

Chandra 衛星を用いた Tycho の超新星残骸における衝撃波の解析

岩崎 啓克 (立教大学大学院 理学研究科 物理学専攻)

Abstract

1572 年に超新星爆発が観測された若い超新星残骸 (SNR: Supernova Remnant) である Tycho の超新星残骸では、衝撃波で加速された電子からのシンクロトロン放射による明るいフィラメント構造が外縁部に見られる。Tycho の SNR の外縁部のフィラメントに沿って領域を取り、一次元投影の技術を用いて衝撃波の移動速度とフィラメントの幅を求めた。衝撃波のプロパーモーションは $0.2''/\text{year}$ – $3.6''/\text{year}$ であり、ほぼ一様な膨張をしていることが確かめられた。また、フィラメントのスケール幅は、1.0–1.6 keV のソフトなエネルギー帯では上流側で $0.8''$ – $1.4''$ 、下流側で $2''$ – $20''$ 、4.0–5.0 keV のハードなエネルギー帯では上流側で $0.5''$ – $2''$ 、下流側で $1.5''$ – $12''$ と求められた。

1 Introduction

超新星爆発によって放出された物質は星間物質や星間磁場の影響を受けながら $\sim 10^4$ 年に渡って膨張を続ける。これを超新星残骸 (SNR) と呼ぶ。SNR は宇宙線の加速などの物理現象の場であり、高エネルギー天文学の重要な研究対象となっている。

宇宙空間には高いエネルギーを持った陽子などの粒子が飛び交っており、それを宇宙線と呼ぶ。地球に降り注ぐ宇宙線が持つエネルギーは 10^{10} eV から 10^{20} eV まで幅広いが、そのなかで $10^{15.5}$ eV までの宇宙線は銀河系内に起源を持つと考えられている。SNR は銀河宇宙線の加速の場の有力な候補として注目されている。超新星残骸中の衝撃波を陽子や電子などが往復するたびに加速されてエネルギーを得ていると考えられている。SNR の衝撃波について、その速度や空間構造を調べることによって、宇宙線が加速されている環境について知ることができる。

SNR の年齢は、現在見えている SNR の姿が、時間進化のモデルにおいてどの段階にあたるかを考える上で必要であるが、超新星爆発した年が記録に残っているものは数例しかない。Tycho の SNR はその貴重な天体の一つで、1572 年に地上で観測されたことが Tycho Brahe によって記録に残されている。ライトエコーの観測から Ia 型超新星であったことがわかっている。現在の Tycho の SNR の形状は円形に近く、外縁部には明るいフィラメント構造が見える。このフィラメントは、Tycho の SNR を覆うようなシェル

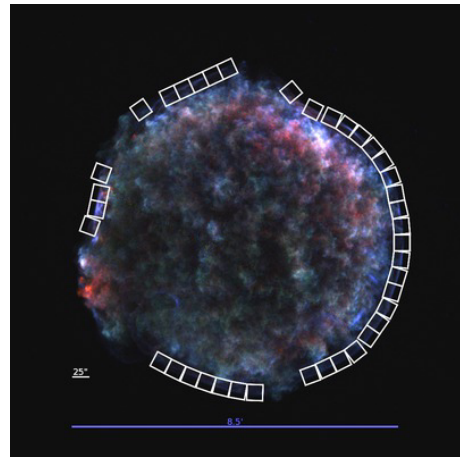


図 1: Tycho の超新星残骸と投影領域。赤は 0.5–1.2 keV、緑は 1.2–2.0 keV、青は 2.0–7.0 keV のエネルギー帯での X 線放射を表す。

状の空間構造を持つ衝撃波によるものであると考えられる。

Tycho の SNR は北東側で分子雲と衝突している可能性が示唆されている。Chandra 衛星によって 2000 年、2003 年、2007 年に行われた X 線観測を用いて、膨張速度が求められており、北東側で膨張が減速していることが報告されている (Katsuda et al. 2010)。

衝撃波によって形成されたフィラメント構造の幅は、移流効果によって電子のエネルギーの平方根に反比例するモデルと、移流と拡散の効果が釣り合っ電子のエネルギーに依存しないモデルとがある。い

くつかの SNR において幅が測定されているが、どちらが有力か確定していない。

2 Analysis and Results

Chandra 衛星ではこれまでに、2003 年、2007 年、2009 年に Tycho の SNR を X 線撮像検出器 ACIS-I (Advanced CCD Imaging Spectrometer) を用いて観測している。Tycho の SNR の現在の視直径は $\sim 8.5'$ であり、ACIS-I 全体の視野 $16.8'$ に収まっている。Chandra 衛星の空間分解能は $0.58''$ であり、他の X 線天文衛星と比べて非常に高い空間分解能を持っていると言える。この高い空間分解能を持つてすれば、細かな空間構造や、位置の時間変化を捉えることができる。つまり、Tycho の SNR のフィラメントの厚さや、数年間での膨張を十分に測定することができる。

2.1 膨張速度

プロパーモーションを求めた先行研究 (Katsuda et al. 2010) に従い、Chandra 衛星による観測データを用いて、Tycho の SNR における衝撃波のプロパーモーションを求めた。(Katsuda et al. 2010) では、2000 年、2003 年、2007 年の観測を用いている。しかし、2003 年、2007 年、2009 年の観測では表面照射型の CCD で撮像されているのに対し、2000 年の観測では裏面照射型の CCD である ACIS-S で撮像されている。2000 年の観測は、他の観測の観測時間が 100 ks を超えているのに対して 48.9 ks と短く、さらに南側で欠けている部分がある。より精度良く解析するために 2000 年の観測は扱わないことにした。また、今回は新たに 2009 年の観測を解析に用いている。そのため、観測の時間間隔が 6 年と広がり、より統計の良い結果を得ることができた。各観測のイベントデータから、観測位置が合うようにして、エネルギーバンド 1.0 keV から 8.0 keV、ビンサイズ $0.59''$ のフラックスイメージを作成した。図 2 に示したように Tycho の SNR の外縁部に沿って、 $25'' \times 25''$ の正方形領域を計 38 個定義した。それぞれの領域について、各観測のフラックスイメージの一次元投影を

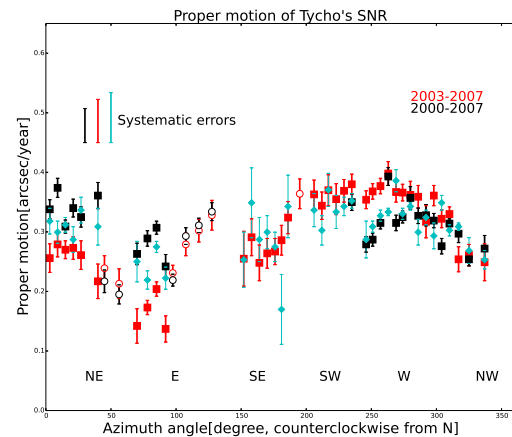


図 2: 投影により求められたプロパーモーション。ひし形のプロットが本解析で得られた点。正方形のプロットは (Katsuda et al. 2010) による。

行った。併せて、1 組の投影データを、観測年の若い方をモデルとして χ^2 フィッティングをし、衝撃波の移動距離を求めた。領域ごとの移動距離から、Tycho の SNR における順行衝撃波の速度を場所ごとに求めることができた。地球からの距離を 3 kpc としたとき、これらの速度の平均は 4138 ± 473 km/sec である。

2.2 フィラメントの形状と幅

ソフトバンド、ハードバンドのエネルギー帯をそれぞれ 1.0–1.6 keV、4.0–5.0 keV として、フラックスイメージを作成した。Tycho の SNR の外縁部において、フィラメント構造が見える領域を選んだ。このとき、フィラメントまで内部のイジェクタが到達しているような箇所は、一次元投影した際にプロファイルの幅に影響があるため、領域に含まないように避けた。また、フィラメントの形状は曲線的であるが、領域内では直線として扱えるように範囲を設定した。それぞれの領域について、フィラメントに沿って投影を行い、このようなフィラメント構造をよく再現すると経験的に知られているモデル (Bamba et al. 2003) をフィッティングした。このモデルは、ピー

クを境にして指数の変わる指数関数であり、式 1 のように表される。

$$f(x) = \begin{cases} A \exp\left(-\left|\frac{x_0-x}{w_u}\right|\right) & (\text{upstream}) \\ A \exp\left(-\left|\frac{x_0-x}{w_l}\right|\right) & (\text{downstream}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 A と x_0 はそれぞれピークでのフラックスと位置であり、 w_u と w_d はそれぞれ衝撃波の上流と下流のスケール幅である。

