

令和 6 年 4 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14532

研究課題名（和文）宇宙論的シミュレーションとGaiaで迫る銀河系形成

研究課題名（英文）Unraveling the Formation of the Milky Way by cosmological simulations and Gaia

研究代表者

平居 悠（Hirai, Yutaka）

東北大学・理学研究科・特任研究員（日本学術振興会特別研究員CPD）

研究者番号：60824232

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高分解能な銀河形成シミュレーションを用いて天の川銀河における鉄より重い元素（rプロセス元素）の形成環境を明らかにした。まず、新たに星形成モデルを構築し、これまで不可能だった個々の星を分解した銀河、星団形成シミュレーションを実現した。続いて、天の川銀河形成シミュレーションを実施し、rプロセス元素に富んだ星の多くは宇宙初期に天の川銀河を構成した矮小銀河で形成されたことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実現した個々の星を分解した銀河形成シミュレーションにより、銀河形成の観点から個々の星の運動、元素放出を追えるようになった。これにより、観測された星の元素組成からその星が形成された環境が理解できるようになる。さらに、rプロセス元素に富んだ星の形成環境を明らかにしたことで、rプロセス元素に富んだ星の元素組成、動力学的性質から、天の川銀河の宇宙初期での形成史を辿れる可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：This project clarified the formation environments of stars enhanced in the elements heavier than iron (r-process elements) in the Milky Way with high-resolution galaxy formation simulations. Firstly, we developed a new star formation model and realized galaxy and star cluster formation simulations, which can resolve individual stars. We then performed a Milky Way formation simulation and showed that most r-process enhanced stars were formed in dwarf galaxies accreted later to the Milky Way in the early Universe.

研究分野：天文学

キーワード：銀河考古学 銀河形成 天の川銀河 矮小銀河 化学進化 元素合成 r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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

銀河の形成進化史を解き明かすことは、現代天文学の最重要課題の一つである。138 億年前に宇宙が誕生してから現在まで、星の進化に伴って元素が放出され、それらを取り込んで銀河が衝突・合体を繰り返しながら成長してきた。天の川銀河では、個々の星の化学動力的な情報を得ることができる。したがって、天の川銀河の形成進化史を明らかにすることは、宇宙の進化史を解き明かす鍵となる。

天の川銀河ハローでは、5%程度の星がユーロピウムなどの r プロセス元素に富んでいることが知られている。位置天文衛星 Gaia の観測により、こうした星は天の川銀河円盤星とは異なる軌道を持っており、(1)矮小銀河サイズのハローで形成され、後に天の川銀河ハローに降着した、(2)天の川銀河メインハロー内部で形成された、(3)天の川銀河円盤かバルジで形成され、ハローに放出された、という3つの可能性が示唆されていた (Roederer et al. 2018)。

階層的構造形成モデルによると、銀河はより小さい構造の合体・降着により成長したと考えられている。近年のサーベイ観測により、天の川銀河を含む局所銀河群において多くの非常に暗い矮小銀河 (Ultra-Faint Dwarfs, UFD) が発見された。UFD は天の川銀河の構成要素の生き残りの可能性があり、天の川銀河の形成進化史の理解には、天の川銀河スケールから UFD までを分解したシミュレーションを行うことが鍵となる。しかし、これまでの天の川銀河形成シミュレーションでは、UFD のスケールは分解できていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、星の r プロセス元素組成と動力的性質に着目し、天の川銀河の形成進化史を明らかにすることを目的とする。そのために、星の r プロセス元素組成・動力的性質と天の川銀河の形成進化史を対応させる。これにより、星の r プロセス元素組成を銀河進化の指標として確立する。銀河形成シミュレーションのデータと位置天文衛星 Gaia、地上の大型望遠鏡による観測によるデータを比較することで、天の川銀河の構成要素と現在存在する UFD の関係を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、銀河周囲のみを高分解能にする宇宙論的ズームインシミュレーションを行った。質量分解能 ~ 10 太陽質量の矮小銀河形成シミュレーションと、質量分解能 $\sim 10,000$ 太陽質量の天の川銀河シミュレーションを順次実施した。計算には、重力・流体計算コード ASURA (Saitoh et al. 2008) を用いた。矮小銀河シミュレーションを行うために、確率的に星粒子に質量を割り振る新たな星形成モデルを構築し、ASURA に導入した。星からの元素放出は、Chemical Evolution Library (Saitoh 2017) を用いて実装した。初期条件は、予め行なっていた宇宙論的構造形成シミュレーションに基づき、Multi Scale Initial Conditions (Hahn & Abel 2011) を用いて生成した。生成した初期条件を用いて、国立天文台天文シミュレーションプロジェクト Cray XC50「アテルイ II」でシミュレーションを実施した。シミュレーション実施後は、AMIGA Halo Finder (Gill et al. 2004; Knollmann & Knebe 2009) を用いてハローを検出し、ハロー内に存在する星の元素組成、動力的性質を解析した。これらのデータを位置天文衛星 Gaia Early Data Release (DR) 3 (Gaia Collaboration 2021) 及び分光観測サーベイ GALAH DR3 (Buder et al. 2021; Shank et al. 2023) のデータと比較した。

4. 研究成果

(1) 個々の星を分解した銀河形成シミュレーションの実現

本研究では、個々の星を分解した星団・銀河形成シミュレーションプロジェクト SIRIUS (Simulations Resolving Individual Stars) を立ち上げた。このプロジェクトでは、新たに星形成モデル (Hirai et al. 2021)、高精度な重力積分法 (Fujii, Hirai et al. 2021a)、個々の大質量星からの加熱効果 (Fujii, Hirai et al. 2021b) を重力・流体計算コードに実装した。これにより、個々の星を分解した星団・銀河形成シミュレーションを実現した。

Hirai et al. (2021) では、SIRIUS プロジェクトの第一論文として、個々の星を分解できる次世代銀河形成シミュレーションで用いる星形成モデルを構築した。このモデルでは、観測から示唆されている星質量分布を確率的に新しくできた星に割り振った。新しくできる星の質量が元のガス粒子の質量より大きい場合は、周囲のガス質量を集めて星を作った。

本研究では、このモデルを用いて乱流ガス雲からの星団形成と宇宙論的な初期条件からの銀河形成シミュレーションを実施した。星形成領域の密度から予測される範囲のガスを集めて星

を作ると、仮定した星質量分布を正しく反映した星団が形成された。小さい質量のガス雲では、大質量な星はごく少数のため、どの質量の大質量星が形成されるかはガス雲により異なる。ガスから星になる割合と星形成の密度は、最終的な星質量分布には影響しなかった。このモデルを用いると、観測で報告されていた、星団に含まれる最も大質量な星と星団質量の関係を再現できた(図1)。本研究により、このモデルが星団形成から銀河形成まで異なる空間スケールのシミュレーションに適用できることが明らかになった。今後本モデルを用いた銀河形成シミュレーションが盛んに行われるようになることが期待される。

(2) r プロセス元素に富んだ星の形成環境の解明

本研究では、世界最高の時間・星質量分解能の天の川銀河形成シミュレーションを実施した(図2、Hirai et al. 2022)。その結果、鉄の量が太陽の300分の1以下のr プロセス元素に富んだ星の9割以上が宇宙誕生から40億年以内に形成されたことがわかった(図3)。これらの星の多くは、形成途中の矮小銀河で誕生していた。こうした矮小銀河では、ガスの量が少ないため、一度の元素合成現象でも、銀河全体のr プロセス元素の割合が高くなる。こうした環境で星が生まれると、重元素の割合の高い星が形成される。

分光観測サーベイ GALAH で観測した天の川銀河の星のr プロセス元素分布と、シミュレーションで予測されたr プロセス元素分布を比較すると、似たような分布をしていた。この結果は、天の川銀河に見られるr プロセス元素に富む星の多くは、100億歳以上の年齢を持ち、宇宙初期の天の川銀河形成史を今に伝える星々であることを意味している。さらに本研究では、2017年に重力波が検出された連星中性子星合体から放出されるr プロセス元素量を仮定することで、天の川銀河銀河の重元素量を矛盾なく説明できた。この成果により、r プロセス元素に富んだ星々を指標として、これまで謎であった100億年以上前の天の川銀河形成史を探ることが可能となった。

<引用文献>

Bonnell et al., 2004, MNRAS, 349, 735
 Buder et al., 2021, MNRAS, 506, 150
 Fujii, Saitoh, Wang, Hirai, 2021a, PASJ, 73, 1057
 Fujii, Saitoh, Hirai, Wang, 2021b, PASJ, 73, 1074
 Gaia Collaboration, 2021, A&A, 649, A1
 Gill et al., 2004, MNRAS, 351, 399
 Hahn & Abel, 2011, MNRAS, 415, 2101
 Hirai et al., 2022, MNRAS, 517, 4856
 Hirai et al., 2021, PASJ, 73, 1036
 Knollmann & Knebe, 2009, ApJS, 182, 608
 Roederer et al., 2018, AJ, 156, 79
 Saitoh, 2017, AJ, 153, 85
 Saitoh et al., 2008, PASJ, 60, 667
 Shank et al., 2023, ApJ, 943, 23

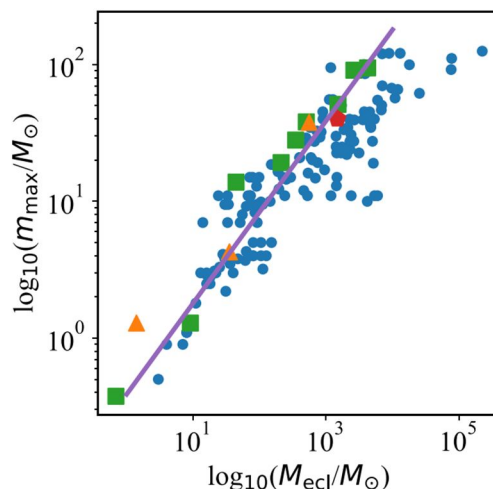


図1. 星団内の最も大質量な星と星団質量の関係。三角、四角、五角形が本研究の結果。丸は観測値。実線は先行研究で計算された関係値 (Bonnell et al. 2004)。

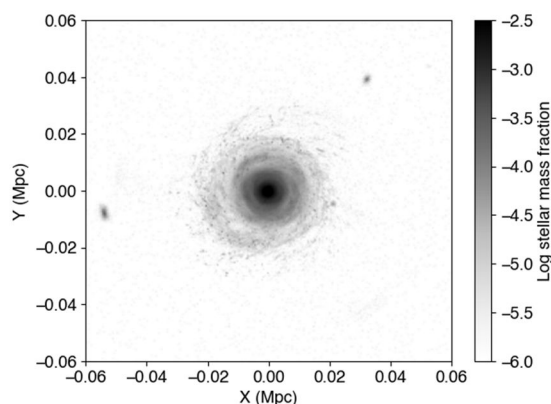


図2. 本研究で実施した天の川銀河シミュレーションで得られた星分布。

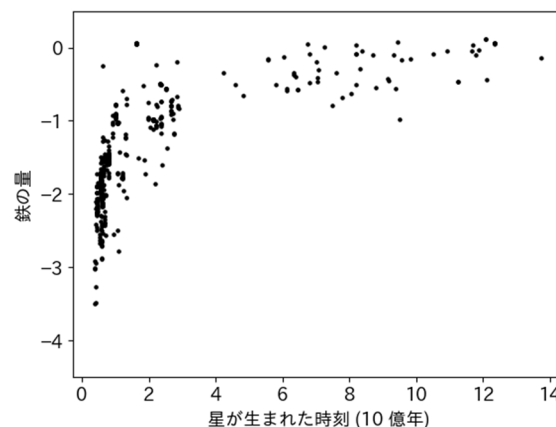


図3. 鉄の量とr プロセス元素に富んだ星が生まれた時刻の関係。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 19件）

1. 著者名 Cabrera Garcia Jonathan, Beers Timothy C, Huang Yang, Li Xin-Yi, Liu Gaochao, Zhang Huawei, Hong Jihye, Lee Young Sun, Shank Derek, Gudin Dmitrii, Hirai Yutaka, Komater Dante	4. 巻 527
2. 論文標題 Probing the Galactic halo with RR Lyrae stars - V. Chemistry, kinematics, and dynamically tagged groups	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 8973 ~ 8990
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad3674	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 Xu Yi, Ouchi Masami, Isobe Yuki, Nakajima Kimihiko, Ozaki Shinobu, Bouche Nicolas F., Wise John H., Emsellem Eric, Kusakabe Haruka, Hattori Takashi, Nagao Tohru, Chiaki Gen, Fukushima Hajime, Harikane Yuichi, Hayashi Kohei, Hirai Yutaka, 他	4. 巻 961
2. 論文標題 EMPRESS. XII. Statistics on the Dynamics and Gas Mass Fraction of Extremely Metal-poor Galaxies	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 49 ~ 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad06ab	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 Hirashima Keiya, Moriwaki Kana, Fujii Michiko S, Hirai Yutaka, Saitoh Takayuki R, Makino Junichiro	4. 巻 526
2. 論文標題 3D-Spatiotemporal forecasting the expansion of supernova shells using deep learning towards high-resolution galaxy simulations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4054 ~ 4066
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad2864	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 Hayashi Kohei, Hirai Yutaka, Chiba Masashi, Ishiyama Tomoaki	4. 巻 953
2. 論文標題 Dark Matter Halo Properties of the Galactic Dwarf Satellites: Implication for Chemo-dynamical Evolution of the Satellites and a Challenge to Lambda Cold Dark Matter	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 185 ~ 185
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace33e	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 Nishigaki Moka, Ouchi Masami, Nakajima Kimihiko, Ono Yoshiaki, Rauch Michael, Isobe Yuki, Harikane Yuichi, Narita Kanako, Zahedy Fakhri, Xu Yi, Yajima Hidenobu, Fukushima Hajime, Hirai Yutaka, Kim Ji Hoon, Inoue Shigeki, Kusakabe Haruka, Lee Chien-Hsiu, Nagao Tohru, Onodera Masato	4. 巻 952
2. 論文標題 EMPRESS. XI. SDSS and JWST Search for Local and z ~4-5 Extremely Metal-poor Galaxies (EMPGs): Clustering and Chemical Properties of Local EMPGs	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 11 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/accf14	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 Isobe Yuki, Ouchi Masami, Nakajima Kimihiko, Ozaki Shinobu, Bouche Nicolas F., Wise John H., Xu Yi, Emsellem Eric, Kusakabe Haruka, Hattori Takashi, Nagao Tohru, Chiaki Gen, Fukushima Hajime, Harikane Yuichi, Hayashi Kohei, Hirai Yutaka, 他	4. 巻 951
2. 論文標題 EMPRESS. IX. Extremely Metal-poor Galaxies are Very Gas-rich Dispersion-dominated Systems: Will the James Webb Space Telescope Witness Gaseous Turbulent High-z Primordial Galaxies?	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 102 ~ 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acc87	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 Piatti Andres E., Hirai Yutaka	4. 巻 165
2. 論文標題 The Origin of the Large Magellanic Cloud Globular Cluster NGC 2005	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 213 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/acc6d1	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 Arzoumanian Doris, Arakawa Sota, Kobayashi Masato I. N., Iwasaki Kazunari, Fukuda Kohei, Mori Shoji, Hirai Yutaka, Kunitomo Masanobu, Kumar M. S. Nanda, Kokubo Eiichiro	4. 巻 947
2. 論文標題 Insights on the Sun Birth Environment in the Context of Star Cluster Formation in Hub-Filament Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L29 ~ L29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/acc849	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 Zepeda Joseph, Beers Timothy C., Placco Vinicius M., Shank Derek, Gudin Dmitrii, Hirai Yutaka, Mardini Mohammad, Pifer Colin, Catapano Thomas, Calagna Sean	4. 巻 947
2. 論文標題 Chemodynamically Tagged Groups of CEMP Stars in the Halo of the Milky Way. I. Untangling the Origins of CEMP-s and CEMP-no Stars	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 23 ~ 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acbbcc	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 Fujii Michiko S., Wang Long, Saitoh Takayuki R., Hirai Yutaka, Shimajiri Yoshito	4. 巻 16
2. 論文標題 Formation process of the Orion Nebula Cluster	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Astronomical Union	6. 最初と最後の頁 258 ~ 261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1743921322001508	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 Hirashima Keiya, Moriwaki Kana, Fujii Michiko, Hirai Yutaka, Saitoh Takayuki, Makino Junichiro	4. 巻 16
2. 論文標題 Predicting the Expansion of Supernova Shells Using Deep Learning toward Highly Resolved Galaxy Simulations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Astronomical Union	6. 最初と最後の頁 209 ~ 214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1743921322001739	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 -

1. 著者名 Hirai Yutaka, Beers Timothy C, Chiba Masashi, Aoki Wako, Shank Derek, Saitoh Takayuki R, Okamoto Takashi, Makino Junichiro	4. 巻 517
2. 論文標題 Origin of highly r-process-enhanced stars in a cosmological zoom-in simulation of a Milky Way-like galaxy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4856 ~ 4874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2489	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 Matsumoto, A., Ouchi, M., Nakajima, K., Kawasaki, M., Murai, K., Motohara, K., Harikane, Y., Ono, Y., Kushibiki, K., Koyama, S., Aoyama, S., Konishi, M., Takahashi, H., Isobe, Y., Umeda, H., Sugahara, Y., Onodera, M., Nagamine, K., Kusakabe, H., Hirai, Y., et al.	4. 巻 941
2. 論文標題 EMPRESS. VIII. A New Determination of Primordial He Abundance with Extremely Metal-poor Galaxies: A Suggestion of the Lepton Asymmetry and Implications for the Hubble Tension	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 167 ~ 167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac9ea1	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 Fujii Michiko S, Wang Long, Hirai Yutaka, Shimajiri Yoshito, Kumamoto Jun, Saitoh Takayuki	4. 巻 514
2. 論文標題 SIRIUS Project - IV. The formation history of the Orion Nebula Cluster driven by clump mergers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2513 ~ 2526
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac1496	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 Fujii Michiko S, Hattori Kohei, Wang Long, Hirai Yutaka, Kumamoto Jun, Shimajiri Yoshito, Saitoh Takayuki R	4. 巻 514
2. 論文標題 SIRIUS Project - V. Formation of off-centre ionized bubbles associated with Orion Nebula Cluster	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 43 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac808	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, Fujii Michiko S, Saitoh Takayuki R	4. 巻 73
2. 論文標題 SIRIUS project. I. Star formation models for star-by-star simulations of star clusters and galaxy formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1036 ~ 1056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab038	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 -

1. 著者名 Fujii Michiko S, Saitoh Takayuki R, Wang Long, Hirai Yutaka	4. 巻 73
2. 論文標題 SIRIUS project. II. A new tree-direct hybrid code for smoothed particle hydrodynamics N-body simulations of star clusters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1057 ~ 1073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab037	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 -

1. 著者名 Fujii Michiko S, Saitoh Takayuki R, Hirai Yutaka, Wang Long	4. 巻 73
2. 論文標題 SIRIUS project. III. Star-by-star simulations of star cluster formation using a direct N-body integrator with stellar feedback	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1074 ~ 1099
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab061	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 -

1. 著者名 Matsuno T., Hirai Y., Tarumi Y., Hotokezaka K., Tanaka M., Helmi A.	4. 巻 650
2. 論文標題 R-process enhancements of Gaia-Enceladus in GALAH DR3	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202040227	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 Wanajo Shinya, Hirai Yutaka, Prantzos Nikos	4. 巻 505
2. 論文標題 Neutron star mergers as the astrophysical site of the r-process in the Milky Way and its satellite galaxies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5862 ~ 5883
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1655	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 Hirashima K., Moriwaki K., Fujii M. S., Hirai Y., Saitoh T., Makino J.	4. 巻 2207
2. 論文標題 Predicting the Expansion of Supernova Shells for High-Resolution Galaxy Simulations Using Deep Learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012050 ~ 012050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2207/1/012050	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 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 平居悠、Kirby Evan N, Anguiano Borja, Beers Timothy C、千葉 柁司、林航平、斎藤貴之、石垣美歩
2. 発表標題 Subaru PFS Mock Observations of Satellites in a Cosmological Zoom-in Simulation of a Milky Way-like Galaxy
3. 学会等名 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hirai Yutaka
2. 発表標題 Subaru PFS Mock Observations of Satellites in a Cosmological Zoom-in Simulation
3. 学会等名 Formation and Evolution of the Galaxies with Subaru PFS: Satellite workshop (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hirai Yutaka
2. 発表標題 Chemo-dynamical evolution of satellites around a Milky Way-like galaxy
3. 学会等名 Dark Matter in the Universe: The Present and Future of Galactic Archaeology and Near-field Cosmology (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 平居悠
2. 発表標題 Chemo-dynamical evolution of satellites around a Milky Way-like galaxy
3. 学会等名 2023年度国立天文台CfCAユーザーズミーティング
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 平居悠
2. 発表標題 銀河形成シミュレーションで探るrプロセス元素に富んだ星の起源
3. 学会等名 シミュレーション天文学のこれまでとこれからーハードウェア・アプリケーション・サイエンスー
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hirai Yutaka
2. 発表標題 Chemical Evolution of Galaxies in the Local Group
3. 学会等名 The 1st IReNA-Ukakuren Joint Workshop "Advancing Professional Development in Nuclear Astrophysics and Beyond" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hirai Yutaka
2. 発表標題 The History of the Milky Way
3. 学会等名 Kalamazoo Astronomical Society General Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hirai Yutaka
2. 発表標題 Chemo-dynamical evolution of the Milky Way
3. 学会等名 MODEST-23 JM (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平居悠
2. 発表標題 Formation of highly r-process-enhanced stars in a cosmological zoom-in simulation of a Milky Way-like galaxy
3. 学会等名 2022年度 国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yutaka Hirai, Michiko S. Fujii, Takayuki R. Saitoh, Long Wang
2. 発表標題 SIRIUS Project: Star-by-Star Simulations of Star Clusters and Galaxies
3. 学会等名 The 241st meeting of the American Astronomical Society (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平居悠
2. 発表標題 Origin of r-process elements and the Milky Way formation
3. 学会等名 宇核連-RCNP研究会「宇宙核物理の展開」(ANP2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Hirai, Timothy C. Beers, Masashi Chiba, Wako Aoki, Derek Shank, Takayuki R. Saitoh, Takashi Okamoto, Junichiro Makino
2. 発表標題 Origin of r-process enhanced stars in cosmological zoom-in simulations of Milky Way-like galaxies
3. 学会等名 The 240th meeting of the American Astronomical Society (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Hirai
2. 発表標題 Numerical models of the r-process
3. 学会等名 RR Lyrae Stars, Galactic Structure and Chemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Hirai, Timothy C. Beers, Masashi Chiba, Wako Aoki, Derek Shank, Takayuki R. Saitoh, Takashi Okamoto, Junichiro Makino
2. 発表標題 Origin of r-process enhanced stars in simulations of Milky Way-like galaxies
3. 学会等名 2022 JINA-CEE Frontiers in Nuclear Astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平居悠
2. 発表標題 Simulations Resolving Individual Stars (SIRIUS) project
3. 学会等名 令和2年度国立天文台CfCAユーザーズミーティング
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Hirai
2. 発表標題 Chemodynamical evolution of dwarf galaxies based on cosmological zoom-in simulations: Perspective for PFS survey
3. 学会等名 Subaru PFS 13th collaboration meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平居悠
2. 発表標題 S-process elements in dwarf galaxies
3. 学会等名 Japan-German Joint Workshop on Chemical Evolution in the Early Universe (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平居悠
2. 発表標題 Chemo-dynamics of the Milky Way and dwarf galaxies
3. 学会等名 2020 meeting of the JSPS-CAS collaboration program "Origin of the Milky Way halo structure explored with LAMOST and Subaru" (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平居悠
2. 発表標題 Galactic Archaeology with Heavy Elements
3. 学会等名 Division of Science + Center for Computational Astrophysics workshop 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平居悠
2. 発表標題 Chemo-dynamical properties of r-process enhanced stars in the Milky Way-like galaxies
3. 学会等名 令和2年度国立天文台CfCAユースミーティング
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平居悠、青木和光、Timothy C. Beers、千葉柁司、斎藤貴之、岡本崇、牧野淳一郎
2. 発表標題 銀河形成シミュレーションで探るrプロセス元素に富んだ星の動力学性質
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>AIが描く超新星爆発の広がりー深層学習を用いた超新星爆発シミュレーションの高速再現技術ー https://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20231023-12907.html 貴金属に富んだ星々は100億歳ー世界最高解像度天の川銀河シミュレーションに成功 https://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20221114-12355.html 貴金属に富んだ星々は100億歳ー世界最高解像度天の川銀河シミュレーションに成功ー https://www.nao.ac.jp/news/science/2022/20221114-cfca.html 貴金属に富んだ星々は100億歳ー世界最高解像度天の川銀河シミュレーションに成功ー https://www.jicfus.jp/jp/press221114/ 貴金属に富んだ星々は100億歳ー世界最高解像度天の川銀河シミュレーションに成功 https://www.kobe-u.ac.jp/research_at_kobe/NEWS/news/2022_11_14_01.html 新しい高精度シミュレーションが明らかにした星団形成の現場 https://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20220608-12126.html</p>

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	ノートルダム大学			
中国	中山大学			
オランダ	University of Groningen			
フランス	Institut Astrophysique de Paris			
ドイツ	Albert Einstein Institute			
スイス	ジュネーブ大学			