

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287040

研究課題名(和文) 低金属度ガスのダイナミクスで解明する宇宙初期天体の起源

研究課題名(英文) Theoretical study on low-metallicity star formation in the early universe

研究代表者

大向 一行 (Omukai, Kazuyuki)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：70390622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙論的シミュレーションと星形成過程の輻射流体シミュレーションを組み合わせることにより、宇宙初代星の形成過程を調べた。その結果、宇宙初代星は典型的には太陽の数10倍から数100倍の大質量星であることがわかった。

また、非常に強い紫外線が存在する場合には、太陽の10万倍を超える超大質量星も形成されうる。

また第二世代星の形成環境である低金属度の星間ガスの物理状態を3次元流体シミュレーションにより調べた。その結果、比較的金属度が高い、もしくは輻射場が強い場合には熱不安定性により二相媒質となることが分かった。多相媒質では乱流が長時間維持されるため星形成率が低くなるものと予想される。

研究成果の概要(英文)：We have studied formation of the first stars in the universe by combining cosmological simulations and radiation hydrodynamics for star formation. We have found that the first stars are typically massive in the range of a few tens to a few hundreds of the Sun. In exceptionally intense ultraviolet radiation fields, even supermassive stars with mass more than hundred thousand times the Sun can be formed.

We have also studied the physical conditions in low-metallicity interstellar media by way of three-dimensional hydrodynamics. We have found that multi-phase media is realized in gases with relatively high-metallicity and strong ultraviolet irradiation. In such environment, turbulence can be maintained for long time and so the star formation would be less efficient.

研究分野：理論宇宙物理学

キーワード：低金属度星 星形成 巨大ブラックホール 銀河形成

1. 研究開始当初の背景

宇宙背景輻射をはじめとした観測により、いわゆる標準宇宙モデルならびに原始密度ゆらぎを種とした重力不安定にもとづく構造形成説は既に定説として確立している。しかしながら、今日の宇宙に見られる多様な階層の天体の起源について、我々はまだ十分に予言能力のある理論モデルを有しているとはいえない。これは、宇宙初期天体の材料となる低金属度ガスのダイナミクスについて我々が未だ十分に理解していないことに原因の大きな一端がある。この状況を打開すべく、これまで宇宙最初の星（初代星）の材料となる始原ガス（ビッグバン元素合成時に生成される、H、He と微量のLi からなるガス）からの星形成過程が研究されてきた。始原ガス雲のH₂分子輝線冷却による重力収縮の結果、初代星が形成されることは既に1960年代から指摘されていた。しかし実際に数値シミュレーションにより初代星形成過程が研究できるようになったのは、計算機能力が向上した過去10年間ほどである。その中で我々は、初代星の原始星（誕生直後の星で、内部で核融合はまだ始まっていない）誕生までの過程を宇宙論的3次元計算により解明し（吉田、大向ほか2008）、更にその原始星が周囲のガスの降着により成長し、最終的に核融合反応により輝く主系列星に達するまでの全過程をシミュレートすることに成功した（細川、大向ほか2011）。その結果、初代星の降着成長は、降着ガスへの星からの輻射加熱が激しくなる結果、星が太陽の数10倍となった段階で終わり、これが初代星の典型的な質量となることが明らかとなった。また母体の雲が標準的な角運動量を持っている場合には、星は連星か数個程度の小星団として形成されることも分かった（町田、大向ほか2008）。

以上のように初代星の性質を理論的に大筋で解明することが出来たが、同時に以下のような疑問が残った。

□ 初代星は超大質量星ではなかった。もし超大質量であったら、深宇宙に近年発見されている超大質量ブラックホールの種となるのではという期待がこれまでであったが、数10太陽質量の種ブラックホールからでは降着成長に時間がかかり過ぎる。ではこの種ブラックホールの起源は何なのか？ 超大質量星は全く形成されなかったのか？

□ 初代星は小質量星ではなかった。現在の近傍宇宙で形成されている星の多くは太陽程度の小質量星である。つまり銀河進化のある段階で形成される星の典型的な質量が小さくなったはずであるが、この物理的メカニズムは何なのか？

2. 研究の目的

以上の疑問に答えるため、銀河形成期に想定しうる多様な環境下でのガス雲内部での星形成過程について、現段階における初代星形成の理解程度にまで進め、その標準理論を構築することを目指すことにする。

