

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：32615

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2013

課題番号：21540244

研究課題名(和文)rプロセス元素に見る矮小銀河・銀河系ハローの星形成史

研究課題名(英文)Enrichment history of r-process elements in the Galactic halo and dwarf galaxies

研究代表者

石丸 友里 (ISHIMARU, Yuri)

国際基督教大学・教養学部・准教授

研究者番号：90397068

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：鉄よりも重い元素の多くは早い中性子捕獲過程(rプロセス)で作られる。その起源の候補の一つは超新星爆発であったが、最近の元素合成理論から困難が指摘された。もう一つの有力な候補は、中性子星連星の合体であるが、合体に1億年程度要すると考えられるため、金属欠乏星に見られるrプロセスの過剰を説明できないと言われていた。しかし本研究では、銀河系ハローが異なる星形成史のサブハローの衝突・合体によって形成されるならば、金属欠乏星の観測値が説明できることを示した。この結果は、重いrプロセス元素の起源として中性子星合体を強く支持するものである。

研究成果の概要(英文)：Rapid neutron-capture process (r-process) produces most elements heavier than iron. Recent nucleosynthesis studies have pointed out serious difficulties for supernovae as a candidate of the r-process site. The other strong candidate is a neutron star merger. However, it has been suggested that neutron star mergers could not explain observed enhancement of r-process elements in metal-poor stars because the timescale of merger is regarded to be too long as 100 Myrs. In this study, using a new chemical evolution model, we have shown that neutron star mergers could reproduce observational abundances of metal-poor stars if the Galactic halo were formed from clusterings of sub-halos with various star formation histories. This result strongly supports neutron star mergers as the r-process site.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：理論天体物理学 銀河系 化学進化 金属欠乏星 矮小銀河 rプロセス 超新星爆発 中性子星

1. 研究開始当初の背景

我々の銀河系ハローにある金属欠乏星には、銀河系誕生期の星形成史が記録されている。その化学組成の特色として最も顕著なことは、中性子捕獲元素(Sr, Ba, Eu 等、鉄よりも重い元素)の鉄に対する組成比(以下、 $[r/Fe]$ 比と表す)が、観測誤差を遥かに越える大きさで分散することである。これは、元素(O, Mg 等)や鉄族元素(Zn, Cr 等)では分散が小さいことと対照的である。特に金属欠乏星の中性子捕獲元素は、 r プロセスで合成されたと考えられているが、この観測事実は r プロセスの起源が 元素や鉄族元素と同一ではなく、限られた天体のみであることを示唆している。 r プロセスの起源天体には、大別して二つの候補が考えられてきた。

(1) r プロセスの起源天体の候補の一つは重力崩壊型超新星爆発である。金属欠乏星に見られる化学組成比 $[r/Fe]$ 比の分散は、超新星爆発の元素合成の多様性に起因すると解釈すれば、一部の超新星爆発のみが r プロセスの起源天体ということになる。またその場合は、金属欠乏星が形成された銀河の進化初期には、星間ガスが一様に混合していなかったことと考えることができる。しかしその一方、鉄族元素(Cr, Mn, Co, Zn 等)と鉄の組成比には、金属量との相関関係に多様性があるながらも分散が小さいことから、星間ガスの非一様性で整合的に解釈できるか議論されていた。

(2) もう一つの候補天体は、中性子星連星の合体である。中性子星合体は、 r プロセスを起こし得る物理条件が整っていると考えられ、有力候補となっている。しかし、中性子星の連星系が形成されてから合体に至るまでの時間が1億年程度と長く、金属欠乏星が誕生した時期ではまだ合体が起こっていないのではないかと議論されていた。

(3) さらに、 r プロセスにも複数の種類があることも示唆されていた。金属欠乏星で、 $[Sr/Ba]$ 比の分散が非常に大きい一方で、 $[Ba/Eu]$ 比はほぼ一定値を示す。これより、Ba や Eu などの重い中性子捕獲元素を合成する主たる r プロセスとは別に、Sr などの比較的軽い元素を合成する「弱 r プロセス」が存在する可能性が議論されていた。

