

理研・『RI ビームファクトリー』の紹介とライン 線観測 ～ 元素の世界から原子核の世界へ～

望月優子 (理化学研究所)

for *Nuclear γ -Ray Astrophysics Collaboration*¹

Abstract

「最近の原子核研究とライン γ 線の観測計画」という内容で世話人より講演の依頼を受けた。筆者の所属する理研・仁科加速器研究センター (2006 年 4 月より発足予定) では、『RI ビームファクトリー』とよばれる次世代大型加速器を建設中であり、人類がまだ未知の、非常に不安定で短い寿命を持つ核種に対する原子核実験を 2007 年より世界に先駆けて順次開始する予定である。ここでは、『RI ビームファクトリー』で何が可能になるかを簡潔に紹介し、特に r プロセス元素合成に関連して、宇宙における今後のライン γ 線観測の重要性を展望する。

1 イントロダクション：鉄からウランにいたる重元素合成

『元素の起源』 我々の身体をふくめ、目に見える世界のすべてをかたち作っている多種多様な元素が、宇宙の進化とともに、どこでどのように創造され、そして地球に存在するに至ったのかという根源的な問いかけ に対して、人類はまだ明確な答えをもっていない。元素の周期表の原子番号 26 の鉄から、天然に存在する元素としてはもっとも重い、原子番号 92 のウランまでの元素については特によくわかっておらず、「物理学上、未解決の大きな 11 の謎」(米国ナショナル科学アカデミーの答申によるもので、今後の研究遂行が強く望まれるもの) のうちのひとつに数えられている。

鉄からウランにいたる数十種類の元素のうち約半数は、重力崩壊型の超新星爆発が作り出す非常に高温で高密度の環境下で、非常に中性子過剰な原子核を経由して創られたと考えられている。これは始源的な隕石中に見いだされた太陽系の核種の大局的な相対組成の考察から、約 60 年も前に唱えられた仮説 (Burbidge et al. 1957) である。その物理的特徴から「 r プロセス (rapid neutron-capture process = 速い中性子捕獲過程)」と名付けられている。しかし、人類はまだこのような非常に中性子過剰な核種を実験的に生成したことはないため、なおかつ超新星爆発においてこのような中性子過剰核種がつけられたという直接的な証拠は天体観測からまだ何も得られていないため、現状では決定的なことは何もわかっていない。理化学研究所で現在建設中の次世代加速器施設『RI ビームファクトリー (RIBF)』の使命のひとつは、この r プロセス元素合成で生成されると仮説上考えられている、非常に中性子過剰で不安定な核種を世界で初めて実験的に生成し、その質量・半減期といった原子核の基本的な性質や核反応機構を実験的に調べ、『元素の起源』の解明に貢献し、もって人類の知見を広げることにある。

しかし、元素の起源を真に解明しようとするならば、原子核の実験からの情報だけでは実は不十分である。第一に、 r プロセス元素合成過程には、4600 種類以上の原子核がその核種に応じているいるな核反応で関与していると考えられており、これらすべての核種について必要な物理量を実験的に調べきことは時間的に不可能である。元素合成に重要な役割を果たしていると考えられる核種群を特定して実験し、実験情報が得られないその他の核種については、主要な核種群の実験結果を説明できるように原子核理論モデルをチューニングしたものを適用するしかない。第二に、原子核物理からわかるのは核反応のメカニズムであり、これはいわば化学反応における反応の「素過程」に対応するものである。反応の「方向」や「スピード」は、宇宙の「環境」が左右する。元素を生成する“現場”の温度・密度がそれに相当するが、実験不可能なため、超新星爆発の理論モデルを適用する必要がある。さらに、上述したように超新星爆発が実際の r

¹ 宇宙核 γ グループ (nuclear_astrophys@crab.riken.jp) : 現在のところ、玉川徹、寺田幸功、馬場彩、牧島一夫、高橋忠幸、中沢知洋、平賀純子、内山泰伸、田代信、洪秀徴、山岡和貴、高橋弘充、深沢泰司の各氏、筆者で活動中。ご参加、常に歓迎です。

