

## 初代星は銀河ハローのどこにいるのか？

須藤 佳依 (甲南大学大学院 自然科学研究科)

### Abstract

宇宙初期に生まれた初代星は、理論的研究により、太陽の数百倍の質量を持った巨大な恒星になっていったのではないかと考えられていた。しかし、巨大な恒星のみならず、 $100M_{\odot}$  以下の星が複数形成されるといふ新しいシミュレーションの結果が発表された (Clark et al. (2011); Hosokawa et al. (2011); Greif et al. (2012))。この結果は、初代星形成の理論の進展に大きな影響を与え、初代星が現在でも生き残っているかもしれないという可能性を示唆するものとなった。そこで、本研究では宇宙で最初に誕生した初代星のホストであるミニハローが、ハロー同士の合体を通じ、現在の矮小銀河のハローにどのように取り込まれていくのか、その過程を高精度の宇宙論的な N 体シミュレーションを用いて調べることを試みた。その結果、初代星を含むミニハローの中にあるものはそのまま矮小銀河の中に取り込まれ、また一部は潮汐力によって引き伸ばされて銀河ハローの内部に広がることがわかった。本講演ではこれらのミニハローに含まれている初代星を、次世代の観測装置を用いて観測することが可能なのかどうかを検証し、その結果を報告する。

## 1 Introduction

初代星 (First star) とは宇宙の晴れ上がり後に最初にできた星である。宇宙初期の原始ガスには、水素とヘリウムの他には微量の軽元素のみが含まれており、炭素より重い元素 (重元素) は、星の中心における核融合反応や、超新星爆発時の高温衝撃波中での核反応など、後の天体活動により生成されると考えられている。そのため、初代星は重元素を含まない原始ガスから形成された事になり、現在の星形成環境とは著しく異なる。一番の相違点は温度の進化であり、現在の星形成過程の進化では、C や O などのダストによる冷却が効くため、ガスは比較的低温で進化する。一方、初代星の場合は重金属による冷却がないために、ガスは現在に比べ高温で進化する。このことから、星の母体となる高密度の分裂片が形成されるときに質量は、現在が  $\sim 1 M_{\odot}$  であるのに対し、初代星は  $10^2 - 10^3 M_{\odot}$  と大質量である。

分裂片の中でコアができ、そこに質量が降着するため、分裂片の質量と降着率がその後の星の質量を決めることになる。降着率は  $dM/dt \sim c_s^3/G \propto T^{3/2}$  で与えられる。宇宙初期のガスは現在よりも温度が高いために、降着率は大きく、また分裂片にも十分な質量があるために、星は大きくなることが期待できる。暴走収縮期の計算から最終的な星の質量を見

積もると初期にできる星は  $100M_{\odot}$  を超えるような大質量の星になると思われてきた。

星の最終的な質量は、原始星誕生後の降着がいつまで続くかによって決まる。原始星誕生から、降着により星の質量が大きくなり、その後の降着までの進化を計算したものが Hosokawa et al. (2011) ある。この計算によると、最終的に形成された星は約  $45M_{\odot}$  であった。さらに、原始星まわりで降着円盤を形成することも Clark et al. (2011) で明らかにされている。また、その円盤は重力不安定になり数十 AU の範囲内で複数に分裂し、分裂したところからまた新たな原始星を形成することがわかっている。Greif et al. (2011) では、形成された低質量の原始星は力学的な相互作用 (slingshot) によりはじき飛ばされることが示されている。このことはその後の降着が進まない原始星の存在を意味する。これらの研究から、初代星が現在でも生き残っているかもしれないということが示唆されるようになった。

## 2 Methods

本研究では、宇宙論的 N 体シミュレーションコード GADGET-2(Springel 2005) を用いて計算を行った。宇宙論的な初期条件から計算をはじめ、初代星の

ホストであるミニハローが現在の銀河ハローの構造にどのように取り込まれていくのかを調べる。粒子数は  $256^3$ 、計算領域は 1Mpc 立方、1 粒子あたりの質量は  $4.57 \times 10^3 M_\odot$ 、全質量は  $7.67 \times 10^{10} M_\odot$  とした。ダークハローの識別は Friends-Of-Friends (FOF) algorithm を使用し、コラプス期のピリアル温度が 2000K を超えるようなハローをミニハローとした。

### 3 Results

図 1 は本研究の計算結果である。青点は  $z \sim 0$  の各ハローの粒子分布で、その中に取り込まれたミニハローの粒子分布を黄点で表している。このとき  $10^9 M_\odot$  を超える矮小銀河は 4 個形成され、質量の大きなものから順に 4 つのハローについて内部の構造を調べた。各矮小銀河内に取り込まれたミニハローが形成されたときの redshift が上から順にそれぞれ  $z \sim 16, 11.5, 9$  の場合を示している。黄点の領域に初代星が存在していると考えられる。各矮小銀河内に取り込まれたミニハローの数を示したものが図 2 である。図 3 では  $z \geq 9$  に形成されたミニハローに関して、矮小銀河の中心からの距離と個数を示した。この図から、ミニハローは銀河中心から 10kpc 以内に分布する傾向があることが明らかとなった。

Greif et al. (2011) の結果から、1 つのミニハローに 10 個の初代星が形成されると仮定し、図 1 の halo 2 ( $= 7.93 \times 10^9 M_\odot$ ) に関して、 $z \geq 9$  で形成されたミニハローに含まれる初代星が次世代の観測機器を用いて観測可能か評価した結果が図 4 である。この結果から、観測者からの距離が 50kpc 以内ならば観測できる可能性が高いことがわかった。halo 2 では 42 個のミニハローが取り込まれており、仮にこの矮小銀河が、観測者から 10kpc 以内に位置していると考え、矮小銀河内の星が  $\sim 10^8$  個程度だとすると、 $2 \times 10^5$  個の星を観測すれば、初代星を 1 個観測することが可能かもしれないということになる。

