

NeXTで探る元素合成の起源

寺田幸功¹、望月優子、玉川徹、馬場彩 (理研)、牧島一夫 (理研、東大)、
 平賀純子、高橋忠幸、内山泰伸、中沢知洋 (ISAS/JAXA)、
 山岡和貴、山崎徹 (青山)、岡田祐 (東大)、
 田代信、洪秀徴 (埼玉大)、
 ほか宇宙核線グループ²

¹ E-mail: terada@riken.jp,

² Mailing List: nuclear_astrophys@crab.riken.jp

概要

爆発的な中性子過剰状態でのみ起きる r プロセスは、ビスマス以降の重い原子核を合成する唯一の反応であるものの、その痕跡を残す天体は発見されていない。NeXT 衛星計画により、高感度な硬 X 線/軟 γ 線観測が可能になると、超新星における r プロセス由来の核 γ 輝線を、世界で初めて検出できるようになると予想される。

1 はじめに

1.1 元素合成の謎

世の中には、256 種類の安定な原子核を含め、2800 種類以上もの原子核が存在する。地球上の生命は、これらの天然の元素をうまく利用し、40 億年の間に複雑な進化を遂げてきた。しかし、我々は、こうした元素が、広大な宇宙のどこでどのように創られたかという、根本的な問いに答えきれていない。その起源を探ることは、宇宙物理、原子核物理だけでなく、科学的にとっても価値のあるテーマである。

宇宙創成のビッグバンによって水素とヘリウムとが作られ、これらが冷え、現在のよう な星やガスが輝く世界に落ち着いた時に、恒星の中でゆっくりと時間をかけて α 粒子の整数倍の元素が Fe まで生成され、さらに、中性子捕獲反応によって Bi までの重元素が作られていったとされる。ビスマスよりも重い原子核を生成する唯一の反応として r プロセスが考えられているが、いまだにその証拠が見つかった天体は発見されておらず、天体核物理学上の最大の謎となっている。

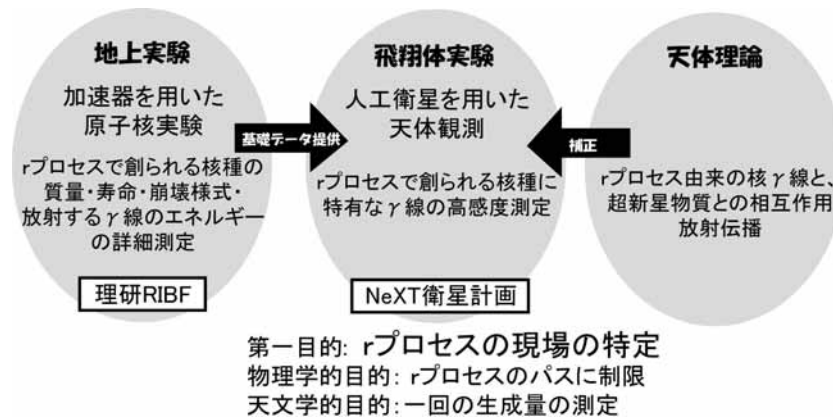


図 1: 地上実験、宇宙実験、理論のコラボレーションで探る、r プロセス重元素合成の謎

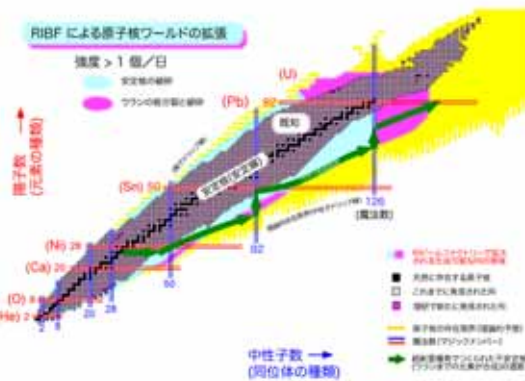


図 2: 核図表上に示した r プロセス元素合成の道筋と、理研 RIBF により広がる世界

1.2 NeXT 計画と r プロセス

NeXT 衛星は、「非熱的な宇宙」の探査を第一の目的として計画されている衛星で、0.5 keV から 600 keV という広いエネルギー帯域に感度をもつ次期 X 線衛星である。軟 X 線の領域で巨大な有効面積での高分散分光が可能となるだけでなく、10 keV 以上の硬 X 線領域での撮像が初めて実現され、かつ、軟 γ 線まで飛躍的に感度が良くなる点が最大の特徴である。10 keV から 80 keV を観測する Hard X-ray Imager (HXI) は、過去最高の感度を誇るであろう Astro-E2 衛星の硬 X 線検出器 (HXD) よりも、さらに 2 桁ちかく感度が向上し、80 keV 以上の Soft γ -ray Detector (SGD) でも 1 桁近い向上が見込まれる。

