超新星残骸が一般に PeVまで加速するという説を推したいところであ る.

新しい超新星残骸の周辺の暗いガンマ線放射を 捉えると、宇宙線加速の過去を直接知ることがで きる.本当に過去に高性能な加速器だったのであ れば、PeVのエネルギーを持った粒子を由来とす る大きく広がった放射が周辺から観測されると期 待できる.このような研究のためにはガンマ線の 高い感度と高い空間分解能力が必要である.決定 的な性能をもつのは目下建設中であるチェレンコ フテレスコープアレイであろう.2020年台の本 格稼働に期待したい.

熱的X線観測の進展に関連して、2023年9月7 日(日本時間),X線天文衛星XRISMが種子島宇 宙センターから打ち上げられた [28].私は主に XRISMに搭載されたCCDカメラ"Xtend"の開 発と軌道上での運用,検出器較正に尽力してい る.XRISMはX線カロリメータ"Resolve"によ る精密分光と,Xtendによる広い視野の分光撮像 を武器とする.加速現場である衝撃波直下の高温 プラズマを精密分光すると,輝線幅の広がりをも とにイオンの熱速度を測ることができ,衝撃波か ら物質の加熱と加速とに渡されるエネルギーの分

<sup>\*2</sup> ここでは最高加速エネルギーが加速時間によって制限されていると仮定した.比較的古い超新星残骸や衝撃波と物質の相互作用の影響が強い系では、粒子の流出に制限されると考えられる.

配過程の理解に踏み込むことができる.また,一 般に多温度かつ非平衡状態である熱的プラズマの 温度や電離状態を精密に決定できる性能のおかげ で,加速環境の情報をより多くの天体で,格段に 高い信頼度で引き出すことができる.

最後に少し私見を述べたい.より高いエネル ギー帯域を狙うほど,天体からの信号は減り,検 出器との反応確率も一般に下がるため,観測装置 の要求性能が高まったり,単純に巨大で複雑な検 出器が必要になったりする.技術的な要求が厳し いと,運用面のコストも大きい.そのような開発 /運用には大きなマンパワーが必要であり,大き な予算が必要であり,しかし得られる情報,科学 成果はコストに見合わなくなってきているのでは ないかと感じつつある.このあたりで発想の転換 が必要かもしれない.巨大な1つの装置でなく小 さいものをたくさん配置するとか,空間方向の拡 張に限界があるなら時間方向はどうか,などと将 来の方向性を模索するのも研究の醍醐味であろ う.

#### 謝 辞

本稿の内容は著者による2018年から2022年の 論文に基づいています [7,10,14,20,29]. この研 究は著者の大学院時代の指導教員である馬場彩氏 をはじめ、山崎了、大平豊、田中孝明の各氏に特 に支えられ進めることができました. 深く感謝い たします.本稿執筆にあたっては勝田哲氏をはじ めとする天文月報編集委員の方々に大変お世話に なりました.本研究は日本学術振興会特別研究員 DC/PD研究奨励費,若手海外挑戦プロジェクト の援助を受けました.

#### 参考文献

- [1] Blasi, P., 2013, A&A Rev., 21, 70
- [2] Ahnen, M. L., et al., 2017, MNRAS, 472, 2956
- [3] Ackermann, M., et al., 2013, Science, 339, 807
- [4] Ambrogi, L., et al., 2019, A&A, 623, A86
- [5] Suzuki, H., et al., 2020, ApJ, 893, 147

- [6] 内田裕之, 2013, 天文月報, 106, 604
- [7] Suzuki, H., et al., 2021, A&A, 655, A116
- [8] 勝田 哲, 2009, 天文月報, 102, 429
- [9] 冷泉家時雨亭文庫, 2003, 冷泉家時雨亭叢書 明月 記 五,第六十巻(朝日新聞出版)
- [10] Suzuki, H., et al., 2021, ApJ, 914, 103
- [11] 田中孝明, 2015, 天文月報, 108, 675
- [12] Yasuda, H., & Lee, S.-H., 2019, ApJ, 876, 27
- [13] Brose, R., et al., 2020, A&A, 634, A59
- [14] Suzuki, H., et al., 2022a, ApJ, 924, 45
- [15] Cao, Z., et al., 2021, Nature, 594, 33
- [16] Cristofari, P., et al., 2020, Astropart. Phys., 123, 102492
- [17] Inoue, T., et al., 2021, ApJ, 922, 7
- [18] Ptuskin, V. S., & Zirakashvili, V. N., 2005, A&A, 429, 755
- [19] Williams, B. J., et al., 2011, ApJ, 741, 96
- [20] Suzuki, H., et al., 2022b, ApJ, 938, 59
- [21] Sano, H., & Fukui, Y., 2021, Ap&SS, 366, 58
- [22] Reynolds, S. P., 2008, ARA&A, 46, 89
- [23] 辻 直美, 2022, 天文月報, 115, 622
- [24] Amenomori, M., et al., 2021, Nat. Astron., 5, 460
- [25] MAGIC Collaboration, et al., 2023, A&A, 671, A12
- [26] Aharonian, F., et al., 2022, A&A, 666, A124
- [27] Morlino, G., et al., 2023, PoS, ICRC2023, 157
- [28] https://www.xrism.jaxa.jp/
- [29] Suzuki, H., et al., 2018, PASJ, 70, 75

#### Are Supernova Remnants Accelerating Galactic Cosmic Rays?: Indication from Recent High-Energy Observations Hiromasa Suzuki

Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, 3–1–1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 252– 5210, Japan

Abstract: We have been investigating whether supernova remnants can provide Galactic cosmic rays, satisfying the basic property including the maximum energy of  $\sim$ PeV (10<sup>15</sup> eV). Our recent studies suggest that maximum energies of accelerated particles in supernova remnants can reach PeV only if the acceleration process is very efficient at a very early phase. We expect a great leap in our understanding of the acceleration microphysics with next-generation X-ray and gamma-ray observatories.