

X線天文衛星すざくによる Keplerの超新星残骸の膨張速度測定

Measurement of Expansion Velocity of Ejecta in Kepler's Supernova Remnant with suzaku

宇宙情報解析研究室 BP12104 藤井 凱 指導教員：久保田 あや 准教授

1 はじめに

超新星残骸とは、超新星爆発によって形成される構造である。ここで超新星爆発とは、恒星の核融合反応が進むことにより、ある時期に突発的に起こる大爆発現象のことであり、これによって宇宙空間に、星を形成していた物質を撒き散らす。超新星爆発には、重力崩壊型と炭素爆燃型と呼ばれる2種類がある。重力崩壊型とは、太陽質量8倍以上の星の爆発であり、核融合反応により、鉄のコアが形成され、それが重力で潰れる。その結果、中心にコンパクト星(中性子星またはブラックホール)を残し、星を形成していた物質が飛び出す。一方、炭素爆燃型とは、連星系にある白色矮星に相手の星のガスが降り積もり、炭素の爆発的な核融合反応により、白色矮星が吹き飛ばす。炭素爆燃型は重力崩壊型とは違い、コンパクト星は残さない。以上のような爆発による爆発噴出物により、周囲の星間物質の先端に衝撃波が形成され、周りの星間物質が高温に加熱される。このような過程によって高温プラズマ球が形成され、X線が放射される[1]。早藤らは、Tychoの超新星残骸のすざくによる観測を行い、その膨張速度を正確に測定し、天体の構造や距離を明らかにした[4]。

本研究は、X線天文衛星すざくにより得られたKeplerの超新星残骸のX線データを解析し、文献[4]の手法の応用によって、その膨張速度を測定することで、天体の状態や構造に迫ることを目的とする。Keplerの超新星残骸(図1、図2)は、ヨハネス・ケプラーが1604年に発見した天体である。炭素爆燃型と考えられているが、重力崩壊型の性質も示すことがわかっている[2]。天体までの距離は約23000光年、視直径は3~4分角であり、X線で球殻構造を示す「シェル型」である[3]。

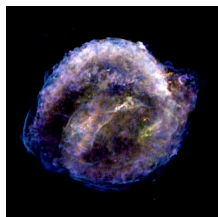


図 1: Chandra 衛星による X 線の画像
Credit:NASA/CXC/NCSU/
M.Burkey et al.

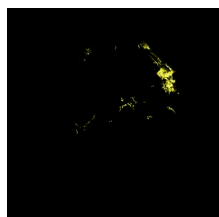


図 2: ハッブル宇宙望遠鏡による可視光の画像
Credit:NASA/ESA/
R. Sankrit and W. Blair
(Johns Hopkins University)

2 X線天文衛星すざくによるKeplerの超新星残骸の観測

すざくは、2005年7月10日にJAXA内之浦宇宙空間観測所より打ち上げられた日本で5番目のX線天文衛星であり、軌道高度は570km、軌道周期は96分である[5]。搭載されている検出器にはXIS(X線CCDカメラ)が4台、HXD(高X線検出器)がある。また、XISはそれぞれXRT(X線望遠鏡)の焦点に置かれている。XISは、0.2-12keV

のエネルギー帯域をカバーし、典型的なエネルギー分解能は130eVである[6]。また、HXDはさらに高いエネルギー帯域(10-600keV)のX線を観測できる[7]。XRTの空間分解能は2分角である[8]。

Keplerの超新星残骸はすざくによって複数回観測されているが、本研究では、2011年2月28日から同年3月4日にかけて観測され、実質観測時間が146233.7秒のデータを用いた。

3 データリダクション

天体のX線データを解析するにあたり、解析する天体以外からのX線は雑音となるので、これを除く必要がある。このため、天体のソース領域とBGD(バックグラウンド)領域をそれぞれ用意し、ソースから抽出したスペクトルからBGD領域のスペクトルを引くことで、天体の正しいスペクトルを得ることができる。視直径とXRTの空間分解能2分角を考慮し、天体からのイベントとして半径3.15分角の領域を天体ソース領域、雑音イベントとして外径7.35分角、内径6.3分角のドーナツ状の領域をBGD領域とした。これらの領域ファイルを重ねて表示したものを、図3に示す。

本研究では、画像情報を用いるため、XISの観測データを解析する。ここで、XIS0、XIS3のセンサーはFI(表面照射型)、XIS1のセンサーはBI(裏面照射型)である。BI(XIS1)は低エネルギーX線に対して高い検出効率を得られるが、高エネルギー側でのバックグラウンドが高いので、使用しなかった[6]。同じFIであるXIS0とXIS3のスペクトルは、統計を向上させるために足しあわせることができるため、本研究では足し合わせたものをXIS0+3として用いる。

