

Central Compact Object 1E 161348-5055 を伴う超新星残骸 RCW 103 の「すぎく」による観測的研究

古田 禄大, 中野俊男, 村上浩章, 中澤知洋, 牧島一夫 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

RCW 103 は 2000 歳程度の若い重力崩壊型超新星残骸 (SNR) で、距離約 3.1 kpc、視直径約 10 分で、中心に中性子星 1E 161348-5055 をもつ。この中心天体は 2000 年に X 線光度が約 50 倍に増大する現象が観測され、さらに 2005 年 8 月の XMM-Newton 衛星による観測から、その X 線放射に非常に長い 6.67 時間の変動周期が見つかった。RCW 103 は X 線天文衛星「すぎく」によって 2009 年 8 月 16 日から 17 日に exposure 66 ksec で観測され、その X 線スペクトルは電離非平衡プラズマモデルを使って温度 0.25 keV と 0.55 keV の二成分で説明でき、前者が衝撃波で加熱された星間ガス成分、後者が爆発の噴出物 (ejecta) と考えられる。ejecta の密度は 1.8 cm^{-3} 、爆発のエネルギーは $\sim 4 \times 10^{50} \text{ erg}$ と求まり、SNR が一様球だと仮定すると親星の質量は $\sim 15 M_{\odot}$ と推定された。この超新星爆発には目立った特異性は見られず、重力崩壊型として典型的であった。

1 Introduction

質量が $8 M_{\odot}$ 以上の重い恒星は、その一生の最期に重力崩壊型の超新星爆発を起こす。星の中心核が重力崩壊する反動で星の外層部は時速数千 km で吹き飛ばされ、衝撃波によって周囲の星間ガス (ISM) が $\sim 10^7 \text{ K}$ まで加熱・圧縮されて球殻状の shell を成したり、shell に跳ね返された後方衝撃波によって爆発の噴出物 (ejecta) が加熱されたりすることで、X 線で明るく光っている。この星雲状の天体を超新星残骸 (SNR) といい、その中心付近には重力崩壊で作られた中性子星 (NS) が見つかる場合がある。これまでに、かにパルサーのような活動的な電波パルサーをはじめ、マグネターのような強磁場 NS、Central Compact Object (CCO) と呼ばれる軟 X 線点源など様々なタイプの NS が複数の SNR の中心付近に見つかっている。CCO は若い孤立 NS と考えられているが、電波放射がなく活動性が弱いなど、これまでよく知られている NS とは異なる性質をもち、その正体はよくわかっていない。

SNR の X 線観測によって、輝度やプラズマの電子温度、元素アバダンスを知ることができ、これらの値と SNR の距離や大きさを使うことで、SNR の

年齢や、shell、ejecta、周囲の星間ガスの密度を推定することができる。さらにモデルを含めた推定によって、親星の質量や組成、超新星爆発のエネルギーといった、爆発のパラメータを見積もることができる。

我々は、電波パルサーやマグネター、CCO といった様々な NS を作る超新星爆発に何か違いがないか調べるため、残骸である SNR を研究し、特に今回は、CCO を伴い明るく解析しやすい SNR として、RCW 103 を選んだ。この SNR は距離約 3.1 kpc にあり (Reynoso *et al.* 2004)、視直径は約 10 分 (9 pc) で、可視光による shell の膨張速度の測定から、年齢は 2000 歳程度と分かっている (Carter *et al.* 1997)。中心には CCO 1E 161348-5055 があり、2000 年に X 線光度が約 50 倍に増大する現象が観測された。さらにその後、2005 年 8 月の XMM-Newton 衛星による観測から、X 線放射に非常に長い 6.67 時間の変動周期が見つかり (De Luca *et al.* 2006)、謎の多い中心天体である。SNR の X 線観測から、この特異な CCO を作った超新星爆発に何か特異性が見つかる可能性があると考え、SNR の解析を行った。