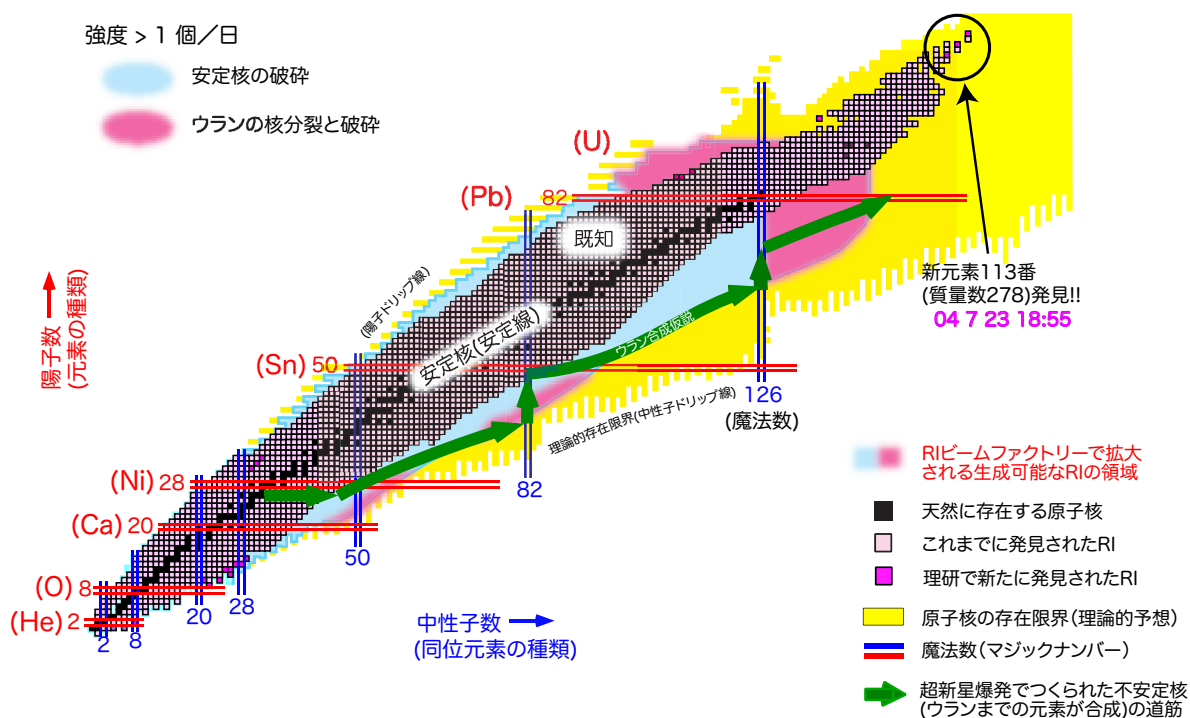


図 1: RIBF が広げる原子核の世界。

プロセス元素合成の現場かどうかまだ確定していないため、元素生成の舞台となっている天体現象を観測的に特定することが大きな鍵となっている。

2 『RI ビームファクトリー』: 世界に冠絶する重イオン加速器

RIBF の最大の特徴は、世界初の“超伝導”リングサイクロトロン (SRC) の採用である。SRC は RIBF の心臓部にあたる加速器で、全体が純鉄のシールドで覆われた総重量 8300 トン (東京タワーの約 2 倍の質量) の「鉄の塊」タイプである。仮にもし主コイルを常伝導にすると、1 年あたり 90 メガワットの電力を消費することになり、1 年あたりの電気代が約 45 億円かかることになる。これは実際には実現不可能である。SRC では、8300 トンの鉄の塊のうち 155 トンが液体ヘリウム温度まで冷やされ、主コイルが超伝導となる。よく知られているように超伝導体は電気抵抗が 0 であるため、これで稼働のための電気代はいっさいかからなくなる。代わりに液体ヘリウムを製造するための電気代が必要となるが、これは 1 年あたり約 8,000 万円ですむ。そして発生する強力な漏えい磁場を約 4000 トンの純鉄がシールドする役割を果たす。RIBF は、本質的には、漏えい磁場のシールドに鉄の塊を用いるという今までにない着想によって、確立した既存の超伝導技術をリングサイクロトロンに適用する道を一っけに開き、「不可能を可能に」しているのである。

