

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05033

研究課題名(和文) 銀河進化と元素合成の統合的理解に根差したr過程元素の中性子星合体起源説の全貌解明

研究課題名(英文) Unraveling the hypothesis that a neutron star merger is the origin of r-process elements, based on the understanding of galaxy evolution and nucleosynthesis

研究代表者

辻本 拓司 (Tsujimoto, Takuji)

国立天文台・光赤外研究部・助教

研究者番号：10270456

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：金やプラチナに代表される中性子を素早く捕獲して形成されるr過程元素の天体物理学的起源については、未だ同定できていない。2017年の夏、連星系にある2つの中性子星の合体がその起源であるという極めて有力な手掛かりを我々は掴むこととなったが、まだ断定できる状況には程遠い。さらに、中性子星合体が唯一の起源であることに対し、複数の観測事実が疑問を呈している。本研究は星の化学組成という独自の視点からr過程元素の起源に迫ろうとするものであり、我々は中性子星合体が支持されること、しかし一方で銀河形成初期では特殊な超新星(磁気駆動型超新星)が出現していたことを突き止めた。

研究成果の概要(英文)：The astrophysical origin of elements formed through rapid neutron-capture process, so-called r-process, such as gold and platinum has not been identified yet. Last summer in 2017, we have caught the compelling signature of binary neutron star mergers as the site of r-process. However, we have only one sample and some observational results challenge the claim that a neutron star merger is the sole site of r-process. In this study, we have assessed this issue from the unique approach using stellar abundances as the diagnosis of r-process origin. We eventually got to the conclusion that stellar abundances in nearby dwarf galaxies support neutron star mergers as the r-process site but require specific supernovae -magnetorotational supernovae- at the early stage of galaxy evolution.

研究分野：天文学

キーワード：r過程元素 中性子星合体 元素合成 銀河化学進化 磁気駆動型超新星 矮小銀河

1. 研究開始当初の背景

(1) 鉄より重い元素は、種となる鉄などの元素に中性子が次から次へと照射・捕獲されることによって合成されることから中性子捕獲元素と呼ばれ、なかでも中性子の密度が極端に高い状況で作られる元素は r 過程元素と呼ばれる。ところが、この過程を実現するほどの中性子が大量に存在する極限状態とも言える物理環境が一体宇宙のどこで実現されているのかがこれまで特定できていなかった。有力な天体物理サイトは昔から 2 つに絞られている。大質量星の大爆発である超新星がその第 1 候補である。ところが、これまでの理論的な数値計算によって、超新星では中性子の多くがニュートリノによって陽子に変えられることから、r 過程元素を作り出すのに十分なだけの中性子が存在する環境を実現できないことが明らかになった。一方、もう一つの候補は連星系にある中性子星同士の合体である。この合体は非常に稀な現象で、その合体の際に r 過程元素が大量に作り出されることが予言される一方で、それ以外の元素はほとんど作り出されない。そのため、中性子星合体による元素汚染の影響を受けたガスから生まれる星は、r 過程元素のみを極端に過剰に含んだ星になることが予想されその存在が予言されていた。ところが、銀河系のどこを探してもそのような元素組成を持った星は見つかっていない。これが中性子星合体説にとっては致命的な問題だと考えられていたのである。

(2) 大きな転機となる発見が 2013 年にもたらされた。ショートガンマ線バースト GRB 130603B の残光の中に近赤外線での増光が検出されたのである。ショート GRB は中性子星同士の合体が起源とされ、その際に合成される大量の r 過程元素による放射性崩壊エネルギーによって明るく輝くことが理論的に予言されていた。理論予測によれば、ほぼ r 過程元素のみから構成される合体からの放出物質中の吸収係数が極めて高いため、可視光ではなく近赤外線が増光されるはずであり、まさにガンマ線バーストの発見から 9 日目にして近赤外線での増光が確認されたのである。これにて、中性子星合体により r 過程元素が合成されたという極めて有力な証拠を我々は捉えたことになった。