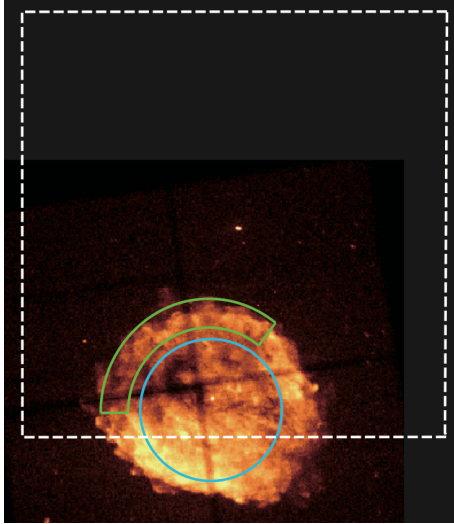


図 1: Chandra 衛星による RCW 103 の X 線イメージに、「すぎく」XIS 検出器の視野（白）とスペクトル抽出領域（青、緑）を示したもの。青は SNR の中心付近（半径 3 分の円）、緑は外縁部（厚み 1.2 分）。

2 Observation

我々は X 線天文衛星「すぎく」の公開データを解析した。「すぎく」は高度 550 km の略円軌道を周回しており、他の X 線衛星に比べて宇宙線の影響を受けにくいバックグラウンドレベルが低く、さらにエネルギー分解能がよいので、SNR の観測に適している。この公開データは、RCW 103 に隣接するパルサー PSRJ 1617-5055 を対象に、2009 年 8 月 16 日から 17 日に exposure 66 ksec で行われた観測のものだが、その視野の一部に RCW 103 が半分あまり写り込んでいた。図 1 は、Chandra 衛星で得られた RCW 103 の X 線イメージに、「すぎく」XIS 検出器の視野と、解析でスペクトルを抽出した領域を重ねて示したものである。RCW 103 は 5 keV 以上では暗く、十分な統計が得られなかったため、10 keV 以上の硬 X 線を検出する硬 X 線検出器 (HXD) は使用せず、XIS 検出器で得られたスペクトルのうち 0.5–5.0 keV の範囲のみを使用した。

表 1: スペクトルのフィットで得られたパラメータ

領域	外側	内側
$n_{\text{H}} (\times 10^{21} \text{ cm}^{-2})$	9.3 ± 0.2	8.7 ± 0.1
$kT_{\text{High}} (\text{keV})$	~ 0.6	0.549 ± 0.003
$kT_{\text{Low}} (\text{keV})$	~ 0.3	0.250 ± 0.002
norm.High	0.12 ± 0.04	0.15 ± 0.02
norm.Low	0.9 ± 0.1	0.58 ± 0.07
norm.High/norm.Low	0.14	0.26
$kT_{\text{BB}} (\text{keV})$	—	~ 0.6
norm.BB ($\times 10^{-5}$)	—	2.2 ± 0.8
$L_{\text{BB}} (\text{erg s}^{-1})$	—	1.3×10^{33}

3 Analysis and Results

3.1 Model Fitting of X-ray Spectrum

X 線スペクトルのモデルフィットには、電離非平衡プラズマモデル (vnei) と星間吸収 (wabs) を使用した。はじめに SNR の外側 (図 1, 緑) から得られたスペクトルを一温度成分でフィットしたところ、1 keV 周辺の輝線構造や 3 keV 以上の連続成分が説明できなかった。そこで二温度の成分でフィットしたところ、温度 ~ 0.3 keV と ~ 0.6 keV の成分で再現でき、SNR のスペクトルには少なくとも二温度の成分が必要であることが分かった。次に SNR の内側 (図 1, 青) から得られたスペクトルを、二温度成分と NS の黒体放射の成分でフィットしたところ、図 2 のように再現でき、星間吸収の column density (n_{H})、プラズマの温度や NS の黒体温度 (kT)、X 線放射の強度 (norm.)、NS の luminosity (L_{BB}) は表 1 のように求められた。星間吸収は SNR の距離 $3.1 \text{ kpc} = 9.6 \times 10^{21} \text{ cm}$ と矛盾せず、NS の黒体温度は De Luca *et al.* (2006) で得られた結果と矛盾しなかった。SNR の外側と内側の領域それぞれで、二温度成分の強度比 (norm.High/norm.Low) を求めると、外側の領域の方が低温成分が強く、内側の領域の方が高温成分が強いことがわかった。SNR の外側ほど shell の寄与が強く、内側ほど ejecta の寄与が強いと考えられるので、二温度のうち低温成分が加熱された ISM、高温成分が ejecta に対応すると分かった。

