

超新星残骸から探る Ia 型超新星爆発の親星の金属量

森 浩 二

〈宮崎大学工学部電子物理工学科 〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西 1-1〉

e-mail: mori@astro.miyazaki-u.ac.jp



宇宙論的な標準光源として Ia 型超新星爆発の応用が整備されていくなかで、その親星の素性を探ることが以前にも増して重要になっている。親星の素性を探るうえで鍵となるのはその金属量であり、Ia 型超新星爆発の若い残骸を X 線観測することで直接的にそれを推定することができる。われわれは X 線天文衛星すざくを用いてケプラーの超新星爆発として知られる SN 1604 の深観測を行い、その親星の金属量が太陽組成のそれを有意に超えていたことを示した。今後、次代の X 線天文衛星 ASTRO-H がこの手法をさらに発展させていこう。

1. Ia 型超新星爆発を取り巻く状況

どのような星が、どのように爆発し、その過程においてどのような元素を合成するのか、という超新星爆発にまつわる物理は、原子核物理学を土台にして宇宙物理学が誕生して以来の主要な研究テーマの一つである。超新星爆発はその起源から、大質量星が核エネルギーの枯渇により引き起こす重力崩壊型と、C+O 白色矮星が爆発的核燃焼によって引き起す Ia 型の、2 種類に分けられる。いずれの場合も、上記の星の進化の終端事象としての扱いに加えて、その特性（宇宙最大の光源 and/or 爆発の均質性）を利用して、宇宙論的なツールとしての扱いを踏まえて議論するというのが現代宇宙物理学のトレンドである^{1), 2)}。特に Ia 型超新星爆発に関しては、宇宙論的な標準光源としてのアプリケーションの整備が進み、さらには宇宙の加速膨張の証左を与えるに至り、より多くの研究者の注目を集める存在になっている。

Ia 型超新星は、前述のように、連星系を成している C+O 白色矮星の質量がチャンドラセカール限界付近にまで達したときに起こす爆発的核燃焼

であるという点は広く受けいられている。一方で、それが主系列星や巨星のような伴星からの質量降着によって起こるのか（single-degenerate; SD 説）、白色矮星同士の合体によって起こるのか（double-degenerate; DD 説）、という SD vs. DD 論争は長く続いており、親星の素性はよくわかっていない。また、これに関連して、連星系ができてから爆発までにどれだけの時間を要しているかという統計的な分布（Delay-time distribution と呼ばれる）から、親星の情報を引き出す研究も進んでいる。その分布は <1 Gyr の比較的短い delay time で爆発する“prompt”と呼ばれる種族と >1 Gyr の比較的長い delay time をもつ“delayed”の種族からなり、0.1-10 Gyr の範囲でおおよそ t^{-1} の依存性をもっている^{3), 4)}。この依存性は DD 説を支持するが、SD 説も完全に棄却されていない⁴⁾。親星の正体を探る試みとしては、爆発前の画像の直接的な確認⁴⁾も行われているが明確な結果は得られていない*1。

近年、Ia 型超新星爆発の明るさが母銀河のタイプにも依存していることが明らかになってきた⁵⁾。減光率で明るさの補正を行った後では、星

生成が活発な母銀河で起きたIa型超新星爆発のほうで、星生成がほとんど起こっていない母銀河でのそれよりも系統的に明るいのである。次世代のIa型超新星を用いた観測プログラムでは飛躍的な統計量の増加が期待されるが、それに伴い徐々に明らかになってきた親星・爆発の多様性に起因する系統的不定性の研究も相対的に重要になってくると思われる。

2. 超新星残骸を用いて親星の金属量を探る

Ia型超新星爆発の明るさが母銀河のタイプに依存するという事は、親星の金属量 (Z^{*2}) が明るさに影響を及ぼしていることを意味する。実際に、理論的にも観測的にも、 Z が ^{56}Ni の生成量に影響を与えることが示唆されている^{6), 7)}。さらに、数値シミュレーションにより、 Z は減光率による明るさの補正にも影響を与えることが示唆されている⁸⁾。上記に加え、親星の年齢分布の観点からも、Ia型超新星爆発の Z の測定が鍵であることがわかる。母銀河のタイプからの Z 推定はその一つの方法であるが、ここではわれわれが用いた超新星残骸のX線観測から Z を探る方法を紹介する。前者は Z の決定が間接的ながらも統計的に多数のサンプルが扱えるのに対し、後者はサンプルが限られるが個々の超新星について直接的に Z を決定でき、相補的な関係であると言える。

