

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740112

研究課題名(和文) 輻射流体シミュレーションを用いた銀河風駆動機構の解明

研究課題名(英文) The role of radiation feedback in driving galactic outflows

研究代表者

岡本 崇 (Okamoto, Takashi)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50541893

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)：銀河風と呼ばれる銀河から銀河間空間へのガスの流出現象を解明するため、そこで重要な役割を果たしていると考えられている大質量星から輻射の影響を調べた。そのために並列計算機を用いて効率的に輻射輸送を解くコードを開発した。また、ダストに対する輻射圧が銀河風を駆動する過程を簡単なモデルとして宇宙論的銀河形成シミュレーションに組み込み、この過程なしでは、星形成銀河のガスの金属量進化を説明できないことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For studying roles of radiation from young massive stars in driving galactic outflows, we have developed a new radiation transfer code that can efficiently run on massively parallel computers including a cluster of GPGPUs. We have also implemented a phenomenological model of radiation pressure on dust grains in cosmological simulations of galaxy formation. We find that, without this process, evolution of a stellar mass-gas metallicity relation of star-forming galaxies cannot be explained.

研究分野：理論天文学

キーワード：宇宙物理 銀河形成 数値シミュレーション 輻射輸送

### 1. 研究開始当初の背景

銀河の形成・進化においては、銀河内のガスの冷却を抑えたり、もしくは銀河内のガスを銀河間空間へ放出したりするための星間ガスの加熱現象(フィードバック)が重要であることがわかってきた。ところが主な加熱源として考えられていた超新星爆発だけではエネルギー的に足りそうになく、また大質量星が生まれてから超新星爆発を起こすまでの数100万年のタイムラグが銀河形成初期の星形成を抑制する上で致命的な致になることが明らかになった。そこで、大質量星からの輻射フィードバックが注目されてきたが、輻射輸送計算は6次元計算であり、その膨大な計算量からほとんど調べられていなかった。

### 2. 研究の目的

銀河内の星からの輻射が銀河風を駆動するメカニズムを調べ、超新星爆発と比較した場合の相対的重要性、及び、先に輻射フィードバックが起こってから超新星爆発が起こることによる相乗効果を明らかにする。その上で、銀河形成における輻射フィードバックの役割を明らかにする。

### 3. 研究の方法

輻射輸送計算を高速に行うためのコードを開発し、輻射流体シミュレーションを行う。同時に、宇宙論的銀河形成シミュレーションに輻射フィードバックを簡単な現象論的モデルとして取り入れ、その効果を検証する。

### 4. 研究成果

輻射フィードバックにおいて重要となる散乱過程を並列計算機上で高速に解くための輻射輸送コードを開発した(Tanaka et al. 2015)。また、宇宙論的シミュレーションにダストによる赤外光の多重散乱の効果を取り入れた。この多重散乱によるフィードバックはより金属量の高い銀河で強く働く性質がある。そのため、星形成銀河の星質量とガスの金属量の間関係は、この過程を考慮しなかったものよりもゆるやかになり、赤方偏移進化も含めて観測をうまく説明できるようになった(Okamoto et al. 2014)。

この宇宙論的シミュレーションの模擬観測を行うことによりALMA望遠鏡で高赤方偏移の銀河から[OIII]輝線が検出できることを明らかにした(Inoue et al. 2014)。我々は実際にALMA望遠鏡を用いた観測を行い、この輝線の検出に成功している(Inoue et al. in press)。

また、ダストによる多重散乱の効果も輻射流体シミュレーションを用いて直接調べる試みも進めており、ダストにより赤外の光学的厚みが1を超えるようになると、銀河風はほぼダストに対する輻射圧だけで駆動され、紫外線により水素やヘリウムが電離・加熱される効果は無視できるようになること

が明らかになった(Ishiki & Okamoto 2016, in press)。

### 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11件)

Makiya, Ryu; Enoki, Motohiro; Ishiyama, Tomoaki; Kobayashi, Masakazu A. R.; Nagashima, Masahiro; Okamoto, Takashi; Okoshi, Katsuya; Oogi, Taira; Shirakata, Hikari, 査読有り,

“The New Numerical Galaxy Catalog (2GC): An updated semi-analytic model of galaxy and active galactic nucleus formation with large cosmological N-body simulations”, 2016, Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, id.25 26 pp

DOI: 10.1093/pasj/psw005

Okamoto, Takashi; Isoe, Mari; Habe, Asao, 査読有り,

“Cosmic evolution of bars in simulations of galaxy formation”, 2015, Publications of the Astronomical Society of Japan, 67, id.6318 pp.

DOI: 10.1093/pasj/psv037

Tanaka, Satoshi; Yoshikawa, Kohji; Okamoto, Takashi; Hasegawa, Kenji, 査読有り,

“A new ray-tracing scheme for 3D diffuse radiation transfer on highly parallel architectures”, 2015, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 67, Issue 4, id.6216 pp.

DOI: 10.1093/pasj/psv027

Shirakata, Hikari; Okamoto, Takashi; Enoki, Motohiro; Nagashima, Masahiro; Kobayashi, Masakazu A. R.; Ishiyama, Tomoaki; Makiya, Ryu, 査読有り,

“The impact of dust in host galaxies on quasar luminosity functions”, 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 450, L6-L10

DOI: 10.1093/mnrasl/slv035

Okamoto, Takashi; Shimizu, Ikkoh; Yoshida, Naoki, 査読有り,

“Reproducing cosmic evolution of galaxy population from  $z = 4$  to 0”, 2014, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, id.70 15 pp.

