

# 宇宙最初の星形成

Clark, P. C., et al. 2011, Science, 331,1040

甲南大学 M1 須藤 佳依

## 1 概要

宇宙の晴れ上がり後に最初にできた星を初代星という。宇宙最初の原始ガスには水素とヘリウムのほかには微量の軽元素のみが含まれており、炭素より重い元素は後の天体活動により生成されるために、この段階では存在せず、現在の星形成の環境とは著しく異なる。これまでの研究により、この環境で形成された星は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と考えられていた。

しかし近年、巨大な恒星というのはむしろ例外的で、 $100M_{\odot}$ 以下の星が複数形成されるという新しいシミュレーションの結果が発表された。この結果は、初代形成の理論の進展に大きな影響を与えることとなった。今回は、この初代星形成に関する最近の研究について紹介する。

## 2 密度揺らぎの成長

宇宙初期には密度の分布にわずかな揺らぎが存在しており、これが構造の種となる。このうち、宇宙の平均よりも高密度な領域は自己重力により、宇宙全体の平均的な膨張速度よりも遅くなり、次第に宇宙膨張から取り残されて重力収縮を始める。その後、十分に密度が高くなって天体が形成される。構造の種である初期の密度揺らぎのスペクトルは、CMBの揺らぎの観測などから非常に精度よく求められている。この初期条件から始めて、理論計算を行うことにより、その後の宇宙の構造の進化を知ることができる。Yoshida et al.(2003)の数値シミュレーションの結果を図1に示す。この計算によると、数10万太陽質量程度のハローの中に単一の星形成ガス雲が形成される。その中でも密度の最も高い部分が自己重力の働きにより暴走的に収縮し始め、やがて初代星となる。

## 3 初代星の質量

暴走収縮期のガスの温度進化を図3に示す。現在の星形成過程の進化では、CやOなどの重金属やダスト

による冷却が効くため、ガスは比較的低温で進化する。一方で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。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 $\sim 1M_{\odot}$ であるのに対し、初代星は $\sim 10^2 - 10^3 M_{\odot}$ 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、

$$\frac{dM}{dt} \sim \frac{c_s^3}{G} \propto T^{3/2} \quad (1)$$

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、星は大きくなるのが期待できる。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。

## 4 角運動量

密度揺らぎは非対称な密度揺らぎの相互作用によって角運動量を得る。大きさによってはその後の進化に影響を及ぼすため、原始星周りの角運動量を考慮しなければならない。

単位質量あたりの角運動量  $j$  が与えられているとき、Kepler回転している円盤の半径は、

$$\frac{j^2}{r_d^3} = \frac{GM}{r_d} \quad (2)$$

と記述することができる。コアの半径  $r_c$  で Kepler 回転する時の角運動量  $j_{kep}$  は、

$$\frac{j_{kep}^2}{r_c^3} = \frac{GM}{r_c} \quad (3)$$

である。ここで、 $r_d, r_c$  はそれぞれ円盤とコアの半径を示す。原始星ができたときの角運動量の分布 [Yoshida et al. (2006)] が図4である。この計算によると、質量あたりの角運動量の大きさは、Kepler回転の運動量の約半分まで推移することがわかっている。したがって、暴

走的に収縮しているときのコアの角運動量は、

$$j = f j_{kep} \quad (4)$$

と書くことができる。 $f$  は角運動量と Kepler 回転の比で  $f \simeq 0.5$  である。この式を用いて、円盤の半径をコアの半径で記述すると、

$$r_d = f^2 r_c \quad (5)$$

となる。 $f$  が 0.5 であればコアの半径が 0.25 になるまで収縮すると回転が降着を止め、円盤が形成されることがわかる。このことから、暴走収縮期までの計算から星の最終的な質量を決定できないことがわかり、質量降着期までの計算が必要になった。

## 5 計算方法

Clark et al. (2011) では、GADGET-2 を使用して計算を行っている。高解像度の数値シミュレーションによって、宇宙論的な初期条件からはじめて、原始星や円盤の形成を 1.5AU 程度のスケールに至るまで計算した。原始ガスにおける化学反応・冷却・加熱過程を解いており、金属を含まない原始ガスの化学進化は、12 種類 (H, H<sup>+</sup>, H<sup>-</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup>, H<sub>2</sub>, He, He<sup>+</sup>, He<sup>++</sup>, D, D<sup>+</sup>, HD, e)<sup>45</sup> 反応式を用いている [4]。

## 6 結果

原始星まわりの降着円盤の進化を化学進化などを加え、質量降着期まで数値計算した結果を図 5[Clark et al.(2011)] に示す。最初に原始星が誕生するのが  $z=17$  である。最初の原始星誕生から約 90 年後を示したものが 4 番目の図である。ここで、降着円盤は分裂し、最初の原始星中心から約 20AU のところで新たな原始星を形成している。この場所では分裂の条件を満たしており (図 6)、この研究は Toomre の  $Q$  で理解できる分裂であると言える。さらにそのわずか 4 年後には 3 つ目の原始星が誕生し、その後も分裂は止まることなく続く。この結果より、宇宙初期にできた原始星は数十 AU の範囲内で複数に分裂することが判明した。

