

Astro-E2を用いた 超新星爆発における元素合成の直接検証

玉川 徹、望月優子 (理化学研究所)
for the Astro-E2 Vela Jr. collaboration ¹

1 はじめに

われわれを取り巻き、この世界を形作っている元素の大半は、超新星爆発により生成されたと考えられている。理論的には、さまざまな超新星爆発のメカニズムが提案されており、どのような核種²が、どこでどのくらい生成されるかについて、研究が進んでいる。しかし観測的には、数多くの努力にもかかわらず、定量的なことはほとんどわかっていないのが現状である。

重力崩壊型の超新星爆発によって合成される核種のうち、内部に落ち込む領域と、外部にはじき飛ばされる領域の境界 (mass cut) で生成されるものは、元素合成のメカニズムを直接われわれに伝えてくれる強力なプローブとなる [Rauscher, 2002]。このような物質を調べるには、放射性元素の崩壊による核ガンマ線を、良い精度で観測することが重要である。しかし、その観測はきわめて難しく、COMPTONガンマ線天文台衛星や INTEGRAL 衛星による観測など、いくつか例はあるものの [e.g. Diehl, 2005]、十分な感度を有する検出器はいまだに存在していない。

そこでわれわれは、核ガンマ線そのものではなく、軌道電子捕獲 (orbital-electron capture) による原子核崩壊の際に発生するX線をとらえ、超新星で合成された核種をダイレクトに観測することを考えている。もし、このようなX線がとらえられるなら、X線領域から、元素合成の研究に切り込む道がひらける。これにより、これまでX線グループが得意としてきた「元素」の観測から、「核種」の観測へ世界が広がることになる。

2 軌道電子捕獲による原子核崩壊

陽子過剰の不安定原子核は、陽電子放出、または、軌道電子捕獲によってベータ崩壊する。親の不安定原子核と、崩壊先の娘核種の基底もしくは励起状態とのエネルギー差が、電子の質量の二倍以上にならないと、陽電子放出によるベータ崩壊は起こりえない。つまり、崩壊の前後の2つの状態間のエネルギー差が二倍に満たない不安定原子核では、100%の割合で軌道電子捕獲によるベータ崩壊が起きることになる。

ここで、軌道電子捕獲型の原子核ベータ崩壊を、⁴⁴Ti を例にとって説明する。⁴⁴Ti は、 α -rich freezeout で生成され、その量も多く、⁵⁶Ni や ⁵⁷Ni などとならび、mass cut 付近で生成される代表的な核種である。その生成量を正確に知ることは、超新星爆発における元素合成を探るために欠かすことができない。超新星を明るく輝かせている ⁵⁶Ni より、生成量は二桁ほど少ないが、半減期が 60 年と長いことから、爆発から 1000 日あたりを境に主役が ⁴⁴Ti に交代する。

超新星爆発により生成された ⁴⁴Ti は、図 1(左) のようなモードで崩壊を起こす。良く知られているのは、⁴⁴Sc の励起状態から放出される 67.9 keV と 78.4 keV、⁴⁴Ca の励起状態から放出される 1157 keV の核ガンマ線である。これら全ての核ガンマ線が観測されているのは、全天で唯一 Cas A のみである [Iyudin, 1994; Vink, 2001; Diehl, 2005]。しかし、われわれが目指しているのは、この核ガンマ線の検出ではない。図 1(右) に示すような、電子捕獲型のベータ崩壊そのものに付随して放出される X 線輝線である。

⁴⁴Ti は 100% の割合で、おもに K 殻の電子を捕獲して ⁴⁴Sc に原子核崩壊する。この過程で空いた孔に、L 殻から電子が落ちてきて、Sc-K α 線 (4.086, 4.091keV) が放出される。この K α 線を観測することができ

¹ 本講演の内容は、Astro-E2 Vela Jr. グループにおけるアイデアや議論が元になっています。グループメンバーは、玉川 徹、望月優子、寺田幸功、馬場彩 (理化学研究所)、Roland Diehl (MPE)、平賀純子、高橋忠幸 (宇宙研)、内山泰伸 (Yale 大)。

