

チャンドラ X 線観測衛星を用いた超新星残骸 RX J1713.7–3946 の解析

辻 直美 (立教大学大学院 理学研究科)

Abstract

超新星残骸は、寿命を迎えた恒星の超新星爆発後に自由膨張期、セドフテイラー期、雪かき期、消滅期を経て進化していく。その進化過程のモデルはイジェクタと呼ばれる噴出物質の質量やエネルギー、まわりの星間物質の密度によって決定される。本研究では、空間分解能の良いチャンドラ X 線観測衛星の観測を用いて、RX J1713.7–3946 のイメージ解析を行い、その結果を進化モデルと比較する。超新星残骸 RX J1713.7–3946 は、非熱的 X 線放射が支配的であり、TeV ガンマ線の放射も確認されるなど、多波長に渡って研究が進んでいる非常に興味深い天体である。一方で、この天体の衝撃波速度は正確に測定されておらず、年齢もはっきりと知られていない。今回、RX J1713.7–3946 のシェルの表面や内部のフィラメント構造において、衝撃波速度や見かけの移動速度を測定し、進化モデルを用いて、この天体の年齢を推定した結果を報告する。

1 Introduction

恒星は核融合反応が進行した結果として、重力型崩壊を起こすか、または伴星からの物質降着により、超新星となる。このとき引き起こされる超新星爆発の噴出物質はイジェクタと呼ばれ、超音速で星間空間を膨張するため、表面に衝撃波が形成され、まわりの物質を掃き集めていく。超新星爆発の後に中心天体の周辺に形成される高温プラズマのことを超新星残骸という。銀河系内の超新星残骸は宇宙線の加速機構の候補として注目され、多くの研究や観測が行われてきた。超新星残骸の衝撃波面を粒子が往復することでエネルギーを得るという衝撃波フェルミ加速によって高エネルギー宇宙線が作られていると考えられている。このようにして生成された高エネルギー電子のシンクロトロン放射が、非熱的 X 線として観測される。

超新星残骸 RX J1713.7–3946 は赤経 $17^{\text{h}}13^{\text{m}}33.1^{\text{s}}$ 、赤緯 $-39^{\circ}45'44''.44$ に位置する銀河系内の超新星残骸である。地球からの距離は約 1 kpc、視直径はおよそ 50 分角である。約 1600 年前に爆発したと言われているが、正確ではない。RX J1713.7–3946 からの X 線放射は非熱的なものが支配的であるので、宇宙線の起源を探る上で最も重要な天体の一つである。

2 観測 & データ処理

今回の解析に用いたデータはチャンドラ衛星という、1999 年に打ち上げられたアメリカの衛星によって撮像された。現在に至るまでに、チャンドラ衛星を用いて超新星残骸 RX J1713.7–3946 の北西領域は 7 回の観測が行われてきた (表 1)。これらのデータを用いることで、この 11 年間に渡る超新星残骸 RX J1713.7–3946 の見かけの運動 (以下、proper motion) を測定することが可能である。以下の解析では、最も観測時間の長い 2011 年のデータをモデルや基準として扱う。

表 1: チャンドラ衛星の RX J1713.7–3946NW 観測

ObsID	Start Date	Exposure[ks]	PI
12671	2011-07-01	89.87	Y.Uchiyama
10092	2009-09-10	29.21	Y.Uchiyama
10091	2009-05-16	29.65	Y.Uchiyama
10090	2009-01-30	28.40	Y.Uchiyama
6370	2006-05-03	29.77	Y.Uchiyama
5560	2005-07-09	29.03	Y.Uchiyama
736	2000-07-25	29.62	P.Slane

チャンドラ衛星の解析ソフト `ciao`(version 4.6) を用いて、データ処理を行った。表 1 の観測データに対

して、chandra_repro(version 4.6.1 の CALDB) によりリプロセスを行った。今回 proper motion を測定する領域で(図 1 参照)、検出器由来のバックグラウンドの量を計算し、これが 20%以下になるようにエネルギー帯の上限を 5keV とした。ciao の fluximage を用いて 0.5-5keV のフラックスイメージを作成した(図 1)。以下の解析では、この 0.5-5keV のフラックスイメージを用いて proper motion を測定する。

