

ファーストスターの進化と最終的な質量

宮首宏輝 (九州大学大学院地球惑星科学研究科)

Abstract

初期宇宙においてファーストスターは重要な役割を担っている。ファーストスターの進化について研究されている現状を知り、これからの可能性について議論するために、宇宙論に基づいて原始星形成の輻射流体力学計算を行った論文 (Hirano et al. 2014) を紹介する。

1 Introduction

宇宙初期の構造形成や化学進化を理解する場合、初代星の質量を知ることは重要である。しかし、観測で初代星の質量を知ることは難しく、これまで理論によって星が形成する様子が調べられてきた。これまでは様々な環境において形成される多様な原始星については調べられておらず、初代星の質量の分布については分かっていなかった。原始星形成の初期条件は原始密度揺らぎから求めることができ、多様な原始星形成環境は計算で求められる。原始星形成ガス雲の多様性と形成環境の影響についてレビューを行う (Yoshida et al. 2008; Hirano et al. 2014)。

2 Methods

Hirano et al. (2014) では宇宙初期における星形成の過程を知るために、二つの段階に分けてそれぞれ異なる計算方法を用いている。密度揺らぎから星形成ガス雲ができるまでの過程は宇宙論に基づいてシミュレーションを行い、降着が輻射フィードバックにより止められるまでを輻射流体シミュレーションで調べている。宇宙論的な計算部分では、SPH 粒子による N 体計算を用いて Λ CDM モデルによるシミュレーションで 3 次元的に計算された。個々の SPH 粒子については、化学反応を解くことで放射冷却を考慮している (水素線冷却についての Soblev 法と水素分子の衝突によって誘起される放射冷却の ray-tracing 法)。また、ここでは重力収縮によってミニハローが形成している領域について詳しく知りたいため、選択した領域にズームインして詳しく再計算し直すことを行っている。これによって大きな領域では粒子数

が不足して解像度が下がるような場合でもズームインして再計算することで粒子濃度が上がり解像度を上げることができる。さらに解像度を上げるために、ズームインした領域内で一つの粒子を分裂させる技術も使われている。この研究ではビリアル平衡にあるダークマターハロー中心にできる合計 110 もの原始ガス雲をサンプルとして選択した。次に輻射流体計算について説明する。この計算では 2 次元で軸対象輻射流体計算が行われた。この時に局所的に解像度を上げるために Nasted Grid 法が用いられている。宇宙論に基づいて調べた場合と異なり、HD 冷却については無視している。また、サンプルによって原始星の進化過程が異なることが分かっており、原始星形成の起こる環境による影響についても調べる。そのためこの研究では、異なる降着率と原始星進化の様々なケースを調査するために、 α 粘性モデルを採用し、 α は Toomre の Q 値をパラメータに持つという仮定している。

3 Results

3.1 原始星形成過程

原始ガス雲が形成するまでの過程は宇宙論的なシミュレーションによって解き明かされてきた。そこで得られた原始ガス雲の進化過程はサンプルによって異なり、ガス雲中で誕生する初代星の質量も様々であった。実際に、宇宙論的なシミュレーションで形成されたすべてのサンプルについて輻射フィードバックにより降着が止まるまでの進化を追ったところ、最終的な初代星質量は予想以上に幅広い分布を示した。図 1 では、後述する降着率によって異なる

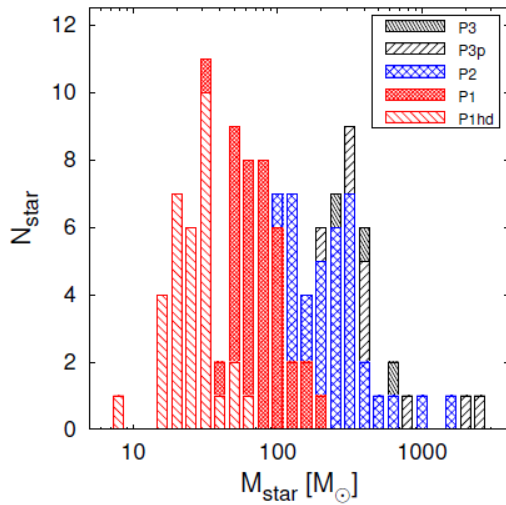


図 1: 110 個の原始星サンプルについて、最終的な質量の個数分布。P1 はケルビンヘルムホルツ収縮する原始星、P2 は振動原始星、P3 は超巨星原始星を表す。P1hd は P1 の中でも HD 冷却でガス雲が形成されるケース、P3p はガス雲の特性と最終的な星の質量の間に一定の関係性があるケース。

