

初代星形成過程の物理

Yoshida et al.(2006)

“FORMATION OF PRIMORDIAL STARS IN A Λ CDM UNIVERSE”

筑波大学 宇宙理論研究室

久保田 明夏

2011/07/20 発表

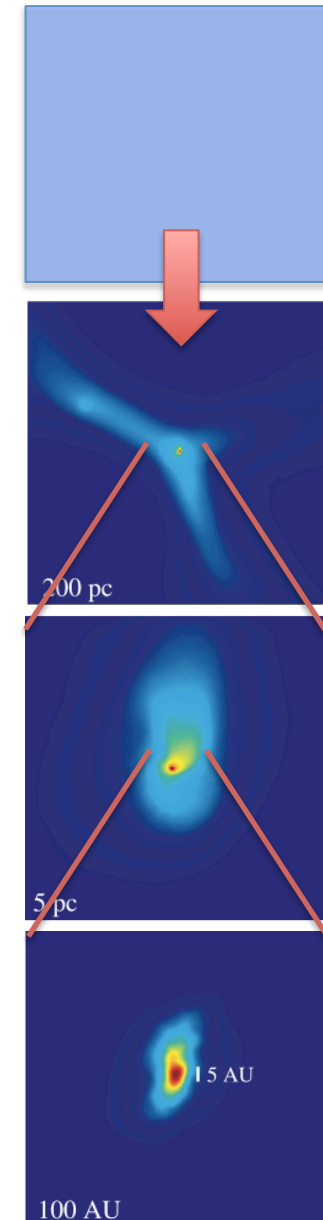
Motivation

- First star = population III (←Metal が 0)
- First star の重要性
 - 宇宙で初めての光源 → 宇宙再電離への影響
 - 宇宙で初めてSN → 重元素汚染
- 分かってない事
 - ガス雲の分裂
(角運動量は？バイナリーはできるのか？)
 - MZAMS
(生まれたときどのくらいの質量か？)

First star 形成 概観

1. 宇宙の晴れ上がりで宇宙が中性化
2. 中性水素原子ガス
3. 宇宙膨張から取り残され、重力収縮が始まる
4. 重力収縮 \leftrightarrow 圧力による膨張 せめぎ合い
5. ガスのcoolingで圧力上昇が抑えられ
重力収縮が続く
6. 中心に原始星
($n = 10^{22} [\text{cm}^{-3}]$)
7. 外層の降着
8. Main sequence

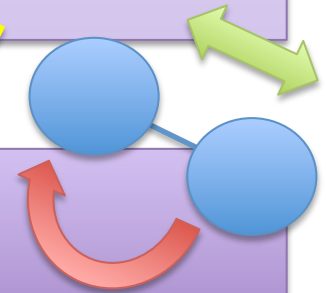
First star では
水素分子による
cooling が重要
(Metalがない)



なぜ水素分子が重要か？

- 現在の宇宙での星形成は
 - Metal がある → Metal による cooling が効く
 - First star を作る中性水素原子ガス雲にはMetalがない
- 水素原子の cooling
 - 電子の準位遷移によるcooling は約8000[K]を超えないと効かない

1番始めに効くのは
水素分子の回転遷移、振動遷移



考慮すべき物理過程と知りたい事

- ガスを収縮させ、First star を作るために
 - 唯一の冷却剤である水素分子の形成
 - 水素分子による Cooling + Heating process

- ガスは分裂するのか知りたい
 - 角運動量をどれくらい持つか？回転の影響は？
- Main Sequence に達した時の質量を知りたい
 - 正確な Mass accretion rate の計算



- Yoshida et al.(2006) “FORMATION OF PRIMORDIAL STARS IN A Λ CDM UNIVERSE”

Contents

- 先行研究
 - One-zone
 - 1D
- Yoshida et al.(2006) 〈3D SPHの計算結果〉
 - ガス雲は分裂するのか → しない
 - Main sequence になるときのmassは → 60 – 100 M \odot
- Yoshida et al.(2006) 以外の3D シミュレーション
 - ガス雲の分裂について
 - Main sequence になるときのmassについて

