

## 論文の内容の要旨

# Systematic Study of Escape Processes of Cosmic Rays from Supernova Remnants based on Gamma-ray and Thermal X-ray Properties

(ガンマ線・熱的 X 線放射の特性をもとにした超新星残骸からの宇宙線逃亡プロセスの系統的研究)

氏名 鈴木 寛大

### 背景：超新星残骸が加速した粒子の逃亡

銀河宇宙線は、 $10^{15.5}$  eV の高エネルギーまで伸びたスペクトルと  $1 \text{ eV cm}^{-3}$  という宇宙プラズマや宇宙電波背景放射に匹敵するエネルギー密度をもち、銀河進化を担う重要要素である。その発見からは 100 年以上が経過しているものの、未だ加速源は定かでない。銀河宇宙線の最高エネルギーとエネルギー密度の大きさを説明できる最有力候補は超新星残骸だと考えられている。実際に超新星残骸の衝撃波近傍には TeV ( $10^{12}$  eV) 以上まで加速された粒子が存在することが分かっている (e.g., Ahnen et al. 2017)。また、図 1 のように、年齢が大きい天体ほど加速粒子を起源とするガンマ線放射がソフトであり、加速粒子の逃亡がより進んでいることが示唆されている (e.g., Ackermann et al. 2013; Ptuskin & Zirakashvili 2003, 2005; Ohira et al. 2010, 2011)。だが、加速粒子がどれほどのタイムスケールで超新星残骸から逃げ出し宇宙線となるか、また逃亡する粒子がどのようなスペクトルをもつか、そしてそれらが加速環境のパラメータにどう依存するのかという最後の大きな謎が残されており、観測的に明らかにする必要がある。

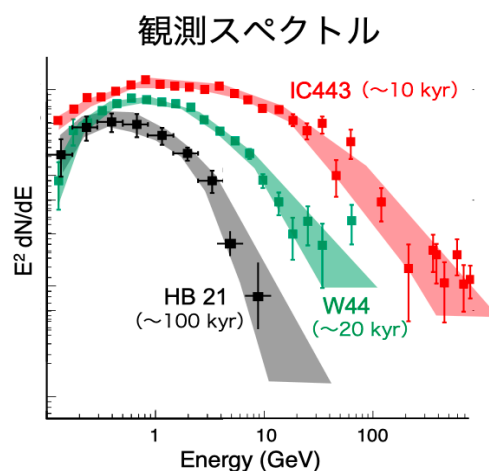


図 1：超新星残骸のガンマ線スペクトルの例。年齢が大きいほどソフトなスペクトルを示す。

## 本研究の目的と手段

本研究の目的は、超新星残骸の衝撃波面から加速粒子が逃亡するタイムスケールや逃亡粒子のスペクトル、それらの環境依存性を調べることである。加速粒子起源のガンマ線を放射する超新星残骸 38 天体に対する X 線・ガンマ線データを組み合わせた系統解析により、ガンマ線観測の系統的な時間発展を抽出し、平均的な加速粒子逃亡のタイムスケールを測る。次に、ガンマ線観測を粒子逃亡の解析モデルと比較することで、天体ごとに生涯に加速する最高エネルギーや逃亡粒子のガンマ線への寄与など、粒子加速・逃亡環境のパラメータに制限をかける。

## 必要な観測量の抽出 (Chapter 4—6)

本研究に必要な観測量は以下の 3 つに大別できる。(1) 熱的プラズマの X 線観測から求められる超新星残骸の年齢や周辺密度 (Chapter 4)、(2) ガンマ線観測から得られる超新星残骸に閉じ込められた加速粒子の情報 (Chapter 5)、(3) 超新星残骸の推定年齢の定量的な信頼性 (Chapter 6)、である。それぞれを以下のように求めた。

(1) ガンマ線スペクトルが特にソフト/ハードかつ熱的プラズマの理解が不十分な 2 天体 (HB 21 と G359.1-0.5) の熱的プラズマの X 線解析を行った。2 天体の温度、プラズマ密度、電離状態を明らかにすることで、それぞれの年齢と周辺密度を推定した。他の天体については文献から最も信頼できる熱的 X 線パラメータを用い、それらから抽出できる年齢や周辺密度の情報を用いた。

(2) Fermi 衛星の最新の観測データを用い、先行研究で示された結果よりデータ統計の大きな向上が見込める 15 天体のガンマ線解析を行い、天体由来のスペクトルを抽出した。これらと文献で示されている 23 天体を合わせてスペクトルモデリングを行い、べきや cutoff energy などのガンマ線観測量を測定した (図 2)。

