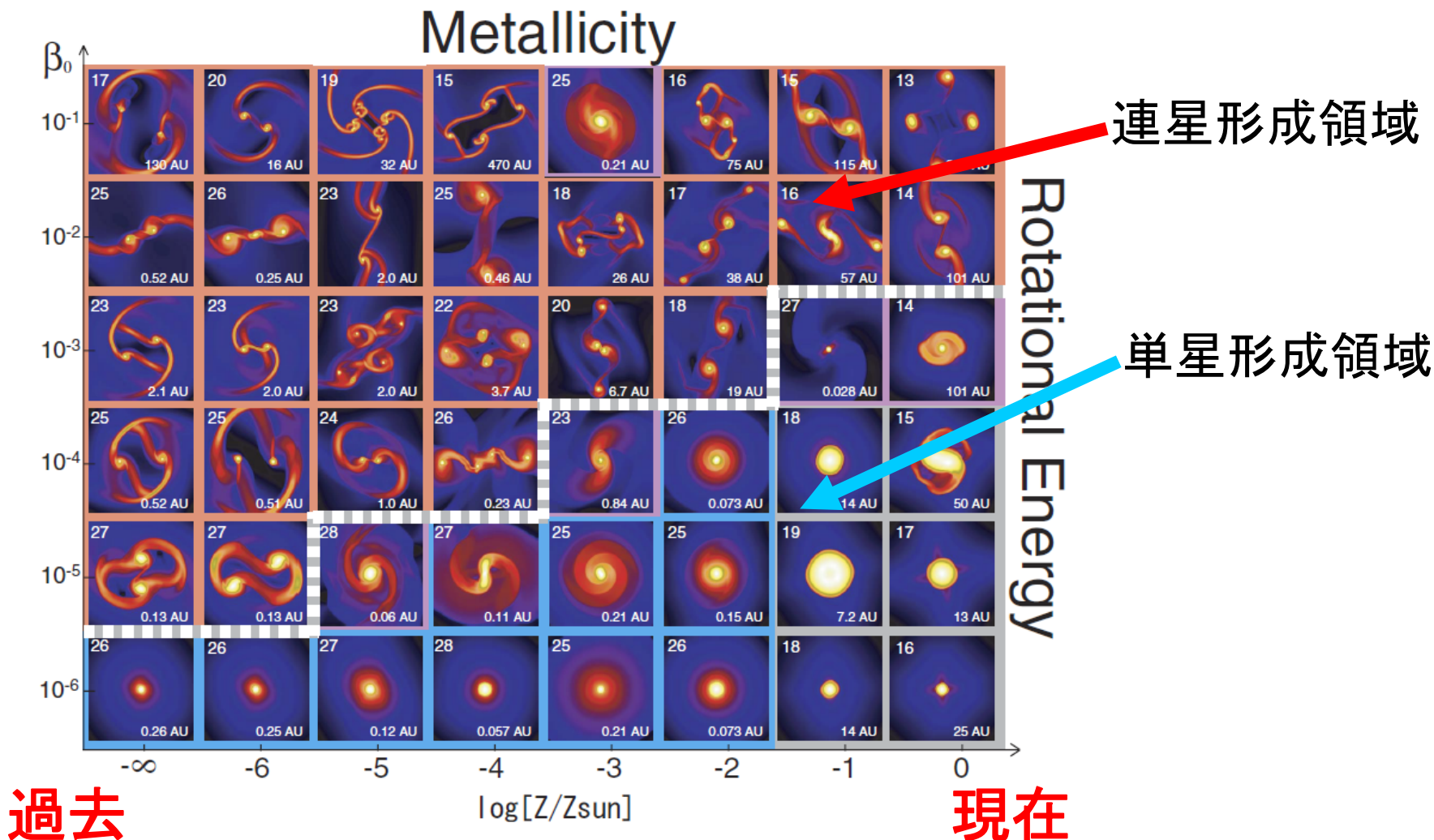


低金属量ガス雲中での星形成

町田正博 (京大), 大向一行 (NAOJ), 松本倫明 (法政大), 犬塚修一郎 (京大)



星形成の研究

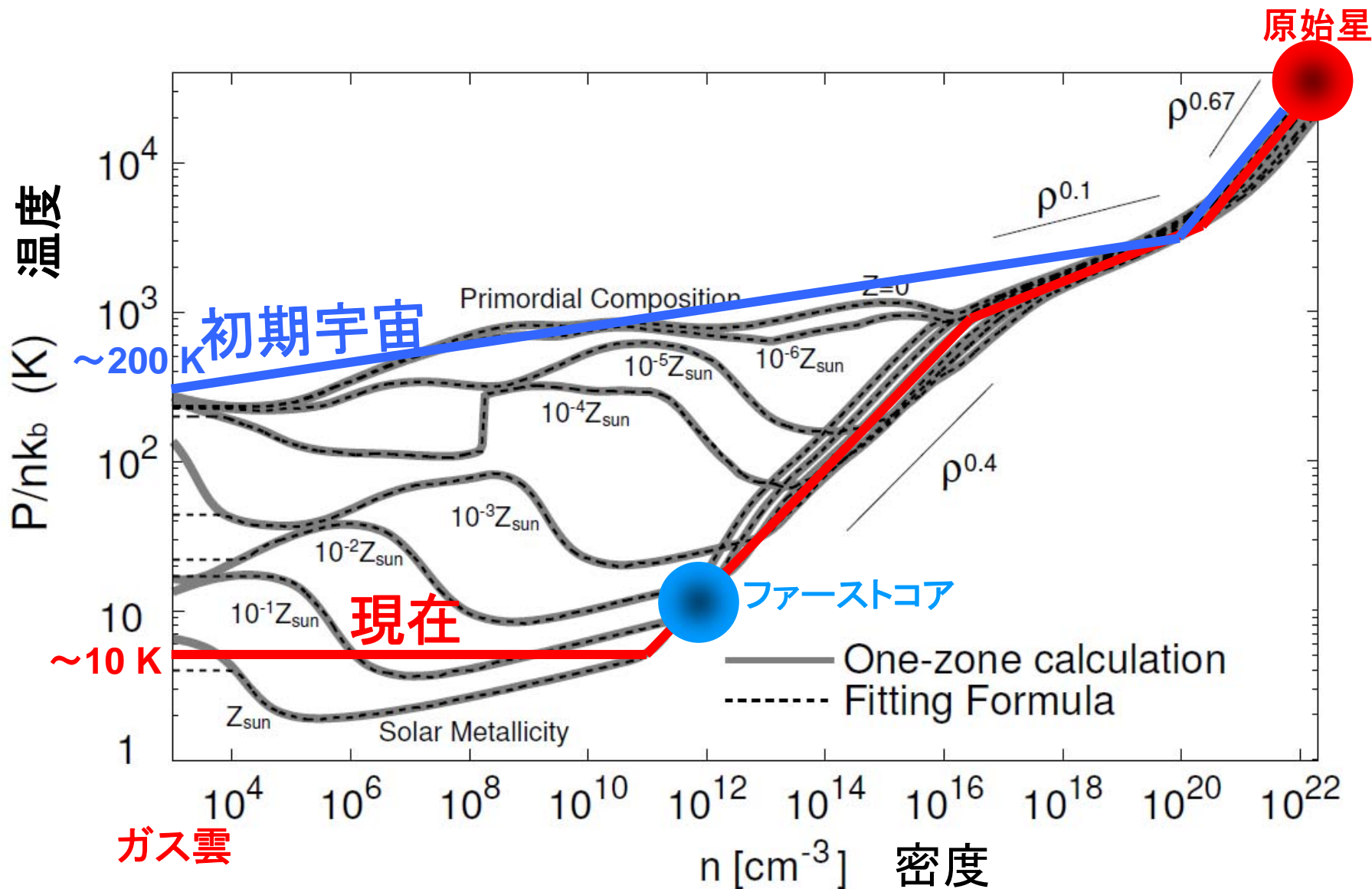
- 星 = 宇宙の階層構造における最も基本的な構成要素、様々な階層で重要な役割、宇宙の進化を支配

- 星形成過程は観測出来ない: 濃いガス雲中(現在)、そもそも見えない(初期宇宙)

- 理論的研究
 - 解析的には難しい: 様々な物理が関連、ガスの熱進化、角運動量、重力
 - 1次元輻射流体の計算
 - 現在の星形成: Larson (1969), Masunaga & Inutsuka (2000)
 - 初期宇宙の星形成: Omukai & Nishi (1998)
 - 3次元輻射流体計算
 - 現在の星形成: Whitehouse & Bate (2006), Stamatellos et al. (2007)
 - 初期宇宙の星形成: Yoshida, Omukai & Hernquist (2008)

現在($Z=Z_{\text{sun}}$)と初期宇宙($Z=0$)のガスの熱進化

➤ **ファーストコア** : 分裂(連星形成)、アウトフロー、角運動量・磁束問題と密接に関連



現在と過去の星形成

Early Universe

Present Day

$n \sim 10^{3-4} \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 250 \text{ K}$,
 $R \sim 10^{5-6} \text{ AU}$, $M \sim 10^3 M_{\text{sun}}$

$n \sim 10^{4-5} \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 10 \text{ K}$,
 $R \sim 10^{4-5} \text{ AU}$, $M \sim 10 M_{\text{sun}}$

母天体

$\beta \sim 10^{-3} - 0.1?$

角運動量

$\beta \sim 10^{-4} - 0.07$

無視できる?

磁場

重要

滑らかな温度上昇 ($\gamma \sim 1.1$)

熱進化

4つの典型的な進化段階

出来ない

First core

出来る

?

分裂、連星

分裂する、ほとんど連星

$M \sim 10^{-3} M_{\text{sun}}$, $R \sim 1 R_{\text{sun}}$

原始星

$M \sim 10^{-3} M_{\text{sun}}$, $R \sim 1 R_{\text{sun}}$

?

ガス流出

アウトフロー、ジェット

大?