Z は親星の材料となる周辺の星間物質中のCNOとFeでほぼ決まっている。白色矮星になるような中質量の星では、そのCNOのほとんどが、主系列時の進化段階におけるCNOサイクルの中で ^{14}N に変換される。これはCNサイクル中で、 $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ の反応が最も遅いためである。つづくヘリウム燃焼において、この ^{14}N は、 $^{14}\text{N}(\alpha, \gamma)^{18}\text{F}(\beta^+, \nu_e)^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ という β^+ 崩壊を含

む経路で ^{22}Ne に変換される。つまり、CNOの量が多いほど中性子過剰な ^{22}Ne が生成されることになる。言い換えると、 Z に比例して中性子過剰の度合 (η) が増すことになる⁶⁾。ただし、電子捕獲を含んだプロセスが働く星のコア ($M < 0.2 M_{\odot}$) においてはこの限りではない。その後の超新星爆発における元素合成において、いくつかの微量元素はこの η に敏感に反応して生成量を変える。その中で最も量が豊富だと期待されるのが ^{55}Mn である。 ^{55}Mn は不完全Si燃焼によりできるが、同様に不完全Si燃焼によりできる ^{52}Cr の生成量は η に鈍感である。そのため、MnとCrの生成量の比は、 η をよく反映する、つまり、 Z の良い指標ということになる⁹⁾。

前述のように Z は ^{56}Ni (および、安定な ^{58}Ni) の生成量にも影響を及ぼすと考えられている。それ故、Mn, Crも含めた鉄族の生成量を精度良く測定することは、親星の素性を明らかにするうえで非常に有用である。これら鉄族の放射性元素の半減期は年のオーダーであるため (例えば、 ^{55}Mn の親核である ^{55}Fe の半減期はおよそ2.7 yr)、可視光での超新星観測でその生成量を測定することは困難である。若い超新星残骸のX線観測こそがその最良の手段である。しかし、Cr, Mn, Niは非常に微量であるため、過去のX線観測ではそれらを精度良く測定することは困難な状況であった。

3. すざくによるケプラー超新星残骸の長時間観測

この夏 (2014年7月) で打ち上げから9年を迎える「すざく」は、8年強稼働し続けた先輩機「あすか」を超えて、日本のX線天文衛星として最長の運用年数記録を更新中である。そのあすかが先鞭をつけたX線CCDは、すざくをはじめと

*1 その観点からはM82に登場したSN 2014Jに期待がかかる。

*2 Z は一般的には「金属量」を意味するが、ここでは冗長性を抑えるため「親星の金属量」と定義する。

する日米欧の次代のX線天文衛星にも継承された。中でもさすがに搭載されたX線CCDカメラXISは、その高い分光能力と低く安定し再現性の高いバックグラウンドを利して、ほかのX線CCDでは捉えきれない超新星残骸からの微弱な鉄族元素の輝線を次々と検出している¹⁰⁾⁻¹³⁾。ただし、Zを測定するためにはそれら元素の生成量の比が必要であり、輝線の「検出」ではなく統計的不定性も抑えた「測定」が必要である。つまり、よい検出器で観測するのはもちろんのこと、明るいサンプルを長時間観測する必要がある。

われわれの銀河系内にあり、ほぼ疑いなくIa型超新星爆発の若い残骸と認識されているものは、SN 1006, SN 1572 (ティコの超新星爆発), SN 1604 (ケプラーの超新星爆発)の三例である。このうちSN 1006は鉄族元素の輝線強度がほかの二つに比べて極めて弱い。この三例の中で最も爆発からの時間は経過しているものの、逆行衝撃波の戻りが遅く、まだほとんどのイジェクタを加熱しきっていないためであると考えられている^{14), 15)}。残りの二例のうち、ティコの超新星爆発の残骸はさすがにより観測が行われており、前述の手法でZが太陽組成の金属量 (Z_{\odot}) と矛盾ないことが示されていた⁹⁾。一方、ケプラーの超新星爆発の残骸に関しては、初期の通常時間観測で $Z > Z_{\odot}$ の感触を得ていたので、われわれはこちらの長時間観測に踏み込むことにした。また、ケプラーの超新星爆発の残骸に関しては、ほかの二例と違って、大質量星からの星風起源と思われる星周物質との衝突が観測されている点も興味深い点であった¹⁶⁾。

以上を踏まえ、われわれはさすがXISを用いて、ケプラーの超新星爆発の残骸の長時間観測を行った。この観測は、さすがの特徴を活かしつつ通常の観測時間では達成できないような観測を推進するために設けられたSuzaku key projectの一環として行われたものである。通常の観測が実効時間で1日程度であるのに対し、本観測の実効観

