

X 線天文衛星 Chandra による超新星残骸 Cassiopeia A の解析

池田 拓馬 (立教大学大学院 理学研究科)

Abstract

超新星爆発で生成されるチタン $44(^{44}\text{Ti})$ は半減期 60 年で電子捕獲によりスカンジウムに崩壊し、その後半減期 4 時間で陽電子放出により安定なカルシウムへと崩壊する。このチタン 44 は爆発時に星中心のいわゆる質量カット付近で生成され、その生成量や空間分布は爆発の様相を強く反映する。そのためチタン 44 の放射性崩壊に伴って放出される硬 X 線やガンマ線ラインの観測がこれまで数多く行われてきた。特に超新星残骸 CassiopeiaA ではガンマ線ラインが明確に捉えられ、さらに最近の NuSTAR 衛星の観測からチタン崩壊による 68/78 keV の硬 X 線ライン放射の空間分布が明らかになった。しかしチタンが電子捕獲により崩壊して生成されるスカンジウムからの $\sim 4.1\text{keV}$ の $K\alpha$ 線は未だ検出されておらず、我々はその輝線の有無をチャンドラ衛星を用いて検証した。その結果、NuSTAR 衛星によって報告された硬 X 線ライン放射の空間分布とは異なる分布を示すスカンジウム及びチタンの $K\alpha$ 線を発見した。しかしスカンジウムのラインフラックスから推測されるチタン 44 の生成量はこれまでの観測結果から数倍高く、放射性崩壊だけではそのラインを説明できない。またその領域において鉄のラインが全く見られない特徴があり、爆発の際の超新星元素合成が通常の状態とは異なる可能性を示唆すると考えられる。

1 Introduction

太陽の約 10 倍以上の質量を持つ星は進化の最終段階で中心に鉄コアを作り、その周りにケイ素、酸素、ネオン、マグネシウムの元素などが順に分布する玉ねぎ状の内部構造を持つ。最も安定な鉄コアからはそれ以上核燃焼により星の重力を支えるエネルギーを取り出せず、電子捕獲や光分解により重力崩壊を起こす。爆縮により元の鉄コアの密度 ($\sim 10^{11}\text{g/cm}^3$) が 10^{14}g/cm^3 程度になると、そのコア表面で物質が跳ね返されるバウンスと呼ばれる現象が起こり、コア付近にある外向きに跳ね返る物質と内向きに降着する物質との間で衝撃波が形成される。この降着衝撃波によって物質は加熱され元素合成が進み様々な重元素が作られる。その後爆発によって星間空間に撒き散らされ、爆発後中心に中性子星やブラックホールを残す。

超新星爆発のメカニズムについてはまだ解明されていない部分も多く、どの元素がどこでどのようにどのくらい作られるのか不定性が大きい。コンパクト星とイジェクタの間である質量カット付近で生成される元素の生成量と空間分布は爆発のモデルに制限を与える。そこで生成されるチタン 44 は半減期 60

年で電子捕獲によりスカンジウムに崩壊し、その後半減期 4 時間で陽電子放出によって安定なカルシウムへと崩壊するため、爆発して数百年の若い超新星残骸ではチタン 44 が残っており、崩壊の際に放出する 68/78keV の硬 X 線、1157keV のガンマ線が様々な観測機で観測されてきた。特に超新星残骸 CassiopeiaA ではそれらチタン 44 の崩壊を示す X 線、ガンマ線がどちらも確認されている唯一の天体である。

カシオペア座に位置する CassiopeiaA は距離 3.4kpc、大きさ 2~3pc、年齢 330 年程度の銀河系内で 2 番目に若い重力崩壊型超新星残骸であり、太陽系外の電波源としては全天で最も電波強度が強い。超新星残骸の外側にある爆風は $\sim 6000\text{km/s}$ 、Reverse Shock は $\sim 3000\text{km/s}$ にも及び、スペクトルは各イオンからの輝線や制動放射などの熱的成分に加えて、シンクロトロン放射の非熱的成分も観測され、NuSTAR の観測から、チタン 44 の分布が明らかにされ (図 2)、非球対称の爆発が強く示唆された。