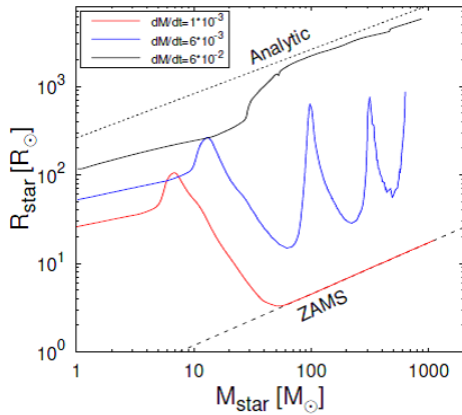


図 2: 降着率によって質的に変化する三つの原始星進化。赤線が前述の P1、青線が P2、黒線が P3 を表す。ZAMS の点線に達するとき星が主系列になる。

原始星進化の三つのパターンについて色分けして、初代星形成環境が星形成に影響を与えることが分かる。

原始星進化の過程において、星となる中心核への降着率はガス雲の温度に依存する。そのためサンプルとなるガス雲の温度の多様性によって原始星降着

進化もまた多様であることが予測されている。図 2 は、降着率によって異なる三つの原始星進化を表している。一つ目はケルビン・ヘルムホルツ (KH) 収縮する原始星の進化。これは輻射によりエネルギーを失うよりも降着によりエネルギーが貯められる方が早いため最初は直線的に膨張し、その後不透明度が上がるために輻射効率が悪くなるため一時的に急膨張する。その後膨張により輻射がエネルギーを逃がす効果が優勢になり収縮し、やがて主系列に加わるという進化である。二つ目は振動するタイプの原始星進化で、降着率が高いために収縮するときに星自身の光度と降着ガスの光度の合計がエディントン光度に達して再度膨張する。そして膨張するにつれて輻射の効果が強くなり収縮をするということを繰り返すタイプの原始星である。三つ目が超巨星となる原始星進化で、降着率が大きすぎて常に輻射の効果が十分でないため膨張を続けるものである。

原始星の進化にバリエーションがあることを見てきた。これらの様々な原始星進化は最終的な星質量に大きな差が見られた原因になる。原始星形成過程には二段階ある。前期段階がガス雲冷却により重力収縮し中心に星が形成される段階、後期段階が降着によって原始星が成長していく段階である。

原始ガス雲における温度進化についてみていく。図 3 では、9 つのサンプルについて中心ガス密度の増加に伴う温度進化および水素分子や重水素分子の比率の変化を示している。重力崩壊が緩やかな時は、二体反応を通して水素分子が形成され、豊富になった水素分子により輻射冷却が強められる。冷却されることによって重水素分子 (HD) が形成されるのに十分な程温度が下がり、低温でのみ有効な重水素分子冷却 (HD 冷却) が働きさらに温度が下がる。更に崩壊が進み中心密度が大きくなっていくと HD 冷却は非効率になるが、三体反応により水素分子の濃度が上昇する。そして再び水素分子による輻射冷却が支配的になる。こうして前期段階の熱進化について実際に確かめることができた。後期段階における降着進化は前述のとおり、異なる三つの降着進化をすることが予想されている。実際に今回用いられた全サンプルについて降着進化のバリエーションを調べたものが図 4 である。前述のように三つの降着進化に分類できることが確認された。また降着率と最終的