(3) 超新星残骸に対して一般になされる複数の年齢推定法の信頼性を初めて定量的に調査した。衝撃波のサイズ・速度やプラズマの電離度から一般の超新星残骸について求められる推定年齢が、超新星爆発で同時に生まれた中性子星の座標と速度が知られている特殊な系などを用いた信頼できる推定年齢と比較してどれだけ異なるかを評価した。結果、(1)で抽出した年齢はどれも factor 4 の範囲内で信頼できると判断できた。

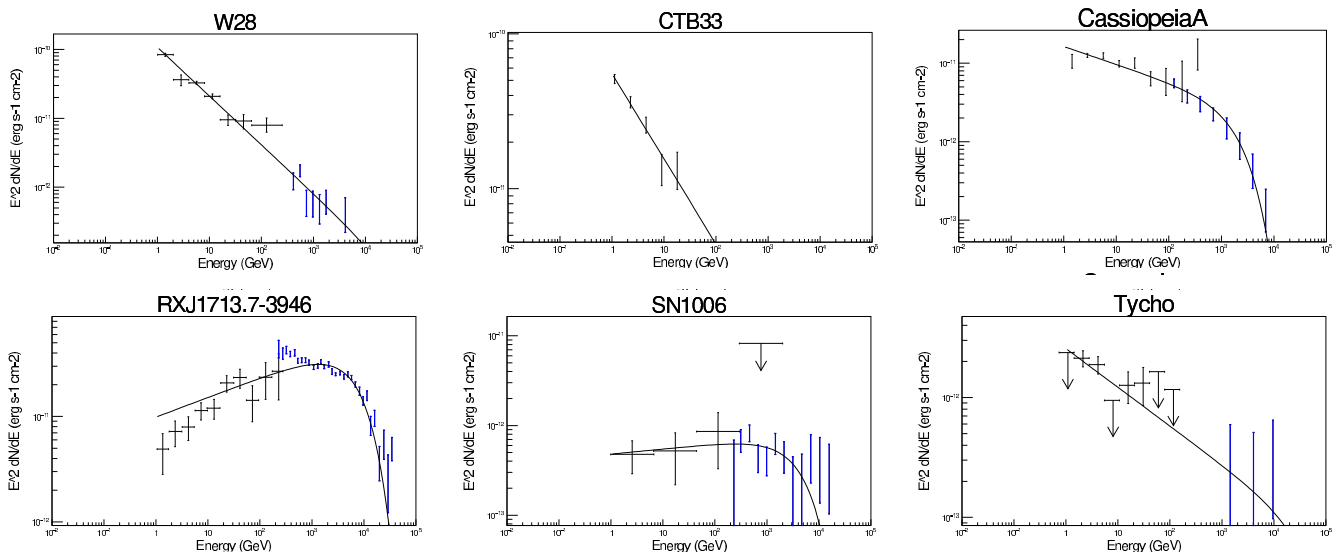


図 2 (本論文 Figs. 5.8—5.13) : ガンマ線スペクトルモデリングの例。Cutoff power-law model でモデリングした結果を示す。データ点は黒 : Fermi, 青 : HESS/MAGIC/VERITAS による観測。

## ガンマ線観測量の時間発展の調査と平均的な粒子逃亡タイムスケールの測定 (Chapter 7)

必要な観測量の抽出(1), (3)で得た超新星残骸の年齢と(2)で得たガンマ線観測量を 38 天体に対して比較することで、ガンマ線観測量の時間発展を調査した。ガンマ線の cutoff energy ( $E_{cut}$ ), break energy ( $E_{br}$ ), hardness ratio, normalized luminosity (1 GeV—100 TeV の luminosity を 1 GeV での値で規格化した無次元量) は、どれも年齢とともに系統的に減少する傾向が見られた。これは系統的な粒子逃亡の進行を反映していると考えられる。Cutoff energy, break energy の時間依存性は  $E_{cut} \propto t^{-(0.45-0.98)}$ ,  $E_{br} \propto t^{-(0.51-0.88)}$  と測定できた。超新星残骸に閉じ込められた加速粒子のエネルギー総量 ( $\propto$  normalized luminosity) の時間ともなう減少傾向をもとに見積もった平均的な粒子逃亡のタイムスケールは 10—100 kyr となった。一方で、 $E_{cut}$  などでは同じ年齢に対しても 3 桁程度の大きなばらつきが天体間で確認された。