質量降着率

大 or 小

低金属量星

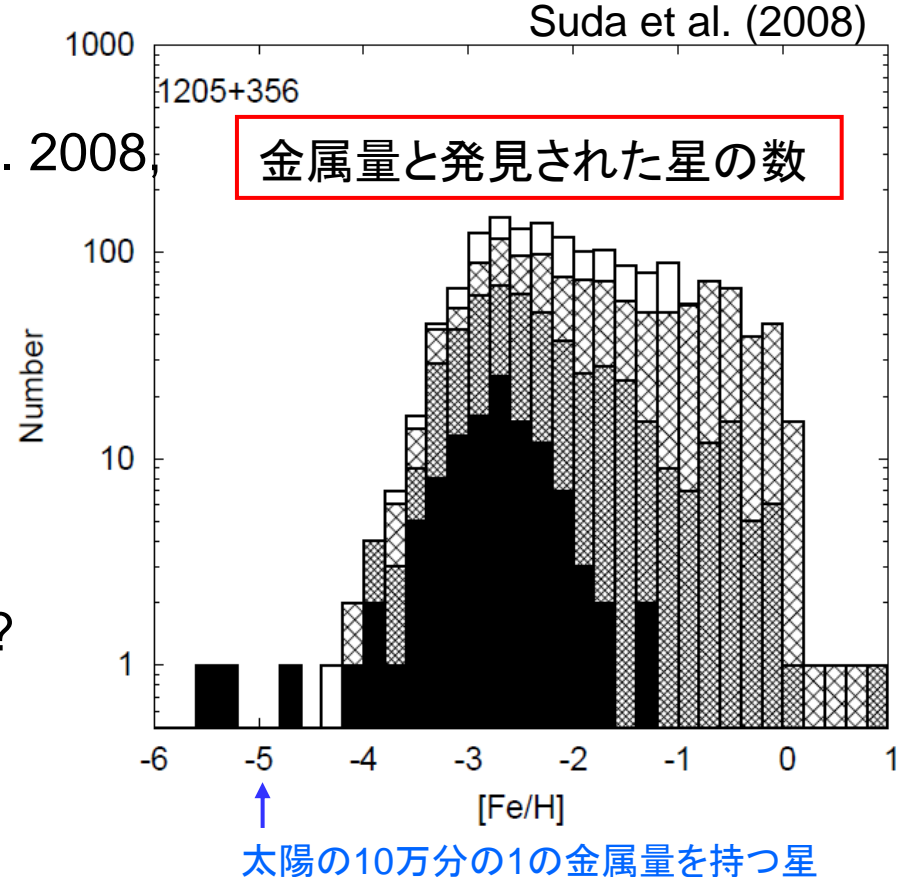
- 低金属量星($[Fe/H] < -3$) ⇒ 重元素汚染前の初期宇宙で形成
- 宇宙初期の情報を保持
- **形成過程は？** ファーストコア？ 分裂・連星？ アウトフロー、ジェット？

□ ガス雲中での低金属量形成の研究

- Tsuribe & Omukai 2008, Clark et al. 2008, Machida 2008
- 回転により分裂: 連星 or Cluster
- First coreの形成？ 分裂条件？ アウトフロー？

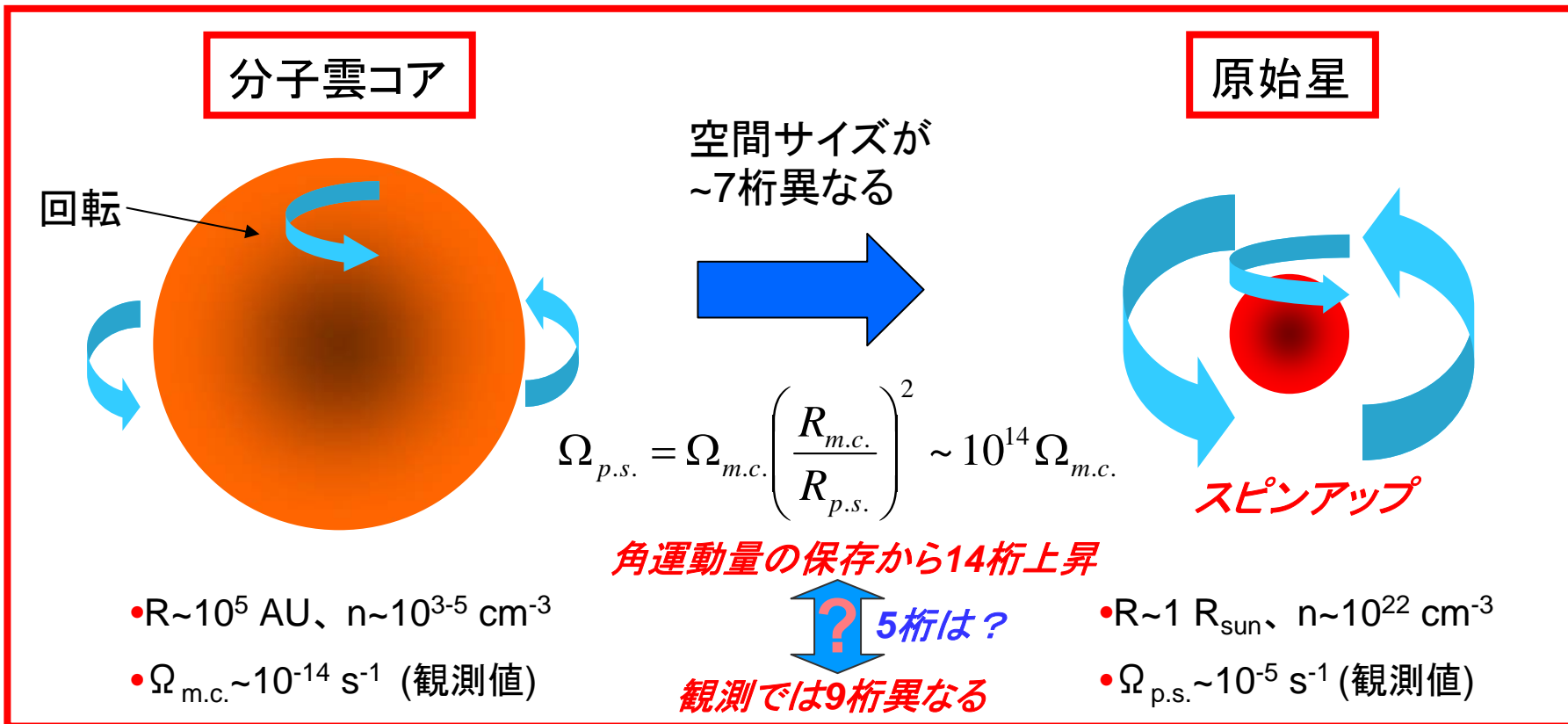
□ ガス雲の持つ角運動量はどこに行くのか？

- 角運動量問題



角運動量問題とは、

- 角運動量問題: $j \sim 10^{21} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (分子雲) \leftrightarrow $j \sim 10^{16} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (原始星)
- 角運動量保存 \Rightarrow 進化段階のどこかで、角運動量を捨てないと星になれない



- 現在の星形成: 磁気星間雲、アウトフロー、ジェット、磁気制動
- 磁場が弱い場合(初期宇宙): 分裂(軌道角運動量)、非軸対称パターンによる輸送
 \Rightarrow 非線形過程 \Rightarrow 数値シミュレーションが有効

この研究では、

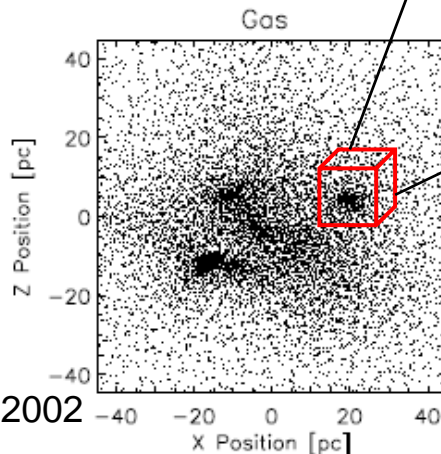
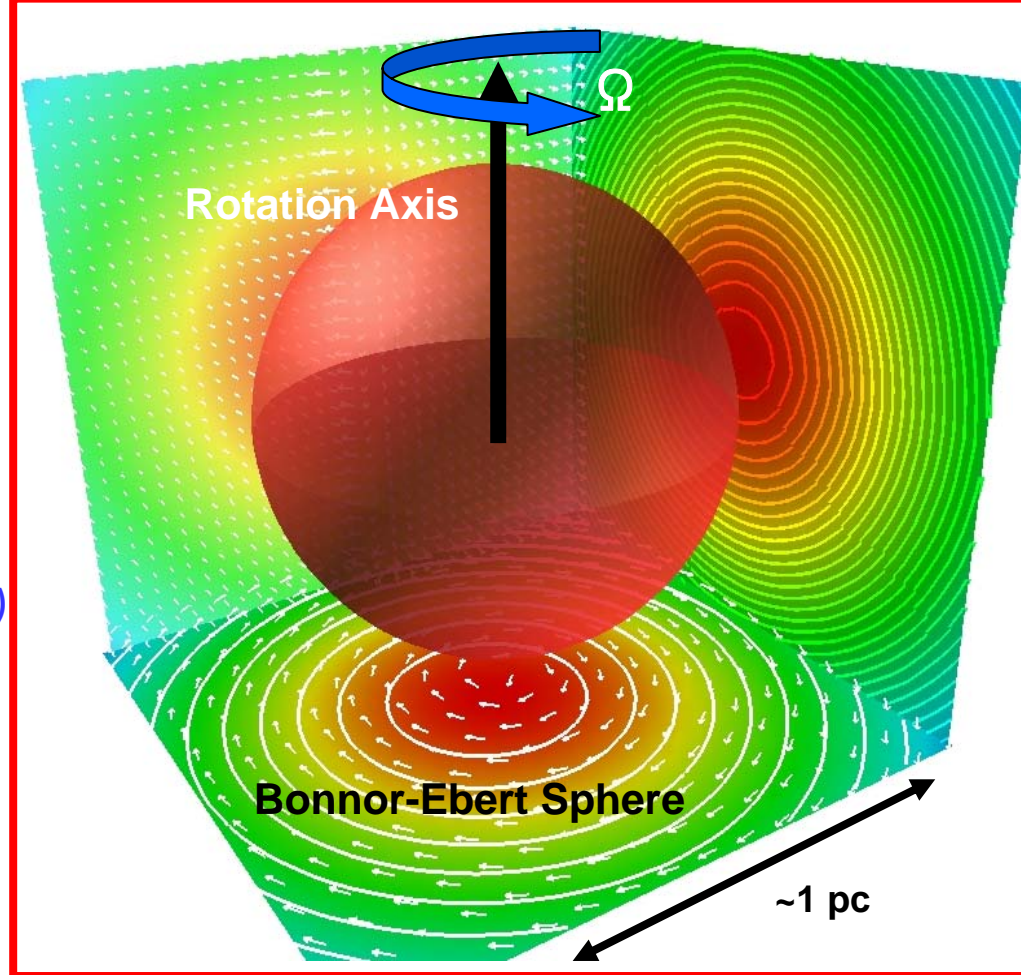
- 異なる金属量を持つガス雲中で、角運動量が星形成に与える影響を調べる
- 金属量の効果は、状態方程式に取り入れる
- ガス雲($n \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$)から原始星形成($n \sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$)まで計算
- パラメータ: 金属量 Z , 初期の回転エネルギー β_0 ,
ガス雲の歪みの度合い A_ϕ
- 統計的な研究: 多くのモデルを計算して分裂条件、分裂間距離など導出

