

# 超新星残骸での宇宙線加速 — 銀河宇宙線の起源に迫る —

馬 場 彩

〈理化学研究所牧島宇宙放射線研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉  
e-mail: bamba@crab.riken.jp

山 崎 了

〈大阪大学大学院理学研究科 宇宙進化グループ 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1〉  
e-mail: ryo@vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp

宇宙線の加速機構および加速起源は、その発見以来 100 年の謎である。われわれは X 線天文衛星「チャンドラ」で超新星残骸 SN 1006 衝撃波面を観測し、高エネルギー電子からのシンクロトロン放射が過去の観測結果と従来の加速理論から予想されていたものよりもはるかに細くフィラメント状に集中していることを世界で初めて発見した。この観測事実を説明するためには、(i) 衝撃波法線に垂直、または (ii) 圧縮増幅された磁場の存在が必要である。われわれの研究は、宇宙線加速理論に観測面から定量的制限を与える新たな手法として注目されている。

## 1. 100 年の謎・宇宙線加速

宇宙線とは宇宙を飛び交う超高エネルギー粒子で、1912 年に Hess<sup>1)</sup> によって発見された。地球に到来する宇宙線はさまざまなエネルギーをもつ。どのエネルギーの宇宙線がどのくらいの数があるかを示すエネルギースペクトルは、図 1 に示されるように、 $10^9$  eV (eV=電子ボルト,  $1\text{ eV}=1.6\times 10^{-19}$  ジュール) 以下から  $10^{20}$  eV 以上の広いエネルギー帯にわたっておよそ  $E^{-3}$  の巾型をしているが、細かく見るといくつかの折れ曲がりが見られる<sup>2)</sup>。スペクトルの形を人間の下半身に例え、 $10^{15.5}$  eV,  $10^{18.5}$  eV での折れ曲がりの部分はそれぞれ、knee (ひざ), ankle (くるぶし) と呼ばれる。宇宙線のエネルギー密度は 1 cc 当たりおよそ 1 eV と宇宙背景放射や星光、銀河磁場、星間ガスのもと同程度であり、われわれの銀河の基本構成要素の一つである。にもかかわらず、「何が、どの

ように、どのエネルギーまで、どのくらいの量の宇宙線を加速しているのか」という基本的な問題は、発見から 100 年近く経った今も決着はついておらず、宇宙物理学における最大級の謎の一つである。

現在最も広く認知されている宇宙線加速機構は、超新星残骸（星が寿命を終える際に起こす超新星爆発の残骸）などに存在する強い衝撃波における **diffusive shock acceleration (DSA)** 機構である<sup>3), 4)</sup>。DSA によると、衝撃波近傍で運動する粒子の一部は、磁場の波の影響を受け宇宙線粒子になる（図 2）。磁場にゆらぎがあると磁気鏡の要領で散乱されるためだ。宇宙線粒子は衝撃波の上流では磁場の波との正面衝突によりエネルギーを増し、下流においては追突によりエネルギーを失う。しかし磁場の波の速度は上流の方が下流よりも速いために、上流と下流の間を一往復すると必ずエネルギーを得る。実際には大部分の粒子（図

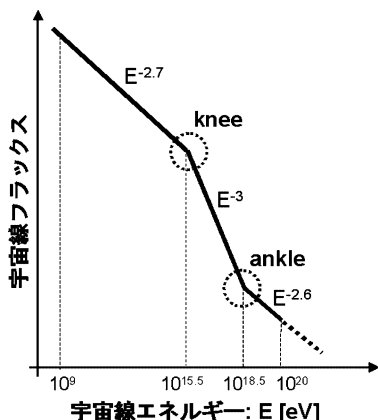


図 1 地球へ降り注いできている宇宙線スペクトルの模式図。巾型をしており、 $10^{15.5}$  eV、 $10^{18.5}$  eV に、それぞれ knee, ankle と呼ばれる折れ曲がりをもつ。

