

## 異なる金属量における星形成後期段階の進化

中村 鉄平 (九州大学大学院 地球惑星科学専攻)

### Abstract

星形成後期段階の進化を調べるために、星形成前のガス雲の金属量を  $0 \leq Z \leq Z_{\odot}$  の範囲で変化させシミュレーションを行った。ほぼ静水圧平衡状態にあるガス雲から計算を開始し、原始星誕生後 100 年間で計算した。星形成過程は  $Z \leq 10^{-4}Z_{\odot}$  と  $Z > 10^{-4}Z_{\odot}$  で大きな違いが見られた。 $Z \leq 10^{-4}Z_{\odot}$  では安定した円盤は形成されずに分裂が頻繁に起こり、多くの原始星が形成される。いくつかの原始星は原始星同士の相互作用によってガス雲の中心から放出されるが、最終的に 10~20 の原始星からなる星団が形成される。 $Z > 10^{-4}Z_{\odot}$  では単一の原始星が形成し、周囲には安定した円盤が現れる。この場合円盤内で時折分裂が起きクランプが形成されるが、最終的にクランプは中心の原始星に落下する。星形成過程の違いはガスの熱進化と質量降着率の違いによって生じる。ガス雲の熱進化はファーストコアの生存時間を決定する。 $Z > 10^{-4}Z_{\odot}$  の場合では原始星が形成される前にファーストコアを形成するが、 $Z \leq 10^{-4}Z_{\odot}$  では安定なファーストコアは形成されない。ファーストコアは次第に円盤に成長し、円盤は角運動量輸送を効率的にし、分裂を抑制する。 $Z \leq 10^{-4}Z_{\odot}$  の場合は質量降着率が高く円盤の表面密度が短時間で増加し、円盤は重力的に不安になる。結果的に活発な分裂が引き起こされる。

## 1 Introduction

星形成は宇宙の力学的、科学的進化を支配する。星質量や星からのフィードバック、星の終末は宇宙全体の進化に強く関係をしている。宇宙進化の歴史を理解するには、星形成プロセスを理解することがとても大切である。近年の研究で初期宇宙における星形成プロセスは現在や中期の宇宙における星形成プロセスとは大きく違うということがわかった (Bromm et al.2001; Smith 2007; Jappsen et al. 2007)。その大きな違いは主に金属量やダストの量に影響を受けていると考えられている。初期宇宙のガス雲は金属もダストも含まれない、一方で現在のガス雲は金属もダストも含んでいる。金属とダストの量が星形成ガス雲の熱進化の変化をもたらす (Omukai 2000; Omukai et al.2005,2010)。

今研究ではガス雲進化のシミュレーションを原始星誕生後~1-100yr で計算した。今回の計算では原始星モデルを利用することによって sink 問題と計算時間の短縮を行った。

## 2 Methods

異なる金属量を含む 8 つのガス雲の星形成進化をシミュレーションした。ガス雲の初期状態として Bonner-Ebert (BE) を仮定して計算を始めた (Ebert 1955; Bonnor 1956)。ガス雲はそれぞれ違う初期質量と温度を持っている (図 1)。

すべてのモデルで回転  $\Omega_0 = 3 \times 10^{-15} s^{-1}$  を初期値として与えている。磁場は今研究では導入しない。化学進化を次元計算し、導入した (図 2)。また原始星モデル (図 3) をシミュレーションに導入することによって sink 問題の解決、計算時間の短縮を行った。

## 3 Results

### 3.1 $Z = 0$ and $10^{-6}Z_{\odot}$ モデル

両モデルでは頻繁に分裂が起きた (図 4,5)。 $Z = 0$  で最も重い原始星の質量は  $\sim 2M_{\odot}$ 、半径  $\sim 160R_{\odot}$ 、 $10^{-6}Z_{\odot}$  では質量  $18M_{\odot}$ 、半径  $160R_{\odot}$  だった。分裂は中心付近で頻繁に起こり、分裂片の数は 10~20 が現れた。両モデルに違いは殆ど見られなかった。