3 解析 & 結果

proper motion を測定する領域として図 1 に示す領域 (box1 から box6) を定義した。

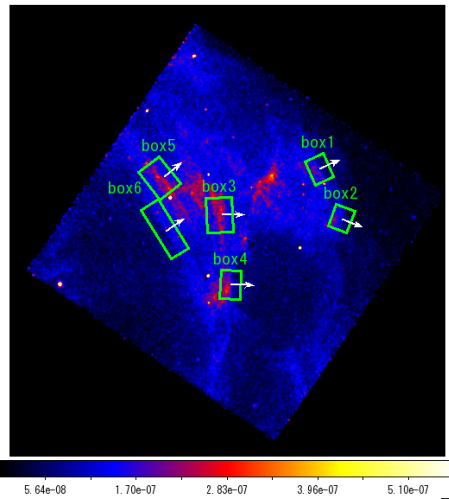


図 1: box の定義

図 1 の各 box の矢印の方向に動いているかどうか調べるために、矢印方向に投影を行った。ここでは box1 と box6 における 2011 年、2006 年、2000 年のフラックスイメージを投影した結果を図 3 に示す。これより、明らかに box1 のエッジは時間とともに移動している一方で、box1 に比べて box6 ではこういった proper motion は確認されなかった。

図 3 において、2011 年のプロットをモデルとし、2011 年のエッジ位置と比較して他の観測のエッジ位置がどの程度移動したかを測定するために、カイ二乗検定を用いた(式 1)。

$$\chi_{red}^2 = \frac{1}{f} \sum_i \frac{(p_i - q_i)^2}{\sigma_i^2} \quad (1)$$

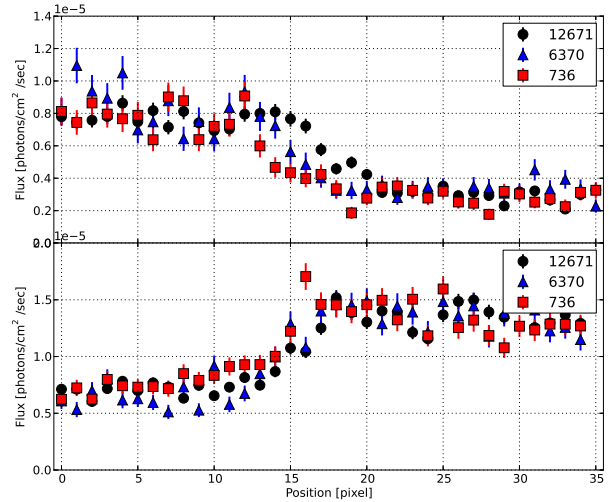


図 2: 投影プロファイル —上図;box1 下図;box6 プロットの数字は観測 ID を示す (表 1)

ここで、 p_i 、 q_i 、 σ_i 、 f はそれぞれ 2011 年のプロット、他の観測のプロット、 q_i の誤差、自由度である。2011 年以外の観測によるプロットをシフトさせ、式 1 で表される換算カイ二乗の最小値を与えるシフト数を、エッジ位置の動いた距離と定義する。こういった方法で、全ての box でエッジ位置の移動距離を測定した。ここでは、はっきりと proper motion が確認された box1 と box4 の結果を図 3 に示す。図 3 のプ

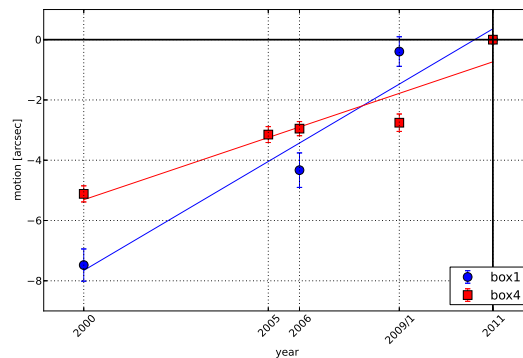


図 3: proper motion 測定結果 (box1,4)