このように、 r プロセスの起源天体の特定には、金属欠乏星の化学組成の多様性の理解が不可欠となっていた。そのためには、銀河の形成過程を考慮した化学進化の研究が必要なのである。

2. 研究の目的

本研究は、銀河の形成過程を考慮した化学進

化モデルを用いて、金属欠乏星の化学組成比の多様性を手がかりに、鉄より重い元素の起源を明らかにすることを目指している。そのために、この研究では以下の事項について議論することを目的とした。

(1) r プロセスの起源は重力崩壊型超新星爆発なのか：超新星爆発に起因して星形成が起こると考えれば、金属欠乏星の化学組成はその星形成を誘因した超新星の生成物を反映するはずである。このような化学進化モデルを用いて、 r プロセスの起源に超新星爆発を仮定した場合を検討する。

(2) r プロセスの起源は中性子連星の合体なのか：中性子星合体は元素合成理論からは最有力候補とされながらも、合体に要する時間が長過ぎることが観測と矛盾すると考えられてきた。しかし、 Λ CDM 宇宙論にしたがって、我々の銀河系ハローがサブハローの衝突・合体から形成されたならば、この問題を解決できる可能性がある。異なる星形成史のサブハローの集合としてハローが進化するモデルを用いて、中性子星合体が r プロセスの起源になりうるかを検討する。

(3) 鉄族元素の起源： r プロセス元素と異なり、鉄族元素の組成比の分散は小さい。統一的なモデルで、 r プロセス元素と鉄族元素の起源を説明することは不可欠であるが、その可能性を検討する。

(4) r プロセスに多様性はあるのか： r プロセス元素によって化学組成比の振る舞いが異なることは、起源に多様性があることを示唆している。化学進化モデルに様々な起源を仮定することで、Sr, Ba, Eu の起源の違いを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 非一様化学進化モデルの構築：星形成が超新星爆発に起因して起こるという仮定に基づいた化学進化モデルを構築する。 r プロセスの起源が超新星爆発であった場合について、その起源天体に様々な質量の星を仮定する。計算結果から得られる星の化学組成比分布と、金属欠乏星の観測値との比較・検討し、可能性のある質量範囲を絞り込む。その一方、同じモデルを用いて、鉄族元素の化学組成比も同時に説明が可能かを検討する。

(2) サブハローの衝突・合体によるハローの進化モデルの構築：サブハローの化学進化モデルを積算し、銀河系ハローへと成長する進化モデルを構築する。矮小銀河に見られる質量-金属量関係の観測値を手がかりに、サブハローの質量による星形成史の違いを仮定し、それらから銀河系ハローが形成された場合、金属欠乏星の化学組成の分布が説明され

るかを検討する。

(3) 高分散分光観測による金属欠乏星の r プロセス元素組成比：すばる HDS を用いた金属欠乏星の化学組成比の測定値をもとに、弱 r プロセスの元素合成について検討する。

4. 研究成果

(1) 重力崩壊型超新星爆発と r プロセス：金属欠乏星の化学組成比の分散が、星間ガスの非一様性に起因すると仮定した場合の化学進化モデルを用いて、 r プロセス元素の起源となり得る天体の質量を検討した。

r プロセスの起源が大質量星である場合：銀河の化学進化において、他の元素に先んじて r プロセスが作られ始めるため、最も金属量の低い星 ($[Fe/H] < -3$) で $[Ba/Fe]$ が過剰な星が予測される。しかし、Ba の観測値は、むしろ $[Fe/H] < -3$ で $[Ba/Fe]$ が下がる傾向を示しており、大質量星が r プロセスの起源として適当ではないことが示唆された。一方、研究期間内に元素合成理論からも、大質量星のニュートリノ加熱による超新星爆発では、 r プロセスを起こすことが非常に困難であることが指摘され、化学進化から得られる結果が支持された。