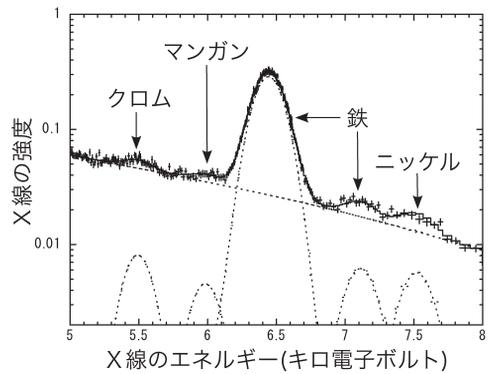


図1 日本のX線天文衛星「さすが」により取得されたケプラーの超新星爆発の残骸のX線スペクトル。横軸はX線のエネルギーで、縦軸がX線の強度を表す。また、十字で示される点がデータを、実線がデータを一番よく再現する理論モデルを、破線がその理論モデルの各成分を示す。

測時間は1週間以上に及ぶ。また、普段はバックグラウンドを同一観測の視野内から取る場合が多いが、今回に限っては明るい天体で周囲への漏れ込みがあったため、バックグラウンド用に別の観測時間をいただいた。そのバックグラウンド観測だけでも3日間の観測時間を使った。それだけバックグラウンドの丁寧な見積もりが必要不可欠だったのである。

図1に、さすがXISを用いて得られたケプラーの超新星爆発の残骸のX線スペクトルを示す。特に鉄族元素からの輝線に注目して、それらが含まれるエネルギー帯域のスペクトルを示している。輝線中心のエネルギー (E) が ~ 6.45 keV の $FeK\alpha$ が目立つが、ここで注目している Cr ($E \sim 5.5$ keV), Mn ($E \sim 6.0$ keV), Ni ($E \sim 7.5$ keV) が明瞭に検出できていることがわかる。 $E \sim 7.1$ keV の輝線は、 $FeK\beta$ である。これらのうち最も微弱な Mn 輝線でも、その強度を20%の不定性 (2σ) で測定できている。図1ではフィットにおける連続成分のモデルとしてべき型関数を用いたものを示しているが、これを熱的制動放射のモデルに置き換えると各輝線の強度は10%ほど変化

したが、相対強度比はほとんど変化しなかった。なお、このときの熱的制動放射モデルの電子温度は $kT=5.1$ keV であった。Ni に関しては、検出器由来の中性 Ni 輝線がバックグラウンドに含まれていること、および、バックグラウンド観測を別に行ったことから、注意深く検証を行った。同一視野内からバックグラウンドを取ったり、別の検出器由来の輝線（ここでは Au 輝線を用いた）が変動していないか調べた結果、間違いなく天体起源であり適切にバックグラウンドが差し引けていることを確認した。この天体から Ni の輝線を検出したのはこれが初めてである。このようにさまざまなモデル・手法で結果の検証を行ったが、特に輝線強度比に関しては統計的不定性を超えるような系統的な要因はなく、十分信頼の得られるものであると結論した。得られた Mn と Cr の輝線強度比は $f_{Mn}/f_{Cr}=0.60\pm 0.16$ (2σ の不定性を示す。以後同様) であり、この純粋な観測量である輝線強度比での比較でいえば、ティコの超新星残骸での測定値に比べて $\sim 30\%$ ほど大きい値であった。

4. ケプラーの超新星爆発の親星は多量の金属を含む星だった

すぐくの深観測により輝線強度比 (f_{X1}/f_{X2}) を精度良く求めることはできたが、これを質量比 (M_{X1}/M_{X2}) に焼き直して初めて Z を推定できる。そして、そのためにはイオン 1 個あたりの line emissivity の比 ($\epsilon_{X1}/\epsilon_{X2}$) を求める必要がある。具体的に Cr と Mn の場合でそれらの関係を書き下すと、 $M_{Mn}/M_{Cr}=1.057 (f_{Mn}/f_{Cr})/(\epsilon_{Mn}/\epsilon_{Cr})$ となる。ここで、1.057 は Mn と Cr の原子量の比である。Line emissivity はプラズマの状態に依存するが、FeK α の輝線中心値が精度よく求められているので、3-8 keV の電子温度の範囲に対して電離度パラメーター $n_e t$ はおよそ $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ と制限できる。このプラズマ状態で line emissivity の比を計算すると、 $\epsilon_{Mn}/\epsilon_{Cr}=0.82\pm 0.20$ となった。