シミュレーション

- One-zone
 - ガス雲中心のみを解く
 - Ex) Omukai(2005)など
- 1D simulation
 - 球対称を仮定
 - Ex) Omukai&Nishi(98)など
- 3D simulation
 - 角運動量の計算ができる
 - Ex) Yoshida N. et al.(2006)など
 - SPH法

角運動量を計算できる



- ガス雲の分裂への回転の影響がわかる
- 正確な質量降着率が分かる

[Yoshida et al. 2006]

【解く式】

- 連続の式

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v}$$

- 運動量保存

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla \Phi$$

- エネルギー保存

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{p}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{v} - \frac{\Lambda}{\rho}$$

流体の運動によって得るエネルギー や 圧力による仕事

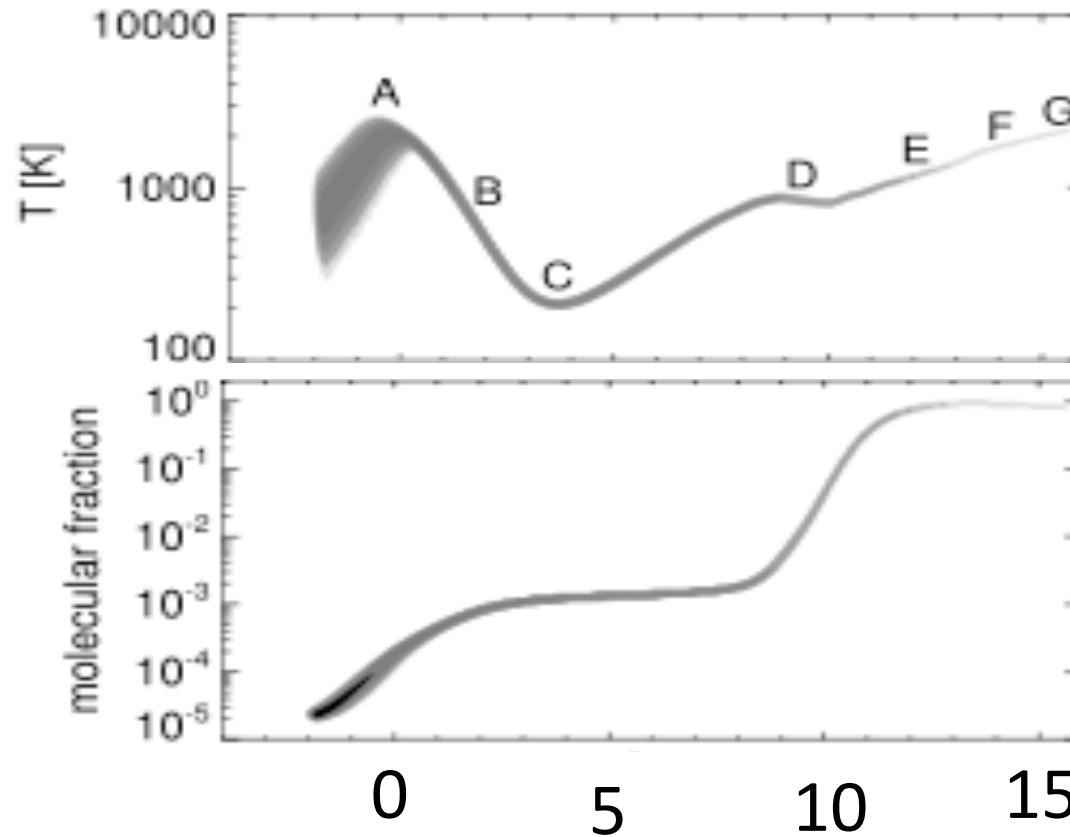
放射冷却 や 化学反応による加熱を考慮した正味の冷却率

- 状態方程式

$$P = \frac{k_B T}{\mu m_p} \rho = (\gamma - 1) \rho u,$$

ρ : 密度 P : 圧力 ϕ : 重力ポテンシャル $\Lambda(T)$: net冷却関数 μ : 平均分子量 m_p : unit mass
 γ : 比熱比 \mathbf{v} : 流体素片の速度ベクトル u : 流体素片の単位質量あたりのエネルギー

