

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21684007

研究課題名(和文) 金属欠乏星形成過程の理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical study on the formation of metal-poor stars

研究代表者

大向 一行 (Omukai, Kazuyuki)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70390622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,100,000円、(間接経費) 5,430,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の初代星は重元素を含まない水素とヘリウムのみからなる始原ガスから形成される。初代星の質量は、その後の天体形成に多大な影響を与える重要な量である。我々は宇宙論的なシミュレーションから得られた初期条件のもとで、初代原始星の誕生と、周囲の物質を重力によって引き寄せて成長する過程を輻射流体計算によって解析した。その結果、中心の原始星が太陽の約40倍の時に星からの強力な紫外線が周りの物質を加熱し、外側に吹き飛ばすことで星の成長が終わることが分かった。太陽の数10倍という結果はこれまで考えられてきた値よりも小さいが、銀河中の低金属度星の元素組成の観測から推定されている値とは整合的である。

研究成果の概要(英文)：The first stars in the universe were formed from the primordial pristine gas, made only of hydrogen, helium and trace light elements. How massive were those stars is crucial for subsequent structure formation. Starting from the initial condition obtained by cosmological simulation, we carried out radiation hydrodynamical calculation for the first star formation. We found that when the protostar becomes 40 times more massive than the Sun, the emitted UV radiation becomes so intense that the ambient material is pushed outward, terminating accretion onto the star. The final stellar mass is set at this moment. Although this value of the first star's mass is lower than previously considered by theoretical arguments, it is in accordance with observation of the abundance ratio of low-metallicity stars in the Galactic halo.

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：星形成 銀河形成

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙背景輻射その他の観測により、宇宙項を持った、冷たい暗黒物質にもとづく宇宙モデルおよび、そこでの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が、現在の宇宙の諸々の構造の起源について、我々が既に十分に予言能力のある理論を有してるとは言うことができない。これは、原始銀河雲中でのバリオンガスのダイナミクスについて我々が未だ良く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、宇宙最初の原始銀河雲である、「初代天体」内での宇宙最初の星（初代星）形成過程が活発に研究されていた。初代星の形成については初期条件が宇宙論的に与えられたものとなることから、一意的に明確に決まる。その素材もビッグバン元素合成により生成された水素、ヘリウムと微量の軽元素のみからなる始原ガスであり、その熱・輻射過程は比較的単純である。そのため、重要な過程を全て3次元シミュレーションにも取り込むことが可能となった。我々のグループは実際に、宇宙最初の原始星の誕生まで計算することに成功したところであった。しかしながら、初代星の最終的な質量は未解明のままであった。

また第二世代星は微量の重元素を持ったガスから形成されるが、ここでの星形成過程は我々が一様近似モデルを用いて熱進化を計算していたものの、輻射場の強度、ダストの性質などといった環境への依存性についての考察は十分に行われていなかった。

## 2. 研究の目的

一つは宇宙初代星の形成過程を2、3次元数値シミュレーションを用いて解析し、形成される星の質量を解明することである。もう一つは微量の重元素を持ったガスから形成される第二世代星形成に関して、星形成環境とそこで生まれる星の性質について大まかな見積もりを得て、今後の本格的な数値シミュレーションへの足がかりとすることである。

## 3. 研究の方法

宇宙初代星形成について：

形成された星が実際にどれくらいの大きさの星となるかは誕生した原始星がその後、周囲のガスを降着して成長する過程がいつまで続くかにより決まる。そこで、初代星の降着成長過程を輻射流体計算により追跡して、初代星の質量が最終的にいくらになるかを見積もった。

第二世代星形成について：

輻射場（FUV, 宇宙線）の強度、ダストのサイズ分布や組成の異なるガスに対して、一様モデルおよび一次元球対称の計算を行い、高密度雲が原始星へと収縮する際の温度進化を

調べ、その結果をもとに雲の分裂条件を見積もる。

## 4. 研究成果

宇宙初代星形成について：

原始星へ降着するガスは角運動量の影響により降着は円盤を通じて進むものと考えられる。そこで円盤降着の効果を見積もるため、次に軸対称性を課した2次元輻射流体計算を行った。この結果、中心星の質量が40太陽質量になった段階で、円盤ガスが光解離による加熱による蒸発してしまい、星への降着が止まることが分かった。この結果はこれまで低金属度星の重元素組成比から予想されていた初代星の質量とよく一致し、それまでの理論（太陽の100倍を超える大質量星の形成を予想していた）と観測の矛盾を解決した。この結果は宇宙の初代星への降着が止まり、一人前の主系列星になるまで計算した最初の多次元計算であり、非常なインパクトをもって受け入れられ、国内外で広く報道された。

第二世代星形成について：

次に微量の重元素汚染の星形成過程への影響を調べるため、重元素量が異なった値をとる高密度コアが原始星へと収縮する過程を異なった輻射場強度（FUV, 宇宙線）、異なった初期の電離度のもとで解析し、その温度進化を明らかにした。この際に重要となる熱的・化学的過程を選び出し、系統的に議論した。

星間ダストがある程度存在する場合には、激しいダスト冷却期が存在するので、これにより収縮するコアの分裂が起こることを予想された。その場合は低質量（太陽質量以下）の分裂片、ひいては星が誕生することになる。そこで、ダストによる冷却が起こる際に、高密度コアが分裂する条件に関して流体計算を行うことで調べた。これにより、太陽の10万分の1程度の僅かな重元素量でも、その多くがダストに凝縮している場合には低質量星形成が可能であることが見出された。また実際にハロー中で発見された低金属度星に対して、このようなダスト冷却分裂によって形成された小質量星であることを指摘した。

これらの低重元素量ガスの熱進化の解析では、星間ダストの性質として、現在の星間媒質中のもの（AGB星起源）と同じものを仮定してきたが、宇宙初期では超新星起源のダストが主となるため、良くない仮定である可能性がある。そこで、我々は宇宙初代星の超新星から形成されたダストのモデルを用いて、そのようなダストを含む気体の熱進化を調べた。その結果、AGB星起源のダストよりも少量でも輻射冷却、分子形成といった過程に重要となることがわかった。

## 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 22 件)

1. 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, 査読有
2. 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, id.60, 22pp., 査読有
3. 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, id.178, 13pp., 査読有
4. K. E. I. Tanaka, T. Nakamoto, & K. Omukai (2013)  
“Photoevaporation of Circumstellar Disks Revisited: The Dust-free Case”  
The Astrophysical Journal, 773, id.155, 10pp., 査読有
5. 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, 3036-3044, 査読有
6. T. Hosokawa, N. Yoshida, K. Omukai, & H. W. Yorke (2012)  
“Protostellar Feedback and Final Mass of the Second-Generation Primordial Stars”  
The Astrophysical Journal, 760, id.L37, 5pp., 査読有
7. K. Omukai (2012)  
“Do the environmental conditions affect the dust-induced fragmentation in low-metallicity clouds?: Effect of pre-ionization and far-ultraviolet/cosmic-ray fields”  
Publications of the Astronomical Society of Japan, 64, 114 (9pages), 査読有
8. T. Hosokawa, K. Omukai, & H. W. Yorke (2012)  
“Rapidly Accreting Supergiant Protostars: Embryos of Supermassive Black Holes?”  
The Astrophysical Journal, 756, id.93, 10pp., 査読有
9. R. Smith, T. Hosokawa, K. Omukai, S. O. C. Glover, & R. S. Klessen (2012)  
“Variable Accretion Rates and Fluffy First Stars”  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 424, 457-463, 査読有
10. R. Schneider, K. Omukai, M. Limongi, A. Ferrara, R. Salvaterra, A. Chieffi, & S. Bianchi (2012)  
“The formation of the extremely primitive star SDSS J102915+172927 relies on dust”  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 424, L60-L64, 査読有
11. K. Inayoshi, & K. Omukai (2012)  
“Supermassive black hole formation by the cold accretion shocks in the first galaxies”  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 422, 2539-2546, 査読有
12. R. Schneider, K. Omukai, B. Simone, & R. Valiante (2012)  
“The first low-mass stars: critical metallicity or dust-to-gas ratio?”  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 419, 1566-1575, 査読有
13. T. Hosokawa, K. Omukai, N. Yoshida, & H. W. Yorke (2011)  
“Protostellar Feedback Halts the Growth of the First Stars in the Universe”  
Science, 334, 1250-1253, 査読有
14. K. Inayoshi, & K. Omukai (2011)  
“Effect of cosmic ray/X-ray ionization on supermassive black hole formation”  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 416, 2748-2759, 査読有
15. K. Omukai, T. Hosokawa, & N. Yoshida (2010)  
“Low-Metallicity Star Formation: Prestellar Collapse and Protostellar Accretion in the Spherical Symmetry”  
The Astrophysical Journal, 722, 1793-1815, 査読有
16. T. Hosokawa, H. W. Yorke, & K. Omukai (2010)  
“Evolution of Massive Protostars via Disk Accretion”  
The Astrophysical Journal, 721, 478-492, 査読有

17. R. Schneider, & K. Omukai (2010)  
“Metals, dust and the cosmic microwave background: fragmentation of high-redshift star-forming clouds”  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 402, 429-435, 査読有

18. T. Nagakura, T. Hosokawa, & K. Omukai (2009)  
“Star formation triggered by supernova explosions in young galaxies”  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 399, 2183-2194, 査読有

19. H. Hirashita & K. Omukai (2009)  
“Dust coagulation in star formation with different metallicities”  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 399, 1795-1801, 査読有

20. M. N. Machida, K. Omukai, T. Matsumoto, & S. Inutsuka (2009)  
“Binary formation with different metallicities: dependence on initial conditions”  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 399, 1255-1263, 査読有

21. M. N. Machida, K. Omukai, & T. Matsumoto (2009)  
“Star Formation in Relic H II Regions of the First Stars: Binarity and Outflow Driving”  
The Astrophysical Journal, 705, 64-67, 査読有

22. T. Hosokawa, & K. Omukai (2009)  
“Low-Metallicity Protostars and the Maximum Stellar Mass Resulting from Radiative Feedback: Spherically Symmetric Calculations”  
The Astrophysical Journal, 703, 1810-1818, 査読有

〔学会発表〕(計 6 件)

1. “Supermassive star formation via direct collapse”  
Cosmic Dawn at Ringberg,  
大向一行  
2013年6月18日 於 Ringberg Castle, Germany

2. “Star formation in low-metallicity gas: thermal and chemical processes”  
The low-metallicity ISM: Chemistry, Turbulence and Magnetic Fields,  
大向一行  
2012年10月8日 於 Goettingen U., Germany

3. “Star formation in the early universe”  
Death of Massive Stars: Supernovae & Gamma-Ray Bursts,  
大向一行  
2012年3月15日 於 Nikko, Japan

4. “Massive star formation in high-z and local universe”  
Formations of Compact Objects: from the cradle to the grave  
大向一行  
2012年3月7日 於 Waseda U., Japan

5. “Massive, low-mass and super-massive star formation in low-metallicity gas”  
First Galaxies,  
大向一行  
2011年6月27日 於 Ringberg Castle, Germany

6. “Low-metallicity star formation and Pop III-II transition”  
大向一行  
Deciphering the Ancient Universe with Gamma-ray Bursts,  
2010年4月20日 於 Kyoto, Japan

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1)研究代表者  
大向 一行 (Omukai, Kazuyuki)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：70390622

(2)研究分担者

( )

研究者番号：

(3)連携研究者

( )

研究者番号：