

Chandra衛星による Tycho の超新星残骸の膨張速度分布測定

Expansion Velocity of Tycho's Supernova Remnant with Chandra

X線天文学研究室 BP20041 松本 真生

指導教員：久保田 あや 教授

1 はじめに:超新星残骸からのX線放射

超新星爆発とは星が最期に起こす大規模な爆発現象である。爆発直後から噴出物質と星間物質との間に強い衝撃波を形成し、数万年にわたり広がりながら光り輝く。最も明るくなる期間の可視光スペクトルに水素の吸収線の有無でI型とII型に分類される。ケイ素の吸収線が顕著であればIa型、そうでないもののうちヘリウムの吸収線が見えるものはIb型、どちらも見えないものはIc型と分類する [1]。

超新星残骸 (SNR) は超新星爆発によってできる噴出物質と星雲 (ガス) 物質から構成され、典型的な温度は百万~数千万度である [2]。SNR は可視光帯域ではほぼ確認できずX線帯域で明るく輝くためX線検出が多用される。X線検出ではどの原子がSNR内に多く含まれているか判断することができ [3]、ある物質のエネルギーから現在のSNRの広がる速度を算出することも可能である [4]。

本研究はChandra衛星で観測されたTychoのSNRのスペクトル解析によりガスの膨張速度を決定する。早藤らはすざく衛星によって膨張速度を決定した [7] が、より高空間分解能のChandraで分布を決定することを目指す。これは超新星爆発における元素の宇宙への放出メカニズムの解明につながる。

2 Chandra衛星搭載ACIS検出器 [5]

Chandra衛星は1999年7月23日にNASAのスペースシャトル「コロンビア」により打ち上げられたX線観測衛星で、HRC(High Resolution Camera)とACIS(Advanced CCD Imaging Spectrometer)という2つの検出器がある。ACIS検出器は10のCCDチップからなるCCDカメラである。スペクトル情報だけではなく0.5秒角(0.5/3600度)の高い空間分解能を特徴とする。0.2~10keVの範囲を観測でき、エネルギー分解能は5.9keVで150eVである。

3 ChandraによるTychoの観測

SN1572は1572年11月11日にティコ・ブラーエにより詳しい観測記録が残されたカシオペア座に現れた超新星のうちの1つでTychoと呼ばれる。Ia型に分類され [6]、地球からの距離は2~5 kpc(6523~16308光年)[7]、1574年3月まで地球上から肉眼で観測可能であった。観測データはNAXAのCXCより公開されている。Chandra衛星が打ち上げられてから36のデータが公開されており、観測時間は13.9~173.4 ksecと幅がある。

本研究では2010年以降で147.0 ksecと一番観測時間の長い2015年4月22日のデータを利用する(観測ID:15998)。

4 解析の準備

ダウンロードしたデータをChandraチームによって供給されているCIAOというツールを用いて、データリダクションした。図1(左)はTychoの領域を示した画像で、半径4.56分角程度に広がっている。図1に示した緑色の内側の円から天体のスペクトルを、黄色のドーナツの領域からバックグラウンド(以下:BG)スペクトルを作成した。

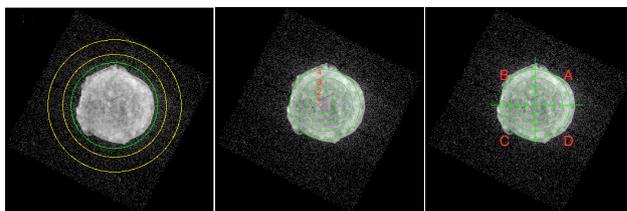


図1: chandraによるTychoのX線画像(左)BG領域(中)4つの同心円分割領域1~4(右)4分割の領域A~D

5 スペクトル解析

5.1 全体のスペクトル

図2は天体からBGを差し引いたスペクトルで、複数の輝線がみられる。輝線のエネルギーは元素の原子番号Zの2乗に比例するためエネルギーから元素を特定できる。それぞれの輝線の近傍のエネルギー領域からべき関数とガウシアンでフィットし、輝線を同定した。図3は鉄を同定した際の6.0~7.2keVのフィット結果である。表1はフィット結果でガウシアンの標準偏差 σ が35~70eVで有意に広がっている。