r プロセスによる元素合成では、核図表の上で、例えば図 2 に示すような道筋を通る。その途中で、中性子数が過剰な領域に生成された不安定核種が、安定核の方向 (図の左上方向) に崩壊するときに、ある決まったエネルギーを持つ核 γ 線の輝線がでる。r プロセスの現場を探するためには、この核 γ 輝線を検出するのが、不定性のない最も有効な方法である。r プロセスは、太陽よりも重たい星が最期に起こす超新星爆発といった、中性子が過剰な爆発的な環境で生じるとされるが、天体から予想される核 γ 線の強度はあまりに微弱であるため、これまで r プロセスの探査は観測的に不可能であった。NeXT 計画によって初めて、我々は、現実的な探査を可能とする感度を手にいれる。

1.3 地上実験、天体理論とのコラボレーション

r プロセスに関しては、地上の原子核実験においてもまだ不明の点が多く、日米欧の代表的な研究施設で、国際的な競争下での活発な研究が進められている状況である。天体からの核 γ 線の強度の見積もりは、地上の原子核実験の精度に大きく左右されるが、2005 年現在、正確な見積もりをするデータはまだそろわない。r プロセスの探査では、NeXT 衛星による飛翔体実験だけでなく、地上の原子核加速器実験とあわせて進める必要がある (図 1)。2007 年から稼働しはじめる、理化学研究所の RI Beam Factory (RIBF) をもちいれば、人類は、ようやく、r プロセスの道筋上にある元素の、ほぼ全てを、実験室的につくり出すことが出来るようになる (図 2)。我々は、この地上原子核実験グループとの強いコネクションを活かし、NeXT 衛星による r プロセス探査が行えよう。

2 NeXT 衛星による探査

NeXT 衛星による探査は、既に爆発した近傍の超新星残骸の深い観測と、衛星寿命の間に発生しうる超新星の観測の二種類が考えられる。

2.1 超新星残骸の深い観測

探査では、既に爆発した超新星残骸からの r プロセス由来の輝線を狙う。歴史的な超新星からの放射をねらう場合にターゲットとなる不安定核は、核 γ 線をだす寿命が、 10^{3-4} 年のオーダーと大体そろっており、寿命の長短は大きくは効いてこない。探査の対象としては、可能な限り近傍で、かつ、NeXT の視野でカバーしきれぬ大きさ、すなわち若い超新星残骸を狙うのが効率がよい。我々は、複数の歴史的な超新星の寿命と距離をあたってみたところ、もっとも有望なのは、Vela 超新星残骸に付随する、RX J0852-4622 (別名 Vela Jr.) であろうと考えている。図3にしめすとおり、NeXT 衛星を用いて Vela Jr. を、 10^6 秒でいど観測すれば、 r プロセス由来の核 γ 輝線を検出できると予測している。