### 3.2 $Z = 10^{-5}Z_{\odot}$ モデル

$Z = 0$  and  $10^{-6}Z_{\odot}$ モデル と似た結果になった (図 6)。しかし、このモデルでは合計 7 つの分裂片が中心領域から放出された。分裂片の数も多く最大で 25 の原始星が形成された。

### 3.3 $Z = 10^{-4}Z_{\odot}$ モデル

原始星誕生前に分裂が起こっている (図 7)。フィラメント構造を形成し、分裂もその周囲で起こっている。分裂片の数は  $Z = 10^{-4}Z_{\odot}$ モデル と比べると少なくなった。

### 3.4 $Z = 10^{-3}Z_{\odot}$ モデル

上のモデルとは大きく違い、分裂はめったに起きない (図 8)。分裂しても中心の原始星に落下する。最終的には 1 つの原始星が残った。

### 3.5 $Z = 10^{-2}Z_{\odot}$ モデル

最初の分裂片が合体したあとで星周円盤が発達する (図 9)。分裂は円盤の内側の縁で起こるが分裂片はすぐに中心に落ちるか消える。

### 3.6 $Z = 10^{-1}Z_{\odot}$ モデル

他のモデルと同様に原始星誕生前に分裂が起こっている (図 10)。分裂片が合体すると星周円盤が発達し、スパイラル構造も発達する。

### 3.7 $Z = Z_{\odot}$ モデル

1 つの原始星が中心に誕生し、周辺に安定した円盤が形成された (図 11)。円盤の中でスパイラル構造が出来る。このモデルでは分裂は起こらなかった。

## 4 Discussion

星形成過程は  $Z \leq 10^{-4}Z_{\odot}$  と  $Z > 10^{-4}Z_{\odot}$  で大きな違いが見られた。 $Z \leq 10^{-4}Z_{\odot}$  では安定した円盤は形成されずに分裂が頻繁に起こり、多くの原始星が形成される。いくつかの原始星は原始星同士の相互作用によってガス雲の中心から放出されるが、最終的に 10~20 の原始星からなる星団が形成される。 $Z > 10^{-4}Z_{\odot}$  では単一の原始星が形成し、周囲には安定した円盤が現れる。この場合円盤内で時折分裂が起きクランプが形成されるが、最終的にクランプは中心の原始星に落下する。星形成過程の違いはガスの熱進化と質量降着率の違いによって生じる。ガス雲の熱進化はファーストコアの生存時間を決定する。 $Z > 10^{-4}Z_{\odot}$  の場合では原始星が形成される前にファーストコアを形成するが、 $Z \leq 10^{-4}Z_{\odot}$  では安定なファーストコアは形成されない。ファーストコアは次第に円盤に成長し、円盤は角運動量輸送を効率的にし、分裂を抑制する。 $Z \leq 10^{-4}Z_{\odot}$  の場合は質量降着率が高く円盤の表面密度が短時間で増加し、円盤は重力的に不安になる。結果的に活発な分裂が引き起こされる。

## 5 図

Model	$Z$	$T_0$ [K]	$M_{cl}$ [ $M_{\odot}$ ]	$R_{cl}$ [AU]	$n_{ps}$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]
1	0	197	1851	$3.80 \times 10^5$	$3.4 \times 10^{17}$
2	$10^{-6}Z_{\odot}$	195	1823	$3.78 \times 10^5$	$3.8 \times 10^{17}$
3	$10^{-5}Z_{\odot}$	190	1753	$3.73 \times 10^5$	$4.3 \times 10^{17}$
4	$10^{-4}Z_{\odot}$	154	1279	$3.36 \times 10^5$	$3.4 \times 10^{18}$
5	$10^{-3}Z_{\odot}$	34	133	$1.58 \times 10^5$	$8.5 \times 10^{19}$
6	$10^{-2}Z_{\odot}$	18	39	$1.01 \times 10^5$	$9.1 \times 10^{19}$
7	$10^{-1}Z_{\odot}$	20	46	$1.06 \times 10^4$	$1.7 \times 10^{20}$
8	$Z_{\odot}$	11	7.1	$4.84 \times 10^4$	$2.2 \times 10^{20}$