First starを形成するガス雲の 【熱進化】



A . H- process

C . H₂ critical density

D . H₂ three-body

E . optically thick
(for line cooling)

F . CIE

G . H₂ dissociation

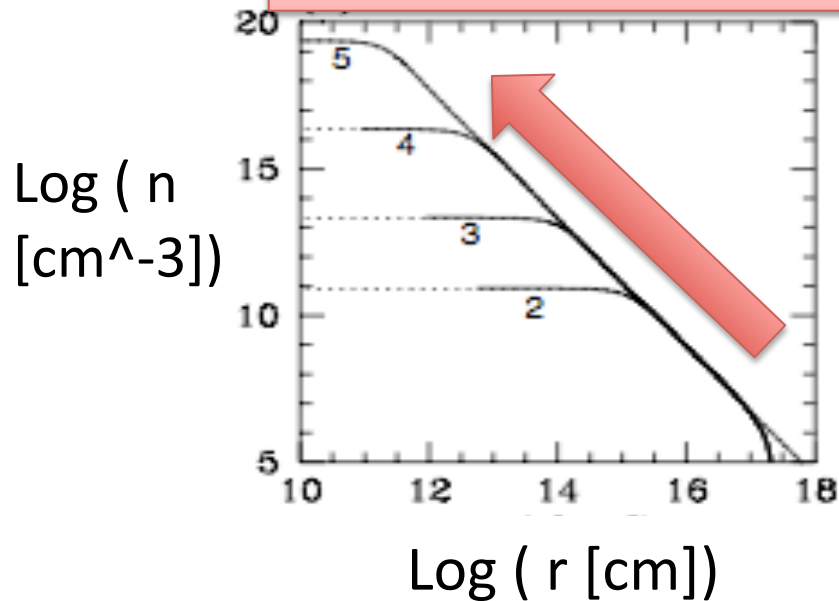
中心密度 $\rightarrow n_H$ (log) [1/cm³]

First starを形成するガス雲の 【力学進化】

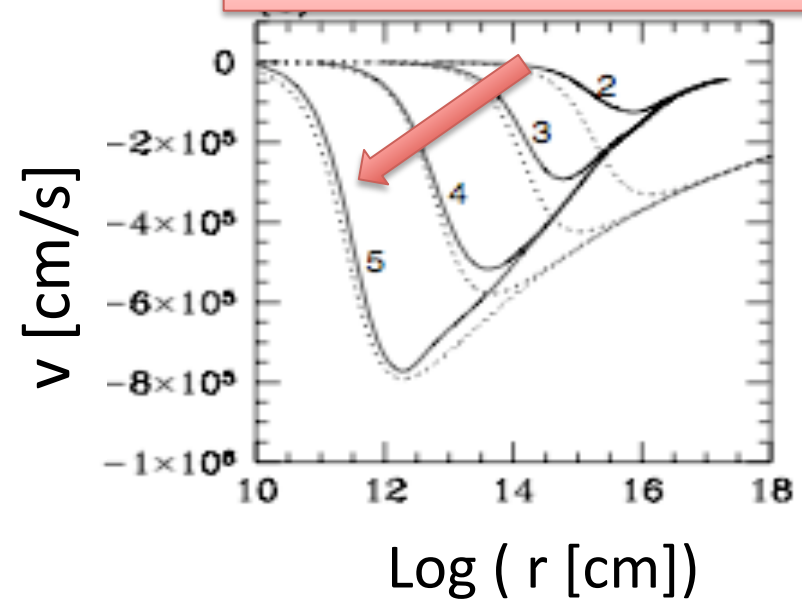
- Larson – Penston 解
 - 自己相似的に進化
 - 中心部がrun-away collapse

Omukai & Nishi (98)

ガス雲の密度進化



ガス雲の速度構造進化



[Yoshida et al. 2006]