2. 研究の目的

r 過程元素の中性子星合体起源説の全貌解明を、銀河進化の理論考察と観測からの知見に、超新星を含めた元素合成計算結果を融合させ、それを実現することにあつた。そのために、(1)高精度の中性子星合体および磁気駆動型超新星における元素合成計算、そして(2)矮小銀河の超低金属量星に焦点を充てた高分散の r 過程元素組成観測、を実行することを主な目的とした。本研究成果は、長年の未解決問題である r 過程元素の起源天体の同定、

そしてまた r 過程元素を駆使した銀河系および矮小銀河への銀河進化モデル構築の展開を生み出すに留まらず、中性子星合体頻度の正確な導出も可能にするため、来る重力波天文学へも重要な寄与をもたらす先駆的な研究になることを目指した。さらに、天文学と隕石学の融合の実現も目的に加えることとなった。

3. 研究の方法

(1) 銀河進化の理論考察に、超新星を含めた元素合成計算結果を融合させる。そのために r 過程元素を駆使した矮小銀河への銀河進化モデル構築と高精度の磁気駆動型超新星における元素合成計算(図 1 参照)を実行する。以上の成果を踏まえることで、長年の未解決問題である r 過程元素の宇宙初期の起源天体の同定を行い、r 過程元素中性子星合体説の最大の弱点である「r 過程元素早期出現の謎」の解明に大きく前進する。

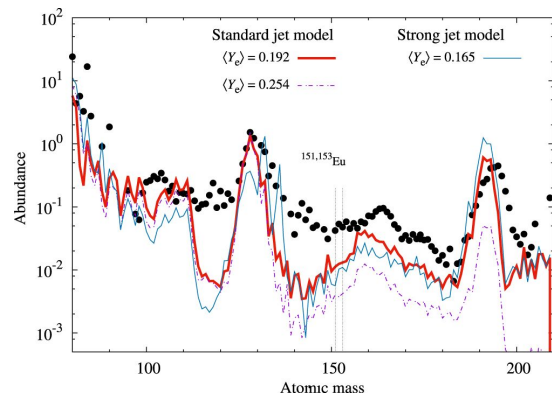


図 1 磁気駆動型超新星モデルで予言される r 過程元素の合成パターンの計算の一例(研究協力者西村氏による)。

(2) 矮小銀河における中性子星合体説の検証を行う。この検証には銀河系よりも矮小銀河が極めて有効である。これは、矮小銀河では稀な現象である中性子星合体が 1 度もあるいは 1 度しか起きていないという状況が実現していると予測できるからである。そして、合体説 vs. 超新星説の検証や中性子星合体の際の元素合成の情報を直接知ることができ、銀河系では決して実現できない独自の研究が遂行できる。そのために、すばるによる観測提案・観測実行・データ解析を遂行する。3 年にわたる本研究期間において、本研究の代表者が PI としてのプロポーザル(連携研究者石垣氏は Co-1)が、すばる観測において 5 本採択されるという快挙を成し遂げた。以下に題目を列挙する。

1. S15A-089: First Eu detection in Sextans to test neutron star mergers as the r-process site
2. S15B-78: Unraveling the Ba feature of the least massive galaxy Segue 2
3. S16A-97: Identifying the r-process site of the Draco dSph galaxy

4.S17B-042: The beginning of r-process enrichment in the Draco dwarf spheroidal galaxy

5.S18A-25: Clocking r-process enrichment in the Sextans dwarf spheroidal galaxy

4. 研究成果

(1) 銀河形成早期には、磁気駆動型超新星のような特殊な超新星が、中性子星合体に代わり、r過程元素を優先的に生み出したというシナリオの提示を行った(図2)。磁気駆動型超新星では星の回転が要となる。早期の低金属量環境では、星の回転が大きくなることが予測されるため、形成初期の優先的な出現を预言した。この仮説を、磁気駆動型超新星の元素合成と低金属量星の化学組成との比較検証や、金属量・磁場といった環境の違いによる頻度率の定量的評価を通して、海外研究協力者であった西村氏とともに徹底検証を行い、r過程元素中性子星合体起源説への一部修正を要請するに至った(引用文献:論文)。