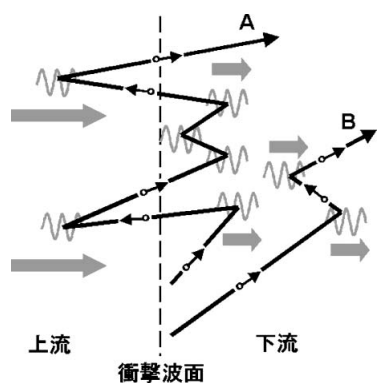


図 2 宇宙線粒子加速機構 diffusive shock acceleration (DSA) の概要 (本文参照)。

2 中の粒子 B) は全体のプラズマの流れに乗って下流方向へ流されエネルギーを得ることはないが、ごく一部の粒子 (図 2 中の A) だけが衝撃波の上流と下流を何度も往復し加速される。他の加速理論にはない DSA 理論の最大の長所の一つは、観測されている宇宙線のスペクトルの性質を大まかに説明できることである。特に knee に対応するエネルギーまでの宇宙線は、超新星残骸衝撃波付近で作られていると信じられている。

DSA 機構による宇宙線加速を定量的に知るためには、加速現場の磁場構造や乱流度が重要なパ

ラメーターになる。しかし、観測的に磁場の詳細構造はほとんどわかっていない。被加速粒子が磁場の影響で拡散する過程、加速プロセスを受ける粒子の割合や性質の理論的な理解も必要である。これらが観測的にも理論的にもわかっていない現在、超新星残骸で加速しうる宇宙線の最高エネルギーやエネルギー収支も解決されていない問題である。言い換えれば、宇宙線全体に対する超新星残骸の寄与の程度は現段階では全くわかっていないのだ。

## 2. 宇宙線加速源探査と硬 X 線超新星残骸観測

宇宙線加速源はどのようにして探査できるのだろうか？ 星間空間には  $1\text{--}10\ \mu\text{G}$  程度の磁場が存在し、荷電粒子である宇宙線は磁力線に巻きつくようにジャイロ運動をする。knee エネルギーをもつ荷電粒子の場合、磁力線に対する回転運動の回転半径 (ジャイロ半径) は数 pc 程度 (pc=パーセク、 $1\text{ pc}=3.3$  光年) になるため、宇宙線は星間空間を直進できず、地上では加速源の方向と無関係に等方的に降り注ぐことになる。したがって地球にやってくる宇宙線はどこからきたのかわからないので、加速源の情報を直接引き出すことは困難で、宇宙線加速源を調べるためには他の手法が必要となる。最良の方法の一つは X 線の中でも波長が短い硬 X 線を用いた探査方法である。加速源付近にとどまっている加速された高エネルギー電子は、磁場中で磁力線の周りを回転するときに電磁波を放射する (シンクロトロン放射)。星間磁場中 ( $\sim\mu\text{G}$ ) で  $10^{14}$  eV 程度のエネルギーをもつ電子の場合、典型的な放射帯は  $3\times 10^3$  eV 程度になり、硬 X 線 ( $10^3\text{--}10^4$  eV) 帯で明るく光ることがわかる。この帯域でシンクロトロン放射を探すことでわれわれは宇宙線加速源を直接調べられる。実際日本の X 線天文衛星「あすか」により超新星残骸 SN 1006 の北東部および南西部からシンクロトロン放射が発見され<sup>5)</sup>、超新星残骸衝撃

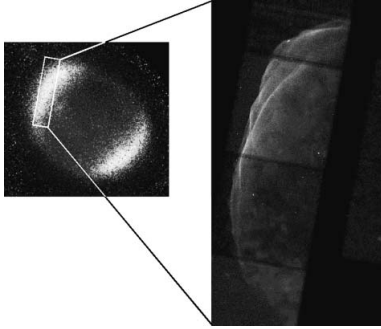


図3 超新星残骸 SN 1006 の硬 X 線によるイメージ。左が「あすか」、右が「チャンドラ」によるもの。

波が宇宙線加速現場であることが明らかになった。図3左は「あすか」による SN 1006 の硬 X 線画像である。超新星残骸の内側ではなく、衝撃波部分が硬 X 線を放射しているのがわかる。現在では複数の超新星残骸の衝撃波付近から加速電子の存在を表すシンクロトロン硬 X 線が発見され、超新星残骸の衝撃波で宇宙線が加速されていると広く認知されている。