r プロセスを起こす星の質量が超新星爆発を起こし得る下限である場合：銀河の化学進化において、Ba, Eu が鉄よりも遅れて合成されるならば、金属欠乏星の Ba, Eu の観測値をよく説明できることが示された。その一方、元素合成理論によって、比較的低質量星の起こす電子捕獲超新星爆発では、鉄より重い元素を合成できる可能性が示されたが、その場合でも Sr 程度の質量の元素に留まると指摘された。すなわち、Ba, Eu の起源として超新星爆発は適当ではないが、少なくとも鉄より遅れて合成されることが結論づけられる。これは、以下で述べるように、中性子星連星の合体が r プロセスの起源であった場合と合致する。

(2) 中性子星連星の合体と r プロセス：中性子星連星が合体を起こすには、従来 1 億～10 億年程度という長い時間を要すると考えられてきた。この時間尺度では、金属欠乏星が誕生する時期には Ba や Eu がほとんど作られないかもしれないと考えられていた。しかし、サブハローの衝突・合体によって銀河系ハローが形成されたと考えれば、ハローの星は様々な星形成史の銀河の集合である。特に、サブハローと同様に低光度の矮小銀河には、質量-金属量関係が見られるが、これより金属の生成効率がサブハローの質量に依存することが示唆される。この観測的關係を説明できる仮説として、以下 1 2 の

二つの場合が考えられる。これらの仮説に基づくサブハロー進化モデルを用いて、 r プロセスの起源と共に銀河の形成史について以下で述べる結果を得た。

サブハローの星形成効率が銀河質量と相關する場合：低質量のサブハローほど星形成率が低ければ、より低い金属量で中性子星の合体が始まる。したがって、これらが集合すれば、 $[Fe/H] = -3$ 程度で見られる Ba, Eu の化学組成比の分散が説明できる。

サブハローからのガス放出率が銀河質量の逆相關する場合：低質量のサブハローほど高い効率で星間ガスのアウトフローを起こす場合、中性子星の合体が起こると、銀河全体の r プロセスの組成比が極度に上がる。このようなサブハローによって、金属欠乏星に見られる Ba, Eu の過剰が説明可能である。

これらより、以下の結論が得られる。

r プロセスの起源として中性子星連星の合体は最有力候補となり得る：本研究により、これまで指摘されていた金属欠乏星との矛盾は解消される。一方、元素合成理論からも、中性子星合体によって太陽の r プロセスの化学組成が良く説明できることが示され (Wanajo+ 2013)、本研究結果によって強く支持されることになった。

中性子星合体の時間尺度との関連：星形成率の低いサブハローが集積したならば、中性子星合体の時間尺度が 1 億年程度であっても、金属欠乏星に見られる分散は十分説明される。一方、近年の中性子星連星の種族合成モデルからは、一部の連星系では 1 万年程度の短い時間尺度での合体も起こりえることが示唆された (Dominik+ 2013)。短い時間尺度での中性子星合体も考慮に入れることによって、 $[Ba/Fe]$ の観測値が $[Fe/H] < -3$ で低くなることも自然に説明できることが示された。

(3) 電子捕獲超新星爆発と鉄族元素：金属欠乏星の鉄族元素の組成比 $[Cr, Mn, Co, Zn/Fe]$ と金属量には、元素によって異なる相関関係が見られる。また、その分散は r プロセスとは対照的に非常に小さい。近年、これらの鉄族元素が、太陽質量の 10 倍程度の星の電子捕獲超新星爆発で作られることが示された (Wanajo+ 2011, 2013)。この元素合成のデータを、本研究で構築した非一様化学進化モデルに組み込み、金属欠乏星の組成比の分布を予測した。その結果、金属欠乏星に見られる鉄族元素の特色が良く説明できることが示された。これは、 r プロセスと鉄族元素の傾向の違いを、統一的なモデルで説明できることを意味する。特に電子捕獲超新星では、Zn などの鉄族元素と共に、Sr などの

