

1.はじめに

太陽の8倍以上の質量を持つ星は、内部での核融合反応による熱エネルギーにより自身の重力を支えている。反応が進み、中心部で鉄が生成されると、鉄は安定であるためそれ以上核融合が進まなくなるため、急激に内部圧力が下がる。これにより、外層を支えきれなくなり、重力崩壊を起こす。さらに内部が高密度となると、中心部に中性子の核が残り、落ちこんでくる外層が中心核表面で跳ね返されることで外側に向かう強い衝撃波が形成される。この衝撃波が、ついには外層を吹き飛ばし、超新星爆発を起こす。近年のシミュレーションでは、爆発前の星の形状の非対称性や星内部の乱流状態による爆発の非球対称性が噴出物の分布に反映され则认为されている。本研究では、X線で観測される形状が非球対称な超新星残骸 G350.1-0.3 において、超新星爆発によって生じた噴出物の速度を輝線のドップラーシフトから求めることで非球対称な超新星爆発メカニズムに迫る事を目的としている。

2. 超新星残骸 G350.1-0.3

G350.1-0.3 は (RA,Dec)=(17h21m05s,-37.27) に位置する年齢 1000–2000 歳の若い超新星残骸である。これまで赤外、電波及びX線で観測されており、それぞれの波長でその特異な形状が異なることが確認されている。日本のX線観測衛星すざくによる観測 [2] では、鉄より大きな質量のNiが検出されており、非対称な爆発がスペクトル解析から示唆されている。また、本天体は Fig.1のように極端に非対称な形状をとっていることから、超新星爆発における非対称性を噴出物の分布を引き起こすメカニズムに迫るための重要な天体の1つだと考えられる。

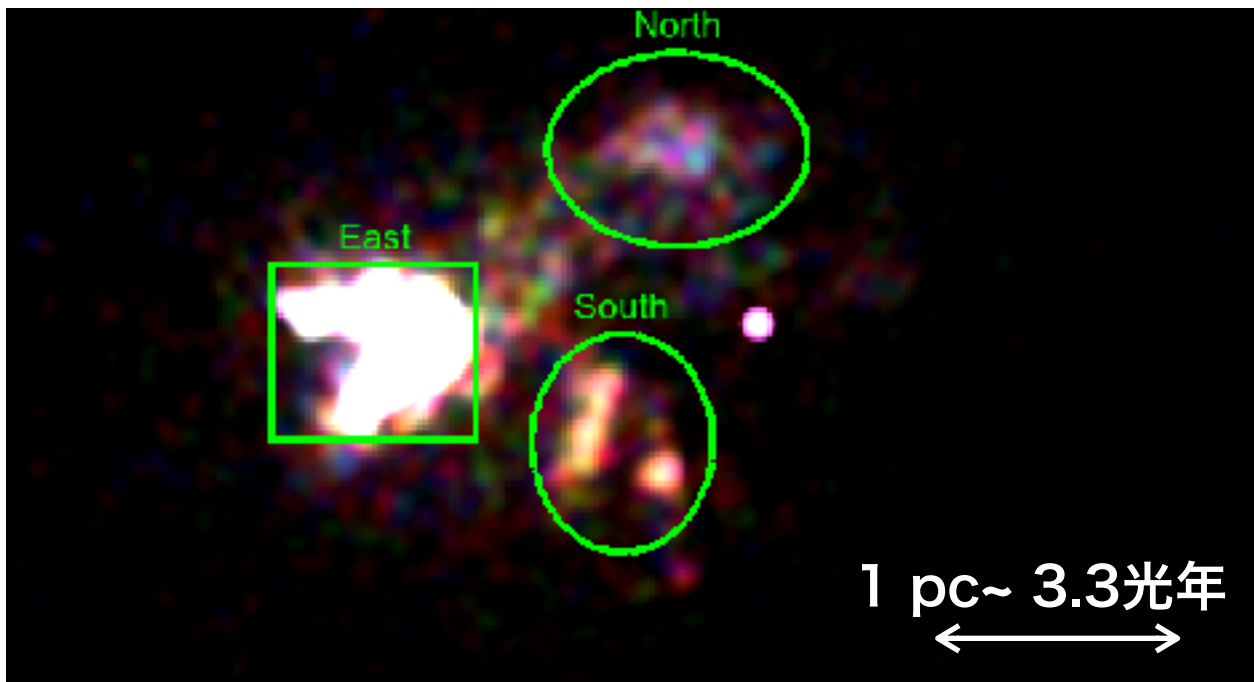


Fig1:G350.1-0.3のRGBイメージ
ChandraによるX線のイメージ (Red: 1.78 - 1.835 keV, Green: 1.84 - 1.87 keV, Blue:1.875 - 1.93 keV)