次にわれわれが行うべきは、1節で述べたような定量的問題の解決だ。われわれは

- (1) 加速された電子の空間分布を示すと思われる、硬 X 線の空間分布<sup>\*1</sup>、
- (2) 加速された電子の最高エネルギーや磁場強度を反映する、シンクロトロン放射スペクトル、
- (3) 宇宙線の加速時間の情報を与える、超新星残骸の年齢、

という三つの観測的情報を選んだ。特に (1) は宇宙線加速に関する多くの物理量を反映することが期待されるが、これまで空間依存性についてほとんど議論されていなかった。これは過去の観測機器では空間分解能が足りず、粒子分布を見るに至らなかったためである。このような議論は、およ

そ 0.5 秒角という、「あすか」の約 100 倍、第一級光学望遠鏡並の空間分解能をもつ「チャンドラ」衛星の登場により初めて可能になった。われわれは、「チャンドラ」で観測した SN 1006 のデータから (1) と (2) を求め、簡単な DSA の仮定に基づいて種々の物理量を概算した。シンクロトロン X 線を放射する超新星残骸についてのこのような解析は世界で初めての試みである。

(3) に関して、超新星残骸の正確な年齢はどうやって調べるのだろうか？ 実は多くの超新星の記録が、古今東西の古文書や日記などに残されている。SN 1006 とは西暦 1006 年に爆発した超新星の残骸であることを示す名前だ。当時の記録は中国やヨーロッパなど 20 カ国以上に残っており、人類史上最も明るかった超新星だと言われている。日本でも藤原定家が国宝「明月記」に「有大客星如熒惑(大客星有り熒惑ノ如シ)」と書き残している。熒惑は火星を指し、南天の低い位置で赤く輝いたことが想像できる<sup>6)</sup>。

### 3. 「チャンドラ」による SN 1006 衝撃波面の詳細観測

図3右は「チャンドラ」による SN 1006 北東部の硬 X 線イメージである<sup>7)</sup>。「チャンドラ」の優れた空間分解能のおかげで、「あすか」では分離できなかった極めて細いフィラメント状構造が超新星残骸の最前面に走っている様子が初めて見えた。このフィラメント構造の断面図が図4である。「チャンドラ」の空間分解能ぎりぎりのシャープな構造を見ることができる。われわれはこれらの断面図を指数関数でフィッティングし、フィラメントの典型的幅を上流側(ピークの外側:  $w_u$ )で 0.04 pc、下流側(内側:  $w_d$ ) 0.2 pc と求めた<sup>7)</sup>。これは SN 1006 半径の 1% 程度の長さである。また、図5はフィラメント部分のスペクトルであ

\*1 いま興味のある衝撃波近傍の狭い領域では、磁場は衝撃波面前後での不連続性を除いて空間変化は無視できると考えられる。したがって、硬 X 線の空間分布は最大のエネルギーをもつ電子の空間分布を反映していると近似できる。

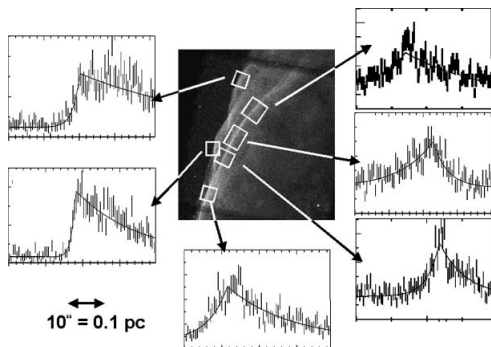


図 4 フィラメントの断面図. 中央イメージの四角で表された各フィラメント領域の南北(縦)方向に積分した東西(横)方向の断面図が周囲のイメージ.