比較的軽い中性子捕獲元素も合成されることが示唆されており、弱 r プロセスの起源である可能性が考えられる。その場合、中性子星合体で作られる Ba, Eu に先んじて Sr が合成されることになるが、これは観測的傾向に合致する。

(4) 弱 r プロセスの元素合成の多様性：
金属欠乏星 CS22892-052 は、Eu が極めて過剰であり、その化学組成比が太陽の r プロセスの組成比と一致す、(主たる) r プロセスの生成物を多く含む星であることが知られている。これに対し、金属欠乏星 HD122563 は、Sr が過剰であるが、Ba, Eu が相対的に少なく、弱 r プロセスの生成物を多く含む星と考えられている。r プロセスがこの 2 種に分けられるかを検討するため、すばる望遠鏡 HDS によって取得した 5 つの金属欠乏星の観測データを解析した。これらはすべて、[Sr/Ba] の値が、中間的なものである。その結果、2 つの星については、CS22892-052 と HD122563 の組成の混合で説明できることが示された。しかし、残りの 3 つの星については、単純に二つの元素合成パターンの混合では説明が難しく、弱 r プロセスにも元素合成の多様性がある可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

石丸 友里, 「銀河の化学進化が物語る r プロセス元素の起源」, 天文月報 (日本天文学会), 査読無, 2014 年, 第 107 巻 第 2 号, pp. 96-106

Ishimaru, Y., Wanajo, S., & Prantzos, N., "Compact binary mergers as the origin of r-process elements in the Galactic halo", AIP Conference Proceedings in: ORIGIN OF MATTER AND EVOLUTION OF GALAXIES 2013 (ed. S. Jeong, N. Imai, H. Miyatake & T. Kajino), 査読有, 2014, Vol. 1594, 46; <http://dx.doi.org/10.1063/1.4874043>

Aoki, M., Aoki, W., Ishimaru, Y., & Wanajo, S., "Diversity of abundance patterns of neutron-capture elements in very metal-poor stars", AIP Conference Proceedings in: ORIGIN OF MATTER AND EVOLUTION OF GALAXIES 2013 (ed. S. Jeong, N. Imai, H. Miyatake & T. Kajino), 査読有, 2014, Vol. 1594, 123; <http://dx.doi.org/10.1063/1.4874056>

François, P., Wanajo, S., Prantzos, N., James, G., Ishimaru, Y., Aoki, W., & Honda, S., "Constraints on the weak

r-process: Abundance of Palladium in metal poor stars", 査読有, 2010, Proceedings of the 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos, PoS(NIC XI)264 (4pp), http://pos.sissa.it/archive/conferences/100/264/NIC%20XI_264.pdf

Ishimaru, Y., Wanajo, S., "Galactic Chemical Evolution and Origin of r-Process Elements", 査読無, 2009, American Physical Society, 3rd Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, October 13-17, 2009, abstract #CG.008

[学会発表](計 18 件)

石丸友里, 和南城伸也, N. Prantzos., 「中性子星合体は r プロセスの起源か: 階層的構造形成論に基づく化学進化にみる」, 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 3 月 19 日~22 日, 国際基督教大学 (東京都三鷹市)

青木みさ, 石丸友里, 青木和光, 和南城伸也, 「金属欠乏星の中性子捕獲元素組成の解析」, 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 3 月 19 日~22 日, 国際基督教大学 (東京都三鷹市)

荒尾幸絵, 石丸友里, 和南城伸也, 「三次元非一様化学進化モデルと鉄より重い元素の起源」, 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 3 月 19 日~22 日, 国際基督教大学 (東京都三鷹市)

深川奈桜, 石丸友里, 「矮小銀河の形態による化学進化の違い」, 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 3 月 19 日~22 日, 国際基督教大学 (東京都三鷹市)