DOI: 10.1093/pasj/psu046

Shimizu, Ikkoh; Inoue, Akio K.; Okamoto, Takashi; Yoshida, Naoki, 査読有り,  
“Physical properties of UDF12 galaxies in cosmological simulations”,  
2014, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 440, p.731-745  
DOI: 10.1093/mnras/stu265  
Inoue, A. K.; Shimizu, I.; Tamura, Y.; Matsuo, H.; Okamoto, T.; Yoshida, N., 査読有り,  
“ALMA Will Determine the Spectroscopic Redshift  $z > 8$  with FIR [O III] Emission Lines”,  
2014, The Astrophysical Journal Letters, 780, id. L18, 5 pp.  
DOI: 10.1088/2041-8205/780/2/L18  
Tanikawa, Ataru; Yoshikawa, Kohji; Nitadori, Keigo; Okamoto, Takashi, 査読有り,  
“Phantom-GRAPe: Numerical software library to accelerate collisionless N-body simulation with SIMD instruction set on x86 architecture”,  
2013, New Astronomy, 19, p. 74-88.  
DOI: 10.1016/j.newast.2012.08.009  
Kawata, D.; Okamoto, T.; Gibson, B. K.; Barnes, D. J.; Cen, R., 査読有り,  
“Calibrating an updated smoothed particle hydrodynamics scheme within gcd+”,  
2013, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 428, p.1968-1979  
DOI: 10.1093/mnras/sts161  
Okamoto, Takashi, 査読有り,  
“The origin of pseudo-bulges in cosmological simulations of galaxy formation”,  
2013, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 428, p.718-728  
DOI: 10.1093/mnras/sts067  
Shimizu, Ikkoh; Yoshida, Naoki; Okamoto, Takashi, 査読有り,  
“Submillimetre galaxies in cosmological hydrodynamic simulations: source number counts and the spatial clustering”,  
2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 427, pp. 2866-2875.  
DOI:  
10.1111/j.1365-2966.2012.22107.x

[学会発表](計 17 件)

Okamoto, Takashi,  
“Metal enrichment of passive galaxies in cosmological simulations”, Workshop for ALMA

Large Proposal of gALactic Cold gAs (ALPACA) Survey, 1-3 Dec 2015, 国立天文台三鷹キャンパス(東京都・三鷹市)  
Okamoto, Takashi,

“Chemical enrichment of passive galaxies in cosmological simulations”, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015), 4-8 Nov 2015, 奈良春日野国際フォーラム(奈良県・奈良市)  
Okamoto, Takashi,

“Chemical enrichment of passive galaxies in cosmological simulations of galaxy formation”, 1st Roman Juszkiewicz Symposium “The non-linear Universe”, 23-28 Aug 2015, Warsaw (Poland)

岡本崇, “銀河形成シミュレーションの現状と PFS に期待すること”, すばる PFS によるサイエンス検討会, 2015年7月9-11日, 国立天文台三鷹キャンパス(東京都・三鷹市)

岡本崇,

“Chemical evolution of galaxies and the role of feedback”, 第二回 銀河進化研究会, 2015年6月3-5日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)

岡本崇, “シミュレーションの模擬観測と、銀河の棒状構造の宇宙論的進化”, ALMA ワークショップ (high- $z$  + nearby galaxies), 国立天文台三鷹(東京都・三鷹市), 2014年10月20-21日

岡本崇,

“銀河形成シミュレーションでみる bar の形成と進化”, 日本天文学会 2014年秋季年会, 山形大学(山形県・山形市), 2014年9月11-13日

岡本崇,

“Reproducing evolution of galaxy population from  $z = 4$  to 0 in hydrodynamic simulations of galaxy formation”, 第1回銀河進化研究会, 国立天文台三鷹(東京都・三鷹市), 2014年6月4-6日

Takashi, Okamoto,

“Evolution of galaxy populations in cosmological simulations of galaxy formation”, The impact of galactic structure on star formation, Hokkaido University (Sapporo, Japan) 16-21 Feb. 2014

岡本崇,

“円盤銀河とフィードバック”, 円盤銀河の形成と進化研究会, 国立天文台三鷹(東京都・三鷹市), 2013年9月26-28日

Okamoto, Takashi,

“Galaxy formation from simulation side”, Subaru Ground Layer AO Science Workshop, Hokkaido University, (北海

道・札幌市), 2013年6月13-14日

岡本崇,

"スーパーコンピュータによる銀河形成", 第9回 創成シンポジウム, 「スーパーコンピュータ "京"でせまる最先端の科学・技術」, 北海道大学(北海道・札幌市), 2013/3/4

岡本 崇,

"Formation of high-redshift disks and pseudo-bulges in nearby galaxies", ALMA 時代の宇宙の構造形成理論: 第1世代から第n世代へ, 北海道大学(北海道・札幌市), 2013/1/26-28

岡本崇,

"Galaxy stellar mass functions obtained by cosmological simulations", 日本天文学会 2013 年秋季年会, 東北大学(宮城県・仙台市), 2013年9月19-21日

岡本 崇,

"理論シミュレーションで見た銀河形成研究の現状 (I) High-redshift discs and their descendants at  $z = 0$ ", 銀河形成解剖ワークショップ "Resolved Views of Galaxy Formation and Evolution", (Hilo, USA), May 29-31, 2012

Okamoto, Takashi,

"Cosmological pseudobulge formation", First stars IV -From Hayashi to the Future-, Hertpia Kyoto, (京都府・京都市), MAY 21-25, 2012

Okamoto, T.,

"Shaping galaxies by feedback: satellites, discs, and bulges", Disc galaxy formation in a cosmological context, (Heidelberg, Germany), May 14-18, 2012

[その他]

ホームページ等

<http://astro3.sci.hokudai.ac.jp/~okamoto/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 崇 (OKAMOTO, Takashi)

北海道大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号: 50541893