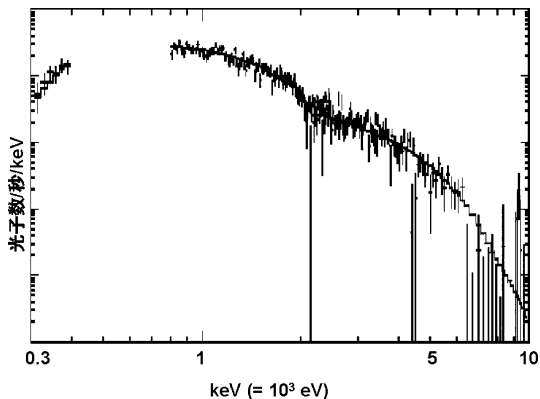


図 5 「チャンドラ」によるフィラメントのスペクトル.

る. 輝線構造が全く見られず, 硬 X 線帯域まで伸びているのがよくわかる. このことからフィラメントからの放射は超新星残骸によく見られる光学的に薄い熱的プラズマの放射(つまり粒子の速度分布がマクスウェル分布の希薄なプラズマからの放射)ではなく, 確かに「あすか」がとらえたようにシンクロトン放射であることがわかる. DSA によって加速された電子のスペクトルは巾型になるが, 超新星残骸の年齢やシンクロトン放射によるエネルギー損失などでエネルギー上限

値  $E_{e, \max}$  をもつ. したがって, シンクロトン放射はあるエネルギー  $h\nu_{\text{roll}}$  以上で急激に減衰する.  $h\nu_{\text{roll}}$  は  $E_{e, \max}$  と磁場  $B$  を用いて

$$h\nu_{\text{roll}} = 2.1 \times 10^3 \text{ eV} \left( \frac{B}{10 \mu\text{G}} \right) \left( \frac{E_{e, \max}}{10^{14} \text{ eV}} \right)^2 \quad (1)$$

と表される<sup>8)</sup>. われわれは電波から硬 X 線までの広帯域スペクトルを解析し,  $h\nu_{\text{roll}} = 1.1 \times 10^3 \text{ eV}$  を得た<sup>7)</sup>.

われわれは同様の手法を, 歴史的に爆発の記録が残っている(=年齢のはっきりわかる)超新星残骸 4 天体にも応用した. 図 6 は Cas A (SN

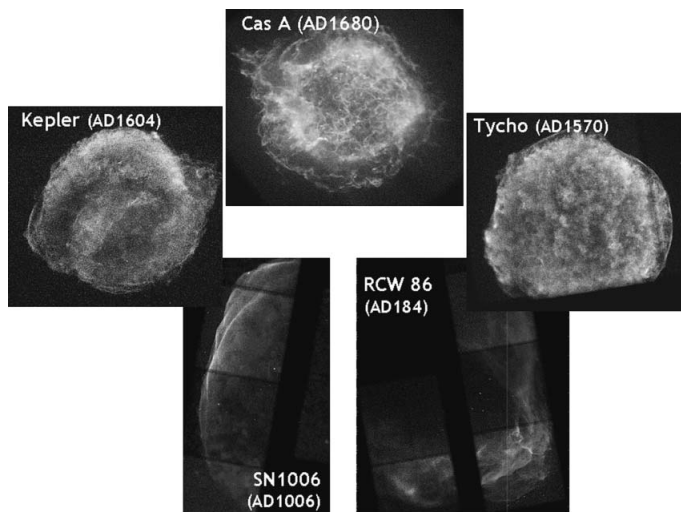


図 6 歴史的超新星残骸 (SN 1006, Cas A, Kepler, Tycho, RCW 86) のチャンドラによる硬 X 線イメージ. SN 1006 と同様, 衝撃波面近傍の狭い領域にシンクロトン X 線が局在している様子が見える.