例として以下のような状況が考えられる。

A) 先行する天体からの強い輻射場を受けている始原ガス雲

B) 衝撃波を経験した始原ガス雲

C) 微量の重元素が存在するガス雲（種族II雲）

A) の場合、非常に強い輻射場中ではH₂形成が阻害されて、H原子冷却により数千Kにとどまることが知られている（大向2001）。B) についても衝撃波が高密度で発生する場合にはH₂が解離して再生成が起こらないため、やはりH原子冷却により収縮することが分かってきた（稲吉 & 大向2011）。これらH原子冷却により収縮する雲（H原子冷却雲）は急激な冷却フェーズを経験しないため分裂が起こらず単一の塊として収縮が続くと考えられている。さらに形成後の原始星への降着率が高く、最終的に超大質量星が誕生するのではと予想されている（Bromm & Loeb2003）。今回の研究は、これらが実際にどうなのかを知ることが目的である。

C) の種族II雲に関しては、これまでの研究から、ダストの熱放射による冷却により小質量分裂片が形成され、小質量星からなる星団が形成されるのではという予想があるが、その当否を確認する。

3. 研究の方法

始原ガス雲から形成される星の降着進化が終了するまでを数値シミュレーションにより調べることで、上記予想の当否を確認する。

種族II雲の場合についても雲の収縮・分裂過程とその後の原始星の降着進化過程を詳細な数値シミュレーションにより調べ、宇宙最初の低質量星からなる星団形成過程を明らかにする計画である。

4. 研究成果

(1) 重元素が全くない環境で形成される宇宙最初の星（初代星）の形成過程に関して：

初代星の形成環境と最終的に形成される星の質量との関係を調べた。具体的には宇宙論的シミュレーション結果から得られる多様な物理的性質（質量、密度、回転など）を持った八ローの内部での星形成過程を軸対称2次元の輻射流体シミュレーションと中心原始星の

進化計算を結合させて、同時に実行することにより調べた。

まず100程度のハローに対して解析を行った結果、初代星の質量分布は数十太陽質量あたりにピークが存在し、数百太陽質量あたりまで広く分布することが分かった(平野他2014)。

つぎに、さらに宇宙論的シミュレーションの計算領域を大きくとることで、その内部に1000を超える初代星形成ハローを同定し、その幾つかに対して、前述の輻射流体計算を行うことで形成される星の質量を求めることに成功した(平野他2015)。形成される星の質量はその母体となるハローの性質と相関していることが分かったので、この関係を用いて計算領域内に形成される星の質量分布を導出することができた。この解析の際には領域内の輻射場の影響も適切に取り入れた。

また限られた数例に対してであるが、初代星の原始星の降着進化過程を3次元輻射数値流体計算により解析した(細川他2016)。その結果、最終的に形成される星の質量は以前実行した2次元計算の結果と大きく変わらず、数10から数100太陽質量程度であることが分かった。一方、星周円盤の分裂は形成される星の質量を下げるまで思われていたが、実際にはそれによって引き起こされる間欠的なガス降着は原始星からの輻射フィードバックを弱める効果があり、最終的な星の質量を大きくする場合もあることが分かった。

回転している原始星へのガス降着の際に、星から輻射が大きくなって、星表面で遠心力と輻射力の合計が重力と等しくなる状況が起こりえるが、その後、ガスの降着は可能かどうかを、星周円盤の構造を計算することにより調べた(高橋&大向2017)。その結果、円盤内縁部では輻射力の為、ガスの落下が十分ゆっくりとなり、角運動量が外部へ輸送される結果、降着流は星へ角運動量を持ち込まず、降着は継続可能であることが分かった。

さらに宇宙初期の星形成領域でも超新星残骸は多数存在し、そこで宇宙線が加速し、銀河間空間に拡散していくものと思われる。予想されている星形成率をもとにこの強度を見積もり、星形成の際の熱進化過程に対するこの影響を計算した。その結果、HD分子の冷却がこれまで考えられていた以上に重要になりえることが分かった。これは形成される星の質量を小さくする方向に働く(仲内他2014)。

これ以外にも銀河系サイズの銀河の形成過程

に関する準解析的モデルを用いて、現在の銀河系ハロー中の低金属度星の重元素分布からゼロメタル星の初期質量関数へ制限を議論し、数100太陽質量の大質量星の割合はそれほど多くないことを見出した(de Bressana他2017)。

(2) 宇宙初期における超大質量星の形成可能性について：

外部から強い輻射が照射するような環境では全く異なる星形成過程が進行し、最終的に10万太陽質量を超える超大質量星が形成される可能性がある。

このような水素分子形成が全く起こらない環境が実現されるために必要な輻射場の強度を現実的な銀河スペクトルを用いることで見積もった(杉村他2014)。

その結果、これまで思われていた値よりも1桁ほど大きな値が必要であることが分かった。これは超大質量星の形成個数が1Gpc立方に一つ程度と極めて小さいものであることを示唆する。

