

X 線天文衛星「すざく」による 超新星残骸 RCW86 での宇宙線加速の系統的研究

坪根義雄、馬場彩、澤田真理（青山学院大学大学院 理工学研究科）

Abstract

銀河系内宇宙線の加速メカニズムとして、超新星残骸衝撃波での Diffusive Shock Acceleration (DSA) が広く受け入れられている。しかし、加速効率を決めているパラメータが何なのかはよく分かっていない。その候補として残骸衝撃波の周辺環境が考えられるが、加速効率と周辺環境との関連を調べた研究はあまりなかった。

RCW86 は視直径 $\sim 1^\circ$ 、距離 ~ 1 kpc、年齢 ~ 2000 歳の系内超新星残骸である。この残骸の X 線スペクトルは加速電子からのシンクロトロン X 線とプラズマからの熱的 X 線の両方を示しており、場所によってシンクロトロン X 線が優勢なところと熱的 X 線が優勢なところがある。シンクロトロン放射強度は加速電子の密度に比例し、熱的 X 線強度は加熱された周囲のガスの密度の 2 乗に比例する。したがってこれらを比較することで、どのような環境で効率よい加速が行われているかを明らかにできる可能性がある。

本研究ではすざくの XIS により観測された合計 6 観測を用いて、残骸全面を 44 の小さな領域に分割し、領域ごとのスペクトル解析を系統的行った。それぞれのスペクトルは ~ 0.3 keV の星間物質と ~ 2 keV の鉄イジェクタからなる 2 成分プラズマモデルと、シンクロトロン放射を表すべき型分布の重ね合わせで再現することができた。宇宙線加速の環境依存を調べるため、我々はシンクロトロン X 線強度と熱的 X 線強度の相関を調べた。シンクロトロン X 線強度は 3.0–5.0 keV の積分強度で、熱的 X 線強度は低温プラズマ成分の Emission Measure で評価した。その結果熱的 X 線が暗い領域ほど (1) シンクロトロン X 線がより卓越し (2) その放射が硬くなることを明らかにした。この結果は周辺の星間ガス密度が低い領域ほど宇宙線の加速効率が良いことを示唆している。

1 Introduction

宇宙線とは、宇宙から地球に降り注いでくる高エネルギー粒子のことである (Hess 1912)。そのエネルギースペクトルは図 1 のように折れ曲がりのある単純なべき関数で表される。ASCA によるシンクロトロン X 線放射の発見で、数十 TeV までの電子については銀河系内の超新星残骸の衝撃波面で加速していることが明らかになった (Koyama et al. 1995)。さらに、Chandra を用いた衝撃波面の詳細イメージは、非常にコンパクトな領域で加速が起こっていることを示した (Bamba et al. 2003)。

宇宙線の加速メカニズムは Diffusive Shock Acceleration (DSA: Bell 1978) で記述され、スペクトルをよく再現している。しかしどれくらいの割合の粒子が DSA に注入されるのかは未だ分かっていない。そ

の割合（加速効率）は周辺環境によって変わる可能性があるが、これまで加速効率と周辺環境との関連を調べた研究はあまりなかった。

RCW86 は銀経 315.4 度、銀緯 -2.5 度に位置する系内の超新星残骸である (Stephenson & Green 2002)。視直径は $\sim 1^\circ$ 、距離は ~ 1 kpc と見積もられている (Rosado et al. 1996)。Naranan et al. (1977) により、はじめて X 線放射が発見され、比較的低いプラズマ温度 (~ 0.5 keV) から古い残骸だと考えられていた。しかし、Chandra/XMM-Newton の観測で ~ 3.0 keV のより高温なプラズマが検出され、現在では歴史的超新星 SN185 の残骸（年齢 ~ 2000 年）であると考えられている (Vink et al. 2006)。

この残骸の X 線スペクトルは高温プラズマからの熱的 X 線と加速電子からのシンクロトロン X 線の両方を示している (Bamba et al. 2000)。また、これら