² 世の中には安定元素 (安定核) と放射性元素 (不安定核) がある。本講演では不安定核を取り扱う。ちなみに原子核崩壊を調べることにより、元素の種類だけでなく、その核種もわかる。

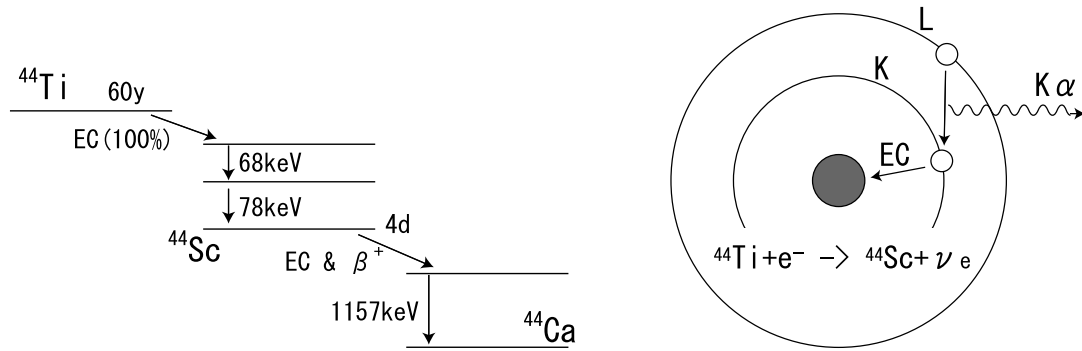


図 1: [左] ^{44}Ti の崩壊チェーン。 ^{44}Sc を経由して ^{44}Ca に崩壊する。[右] 軌道電子捕獲 (EC) による ^{44}Ti の ^{44}Sc への原子核崩壊の模式図。 ^{44}Ti 中の陽子が主に K 殻の電子を吸収し、中性子に改変される。その孔に上の順位から電子が落ちてきて X 線を放出する。

ば、ベータ崩壊を直接とらえたことになる。重要なことは、もともとそこに存在している元素が熱的に励起され緩和放出される X 線を見ているのではなく、原子核の崩壊そのものを見ているということである。ちなみに、超新星の爆発的な元素合成で生成される鉄族付近の原子核には、電子捕獲するものが比較的多いことが知られている。これに加え、放出される $K\alpha$ X線のエネルギー範囲は 4-8 keV 付近なので、*Astro-E2* XRS の観測に非常に有利な位置にくる。

観測されるラインのフラックス F_X は、以下のように表すことができる [e.g. Motizuki & Kumagai, 2004];

$$F_X = \frac{A g_X I_X f_X}{4\pi d^2} \quad (1)$$

$$= \frac{F_\gamma g_X I_X f_X}{I_\gamma f_\gamma} \quad (2)$$

ここで A は radioactivity、 g_X は全崩壊率に対する K 殻電子捕獲が占める割合 ($\sim 8/9$ [Motizuki & Kumagai, 2004])、 I_X は K 殻の空孔 1 つあたり $K\alpha$ X線が放出される強度、 f_X は X 線が超新星残骸からぬけ出して、われわれの元まで届く確率、 d は天体からの距離である。式 (2) は、すでに核ガンマ線の観測がある場合の求め方で、 F_γ は観測された核ガンマ線のラインフラックス、 I_γ は親核の崩壊 1 回あたりの核ガンマ線の絶対強度、 f_γ はそのガンマ線が超新星残骸から抜け出してわれわれの元に届く確率である。radioactivity A は以下のように表すことができる;

$$A = -\frac{dN}{dt} = N_0 \lambda \exp(-\lambda t) \quad (3)$$

ここで λ は decay rate を表し、 $t_{1/2}$ を元素の半減期とすると、 $\lambda = \ln 2 / t_{1/2}$ と書ける。 N は生成された放射性元素の数、 N_0 はその初期値である。もし核ガンマ線の観測例がなければ、 A は理論の助けを得て計算することになる。

