

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05876・19K21057

研究課題名（和文）宇宙論ズームインシミュレーションから探るUFDの形成進化史

研究課題名（英文）Formation and evolution of UFDs in cosmological zoom-in simulations

研究代表者

平居 悠（HIRAI, Yutaka）

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：60824232

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、天の川銀河周囲に存在する矮小銀河の化学動力学進化シミュレーションを行った。中性子捕獲過程で合成される元素の中で比較的軽いストロンチウムに着目し、電子捕獲型超新星爆発、連星中性子星合体、回転大質量星、漸近巨星分枝星の矮小銀河でのストロンチウム汚染に対する影響を明らかにした。これにより、ストロンチウムに富んだ星は、電子捕獲型超新星爆発の放出物から形成された可能性が高いことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

元素が宇宙のどこで合成されたのか、という問題は、天文学における長年の課題である。私たちが形作る元素の起源天体を理解することは、生命の起源を探ることに繋がる。特に鉄より重い元素の起源天体は未だ謎である。本研究では、銀河進化の観点から、重元素の起源天体を制限した。これにより、天の川銀河とその周辺に存在する矮小銀河の星の元素組成の観測から、重元素が銀河内でいつ・どこで合成されたのかを辿ることが可能になる。

研究成果の概要（英文）：This study performed a series of simulations of the chemo-dynamical evolution of dwarf galaxies around the Milky Way. In this study, we have focused on the enrichment of strontium, which is relatively light elements synthesized by the neutron-capture process. We have refined the effects of electron-capture supernovae, binary neutron star mergers, rotating massive stars, and asymptotic giant branch stars on the enrichment of strontium. Through this study, we have shown that stars enhanced in abundances of strontium are possibly formed from the ejecta of electron-capture supernovae.

研究分野：銀河進化

キーワード：矮小銀河 銀河形成 銀河進化 化学進化 元素合成 rプロセス sプロセス 数値シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、天の川銀河周囲の天体についての観測が広く行われている。これにより、天の川銀河周囲に多くの非常に暗い矮小銀河 (UFD) が見つかった (Simon ARA&A 2019; Homma et al. PASJ 2019 など)。これらの天体は、年齢が 100 億歳以上の古い星を多く持ち、銀河形成初期を理解する鍵となる。

矮小銀河中に存在する星の元素組成の観測も進んでいる。特に中性子捕獲過程で合成される鉄より重い元素 (中性子捕獲元素) の観測の進展は目覚ましい。2016 年には、レクチル座 II 矮小銀河でバリウムやユーロピウムなどの中性子捕獲元素に富んだ星が発見された (Ji et al. Nature 2016; Roederer et al. AJ 2016)。また、矮小銀河の星の中には、ストロンチウムやイットリウムなど、比較的軽い中性子捕獲元素のみ富んでいるものも見つかった (François et al. A&A 2016)。しかし、これらの元素が銀河進化史の中でいつ合成され、どのように拡散してきたのかは未だ明らかではない。

2. 研究の目的

本研究では、矮小銀河の形成進化史を明らかにし、重元素の起源を制限することを目的とする。そのために、高分解能な矮小銀河進化シミュレーションを実施する。これと観測された矮小銀河の元素組成を比較することで、重元素の起源天体を明らかにすることができる。

3. 研究の方法

本研究では、矮小銀河の重力/流体シミュレーションを実施した。数値計算コードは、 N 体/smoothed particle hydrodynamics (SPH)コード、ASURA (Saitoh et al. PASJ, 2008; 2009) を用いた。本コードには、銀河進化を計算するために加熱/冷却関数、星形成、超新星爆発による加熱過程、元素の拡散モデル (Hirai & Saitoh ApJL 2017) が実装されている。元素の起源天体としては、鉄コア重力崩壊型超新星爆発 (Nomoto et al. ARA&A 2013)、電子捕獲型超新星爆発 (Wanajo et al. ApJ 2018)、回転大質量星 (Limongi & Chieffi ApJS 2018)、連星中性子星合体 (Wanajo et al. ApJL 2014)、漸近巨星分枝星 (Cristallo et al. ApJS 2011; 2015)、Ia 型超新星爆発 (Seitzzahl et al. MNRAS 2013) を仮定した。これらの天体のモデルは化学進化ライブラリ (Saitoh AJ 2017) を用いて実装した。銀河モデルは、全質量 7×10^8 太陽質量、最終的な星質量が 3×10^6 太陽質量となる矮小銀河モデルを選択した。本研究で用いたモデルは表 1 に示す。尚、本稿で示す全てのモデルで連星中性子星合体と漸近巨星分枝星の寄与を仮定した。