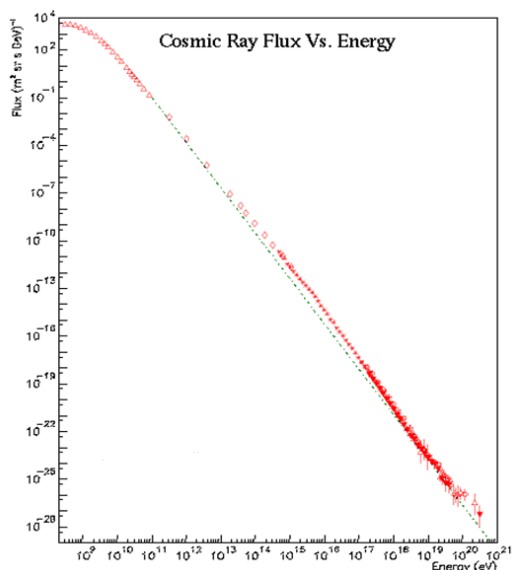


図 1: 宇宙線エネルギースペクトル (Cronin 1999)

の強度比が場所ごとに違うので、両者の関係を調べるのに最適である。シンクロトン放射強度は加速電子の密度に比例し、熱的 X 線強度は加熱された周囲のガスの密度の 2 乗に比例する。したがってこれらを比較することで、どのような場所で効率よい加速が行われているかを明らかにできる可能性がある。

本発表の目的は、RCW86 における加速効率と周辺環境の関係を検証することである。そのため、すざく衛星 (Mitsuda et al. 2007) 搭載の X-ray Imaging Spectrometer (XIS: Koyama et al. 2007) で取得した RCW86 全域のデータを系統的に解析した。

2 Observations

本研究では「すざく」衛星の XIS により観測された合計 6 領域の観測データを使用した。表 1 は使用データについてまとめたものである。また、各観測の視野を図 2 の色つきの破線に示した。

XIS は X 線 CCD であり、X-ray Telescope (XRT: Serlemitsos et al. 2007) と組み合わせて 0.2–12.0 keV での撮像分光を行う。すざくには 4 組の XIS-XRT が搭載されていて、4 台の XIS のうち 3 台 (XIS 0,2,3) は表面照射型素子 (FI) を、残る 1 台 (XIS 1) は裏面照射型素子 (BI) を用いている。BI は低エネルギー X

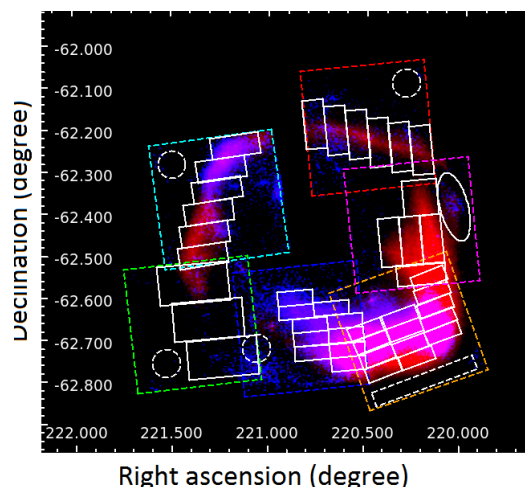


図 2: すざくによる RCW 86 のイメージ。赤で示したものは 0.5–2.0 keV のバンドイメージで、青で示したものは 3.0–5.5 keV のバンドイメージである。各観測の視野を色つきの破線で示しており、水色 (EAST)、緑 (SE)、青 (SOUTH)、オレンジ (SW)、ピンク (WEST)、赤 (NORTH) となっている。また、白の実線は領域を分けたスペクトル解析の際に使用するソース領域であり、白の破線は各観測ごとに Background として使用した領域である。WEST に関しては視野内に Background 領域を取ることが困難だった為、SE の Background 領域を使用して解析を行った。

表 1: 「すざく」衛星による RCW86 の観測データ

領域	観測日	有効時間 [ks]	赤経 [deg]	赤緯 [deg]	XIS の台数
SW	2006-02-12	100.8	220.28	-62.68	4
EAST	2006-08-12	59.8	221.26	-62.36	4
NORTH	2009-01-29	55.4	220.50	-62.21	3
SOUTH	2009-01-31	54.8	220.83	-62.67	3
SE	2009-02-01	53.5	221.39	-62.67	3
WEST	2009-02-02	53.6	220.28	-62.43	3

線に対して、FI は 2 keV 以上の高エネルギー X 線に対してそれぞれ検出効率が高い。この特性と、優れたエネルギー分解能 (~130 eV at 6 keV at FWHM)、XRT の大きな有効面積 (440 cm² at 1.5 keV) のおかげで、熱的 X 線と非熱的 X 線の両方に対して高い感度を持ち、本研究に最適である。