な原始星質量の間に関係性があることが予想される。

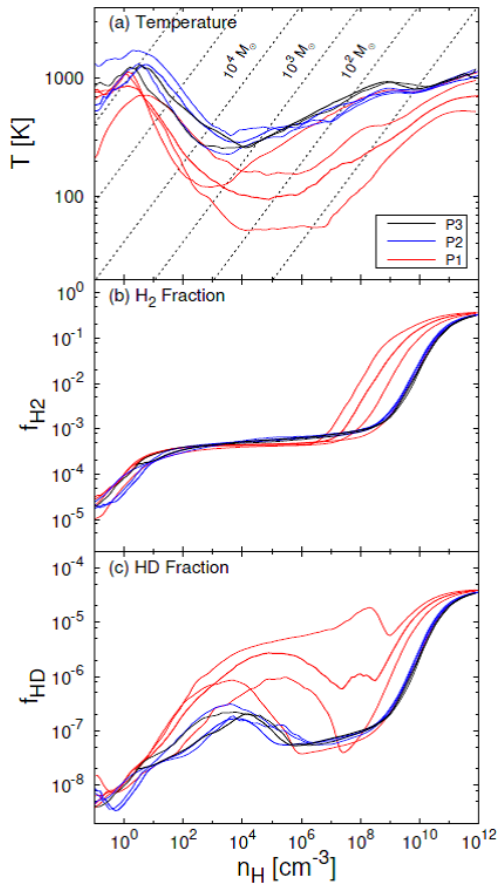


図 3: 中心密度の増加に伴う熱進化の過程。(a) は重力崩壊の進行に伴う温度変化、(b) は水素分子の存在比、(c) は重水素分子の存在比の移り変わりを表す。(a) における点線は中心密度と温度に対応する星の質量。

3.2 原始星形成環境による影響

3.1 において降着率と最終的な星質量の間に関係があることが予想された。原始ガス雲とハローそれぞれについて、全体の降着率分布の大きさを重力不安定となった部分時点での降着率で代表させると図5のようになる。どちらも降着率と星質量の間に点線で示されるような明確な関係性があることがいえる。また両者の関係性は似ていて、ダークハロー中に作

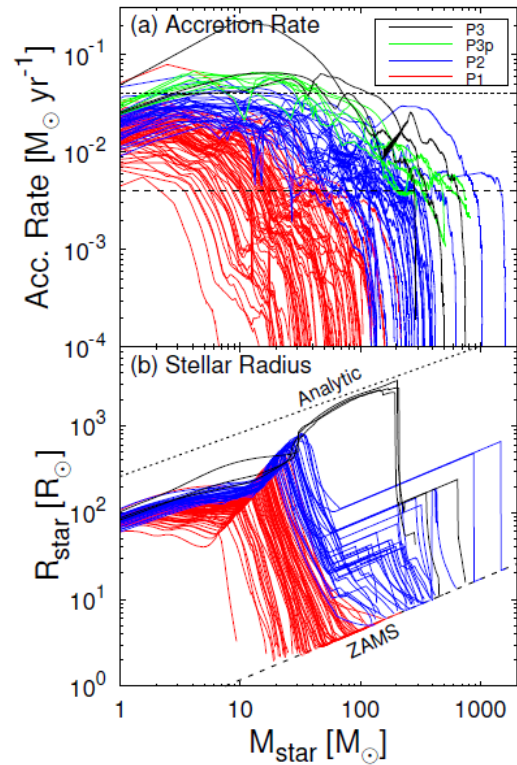


図 4: 110 個の原始星サンプルについて降着率によって異なる原始星進化を表す。(a) は各サンプルの降着率の移り変わり、(b) は各サンプルの膨張や収縮の様子。

られるガス雲の特性はダークハローの特性に影響されている事によると考えられる。つまりガス雲の熱化学進化には少なくとも部分的にはダークハローの降着進化が影響していると予想される。また、ガス雲の性質も星を形成する降着率に影響しているはずである。図 6 からその決め手がガス雲の質量と回転速度であることが分かる。ガス雲の質量が大きいほど降着率は大きく、また回転速度が小さいほど降着率は小さくなっている。