図 1: 初期設定

## Reference

Abel and Norman. 2012. 発行元 1

Borrm. 2013. 発行元 2

Omukai, and Matsumoto, and Inutsuka. 2013. 発行元 3

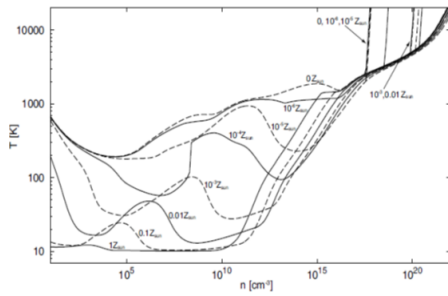


図 2: それぞれの金属量におけるガス雲の熱進化一次元計算

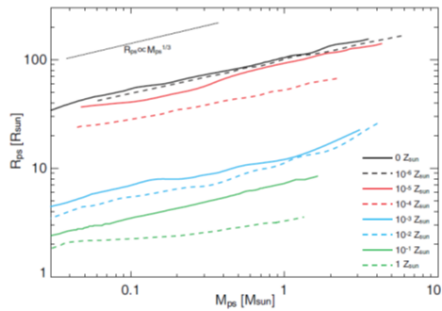


図 3: それぞれの金属量での原始星の半径と質量

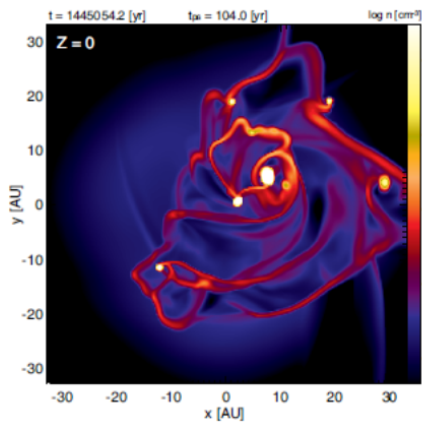


図 4:  $Z = 0$  モデル

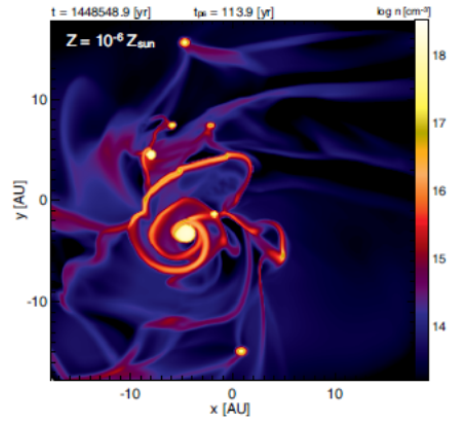


図 5:  $Z = 10^{-6} Z_{\odot}$  モデル

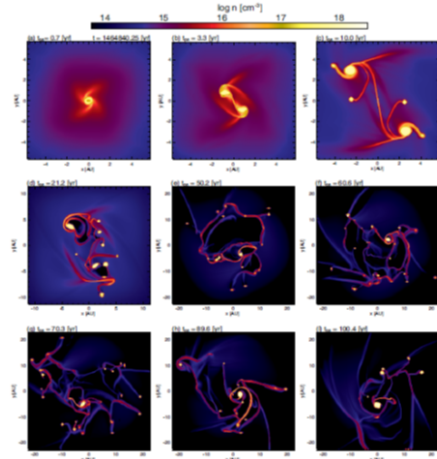