3 Analysis

解析には HEASoft version 6.12 を用いた。スペクトル解析には XSPEC version 12.7.1 を用い、xismfgen および xissimarfgen (Ishisaki et al. 2007) で作成した応答関数を使用した。非 X 線バックグラウンドは xisnxbgen (Tawa et al. 2008) を用いて見積もった。

3.1 Image

熱的 X 線と非熱的 X 線の空間分布を捉える目的でバンドイメージを作成した。まず、0.5–2.0 keV および 3.0–5.5 keV で各観測ごとにイメージを抽出した。このエネルギーバンドで分けるのは、過去の観測で得られたスペクトルにおいて、2 keV 以下では熱的成分が、これより上では非熱的成分が卓越しているからである (Vink et al. 2006)。次に、X 線の輝度分布を正確に得るため、それぞれ NXB を差し引き、全観測をあわせた上で、xissim でシミュレートした flat field で規格化した。これにより用いた XIS の台数の違い、exposure の違い、および望遠鏡の vignetting 効果を補正した。以上のように補正した RCW86 全域のイメージが図 2 である (0.5–2.0 keV : 赤色・3.0–5.5 keV : 青色)。これを見ると熱的 X 線と非熱的 X 線の分布が異なり、おおそ反相関していることが分かる。

3.2 Spectra

イメージが示唆する 2 つの成分の反相関をより定量的に検証するため、スペクトル解析を行った。はじめに、プラズマの組成比や温度を決定する目的で各観測、全視野でスペクトル解析を行った。具体的には、Power-law と 2 温度のプラズマモデル (低温: Vpshock と高温: Vnei) を使用した。高温プラズマに関しては Yamaguchi et al. (2008) を参考に、温度 1.8 keV、組成比は鉄以外を 1 solar とした。電離度 τ は鉄輝線のエネルギー中心値から見積もった。低温成分は He・C・N・O を 1 solar とした。それ以外のパラメータを free としてフィッティングを行った。

次に、残骸全域を図 2 のように 44 の小さな領域に分割し、各領域ごとにスペクトル解析を行った。バックグラウンドスペクトルは、その空間変動や観測性

能の時間変化による系統誤差を最小化するため、観測ごとに同じ視野内から抽出した。ただし、WEST に関しては視野内から抽出することが難しかった為、SE のものを用いた。スペクトルの例として EAST の 1 領域のスペクトルを図 3 に示す。この解析では温度や組成比は全視野での解析で得られた値で固定し、3 つの成分の強度と Power-law 成分の Photon index のみ free としてフィッティングを行った。この解析方法により、全領域において良い解析結果を得ることができた。

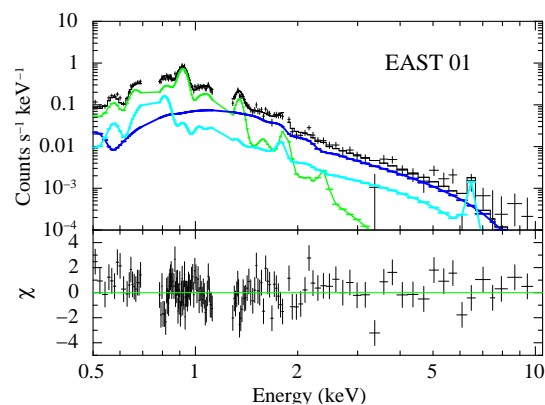


図 3: 領域分けをしたスペクトル解析の例 (EAST01)。青で示しているのが Power-law 成分で、緑が低温プラズマ成分 (Vpshock)、そして水色が高温のプラズマ成分 (Vnei) である。

4 Results and Discussion

熱的 X 線強度はプラズマ密度の関数である低温成分熱的 X 線の Emission Measure (EM) で評価し、非熱的 X 線強度は加速電子の密度に比例するシンクロトロン X 線の 3–5 keV の表面輝度 (SB_{NT}) で評価をした。図 4 に $EM^{1/2}$ に対して $SB_{NT}/EM^{1/2}$ をプロットした。 $SB_{NT}/EM^{1/2}$ は熱的プラズマ密度に対して非熱的 X 線がどれだけ卓越しているかを表している。相関係数を計算すると -0.39 ± 0.15 となり、負の相関があることが分かる。図 5 に $EM^{1/2}$ に対して Power-law 成分の photon indices をプロットした。これに関して相関係数を計算すると $+0.37 \pm 0.16$ となり、正の相関があることが分かる。以上二つの相関