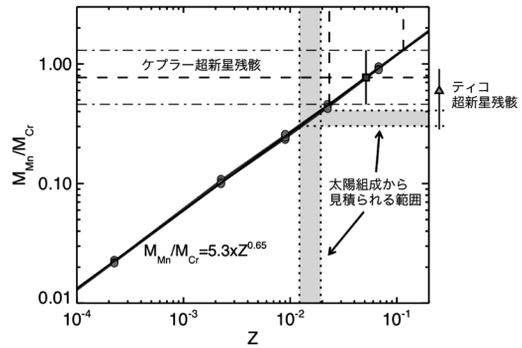


図2 M_{Mn}/M_{Cr} の Z に対する依存性を示す理論関係式 (丸を結ぶ右上がりの直線)⁹⁾ と、今回の観測により得られたケプラー超新星残骸の M_{Mn}/M_{Cr} (四角)。影のついた領域は、太陽組成から見積られる範囲を示す。枠外の三角で示した点は、ティコ超新星残骸の M_{Mn}/M_{Cr} 。

ここで line emissivity の不定性は、プラズマの温度、電離度、用いた atomic code の不定性を最大限考慮して決めた値である。以上より、われわれは Mn と Cr の質量比として $M_{Mn}/M_{Cr}=0.77^{+0.53}_{-0.31}$ という値を得た。

図2は、 M_{Mn}/M_{Cr} の Z に対する依存性を示す理論関係式と、今回の観測により得られたケプラー超新星残骸の M_{Mn}/M_{Cr} の値をプロットしたものである。理論的には質量比の Z に対する依存性は、およそ $M_{Mn}/M_{Cr}=5.3 \times Z^{0.65}$ で表すことができる⁹⁾。この関係式を用いて太陽組成の金属量と比較すると、これまで歴史的に最もよく参照されていた太陽組成¹⁷⁾ の $Z_{\odot}=0.019$ を用いると $Z/Z_{\odot}=2.7^{+3.4}_{-1.5}$ 、最近の更新された太陽組成¹⁸⁾ の $Z_{\odot}=0.014$ を用いると $Z/Z_{\odot}=3.6^{+4.6}_{-2.0}$ となる。いずれの場合においても、太陽組成の金属量より有意に大きく、およそ 3 倍程度あったと推測できた¹⁹⁾。つまり、ケプラーの超新星爆発の親星は多量の金属を含む星だったのである。ケプラー超新星残骸は、銀河中心の近傍に位置する。銀河中心領域では、太陽周辺に比べて金属量が高く若い星が多く存在し、今回の結果と矛盾しない。超新星残骸中に星周物質の痕跡が見られることも含め、今回の

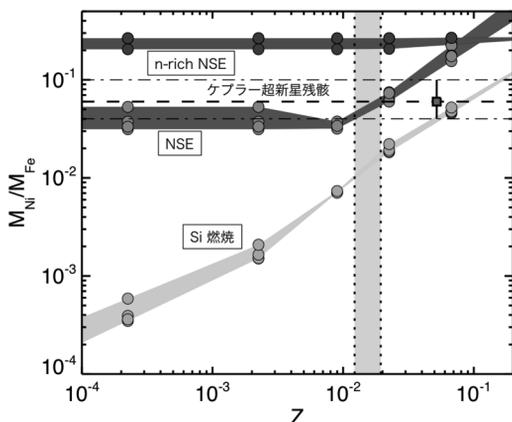


図3 M_{Ni}/M_{Fe} のZに対する依存性を示す理論値（遅延爆轟波モデルに基づいて「Si 燃烧」「NSE」「n-rich NSE」の三つの層について計算⁹⁾）と今回の観測により得られたケプラー超新星残骸の M_{Ni}/M_{Fe} （四角）. 影のついた領域は、太陽組成から見積られる範囲を示す.

結果はケプラーの超新星爆発はSDかつ比較的delay timeの短いpromptの経路で起こったことを示唆する.

測定結果から上記の結論に至るまでに、われわれはX線で観測できる衝撃波加熱されたMn, Crが $M > 0.2M_{\odot}$ の層でSi 燃烧により合成されたという仮定を置いている. $M < 0.2M_{\odot}$ のコアではZによらず中性子過剰な状態が達成されていると考えられ (neutron-rich nuclear statistical equilibrium; n-rich NSE)²⁰⁾, この層からの漏れ込みがあると結論も変わりうる. この点は、FeとNiの輝線比を使って検証可能である.