各領域の膨張速度を測定していくために、図4(XIS0によるX線画像)のように、Keplerの超新星残骸を内側からSKY0、SKY1、SKY2とする3つの領域に分けた。SKY0、1、2及びBGDから抽出したスペクトルの画像を図5に示す。スペクトルを表示させる際、X線イベントの波高値(channel)をエネルギーに変換するための応答関数rmf(Redistribution Matrix File)を作成し、これを用いた。また、検出器の単位面積当たりの光子数(強度)を得るために、エネルギー毎の有効面積を記述するarfファイル(Ancillary Response Files)を、ray tracingによるシミュレーションで作成した。

図6は、各領域のスペクトルからBGDのスペクトルを引いたものである。図5のソース部分のスペクトルに対し、高エネルギー側のバックグラウンド成分が除去されている。

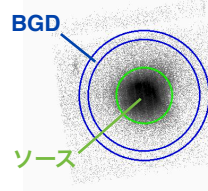


図 3: XIS0 ソースと BGD 領域

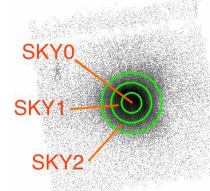


図 4: 各領域のイメージ領域

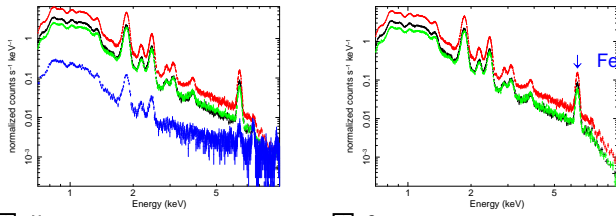


図 5: XIS0+3 各領域のスペクトル
(黒:SKY0 赤:SKY1 緑:SKY2 青:BGD)

図 6: 各領域から BGD を引いたスペクトル

4.2 2つのガウシアンモデルでのスペクトルフィッティング

早藤らの観測から、輝線の広がり、すざくの視線上の赤方偏移、青方偏移に依るものである。鉄輝線はこれらの偏移による輝線の重ね合わせで表現されているので、同じ幅 (σ は固定せず、双方をリンクした) の2つの gaussian モデルを用いて、赤方偏移、青方偏移の様子を調べた [4]。表 2 は、それぞれの値をまとめたものである。

Table 2: 2つのガウシアンモデルを用いた、赤方偏移、青方偏移の測定結果

各領域	E_{blue} (keV)	E_{red} (keV)	各偏移での σ (eV)
SKY 0	$6.493 \pm_{-0.007}^{0.008}$	$6.382 \pm_{-0.009}^{0.007}$	$(4.0 \pm_{-1.3}^{0.9}) \times 10^{-2}$
SKY 1	$6.493 \pm_{-0.008}^{0.007}$	$6.389 \pm_{-0.007}^{0.008}$	SKY0 とリンク
SKY 2	$6.499 \pm_{-0.008}^{0.006}$	$6.378 \pm_{-0.006}^{0.008}$	SKY0 とリンク

4 スペクトル解析

4.1 平均のスペクトル

膨張速度を測定する方法として、図 6 のように、スペクトル中に現れる鉄特性 X 線のピークに注目する。静止した冷たいガスから放射される鉄の特性 X 線は、エネルギーが単一であり、細い輝線として観測される。しかし、ガスが運動しているとドップラー効果によって特性 X 線の波長がずれる。膨張する超新星残骸のように、ガスが様々な方向に運動している場合、波長のずれは長波長側と短波長側に生じるので、結果として輝線の幅が広がる。したがって、輝線幅を測定することで、ガスの運動速度を測定することができる。

鉄輝線 (Fe K α 線) のエネルギー領域のスペクトルを記述する放射モデルとして、gaussian モデル (正規分布) を使用する。また、連続 X 線放射を近似するため、べき関数 (power-law) モデルを用いた。

図 7 は、XIS0+3 において、SKY0、1、2 の各領域を足したソースのスペクトルを 5.5keV~7.5keV の範囲で同時にモデルフィットした図である。表 1 は、ソースの中心エネルギーと輝線幅、各領域の輝線幅を測定した結果で、各領域での中心エネルギーは全てリンクさせ、ソースとは別に同時フィットした。ソースでは、中心エネルギー $E=6.439 \pm 0.002$ (keV)、標準偏差 $\sigma=70 \pm 2$ (eV) であり、鉄輝線が広がっていることがわかる。

