

超音速ガス流による初代星の集団形成の長時間進化シミュレーション

○金岡 慧¹, 平野 信吾², 沈 有程¹, 梅田 秀之¹
¹東京大学, ²九州大学

宇宙初期に生じるダークマターとバリオン間の超音速の速度差からこれまで線形摂動理論で無視されていた移流項が初代星形成過程にも影響することが知られている。この効果を取り入れた最近の研究では、大質量ガス雲がフィラメント状になり同時に複数の初代星形成を生じることにも調べられた。一方、初代星が主系列星となるまでは数値シミュレーションから約10万年と見積もられており、ガス雲で初代星形成が始まると10万年以内にできる初代星は輻射の影響を受けない種族III.1の初代星と考えられる。この超音速ガス流を導入した初期条件を用いて生じたフィラメント状ガス雲の長時間進化シミュレーションを行い、先行研究で確認されていなかった密度ピークを発見した。

動機：大質量初代星の集団形成

宇宙初期の構造・天体形成を理論的に調べるために、現在宇宙論より与えられる始原的な物質分布・化学組成を初期条件としてその後の時間発展を数値計算する、宇宙論的シミュレーションが用いられてきた。近年になって、それまで線形摂動理論に基づいて計算初期条件を生成する際に無視されていた移流項が、宇宙初期においては**ダークマター・バリオン間に超音速の速度差**を生じるため、宇宙初期の星・銀河形成に影響することが指摘された (Tselikhovich & Hirata 2010)。

宇宙の第一世代星・初代星の形成過程は、**ダークマターミニハロー**がその密度中心にバリオンを集めることで始まる。ダークマター・バリオン間の相対速度はこのバリオン収縮を妨げるため、星形成を遅らせる (Greif et al. 2011; Stacy et al. 2012)。

この間にダークマターハローは周囲の物質をとりこんで成長し、その内部に大質量のバリオンを蓄えられる。この大質量ガス雲が重力不安定となり収縮を開始すると、ガス温度が急激に低下することで**ガス雲は大きなフィラメント状となり、同時に複数の初代星を形成する高密度コアへと分裂**することが数値シミュレーションより確認された (Hirano et al. 2018)。先行研究は、最初の星形成から4万年後までに約56 - 113 [M_{\odot}]を持つ8つの初代星が形成することを示した。その後、フィラメント状ガス雲が潰れると共にこれらの天体は接近し、その一部は**近接連星系を形成する可能性**が指摘された。この系が**近接連星大質量ブラックホール連星**となると、重力波の起源天体となりうる。

一方、**初代星が降着期進化する時間は、数値シミュレーションより約10万年と見積もられる** (Figure 1 in Hirano & Bromm 2017)。この後、主系列星となった初代星からの輻射フィードバックによって周囲ガスの落下を妨げる。また高温の星表面から放出される高エネルギー光子によって電離・解離光された領域では、初代星形成過程が変化する (種族 III.2 の初代星)。

先行研究では4万年以降から初代星が降着進化する10万年までの間の星形成過程についてはまだ十分調べられていない。また、計算コストの問題のため差し渡し100 [pc] にもなるフィラメント状ガス雲のうち、最初に重力収縮した領域を含む10 [pc]領域のみを計算しており、残りの領域における天体形成は調べられていなかった。

本研究では、数値分解能に上限を設けることで計算コストを抑えることで100[pc]スケールのガス雲で最初の星形成から10万年に渡る始原的星形成シミュレーションを行う。そして、このガス雲での種族III.1の初代星の星形成効率を求める。

このポスターでは10万年後における重力不安定となる領域 (=クランプ) を特定し、Hirano et al. 2018の8つのクランプと比較する。

手法：ガス雲全体の長時間計算

本研究では重力 (ジーンズ) 不安定となった領域で初代星形成が起きたと判定し、それ以後の収縮進化を無視する。臨界密度 $10^7[\text{cm}^{-3}]$ 以上の領域では断熱コア (図1の高密度の断熱圧縮) が形成されるよう設定することで、ガスの収縮・密度上昇を止めた (Hirano & Bromm 2017)。また、この臨界密度を数値分解能の上限とすることで4万年以降の時間進化を追うことを実現した。

計算コード... Gadget-3 (Springel 2005) + 始原的ガス反応 (Hirano et al. 2015)
初期条件 ... "Run-Med" (in H18; 超音速ガス流 2σ の影響下における始原的星形成シミュレーション) において、最初のガス雲収縮が起きた時点
終了条件 ... 計算開始 (=最初の初代星形成) から10万年後

解析：フィラメントの円柱状解析

フィラメント状ガス雲の解析にはHirano et al.2018でも用いられた以下の円柱状解析を行う。
1. フィラメントに沿ったベクトルを用意し、 $\Delta L=0.01\text{pc}$ のbinを取る。
2. 各binの内部で最大密度を持つ粒子の周りにbinごとに円盤状にプロファイルを取る。
3. 円盤部分の質量 ΔM_{cyl} をbinの幅である ΔL で割った線質量 M_{line} を次の臨界線質量 $M_{\text{line,crit}}$ と比較し、重力不安定なbinを特定する (図3の赤色部分)。

$$M_{\text{line,crit}} = \frac{2c_s^2}{G}$$

結果

10万年後のフィラメント状ガス雲の密度構造

先行研究で計算されなかった図2(a)の領域にも高密度の構造が確認できる。また、図2(b)では時間を進めることで4万年後では広がって存在していたCL1-4は集まり始めていることが確認できる。