1680), Kepler (SN 1604), Tycho (SN 1572), RCW 86 (SN 184) の「チャンドラ」による硬 X 線イメージである<sup>9)</sup>. いずれの超新星残骸においても, フィラメント状になった高エネルギー電子からのシンクロトロン放射を見ることができ, 細いフィラメントは比較的若い超新星残骸での宇宙線加速に共通の性質であることがわかる.

#### 4. 予想以上に細かったフィラメント

われわれは, シンクロトロン X 線のフィラメント状構造の細さに驚いた. なぜなら, それは従来の DSA で用いられるパラメーターから期待されるものよりはるかに細く, 標準的なシナリオを変更しなければならぬ可能性さえあったからである. ここでは, このことを少し専門的にはなが簡潔に述べてみたいと思う.

DSA によれば, 被加速粒子は磁場によって散乱されて拡散運動を行い, 上流から下流への大多数の粒子による全体的なプラズマの流れ (移流運動) に逆らって上流方向へさかのぼることができる. 特に最高エネルギー  $E_{e,max}$  をもつ電子は, 衝撃波面から拡散運動と移流運動の釣り合う距離  $\Delta R \sim K/u_s$  くらいまで存在する<sup>3)</sup>. ここで,  $u_s = 2,890 \text{ km s}^{-1}$  は衝撃波速度<sup>10)</sup>,  $K$  は電子の拡散係数で, 被加速電子が磁場によって一度散乱されてから次に散乱されるまでに移動する平均距離 (平均自由行程)  $l_{mfp}$  を用いて  $K = (1/3)l_{mfp}c$  と表される.  $l_{mfp}$  は非常に大雑把に電子のジャイロ半径  $r_g = E_{e,max}/eB$  に比例し, 不定係数  $\xi$  を用いて  $l_{mfp} = \xi r_g$  と書くのが慣習となっている.  $\xi$  は磁場ゆらぎの度合を表し,  $\xi$  が小さいということは磁場のゆらぎが大きく, その結果粒子が散乱されやすいことを意味する. (1) 式を用いて  $E_{e,max}$  を消去して次を得る.

$$\Delta R \sim 0.3\xi \text{ pc} \left( \frac{B}{10 \mu\text{G}} \right)^{-3/2} \left( \frac{u_s}{2,890 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-1} \times \left( \frac{h\nu_{\text{roll}}}{1,100 \text{ eV}} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

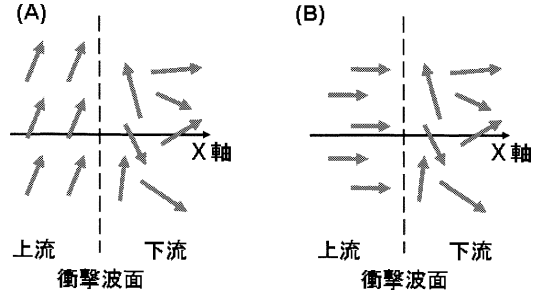


図 7 衝撃波面近傍の磁場の配位の概念図. 矢印は磁場を表す. 衝撃波面の法線方向 (x 軸) と上流磁場の方向が一致しない場合 (A) がななめ衝撃波, 一致する場合 (B) が平行衝撃波である.

(2) 式を端的に述べると, シンクロトロン X 線を放射する電子の空間分布は  $\xi$  に比例し, 磁場とともに減少する. 実際は最高エネルギー決定のモデルや衝撃波面の立体構造の影響などにより係数の不定性が多少あるが, 大雑把には観測されたシンクロトロン硬 X 線の空間分布  $w_u, w_d$  は  $\Delta R$  で決まるとしてよい. 以上のことを実際に SN 1006 の観測結果にあてはめてみよう. 観測結果 ( $w_u \sim 0.04 \text{ pc}, w_d \sim 0.2 \text{ pc}$ ) と (2) 式を比較すると,

(i)  $\xi < 1$

(ii)  $B \gg$  (典型的な星間磁場)  $\sim 1\text{--}10 \mu\text{G}$

のいずれか, もしくはその両方が必要であることがわかる ( $u_s, \nu_{\text{roll}}$  は決まっているので気にしないでよい). 「チャンドラ」以前では,  $\xi \sim 10\text{--}100, B \sim$  数  $\mu\text{G}$  程度で主にスペクトルなどの観測的性質を説明できると思われていたが, これでは観測された硬 X 線の空間構造を説明できないことが明らかになった.