初期条件

□ 静水圧平衡にある球対称コア (B.E.球)
+ 回転 + 微小揺らぎ

- ガス雲の温度は、金属量毎に異なる
- 中心密度同じ
- 与えられた温度と密度での平衡ガス雲
- 金属量毎に平衡なガス雲(サイズ異なる)

□ $m=2$ の密度揺らぎ (ガス雲を歪める)



Bromm et al. 2002

□ 初期値

- 中心密度: $n=10^4 \text{ cm}^{-3}$
- 温度: $T=7-250\text{K}$
- 半径: $1.2-5.5 \times 10^5 \text{ AU}$
- 質量: $M_{\text{tot}} = 10 - 10^3 \text{ Msun}$

数值計算

3D Nested Grid Method

- **Grid size:** 128 x 128 x 16
- **Grid level:** $l_{\max}=31$ (l : Grid Level)
- **Grid generation:** Jeans Condition

$l=1$: $L_{\text{box}} = \sim 10 \text{ pc}$, $n = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ (initial)
 $l=31$: $L_{\text{box}} = 0.2 R_{\text{sun}}$, $n = 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ (final)

空間 10桁、密度コントラスト 20桁

基礎方程式

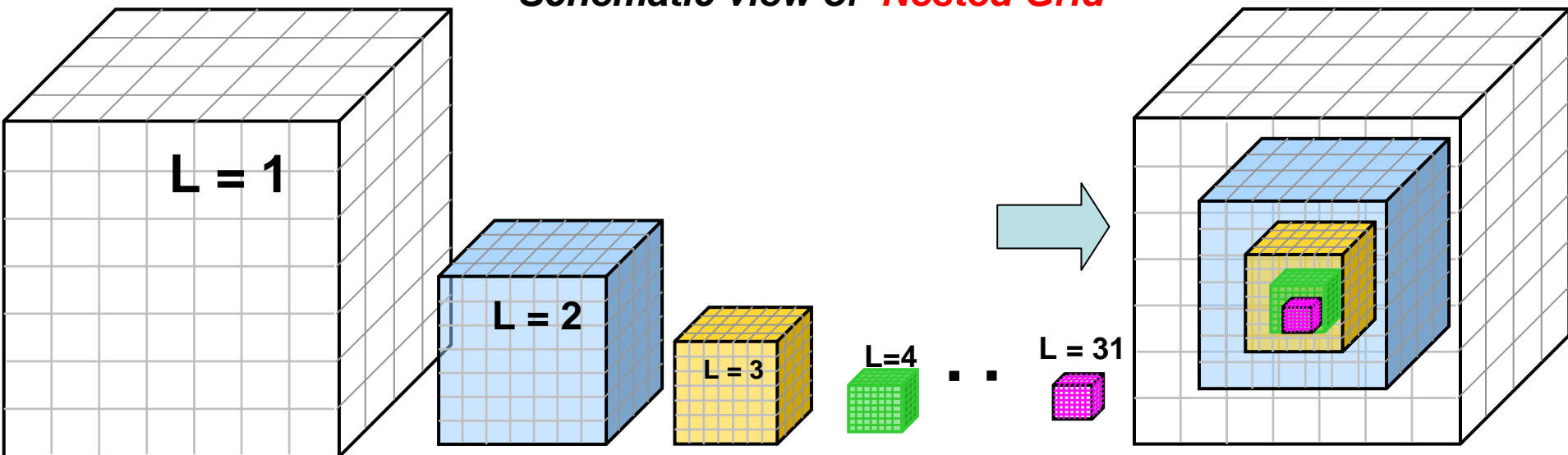
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0,$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla P - \rho \nabla \phi,$$

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

$$P = P(\rho)$$

Schematic view of *Nested Grid*



Metallicity ごとの進化

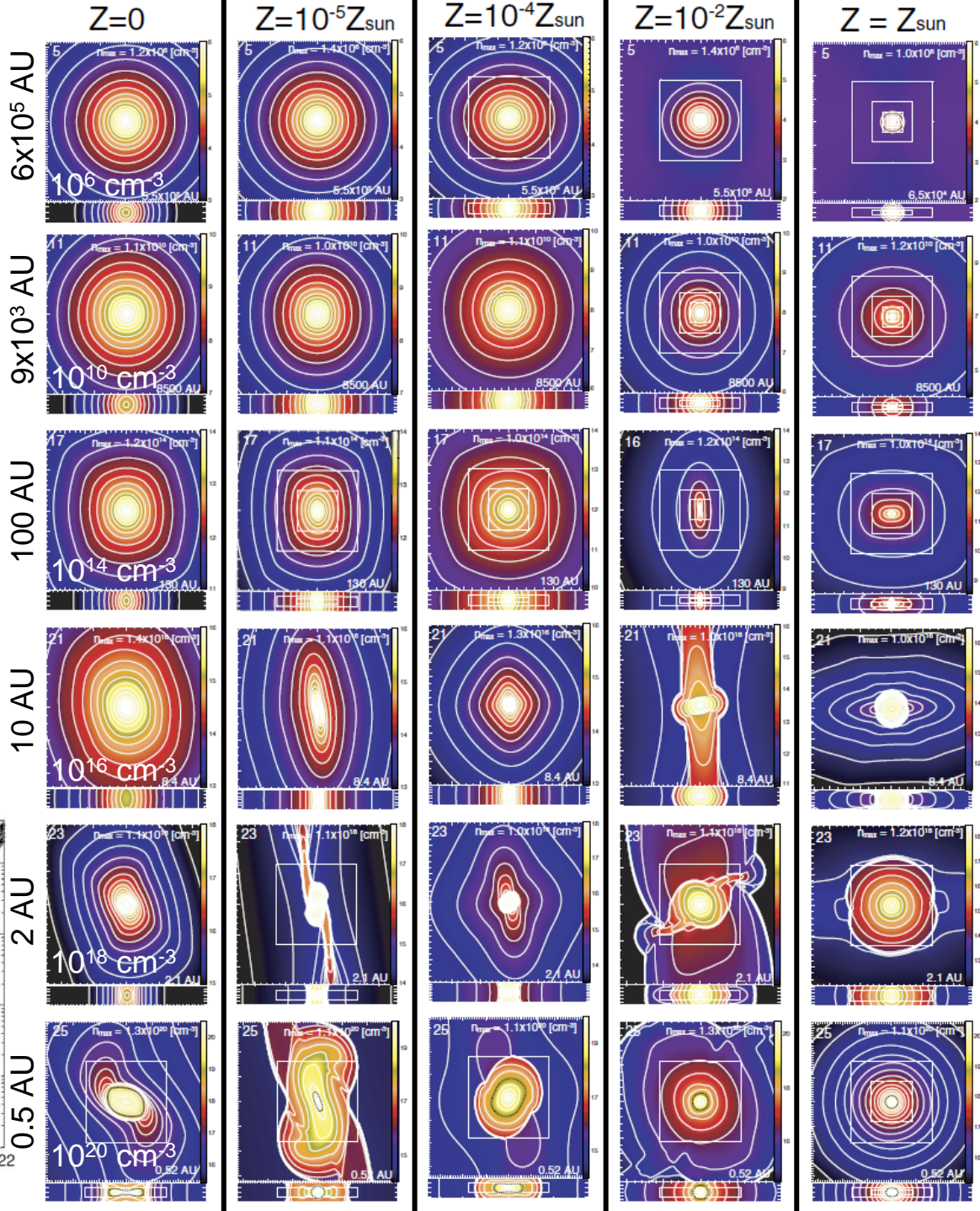
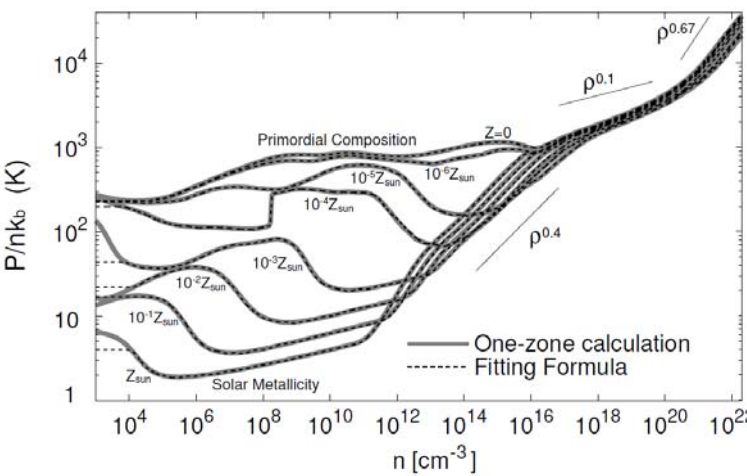
回転が非常に緩やかなガス雲

◆パラメータ

➤ $\beta = 10^{-6}$ ➤ $A_\phi = 0.01$

◆First coreの形成

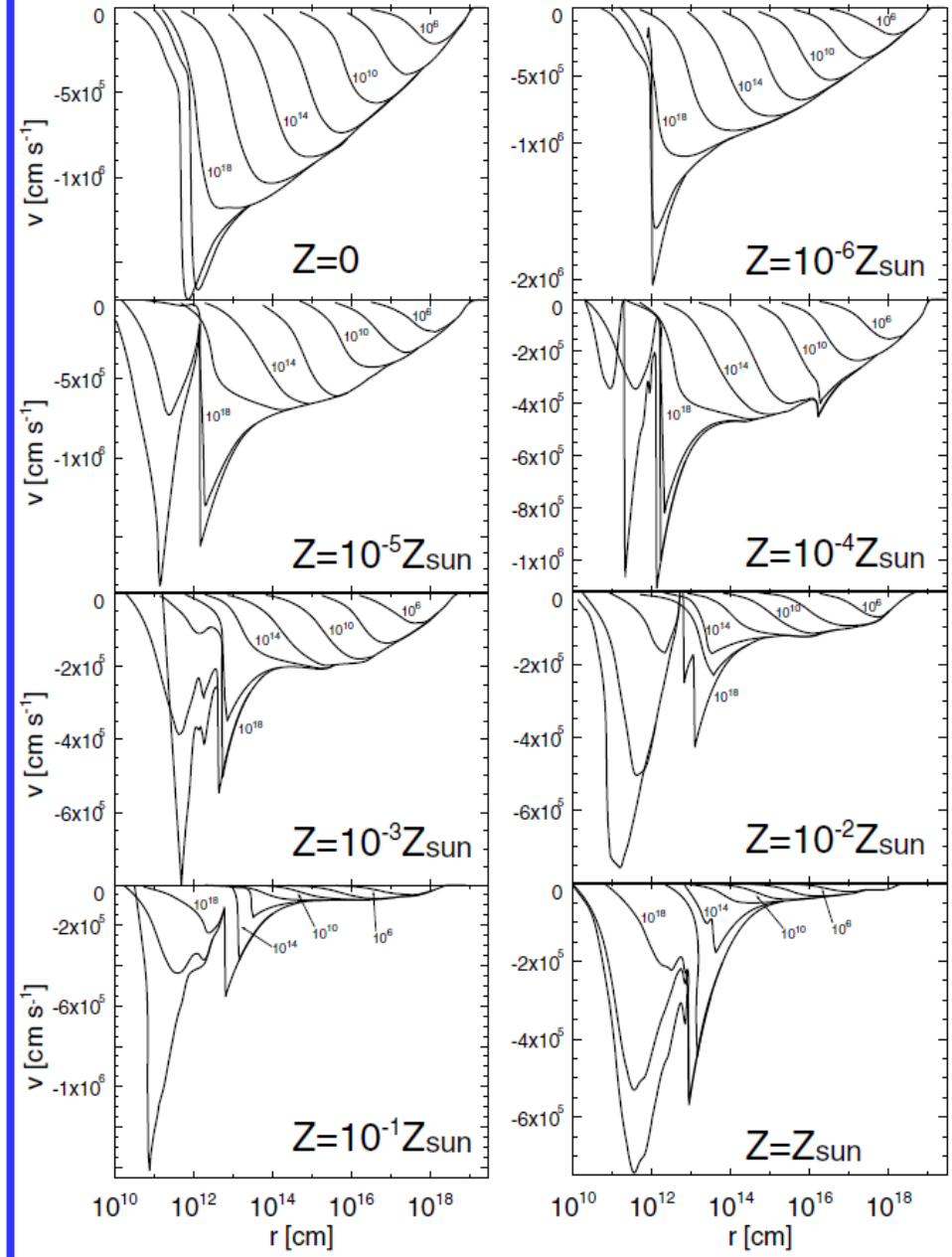
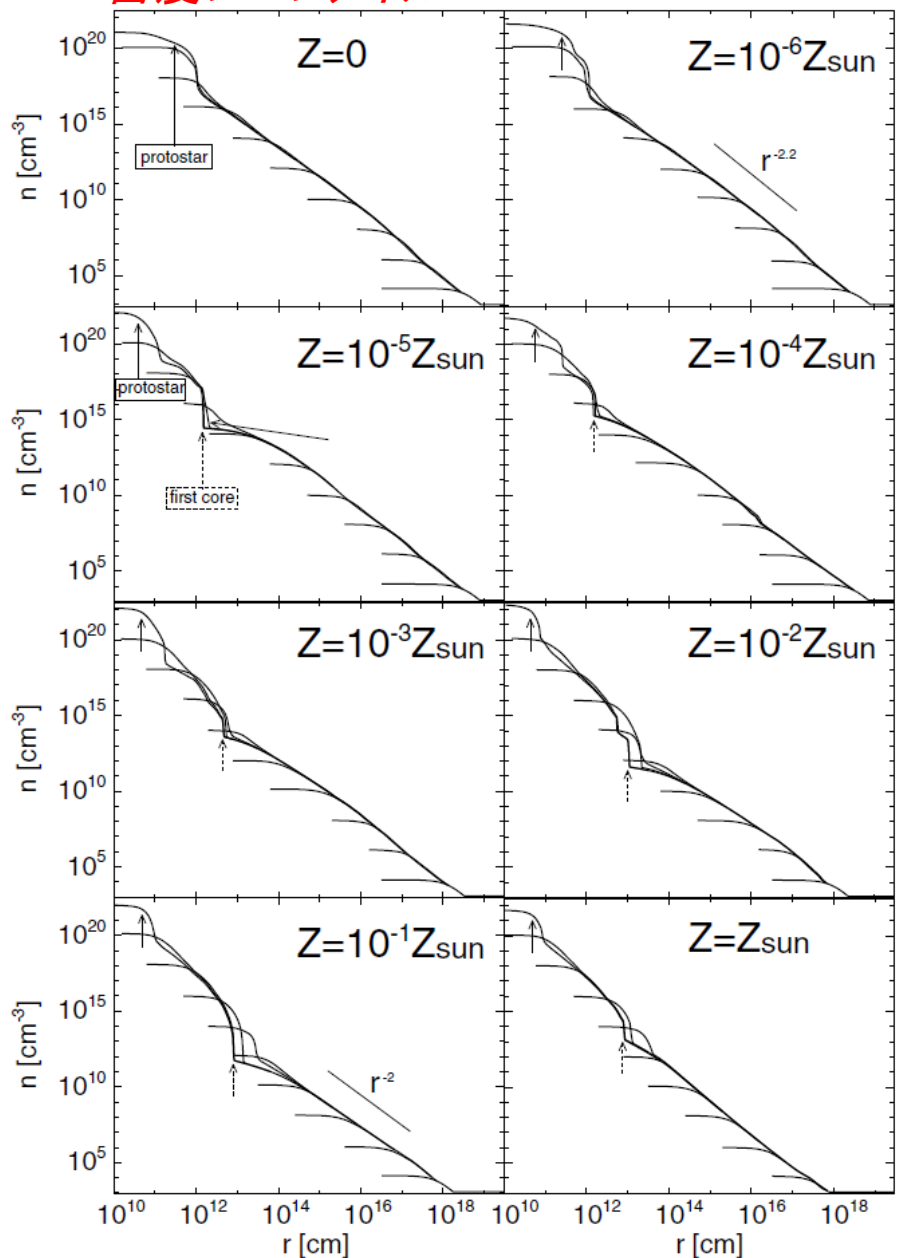
- $Z > 10^{-5} Z_{\text{sun}}$: First core形成
- $Z < 10^{-5} Z_{\text{sun}}$: First core形成なし
- Metallicityが低い程、高密度で小さいファーストコア



密度 & 速度プロファイル

密度プロファイル

速度プロファイル



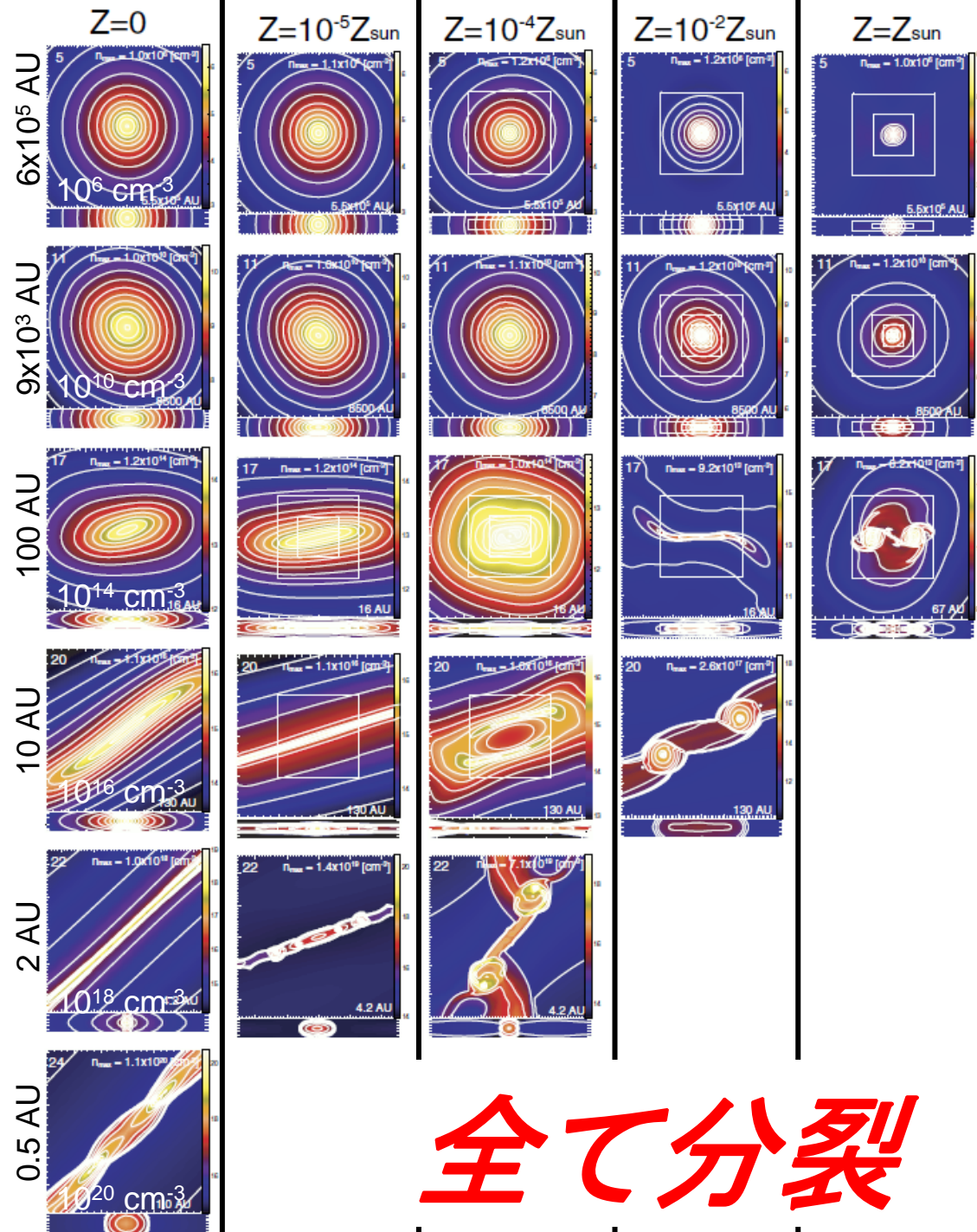
高速回転している場合

◆ パラメータ

➤ $\beta=10^{-2}$ ➤ $A_\phi=0.01$

◆ collapseの途中で分裂

◆ 金属量が高い程、より低密度、
より大きなスケールで分裂



全て分裂

緩やかに回転 している場合

◆パラメータ

➤ $\beta=10^{-3}$ ➤ $A_\phi=0.01$

◆ $Z=10^{-2} Z_{\text{sun}}$:

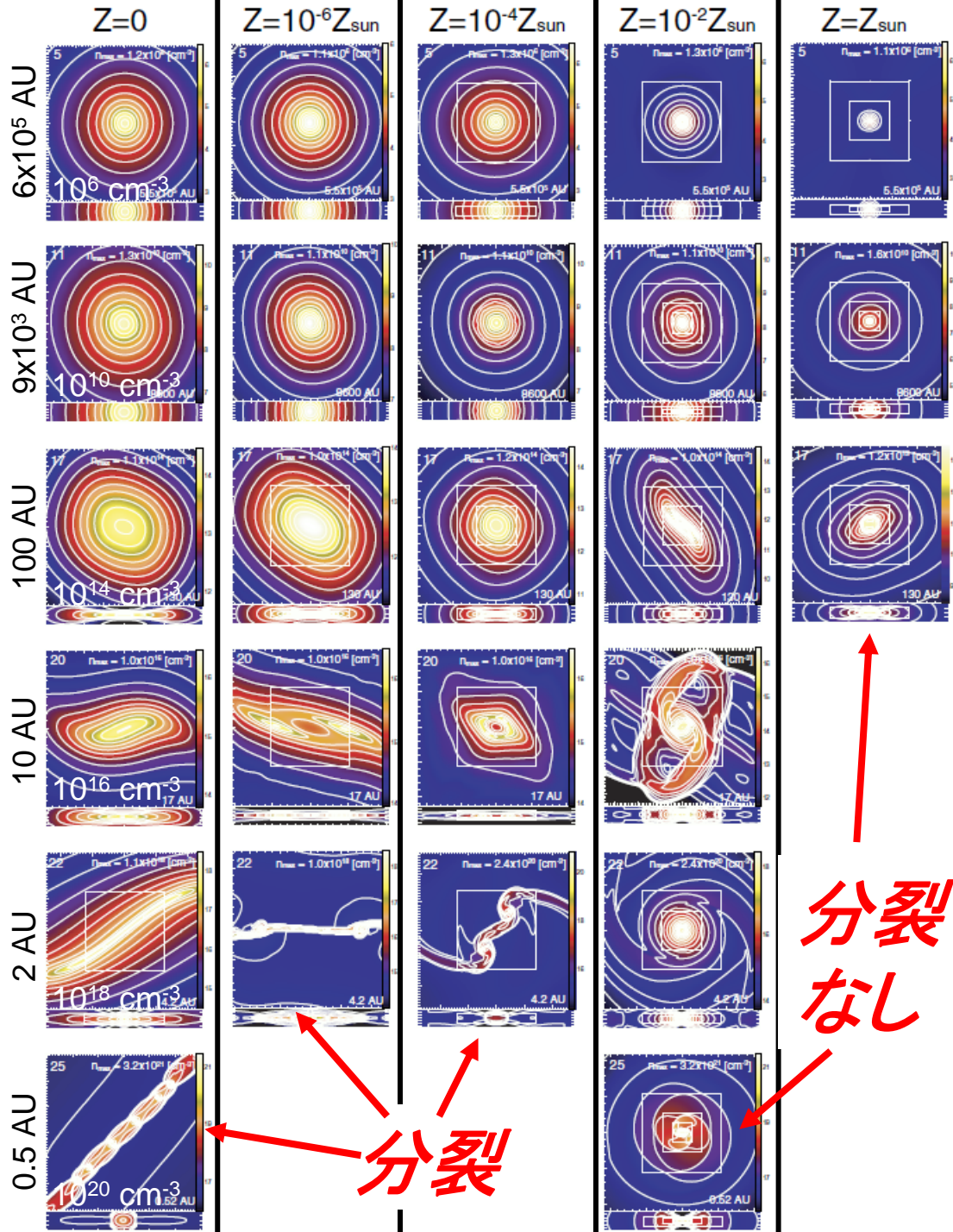
スパイラル \Rightarrow 角運動量輸送
 \Rightarrow 分裂なし

◆ $Z=Z_{\text{sun}}$:

回転平衡ファーストコア
(スパイラル \Rightarrow 分裂なし)

◆ 分裂条件: ガス雲の形状、 回転に大きく依存

(初期条件の僅かな違いにより
分裂したりしなかったり)



分裂
なし

分裂

分裂するかどうかはカオス的

◆ 収縮ガスの *bar mode* の成長率と角運動量と熱進化が複雑に絡み合う

◆ Bar mode の成長が

- 大: Bar mode 不安定による分裂
- 中: Spiral pattern による角運動量の輸送: 分裂無し
- 小: Ring mode による分裂

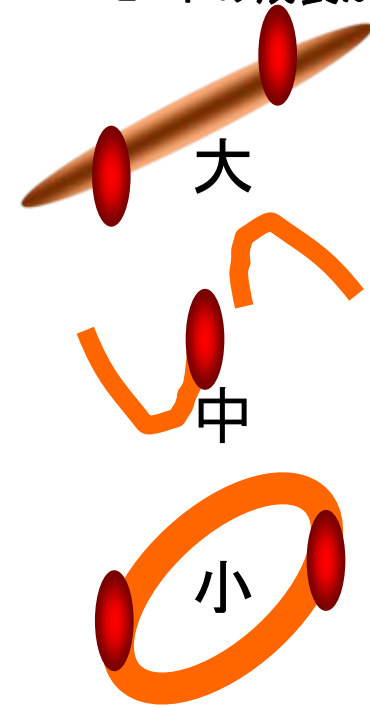
◆ 非軸対称揺らぎ (Bar mode) の成長: $\varepsilon \propto \rho^n$, γ に依存、回転にも依存

◆ Disk 形成 \Rightarrow Bar mode は非線形成長

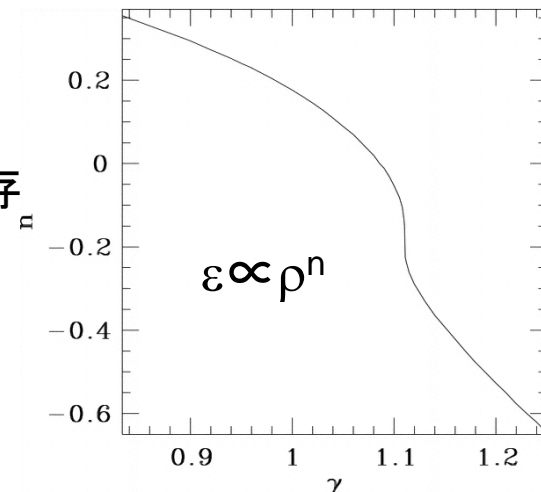
➤ Disk が出来るタイミング

\Rightarrow 初期の角速度と熱進化に強く依存、初期揺らぎに弱く依存

バーモードの成長が



Polytropic index γ と
バーモードの成長率



Omukai et al. (2005)

多数のモデルを計算して統計的な理解

パラメータサーベイ

480モデルについて進化を計算

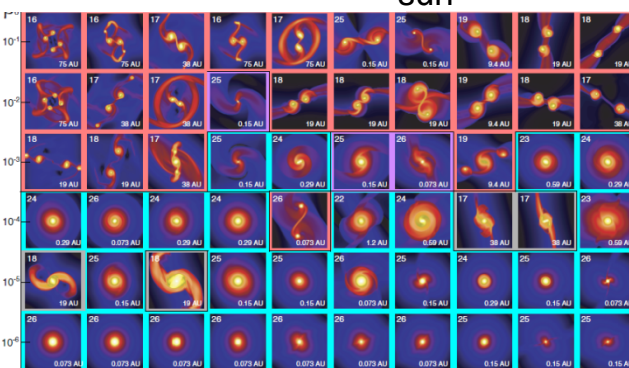
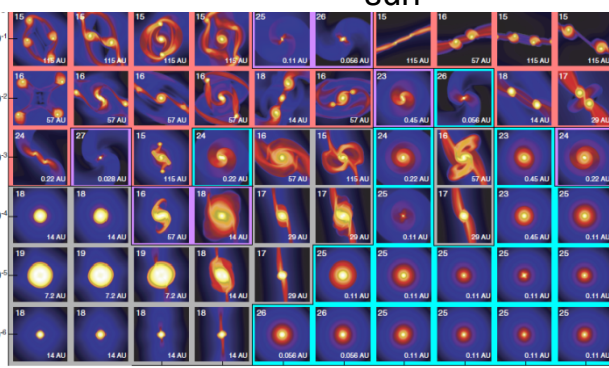
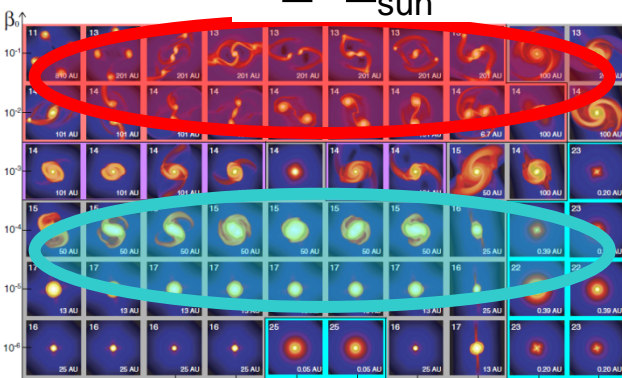
➤ x軸: 揺らぎの大きさ

➤ y軸: 回転エネルギー

$Z = Z_{\text{sun}}$

$Z = 0.1 Z_{\text{sun}}$

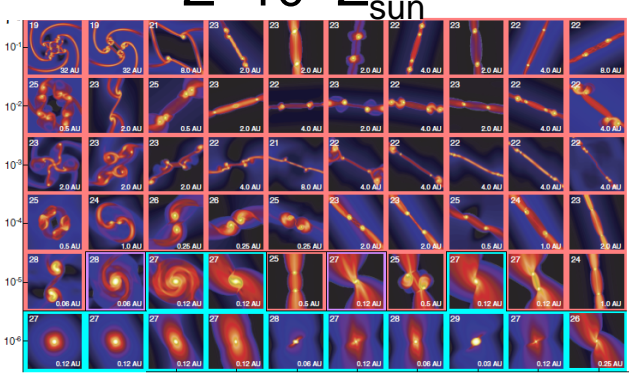
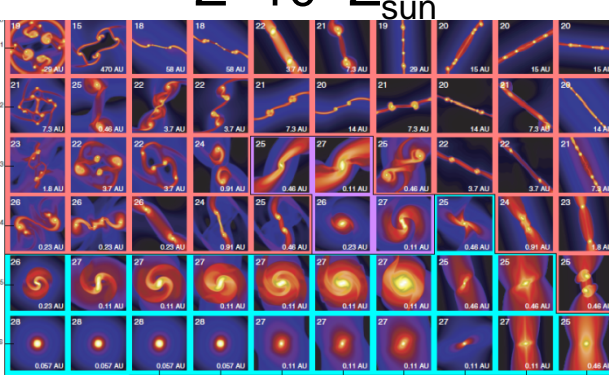
$Z = 0.01 Z_{\text{sun}}$



