

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：34506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400279

研究課題名(和文) 輻射流体計算による初代星形成の研究

研究課題名(英文) Studies on the formation of first stars by radiation hydrodynamical simulations

研究代表者

須佐 元 (Susa, Hajime)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号：00323262

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙で最初に生まれた星々(初代星)の誕生の様子を輻射と流体の効果を取り入れた数値シミュレーションによって調べた。その結果、初代星の質量は1-300倍の太陽質量の範囲に分布し、ピークは数十太陽質量程度であることが分かった。またいくつかの小質量星は多体の相互作用によってミニハローの外側に飛ばされ、結果として質量降着が進まずに軽いままであることがわかった。現在まで生き残ることができる0.8太陽質量よりも軽い星が生まれたとすると、観測的にはミニハローあたり1個程度以上は生まれてはいけないという制限があることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：We perform radiation hydrodynamics numerical simulations to study the birth of the first stars. We find the mass of the stars found in our simulations are in the range of $1M_{\text{sun}} < M < 300 M_{\text{sun}}$, peaking at several $\times 10 M_{\text{sun}}$. We also find some fraction of the low mass stars are ejected to the outer envelope of the host minihalos. As a result, they remain less massive since they do not accrete the ambient gas efficiently. In addition, if low mass stars with $M < 0.8M_{\text{sun}}$ are born, which could survive until today, we find that the previously reported observations already put a constraint on the theory that the number of survived low mass stars per minihalo has to be less than $O(1)$.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：初代星 形成 輻射流体

1. 研究開始当初の背景

宇宙で最初に生まれる星、初代星は、天の川など現在の宇宙で生まれる星に比べて、ずっと質量が大きくなり、太陽質量の100倍を超えることが予測されてきた。

一方で、この研究開始当初は、初代星の形成、特に質量降着期の輻射によるフィードバックによる降着抑制の議論が2次元計算によって行われ、その重要性が認識されていた。また初代星形成時の降着円盤が重力的に不安定であり、多くの原始星が分裂によって生まれるという報告があった。これらはいずれの初代星の質量を小さくする効果があり、実際いくつかのシミュレーションで100太陽質量を下回る星が生まれることが示唆されていた。しかしこれらはそれまで同時に扱われることはなく、三次元計算で分裂を追跡し、かつ輻射の輸送を考慮した数値シミュレーションによる研究が必要であると認識されていた。

また当時は初代星の質量は大きいということは理解されていたが、具体的な初期質量関数の計算例はなかった。これは三次元輻射流体計算で質量降着が完了するまで追跡することが困難であること、また多くの宇宙論的な初期条件から計算しなければならないことが障害となっていたからである。

もう一つ議論となっていたのは、初代星形成における磁場の役割である。初代星形成が集中的に調べられ始めたのはここ20年程度であるが、初期宇宙の種磁場は非常に弱いため、当初磁場は重要ではないと思われていた。しかし初代星のホストであるミニハローが非常に乱流的であれば乱流ダイナモによって磁場が指数関数的に増幅され、星形成のダイナミクスに影響を与える可能性が提起されていた。

2. 研究の目的

この研究では、1.の状況に鑑み、輻射流体計算コードを用い、星の形成・降着円盤の分裂とその輻射によるフィードバックを統合的に解きあげることによって、宇宙の最初期に生まれる星の質量を調べることを目的とする。また低質量の初代星が生まれた場合、現在まで我々の銀河系の何処にどの程度残っているかを大規模N体シミュレーションによって調べる。