その後、上記をさらに発展させ、水素分子イオンの非平衡準位分布を考慮して再解析した(杉村他2016)。その結果、輻射場の特徴的な温度が数千度と低い場合にはこの過程を考慮しないと正しい値は得られないものの、宇宙初期において想定される輻射場はより高温であるので、前回得られた値で問題ないことが分かった。

外部輻射場により水素分子形成が完全に阻害されているような状況の星形成雲の進化を3次元流体シミュレーションにより解析した(稲吉他2014)。その結果、超音速の乱流があるような状況でも激しい分裂は抑制され、ほぼ単一の塊として収縮していくことが分かった。この際、周囲のガスは高密度であり、形成後の原始星は1太陽質量毎年を上回る急激なガス降着により成長することが予想された。これから最終的に超大質量星へと成長するものと予想される。

また微量の重元素が存在する場合に、どのような星が形成されるか調べるため、ガス中にダスト粒子が存在する場合に対して同様の3次元流体計算を実行した(Latif他2016)。その結果、現在の銀河系に比べて、ダストが1万分の1以上存在すると、ダスト冷却の影響でガス雲が分裂してしまい、大質量にならないことが示唆された。超大質量原始星の降着進化を調べ、それがブラックホールへと重力崩

壊す際の最終質量を降着率の関数として与えた。現実的な降着率の範囲では、数10万太陽質量程度となった。

(3) 微量の重元素を含む環境における種族II星の形成に関して：

微量の重元素をもった第二世代以降の初期世代星の形成に関して、原始星が降着成長する際に、その周りに形成される降着円盤の重力不安定性を定常円盤モデルを用いて調べた(田中&大向2014)。その結果、重元素が全くない始原ガスの場合と重元素が太陽程度ある現在の星間ガスの場合には円盤は比較的安定であり、せいぜい連星か少数の星団しかできないと予想されるものの、微量の重元素を含むガスの場合には非常に不安定であり、多数の星に分裂することが分かった。その結果、このようなガス中では小質量星が形成される傾向が強いことが明らかとなった。

また形成環境である低金属度の星間ガスの物理状態を解明するため、低金属度ガスを衝撃波が通過した後に熱不安定性により多相媒質が形成される様子の3次元数値シミュレーションを実行した(井上&大向2015)。それにより炭素イオンが冷却剤として重要な状況(比較的金属度が高い、もしくは輻射場が強い)では熱不安定性により二相媒質となるものの、水素分子が主要な冷却剤である重元素が非常に低い状況では熱不安定性は弱くなり、ガスは一相となることが分かった。多相媒質では乱流が長時間維持されるため星形成率が低くなるものと予想される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計24件)

以下、全て査読有

1. K. Sugimura, T. Hosokawa, H. Yajima, & K. Omukai (2017)
“Rapid Black Hole Growth under Anisotropic Radiation Feedback”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, in press
2. B. Yue, A. Ferrara, F. Pacucci, & K. Omukai (2017)
“Triggering the Formation of Direct Collapse Black Holes by Their Congeners”

The Astrophysical Journal, 838, id.111, 17pp.

3. D. Nakauchi, T. Hosokawa, K. Omukai, H. Saio, & K. Nomoto (2017)
“Do stellar winds prevent the formation of supermassive stars by accretion?”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 465, 5016
4. M. de Bressan, S. Salvadori, R. Schneider, R. Valiante & K. Omukai (2017)
“Limits on Pop III star formation with the most iron-poor stars”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 465, 926
5. H. Umeda, T. Hosokawa, K. Omukai & N. Yoshida (2016)
“The Final Fates of Accreting Supermassive Stars”
The Astrophysical Journal, 830, L34
6. T. Hosokawa, S. Hirano, R. Kuiper, H. W. Yorke, K. Omukai, & N. Yoshida (2016)
Formation of Massive Primordial Stars: Intermittent UV Feedback with Episodic Mass Accretion
The Astrophysical Journal, 824, id.119, 26pp.
7. Y. Sakurai, E. I., Vorobyov, T. Hosokawa, N. Yoshida, K. Omukai & H. W. Yorke (2016)
“Supermassive star formation via episodic accretion: protostellar disc instability and radiative feedback efficiency”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 459, 1137
8. M. A. Latif, K. Omukai, M. Habouzit, D. R. G. Schleicher & M. Volonteri (2016)
“Impact of Dust Cooling on Direct-collapse Black Hole Formation”
The Astrophysical Journal, 823, id.40, 13pp.
9. R. Valiante, R. Schneider, M. Volonteri & K. Omukai (2016)
“From the first stars to the first black holes”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 457, 3356
10. K. Sugimura, C. M. Coppola, K. Omukai, D. Galli, & F. Palla (2016)
“Role of the H₂⁺ channel in the