(i) は  $l_{mfp} < r_g$  を意味するので一見すると不自然と思われるかもしれないが, 図 7(A) のような, 衝撃波面の法線方向 (図 7 中の x 軸) と磁場の方向が平行ではない衝撃波 (斜め衝撃波) では実現される場合がある<sup>11)</sup>. 粒子は磁場に平行な方向に拡散しやすく, その方向の平均自由行程は  $r_g$  より大きい. しかし, ななめ衝撃波の場合に  $l_{mfp}$  は x



軸上に射影された平均自由行程を表すので、 $r_g$  より小さくなる場合があるのだ。

## 5. なぜフィラメントは細い？ —SN 1006 の観測結果の理論的 解釈を巡る論争

現在、われわれの観測したシンクロトロン硬 X 線の空間構造の理論的解釈を巡り、大きく二つのシナリオに分かれて論争になっており、注目を集めている。なぜなら、一方は宇宙線加速は比較的穏やかであることを、他方では加速は非常に効率的であるということを経験し、二つのシナリオで描かれる宇宙線加速の描像が全く異なってしまうからである。

われわれは、衝撃波近傍でも磁場の値は星間磁場程度であると考え、(i) の立場に基づき、フィラメントの細さに対する理論的解釈を世界で初めて与えた<sup>7), 9), 12)</sup>。図 7(A) のように磁場が衝撃波面の法線 ( $x$  軸) にほぼ垂直 (垂直衝撃波) ならば衝撃波上流の磁場の値が星間磁場 ( $\sim 10 \mu\text{G}$ ) 程度で  $w_u, w_d$  の観測値を説明可能である。垂直衝撃波においては DSA 機構で加速される粒子の割合は図 7(B) のような磁場が  $x$  軸に平行な衝撃波 (平行衝撃波) の場合に比べて少なく、生成される宇宙線粒子の全エネルギーは超新星爆発で外に飛び出した物質の運動エネルギーの 1% 程度である<sup>13)</sup>。これは従来の標準的なシナリオに基づく理論的解釈である。

一方で、(ii) の立場の下、磁場が  $100 \mu\text{G}$  程度で衝撃波面の法線に平行 (図 7(B)) であるとして  $w_u, w_d$  の観測値を説明するモデルがある<sup>13), 14)</sup>。磁場が大きいと粒子の平均自由行程は小さくなり、何回も進む方向が変わる。その結果、被加速粒子は衝撃波面からなかなか離れることができず、衝撃波面の周りを何回も行ったり来たりするので、大きな運動エネルギーを得ることができる (加速効率が上がる)。また平行衝撃波のときには加速される粒子の割合も大きくなり<sup>15)</sup>、超新星爆発で