### 4 Discussion & Conclusion

本研究では宇宙で最初に誕生した初代星のホストであるミニハローが、ハロー同士の合体を通じ、現

在の銀河ハローの構造にどのように取り込まれていくのか、その過程を高精度の宇宙論的な N 体シミュレーションを用いて調べることを試みた。その結果、初代星を含むミニハローの中にあるものはそのまま大きな銀河の中に取り込まれ、また一部は潮汐力によって引き伸ばされて銀河ハローの内部に広がることわかった。特に、ミニハローは取り込まれた銀河ハローの中心から 10kpc 以内に分布する傾向がある。これらのミニハローに含まれている初代星を、次世代の観測装置を用いて観測することが可能なかどうかを検証した結果、50kpc 以内に矮小銀河が存在すれば見つかるかもしれないことがわかった。

### Acknowledgement

The authors thank the Yukawa Institute for Theoretical Physics at Kyoto University, where this work was initiated during the WITP-W-13-07 on “Summer School on Astronomy & Astrophysics 2013”.

### Reference

- Clark, P. C., Glover, S. C. O., Smith, R. J., et al. 2011, *Science*, 331, 1040
- Greif, T. H., Bromm, V., Clark, P. C., et al. 2012, *American Institute of Physics Conference Series*, 1480, 51
- Greif, T. H., Springel, V., White, S. D. M., et al. 2011, *ApJ*, 737, 75
- Hosokawa, T., Omukai, K., Yoshida, N., & Yorke, H. W. 2011, *Science*, 334, 1250
- Tegmark, M., Silk, J., Rees, M. J., et al. 1997, *ApJ*, 474, 1
- Yoshida, N., Abel, T., Hernquist, L., & Sugiyama, N. 2003, *ApJ*, 592, 645

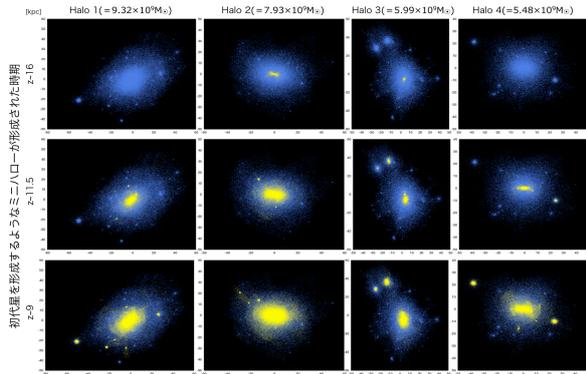


図 1:  $z \sim 0$  での各ハローの粒子分布 (青点)。その中に取り込まれたミニハローの粒子分布 (黄点)。ミニハローが形成されたときの redshift が上から  $z \sim 16, 11.5, 9$  の場合を示す。黄点の領域に初代星が存在していると考えられる。

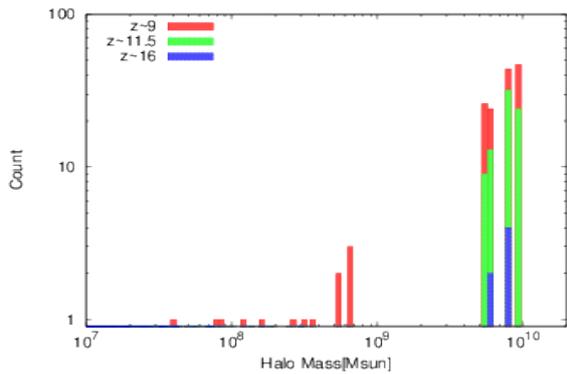


図 2:  $z \sim 0$  でのハローの質量と取り込んだミニハローの数。

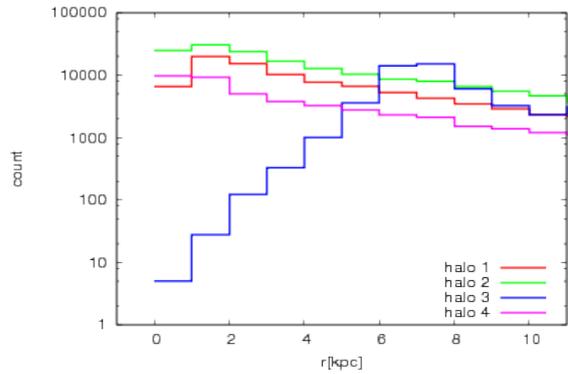


図 3:  $z \sim 0$  の矮小銀河内に取り込まれた  $z \geq 9$  に形成されたミニハローの分布。ミニハローは銀河中心の 10kpc 以内に集中している。

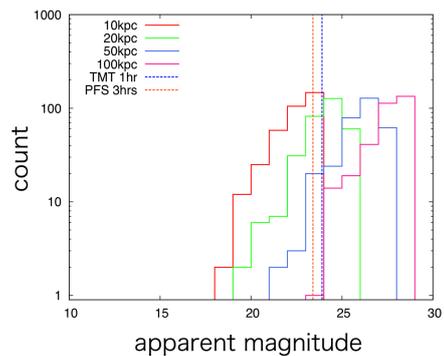


図 4: 観測者と銀河の距離が 10kpc, 20kpc, 50kpc, 100kpc の場合の見かけの等級とその数。破線は各観測装置の限界等級。