## 7 まとめ

暴走収縮期までの計算から質量を見積もると、太陽の数百倍の質量を持った単体の巨大な星になると考えられていた。しかし、質量降着期までの数値計算を行うと降着円盤を形成した。また、その円盤は重力不安定になり分裂し、分裂したところからまた新たな原始

星を形成する。この研究によって、宇宙最初の原始星は約数十 AU の範囲内で複数に分裂することがわかった。

## 参考文献

- [1] Clark, P. C., Glover, S. C. O., Smith, R. J., Greif, T. H., Klessen, R. S., & Bromm, V. 2011, *Science*, 331,1040
- [2] Yoshida, N., Abel, T., Hernquist, L., & Sugiyama, N. 2003, *ApJ*, 592, 645
- [3] Yoshida, N., Omukai, K., Hernquist, L., & Abel, T. 2006, *ApJ*, 652, 6
- [4] Clark, P. C., Glover, S. C. O., Klessen, R. S., & Bromm, V. *Astrophys. J.*, in press; (available at <http://arxiv.org/abs/1006.1508>)

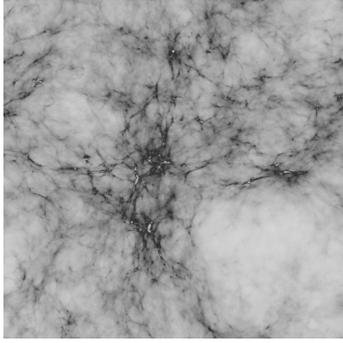


図 1: 宇宙論的シミュレーションによる初代天体の形成。 $z=17$  の宇宙のガスの分布を表している。

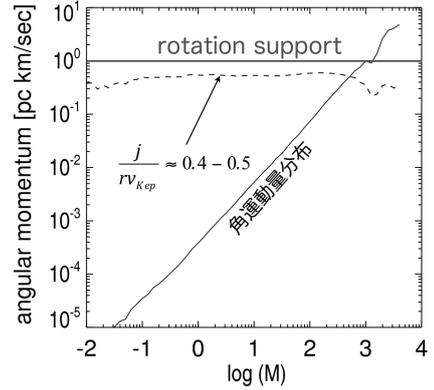


図 4: 原始星ができたときの角運動量分布

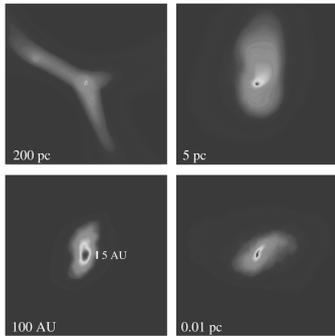


図 2: 宇宙最初の星形成が起こる高密度コアとその内部の構造。コントアは柱密度を示す。パネルは左上から時計回りに拡大したもの。数字は 1 辺の大きさを示す。2 番目のパネルが高密度コアに対応する。

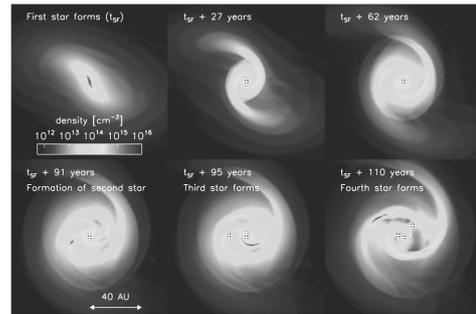


図 5: 原始星まわりの降着円盤の進化

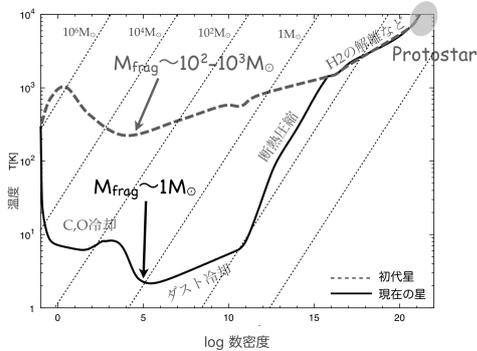


図 3: 原始ガスからなる高密度コアが収縮する際の温度進化。点線はジェーンズ質量が一定の線である。

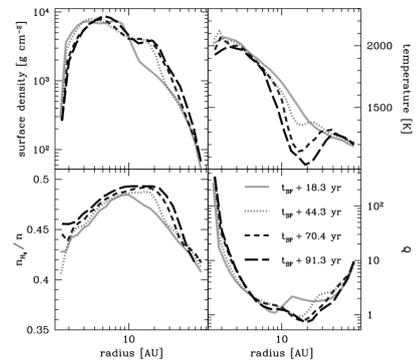


図 6: 最初に形成された原始星中心からの距離に対する物理量の進化