表 1 本研究で用いたモデル

モデル	電子捕獲型超新星爆発質量範囲	回転大質量星
A	なし	なし
B	Doherty et al. (2015)	なし
C	8.2–9.2 太陽質量	なし
D	Doherty et al. (2015)	あり

4. 研究成果

(1) 主な成果

矮小銀河におけるストロンチウム汚染史に対する 4 つの起源天体 (電子捕獲型超新星爆発、連星中性子星合体、回転大質量星、漸近巨星分枝星) の影響を明らかにした。図 1 に、本研究で計算したストロンチウム/鉄比を示す。ここで、 $[\text{Sr}/\text{Fe}]$ とは、星が持つストロンチウム/鉄比と太陽系のストロンチウム/鉄比の対数比を取ったものである。図 1a は、ストロンチウムの起源天体として、連星中性子星合体と漸近巨星分枝星のみを仮定した場合である。図 1a をみると、 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -3$ (鉄の量が太陽組成の千分の一程度) で $[\text{Sr}/\text{Fe}]$ 量が大きく増加していることがわかる。これは、連星中性子星合体の寄与によるものである。連星中性子星合体では、 r プロセスと呼ばれる元素合成過程により、多くのストロンチウムを合成するため、1 回のイベントでストロンチウム量を大きく増加させる。

漸近巨星分枝星は、元素合成量に強い金属量依存性があるため、その影響は $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.5$ 程度から現れ、 $[\text{Sr}/\text{Fe}]$ 比を僅かに増加させる。しかし、天の川銀河の $[\text{Sr}/\text{Fe}]$ の平均値と比較すると、1 桁程度低くなっている。これより、連星中性子星合体と漸近巨星分枝星のみでは、ストロンチウムの総量を説明できないといえる。

漸近巨星分枝星の影響はバリウム/ユーロピウム比 ($[\text{Ba}/\text{Eu}]$) をみると明確に見て取れる。図 2 は、モデル A の $[\text{Ba}/\text{Eu}]$ と $[\text{Fe}/\text{H}]$ の関係である。この図をみると、 $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.5$ から $[\text{Ba}/\text{Eu}]$ が増加していることがわかる。漸近巨星分枝星は、 s プロセスと呼ばれる元素合成過程で重元素を合成する。バリウムは、主に s プロセスで合成される一方、ユーロピウムは 90% 以上が r プロセスで合成される。漸近巨星分枝星が元素を放出すると、 s プロセスの効果が大きくなり、 $[\text{Ba}/\text{Eu}]$ が増加する。 $[\text{Fe}/\text{H}] = -4$ 程度にみられる $[\text{Ba}/\text{Eu}] > 2$ 程度の星も漸近巨星分枝星であるが、これらの星のバリウム、ユーロピウム量は非常に少ない ($[\text{Ba}/\text{H}] < -6$, $[\text{Eu}/\text{H}] < -4$) ため、