RIBF は、安定な原子核の破碎反応、またウランの核分裂と破碎反応という 2 つの手法を用いて、現在までに知られている核種の世界を飛躍的に拡大させると期待されている。図 1 に RIBF が広げる原子核の世界を示す。図 1 において、縦軸は原子核を構成している陽子の数 (原子番号) すなわち元素の種類を表し、横軸は中性子の数すなわち同位体の種類を表す。自然界には、水素からウランに至る 83 種類の元素、核種で数えると 287 種の核種が、安定 (あるいは地球と同程度以上の長寿命であるため準安定) に存在する。このうち ^{238}U は、陽子 92 個と中性子 146 個から構成される準安定な核種で、天然に存在する核種としては最も重い。安定な核種以外は不安定で、たとえ生成されたとしてもその核種に特有の寿命で特定のエネルギー

表 1: Important stellar radioactivities for gamma-ray line astronomy. [Pranztos(2004) より引用]

DECAY CHAIN	MEAN LIFE* (yr)	LINE ENERGIES (MeV) (Branching Ratios)	SITE [Detected]	NUCLEAR PROCESS
${}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li}$	0.21	0.478 (0.1)	Novae	Expl.H
${}^{56}\text{Ni} \rightarrow {}^{56}\text{Co}^+ \rightarrow {}^{56}\text{Fe}$	0.31	<u>0.847</u> (1.) <u>1.238</u> (0.68) 2.598 (0.17) 1.771 (0.15)	SN [SN1987A] [SN1991T]	NSE
${}^{57}\text{Co} \rightarrow {}^{57}\text{Fe}$	1.1	<u>0.122</u> (0.86) <u>0.136</u> (0.11)	SN [SN1987A]	NSE
${}^{22}\text{Na}^+ \rightarrow {}^{22}\text{Ne}$	3.8	1.275 (1.)	Novae	Expl.H
${}^{44}\text{Ti} \rightarrow {}^{44}\text{Sc}^+ \rightarrow {}^{44}\text{Ca}$	89	<u>1.157</u> (1.) 0.068 (0.95) 0.078 (0.96)	SN [CasA]	α -NSE
${}^{26}\text{Al}^+ \rightarrow {}^{26}\text{Mg}$	$1.1 \cdot 10^6$	<u>1.809</u> (1.)	WR, AGB Novae SNII [Galaxy, Vela]	St.H Expl.H St.Ne, Expl.Ne, ν
${}^{60}\text{Fe} \rightarrow {}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni}$	$2.2 \cdot 10^6$	1.332 (1.) 1.173 (1.)	SN [Galaxy]	n-capt

+ : positron emitters (associated 511 keV line)

* : Double decay chains: the longest lifetime is given; *Underlined* : lines detected

In *parentheses* : branching ratios; In *brackets* : sites of lines detected

St. (Expl.) : Hydrostatic (Explosive) burning; NSE : Nuclear statistical equilibrium

α : α -rich "freeze-out"; n-capt : neutron captures; ν : neutrino-process

の放射線を放出しながら別の核種に改変してしまい、最終的には 287 種の (準) 安定な核種にたどり着く。

現在、理論的に存在が予測されている核種の種類は、原子核の質量モデルや核分裂モデルにもよるが、およそ $11,000 \pm 1,100$ 種である (小浦、private com. 2005)。このうち 2004 年 10 月時点までに実験的に存在が確認された核種は、2,968 核種である。さらに同定された核種のうち基本的な物理量である質量が測定されている核種は、2003 年までの核データで 2,228 種にすぎない [小浦、橘 (2005) 参照]。

図 1 には、r プロセス元素合成が核図表上で経路すると考えられている典型的な経路 (" r プロセスパス ") を緑のラインで示してある。中性子が過剰で不安定な核種の領域を経由しながら重い核種が生成され、それらは電子ベータ崩壊を起こして原子番号のひとつ大きな核種に改変していく。ウランの同位体 ${}^{235}\text{U}$ 、 ${}^{238}\text{U}$ や、 ${}^{232}\text{Th}$ (トリウム) といった核種は、このようにして r プロセスによってのみ生成される。核種の質量や寿命は、r プロセスパスを決定する上で非常に重要な物理量であるが、現在のところ全面的に理論計算に頼らざるを得ない状況である。RIBF では、約 1000 種の未知の中性子過剰核種について初めて実験が可能になり、図 1 からわかるように、r プロセスパス上の中性子過剰核種を世界で初めて実験的にカバーする。