Ishimaru, Y., Wanajo, S., Prantzos, N., "Origins of light trans-Fe and r-process elements deduced from chemical evolution of the Galactic halo", The 12th international symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG12), 2013/11/18-22, Tsukuba, Japan

Aoki, M., Aoki, W., Wanajo, S., Ishimaru, Y., "Diversity of abundance patterns of neutron-capture elements in very metal-poor stars", The 12th international symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG12), 2013/11/18-22, Tsukuba, Japan

石丸友里, 和南城伸也, N. Prantzos., 「中性子星合体は r プロセスの起源か: 銀河系の化学進化にみる」, 日本天文学会 2013 年秋季年会, 2013 年 9 月 10 日~12 日, 東北大学 (宮城県仙台市)

荒尾幸絵, 石丸友里, 和南城伸也, 「三次元非一様化学進化モデルの構築と亜鉛の起源」, 日本天文学会 2013 年秋季年会, 2013 年 9 月 10 日~12 日, 東北大学 (宮城県仙台市)

Ishimaru, Y., Wanajo, S., Prantzos, N., “Chemical evolution of the Galaxy and origin of r-process”, 第 1 回国立天文台・滞在型研究員 (セミナー実施型) 国際集会: 「元素の起源と宇宙の化学進化 r プロセスに焦点をあてて」/ Element Genesis and Cosmic Chemical Evolution (招待講演), 2012 年 10 月 17 日~19 日, 理化学研究所 (埼玉県和光市)

石丸友里, 和南城伸也, N. Prantzos., 「階層的銀河系形成説による r プロセス元素の非一様化学進化」, 日本天文学会 2012 年秋季年会, 2012 年 9 月 19 日~21 日, 大分大学旦野原キャンパス (大分市)

Ishimaru, Y., Wanajo, S., & Prantzos, N., “Evolution of r-process elements in the framework of the hierarchical formation of the Milky Way”, IAP-Subaru Joint International Conference: Stellar populations across Cosmic Times (招待講演), 2012/06/25-29, Institut d'Astrophysique de Paris, Paris, France

Ishimaru, Y., Wanajo, S., & Prantzos, N., “Enrichment of r-process elements in the early Galaxy”, 9th Russbach Workshop on Nuclear Astrophysics, 2012/03/12-16, Russbach, Austria

石丸友里, 和南城伸也, N. Prantzos, 「階層的構造形成に基づく銀河系化学進化と r プロセス元素の起源」, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 2011 年 9 月 19 日~22 日, 鹿児島大学 (鹿児島市)

石丸友里, 和南城伸也, N. Prantzos, 「階層的銀河形成に基づく r プロセス元素の起源」, 研究会「恒星進化・星形成から探る銀河の形成・進化の研究 - 宇宙最初の星から太陽系形成まで」, 2011 年 3 月 2 日~4 日, 北海道大学 (札幌市)

Ishimaru, Y., Wanajo, S., & Prantzos, N., “Enrichment of the r-process

elements in the sub-halos as building blocks of the Milky Way halo”, 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC XI), 2010/07/19-23, Heidelberg, Germany

François, P., Wanajo, S., Prantzos, N., James, G., Ishimaru, Y., Aoki, W., & Honda, S., “Constraints on the weak r-process: Abundance of Palladium in metal poor stars”, 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC XI), 2010/07/19-23, Heidelberg, Germany

Ishimaru, Y., Wanajo, S., & Prantzos, N., “Galactic chemical evolution and origin of r-process elements”, 15th Workshop on “Nuclear Astrophysics”, 2010/03/22-27, Ringberg Castle (Kreuth, Germany)

Ishimaru, Y., & Wanajo, S., “Galactic Chemical Evolution and Origin of r-Process Elements”, 3rd Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, 2009/10/13-17, Waikoloa, Hawaii, USA

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石丸 友里 (ISHIMARU, Yuhri)

国際基督教大学・教養学部・准教授

研究者番号: 90397068

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし