

平成 30 年 9 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247022

研究課題名(和文) 第3次革命を迎えた宇宙論的銀河形成流体シミュレーション：原始銀河形成と宇宙再電離

研究課題名(英文) The third revolution in cosmological hydrodynamic simulations: first galaxy formation and reionization

研究代表者

長峯 健太郎 (Nagamine, Kentaro)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：50714086

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,000,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙論的銀河形成流体コードGADGET-3を用いて、早期宇宙から現在に至るまでの銀河形成と進化の統一的理解を推進した。具体的には、新たな超新星爆発モデルとダストの破壊・成長モデルをシミュレーションコードに組み込み、ダストとメタルを空間的・時間的に追うことに成功した。銀河の光度関数や質量関数、及びダストによるextinctionの空間分布も計算した。また、宇宙論的ズーム計算においては、矮小銀河の質量獲得史および星形成史を調べた。その結果、フィードバックが強いモデルにおいては、ガスが吹き飛ばされて銀河円盤が破壊され、より乱れたガス分布の初代銀河が形成されることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Using the cosmological SPH code GADGET-3, we have acquired a more unified view of galaxy formation from the early Universe to the present time. We implemented a new supernova feedback model and a model for dust formation and destruction into our simulation code, and succeeded in following the temporal and spatial distribution of dust and metals. We also computed the luminosity and mass functions of galaxies, as well as the spatial variation of galactic extinction. Furthermore, using cosmological zoom simulations, we examined the mass accretion and star formation histories of dwarf galaxies at high redshift. As a result, we found that the gas is blown out of the galaxy due to strong feedback, and that the galaxy evolved into a more disturbed morphology at high redshift.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙論 構造形成 銀河形成 星形成 超新星爆発 フィードバック

1. 研究開始当初の背景

「我々はどこから来たのか？」という疑問は人類にとって古来より最も根源的な疑問の一つである。我々が住む地球は太陽系惑星の一つであり、太陽は天の川銀河の数千億の星のうちの一つに過ぎない。では天の川銀河はどのように出来たのかという疑問には、宇宙論的な研究をもってしか答えることができない。宇宙における構造形成は本質的に非線形な物理過程なので、その進化を早期宇宙から現在まで追う為には、暗黒物質とガスの運動を同時に宇宙論的流体シミュレーションで追う必要がある。

宇宙論的銀河形成大規模流体シミュレーションの分野は、これまで大きく分けて二つの時代を経験し、今まさに3つ目の時代に入っている。一つ目の時代は1990年代の約10年間で、20世紀初頭にCen (1992)に代表されるような宇宙論的な体積での構造形成計算が始まり(第1次革命)、その後急速なパソコンの進化と共に放射冷却を扱う具体的な銀河形成の数値計算(Katz et al. 1996)が行われるようになっていった。しかし、この頃のシミュレーションは解像度が現在に比べるとかなり低く、大規模構造を暗黒物質粒子とガスで大まかに追い、大質量銀河の形成を解像度~数100kpc (comoving)でおぼろげに見る程度であった。

二つ目の時代は21世紀初頭の10年間(2001-2012年頃)である。この時期に解像度が数kpc (comoving)に到達し、星形成・超新星爆発・銀河風などの諸物理過程がsubgridモデルによってより詳細に記述されるようになった(第2次革命)。この動きを代表する仕事としてはNagamine et al. (2001)やSpringel & Hernquist (2003)が挙げられ、筆者も同時期に博士論文を書き、暗黒物質と暗黒エネルギーに支配された宇宙における星形成史や銀河光度関数の進化の研究を行って来た。銀河の内部構造を分解するのは依然として難しかったが、これらのシミュレーションの貢献なくして、今日の銀河形成の総合的な理解はなかったと言えよう。

そして今まさに第3次革命が新しいズーム計算手法を軸として起きており、これまで達成できなかった高解像度で、数Mpcの領域の進化を宇宙論的に忠実に追うことができるようになってきた。この手法では、まず比較的解像度の低い計算を大規模領域で走らせて興味深い領域を特定し、もう一度遡ってその特定領域にmulti-scale高解像度初期条件を設定する。これによって宇宙論的な初期条件を保ったまま、解像度をsub-kpcスケールに上げて特定領域の銀河形成を解くことができるようになってきた。この第3次革命では、解像度が数10pcに迫って来ており、銀河の円盤やバルジ等の内部構造はもちろんの事、巨大分子雲の生成も徐々に分解され始めている。この進歩と共に、大質量星から

の星風や輻射圧等の物理も新たに重要になってくるため、それらをコードに組み込んで行く必要がある。

現在、世界的規模で宇宙論的銀河形成流体コード比較プロジェクトAGORA (<http://www.agorasimulations.org/>) (Kim et al. 2014, 2016)がこの手法を活用して走っており、筆者は日本から唯一参加しているPIである。そこでは世界各国の研究チームが開発したコードを持ち寄り、最新の銀河形成のズームシミュレーションを同じ初期条件で走らせ、結果の違いを互いに検証し合う。その結果、新たに組み込んだ物理過程がどのように銀河形成に影響を与えるのか、より批判的・客観的に検証できるようになる。本研究で開発したフィードバックモデルを用いて、最先端シミュレーション群を実行し、それらをAGORA projectを通じて検証していく。

2. 研究の目的

上記のような国際的潮流の中で、本研究においては早期宇宙から現在に至るまでの銀河形成と進化に関する包括的な研究プログラムを展開し、特に高解像度が達成できるズーム計算手法を積極的に活用しながら、第3次革命以前には正確に扱えなかった以下の3つの課題を明らかにする：(i) 早期宇宙における矮小銀河がいつどこで誕生し、どのように成長していくのか。特に $z=10$ 頃に生まれる数多くの矮小銀河がどのように質量を獲得し、現在の巨大質量銀河へと成長して行くのか。(ii) その過程において星形成史はどのように時間変化するのか。大質量星からの星風と輻射圧は銀河内のガス分布をどのように変え、その後の超新星爆発フィードバックの効率に変化を与えるのか。(iii) 矮小銀河からどれだけの電離光子が脱出し、 $z>6$ において宇宙再電離に影響を与えるのか。上記の過程を詳細に調べ、銀河形成を宇宙論的な視点から統一的に理解する。

3. 研究の方法

我々は宇宙論的銀河形成流体コードGADGET-3 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) (Springel et al. 2005の改良版)を用いて、大規模領域での構造形成計算とズーム手法を併用しながら、早期宇宙から現在に至るまでの銀河形成と進化の統一的な理解を目指す。

特に高解像度シミュレーションでは、分子や禁制線に依る新たな冷却過程を考慮し、ガス温度が10-100 K程度まで下がって行く過程を追って、これまで解像不可能だった星間物質の多相構造を徐々に分解していく。また、大質量星からの星風が周囲の星間物質をどのように吹き飛ばし、超新星爆発フィードバックの効率を変えるのか、明らかにする。新

たな超新星フィードバックモデル開発し、銀河から銀河間空間への輻射輸送計算を行い、宇宙再電離と矮小銀河形成の関係を明らかにする。

4. 研究成果

我々はまず、大質量星からの星風と輻射の効果をも熱的フィードバックとして取り入れた新しい超新星爆発フィードバックモデルを開発し、孤立銀河系においてテストを行った(Aoyama et al. 2017; Shimizu et al. 2018, submitted)。

旧来のモデルでは超新星爆発が起きた後、単に熱的エネルギーを周辺のガス(SPH)粒子にばらまき、かつ解像度の限界を克服するために運動エネルギーも同時にSPH粒子に与えて銀河風などの現象を再現する手法が主流であった。近年は、超新星爆発に加えて大質量星からの星風や輻射によって超新星が爆発する以前に周辺の星間物質にまずフィードバックがかかり、その後の超新星爆発フィードバックの効率がより良くなるという指摘がなされていた(所謂 early stellar feedback)。我々はこの流れを受けて、超新星爆発が起きる以前の星形成から4 Myrに大質量星からの熱的フィードバックを考慮し、その影響を孤立銀河系において調べた。

超新星の爆発エネルギーを分配する領域をどのように選ぶかによって、そのフィードバックを受けた粒子が時には1000km/sを越すような速度を持ってしまふことがあり、注意を要することを孤立銀河系のテスト計算から見出した。これは単純な超新星爆発のSedov-Taylor解を使用すると爆発の影響を見積もる半径が小さめに出てしまい、結果として非常に数少ない粒子に多くのエネルギーが分配されてしまうことによって起きる。そこで我々は、より長時間にわたってガス冷却などの効果を考慮して爆発半径を見積もったChevalier (1974)の解析結果を利用することで、この問題を解決した。

孤立銀河系において新しいフィードバックモデルをテストした結果、従来のモデルに比べてフィードバック効率が確かに上がり、初期の星形成率が抑制されることが判明した。これは、stellar-to-halo mass ratio (SHMR)のデータとして観測されている通り、low-mass haloにおいて星形成が抑制されてabundance-matching techniqueの結果とよりよく合致するという意味で、観測データにより近い方向にシミュレーション結果が向かっていることを意味する。

Early stellar feedbackは大質量星からの輻射による効果が重要であると考えられており、そのためにはダストの破壊と成長を含んだ動的モデリングも重要になってくる。これまでのシミュレーションにおいては通常

ダストの質量は金属量に正比例するものとして非常に単純に扱われていたが、最近Asano et al. (2013)やHirashita (2015)などのダストの破壊と成長を考慮したモデルが構築された。ダストの生成・破壊を含む2成分ダストモデル(Hirashita 2015)をシミュレーションに組み込みやすいように改変し、実装した。そして、孤立系銀河および宇宙論的スケールの両方においてダストとメタルのダイナミクスを空間的・時間的に追うことに成功した(Aoyama et al. 2017; Hou et al. 2017)。

これらの超新星爆発モデルとダストモデルの両方を組み込んだ宇宙論的シミュレーションを走らせ、銀河形成と進化に対する影響を調べて、銀河の光度関数や質量関数などの比較を行った。大規模構造形成シミュレーションの中の銀河を同定し、ダストによるextinctionや銀河の質量関数・光度関数などを計算し、観測とも比較した(Aoyama et al. 2018; Hou et al. 2018)。

宇宙論的ズームシミュレーションにおいては、矮小銀河形成の過程を時間・空間・質量の関数としてトラックし、矮小銀河の質量獲得史および星形成史が異なるSNフィードバックモデルによってどのように異なり、SHMR plot上でどのように進化していくのかを調べた(Yajima et al. 2017)。銀河の形態や電離光子の脱出確率がどのように変わっていくのかについても、高赤方偏移の銀河について検証した。その結果、フィードバックが強いモデルにおいては、ガスが吹き飛ばされて円盤が破壊され、より乱れたガス分布の初代銀河が形成されることがわかった。SN feedbackによって星形成が $z > 10$ においては断続的になり、その後はスムーズに成長することも発見した。ダークマター(DM)ハローの中心部でスターバーストが起きると、そのポテンシャルが攪乱され、DMプロファイルのカスポが一時的に消え、またしばらくするとガスinfallによって回復することも発見した。これはCDMモデルの問題の一つとして考えられているカスポについて重要な示唆を与える結果である。我々のズームシミュレーションで成長した銀河は、 $z=7-8$ で観測されているLy-alpha emitterの星形成率や星質量をよく再現していることを見出した。

Arata et al. (2018a)の論文においては、従来よりも解像度が高い計算を実行し、ガス温度が10-100K程度まで下がり、高密度の分子雲へと向かっていく過程を計算した。その結果、金属量が低いケースにおいては熱的不安定生によって $10^3 M_{\text{sun}}$ 程度の質量を持つガス雲が形成されることを発見した。

また、輻射輸送計算もpostprocessで計算し、Lyman-alpha emitterなどの高赤方偏移天体の性質についても観測と比較している

(Arata et al. 2018b)。

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 14 件、全て査読あり)

1. Hou, K.-C., Aoyama, S., Hirashita, H., Nagamine, K., Shimizu, I., 2018, MNRAS, submitted. “Dust Scaling Relations in a Cosmological Simulation”
2. Aoyama, S., Hou, K.-C., Hirashita, H., Nagamine, K., Shimizu, I., 2018, MNRAS, Vol. 478, Issue 4, p.4905-4921 “Cosmological Simulation with Dust Formation and Destruction”
3. Arata, S., Yajima, H., Nagamine, K., 2018, MNRAS, Volume 475, Issue 3, p.4252-4262 “Gas clump formation via thermal instability in high-redshift dwarf galaxy mergers”
4. Shimizu, I., Nagamine, K., Todoroki, K., Yajima, H., 2018, MNRAS, submitted. “Osaka Feedback Model: I. Isolated disk galaxy simulation”
5. Chen, L.-H., Hirashita, H., Hou, K.-C., Aoyama, S., Shimizu, I., Nagamine, K., 2017, MNRAS, Volume 474, Issue 2, p.1545-1563 “Populating H₂ and CO in galaxy simulation with dust evolution”
6. Spinoglio, L., et al. 2017, Publications of the Astronomical Society of Australia (PASA), Volume 34, id.e057 13 pp. (41st author among 68 authors) “Galaxy evolution studies with the SPace IR telescope for Cosmology and Astrophysics (SPICA): the power of IR spectroscopy”
7. Yajima, H., Nagamine, K., Zhu, Q., Khochfar, S., Dalla Vecchia, C., 2017, ApJ, Volume 846, Issue 1, article id. 30, 13 pp. “Growth of First Galaxies: Impacts of Star Formation and Stellar Feedback”
8. Hou, K.-C., Hirashita, H., Nagamine, K., Aoyama, S., Shimizu, I., 2017, MNRAS, Volume 469, Issue 1, p.870-885 “Evolution of dust extinction curves in galaxy simulation”
9. Aoyama, S., Hou, K.-C., Shimizu, I., Hirashita, H., Todoroki, K., Choi, J.-H., Nagamine, K., 2017, MNRAS, Volume 466, Issue 1, p.105-121 “Galaxy Simulation with Dust Formation and Destruction”
10. Kim, J.-H., et al. 2016, ApJ, 833, 202 (33rd author among 43 authors) “The AGORA High-Resolution Galaxy Simulations Comparison Project. II: Isolated Disk Test”
11. Nagamine, K., Reddy, N., Daddi, E., & Sargent, M., 2016, Space Science Reviews, Vol. 202, Issue 1, pp.79-109 “Galaxy Formation and Evolution”
12. Yajima, H., Shlosman, K., Romano-Diaz, E., Nagamine, K., 2015, MNRAS, 451, 418 “Observational Properties of Galaxies in Overdense and Average Regions at High Redshifts $z=6-12$ ”
13. Thompson, R., Dave, R., Nagamine, K., 2015, MNRAS, 452, 3030 “The rise and fall of a challenger: the Bullet Cluster in Lambda Cold Dark Matter simulations”
14. Jaacks, J., Finkelstein, S., Nagamine, K., 2015, ApJ, 817, 174 “Connecting the Dots: Tracking Galaxy Evolution Using Constant Cumulative Number Density at $z=3-7$ ”

[学会発表] (計 27 件)

1. S. Arata, H. Yajima, K. Nagamine, “Radiative properties and detectability of the first galaxies”, Tokyo Spring Cosmic Lyman-Alpha Workshop (March 26-30, University of Tokyo)
2. 荒田翔平 矢島秀伸 長峯健太郎 「初代銀河の多波長輻射特性と検出可能性」 日本天文学会 2018年春季年会 (2017年3月14日-17日 千葉大学)
3. K. Nagamine, “Getting bored with Lambda CDM? -- Structure Formation and Dark Matter”, International workshop on Axion physics and dark matter cosmology (Dec 20-21, 2017, Osaka Univ., Osaka)
4. K. Nagamine, “Formation of First Galaxies & Dust”, Distant Galaxies from the Far South (Dec 11-15, 2017, Bariloche, Argentina)
5. 荒田翔平 矢島秀伸 長峯健太郎 「初代銀河の衝突で誘起されるガス雲形成」 日本天文学会 2017年秋季年会 (2017年9月11日から13日 北海道大学)
6. 中村亮介 長峯健太郎 「Cold Flows and

- Galaxy Formation」日本天文学会 2017 年秋季年会 (2017 年 9 月 11 日から 13 日 北海道大学)
7. 長峯健太郎 矢島秀伸 「Impact of Star Formation and Stellar Feedback on First Galaxies and beyond」日本天文学会 2017 年秋季年会 (2017 年 9 月 11 日から 13 日 北海道大学)
 8. K. Nagamine, H. Yajima, “Impact of Feedback on High-z Galaxy Formation using Cosmological Hydrodynamic Simulations”, APRIM 2017 (Jul 3-7, 2017, Taiwan)
 9. K. Nagamine, “Impact of Feedback on Galaxy Formation”, MIAPP Cosmic Reionization Workshop (April 17-30, 2016, Max Planck Institute for Astrophysics, Munich, Germany)
 10. 青山尚平 Kuan-Chou Hou 清水一紘 平下博之 長峯健太郎 「ダストのサイズ分布を考慮した宇宙論的ダスト形成シミュレーション」日本天文学会 2017 年春季年会 (2017 年 3 月 15 日から 18 日 九州大学)
 11. 清水一紘 長峯健太郎 「Development for New SNII Feedback Treatment」 「銀河進化と遠方宇宙 2017」 2017 年 1 月 7 日 アーデンホテル阿蘇
 12. 青山尚平 長峯健太郎 「ダスト形成を考慮した銀河形成シミュレーションと観測量との比較」 「銀河進化と遠方宇宙 2017」 2017 年 1 月 7 日 アーデンホテル阿蘇
 13. 荒田翔平 矢島秀伸 長峯健太郎 「初代銀河における熱的不安定による球状星団の形成」 第 29 回 理論懇シンポジウム「重力が織りなす宇宙の諸階層」 2016 年 12 月 20 日-22 日 東北大学
 14. 青山尚平 Kuan-Chou Hou 清水一紘 平下博之 長峯健太郎 「ダスト形成を考慮した銀河形成シミュレーションと観測量との比較」 第 29 回 理論懇シンポジウム「重力が織りなす宇宙の諸階層」 2016 年 12 月 20 日-22 日 東北大学
 15. K. Nagamine, “High-z Galaxy Formation, Feedback, & Dust”, Panoramas of the Evolving Cosmos”, The 6th Subaru International Conference (November 28-December 2, 2016, International Conference Center Hiroshima, Hiroshima, Japan)
 16. 青山尚平 Kuan-Chou Hou 清水一紘 平下博之 Keita Todoroki Jun-Hwan Choi 長峯健太郎 「ダスト形成を考慮した孤立系銀河シミュレーションと観測量との比較」日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14 日から 16 日 愛媛大学)
 17. 長峯健太郎 「Cosmic Gas, Galaxy Formation, Feedback, and Cosmological Hydrodynamic Simulations」 “IGM Tomography Workshop 2016” 2016 年 8 月 29 日 IPMU, 東京大学
 18. 青山尚平 Kuan-Chou Hou 清水一紘 平下博之 長峯健太郎 「ダスト形成を考慮した孤立系銀河シミュレーションと観測量との比較」 第 3 回銀河進化学研究会 2016 年 6 月 3 日 東北大学
 19. 長峯健太郎 「Theoretical View on AGN-Starburst Connection: Merger vs. Smooth Accretion」 ALMA Workshop: Starburst-AGN Connection - Toward the Merger-Driven Unified Model for Triggering Nuclear Activities Science Workshop 2016 年 2 月 16 日-17 日 国立天文台
 20. K. Nagamine, “Recent Development in Numerical Cosmology and High-Redshift Galaxies-in ALMA Context”, East Asian ALMA Science Workshop (December 8, 2015, I-Site, Namba, Osaka)
 21. 長峯健太郎 「Recent Development in Numerical Cosmology and PFS」 PFS workshop 2015年11月13日 東京大学IPMU
 22. 長峯健太郎 「Recent Development in Numerical Cosmology and SWIMS」 TA0-SWIMS workshop 2015年9月17日 東京大学天文学教育センター
 23. 青山尚平 長峯健太郎 「Gadget-3 のためのダスト成長・破壊を取り入れたサブグリッドモデルの開発」 銀河・銀河間物質に関するワークショップ 2015年6月10日-11日 筑波大学
 24. 清水一紘 長峯健太郎 「数pcスケール宇宙論的流体計算に向けた準備」 銀河・銀河間物質に関するワークショップ 2015年6月10日-11日 筑波大学
 25. 長峯健太郎 「Recent Development in Numerical Simulations」 銀河・銀河間物質に関するワークショップ Tsukuba Galaxy-IGM Workshop 2015年6月10日-11日 筑波大学

26. 長峯健太郎 「High-z Galaxy Formation and Feedback」第2回銀河進化研究会 2015 年 6 月 3 日-5 日 名古屋大学
27. K. Nagamine, “Galaxy Formation at High Redshift”, ISSI-BJ GRB Workshop, ISSI-BJ (April 13-17, 2015, Beijing, China)

〔図書〕 (計 1 件)

“Numerical Simulations in Cosmology”
Encyclopedia of Cosmology, eds. K. Nagamine
(pp.1-26, pp.147-174), 2018, 320 pages.
World Scientific Publishing
ISBN: 978-981-4656-19-1

〔産業財産権〕

本研究は純粋理学であり、宇宙物理学の理論研究であるため、特許等の申請はない。

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://astro-osaka.jp/kn/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者 :

長峯 健太郎 (Nagamine, Kentaro)
大阪大学・理学研究科・教授
研究者番号 : 50714086

(2) 研究分担者 : なし

(3) 連携研究者 : なし

(4) 研究協力者 :

矢島秀伸 (YAJIMA, Hidenobu; 東北大学)
清水一紘 (SHIMIZU, Ikko; 大阪大学)
青山尚平 (AOYAMA, Shohei; 大阪大学、
ASIAA 台湾)
平下博之 (HIRASHITA, Hiroyuki; ASIAA,
台湾)
Kuan-Chou Hou (ASIAA)
Li-Hsin Chen (ASIAA)
Qirong Zhu (Penn State Univ., USA)
Sadegh Khochfar (Edinburgh, UK)
Claudio Dalla Vecchia (IAC, Spain)