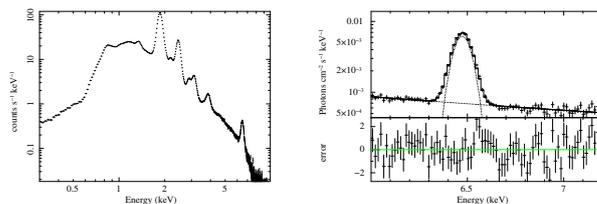


図2: 天体全体からBGを差し引いたスペクトル

図3: 範囲6.0~7.2keVのフィット

表1: 輝線同定のフィットモデルのパラメータ

中心 E_c (keV)	σ (eV)	EW(keV)	元素 (Z)	χ^2 (d.o.f)
$1.866^{+0.004}_{-0.003}$	54^{+10}_{-9}	NONE	Si(14)	27.83(14)
$2.890^{+0.003}_{-0.003}$	68^{+10}_{-19}	$0.34^{+0.109}_{-0.070}$	S(16)	50.91(42)
$3.125^{+0.004}_{-0.003}$	35^{+5}_{-5}	$0.39^{+0.015}_{-0.015}$	Ar(18)	50.91(42)
$3.849^{+0.003}_{-0.002}$	67^{+4}_{-5}	$0.28^{+0.008}_{-0.008}$	Ca(20)	89.00(63)
$6.472^{+0.004}_{-0.003}$	43^{+9}_{-10}	$1.0^{+0.03}_{-0.02}$	Fe(26)	115.49(103)

5.2 領域別スペクトル解析

表1より鉄が最も等価幅 (equivalent width ; EW) が大きく精度よく E_c が決定できるため鉄に注目して領域ごと

にガスの膨張速度を調べる．図 1(中) が使用するデータ領域を示した X 線画像で，天体の領域を同心円状 4 つに分割した．それぞれの半径は 1.2, 2.1, 3.0, 3.9 分角として，内側から領域 1~4 とする．5.1 節と同様にべき関数とガウス関数でフィットしたところ，ガウシアン の σ は中心から順に $106 \pm 30, 75 \pm 20, 50_{-20}^{+10}, 8_{-8}^{+20}$ eV と求まり，ガスの膨張速度の視線方向成分 ($\theta=0^\circ$ と 180°) の重ね合わせで輝線が広がっていると解釈できる．これを検証するために同じスペクトルを 2 本のガウシアン (norm と σ の値はそれぞれ共通) で再解析した．図 4 は領域ごとのフィット結果で，表 2 に 2 本のガウシアン の中心エネルギー E_1, E_2 を示した．図 5(左) は領域 1~4 のエネルギー変化をまとめた．2 本のガウシアン の重なりから中心 (領域 1) は運動の速度差が約 3% ほどあり，外側 (領域 4) ではほぼ速度差がないことがわかった．

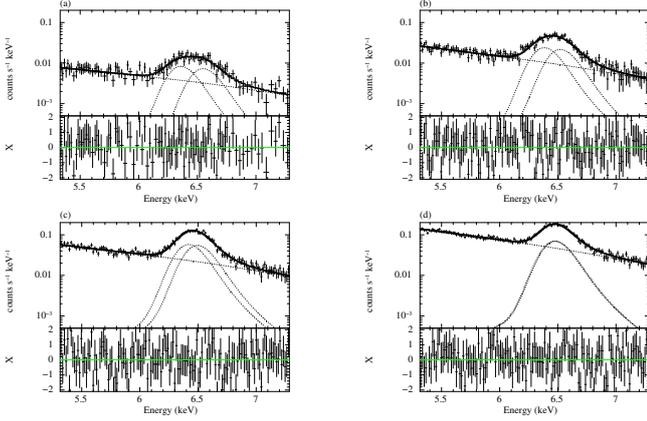


図 4: norm と σ を共通にした 2 本のガウシアンによるフィッティング (a) 領域 1 (b) 領域 2 (c) 領域 3 (d) 領域 4

表 2: 領域別のフィットモデルパラメータ ガウス関数 2 つ

領域	E_1 (keV)	E_2 (keV)	$\chi^2(d.o.f)$
1	$6.361_{-0.020}^{+0.021}$	$6.551_{-0.028}^{+0.027}$	67.01(94)
2	$6.386_{-0.014}^{+0.020}$	$6.523_{-0.015}^{+0.015}$	119.47(129)
3	$6.421_{-0.012}^{+0.014}$	$6.496_{-0.014}^{+0.014}$	136.46(130)
4	$6.474_{-0.039}^{+0.027}$	$6.482_{-0.025}^{+0.040}$	110.79(130)