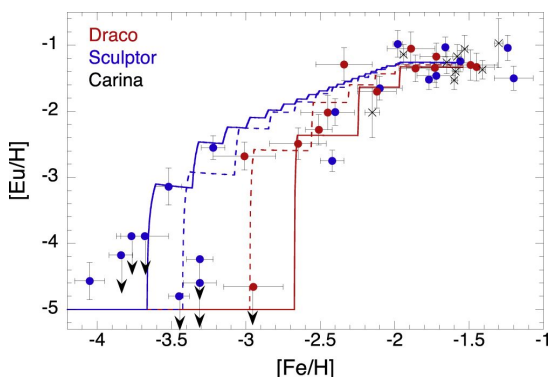


図2 磁気駆動型超新星を銀河進化に取り入れたモデルで预言される矮小銀河でのユーロピウムの進化パスを観測データと比較したもの。

(2) r核種の起源および進化に関するテーマに隕石組成を解釈するという新しい視点を取り入れた研究を実行した。具体的には、隕石から期待される太陽系形成期におけるプルトニウム量、および現在の深海の堆積層から評価された現在におけるプルトニウム量を同時

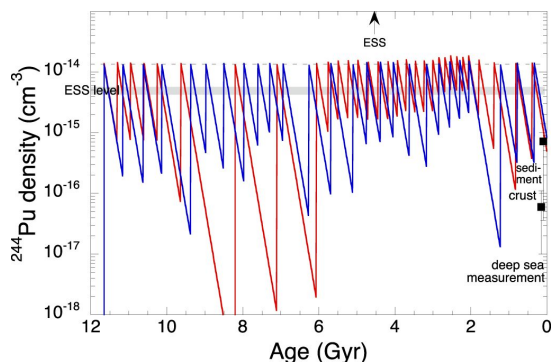


図3 太陽近傍における放射性r過程元素プルトニウムの化学進化の計算結果。2つの線は星形成史の違い。

に説明するためには、r核種が超新星起源ではなく、極めて稀な天体現象である中性子星の合体が起源でなくてはならないことを突き止めた(図3)。本研究は隕石学と天文学の融合を実現した極めて独創的かつ先駆的な研究成果となった(引用文献:論文)。

(3) 矮小銀河Dracoの12個の星についてr過程元素の測定を実行した。その結果、これらの星がr過程元素組成が高いグループと低いグループの2者にはっきりと分かれることを発見した(図4)。これは、r過程元素合成イベントが超新星のように常に起きる現象ではなく、中性子星合体のような散発的かつ稀に起きる現象であることを突き止めたことに対応する。また、r過程元素組成が高いグループを作り出すのに必要なr過程元素合成量が、中性子星合体の放出から期待される量に合致することも明らかにした。さらに、r過程元素組成が低いグループを作り出したr過程イベントでは、合成量が桁で小さい現象であることが示唆されることから、中性子星合体でのr過程元素合成量には多様性が存在する可能性にも言及することができた(引用文献:論文)。

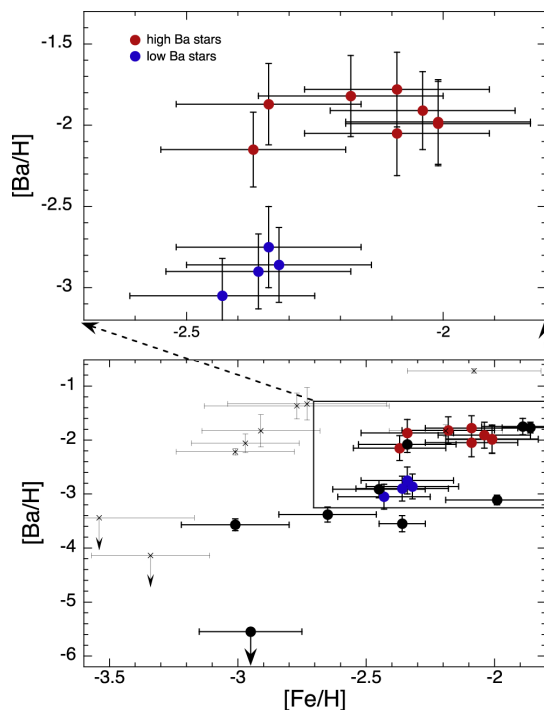


図4 矮小銀河Dracoでのすばる観測によって明らかにされたr過程元素の進化。顕著なr過程イベントが2回起きたことがはっきりとわかる。x印はReticulum IIでの観測データ。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