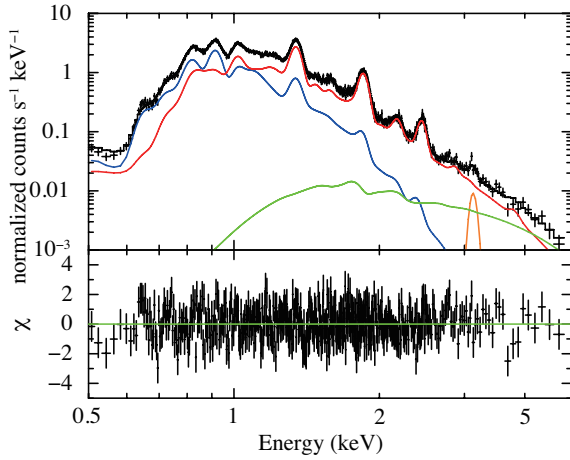


図 2: SNR の内側で得られたスペクトルとそのモデルフィット。赤と青はそれぞれ電離非平衡プラズマの高温成分と低温成分、橙はこのプラズマモデルに入っていない Ar (He-like) の輝線 (K_{α}) を表すための gaussian, 緑は NS の黒体放射。 $\chi^2/d.o.f = 1.027 (472)$

3.2 Estimation of Supernova Parameters

SNR の X 線スペクトルのモデルフィットによって得られたパラメータを用いて、表 2 のように超新星爆発のパラメータを推定した。

ガス密度 プラズマ放射の強度は、電子密度と水素密度と放射体積に比例する。

$$\text{norm.} = \frac{10^{-14}}{4\pi[D(1+z)]^2} \int n_e n_H dV$$

ここで D は天体の距離, z は red shift である。プラズマの大部分が水素イオンと電子であると考えて $n_e \sim n_H$ とし、さらに密度が SNR 内で一様と仮定して積分を密度と体積の積に置き換えて、shell と ejecta のガス密度を求めた。また、Rankine-Hugoniot の関係から、衝撃波面の前後の密度の比は $n_1/n_0 = (\gamma + 1)/(\gamma - 1) = 4$ ($\gamma = 3/2$) となる。この関係を使って、shell の密度から SNR の周囲の星間ガスの密度を求めた。

親星の質量 ejecta の密度に ejecta の体積と陽子の質量をかけ、親星の質量 (M_{SN}) を推定した。

表 2: 超新星爆発のパラメータ

n_{ejecta}	1.8 cm^{-3}
n_{shell}	12 cm^{-3}
n_{ISM}	3.0 cm^{-3}
M_{SN}	$\sim 15M_{\odot}$
ISM アバundance	いずれも $\sim 1 \text{ solar}$
Mg_{ejecta}	$(1.6 \pm 0.10) \text{ solar}$
Si_{ejecta}	$(2.2 \pm 0.2) \text{ solar}$
S_{ejecta}	$(1.7 \pm 0.2) \text{ solar}$
Fe_{ejecta}	1 solar (fixed)
E_{shell}	$\sim 3 \times 10^{50} \text{ erg}$

元素アバundance スペクトルの輝線の強度から、ISM と ejecta それぞれの元素アバundanceを求めた。

超新星爆発のエネルギー shell を成すプラズマの運動エネルギーを概算すると、

$$E_{\text{shell}} = \frac{1}{2} m_p v_{\text{shell}}^2 \times 4\pi R^2 \Delta R \times n_{\text{shell}}$$

となる。ここで v_{shell} は shell の膨張速度, R は SNR の半径, ΔR は shell の厚みである。Carter *et al.* (1997) から $v_{\text{shell}} = 1100 \text{ km/s}$ が求まっている。また、衝撃波によって掃き集められた星間ガスの質量と shell の質量が等しいことから、