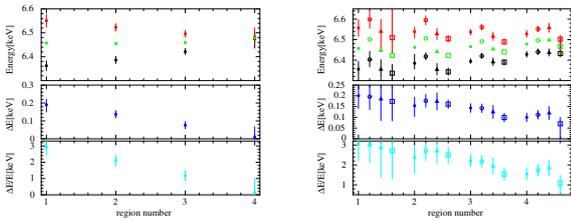


図 5: 領域別 5.3~7.3keV の 2 本のガウシアンでのスペクトルフィット (左)5.2 節の結果 (右)5.3 節の結果 領域 A: ● 領域 B: ○ 領域 C: ▲ 領域 D: □ (上)2 本のガウシアン の中心エネルギー $E_1 E_2$ と平均 \bar{E} , (中) $\Delta E (= E_1 - E_2)$, (下) $\Delta E / \bar{E}$

5.3 より細かい領域のスペクトル解析

より細かい領域でスペクトル解析を行うために図 1(右) のようにさらに領域を 4 分割した．右上から右下へと反時計回りに領域 ABCD とし，16 の領域について 5.2 節と同様に解析した．図 5(右) がフィット結果のグラフである．領域 A~D に関して領域 B(記号○) が全体でややエネルギーが高く領域 D では低い (図 5 右中)．しかし， $\Delta E / \bar{E}$ には他の領域と値に大きな差はみられなかった．

6 膨張速度の決定

同心円状の領域 1~4 では 2 つのガウシアン のフィットでは中央に近いほど ΔE が大きくなった (図 5 左中)．領域 A~D の中心エネルギーの違いは電離度の違いで，視線速度は動径方向のみに依存するとして良いと考えられる．図 6 はシェル状の膨張ガスを遠方 ($D \gg R$) の観測者からみたときの描像である．

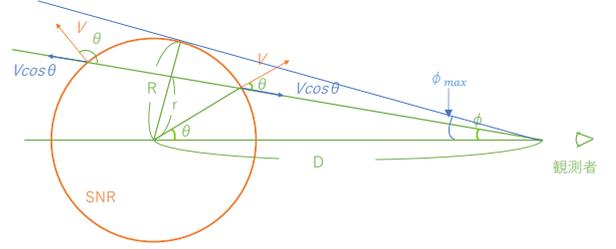


図 6: 図式 (R は SNR の実半径， ϕ_{max} は観測者からみた SNR の広がり角である)

ガスの運動速度は光のドップラー効果から求められる．速さ V で運動しているガスから発せられたエネルギー E の光を観測者が観測した際，エネルギー E' は

$$E' = E \frac{\sqrt{1 - (V/c)^2}}{1 - \frac{V}{c} \cos \theta}$$

で与えられ (c は光速)，SNR の広がり角を R とすると $\sin \theta = \frac{r}{R}$ すなわち $\cos \theta = \sqrt{1 - (\frac{r}{R})^2}$ であり， $R = D \phi_{max}$ ， $r = D \phi$ であるから，速度の光速に対する比は

$$\frac{V}{c} = \frac{\Delta E}{2E} \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{\phi}{\phi_{max}})^2}}$$

で与えられ，これに表 2 の値を代入して速度を算出した． ϕ の値は領域内の中央値をとり ϕ_{max} を 3.45 分角とする．領域 4 については $\Delta E / \bar{E}$ が誤差を含めると下限が 0 を下回るため求めない．表 3 が結果である．平均速度は 4200 ± 700 km/s と求められた． V の中央値は外側で下がっているが誤差を考慮すると一定として矛盾ない．

この速度で一定のまま膨張し続けていたとすると Tycho の大きさは $(0.6 \pm 0.1) \times 10^{14}$ km と求められる．距離を 2~5 kpc と仮定すると実際は $(0.7 \sim 1.7) \times 10^{14}$ km のため誤差を含めると膨張速度は等速であるとして矛盾ない．

表 3: 領域別に求めた膨張速度

領域	ϕ	$\Delta E / \bar{E} (\%)$	V (km/s)
1	0'60	$2.94_{-0.5}^{+0.5}$	4544 ± 768
2	1'65	$2.12_{-0.3}^{+0.3}$	4120 ± 548
3	2'55	$1.18_{-0.3}^{+0.3}$	3899 ± 785
4	3'45	$0.12_{-0.6}^{+0.9}$	NONE

参考文献

- [1] 小山勝二, 1992, X 線で探る宇宙
- [2] JAXA, X 線で探る超新星残骸, <https://www.isas.jaxa.jp/forefront/2012/katsuda/index.shtml>
- [3] Hwang, U., Decourchelle, A., Holt, S. S., & Petre, R. 2002, ApJ, 581, 110
- [4] Furuzawa, A., et al. 2009, ApJ, 693, L61
- [5] Warren, J. S., et al. 2005, ApJ, 634, 376
- [6] Baade, W. 1945, ApJ, 102, 309
- [7] Hayato A., et al. 2010, ApJ, 725, 894