3 ライン γ 線・X 線放出の物理過程と期待されるフラックス

さて原子核に関連するライン γ 線・X 線放出の物理過程として、以下の 3 つが考えられる。

1. 励起状態にある原子核の脱励起による核 γ 線放出プロセス。例えば、 ${}^{44}\text{Ti}$ や ${}^{26}\text{Al}$ のベータ崩壊に伴って、娘核が励起状態から基底状態におちる際に放出される核 γ 線が CGRO 衛星や INTEGRAL 衛星

表 2: Vela Jr. SNR から期待される r プロセス核 γ 線. [Qian et al. (1999) より引用]

r プロセス核種 [親核] (親核の崩壊系列上の娘核)	崩壊寿命 (10^3 yr)	ラインエネルギー (keV)	親核の崩壊 1 回あたりの γ 線絶対強度 (光子数)	γ 線フラックス (10^{-7} γ cm $^{-2}$ s $^{-1}$)
^{226}Ra (^{214}Po)	2.31	609	0.448	1.0
^{229}Th (^{237}Np)	10.6	59.5	0.359	1.2
^{249}Cf (^{245}Cm)	0.506	388	0.660	2.1
^{251}Cf (^{247}Cm)	1.30	Cm K X-rays (104-127)	0.436	1.2

によって観測されている。

- 陽子過剰な不安定核が軌道電子捕獲によってベータ崩壊したのち、空いた K 殻電子孔へ外殻の電子が遷移する際に放出する K-X 線。
- 励起状態にある原子核が γ 線を放出する代わりに主に K 殻の軌道電子を放出して脱励起すること (γ 線の内部転換) により、空いた K 殻電子孔へ外殻の電子が遷移する際に放出する K-X 線。r プロセスに関わるような重い核種では、70-80keV から 120-130keV 程度にわたる軟 γ 線領域になる。

表 1 に、核 γ 線天文学で代表的な核 γ 線 (上記 1) について、それぞれ核種の崩壊様式・崩壊寿命 (半減期ではないことに注意)・ラインエネルギー・観測が期待される (もしくは観測された) 天体・元素合成過程を、現状がよくまとめられているレビュー論文 (Prantzos 2004) より引用する。

一方、超新星爆発時の爆発的元素合成で生成される生成量の比較的多い不安定核種には、陽子過剰で軌道電子捕獲でベータ崩壊するものが多い。例えば、 ^{56}Ni 、 ^{44}Ti 、 ^{59}Ni 、 ^{55}Fe 、 ^{53}Mn などがある。これらの崩壊に伴う核 γ 線や“核 K-X 線”(上記 2) を観測して、実際の超新星残骸の ^{56}Ni 、 ^{59}Ni 、 ^{44}Ti の核種の絶対量や或いは複数の核種の合成量の比と理論モデルの結果とを比較し、爆発における非球対称の度合いや、マスカットの位置に制限をつけ、超新星爆発モデルをより信頼に足るものへと発展させていくことが元素合成の研究では非常に大切である [例えば、玉川、望月ら (2005) による提案など]。

r プロセスが起きている“現場”としては、必要な大量の数の中性子は爆発的な天体現象でしか供給することができないため、重力崩壊型超新星爆発が最有力候補とされているのは上述したとおりである。しかし、r プロセスがどんな天体現象に伴い起きてきたのかということはまだわかっておらず、これは天文観測から確かめられねばならない。このための唯一の手段は、爆発で生成された不安定な r プロセス核種が崩壊する際に放出する特徴的な核 γ 線や核 K-X 線 (上記 3) を超新星爆発や超新星残骸から捉えることである。

表 2 に、Qian らが発表 (1999) した、超新星残骸 RX0852-4622 (Vela Jr.) から検出される可能性のある r プロセス核種からの核 γ 線を、期待されるフラックスの大きなものから 4 つを選んでまとめた。表 2 より、Vela Jr. 超新星で生成されたであろう r プロセス核種の崩壊に伴う γ 線を検出するためには、少なくとも 10^{-7} (ph cm $^{-2}$ s $^{-1}$) の検出能力が必要であることが示唆される。ここで Qian らの理論的な見積りは、1) Vela Jr. SNR までの距離は 200pc で年齢は 700 年、2) 我々の銀河系では 10^{10} 年にわたって空間的に一様に 30 年おきに超新星爆発が起きてきた、3) 一発の超新星爆発で合成される各 r プロセス核種の親核 (表 2) の合成量は $2 \times 10^{-8} M_{\odot}$ 、との仮定に基づいている。しかしながら、天の川銀河の超新星爆発率の不定性は 2 桁に及んでいること [例えば、最近のコンパイルとして Pavidow & Fields (2001) の Fig. 1]、爆発エネルギーの不定性、また太陽系 r プロセス核種の相対組成は太陽系の核種相対組成から s プロセスの相対組成を差し引いて得られるが、この s プロセスの組成自体にも警報がある (Käppeler et al. 1989) ことから、表 2 で得られたライン γ 線フラックスは、数ファクターの不定性があると考えらるべきであろう。