【ガスの分裂】

- [Yoshida et al. 2006] では重力収縮を始めた後、ガス雲は分裂しない
- 分裂の原因 →これら全てに対し、安定だった
 1. 熱的不安定
 2. 重力収縮中のガス雲の形状の
 3. 回転の影響
- Yoshida et al.(2006) 以外の3D simulationで分裂すると主張するものもある

ガス雲の分裂について

Tsuribe(2002) “On the Possibility of Binary Fragmentation during the First star Formation”

$$\alpha_0 = \frac{5c_s^2 R_0}{2GM} = \frac{\text{Thermal Energy}}{\text{Gravitational Energy}}$$
$$\beta_0 = \frac{\sigma_0^2 R_0^3}{3GM} = \frac{\text{Rotational Energy}}{\text{Gravitational Energy}}$$

- 安定性条件

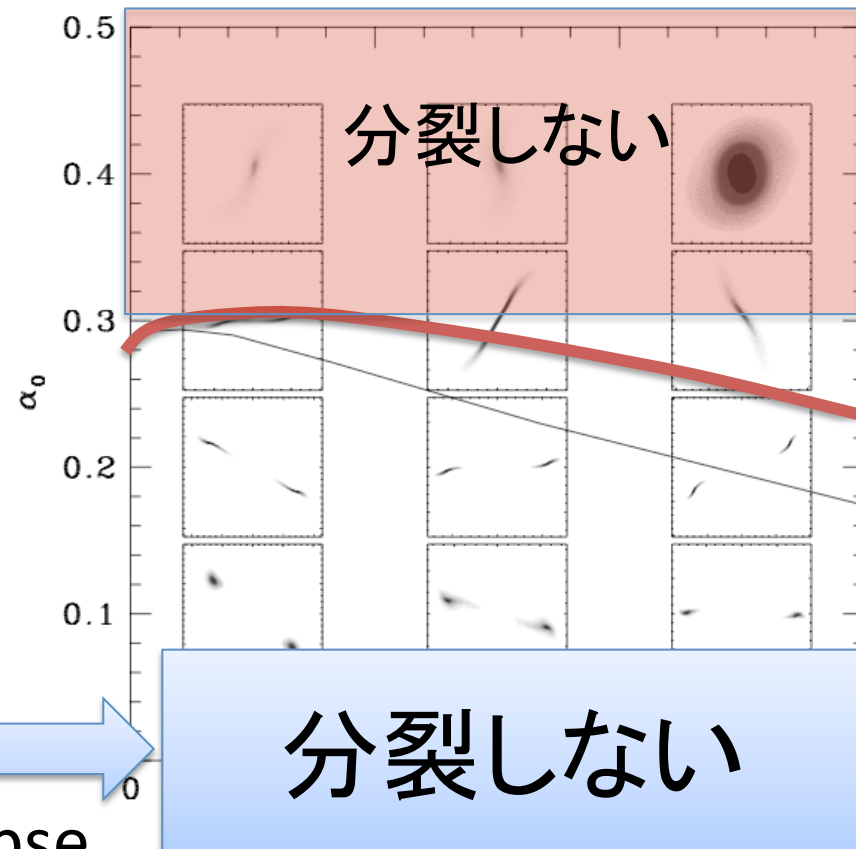
$$\alpha_0 > 0.3$$

for $0 < \beta_0 < 0.3$

- Yoshida et al.