3.超新星残骸における輝線のドップラーシフト

星の内部で核融合が進み、外層を支えきれなくなり超新星爆発を起こした天体は衝撃波により外層が吹き飛ぶ。このときの噴出物は衝撃波によって温められ、熱輝線や制動放射などの熱放射を出すようになる。このとき、超新星爆発によって、噴出物の視線方向の速度はとて大きい (>1000km/s) ので、観測される輝線の中心値に温度・電離度から理論的に期待されるエネルギー中心値からずれが生じ、輝線のドップラーシフトという形で観測される。ドップラーシフトから噴出物の視線方向(近づく向きを正)の速度を以下の式で見積もることができる。

(E0はドップラーシフトがない場合に期待されるエネルギー)

$$\frac{(E_{obs} - E_0)}{E_0} = \frac{v}{c} \cdot \dots (1)$$

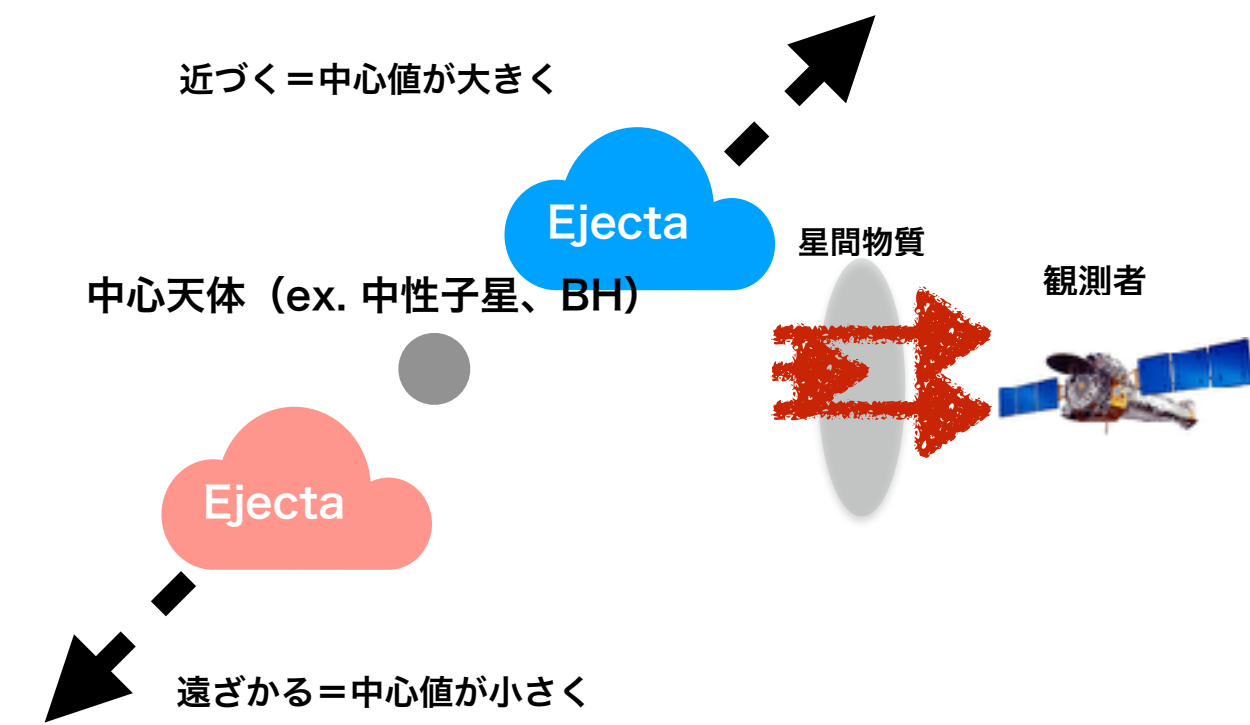


Fig 2:SNRにおけるドップラーシフトの観測原理

4.ChandraX線観測衛星

Chandra X線観測衛星は1999年にNASAが打ち上げた衛星である。搭載されている観測機器は以下の3つである。

- ・10枚のCCDで構成される**ACIS(Advanced CCD Imaging Spectrometer)**