先ほどと同様に f_{Ni}/f_{Fe} を質量比に変換すると、 $M_{Ni}/M_{Fe} = 0.06^{+0.04}_{-0.02}$ が得られる. ほとんどのFeが ^{56}Ni の崩壊によりできることを考えると、これは $M^{58Ni}/M^{56Ni} \approx 0.06$ と解釈できる. この比は、Ia型超新星爆発の遅延爆轟波モデルと比較的良好一致を示す. 図3に、遅延爆轟波モデルに基づいて「Si 燃烧」「NSE」「n-rich NSE」の三つの層について計算した M_{Ni}/M_{Fe} のZに対する依存性を示す理論値を示す⁹⁾. これらと M_{Ni}/M_{Fe} の観測値を比較すると、まずZの値によらずn-rich NSEから

の寄与は考えにくいことがわかる. また、 M_{Mn}/M_{Cr} からZが比較的大きな値であったことを考慮すると、今回観測された鉄族元素のほとんどはSi 燃烧により合成されたと考えられる. つまり、今回の議論の根幹となる「 M_{Mn}/M_{Cr} がZの良い指標である」という点を担保する結果であると言える.

5. まとめ

今回、われわれはX線天文衛星すざくを用いてケプラーの超新星爆発の残骸を観測し、これまでにない精度で微量元素の輝線強度を測定した. また、そこから微量元素の生成量比を見積もり、その値を基に親星の金属量が太陽組成のそれと比べて有意に大きかったことを示した. たかだか一例の結果ではあるが、直接的かつ具体的に太陽組成を超える金属量をもつ白色矮星がわれわれの銀河系内で超新星爆発したことを観測的に示した意義は少なくない.

2015年度には、X線CCDのエネルギー分解能をはるかにしのぐカロリメーターを搭載した日本で6番目のX線天文衛星ASTRO-Hが打ち上げられる. これにより、このような輝線診断が可能になるサンプル数が増加し、かつ、プラズマの運動情報が新たに得られることにより、さらにIa型超新星の親星の素性に直接的に迫ることができると確信している.

謝辞

Key projectとしてこの観測を可能にしてくださった、すざく衛星のすべての関係者に感謝します. また、この記事を執筆する機会を与えていただき、かつ、完成まで温かく見守っていただきました編集委員の馬場彩氏にこの場を借りて御礼申し上げます.

参考文献

- 1) 河合誠之, 青木賢太郎, 戸谷友則, 2007, 天文月報 100, 17
- 2) 前田啓一, 2010, 天文月報 103, 672
- 3) Totani T., et al., 2008, PASJ 60, 1327
- 4) Maoz D., Mannucci F., 2012, PASA 29, 447
- 5) Sullivan M., 2010, MNRAS 406, 782
- 6) Timms F. X., et al., 2003, ApJ 590, 83
- 7) Howell D. A., et al., 2000, ApJ 691, 661
- 8) Kasen D., et al., 2009, Nature 460, 869
- 9) Badenes C., et al., 2008, ApJ 680, 33
- 10) Yamaguchi H., et al., 2008, PASJ 60, 147
- 11) Tamagawa T., et al., 2009, PASJ 61, 167
- 12) Uchida H., et al., 2013, ApJ 771, 56
- 13) Kamitsukasa F., et al., 2014, PASJ, in press
- 14) 山口弘悦, 2010, 天文月報 103, 43
- 15) 内田裕之, 2013, 天文月報 106, 604
- 16) Blair W. P., et al., 1991, ApJ 366, 484
- 17) Anders E., Grevesse, N., 1989, GeCoA 53, 197
- 18) Asplund M., et al., 2009, ARA&A 47, 481
- 19) Park S., et al., 2013, ApJ 767, 10
- 20) Brachwitz F., et al., 2000, ApJ 536, 934

An X-Ray Observation of a Young Remnant of Type Ia Supernova Reveals Its Progenitor's Metallicity

Koji Mori

Department of Applied Physics and Electronic Engineering, University of Miyazaki, 1-1 Gakuen Kibanadai-Nishi, Miyazaki 889-2192, Japan

Abstract: Type Ia supernovae are now the most useful cosmological distant indicators. In this context, the importance of understating of its progenitor's metallicity, Z , is growing. An X-ray observation of a young remnant of type Ia supernova provides an excellent opportunity to examine Z . We have performed deep X-ray observations of SN 1604 known as Kepler's super-nova with Suzaku and revealed that the progenitor of Kepler's SN had a super-solar metallicity. Next generation X-ray observatory ASTRO-H is expected to expand this unique method.