観測される X 線のフラックスは、たとえば Cas A の場合、*COMPTEL* でとらえられた 1157 keV のガンマ線フラックス 3.4×10^{-5} ph/cm²/sec [Iyudin, 1994] と $I_\gamma(1157) = 0.999$ 、 $I_X(\text{Sc-K}\alpha) = 0.17$ を用い、 $f_\gamma(1157) \sim 1$ 、 $f_X(\text{Sc-K}\alpha) \sim 1$ と仮定すると、Sc-K α ラインは 5.5×10^{-6} ph/sec/cm² 程度の値になる。

3 観測ターゲット

上に述べた ^{44}Ti の検出のほか、mass cut 付近で大量に生成される ^{59}Ni の電子捕獲による崩壊も、良い観測目標となる [Leising, 2001]。こちらは 7.6×10^4 年の半減期を持ち、 ^{56}Co という安定核に、軌道電子捕獲によってベータ崩壊する。この過程で、Co-K α (6.916, 6.930 keV) の X 線が放出される。 ^{44}Ti や ^{59}Ni の合成量は、親星の質量や中心部の構造、超新星爆発のエネルギー、超新星のタイプに大きく依存するの

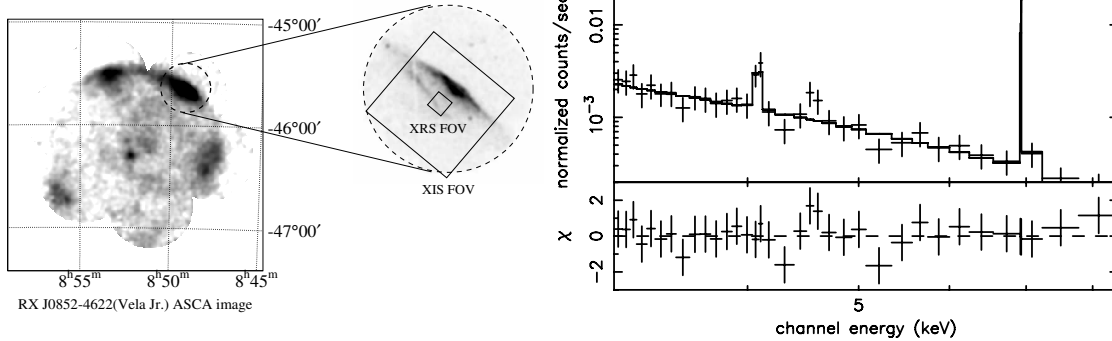


図 2: [左] ASCA で観測した Vera Jr. イメージに XMM-Newton で観測したリムの拡大図。観測はこの北西リムで行う。[右] 期待される XRS のスペクトル。4.1keV と 6.9keV 付近に、電子捕獲によるベータ崩壊に伴って放出される X 線のラインが見られる。

で、どちらも爆発メカニズムに強い制限を与える。この二つの核種を同時に観測することができれば、爆発メカニズムにさらに厳しい制限をつけることができる。

これらの放射性元素を観測するターゲットとして、すでに ^{44}Ti 核ガンマ線が受かっている Cas A などは、良い候補となる。1987A も良い候補であるが、爆発から 20 年しか経っておらず、まわりの物質の密度によっては、X 線が外部に出てこられない可能性もある。Tycho における ^{59}Ni なども、良い観測候補である。これらの天体はいずれも、SWG ターゲットとして観測が予定されているので、今から観測データが出てくるのを心待ちにしている。

それらとは別に、われわれは RX J0852.0-4622 (通称 Vela Jr.) の観測を提案している。 ^{44}Ti は半減期が 60 年であることから、若い超新星を観測することが重要である。Vela Jr. は 4-7keV 付近での熱的な X 線ライン放射が無視できるほど温度が低く ($kT_e=0.09$ and 0.24 keV)[Hiraga, 2005]、爆発からの年齢が若く ($\sim 680\text{yr}$)、距離が比較的近い ($\sim 200\text{pc}$)³ [Iyudin, 1998; Aschenback; 1999]、良い条件のそろった超新星残骸である。ただしこの天体は視直径が二度もあるので、観測がひじょうに難しい。XRS の視野はおろか、XIS の視野ですら全体をカバーすることは出来ない。観測は図 2(左) に示すように、X 線で明るく輝く北西リム付近で行う。ここでは 4.1keV の X 線ラインが観測されたという報告がいくつかある [Tsunemi, 2000; Slane, 2001; Iyudin, 2005] が、確定的なことは不明である。X 線の明るさと同様に物質が分布していると仮定して⁴ 収量をシミュレートしたものを、図 2(右) に示す。