$Z = 10^{-3} Z_{\text{sun}}$

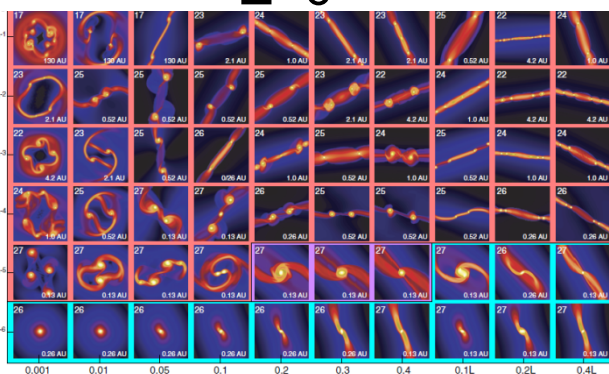
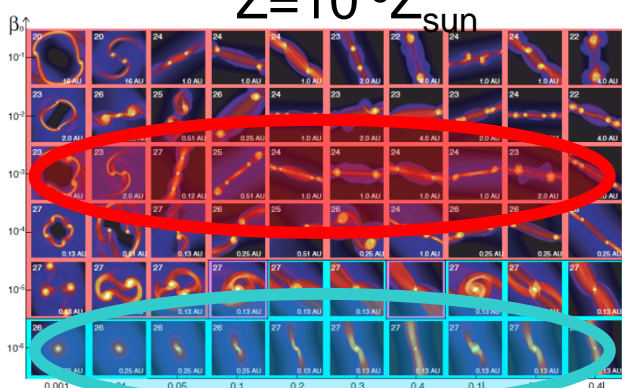
$Z = 10^{-4} Z_{\text{sun}}$

$Z = 10^{-5} Z_{\text{sun}}$



$Z = 10^{-6} Z_{\text{sun}}$

$Z = 0$



背景の色

- 赤: 分裂したモデル(連星)
- 青: 分裂しなかったモデル(単星)
- 灰色: 安定な第一コアモデル(単星)

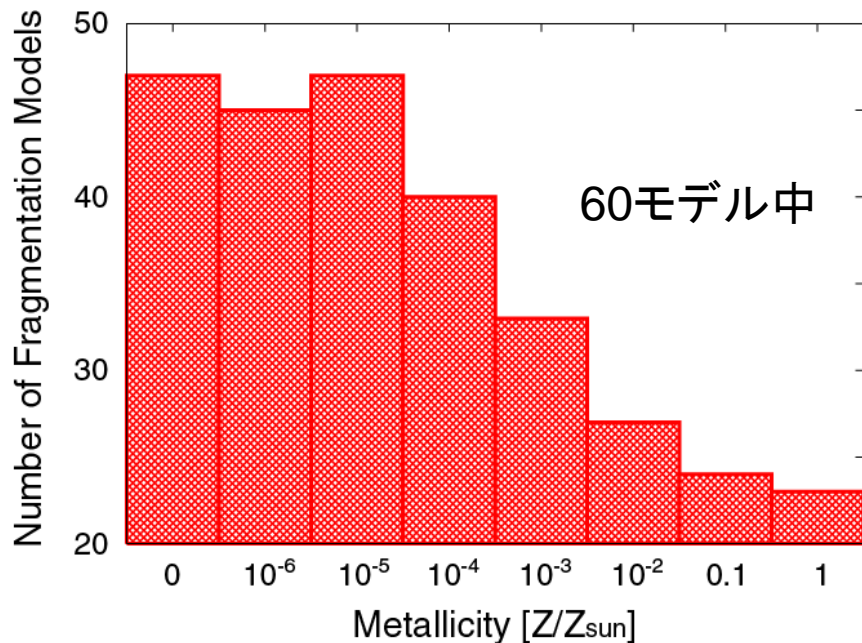
分裂時期と連星間距離

ファーストコアの形成時期

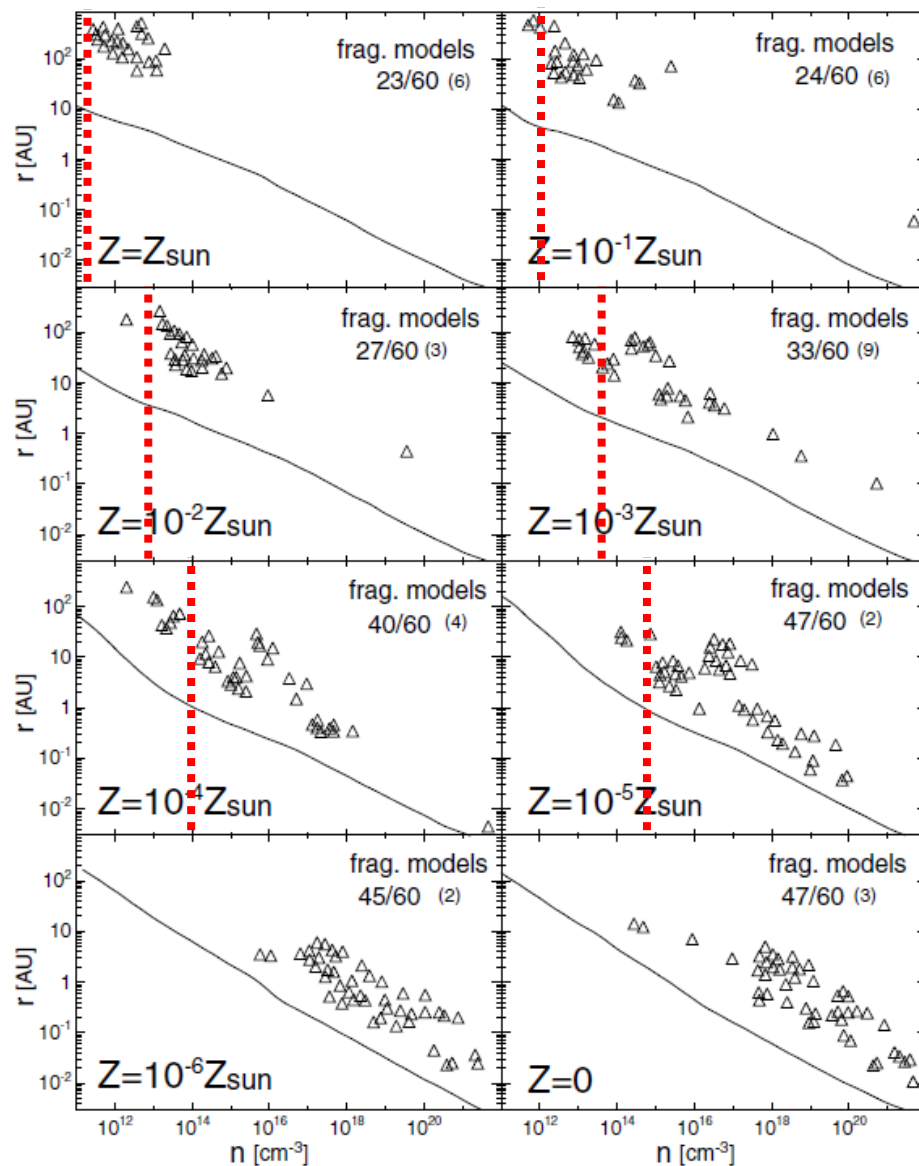
金属量が低いほど

- 分裂(連星)頻度は高い
- 分裂(連星)間距離は狭い

分裂したモデルの数



金属量ごとの分裂時期と分裂スケール



分裂時期とガスの熱進化

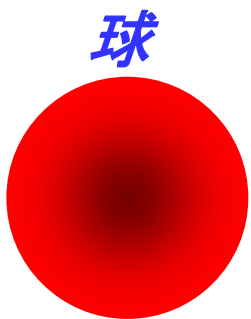
◆ $Z > 10^{-5} Z_{\text{sun}}$: First core形成直後 ⇔ $Z < 10^{-6} Z_{\text{sun}}$: $n > 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ で除々に

◆ First coreを作るモデル ($Z > 10^{-5} Z_{\text{sun}}$)

- First core形成前: 円盤形成、急速なガス収縮 ⇒ **分裂不可**
- First core形成直後: **分裂可**
- First core形成後: 熱エネルギーにより球状に ⇒ **分裂不可**

◆ First coreを作らないモデル ($Z < 10^{-5} Z_{\text{sun}}$)