以上の考察から、寺田ら (2005) は第一ステップの楽観的なケースとして、Qian らの得た γ 線フラックスの 4 倍の値を想定し、NeXT 衛星搭載の SXS/HXI/SGD で得られるであろう γ 線スペクトルの予想シ

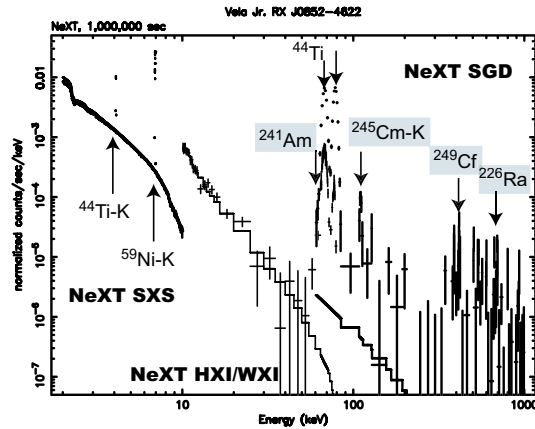


図 2: NeXT で期待される Vela Jr. からの r プロセス核種の崩壊に伴う核 γ 線。 ^{44}Ti の 68、78keV の核 γ 線、また ^{44}Ti と ^{59}Ni の軌道電子捕獲ベータ崩壊に伴う K-X 線も期待される。寺田ら (2005) より転載。

ミュレーションを行った。Vela Jr. SNR を 10^6sec 観測した場合 (図 2) と、さらに将来、新しい超新星が距離 200pc に出現したとして爆発直後に光学的に薄くなってから 500ksec 観測した場合について調べた結果、60keV から 1MeV の範囲で、r プロセスで生成される核種からの輝線が多数受かる可能性のあることがわかっていてる。Qian らの理論的な核 γ 線フラックスの見積りの更新は、今後の課題である。

4 元素の世界から原子核の世界へ！

ASCA をはじめとする日本の X 線天文衛星は、元素の観測に大変な威力を発揮してきた。元素合成の分野では、当然のことながら、さらに核 γ 線観測に踏み込んで初めてアプローチ可能になる研究対象は広い。例えば、前節で述べたように、特定の超新星爆発イベントで生成される核種の絶対量が求められれば理論との精密な比較ができるようになるだけでなく、r プロセスで生成される核種に特徴的な核 γ 線を捕らえることによって、r プロセスが起きている天体現象を特定することができる。一方、地上では RIBF によって、r プロセスに関係しているが現在では未知の不安定核種の崩壊に伴う核 γ 線エネルギーが実験室レベルでわかるようになる。すると観測されたライン γ 線エネルギーと実験室で知られた核 γ 線エネルギーを照らしあわせることによって、r プロセスパス (図 1) を観測から特定することすら原理的には可能となる！世界に先駆けて RIBF で得られるであろう研究成果を使えるのであれば使わない手はないと思われる。分野の垣根を越えた NeXT と RIBF の“最強タッグ”によって、元素から核種の世界へ、宇宙の観測研究がさらに拡大することを強く期待するものである。

References

- Burbidge, M. et al. 1957, Rev. Mod. Phys. 29, 547
- Käppeler et al. 1989, Rep. Prog. Phys. 52, 945
- Pavidow, V. & Fields, B.D. 2001, ApJ. 558, 63
- Prantzos, N. 2004, Proc. of the 5th INTEGRAL Workshop; astro-ph/0404501
- 小浦寛之、橋孝博、日本物理学会誌 (2005)、60、717
- 玉川徹、望月優子 for Astro-E2 Vela Jr. Collaboration、「Astro-E2 でひらく X 線分光天文学」研究会集録 (2005)、26
- 寺田幸功、望月優子ほか宇宙核グループ、第五回宇宙科学シンポジウム集録 (2005)、28