



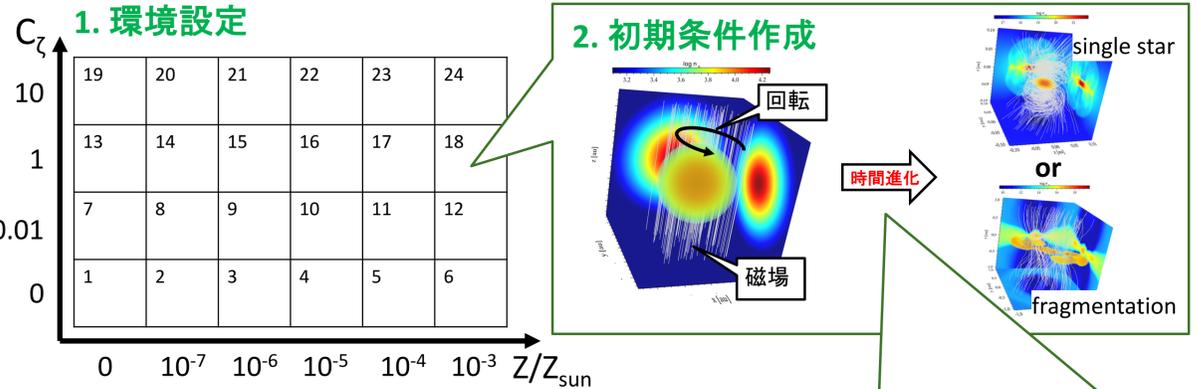
INTRODUCTION

近年ブラックホール(BH)連星の存在が重力波の検出によって明らかになり、この数十太陽質量同士のBH連星が宇宙のいつ、どこで、どのように誕生するかが問題となっている。一般的なBH連星形成シナリオとして、孤立した2つの大質量星からなる連星(大質量星連星)からの形成が挙げられるが、こういった連星形成が起こりやすいのはいつ、どういった環境なのか、まだ議論が続いている。

そこで、スターバースト銀河や初代銀河といった銀河系外の星形成環境を再現し、連星形成の可能性について言及する。

最終的には、銀河系内外の星形成の数値シミュレーションを行うことで、アウトフロー・ジェット駆動や分裂に関して理論的に調べ、銀河系内外の多様な星形成を理解する。

MODEL & NUMERICAL METHOD



本研究では、初代銀河やスターバースト銀河といった銀河系外環境に焦点を当て、初期にガス雲が持つ金属量 ( $Z/Z_{sun} = 0, 10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}$ ) とイオン化度 ( $C_i = 0, 0.01, 1, 10$ ; 宇宙線強度と放射性元素崩壊で生じる $\gamma$ 線強度) を組み合わせ、24通りの極低金属量星形成環境を設定する。金属量は星の進化と関連するため、宇宙の各々の時代に対応する。また、イオン化度は電離源の強度に関係しており、周囲の環境に対応する (Susa et al. 2015; Higuchi et al. 2018, 2019)。

3. 数値計算

設定した24通りの星形成環境それぞれに対して、Bonner-Ebert密度プロファイルを持つコアを初期条件として、コアから原始星形成まで、多層格子法を用いたnon-ideal MHDシミュレーションを行った。

多層格子法は、空間分解能の低いグリッドで全体を覆いながら、細かいグリッドで空間分解能の必要な領域を覆う手法である。この手法によりコア全体と原始星の両方を空間分解することが出来る。

Non-ideal MHD equations

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

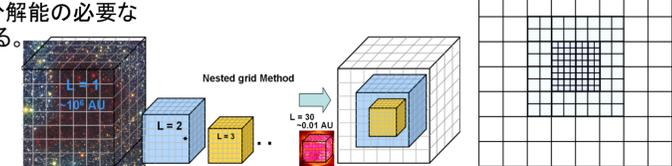
$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho (v \cdot \nabla) v = -\nabla P - \frac{1}{4\pi} B \times (\nabla \times B) - \rho \nabla \phi$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times \left[ v \times B + \frac{\eta_{AD}}{|B|^2} [(\nabla \times B) \times B] \times B - \eta_{OD} \nabla \times B \right]$$

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho$$

$$P = P(\rho) \quad \ast 4 \text{ 化学進化、熱進化は1 zone計算をしたものを用いる}$$

多層格子法の概念図



RESULTS

銀河系内の星形成では普遍的に駆動するとされるアウトフローだが、銀河系外の星形成は望遠鏡の分解能が足りず、観測的に調べられてきていない。そこで、銀河系内外の星形成環境を再現し、原始星が形成されるまでに、アウトフローが駆動するかどうかを調べた (Higuchi et al. 2019)。図1が、そのシミュレーション結果である。背景オレンジ色、青色の領域では、アウトフローが駆動し、背景灰色の領域ではアウトフローが駆動しなかった。宇宙初期の星形成環境における星形成過程では、アウトフローは駆動せず、宇宙進化に伴って、星形成過程でアウトフローが駆動するようになることが分かった。そして、その遷移は、おおよそ、 $Z/Z_{sun} \approx 10^{-4} - 10^{-3}$  で起こっていることが示唆された。