外に飛び出した物質の運動エネルギーの 10% 以上が生成される宇宙線のエネルギーに変換される<sup>13)</sup>。

(ii) のような場合では、宇宙線の作る圧力は他の大多数の粒子から構成される熱的プラズマからの圧力に対して無視できなくなり、衝撃波の構造が変成を受ける<sup>4)</sup>。宇宙線が衝撃波からどんどんエネルギーを奪うため下流の流体は温度が冷え、密度が高くなる。このため衝撃波前後の流体の速度差はさらに大きくなり、宇宙線加速はさらに効率良くなる (このような正のフィードバック効果は宇宙線の反作用効果、または非線型効果と呼ばれている)。実際に地球近傍でも太陽フレアが作る惑星間空間を伝わる衝撃波で、そのような宇宙線変成衝撃波がいくつか観測されていることもあり<sup>16), 17)</sup>、従来の比較的穏やかな (被加速粒子がテスト粒子近似できる) 加速のシナリオに代わって、現在では世界の標準モデルになりつつある。このような宇宙線の非線型効果が効くほど加速が効率的であるためには、磁場の値が  $100 \mu\text{G}$  と星間空間の典型的な値よりも 10–100 倍大きいことが必要である<sup>13)</sup>。このような状況も、加速された陽子自身が周囲のプラズマとの二流体不安定という現象を引き起こして、磁場が増幅され達成されると考えられている<sup>18)</sup>。さらに、加速できる陽子の最高エネルギーは磁場に比例し、(i) の場合ではおよそ  $10^{14}$  eV 程度、(ii) ではおよそ  $10^{15}$  eV 程度になると期待できる。つまり (ii) の非線型粒子加速の場合には knee エネルギー ( $10^{15.5}$  eV) まで超新星残骸での DSA で説明可能ということになり、期待をもって受け入れられている大きな理由の一つになっていると思われる。

## 6. 今後の展望—ASTRO-EII にかける期待—

われわれは「チャンドラ」衛星を使って初めて衝撃波粒子加速の現場を詳細にかいま見ることができた。「チャンドラ」による SN 1006 の観測は、

期待されていたよりもはるかに狭い領域にシンクロトロン硬 X 線が集中しているのを発見した。シンクロトロン硬 X 線の空間分布を議論することは宇宙線加速機構を調べる際にいままでない新たなアプローチである。これにより、DSA に現れる拡散係数などの物理量を直接的に議論することが可能になり、宇宙線加速理論に新たな問題を提起することになった。われわれは、得られた観測結果に対して (i) の立場で無矛盾な解釈を与えたが<sup>7), 9), 12)</sup>、今のところ (i), (ii) 両方の立場で解釈が可能である。

今後 (i), (ii) のうちいずれが正しいか決着をつけるために、以下のような観測が重要になると思われる。電波偏光の詳細観測によって磁場の配位の情報が得られればモデルに制限がつくことが期待される。エネルギー帯域  $10^{12}$  eV のガンマ線の放射は、(i) では高エネルギー電子による宇宙背景放射光子の逆コンプトン放射 (leptonic プロセス) が、(ii) では高エネルギー陽子と星間物質の反応によって生成された  $\pi^0$  粒子の崩壊による放射 (hadronic プロセス) がそれぞれ卓越する<sup>13)</sup>。これらは  $10^9$  eV から  $10^{12}$  eV にわたる放射スペクトルを調べることで識別可能である。SN 1006 に対する  $10^{12}$  eV のガンマ線の観測は世界の複数のグループにより行われているが、各々の結果が矛盾しており今後の確認が待たれる。また、hadronic プロセスのときに放射されるニュートリノの観測結果も重要になると思われる。観測的にどのシナリオがもっともらしいか決着がつくと、どのような環境でどのくらいのエネルギーが宇宙線に移行するのかをわれわれは現象論的に決めることができる。この後、これらの量を微視的な物理過程から説明することが理論的課題であろう。しかし、現時点では宇宙線へのエネルギー注入の割合、拡散係数の磁場依存性、磁場の増幅過程など、解決すべき問題が山積している。