ソフトバンドとハードバンドの間でのフィラメントのスケール幅の関係は図 3 のようになった。スケール幅は上流下流ともに、ソフトよりもハードの方が小さくなる傾向がある。

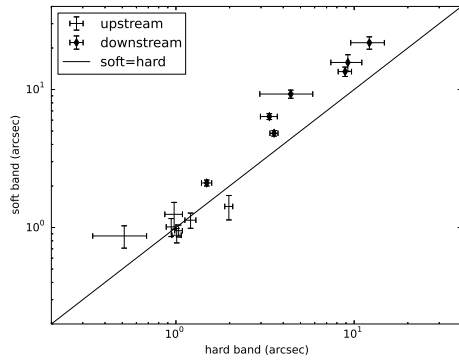


図 3: ハードとソフトの間のフィラメントのスケール幅の関係。十字が上流 w_u 、ひし形のプロットが下流 w_d を表す。

3 Discussion

3.1 膨張

今回得られた結果から、衝撃波速度の位置ごとのばらつきが先行研究での値より小さいことが示された。この結果は Tycho の SNR の円形に近い形状とも矛盾しない。一方で、東側領域での膨張は減速していないことが確認された。2003 年から 2007 年の間に減速が起きたことが示唆されていたが (Katsuda et al. 2010)、これに対して否定的な結果である。このことから、分子雲との相互作用の有無は、この結果からは判断できない。

3.2 フィラメント

フィラメントは非熱的な電子からのシンクロトロン放射で明るく光っていると考えられている。これらの電子は放射によってエネルギーを失うため、電子の分布が空間的に広がることのできる範囲には限りがある。シンクロトロン冷却は磁場強度と電子のエネルギーによるため、より高いエネルギーの電子ほど速く冷却される。そのため、移流効果で広がった電子分布を考えると、式 2 のように高エネルギーの電子から放射されるハードな X 線では、ソフトな X 線に比べて、放射範囲が狭くなる。一方で、エネルギーの高い電子ほど拡散速度は速い。拡散効果を加えて考えると、式 3 のように移流効果と相殺して、電子の分布、つまりフィラメントの放射範囲は電子のエネルギーによらないことになる。

$$l_{\text{adv}} = \frac{t_{\text{cool}} v_{\text{sh}}}{r} = 1.8 \times 10^{-3} B_{\text{mG}}^{-3/2} \nu_{\text{keV}}^{-1/2} v_{1000} / r \text{ pc} \quad (2)$$

$$l_{\text{dif}} = \sqrt{\kappa_d t_{\text{cool}}} = 1.2 \times 10^{-3} B_{\text{mG}}^{-3/2} \text{ pc} \quad (3)$$

式 2 は移流効果のみ考えたときの衝撃波下流での放射のスケールハイト l_{adv} を、式 3 は拡散効果を入れたときのスケールハイト l_{dif} をそれぞれ表す。 t_{cool} はシンクロトロン冷却の時間、 ν_{keV} は単位 keV のシンクロトロン放射の周波数を表す。 v_{sh} は衝撃波速度で、単位を 1000 km/s とした $v_{1000} = v_{\text{sh}}/1000 \text{ km/s}$ も用いている。

解析結果から、ソフトよりハードの方がフィラメントのスケール幅が小さい傾向にあることが確かめられたので、式 2 に従って移流効果が効いていることが示唆される。今後、PSF による影響も考慮に入れて、より精度よく確認をする必要がある。

4 Conclusion

Tycho の SNR の外縁部に沿った衝撃波とその前後に生じたフィラメント構造について、次元投影を用いて解析を行い、衝撃波の膨張速度とフィラメントの幅を求めた。衝撃波速度は、先行研究ほど値に幅はなく、ほぼ一様な膨張をしていることがわかった。また、フィラメントの厚さは、ハードな放射の方がより細くなる傾向が見られた。今後、PSF も考慮に入れてさらなる解析をする。

2015 年度 第 45 回 天文・天体物理若手夏の学校

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04)
及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

Katsuda, S., Petre, R., Hughes, J.P., Hwang, U., Yamaguchi, H., Hayato, A., Mori, K. & Tsunemi, H.
2010, ApJ

Ballet, J. 2006, Advances in Space Research

Bamba, A., Yamazaki, R., Ueno, M. & Koyama, K.
2003, ApJ