一般的に若い超新星残骸からは、数 keV まで加熱された高温プラズマからの放射が観測されており、これに伴う安定元素からの X 線輝線が邪魔になる (例えば ^{59}Ni の 6.9keV に対する neutral Fe-K β など)。われわれの試みは、核崩壊に起因する輝線を確実にとらえて初めて実現可能になる。このために、Astro-E2 衛星の優れた能力、特に XRS の高エネルギーで広がった天体に対する分光能力を用いることが必要不可欠である。

4 将来の展望

電子捕獲による原子核崩壊を観測することができれば、元素合成研究に、これまでとは全く違う強力な手法を導入することになる。この手法は Astro-E2 のみならず、次世代天文衛星 NeXT の、スーパーミラーを用いた望遠鏡でも有効だろう。80keV まで感度良く硬 X 線のラインをとらえることができるなら、より重い原子核の崩壊をとらえることができる。

電子捕獲に限らず、X 線領域から元素合成研究へのアプローチを考えると、研究の幅がさらに広がる。わ

³ 距離については依然議論がある [Bamba, 2005]

⁴ Cas A で見られるように、物質は超新星残骸のさまざまな所に局在している可能性が高い。

れわれの身近なところで超新星爆発が起きれば、鉄以上の重い元素を生成した物理過程のひとつと信じられている、速い中性子捕獲プロセス (r-process) に関連した、短時間で崩壊する原子核を観測する絶好の機会となるだろう [Terada, 2005]⁵。

さいごに、2007年度には理化学研究所で次世代加速器施設「RI ビームファクトリー」(<http://ribf.riken.jp>)が稼働し始める。これにより、今まで人工的に作ることでできなかった、元素合成の鍵となる不安定原子核が生成できるようになる。例えば、現在では未知の、r-process に関連している核種が生成され、その崩壊に伴う核ガンマ線のエネルギーが、実験室レベルでわかるようになる。それを衛星による観測にフィードバックすることにより、地上での観測と有機的に結びつけ、宇宙における元素合成の謎の解明に一歩でも近づきたいと願っている。

References

- Aschenback, B., Iyudin, A.F., Schonfelder, V., 1999, *A&A*, 350, 997.
Bamba, A., Yamazaki, R., Hiraga, J.S., 2005, *astro-ph/0506331*.
Diehl, R., Prantzos, N., Ballmoos, P., 2005, *astro-ph/0502324*.
Hiraga, J., et al., 2005, in preparation.
Iyudin, A.F., et al., 1994, *A&A*, 284, 1.
Iyudin, A.F., et al., 1998, *Nature*, 396, 142.
Iyudin, A.F., et al., 2005, *A&A*, 429, 225.
Leising, M.D., 2001, *ApJ*, 563, 185.
Motizuki, Y., Kumagai, S., 2004, *New Astron. Rev.*, 48, 69.
Qian, Y.-Z., Wasserburg, G.J., 1999, *ApJ*, 524, 213.
Rauscher, T., Heger, A., Hoffman, R.D., Woosley, S.E., 2002, *ApJ*, 576, 323.
Slane, P., et al., 2001, *ApJ*, 548, 814.
Terada, Y., et al., 2005, 第五回宇宙科学シンポジウム集録.
Tsunemi, H., et al., 2000, *PASJ*, 52, 887.
Vink, J., et al., 2001, *ApJ* 560, L79.

⁵ 例えば Bi-K X 線 (75-90 keV) などが観測にかかると期待される [Qian, 1999]。