4 Discussion

ここまで述べてきたように原始星の質量分布に大きく差が出るのはサンプルによって異なる進化をたどる為である。星が形成されるまでの過程である熱化学進化では二つの冷却過程が存在することを確かめた。そのうち HD 冷却はある程度冷えないと働か

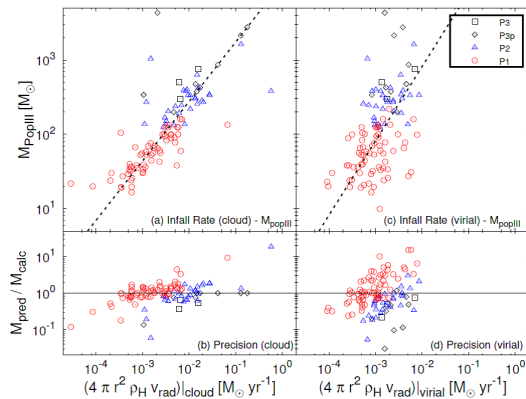


図 5: 原始ガス雲とダークハローについて全体の降着率を見積もったものと最終的な星の質量の関係性。左側が原始ガス雲について、右側がダークハローについて。下側のパネルが計算から得られた星の質量と、上側のグラフで得られた降着率と星質量の関係性から見積もった星の質量の間の偏差を表す。

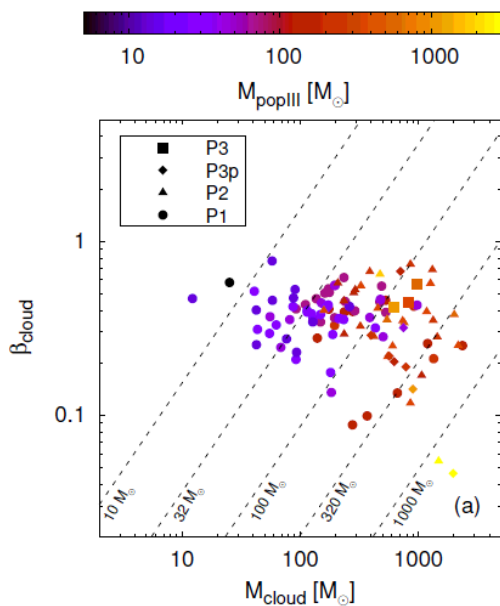


図 6: 原始星が形成されるガス雲の質量と回転のパラメータの関係を表す。

ず、また中心密度が上がると効果的でなくなるので、熱進化にバリエーションを与えるのは重力崩壊のタイムスケールであるだろう。重力崩壊が急速に起こる場合は水素分子による輻射冷却がほとんどを占め、ゆっくりおこる場合 HD 冷却が十分働くことができ

ると考えられる。降着によって星が成長していく過程については、降着率によって異なる原始星進化をすることが分かった。そして降着率は原始星が形成される環境によって影響されることも分かった。ガス雲の質量が上がると、降着できるガスの総量が増加するので降着率の増加につながる。またガス雲の回転が速いほどガスは原始星に落ちにくくなり、結果降着率は減少すると考えられる。このように環境によって降着率が変化することで、原始星は様々な降着進化をすることにつながるという。

5 Conclusion

今回紹介した研究では、従来より多くの初代星形成過程の結果を比較できたこと、またそれらの一つ一つが原始星が形成されて成長していくところまで進化を追えた点で重要な結果になっている。輻射流体計算が二次元であるために不鮮明な部分も存在する。ガス雲の分裂によってできる複数のクランプの相互作用やその後の星形成については今後の研究でより詳しく見ていきたい。また今回は磁場による効果を加えていないので磁場の効果を加えた場合の質量分布も同じようになるのかという点も確かめる必要がある。そしてこれらの要素を加えても今回得られた結果と差があまり見られないようなら、さらにこの先に形成された多様な初代星がどのように相互作用して初期銀河のような構造を作っていくのかということについても研究したい。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- Hirano, S., Hosokawa, T., Yoshida, N., et al. 2014, ApJ, 781, 60
- Yoshida, N., Omukai, K., & Hernquist, L. 2008, Science, 321, 669