なお、本稿で超新星残骸衝撃波面での宇宙線加速として議論してきたのは主に電子加速である。

一方で、宇宙線の主成分である陽子の加速については今までの研究はまだ想像の域を出していない。そこでわれわれは、2005 年に打ち上げられる日本の 5 番目の X 線天文衛星 *ASTRO-EII* を用いて陽子の加速効率の直接測定を計画している。毎秒  $1,000 \text{ km s}^{-1}$  以上の速度をもつ超新星残骸衝撃波の運動エネルギーは衝撃波下流で熱エネルギーに転化されるが、衝撃波の速度と下流のプラズマ温度を結びつける衝撃波接続条件<sup>19)</sup>を単に当てはめると下流の温度は  $kT \sim 2 \times 10^3 \text{ eV}$  以上になるはずである。ところが実際には超新星残骸の電子温度は  $10^3 \text{ eV}$  以下であることが一般的であり、SN 1006 の場合も  $200 \text{ eV}$  程度しかなく、陽子-電子平衡に達していないとしてもこの低い温度はエネルギーが熱的な成分から何か他の成分へと移動したことを示唆する。可能性として考えられるのは、宇宙線成分へのエネルギーの移動であるが、まだ証拠は掴めていない。*ASTRO-EII* には、世界で初めて超新星残骸のような広がった天体でも超高エネルギー分解能で観測できる X-ray spectrometer (XRS) が搭載されている。XRS を用いて詳細に熱的プラズマの状態を調べ熱的プラズマへ移ったエネルギーを求めることで、お釣りである宇宙線陽子へ移ったエネルギーを直接測定できれば、超新星残骸の衝撃波における DSA のシナリオに観測的に決着がつくと期待している。

## 謝 辞

本稿は筆者の一人(馬場)が京都大学在学時にまとめた博士論文の一部をもとに作成したものです。小山勝二教授(京都大学)、寺沢敏夫教授(東京大学)、星野真弘教授(東京大学)、吉田龍生助教授(茨城大学)、京都大学宇宙線研究室・天体核研究室の皆様にご感謝いたします。また、本稿に関して貴重なコメントをいただいた牧島一夫教授(東京大学/理化学研究所)、高原文郎教授(大阪大学)、藤田 裕上級研究員(国立天文台)、高橋弘毅氏(大阪大学/新潟大学)、寺田幸功研究員(理

化学研究所) に感謝いたします。最後に、本研究を遂行するにあたり、山崎は日本学術振興会から特別研究員 PD として援助を受けていることに感謝いたします。

### 参考文献

- 1) Hess V. F., 1912, Phys. Zeits. 13, 1084
- 2) Cronin J. W., 1999, Rev. Mod. Phys. 71, 165
- 3) Blandford R. D., Eichler D., 1987, Phys. Rep. 154, 1
- 4) Malkov M. A., Drury L. O'C., 2001, Rep. Prog. Phys. 64, 429
- 5) Koyama K., et al., 1995, Nature 378, 255
- 6) 齊藤国治, 1999, 定家『明月記』の天文記録—古天文学による解釈—(慶友社)
- 7) Bamba A., et al., 2003, ApJ 589, 827
- 8) Reynolds S. P., Keohane J. W., 1999, ApJ 525, 368
- 9) Bamba A., 2004, Ph.D. thesis, Kyoto University
- 10) Ghavamian P., et al., 2002, ApJ 572, 888
- 11) Jokipii J. R., 1987, ApJ 313, 842
- 12) Yamazaki R., et al., 2004, A&A 416, 595
- 13) Berezhko E. G., et al., 2002, A&A 395, 943
- 14) Berezhko E. G., et al., 2003, A&A 412, L11
- 15) Vólk H. J., et al., 2003, A&A 409, 563
- 16) Shimada N., et al., 1999, Astrophys. Space Sci. 264, 481
- 17) Terasawa T., et al., 1999, Proc. 26th ICRC 6, 528
- 18) Lucek S. G., Bell A. R., 2000, MNRAS 314, 65
- 19) Landau L. D., Lifshitz E. M., 1987, Fluid Mechanics (Pergamon Press, Oxford).

### Discovery of Small Scale Filaments in SN 1006—New Approach for Understanding Cosmic Ray Acceleration—

Aya BAMBA

RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research), 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Ryo YAMAZAKI

Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

Abstract: With excellent spatial resolution of the X-ray satellite *Chandra*, we discovered synchrotron X-rays in the supernova remnant SN 1006, which concentrate on very thin filamental structure. In order to illustrate the thin filaments with diffusive shock acceleration mechanism (DSA), we need (i) perpendicular magnetic field to the shock normal with the strength of interstellar magnetic field or (ii) very compressed parallel one. This method is a new approach to understanding the DSA.