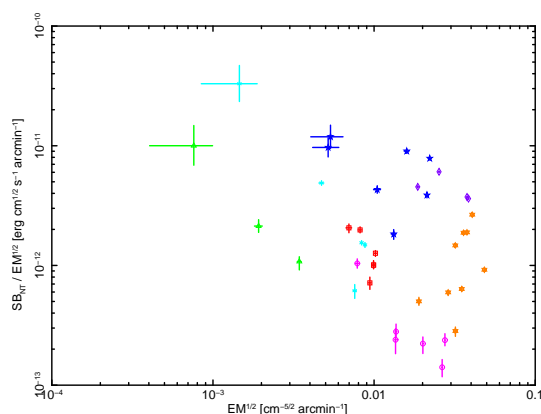


図 4: $EM^{1/2}$ と $SB_{NT}/EM^{1/2}$ の関係をプロットした。データ点の色の違いは各観測の違いを表している (図 2)。

により、熱的 X 線が弱いところほど非熱的 X 線が卓越しており、その放射が固くなっていくということが分かる。このことはプラズマ密度の薄いところで効率よい宇宙線加速が行われていることを示唆している。

Acknowledgement

本研究において用いている、すざく衛星の素晴らしいデータを提供してくださいました、すざくチームの皆様には感謝いたします。その他にもさまざまな観測データ、解析ソフトによって本研究は成り立っています。JAXA、NASA をはじめとする、X 線天文学関係者の皆様にお礼を申し上げます。

Reference

Bell, A. R. 1978, MNRAS, 182, 147
 Bamba, A., Koyama, K., & Tomida, H. 2000, PASJ, 52, 1157
 Bamba, A., Yamazaki, R., Ueno, M., & Koyama, K. 2003, ApJ, 589, 827
 Cronin, J. W. 1999, Reviews of Modern Physics Supplement, 71, 165
 Hess V.F. 1912, Phys. Zeits 13, 1084
 Ishisaki, Y., Maeda, Y., Fujimoto, R., et al. 2007, PASJ, 59, 113

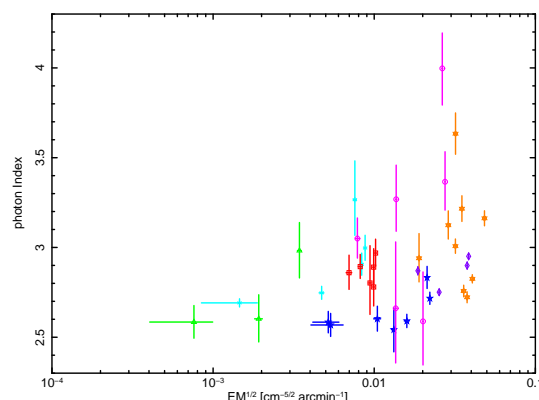


図 5: Powerlaw 成分の photon indices と $EM^{1/2}$ の関係をプロットした。データ点の色の違いは各観測の違いを表している (図 2)。

Koyama, K., Petre, R., Gotthelf, E. V., et al. 1995, Natur, 378, 255

Koyama, K., Tsunemi, H., Dotani, T., et al. 2007, PASJ, 59, 23

Mitsuda, K., Bautz, M., Inoue, H., et al. 2007, PASJ, 59, 1

Naranan, S., Shulman, S., Yentis, D., Fritz, G., & Friedman, H. 1977, ApJL, 213, L53

Rosado, M., Ambrocio-Cruz, P., Le Coarer, E., & Marcelin, M. 1996, A&A, 315, 243

Serlemitsos, P. J., Soong, Y., Chan, K.-W., et al. 2007, PASJ, 59, 9

Stephenson, F. R., & Green, D. A. 2002, Historical supernovae and their remnants, by F. Richard Stephenson and David A. Green. International series in astronomy and astrophysics, vol. 5. Oxford: Clarendon Press, 2002, ISBN 0198507666, 5,

Tawa, N., Hayashida, K., Nagai, M., et al. 2008, PASJ, 60, 11

Vink, J., Bleeker, J., van der Heyden, K., et al. 2006, ApJL, 648, L33

Yamaguchi, H., Koyama, K., Nakajima, H., et al. 2008, PASJ, 60, 123