2 Analysis

本研究では表 1 に表記された Chandra 衛星による Cassiopeia A の 2000 年から 2014 年までの 30 観測のうち観測方法が同じ 20 観測のデータを解析した。解析には Chandra 衛星のデータ解析用ソフト群 *ciao*、スペクトル解析には X 線解析ソフト群 *heasoft* 内にある *Xspec* を用いるが、Python ベースの *Xspec* の解析プログラム *PyXspec* も用いた。イメージ解析では各元素の $K\alpha$ のエネルギーバンドのフラックスイメージを 2004 年のデータを用いて作成し比較した。

OBSID	INST	TIME[ks]	OBSDATE
114	ACIS-S	50.6	2000/1/30
1038	HRC-S	50.4	2001/9/19
1046	ACIS-S	69.9	2001/5/25
1505	HRC-I	46.4	1999/12/19
1857	HRC-S	48.9	2000/10/4
1952	ACIS-S	50.3	2002/2/6
4634	ACIS-S	150.6	2004/4/28
4635	ACIS-S	136.8	2004/5/1
4636	ACIS-S	145.4	2004/4/20
4637	ACIS-S	165.7	2004/4/22
4638	ACIS-S	166.7	2004/4/14
4639	ACIS-S	80.1	2004/4/25
5196	ACIS-S	50.2	2004/2/8
5319	ACIS-S	42.8	2004/4/18
5320	ACIS-S	55.1	2004/5/5
9117	ACIS-S	25.2	2007/12/5
9773	ACIS-S	25.2	2007/12/8
10703	ACIS-S	35.1	2010/4/27
10935	ACIS-S	23.6	2009/11/2
10936	ACIS-S	32.7	2010/10/31
11240	HRC-I	14.2	2009/12/20
12020	ACIS-S	22.7	2009/11/3
12057	HRC-I	12.2	2009/12/13
12058	HRC-I	10.2	2009/12/16
12059	HRC-I	14.2	2009/12/15
12206	ACIS-S	35	2010/4/29
13177	ACIS-S	17.5	2010/11/2
14229	ACIS-S	49.1	2012/5/15
14480	ACIS-S	48.8	2013/5/20
14481	ACIS-S	49.4	2014/5/12

表 1: CasA の観測データ (使用したデータは赤文字で表記)

3 Results

図 2 にケイ素, 鉄, スカンジウム の $K\alpha$ のエネルギーバンドのフラックスイメージを示す。ケイ素や硫黄, カルシウムなどの元素は同様の分布を示したが, スカンジウムは異なり, 特に明るい部分にのみ集中して分布している。また, 鉄の分布と比較すると, その領域において鉄のフラックスが極めて少ない事が分かった。さらにスカンジウムの $K\alpha$ は図 4 に示す NuSTAR の観測結果とは異なる分布を示した。CasA イメージ左下の緑色の領域のスペクトルを図 1 に示す。モデルは連続成分が熱制動放射モデル BREMSS、輝線は gaussian でモデルフィットを行い、スペクトル中の黒色の太い実線がすべての成分の重ね合わせである。このスペクトルからスカンジウムは He-like に電離していること, チタンは He-like, H-like に電離していること, アルゴンの $He\beta$ のラインフラックスが大きいことなどが分かった。このアルゴンの $He\alpha$ と $He\beta$ の比は ~ 0.4 と熱的なプラズマ中における電子-イオン間の衝突による遷移だけでは説明ができない可能性がある。またこの領域付近はシンクロトロン放射が強くないことが知られているが, スペクトルの連続成分はハードであり 1 つの電子温度 $\sim keV$ による熱制動放射だけでは高エネルギー側のスペクトルを説明できず, 高温の電子の存在が示唆された。これらの特徴は他のスカンジウムが明るい領域でも同様であり, 類似した環境下にあることが考えられる。