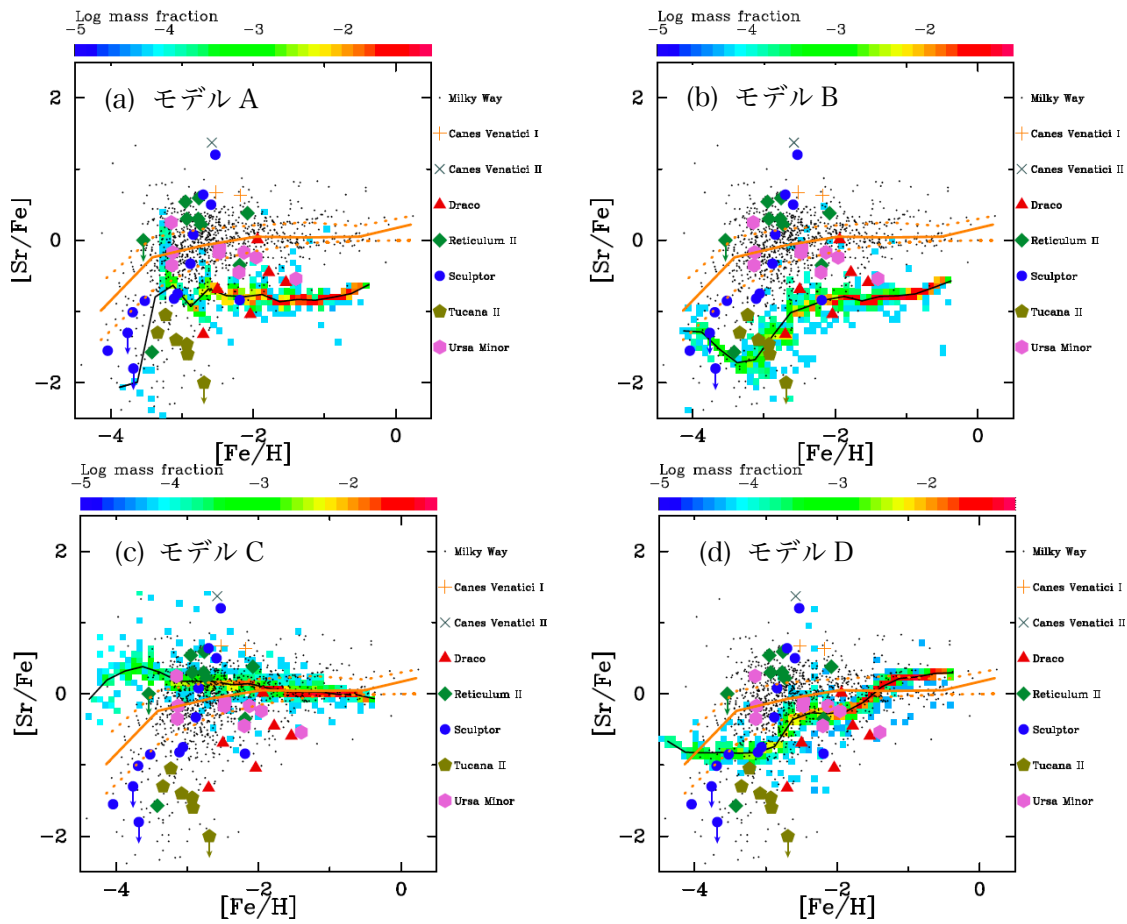


図 1. [Sr/Fe]と[Fe/H]の関係 (Hirai et al. ApJ 2019, Figure 3)。カースケールは計算値 (a: モデル A, b: モデル B, c: モデル C, d: モデル D)。黒実線はモデルの平均値。オレンジ実線と点線はそれぞれ天の川銀河の観測の平均値と分散。黒点、色点はそれぞれ天の川銀河と矮小銀河の観測値 (個々の銀河名は凡例参照)。

観測することは難しい。

電子捕獲型超新星爆発は、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ からストロンチウムを放出する (図 1b, c)。電子捕獲型超新星爆発は、超新星爆発を起こす星の中で最も軽い星 (太陽質量の 8-10 倍程度) が起こす超新星爆発である。本研究では、電子捕獲型超新星爆発を起こす超新星爆発の不定性の影響を明らかにするため、恒星進化計算により得られた金属量依存の質量範囲 ($[\text{Fe}/\text{H}] = -3$ で 8.2-8.4 太陽質量、モデル B)、質量範囲一定 (8.2-9.2 太陽質量、モデル C) で計算した。図 1b, 1c をみると、電子捕獲型超新星爆発により、 $[\text{Fe}/\text{H}] = -4$ 程度にもストロンチウムを持つ星が形成されていることがわかる。また、質量範囲を大きくすると、 $[\text{Sr}/\text{Fe}]$ の平均値が増加しており、 $[\text{Sr}/\text{Fe}]$ 比は、電子捕獲型超新星爆発の質量範囲に強く依存することが明らかになった。

りょうけん座 II 矮小銀河などでみられる $[\text{Sr}/\text{Ba}]$ 比の高い星は、電子捕獲型超新星爆発由来の放出物で説明できる。図 3a は、モデル B の $[\text{Sr}/\text{Ba}]$ と $[\text{Fe}/\text{H}]$ の計算値である。この図をみると、電子捕獲型超新星爆発が寄与を始める、

$[\text{Fe}/\text{H}] = -4$ 程度から $[\text{Sr}/\text{Ba}] > 1$ と、ストロンチウムに富み、より重いバリウムが欠乏している星が形成していることがわかる。電子捕獲型超新星爆発は、ストロンチウムなどの質量数 90 程度の元素を多く合成するが、バリウムなどの質量数が 110 を超すような元素は合成できない (Wanajo et al. ApJ 2018)。このような元素合成の特徴を持ち、かつ低金属量から寄与することができるため、高い $[\text{Sr}/\text{Ba}]$ 比を持つ星は、電子捕獲型超新星爆発の放出物から形成された可能性が高い。