Higuchi et al. (2019)の結果から、アウトフローは銀河系外では普遍的に駆動しないことが示唆された。アウトフローによって十分に角運動量が外部に輸送されなければ、角運動量がガス雲中心部に残る。したがって、原始星形成時に、周囲に形成される原始惑星系円盤が分裂する可能性が高くなる。そこで、Higuchi et al. (2019)でアウトフローが駆動しなかった金属量領域を中心に、 $Z/Z_{sun} \approx 0 - 10^{-3}$ における分裂可能性について言及するため、数値シミュレーションを行い、図2にシミュレーション結果の3D図を示した。オレンジ線で囲まれた領域では分裂は見られず、単星が中心部に形成され、その原始星からジェットが駆動したことが確認された。緑線、紫線で囲まれたモデルでは、今回のシミュレーション時間内に、分裂が見られたモデルである。

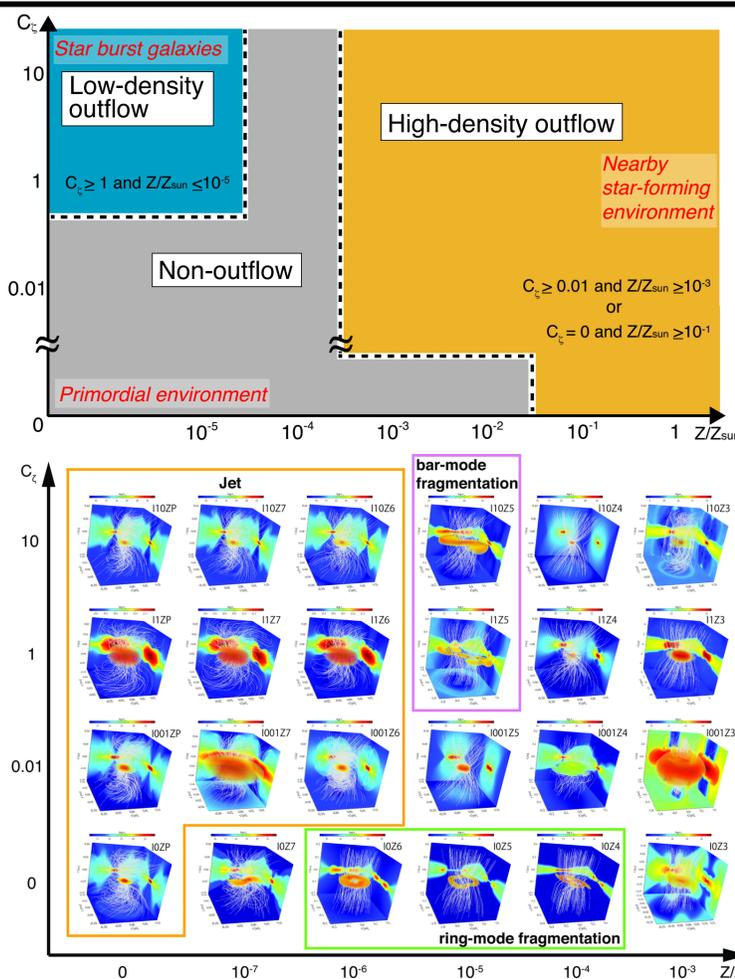


図1 シミュレーション結果。横軸が金属量、縦軸がイオン化パラメータである。背景オレンジ色領域が太陽系近傍で見られる、first core段階(数密度  $n > 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ; high-density outflow)で駆動したモデル、背景青色領域が形成過程のより初期段階(数密度  $n < 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ; low-density outflow)で駆動したモデル、背景灰色領域が原始星形成までアウトフローが駆動しなかったモデルである。Higuchi et al. (2019)より引用。

図2 原始星形成時のシミュレーション結果。横軸が金属量、縦軸がイオン化パラメータである。それぞれの3次元図右上にモデル名を記載(例: I02Pは  $C_i = 0, Z/Z_{sun} = 0$  を示し、I10Z3は  $C_i = 10, Z/Z_{sun} = 10^{-3}$  を示す)。カラーコントアは数密度、白線は磁力線を表す。オレンジ線で囲まれたモデルはジェットが駆動したモデル、紫線、緑線で囲まれたモデルは分裂が見られたモデルである。

DISCUSSION & CONCLUSIONS

今回の数値シミュレーションは星形成過程のうちの前期段階のみの結果であり、降着段階を経てどのように星が進化していくかについては言及できていない。しかし、緑線で囲まれたモデルは、ring-modeの分裂が見られた。ring-modeは分裂片間の軌道角運動量が大きくなるため、連星や複数星として生き残る可能性が高いことが示されており(Matsumoto & Hanawa 2003; Machida et al. 2005, 2008)、今後長時間シミュレーションを行ったとしても、見られた分裂片が生き残る可能性が高い。

Higuchi K., Machida M. N., Susa H., 2018, MNRAS, 475, 3331  
 Higuchi K., Machida M. N., Susa H., 2019, MNRAS, 486, 3741  
 Machida M. N., Matsumoto T., Hanawa T., Tomisaka K., 2005a, MNRAS, 362, 382  
 Machida M. N., Inutsuka S., Matsumoto T., 2008, ApJ, 676, 1088  
 Matsumoto, T., & Hanawa, T. 2003, ApJ, 595, 913  
 Susa H., Doi K., Omukai K., 2015, ApJ, 801, 13