ロットを直線でフィッティングし、傾きから角速度 [秒/yr] を求め、天体までの距離を 1 kpc として速度 [km/s] を計算した(表 2)。

表 2: proper motion 測定結果

box ID	角速度 [秒/yr]	速度 [km/s]
1	0.73 ± 0.12	3500 ± 600
4	0.42 ± 0.12	2000 ± 600

今回の解析では、box1 や box4 では明確に proper motion が確認されたが、それ以外の box ではこのような動きは見られなかった。また、box1 は超新星残骸のシェルの一番外側に位置することから、衝撃波が形成されていると考えられる。今回得た box1 の速度 3500 ± 600 km/s は、この天体の衝撃波速度に一致すると考える。

4 進化モデル

超新星残骸の進化過程を記述する上で、指数 n のイジェクタの密度プロファイル (ρ_{ej})、指数 s のまわりの物質の密度プロファイル (ρ_{am}) を定義する必要がある。

$$\rho_{ej} \propto r^{-n} \quad (2)$$

$$\rho_{am} \propto r^{-s} \quad (3)$$

Truelove & McKee (1999)、Laming & Hwang (2003) はそれぞれまわりの星間物質が一樣な密度の場合 ($s = 0$)、恒星からの星風がある場合 ($s = 2$) において、星間物質中を膨張する超新星残骸の進化過程を解析的に議論した。以下では、様々なモデルパラメータ (s と n) を仮定し、今回得た順行衝撃波速度 3500 km/s をよく再現するモデルを決定する。

進化モデルを決める s と n に加えて、初期パラメータとしてイジェクタの質量 $M_{ej}[M_{\odot}]$ とエネルギー $E_{ej}[10^{51}\text{erg}]$ 、まわりの物質の密度 $n_0[\mu\text{H}/\text{cm}^2]$ を与えることで、順行衝撃波の位置 R_b と速度 V_b 、逆行衝撃波の位置 R_r と速度 V_r を時間 t の関数として記述することができる (Truelove & McKee (1999))。ここで衝撃波の位置とは爆発中心からの距離のことである。星風を伴う星間物質を考える場合 ($s = 2$)、まわりの物質の密度 n_2 を $r = R_b$ での密度と定義する (Laming & Hwang (2003))。RX J1713.7–3946 は大

質量の恒星が爆発し、恒星風があったと考えられるので、今回は $s = 2$ の場合について考える。

初期パラメータをある範囲の値で振り、現在の順行衝撃波の位置 ($R_b=8.6$ pc) を与える時間 T を求め、 $t = T$ での V_b 、 R_r 、 V_r の値をモデルからそれぞれ求める。ここで、 V_b や V_r は観測者から見た速度である。これらの値を二次元プロットしたものを図 4 に示す。今回の解析で得た $V_b = 3500 \pm 600$ km/s の範囲を点線で囲んで表示させている。この範囲内からいくつか選択して物理量を計算し、表 3 にまとめた。

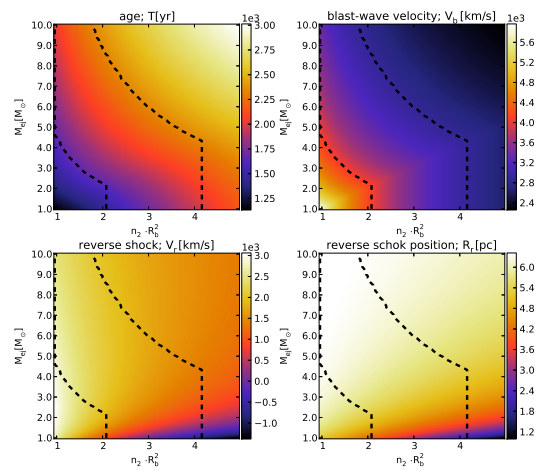


図 4: $s=2$, $n=7$, $E_{ej} = 1$ の場合 —横軸; 星間物質の密度 縦軸; イジェクタ質量 左上; 年齢 T 右上; V_b 左下; V_r 右下; R_r