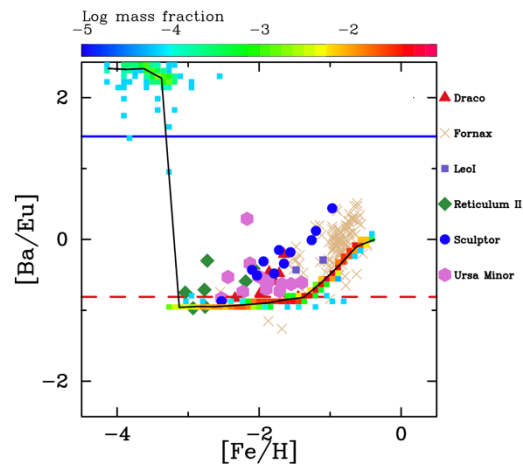


図 2. $[\text{Ba}/\text{Eu}]$ と $[\text{Fe}/\text{H}]$ の関係 (Hirai et al. ApJ 2019, Figure 7a)。赤破線、青実線はそれぞれ太陽系組成から推定した r プロセスのみ、s プロセスのみの場合の $[\text{Ba}/\text{Eu}]$ 比。他は図 1 と同様。

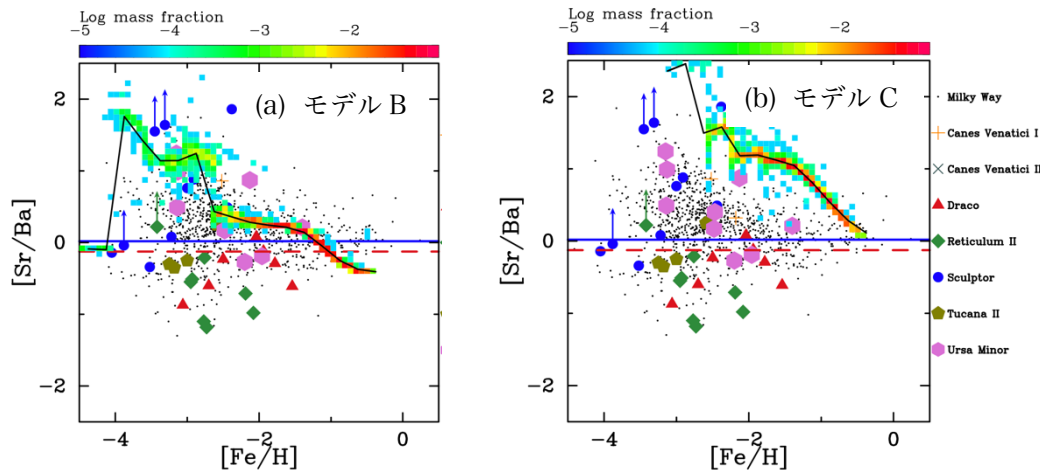


図3. [Sr/Ba]と[Fe/H]の関係 (a: モデル B, b: モデル C, Hirai et al. ApJ 2019, Figure 8b, 8c)。他は図2と同様。

回転大質量星も[Fe/H] < -3 の超金属欠乏星でのストロンチウム汚染に寄与している可能性がある。図1dに、モデルB(図1b)に回転大質量星のモデルを加えた場合の[Sr/Fe]と[Fe/H]の関係を示す。ここでは、大質量星の回転速度を150 km s⁻¹と仮定した。モデルB(図1b)では、天の川銀河における[Sr/Fe]比の平均値を説明できていない。一方、回転大質量星の効果を入れると、[Sr/Fe]の量が増加し、天の川銀河の[Sr/Fe]を説明できるようになる(図1d)。電子捕獲型超新星爆発の質量範囲を増加させることでも天の川銀河における[Sr/Fe]の平均値を説明できるが、この場合は、[Sr/Ba]比が観測と比較すると過剰になってしまう(図3b)。したがって、[Fe/H] < -3 では、電子捕獲型超新星爆発のみではなく、回転大質量星の寄与もあることが示唆される。

本研究では、ストロンチウムの汚染史に着目し、矮小銀河の高分解能な化学動力学進化シミュレーションを行った。新たに漸近巨星分枝星、連星中性子星合体、電子捕獲型超新星爆発、回転大質量星のモデルをシミュレーションに導入した。これにより、漸近巨星分枝星と連星中性子星合体のみでは[Sr/Fe]比の観測値を説明できず、低金属量側では電子捕獲型超新星爆発と回転大質量星がストロンチウム汚染に寄与している必要があることが明らかになった。当初の研究計画では、低い金属量においては、連星中性子星合体と電子捕獲型超新星爆発などの天体のみで観測値を説明できることを予期していた。しかし、本研究により、回転大質量星や漸近巨星分枝星など、sプロセスを起こす天体の寄与も重要な役割を担っている可能性を示すことができた。