- primordial star formation under strong radiation field and the critical intensity for the supermassive star formation ”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 457, 3356
11. T. Inoue & K. Omukai (2015)
“ Thermal Instability and Multi-phase Interstellar Medium in the First Galaxies ”
The Astrophysical Journal, 805, id.73, 11pp.
 12. S. Hirano, T. Hosokawa, N. Yoshida, K. Omukai & H. W. Yorke (2015)
“ Primordial star formation under the influence of far ultraviolet radiation: 1540 cosmological haloes and the stellar mass distribution ”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 448, 568-587
 13. H. Susa, K. Doi & K. Omukai (2015)
“ Dissipation of Magnetic Fields in Star-forming Clouds with Different Metallicities ”
The Astrophysical Journal, 801, id.13, 12pp.
 14. G. Chiaki, S. Marassi, T. Nozawa, N. Yoshida, R. Schneider, K. Omukai, M. Limongi & A. Chieffi (2015)
“ Supernova dust formation and the grain growth in the early universe: the critical metallicity for low-mass star formation ”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 446, 2659-2672
 15. K. Inayoshi, K. Omukai & E. Tasker (2014)
“ Formation of an embryonic supermassive star in the first galaxy ”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 445, L109-L113
 16. K. Sugimura, K. Omukai & A. K. Inoue (2014)
“ The critical radiation intensity for direct collapse black hole formation: dependence on the radiation spectral shape ”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 445, 544-553
 17. S. Marassi, G. Chiaki, R. Schneider, M. Limongi, K. Omukai, T. Nozawa, A. Chieffi, & N. Yoshida (2014)
“ The Origin of the Most Iron-poor Star ”
The Astrophysical Journal, 794, id.100, 12pp.
 18. D. Nakauchi, K. Inayoshi & K. Omukai (2014)
“ Conditions for HD cooling in the first galaxies revisited: interplay between far-ultraviolet and cosmic ray feedback in Population III star formation ”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 442, 2667-2679
 19. G. Chiaki, R. Schneider, T. Nozawa, K. Omukai, M. Limongi, N. Yoshida, & A. Chieffi (2014)
“ Dust grain growth and the formation of the extremely primitive star SDSS J102915+172927 ”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 439, 3121-3127
 20. K. E. I. Tanaka & K. Omukai (2014)
“ Gravitational instability in protostellar discs at low metallicities ”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 439, 1884-1896
 21. S. Hirano, T. Hosokawa, N. Yoshida, H. Umeda, K. Omukai, G. Chiaki, & H. W. Yorke (2014)
“ One Hundred First Stars: Protostellar Evolution and the Final Masses ”
The Astrophysical Journal, 781, 60, id.60, 22pp.
 22. T. Hosokawa, H. W. Yorke, K. Inayoshi, K. Omukai, & N. Yoshida (2013)
“ Formation of Primordial Supermassive Stars by Rapid Mass Accretion ”
The Astrophysical Journal, 778, 178, id.178, 13 pp.
 23. K. E. I. Tanaka, T. Nakamoto, & K. Omukai (2013)
“ Photoevaporation of Circumstellar Disks Revisited: The Dust-free Case ”
The Astrophysical Journal, 773, 155
 24. K. Inayoshi, T. Hosokawa, & K. Omukai (2013)
“ Pulsational instability of supergiant protostars: do they grow supermassive by accretion? ”
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 431, 3036

〔学会発表〕(計 4 件)

1. “Seed black hole formation via direct collapse”
K. Omukai
Understanding the growth of the first supermassive black holes,
Symposium in EWASS 2015 meeting
2015年6月22日 於 University of La Laguna, Tenerife, Spain
2. “Super-massive star formation: embryos of SMBHs?”
K. Omukai
First stars, galaxies, and black holes: Now and Then
2015年6月19日 於 University of Groningen, Groningen, The Netherlands
3. “Supermassive star formation in the early universe”
K. Omukai
Unsolved Problems in Astrophysics and Cosmology
2014年7月5日 於 Eotvos U., Budapest, Hungary
4. “Supermassive star formation via direct collapse”
K. Omukai
Cosmic Dawn at Ringberg
2013年6月18日 於 Ringberg Castle, Munich, Germany

〔図書〕(計 1 件)

「宇宙と生命の起源2」
(岩波ジュニア新書) 分担執筆
小久保英一郎、嶺重慎 編著、
2014年、256ページ

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

大向 一行 (Omukai, Kazuyuki)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号: 70390622

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

吉田 直紀 (Yoshida, Naoki)

東京大学・理学系研究科・教授

研究者番号: 90377961

細川 隆史 (Hosokawa, Takashi)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 30413967

町田 正博 (Machida, Masahiro)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号: 10402786

(4)研究協力者

Schneider, Raffaella

ローマ大学・理学部・准教授