- ・マイクロチャンネルプレートからなる**HRC (High Resolution Camera)**
- ・**高エネルギー透過型回折格子HETG**と**低エネルギー透過型回折格子LETG**

ACISには2×2のCCDからなるACIS-Iと1×6のCCDからなるACIS-Sがある。Chandraの特徴としては視野中心での空間分解能が約0.5秒角であることと、観測できるエネルギー範囲が10keVであることが挙げられる。今回、解析に用いたのは撮像と分光が可能な**ACIS**を用いて観測されたデータのみである。

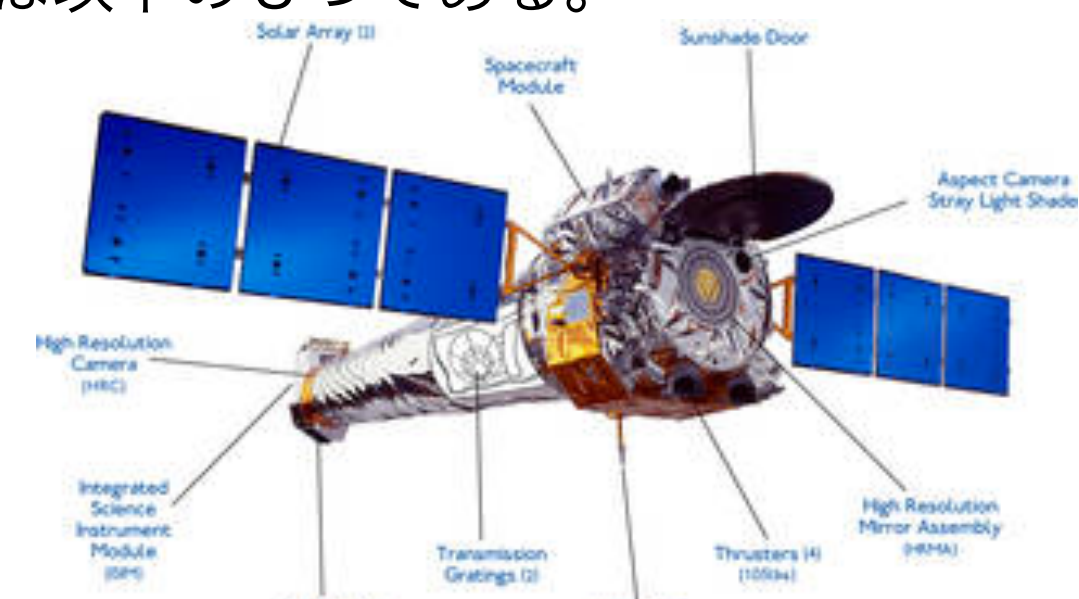


Fig 3:ChandraX線観測衛星の外観

5.解析

5-1. スペクトル解析

超新星残骸を Fig1のように放射が明るい3つの領域(東側・北側・南側)に分割し、スペクトル解析を行った。スペクトルモデルは星間吸収モデルとしてwabs、連続成分として制動放射、輝線には複数のガウシアンを考慮したwabs × (bremss + gaussian)と赤方偏移z~v/cを考慮したガウシアンをSi、S、Arに適用したwabs×(bremss + zgaussian)である。解析結果より、Si、S、Arのそれぞれの領域での視線方向の速度を求めた。

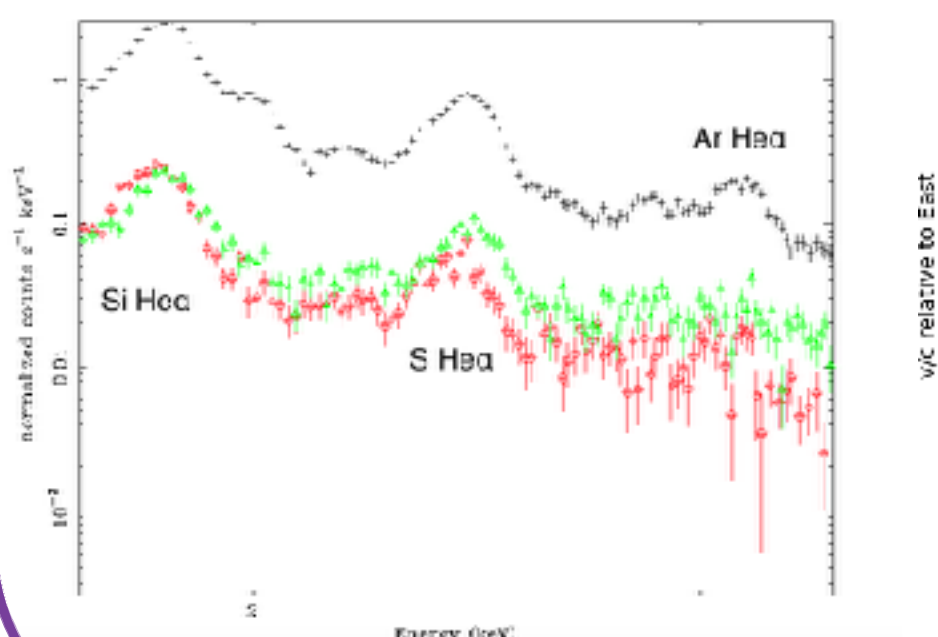


Fig4:Chandraによる各領域のスペクトル (1.7 – 3.4 keV) 黒線(マーカー+):東側のスペクトル、赤線(x):南側のスペクトル、緑線(△):北側のスペクトル

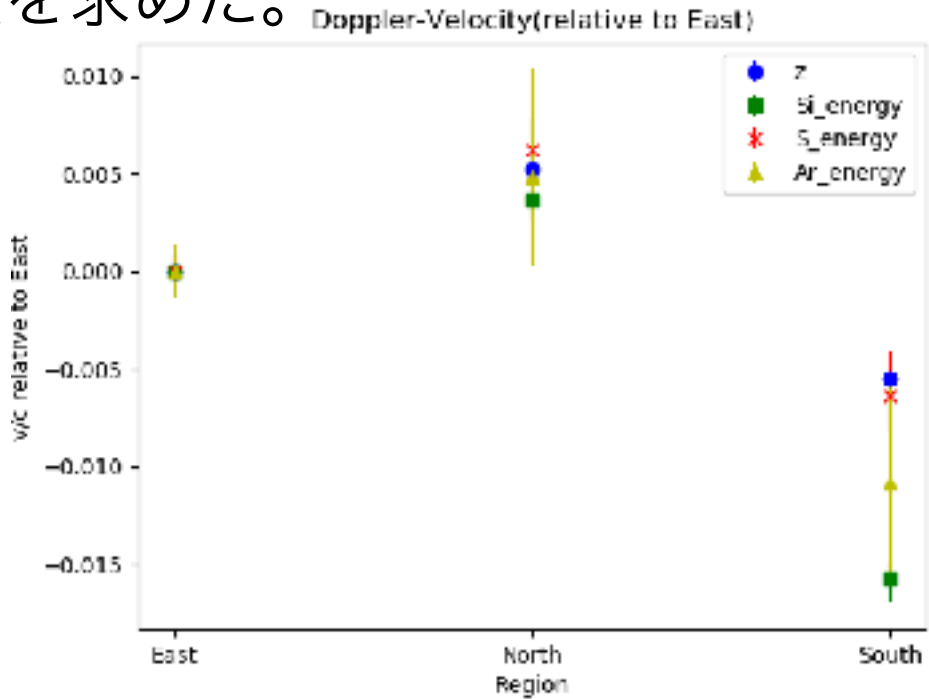


Fig5:各領域の東側の領域に対する視線方向の速度式(1)をE0=E_{East}として求めた。

5-2. 温度・電離度依存性

5-1の結果の赤方偏移zから、SNRの北側と南側の領域keV) に関して各ピクセルに平均どれくが光速の約±0.5%程度で運動していることがわかった。らのエネルギーを持った光子が到来しているのかを表すマップを作成することを確認した。このマップからも北側ではエネルギーの比較的高エネルギー、南側では低エネルギーが到来していることがわかる。この傾向はFig1と同様であるため、この天体では北と南の領域で約1pcのプラズマ塊がそれぞれv_{South}~1640⁺¹⁵⁰_-130 km/s、v_{North}~1570⁺³³⁰_-240 km/sで運動していることがわかった。

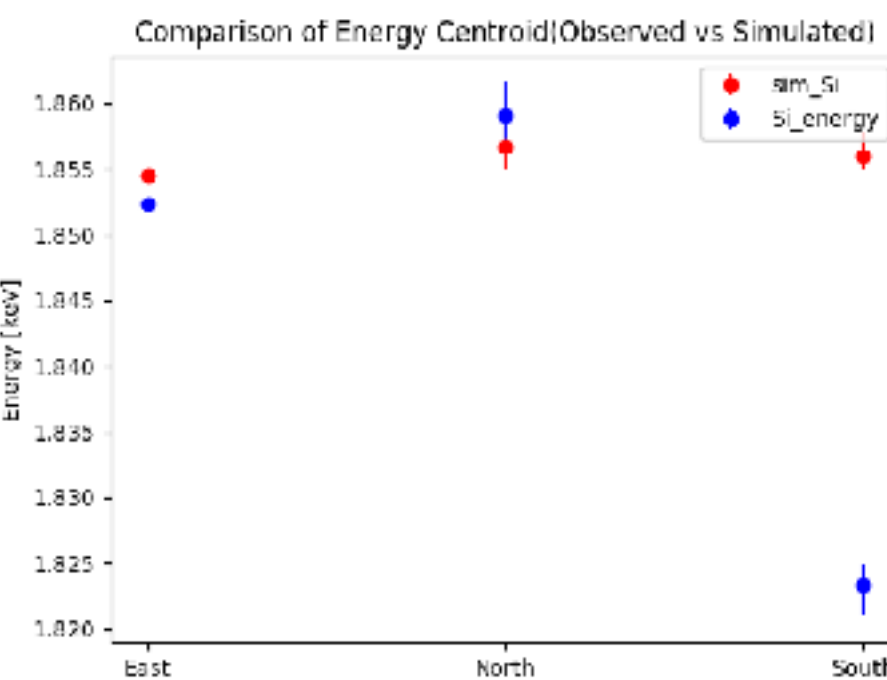


Fig6:各領域のシミュレーションスペクトルと観測スペクトルのSiのエネルギー中心値の比較 (青:観測値、赤:シミュレーション)

5-3. Mean Energy Map

これらの結果と合わせて、Si (1.7-1.9 keV) に関して各ピクセルに平均どれくが光速の約±0.5%程度で運動していることがわかった。らのエネルギーを持った光子が到来しているのかを表すマップを作成することを確認した。このマップからも北側ではエネルギーの比較的高エネルギー、南側では低エネルギーが到来していることがわかる。この傾向はFig1と同様であるため、この天体では北と南の領域で約1pcのプラズマ塊がそれぞれv_{South}~1640⁺¹⁵⁰_-130 km/s、v_{North}~1570⁺³³⁰_-240 km/sで運動していることがわかった。

今後の予定

今後はESAのXMM-Newtonを用いた同様の解析によって、今回のChandraのデータを用いた解析による結果を確認することを予定している。この他、ドップラー効果の面から非対称性爆発が示唆されたことから、Chandraの空間分解能を活かし、より細かな領域に分割し、それぞれの領域でスペクトル解析することで、どのような超新星爆発モデルによってこの超新星爆発が再現できるのか既存の理論と照らし合わせて確かめていきたい。

参考文献

[1] Toshiki Sato 博士論文 2018

[2] Yasumi, M. et al. 2014, Pasj, 66, 68

[3] Hayato, A. et al. 2010, Apj, 725, 894

[4] Gaensler, B. M. et al. 2008, ApjL, 680, L37

