Chandra による SN1006 衝撃波面の詳細観測

山崎 了* 馬場 彩† 植野 優‡ 小山 勝二§
(京都大学理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻)

1 はじめに

$10^{15.5}$eV (knee energy) 以下のエネルギーを持つ宇宙線は、銀河磁場に閉じ込められるために我々の銀河内天体が起源と考えられる。エネルギー収支等からその起源天体は超新星残骸 (SNR) が有力視されている。TeV 領域までの宇宙線加速を初めて観測的に示したのが 1995 年 *ASCA* による SN1006 の観測である (Koyama et al. 1995)。SN1006 の NE rim 及び SW rim から放射される非熱的 X 線を検出し、SN1006 の衝撃波面付近で 100TeV 程度まで加速された電子が存在することを示した。また CANGAROO グループは、同じく SN1006 の NE rim からそのような高エネルギー電子が CMB との逆コンプトン散乱によって放射する TeV ガンマ線を検出した (Tanimori et al. 1997)。他の幾つかの SNR からも、非熱的 X 線や TeV ガンマ線が検出されており、これら SNR の衝撃波面で電子 (および陽子) の加速が起こっているということが強く示唆されている。

このような宇宙線粒子の加速機構として最も標準的だと考えられているものが diffusive shock 加速 (DSA) である。DSA の理論は粒子数巾分布の巾指数や最高エネルギー等の性質をおよそ説明することができるが、拡散課程や injection 等の詳細な物理過程については理解されていない点も多い。これらの物理は粒子の空間分布に反映することが期待されるが、上で挙げたようなこれまでの観測では系全体からの放射のみ議論されており、空間依存性についての議論はなされていなかった。このような議論は *ASCA* のおよそ 100 倍の空間分解能を持つ *Chandra* 衛星によってはじめて可能となった。

我々は、*Chandra* のデータを用いて SN1006 から放射される非熱的な X 線の空間分布とスペクトルの解析を行い、簡単な DSA の仮定に基づいて種々の物理量を概算した。非熱的な X 線を放射する SNR についてのこのような解析ははじめてである。

*yamazaki@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp
†bamba@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp
‡masaru@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp
§koyama@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

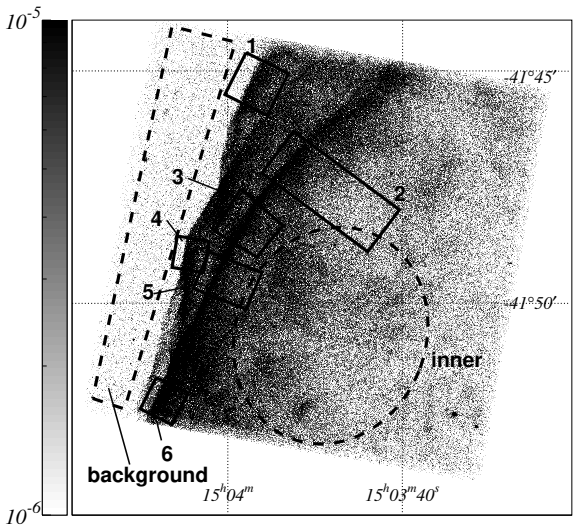

図 1: S3 チップの $0.5-10.0$ keV バンドのイメージ。色の濃淡はログスケールで 1×10^{-6} ~ 1×10^{-5} cnts s^{-1} arcsec^{-2} を表す (1 arcsec 四方で平均している)。1 ~ 6 が今回の空間分布の解析に用いた領域。

2 解析結果

SN1006 の NE rim のイメージを図 1 に示す。衝撃波面近傍で極端に狭いフィラメントが見える。

まず inner region (図 1 中の楕円の点線で示される領域) のスペクトル解析を行い、非平衡 ionization (NEI) の熱的成分 + 巾分布成分でフィットすることができた。その結果、2.0−10.0 keV バンドでは非熱的 X 線の成分が卓越していることがわかった。そこで、図 1 中の 1 ~ 6 で示されるフィラメント領域について 2.0−10.0 keV の X 線光子の空間分布の解析を行った。

典型的な例としてフィラメント 4 の非熱的 X 線強度の空間分布を図 2 に示す。フィラメントに垂直な方向を x 軸、強度のピークの位置を $x=0$ として、強度の空間分布を上流、下流それぞれについて $f(x)\propto\exp|x/w|$ でフィットし、上流、下流の幅 w_u、w_d をそれぞれ求めた。図 2 中の実線は上の関数型の best-fit モデルである。解析を行った 6 個のフィラメントの幅の平均値は、上流が 0.04pc、下流が 0.2pc であり、6 個の中の最小値は、上流が 0.01pc、下流が 0.05pc であった。

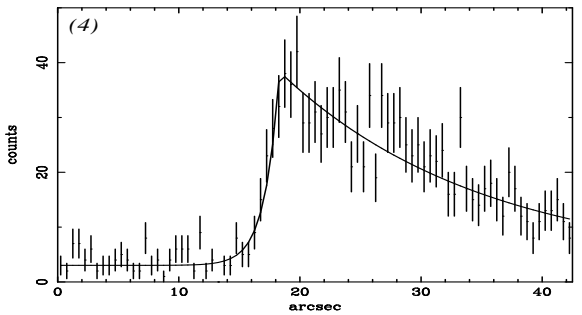

図 2: 図 1 中のフィラメント 4 の空間分布 (2.0−10.0 keV)。図中左側が上流、右側が下流である。1 bin は 0.5 arcsec。SN1006 までの距離を 1.8kpc とすると、1 arcsec $= 8 \times 10^{-3}$pc。