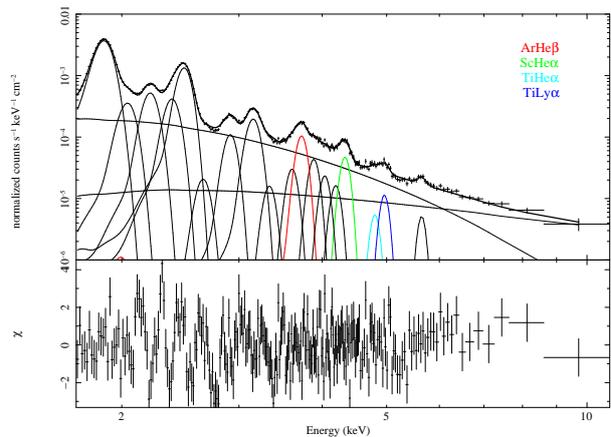


図 1: 図 2 イメージ左下の緑色の領域のスペクトル

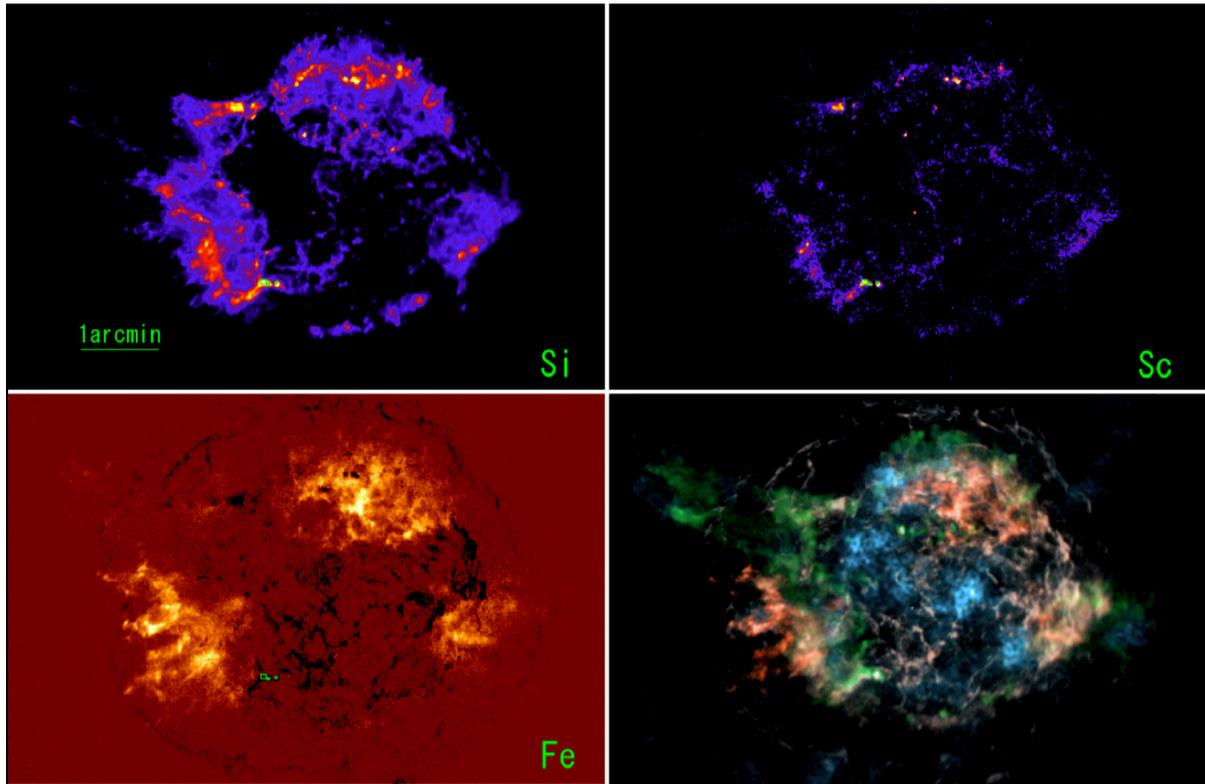


図 2: Si, Sc, Fe の分布, 右下のイメージは Si/Mg, Fe, Ti の合成 [2]

これらのラインの同定は gaussian モデルの中央値から決定しており、他の元素のラインが混じっている可能性もある。特にアルゴンの $\text{He}\beta$ とカリウムの $\text{Ly}\alpha$ のラインエネルギーはほぼ一致するため、スペクトルからは慎重に判断する必要があるが、アルゴンの $\text{He}\beta$ とスカンジウムライン、チタンの空間分布は一致することが分かった。次に観測時間が 100ks 以上となるように足したデータをスカンジウムが強い領域ごとにスカンジウムとアルゴン $\text{He}\beta$ のラインフラックスを計算した。図 3 にスカンジウムとアルゴンのラインフラックスを示す。この 2 つのラインフラックスがよい相関を持つことがわかった。これまでの解析ではスカンジウムのフラックスとよい相関を持つのはアルゴンの $\text{He}\beta$ の他は無く、この結果が何を意味しているのか今後はより詳細に検討していく必要がある。