全て査読あり

Enrichment in r-process elements from multiple distinct events in the early

Draco dwarf spheroidal galaxy, T. Tsujimoto, T. Matsuno, W. Aoki, M. N. Ishigaki, & T. Shigeyama, ApJ Letters, 850, L12 (2017)

DOI: 10.3847/2041-8213/aa9886

Formation of globular clusters with internal abundance spreads in r-process elements: strong evidence for prolonged star formation, K. Bekki & T. Tsujimoto, ApJ, 844, 34 (2017)

DOI: 10.3847/1538-4357/aa77ae

Chemical evolution of ²⁴⁴Pu in the solar vicinity and its implication for the properties of r-process production, T. Tsujimoto, T. Yokoyama, & K. Bekki, ApJ Letters, 835, L3 (2017)

DOI: 10.3847/2041-8213/835/1/L3

Formation of anomalous globular clusters with metallicity spreads: A unified picture, K. Bekki & T. Tsujimoto, ApJ, 831, 70 (2016)

DOI: 10.3847/0004-637X/831/1/70

Line-depth ratios in H-band spectra to determine effective temperature of G- and K-type giants and supergiants, K. Fukue et al. (12 authors; 10th), ApJ, 812, 64 (2015)

DOI: 10.1088/0004-637X/812/1/64

The r-process in magnetorotational supernovae, T. Tsujimoto & N. Nishimura, ApJ Letters, 811, L10 (2015)

DOI: 10.1088/2041-8205/811/1/L10

The origin of dust extinction curves with or without the 2175 Å bump in galaxies: the case of the Magellanic clouds, K. Bekki, H. Hirashita, & T. Tsujimoto, ApJ, 810, 39 (2015)

DOI: 10.1088/0004-637X/810/1/39

Chemical feature of Eu abundance in the Draco dwarf spheroidal galaxy, T. Tsujimoto, M. N. Ishigaki, T. Shigeyama, & W. Aoki, PASJ, 67, L3 (2015)

DOI: 10.1093/pasj/psv035

[学会発表](計 9 件)

T. Tsujimoto, Galactic Archaeology with Planetary Nebula Study, Planetary Nebula Research with Subaru Telescope in the Era of International Partnership (2017)

辻本 拓司, 太陽近傍および矮小銀河におけるr過程元素の起源と進化、天の川銀河研究会 2017 (2017)

T. Tsujimoto, r-process enrichment traced by Pu and Ba near the sun and in the Draco, Observational Signatures of r-process nucleosynthesis in neutron star mergers (2017)

T. Tsujimoto, Origin and evolution of r-nuclides in Local Universe, Goldschmidt (2016)

T. Tsujimoto, r-process enrichment in the Milky Way and nearby dwarf galaxies, The Milky Way and its environment (2016)
辻本 拓司, 短寿命放射性核種²⁴⁴Puの太陽系における化学進化、日本質量分析学会同位体比部会 (2016)

T. Tsujimoto, Observational constraints on r-process site & nucleosynthesis from dwarf galaxies, the Milky Way, and the solar system, The r-process nucleosynthesis: connecting FRIB with the cosmos (2016)

T. Tsujimoto, Chemical footsteps of r-nuclides in satellite galaxies of Local Group, In the Footsteps of galaxies: tracing the evolution of environmental effects (2015)

M. N. Ishigaki, Chemical evolution of r-process elements in Draco dwarf spheroidal galaxies, IAU Symposium "The general assembly of galaxy halos: structure, origin and evolution" (2015)

[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]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻本 拓司 (Tsujimoto, Takuji)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号: 1 0 2 7 0 4 5 6

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

和南城 伸也 (Wanajo Sinya)
上智大学・理工学部・准教授
研究者番号: 3 0 3 2 7 8 7 9

石垣 美歩 (Ishigaki Miho)
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・
研究員
研究者番号: 3 0 5 8 3 6 1 1

(4) 研究協力者

西村 信也 (Nishimura Nobuya)
戸次 賢治 (Bekki Kenji)
Hensler Gerhard