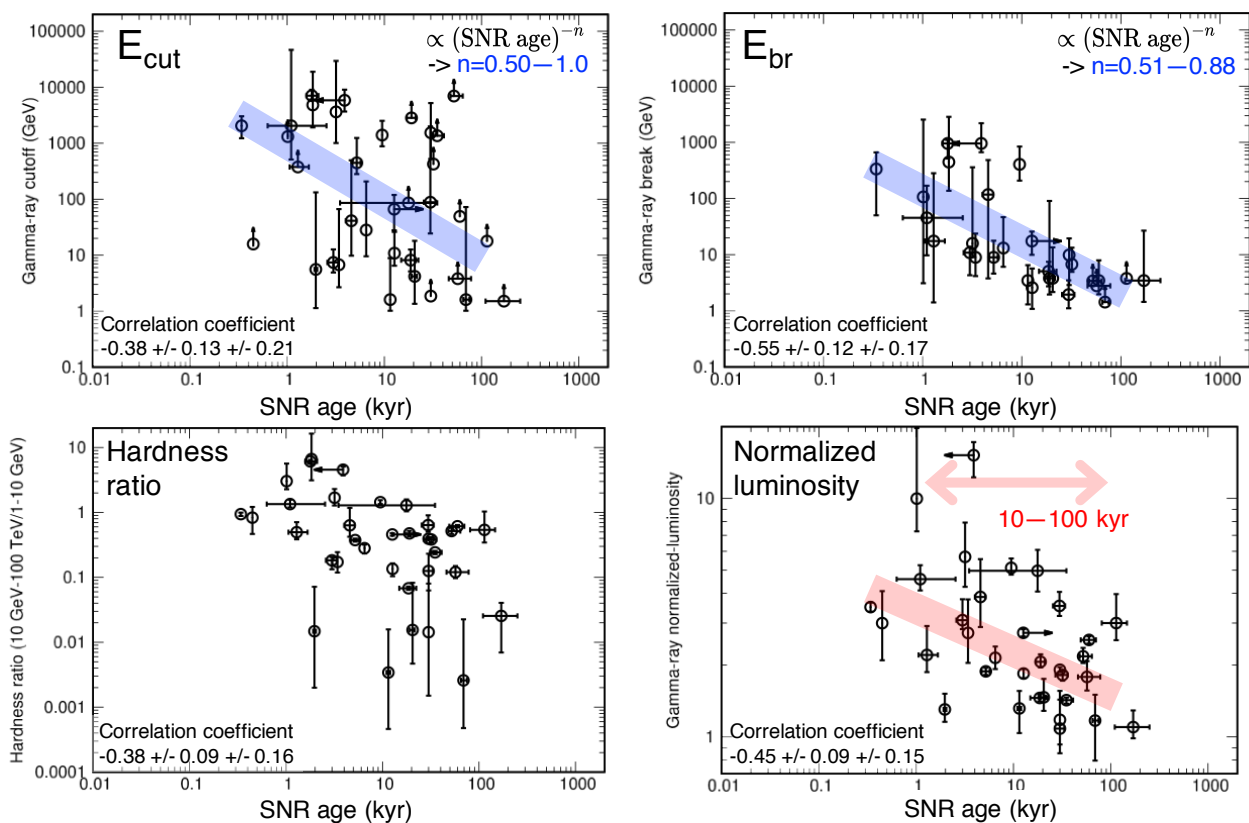


図 3 (本論文 Figs. 7.3—7.11) : 年齢に対するガンマ線パラメータの分布。Cutoff energy ( $E_{\text{cut}}$ ), break energy ( $E_{\text{br}}$ ), hardness ratio (10 GeV—100 TeV/1—10 GeV), normalized luminosity (1 GeV—100 TeV の luminosity を 1 GeV でのスペクトルの高さで規格化した無次元量) の時間発展を示す。どれも年齢に対して有意な減少傾向を示す。

## 粒子加速・逃亡のパラメータへの制限 (Chapter 7)

図 4 に、天体ごとにつけられた粒子加速・逃亡のパラメータの制限を示す。1 kyr での加速粒子の最高エネルギーは天体間に有意な差異を示し、その大きさは最大 3 桁程度であることが分かった。逃亡粒子が放射するガンマ線の最高エネルギーの天体間差異は 1 桁以下であった。Cassiopeia A などスペクトルの統計が良いにも関わらず加速の最高エネルギーなどのパラメータが良く制限されないケースは、加速中の粒子と逃亡中の粒子のガンマ線放射スペクトルへの寄与が分離できなかったことによる。

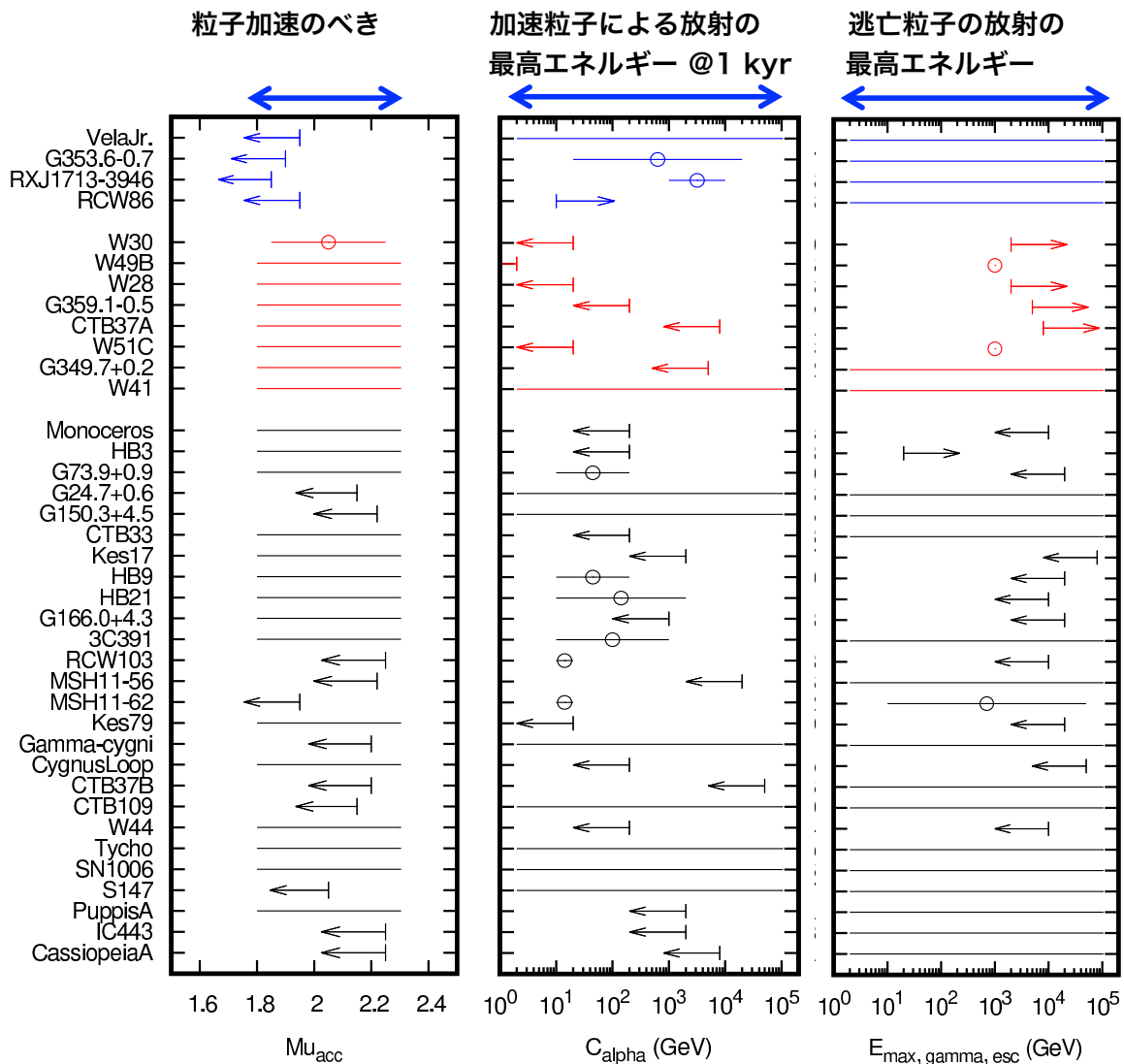


図 4 (本論文 Fig. 7.19) : 天体ごとに粒子加速・逃亡のパラメータにかけられる制限を示す。

青矢印はパラメータサーチの範囲を示す。

## 考察 (Chapter 8)

### 平均的な粒子加速環境

粒子加速の最高エネルギー  $E_{max}$  の系統的な時間発展は  $E_{cut}$  と  $E_{br}$  の時間発展から  $E_{max} \propto t^{-(0.5-1.0)}$  と求められた。理論計算による予測と比較すると、この時間依存性は Bohm limit を仮定した最もシンプルな加速モデル ( $E_{max} \propto t^{-0.2}$ ) では説明できず、衝撃波と星周物質との衝突を加味したモデル ( $E_{max} \propto t^{-0.8}$ ) が必要であることを示した (Ptuskin & Zirakashvili 2003, 2005)。

## 超新星残骸は PeVatron になれるか？

1 kyr での粒子加速の最高エネルギーの平均値 (0.01—1.6 TeV) とその系統的な時間発展 ( $\propto t^{-(0.5-1.0)}$ ) からは、生涯の最高加速エネルギー (Sedov phase が始まる年齢での最高エネルギー) は平均的には 0.2—80 TeV であることが推定された。これは銀河宇宙線の最高エネルギーである  $10^{15.5}$  eV に及ばない。ただし理論計算との比較によれば、ガンマ線放射から推測できる最高加速エネルギーは平均的に < 2 桁だけ実際の最高加速エネルギーより低いというバイアスの存在が示唆されたため、実際の生涯の最高加速エネルギーは平均的に約 10 PeV まで達する可能性がある。

## 粒子加速・逃亡環境のバラエティ

本研究は、超新星残骸が生涯に加速する最高エネルギー  $E_{\max}$  が天体間に 3 桁程度のばらつきをもつことを示唆した。理論から  $E_{\max}$  は粒子加速効率  $\xi$ , 超新星爆発のエネルギー  $E_{SN,kin}$ , 背景磁場  $B_0$ , 周辺密度  $n$  を用いて  $E_{\max} \propto \xi E_{SN,kin}^{0.6} n^{-0.6}$  (衝撃波が速い場合),  $E_{\max} \propto \xi^2 E_{SN,kin}^{1.6} n^{-1.6} B_0^{-3}$  (衝撃波が遅い場合) と表せる (Ptuskin & Zirakashvili 2003, 2005)。観測からどのパラメータのばらつきがどれほど効くかを分離することはできなかったが、それぞれのパラメータに factor 程度のばらつきを想定すれば  $E_{\max}$  のばらつきは説明がつく。逃亡粒子からのガンマ線放射の最高エネルギーが示した天体間の 1 桁以内の差異は、衝撃波が相互作用する分子雲・原子雲のサイズ・磁場といった特性の差異を考えると自然に説明できる。

## 結論 (Chapter 9)

本研究は、年齢が異なる 38 個の超新星残骸の系統解析を行うことで、超新星残骸の粒子加速から逃亡に至る時間発展を世界で初めて観測的に明らかにした。

まず観測量の抽出のため、3 つの解析を行った。(1) ガンマ線放射が特異な 2 つの超新星残骸 HB 21, G359.1-0.5 の熱的プラズマの X 線解析により、両者の年齢を初めて推定した。(2) 15 天体について Fermi 衛星の最新のデータを用いたスペクトル抽出を行ったのち、文献で示されたスペクトルと合わせた全サンプル 38 天体のガンマ線スペクトルモデリングによりガンマ線パラメータを測定した。(3) 超新星残骸に対して用いられる年齢推定の信頼性を初めて定量化し、衝撃波のダイナミクスから推定する年齢・熱的プラズマの電離度から推定する年齢どちらも factor 4 の範囲で信頼できることを明らかにした。

以上の観測量を用いた系統解析では、まず粒子逃亡を示すパラメータ ( $E_{\text{cut}}$ ,  $E_{\text{br}}$ , hardness ratio, normalized luminosity) が年齢の増加にともなって系統的に減少することを発見した。この傾向から平均的な粒子逃亡タイムスケールを 10-100 kyr と見積もった。平均的な加速環境は最もシンプルな加速モデル (Bohm limit) では説明できず、衝撃波と周辺物質の衝突を取り入れたモデルが必要であることを示した。次に、各天体の加速・逃亡パラメータに制限をかけた。結果、超新星残骸が生涯に加速する最高エネルギーには最大 3 桁程度の天体間の差異が示唆され、これは加速効率や周辺密度のばらつきによって説明できる。逃亡粒子の放射の最高エネルギーが示した天体間の差異は 1 桁以内であり、これは相互作用する分子雲・原子雲のサイズや磁場といった特性のばらつきで説明できる。

本研究で明らかにした粒子逃亡の系統的な時間発展と加速・逃亡パラメータのばらつきは、宇宙線による銀河進化への寄与を定量化するための第一歩となるだろう。