$$\alpha_0 = 1.0, \beta_0 = 0.1$$

※t = 0 : when start collapse



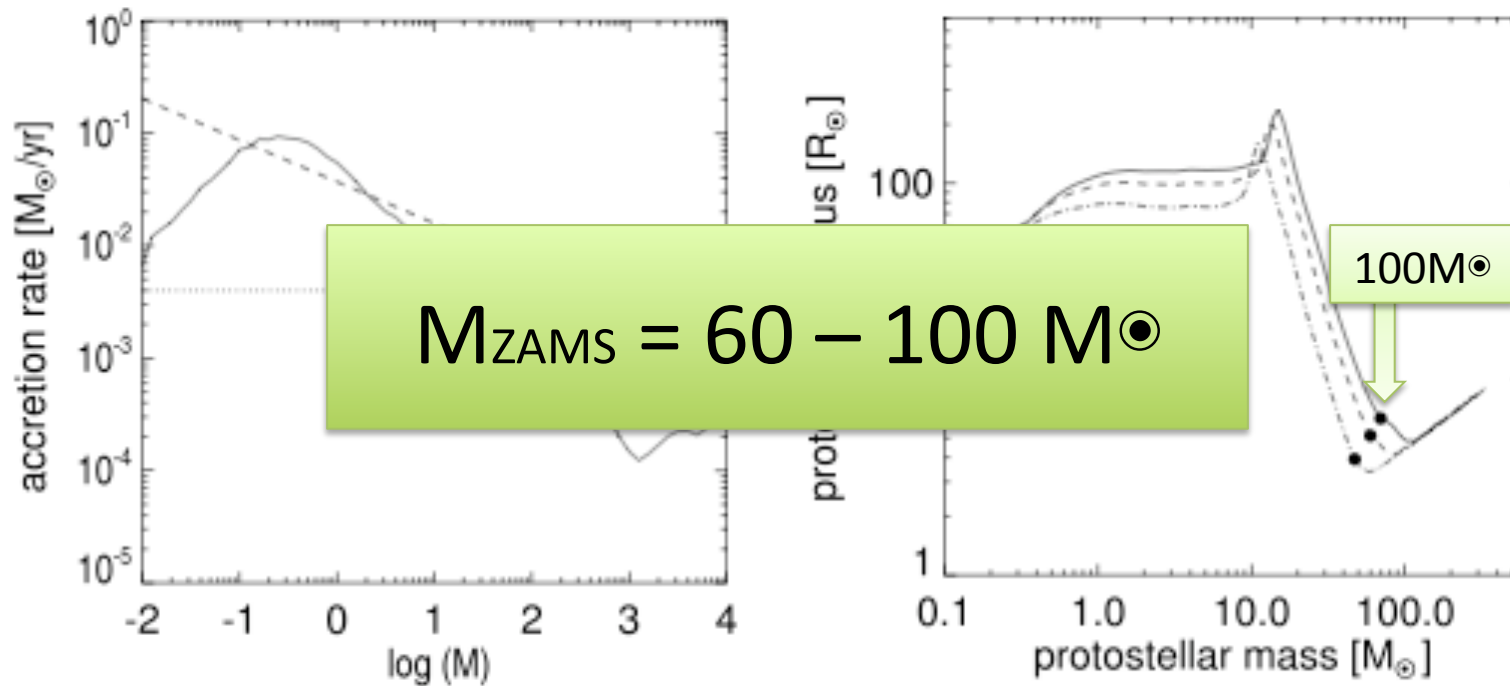
[Yoshida et al. 2006]

【Main sequence に達した時の Mass】

- 降着率

定義 $\dot{M} = 4\pi\rho r^2 v_{rad}(r)$

- 得られた降着率を原子星の進化モデルに
適応すると



[Yoshida et al. 2006]

以外のSimulation 結果

- 分裂について

- Stacy et al. (2010)

- SPH法(zoom-in), box size は3分の1程度

- 分裂する

- etc...

- First star の質量

- Hosokawa et al. (2010)

- protostarからの放射が外層に及ぼす影響を考慮

- 45M \odot

- etc...

まとめ

- Yoshida et al.(2006) の結論
 - First star が **回転の影響で分裂するかどうか**
→しない
 - First star が **主系列星になった時のMass**
→60 – 100 M_{\odot}
- Simulation 手法により結果が異なる
 - 分裂しう得るのか
 - First star の質量 } → 結論は出ていない

Future work

- 分裂の計算
 - SPH粒子を増やしたシミュレーション
 - Zoom-in SPH法の改善
- First star の質量
 - Protostarからの輻射の影響を3D計算
- 修論のテーマ
 - Pop III バイナリー (分裂してほしい)