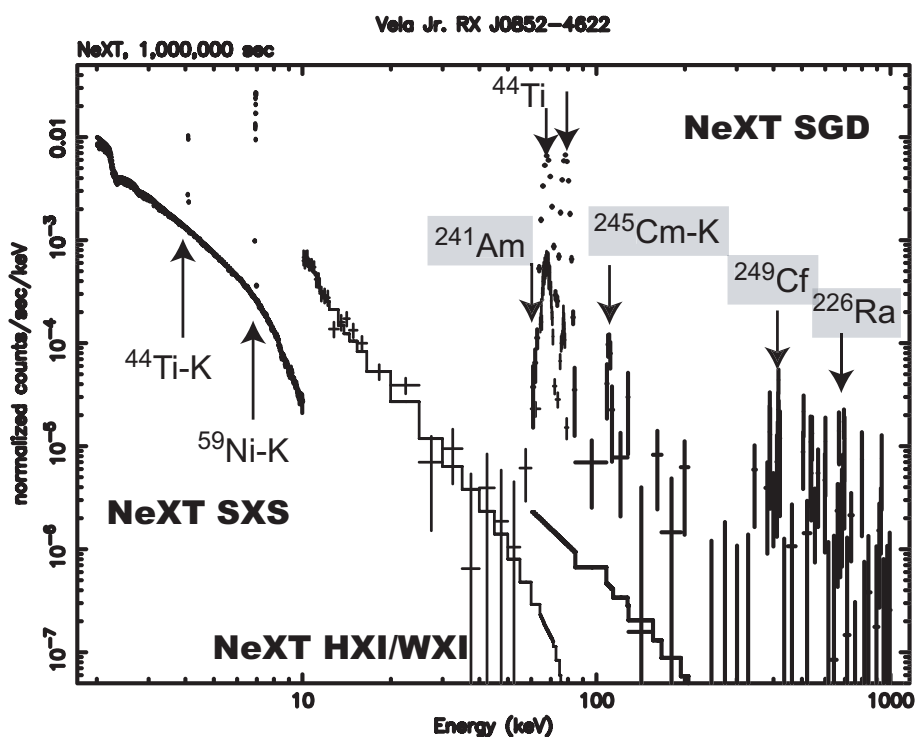


図3: NeXT を用いた Vela Jr. 観測の予想スペクトル。超新星爆発の際にできる ^{44}Ti , ^{56}Ni 由来の輝線の他に、 r プロセス由来の不安定核からの核 γ 線 (ハッチをかけたもの) が検出できると予想される。 r プロセス由来の各輝線の強度は、Quian *et.al.* 1999 を元に計算。

2.2 超新星の早期観測

将来、発生するであろう超新星を、NeXT 衛星で早期に観測することで、崩壊の減衰定数がはやい核種からの核 γ 線が狙える。超新星爆発後すぐは、爆発で放出した物質が濃く、 γ 線のエネルギーをもってしてもほとんど透過できないため、ターゲットとなる核種

の崩壊の寿命は、約年オーダーのものとなる。図4に、距離 200pc に発生した場合に、超新星爆発から一ヵ月程度から 500 ksec の観測を行った場合の、NeXT 衛星 SGD 検出器による予想エネルギースペクトルを示す。 ^{227}Ac 系列、 ^{228}Ra 系列からの核 γ 線が、多数、検出できると予測できる。

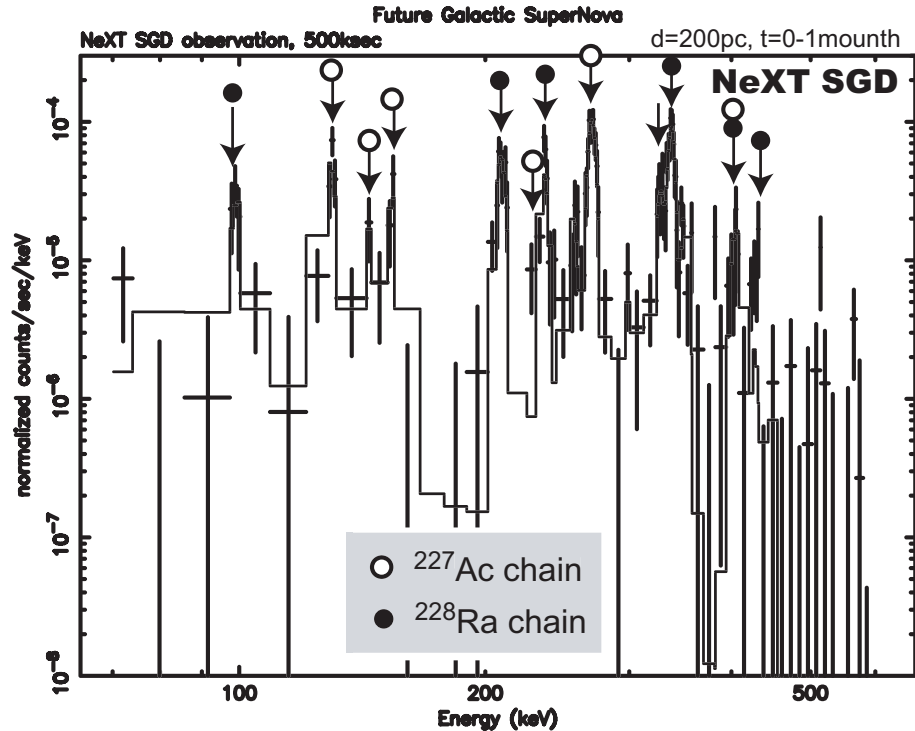


図 4: NeXT 衛星寿命の間に、200pc の距離に発生した超新星を観測した場合の、予想エネルギースペクトル。アクチノイド系、ランタノイド系の輝線が多数みえる。

地上実験では、 r プロセス上の不安定核の物理量を一つずつ正確に測定することが主となる。NeXT 衛星を用いた超新星の早期観測によって、多数の輝線の強度が同時に測定されると、 r プロセスの時間発展およびその道筋に対する強い制限を課す事ができ、地上実験の個々の測定を繋ぐようなフィードバックがかけられる観測となる。

参考文献

- [1] R. Diehl and F.X. Timmes 1998, PASP 110, 637
- [2] NeXT WG 2003, NeXT 計画提案書
- [3] J.Vink *et al.* 2001, ApJ 560, L79
- [4] A.F. Iyudin 1994, A&A 284, L1
- [5] Quian *et al.* 1999, ApJ 524, 213