図 6:  $Z = 10^{-5} Z_{\odot}$  モデル

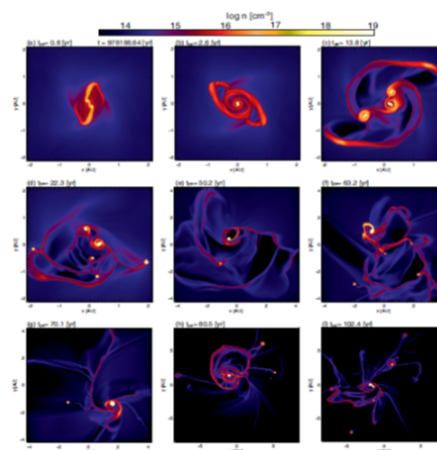


図 7:  $Z = 10^{-4} Z_{\odot}$  モデル

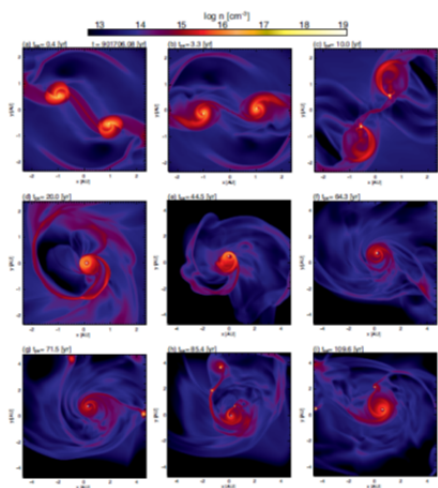


図 8:  $Z = 10^{-3} Z_{\odot}$  モデル

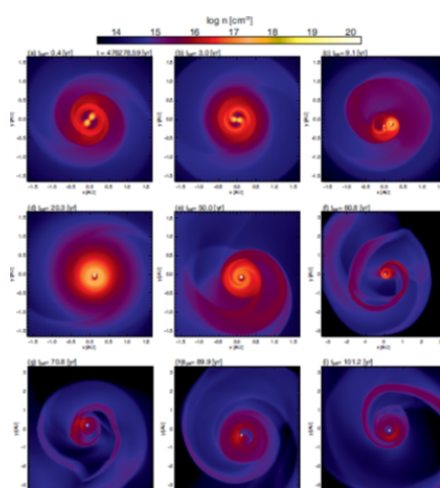


図 10:  $Z = 10^{-1} Z_{\odot}$  モデル

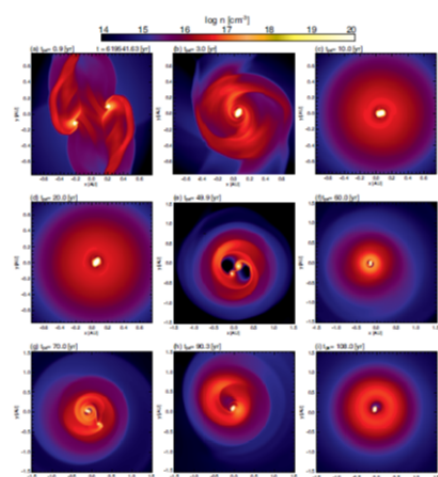


図 9:  $Z = 10^{-2} Z_{\odot}$  モデル

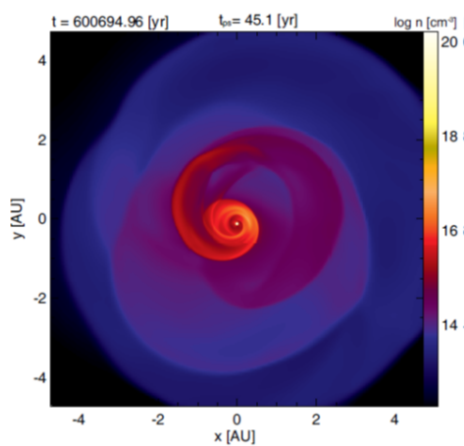


図 11:  $Z = Z_{\odot}$  モデル