3. 研究の方法

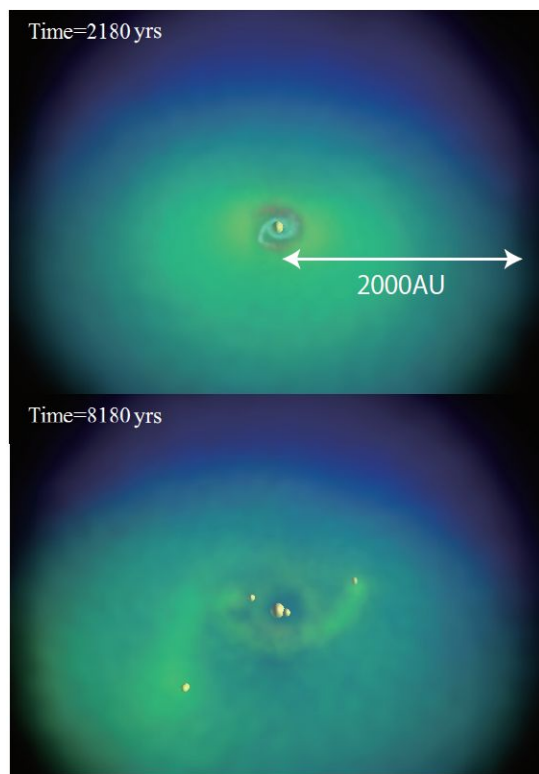
本研究では、代表者が開発した3次元輻射流体計算コードRSPH(Susa 2006, PASJ, 58, 445)を改良し、上記の初代星形成の問題に挑戦した。また初代星形成の初期条件に関しても、宇宙論的な密度揺らぎの成長の結果とし

ての宇宙論的な初期条件から計算をスタートし、初代星の最終的な質量分布を求めた。またそれに加えて初代星が十分に軽く、現在まで生き残っている場合に、我々の近傍で「化石初代星」として観測できる確率についても調べた。これは計算領域内に銀河系ハロー程度の質量をもつダークマターハローを複数含み、かつ初代星のホストとなるミニハローを分解する超大規模宇宙論的N体シミュレーションによって行った。

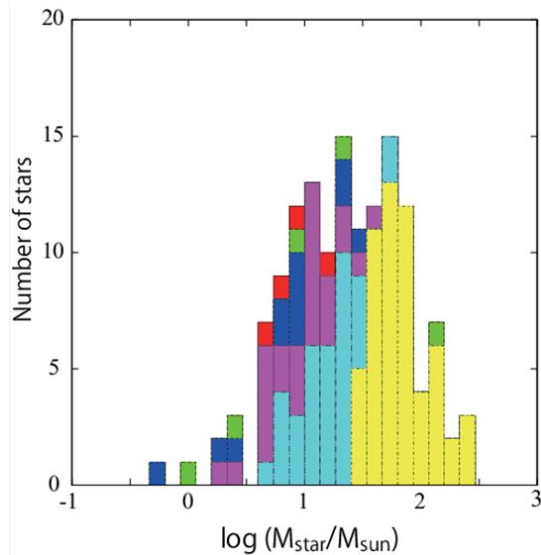
4. 研究成果

A) 初代星形成の輻射流体シミュレーション (論文)

当初の計画どおり初代星の形成を輻射のフィードバックを考慮して計算することに成功した。下図はあるミニハロー中で進む星形成の様子である(Susa+2014)。最初最も密度の高いところで初代星の原始星が生まれその周りに降着円盤が形成される。円盤は重力的に不安定となり、アーム状の構造が形成されるが、これがさらに分裂してさらに原始星が生まれる。これらの星々の輻射のフィードバックによって質量降着は妨げられ、平均的



には数十太陽質量程度の星が生まれた。この研究では59個のミニハローから生まれた初代星についてその質量分布を調べている。次の図はそれを表している(Susa+2014)。星の質量は0.5太陽質量から300太陽質量程度まで広がりピークは数十太陽質量のあたりにある。



このような初代星の「初期質量関数」は、観測的に銀河ハロー中に見つかっている金属欠乏星の元素組成比を説明するにはまだ 140 太陽質量以上の星によるペア不安定型超新星の寄与が大きすぎる。これは比較している金属欠乏星が太陽組成の 1000 分の 1 以下のものばかりであり、ペア不安定による超新星の寄与は比較的金属量の多い 1000 分の 1 以上の星で顕在化している可能性があることを示唆している。

B)化石初代星はどこにあるか (論文)

天の川銀河を複数個含み、かつ初代星形成のホストであるミニハローを分解する宇宙論的大規模 N 体シミュレーションを行い、初代星形成をモデル化し、生まれた初代星がどこに行くのかを追跡した。その結果を用いて天の川銀河の何処にどれだけ化石初代星が見つかるかを計算した。生き残るほど低質量の初代星がミニハローあたり 10 個程度生まれるというモデルを想定すると、銀河ハロー方向の星を 19 - 20 等級までの 10 万個程度観測すると、1 個以上の化石初代星が見つかるという結果となった。これまでの観測ですでに数十万個のハロー星が調べられており、その中に金属量がゼロである星は見つかっていないことから、ミニハローあたり 10 個低質量初代星が生まれるモデルはおそらく exclude されており、ミニハローあたり 1 個のモデルが marginal である。この結果は理論に強い制約をかけることがわかった。

C)初代星と磁場 (論文)

初代星の形成には磁場の影響も無視できないこともわかってきたため、磁場の生成について調べた。まず(論文)初代星が生まれる際に強い輻射で初代星近傍に輻射フラッ

クスのシアーが生まれる。このようなシアーは電場の回転を生み、したがって磁場の種となる。この研究では定量的に初代星が生まれるときに発生する磁場をしらべた。その結果やはり星間空間に広がった値で見ると弱く、1000/cc の密度でみると 10^{-14} - 10^{-13} G 程度であり、その後の星形成のダイナミクスにそのまま影響を与えるほどではなかった。論文では原始組成および低金属量での磁場とガスの結合の様子を調べ、乱流ダイナモが駆動する条件を満たしているかどうかを見た。その結果、やはりミニハローの密度が 10^8 /cc 以下で条件は満たされ、磁場の増幅が起きる可能性が高いことがわかった。

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 5 件)

Tomoaki Ishiyama, Kae Sudo, Shingo Yokoi, Kenji Hasegawa, Nozomu Tominaga, Hajime Susa, “Where are the low mass Pop III stars?” *The Astrophysical Journal*, in press (2016)

Hajime Susa, Kentaro Doi, Kazuyuki Omukai, “Dissipation of Magnetic Fields in Star-forming Clouds with Different Metallicities”, *The Astrophysical Journal*, Vol 801, article id. 13 (2015)

Hajime Susa, Kenji Hasegawa, Nozomu Tominaga, “The Mass Spectrum of the First Stars” *The Astrophysical Journal*, Vol 792, article id. 32 (2014)

Yuki Shiromoto, Hajime Susa, Takashi Hosokawa, “Generation of Magnetic Field on the Accretion Disk around a Proto-first-star” *The Astrophysical Journal*, Vol 782, article id. 108 (2014)

Hajime Susa “The mass of the first stars”, *The Astrophysical Journal*, Vol 773, article id. 185 (2013)

[学会発表](計 6 件)

石山智明, 須藤佳依, 横井慎吾, 長谷川賢二, 畠永望, 須佐元「初代星は銀河系内のどこに生き残っているか?」日本天文学会, 甲南大学(神戸市), 2015年9月9日 - 11日

Hajime Susa, “The effects of magnetic dissipation on the star formation in low metallicity environments”, *First Stars, Galaxies, and Black Holes: Now and then* フロニンゲン(オランダ), 2015年6月16 -

19日

Hajime Susa, “ The IMF of the First Stars ” ,
*THE PHYSICS OF FIRST STAR & GALAXY
FORMATION* エジンバラ(イギリス), 2014
年6月10日 - 12日

Hajime Susa, “ On the IMF of first stars ” ,
*Origin of Matter and Evolution of Galaxies
(OMEG12)*, つくばエポカル(つくば市), 2013
年11月18日 - 21日

須佐 元, 長谷川賢二, 富永望「初代星の
質量について」日本天文学会, 東北大学(仙
台市), 2013年9月10日 - 12日

須藤佳依, 横井慎吾, 須佐元「初代星は銀河
ハローのどこにいるのか?」日本天文学会,
東北大学(仙台市), 2013年9月10日 - 12
日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

須佐 元 (SUSA, Hajime)
甲南大学・理工学部・教授
研究者番号: 00323262

(3) 連携研究者

長谷川賢二 (HASEGAWA, Kenji)
名古屋大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 20536627

富永 望 (TOMINAGA Nozomu)
甲南大学・理工学部・准教授
研究者番号: 00550279