3 議論

求められた w_u、w_d の値から、DSA の枠組み内で拡散係数、磁場の値、加速された電子の最高エネルギーを概算することを考える。簡単のため、非熱的 X 線の空間分布は加速された高エネルギー電子の分布をトレースしているものとし[1]、磁場の方向は衝撃波面の法線に平行であるとする。衝撃波面の視線方向への投影の効果や曲率の影響は考慮せずに w_u、w_d を求めたため、この値は上限値を与えていると考えられる。そこで以下では、w_u には最小値の 0.01pc を用い、w_d については平均値 0.2pc を採用する。

上流では、加速された粒子は衝撃波面から K_u/u_s 離れたところくらいまで存在する。K_u、u_s はそれぞれ上流の拡散係数、(上流静止系で見た) 衝撃波の速度である。ここでは $u_s = 2.6 \times 10^3$ km s^{-1} を用いる。すると上流の拡散係数は

$$K_u \sim w_u u_s \sim 8.0 \times 10^{24}\,\mathrm{cm^2 s^{-1}} \qquad (1)$$

と計算できる。一方で下流の幅 w_d については、現在まで加速されていた電子が X 線を放射していると仮定すれば、移流や拡散の効果はあまり効かず、$w_d \sim K_d/u_d$ (K_d は下流の拡散係数。$u_d = u_s/4$。) として良い。このとき下流の拡散係数は

$$K_d \sim w_d u_s/4 \sim 4.0 \times 10^{25}\,\mathrm{cm^2 s^{-1}} \qquad (2)$$

となる。(1)、(2) を用いると加速時間は $t_{acc} \sim 4(K_u + 4K_d)/u_s^2 \sim 10^{10}$sec となり SNR の年令 ($\sim 10^3$ yrs) にほぼ等しくなることから、$w_d \sim K_d/u_d$ の仮定が正しいことがわかる。

[1]非熱的 X 線とともに、熱的 X 線の空間分布も求めることができるが (Bamba et al. 2002)、特に下流では熱的 X 線の空間分布の幅が優位に大きく (およそ 1pc で、セドフ解の密度分布と良く一致した長さスケールになっている)、非熱的 X 線の空間分布が磁場の強度分布をトレースしているとすると、磁場の強度が背景プラズマの密度とともに大きくなるとする限り矛盾する。

次に下流の磁場の値 B_d と加速された電子の最高エネルギー E_{max} を概算する。srcut モデル (Reynolds 1998) を用いて電波と X 線を結ぶスペクトルをフィットすることにより roll-off energy ($\propto E_{max}^2 B_d$) を求め、下流の磁場 (X 線の放射は下流からのものが卓越している) と最高エネルギーの満たす関係：

$$E_{max} B_d^{1/2} = 0.37^{+0.04}_{-0.06}\ \ [\mathrm{erg\,G^{1/2}}] \qquad (3)$$

が得られる。また、電子が加速されるためには、加速時間 t_{acc} がシンクロトロン放射による冷却時間よりも小さくなければならないので、

$$6.3 \times 10^2 E_{max}^{-1} B_d^{-2} \geq 9.7 \times 10^9\ \ [\mathrm{sec}] \qquad (4)$$

を得る。さらに拡散係数を $K = \xi\, r_g c/3$ (r_g はジャイロ半径 $\propto E_{max} B_d^{-1}$) とおくと、磁場が衝撃波面の法線に平行ならば、$\xi_d \geq 1$ でなければならないので、

$$E_{max} B_d^{-1} \leq 6.4 \times 10^6\ [\mathrm{erg\,G^{-1}}] \qquad (5)$$

が得られる。(3)、(4)、(5) を満たす E_{max}、B_d は、それぞれ $E_{max} \sim 30{-}40$ TeV、$B_d \sim 30{-}40\,\mu$G となり、また $1 \leq \xi_d \leq 1.3$ を得る。さらに、(1)、(2) と ξ の定義より $\xi_u \sim 0.2\,\xi_d (B_u/B_d) \leq 0.3$ となる。これは斜め衝撃波になっていることを示唆する結果である。

観測されたフィラメントの薄さはこれまでの DSA の枠組みで marginal に説明できるという結論を得た。非熱的 X 線を放射している他の SNR についても、観測される X 線の非熱的成分の空間的な幅は狭く、SN1006 と同様な議論となる可能性がある。そうすると DSA とは異なる加速機構 (例えば、Hoshino & Shimada 2002 で提唱されているような電子サーフィン加速) が働いている可能性もあるかもしれない。今後の議論の展開のためには DSA も含めてより定量的な評価が必要である。

References

- Bamba, A., Yamazaki, R, Ueno, M., & Koyama, K., 2002, Submitted to ApJ.
- Hoshino, M., & Shimada, N. 2002, ApJ, 572, 880
- Koyama, K. et al. 1995, Nature, 378, 255
- Reynolds, S. P. 1998, ApJ, 493, 375
- Tanimori, T. et al. 1997, ApJ, 497, L25