

## 初代原始星システム～形成と進化～

中村 鉄平 (九州大学大学院 理学研究科)

### Abstract

この論文では、宇宙暗黒時代の終わりに最初に誕生する星の形成を研究した。ダークマターハローの中心にできる初代原始星の形成、ガスの収縮について、3次元のムービング・メッシュシミュレーションを使用して計算を行った。今回のシミュレーションでは 25 桁以上の異なる密度レンジをカバーしており、 $0.05R_{\odot}$  の空間分解能を持つ。この空間分解能は初代原始星の進化を理解するには十分であり、周囲のガスの影響も調べることが出来る。計算の結果、最初に形成する原始星の周りに出来るケプラー円盤がいくつかの原始星に分裂することがわかった。円盤と周囲のガスの重力相互作用によって原始星のシステムは複雑に進化する。また、少数の原始星は N-体インタラクションを通して他の原始星から角運動量を得て、外側の軌道に放出される。しかし、存在する原始星の数は単調増加する。これは、初代原始星のシステムがここでシミュレーションされた限られた時間を越えて成長し続けることを示唆している。

## 1 Introduction

初代星の形成は宇宙暗黒時代を象徴するテーマの一つです。初代星からの輻射は銀河間空間 (IGM) を加熱し電離させる。そして初代星の超新星爆発は宇宙初期のガスに重元素を与える。初代星の研究の主な目的は、初期質量関数 (IMF) を求めることと、初代星が銀河間物質に与える影響や初代星以降の星の世代について理解することです。しかしながら、初代星の形成に関してはまだまだあまりよく理解されていない。初代星が出来るまでの過程は、例えば?などによって詳細に調べられた。しかし、この研究は原始星が誕生するまでの計算であり、原始星が誕生後に成長する過程は調べられていない。

近年、シンクセルという手法を用いて原始星誕生後の星が成長する過程が調べられつつある (e.g., ?)。これらの研究では、原始星の周囲に出来る質量の大きい星周円盤が分裂して星の集団 (star cluster) が出来ることを示している。しかしながら、シンクセルを用いた計算では、原始星周囲の 1-10AU 以内の領域をマスクをしており、この領域は計算されていない。そのため、実際に分裂が起こるか、また、どのような質量の星が誕生するかはよく分かっていない。

この論文では、ムービング・メッシュシミュレーションを用いて、シンクセルを用いることなく、ダークマターハローの最初の崩壊、ディスク (全体とし

ての原始星のシステムの進化) の形成と分裂を調べた。また、ディスク内で出来た原始星の中心星への合体や生存率についても調べた。

## 2 Methods

シミュレーションの初期条件は Greif et al. (2011) を用いた。Greif et al. (2011) から求められた 4 つの異なるダークマターハロー (ミニハロー) を初期条件として、ムービングメッシュ・コード arepo を使用して (?), ガスのさらなる進化を計算した。

ガスの熱進化を正確に計算するために、水素とヘリウムを含んだ化学反応式を同時に計算した。また、ガスの重力収縮の結果数密度が  $n > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  になった領域を原始星として同定した (詳しい計算の設定については?を参照せよ)。

## 3 Results

図 1 は、原始星形成後の中心近傍の進化を表している。最初にダークマターハローの中心に単一の原始星が出来る (左のパネルの赤い部分)。形成時の原始星の質量は  $0.01 - 0.1M_{\odot}$  程度である。原始星形成後、その周囲で星周円盤が成長する (図中の緑色の部分)。星周円盤は、ほぼケプラー速度で回転してい

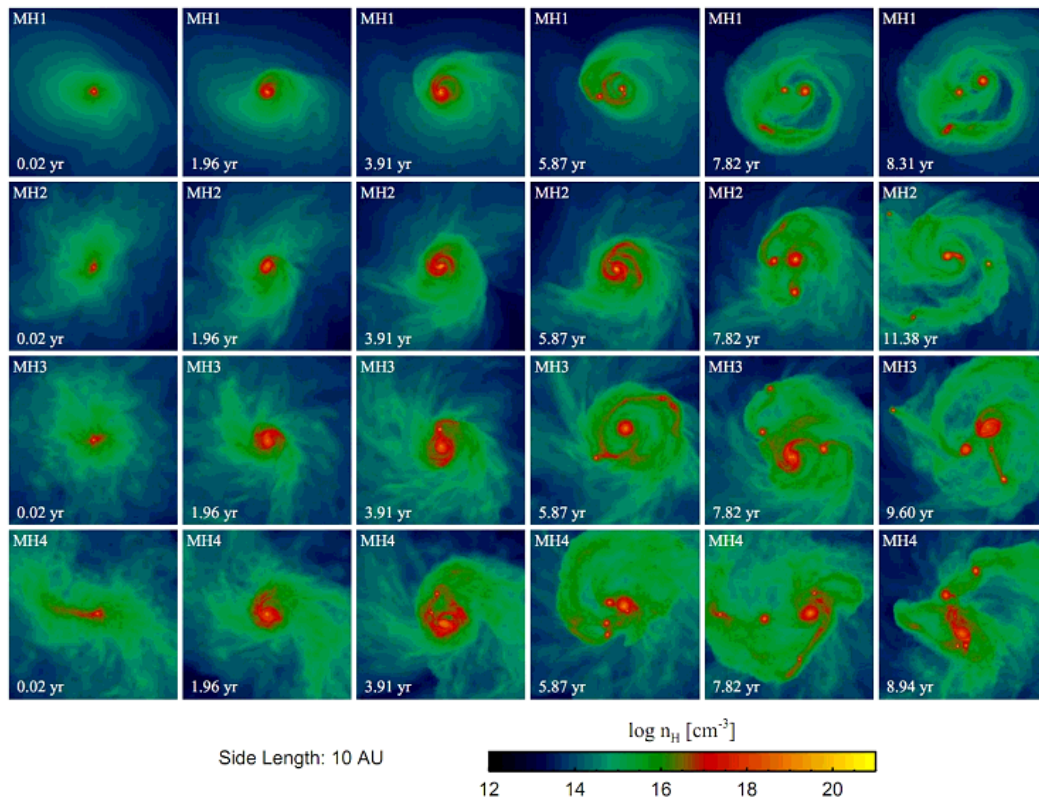


図 1: 計算結果。原始星近傍の赤道面の密度分布

る。その後、原始星形成後 6 年程度で星周円盤が分裂して複数の原始星が誕生しているのが分かる。

円盤中での分裂は、その後も繰り返して起こった。また、いくつかの原始星はお互いの重力相互作用によって中心近傍から放出された。これら放出された星は、ガス降着が出来ないために低質量星に進化すると考えられる。さらにいくつかの原始星は中心星へと落下した。最初に誕生した原始星は、ダークマターハローの中心部分に存在しており、他の原始星が落下してくるために、計算中最大の質量を保持しつづけた。この原始星は大質量星へと進化すると考えられる。

この計算では、シンクセルを用いていないために最初の原始星誕生後 10 年程度しか計算は出来なかったが、このような円盤の分裂による原始星形成はこの後も続くと考えられる。また、図中の MH1-MH4 は異なるダークマターハロー中での進化を示しているが、定量的な差はあるがどのダークマターハロー中でも円盤が分裂して多数の原始星が出来ることが

## 4 Discussion

今までの研究ではダークマターハローの中心のガスが崩壊すると星の集団が誕生することを示唆していた。しかし、それらの計算はシンクセルを用いていたために降着半径 (シンクで覆われている領域) の近傍では正確に流体力学を計算していなかった。その代わりに形成した原始星と周囲のガスの相互作用を分解することでその進化を調べてきた。この研究では、前の研究と同様に、ケプラー円盤が分裂していくつかの原始星が誕生することを示した。ケプラー円盤中での分裂は、水素分子による冷却と密接に関係している。円盤ガス中で水素分子が豊富に含んでおり、より低温の領域で分裂が起こることが分かった。

また、一旦最初の分裂が起こってクランプが形成すると、原始星とガスとの重力相互作用によって

角運動量の再分配が起こる。円盤中で出来た原始星のおよそ半分は、自由落下時間に円盤中を移動して中心の主星と合体した。その結果、中心の主星の質量は 2 番目に大きな原始星の質量のおよそ 5 倍になる。そのため、最初に出来たほぼ中心に存在する原始星が最もはやく進化すると考えられる。円盤中の多くの星は中心星に落下するが、いくつかの原始星は合体せずに (中心星に落下せず) に生き残るとことが分かった。

原始星の数はシミュレーションが終了するまで単調に増加した。これは、この後もこの原始星のシステムは進化し続けることを意味している。この計算では、原始星形成後 10 年程度しか計算出来なかったために、我々は誕生する星の最終的な質量を見積もることは出来ない。また、この計算では原始星からの輻射の影響を考慮していない。原始星からの輻射は、ガスの化学進化に多大な影響を与えると考えられる。さらにこの計算では、磁場の効果を考慮していない。一般に磁場が分裂を抑制すると考えられている。そのため、初期宇宙に磁場が存在した場合には、今回のように星団が誕生しないかもしれない。次世代のシミュレーションではさらなる効果を含めて初代星の形成を計算する必要があると考えられる。

上記の問題を解決するために、新たな計算手法を考慮し、またさらにそれを利用して初代ブラックホール形成のシミュレーションすることが今後の課題である。

## Reference

- Yoshida, N., Omukai, K., & Hernquist, L. 2008, *Science*, 321, 669
- Clark, P. C., Glover, S. C. O., Klessen, R. S., & Bromm, V. 2011, *ApJ*, 727, 110
- Greif, T. H., Springel, V., White, S. D. M., et al. 2011, *ApJ*, 737, 75
- Springel, V. 2010, *MNRAS*, 401, 791
- Greif, T. H., Bromm, V., Clark, P. C., et al. 2012, *MNRAS*, 424, 399