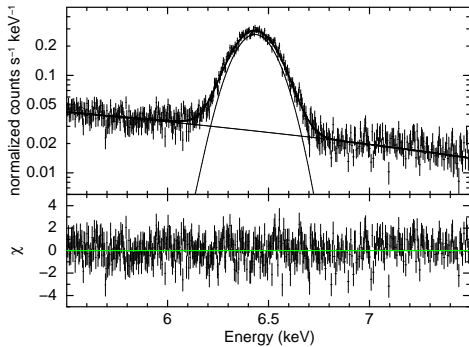


図 7: (上)XIS0+3 の鉄輝線付近のスペクトルとベストフィットモデル
(下) データとモデルの残差

Table 1: 各領域の平均スペクトルのモデルフィット

モデル	パラメータ	SKY0+1+2	SKY 0
power-law	Γ	2.1 ± 0.2	2.1 ± 0.2
	norm	$(7.3 \pm_{-2.0}^{3.0}) \times 10^{-3}$	$(3.0 \pm_{-0.8}^{1.1}) \times 10^{-3}$
gaussian	LineE (keV)	6.439 ± 0.002	6.440 ± 0.002
	σ (keV)	$(7.0 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	$(7.6 \pm 0.3) \times 10^{-2}$
	norm	$(3.55 \pm 0.05) \times 10^{-4}$	$(2.01 \pm 0.05) \times 10^{-4}$
	χ^2/dof	1.04 ($dof = 486$)	0.97 ($dof = 869$)
モデル	パラメータ	SKY 1	SKY 2
powerlaw	Γ	XIS0 とリンク	XIS0 とリンク
	norm	XIS0 とリンク	XIS0 とリンク
gaussian	LineE (keV)	XIS0 とリンク	XIS0 とリンク
	σ (keV)	$(6.7 \pm 0.3) \times 10^{-2}$	$(6.7 \pm 0.5) \times 10^{-2}$
	norm	$(1.60 \pm 0.07) \times 10^{-4}$	$(1.20 \pm 0.08) \times 10^{-4}$
		XIS0 と同時フィット	XIS0 と同時フィット

5 考察：膨張速度の決定

赤方偏移、青方偏移によるエネルギーの違いにより、膨張速度を決定していく。それぞれの輝線が、本来の鉄輝線の中心エネルギー E_0 からどの程度偏移しているかを求める。 E_{red} を赤方偏移のエネルギー、 E_{blue} を青方偏移のエネルギー、 δE を平均の偏移エネルギーとして、

$$2 \delta E = |E_{blue} - E_{red}| \quad (1)$$

のように決める。

δE と中心エネルギー E_0 との比は、膨張速度の視線方向成分 v と光速 $c (= 3.0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})$ との比に等しいので、

$$\frac{\delta E}{E_0} = \frac{v}{c} \quad (2)$$

として表せる。表 3 は領域ごとの計算結果をまとめたものである。

Table 3: 計算結果

各領域	$2\delta E$ (eV)	v (km s^{-1})
SKY 0	111 ± 9	2600 ± 300
SKY 1	104 ± 11	2400 ± 300
SKY 2	121 ± 11	2800 ± 300

6 まとめと結論

鉄輝線の広がりに対し、ドップラー効果を用いた観測を行い、表 3 の結果を得た。天体中心付近 (SKY0) では、視線方向の奥と手前側に運動するガスの影響によって、膨張速度の視線方向成分が最も大きくなると推測していたが、SKY0 と SKY1 に関しては推測通りの結果が得られた。SKY2 に関しては中心よりも v が大きくなっており、Kepler の超新星残骸が球対象な膨張をしていないのではないかと考えられる。今後は、星間物質の影響で、超新星残骸の膨張方向とは逆に働く (反作用する) ガスによる放射がどのようにになっているのか、また、他元素がどのように分布しているのかを探ることで、天体がどのような進化の過程を辿ってきたのかを考えていくことが必要である。

References

- [1] 勝田 哲, 2007, 天文月報, 第 102 巻 第 7 号, 429-436
- [2] Katsuda S., Tsunemi H., Uchida H., Kimura M., 2008, ApJ 689, 225
- [3] Sankrit et al. 2008, ApJ 135, 538-547
- [4] Hayato et al. , 2010 ApJ 725, 894-903
- [5] Mitsuda et al. , 1984 PASJ 36, 741
- [6] Koyama et al. , 2007 PASJ 59, 23-33
- [7] Takahashi et al. , 2007 PASJ 59, 35-51
- [8] Serlemitsos P.J., et al., 2007, PASJ, 59, 9