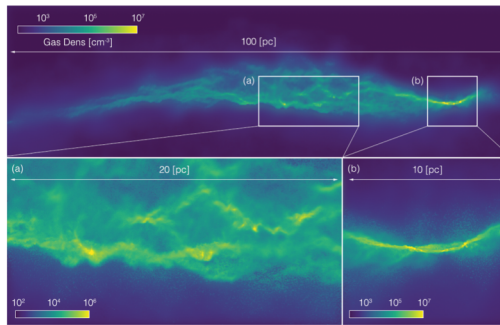


図2上段：最初の重力収縮から10万年後のフィラメント状ガス雲の全体
下段a: Hirano et al. 2018では計算されなかった領域
下段b: Hirano et al. 2018で計算された最初に重力収縮したクランプを含む領域

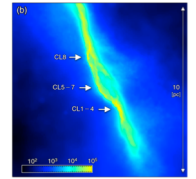


図3: Hirano et al. 2018で計算された最初の重力収縮から4万年後のフィラメントの一部 (Figure 8(b) in Hirano et al. 2018)

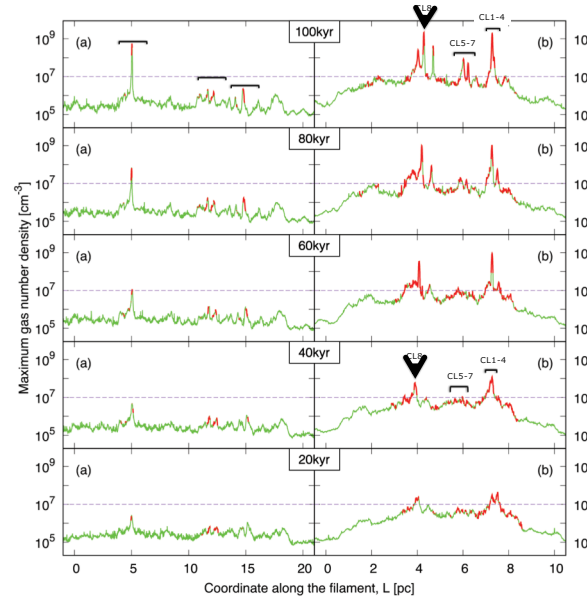


図4: 上から10万年、8万年、6万年、4万年、2万年でのフィラメントに沿ったベクトルの ΔL のbin内部での最大密度 (フィラメント方向の1次元構造)。赤色部分は重力不安定なbinを示している。また、(a)は図2(a)に(b)は図2(b)の領域にそれぞれ対応している。CL1-8はHirano et al. 2018で特定されたクランプの位置を示している。

図4最上段(a)では、大きく3箇所しに重力不安定なbinの密度ピークが存在していることが確認できる。(b)でもHirano et al. 2018で特定されたCL8の周りに複数のピークが確認できる。一方で、CL1-4は10万年では1つのピークに集まっている。

図5ではEnclosed massをジーンズ質量で割ることでクランプの個数の統計量を示している。100pcに領域を広げてもオーダーが変わるほどクランプの個数は増えない。

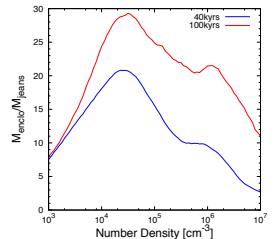


図5: 100pc領域での密度メッシュでのEnclosed massをジーンズ質量で割った N_{clump} の時間進化を示す。

まとめ/展望

今回、計算終了時 (=10万年) のフィラメント状ガス雲を解析し、先行研究の10pc領域でも確認されていなかった新たな密度ピークが存在することがわかった。CL1-4が10万年後に1次元では1つの密度ピークになるように、クランプの数を調べるには密度ピークの3次元空間での重力不安定性を時間を追って解析しなければならない。また、初代星の最終星質量を推定する際に使用する最終星質量推定式 (Equation 13 in Hirano et al. 2014) は、各クランプが重力不安定になった時点でのガス降着率を使用する。重力不安定になった時点特定することで、ガス雲にできる種族III.1の初代星の総数と質量および、星形成効率を求めることができる。

Reference

- Tselikhovich & Hirata, PhRvD, 82, 083520(2010)
- Greif et al., ApJ, 736, 147(2011)
- Stacy et al., ApJ, 523, L1(2011)
- Hirano et al., ApJ, 885, 17(2018)
- Hirano & Bromm, MNRAS 470, 898(2017)
- Springel, MNRAS 364, 1105(2005)
- Hirano et al., MNRAS 448, 568(2015)
- Hirano et al., ApJ, 781, 60(2014)

図1: 100pc領域での密度-温度の時間進化を示す。