$$\frac{4\pi}{3} R^3 n_{\text{ISM}} = 4\pi R^2 \Delta R \times 4n_{\text{ISM}}$$

が成り立ち、これから shell の厚みが $\Delta R = R/12$ と求まる。これらの値を用いて E_{shell} を求めた。

4 Discussion

推定された各パラメータについて、典型的な重力崩壊型の超新星爆発と比較して考察する。

親星の質量 推定で得られた $M_{\text{SN}} \sim 15M_{\odot}$ は、重力崩壊型としては非常に典型的である。

元素アバundance ejecta のアバundanceを見ると、Fe より軽い Mg, Si, S といった元素が豊富に含

まれている。これはこの超新星爆発が、Fe の光分解によって引き起こされた重力崩壊型であったことを裏付けている。

超新星爆発のエネルギー 重力崩壊型の超新星爆発の典型的な爆発エネルギーは $\sim 10^{51}$ erg と言われている。解析における推定では shell の運動エネルギーのみを考えたが、実際には他に熱エネルギーや乱流のエネルギー、粒子加速に充てられるエネルギーがあるため、それらを考慮すると $E_{\text{shell}} \sim 3 \times 10^{50}$ erg というエネルギーは妥当であると言える。

以上の考察から、RCW 103 とその中心天体を作った超新星爆発のパラメータには目立った特異性は見られなかった。1E 161348-5055 は、X 線光度の 50 倍の増大や 6.67 時間の非常に長い変動周期など、謎の多い CCO であるが、起源となった爆発に特異性がないことから、実はこの CCO も我々がこれまでよく知っている NS と類似のタイプのものであることが期待される。

孤立 NS には、その自転の回転エネルギーを解放して光るもの（回転駆動）と、爆発の余熱によって熱的放射をするものと、マグネターのよう磁場のエネルギーを解放して光るもの（磁気駆動）とがある。この CCO が回転駆動であるとする、その光度（spin down luminosity）は $L_{\text{rot}} = 3.9 \times 10^{46} \dot{P}/P^3$ で与えられる。ここで、 \dot{P} は自転周期の変化率である。1E 161348-5055 は自転周期の変化率が測定されていないため、2000 年で 6.67 時間まで単調に周期が長くなったと考え、 $\dot{P} = 6.67 \text{ hour}/2000 \text{ year} \simeq 3.8 \times 10^{-7} \text{ s/s}$ と仮定すると、 $L_{\text{rot}} \sim 10^{27} \text{ erg/s}$ となる。これはスペクトルから得られた NS の luminosity（表 1, $L_{\text{BB}} \simeq 1.3 \times 10^{33} \text{ erg/s}$ ）より極めて小さいため、この CCO は回転駆動ではないと結論づけた。また熱的放射によって光っているとすると、2000 年に観測された 50 倍の増光が説明できない。一方でマグネターのよう磁気駆動の場合、黒体温度 $\sim 0.6 \text{ keV}$ は典型的であり、最も可能性が高い。

よって我々は、CCO 1E 161348-5055 はマグネターであり、強磁場 ($\sim 10^{14}$ G) のために真球から軸対称に変形し、自由歳差運動を起こしているという描像を考えてた。自由歳差運動をしているマグネター

では、自転周期と自由歳差運動の周期がうなりを起こすことによって、長いスリップ周期が観測される例がある (Makishima *et al.* 2014)。RCW 103 の中心天体も自転と自由歳差運動がうなりを起こし、そのスリップ周期として 6.67 時間という非常に長い変動周期が観測されていると考えることができる。

5 Conclusion

CCO を伴う重力崩壊型 SNR RCW 103 を「すざく」の公開データを用いて解析したところ、親星の質量、元素アバングス、爆発のエネルギーといった超新星爆発のパラメータには目立った特異性は見られなかった。このことから我々は、RCW 103 の中心天体はこれまでよく知られている NS と類似のタイプのものであると推測し、マグネターのような磁気駆動 NS が強磁場によって変形し、自由歳差運動と自転周期のうなりによって 6.67 時間の非常に長い変動周期が見えているという描像を考えた。

Reference

- Carter, L. M., Dickel, J. R., & Bomans, D. J. 1997, *PASP*, **109**, 990
- De Luca, A., Caraveo, P. A., Mereghetti, S., Tiengo, A., & Bignami, G. F. 2006, *Science*, **313**, 814
- Makishima, K., Enoto, T., Hiraga, J. S., *et al.* 2014, *Physical Review Letters*, **112**, 171102
- Reynoso, E. M., Green, A. J., Johnston, S., *et al.* 2004, *PASA*, **21**, 82