表 3 より、天体の年齢や初期パラメータといった物理量に制限をつけることができる。どのモデルにおいても、年齢は 1600 年から 1900 年となり、順行衝撃波の位置でのまわりの星間物質の密度は 0.01 から $0.07 \mu\text{H}/\text{cm}^3$ 程度であることが分かった。もし逆行衝撃波の位置 R_r が分かれば、年齢にさらに厳しい制限をつけることができるだろう。参考として、box6(中心からの距離 6 pc) にはシェルの内側のエッジのような構造がきれいに見えるが、これが逆行衝撃波であるかは定かではない。

表 3: RX J1713.7–3946 の進化モデル — t_{ST} 、 t_{core} は自由膨張期からセドフテイラー期に入る年齢、逆行衝撃波がイジェクタの内部のコアに到達する年齢をそれぞれ示している。

s	n	age [yr]	R_b [pc]	V_b [km/s]	R_r [pc]	V_r [km/s]	n_2 [μ_H/cm^3]	M_{ej} [M_\odot]	E_{ej} [10^{51} erg]	t_{ST} [yr] (Stage)	t_{core} [yr] (Reverse shock)
2	6	1740	8.68	3670	4.71	1130	0.027	1.5	1	5330(ED)	180(core)
2	6	1770	8.68	3600	5.94	2210	0.02	3	1	20110(ED)	680(core)
2	6	1690	8.68	3780	6.15	2680	0.013	5	1	64910(ED)	2210(core)
2	7	1630	8.68	3630	3.48	260	0.036	1	1	410(ST)	30(core)
2	7	1830	8.68	3710	6.1	2350	0.023	4	1	5200(ED)	440(core)
2	7	1840	8.68	3690	6.42	2720	0.013	7	1	20450(ED)	1720(core)
2	8	1640	8.68	3570	4.4	960	0.037	1	1	240(ST)	20(core)
2	8	1920	8.68	3680	5.92	2180	0.033	4	1	2130(ED)	180(core)
2	8	1890	8.68	3740	6.57	2760	0.013	7	1	12310(ED)	1020(core)
2	6	1690	8.68	3770	3.36	80	0.06	2	2	2580(ED)	90(core)
2	6	1740	8.68	3660	5.41	1720	0.046	4	2	9380(ED)	320(core)
2	6	1770	8.68	3600	5.94	2210	0.04	6	2	20110(ED)	680(core)
2	7	1570	8.68	3770	3.69	470	0.066	2	2	440(ST)	40(core)
2	7	1650	8.68	3980	5.14	1740	0.06	4	2	1390(ST)	120(core)
2	7	1770	8.68	3830	6.17	2490	0.04	8	2	5890(ED)	500(core)
2	8	1580	8.68	3700	4.54	1140	0.069	2	2	260(ST)	20(core)
2	8	1590	8.68	3980	5.49	2200	0.06	4	2	840(ST)	70(core)
2	8	1920	8.68	3680	5.92	2180	0.066	8	2	2130(ED)	180(core)

5 結論

今回の解析で、超新星残骸 RX J1713.7–3946 の北西領域における proper motion が測定された。外側のエッジ (box1) の結果から、衝撃波速度が 3500 km/s であることが分かった。この結果をもとに、超新星残骸の進化過程モデルから、この天体の年齢に初めて 1600 年から 1900 年という制限をつけることができた。また、観測を良く再現するイジェクタの質量やエネルギー、まわりの星間物質の密度の値についても得ることができた。星間物質の密度が順行衝撃波の位置で 0.01 から 0.07 μ_H/cm^3 であるという結果は、ガンマ線がレプトン起源かハドロン起源かという議論において、非常に重要となってくる。

今後はガンマ線の放射起源についても研究をしていくとともに、今回の解析でフィラメント構造やシェルの内側のエッジで proper motion が確認されなかったことについて、物理的意味を考えていく。

Reference

- J.K. Truelove, C.F. McKee, ApJ 120, 299-326(1999)
 J.M. Laming, U. Hwang, ApJ 597, 347-361 (2003)
 S. Katsuda et al., ApJ 709, 1387-1395 (2010a)

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。