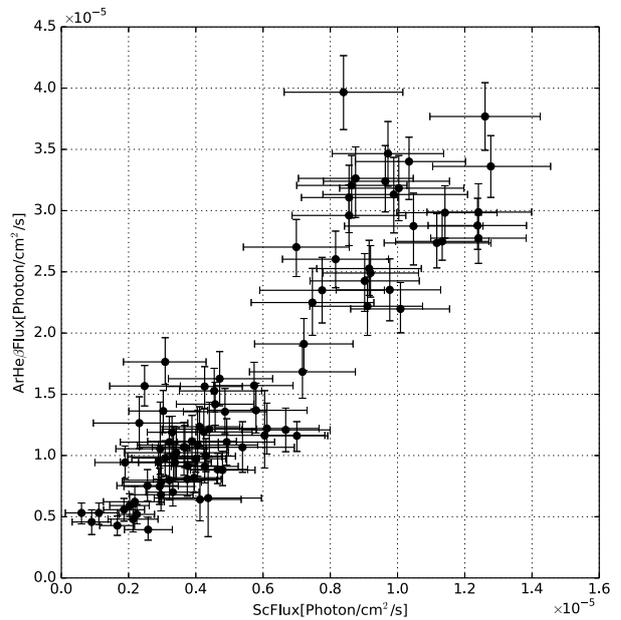


図 3: スカンジウムとアルゴンのラインフラックス

4 Discussion and Conclusion

スカンジウム 44 の $\text{He}\alpha$ が観測されたとすると、チタン 44 が Li-like に電離した状態で K 殻の電子を捕獲しスカンジウムに崩壊し、その後速やかに L 殻の電子が遷移し $\text{He}\alpha$ 放出したためだと考えられる。図 4 はスカンジウムのラインが強い領域を空間的、時間的に足しラインフラックスを計算し、その値からチタン 44 の初期合成量を計算した結果である。2000 年～2014 年までのフラックスの現象は 20%程度でチタン 44 の崩壊で説明ができるが、フラックスから計算される初期チタン 44 合成量は $\sim 4 \times 10^{-4} M_{\odot}$ であり、この値は NuSTAR の観測結果に比べて数倍高く、スカンジウムの空間分布も異なる事からスカンジウム 44 のラインではない可能性も示唆される。さらに他の元素のライン、連続成分もフラックスは同様に減少しているため、この減少が崩壊由来でない可能性もある。またスカンジウムが強い場所ではケイ素、硫黄、カルシウムなど他の元素のラインも強い一方、鉄のラインのみが弱い事から、元素合成の際に他とは異なる状態であった事が推測される。このため今後は超新星元素合成の観点からより詳しく検討を行う。

Reference

- [1] Thomas Siegert et al. 2015,arXiv:astro-ph/1505.05999
- [2] B. W. Grefenstette et al. 2014,Nature 506,339–342

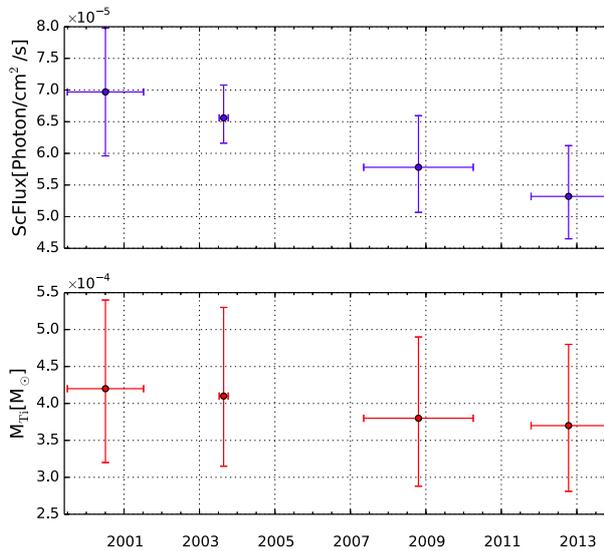


図 4: スカンジウムのフラックスの時間変化とチタン初期生成量