(2) 国内外における位置づけとインパクト

これまで銀河における重元素の汚染史に着目した研究は、元素が放出後銀河全体に均様に混ざると仮定したシンプルな化学進化モデルがほとんどであった(Travaglio et al. A&A 2004; Prantzos et al. MNRAS 2018 など)。こうしたモデルでは、ストロンチウムのような、星ごとに元素量にばらつきがある観測と直接比較することができなかった。天の川銀河に着目したシミュレーションは行われているが、元素はユーロピウムに限られていた(Haynes & Kobayashi MNRAS 2019; van de Voort et al. MNRAS 2020 など)。また、これらのシミュレーションでは、本課題で対象とするような矮小銀河を分解することはできなかった。

本研究では、世界で初めて矮小銀河の化学動力学進化シミュレーションを用いて重元素の汚染史を計算した。これにより、銀河進化の中で、異なる時間スケール、元素合成過程で放出された重元素が次世代星の元素組成にどのように反映されるのかを辿ることができるようになった。本研究により、電子捕獲型超新星爆発の質量範囲や回転大質量星の重要性が示され、恒星進化研究に対するインパクトも大きい。

(3) 今後の展望

本研究では、矮小銀河における重元素汚染史を明らかにすることができた。しかし、本研究では、1つの矮小銀河モデルのみでしかシミュレーションを実行できなかった。近年の観測により、重元素分布は、銀河ごとに異なる傾向を有していることが示唆されている。今後は、異なる初期条件を用いて重元素の汚染史を計算することにより、銀河進化史と重元素組成の関係を明らかにすることが必要である。

本研究で構築したモデルは、天の川銀河の研究にも適用できる。最近、位置天文観測衛星Gaiaによって、天の川銀河の動力的構造が明らかになってきた。高分散分光観測による天の川銀河の重元素分布の理解も進んできた。天の川銀河の化学動力学構造には、過去の進化史が刻まれている。本研究を天の川銀河に拡張することで、星の重元素組成と動力的特性から、天の川銀河進化史解明に迫ることができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hirai Yutaka, Wanajo Shinya, Saitoh Takayuki R.	4. 巻 885
2. 論文標題 Enrichment of Strontium in Dwarf Galaxies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 33 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab4654	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hirai Yutaka, Saitoh Takayuki R., Wanajo Shinya, Fujii Michiko S.	4. 巻 14
2. 論文標題 Enrichment of Heavy Elements in Chemo-Dynamical Simulations of Dwarf Galaxies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Astronomical Union	6. 最初と最後の頁 197 ~ 200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1743921318005227	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hirai Yutaka, Wanajo Shinya, Saitoh Takayuki R.	4. 巻 31
2. 論文標題 Enrichment of Heavy Elements in Chemodynamical Evolution of Dwarf Galaxies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.31.011009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Hirai Yutaka
2. 発表標題 Enrichment of Heavy Elements in the Local Group Galaxies
3. 学会等名 Taiwanese Theoretical Astrophysics Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平居 悠
2. 発表標題 r-process元素の起源と進化
3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirai Yutaka
2. 発表標題 Understanding the Enrichment of Heavy Elements by Galactic Chemo-Dynamical Evolution Models
3. 学会等名 Chemical evolution and nucleosynthesis across the Galaxy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirai Yutaka
2. 発表標題 Metal Mixing in Galaxies as a Probe of Understanding Signatures from First Stars
3. 学会等名 Stellar Archaeology as a Time Machine to the First Stars (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平居 悠
2. 発表標題 銀河の化学進化とrプロセス
3. 学会等名 原子核物理でつむぐrプロセス (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平居 悠
2. 発表標題 Prospects for Simulations of Galaxy Formation
3. 学会等名 令和元年度国立天文台天文シミュレーションプロジェクトユーザーズミーティング(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hirai Yutaka, Wanajo Shinya, Saitoh Takayuki R.
2. 発表標題 Enrichment of Heavy Elements in Chemodynamical Evolution Models
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yutaka Hirai	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer Nature	5. 総ページ数 135
3. 書名 Understanding the Enrichment of Heavy Elements by the Chemodynamical Evolution Models of Dwarf Galaxies	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----