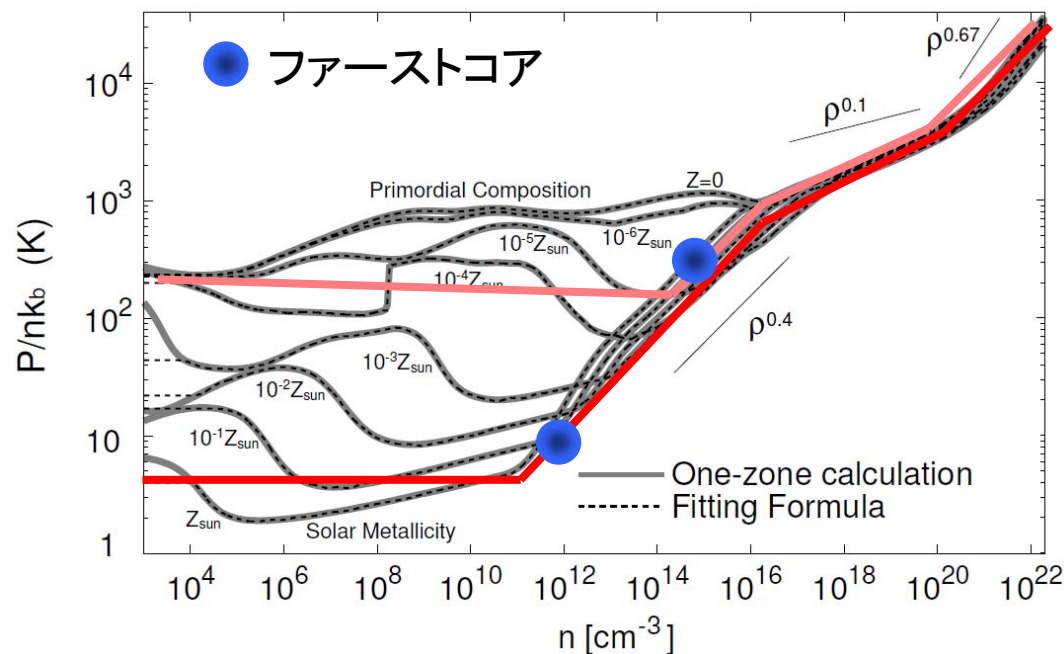
- $\gamma \sim 1.1$ ⇒ collapse比較的緩やか



分裂難しい



分裂簡単



球⇒円盤

円盤⇒球

球～円盤～球

状態方程式・回転エネルギーと分裂

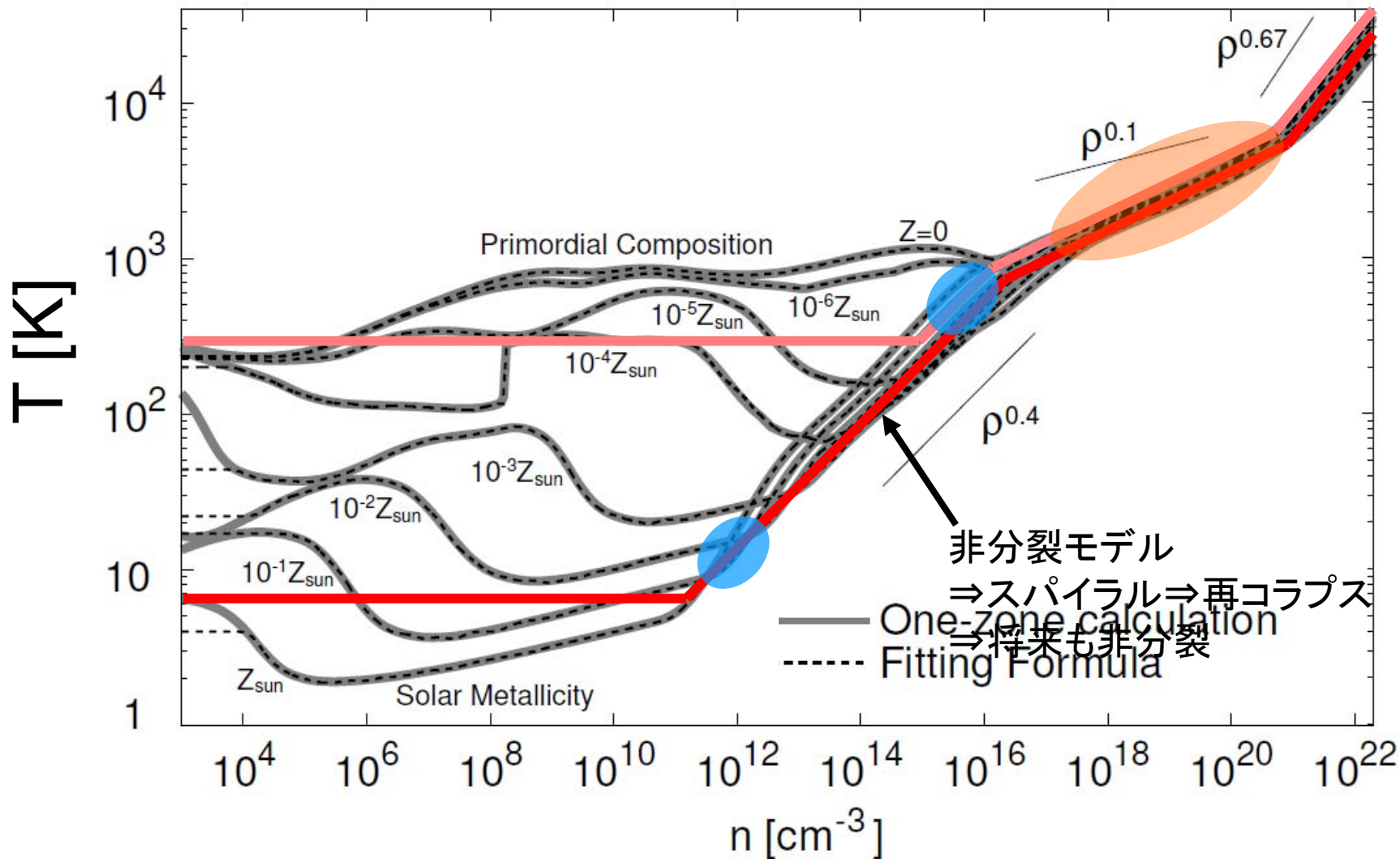
スピナップ出来る期間

$Z=10^{-5} Z_{\text{sun}}$

低角運動量でも分裂可

$Z=Z_{\text{sun}}$

低角運動量は分裂不可



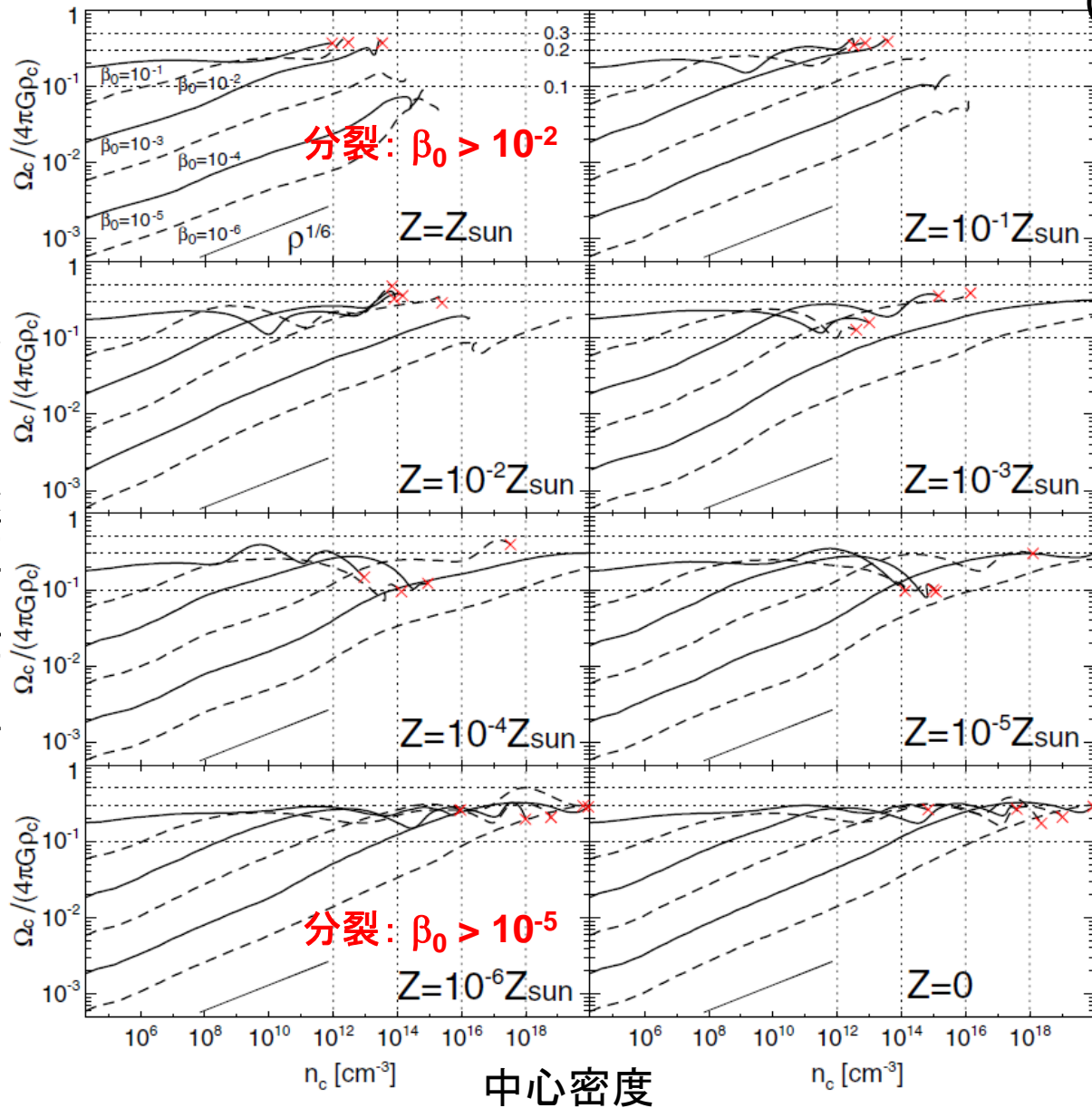
分裂条件

どの位スピナップしたら分裂するか？

$$\omega \equiv \frac{\Omega_c}{\sqrt{4\pi G\rho_c}} \sim 0.2 - 0.3 \quad (1)$$

($\beta \sim 4-9\%$)

中心部の回転エネルギーのルート



➤ $Z > 10^{-5} Z_{\text{sun}}$:

First core形成前に(1)を満たす

➤ $Z < 10^{-5} Z_{\text{sun}}$:

原始星形成前に(1)を満たす

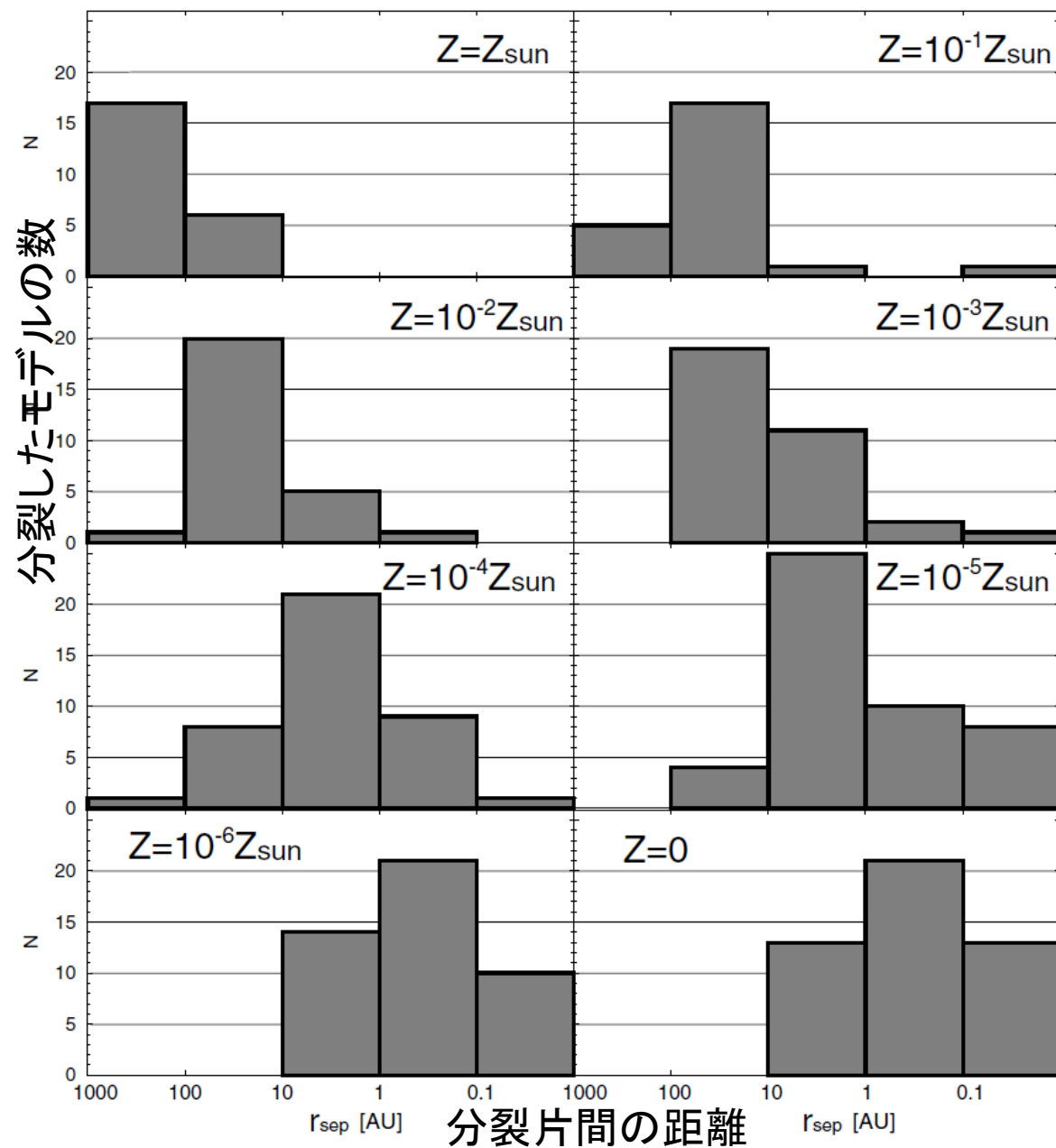
金属量が低い程、
スピナップ期間長い

金属量が低い程、
低 β_0 でも分裂する

金属量が低い程、
分裂しやすい

ただし、 β_0 の分布による

分裂時のSeparation



◆ 金属量が低い程、高密度で分裂



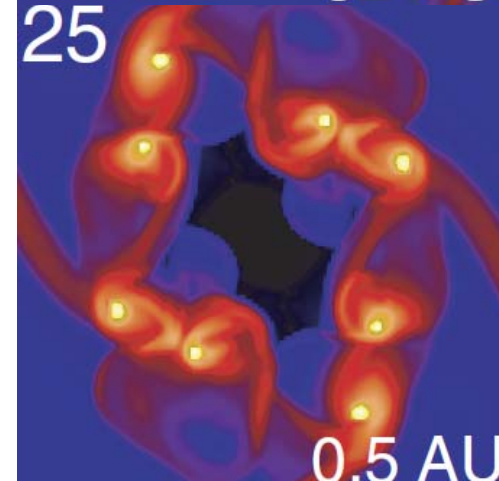
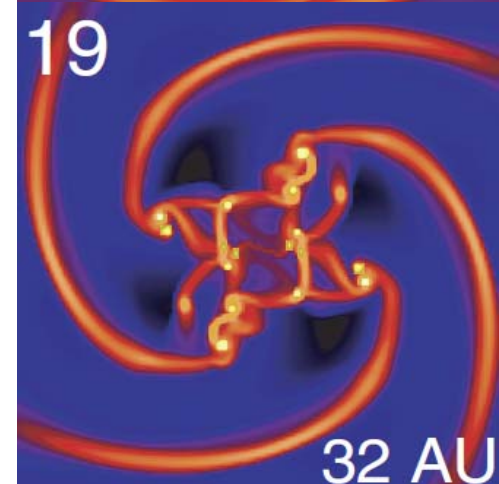
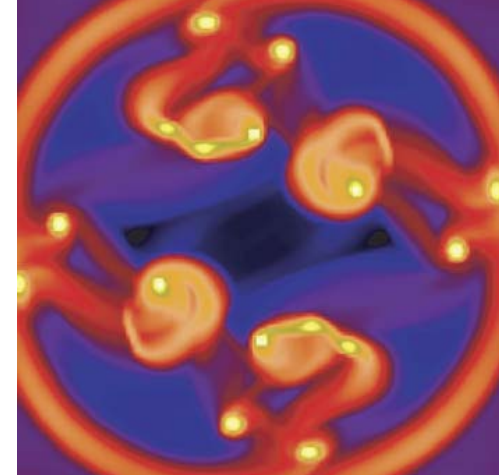
◆ ジーンズスケールは密度と共に小さくなる



◆ 金属量が低い程、小スケールの連星間距離

原始星形成後:ガス降着段階

- 形成時の原始星質量: $M \sim 10^{-2} - 10^{-3} M_{\text{sun}}$ (前期段階)
- ガス降着段階(後期段階)で、原始星が成長
- Lower metallicityの場合 ($Z < 10^{-5} Z_{\text{sun}}$)
 - 輻射により降着が止まらない \Rightarrow 質量が増加し続ける
 - Binary Black hole
- 高回転エネルギーを持つガス雲 \Rightarrow 多くの分裂片
 - 3体以上は不安定 $\Rightarrow M \sim 10^{-2} - 10^{-3} M_{\text{sun}}$, B.D.サイズが放出
 - Binaryで放出 \Rightarrow metal free or low metallicity binary
- Metallicityが低いほど分裂しやすい
 - $Z < 10^{-4} Z_{\text{sun}}$ ならば $\beta_0 > 10^{-4}$ で分裂
 - Low metallicity starは、ほぼすべてbinary (singleでの放出?)
(see, Lucattelo et al. 2005)

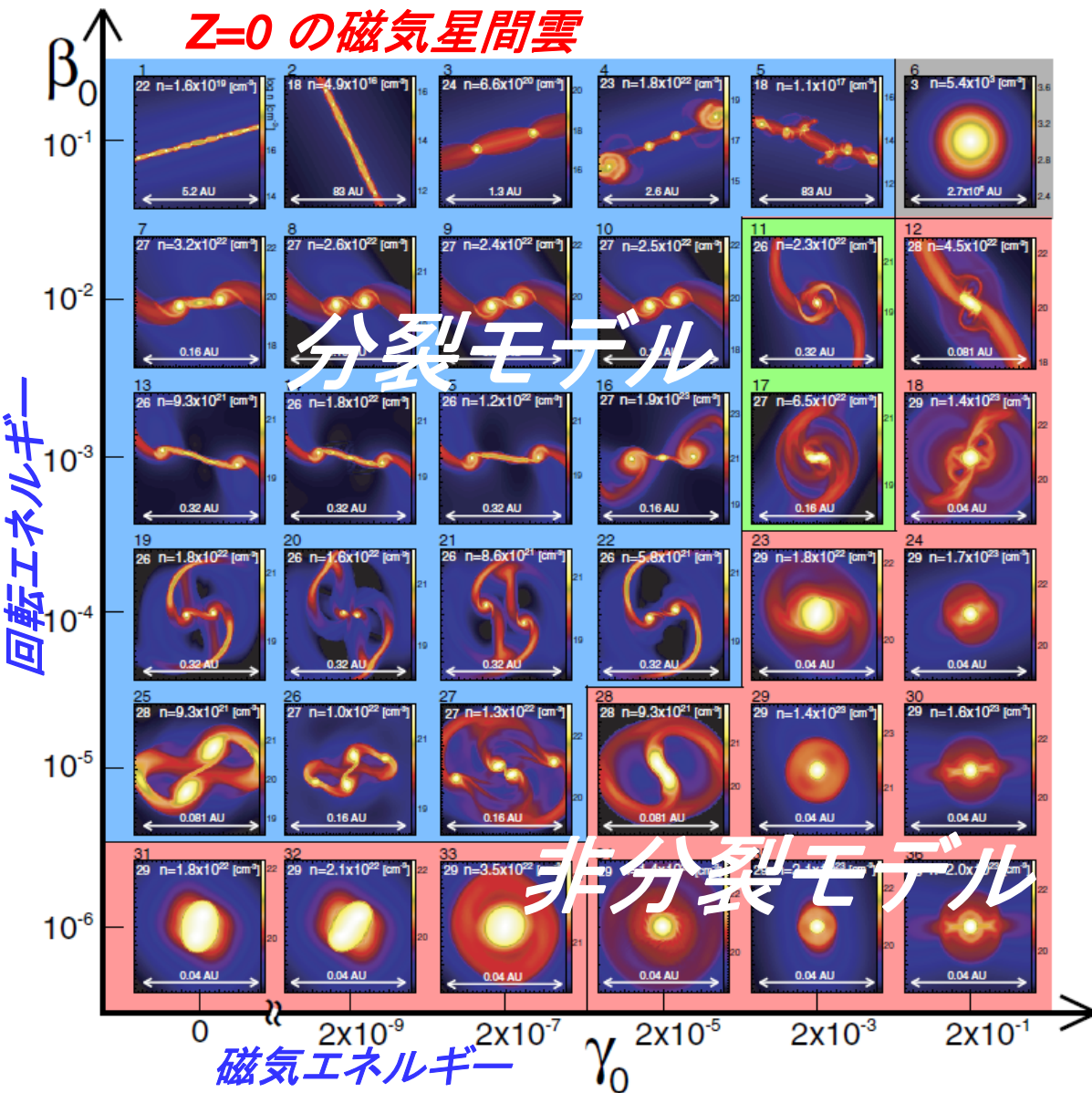


磁場の効果

□ 磁場は分裂を抑制する: 磁気制動、ジェット

□ どの時代に磁場が強くなるのか?

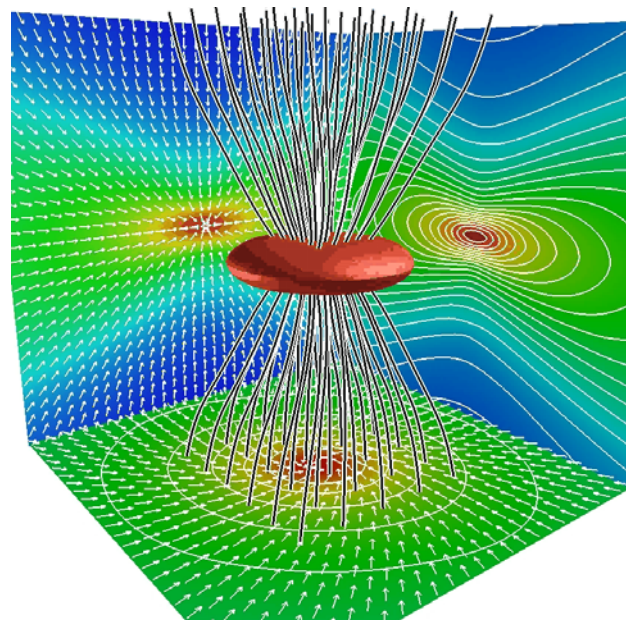
Z=0 の磁気星間雲



□ 磁場の散逸

□ Z=0 and Z_{sun} は理解

Pop III星からのジェット



Machida et al. 2008

まとめ

- 低金属量ガス雲 ⇒ 連星率が高い、より短周期の連星
 - ファーストコア形成時期が遅い(or 無い)ため、スピナップの期間が長い
 - 分裂条件は、初期の回転エネルギーに強く依存、歪みに弱く依存
- 高回転エネルギーを持つ低金属量ガス雲
 - Cluster形成、褐色矮星サイズの星を放出、低質量・低金属量星
- First coreの形成: $Z > 10^{-5} Z_{\text{sun}}$, 角運動量輸送、アウトフローに影響
- 角運動量問題: 分裂して軌道角運動量に 一部非軸対称パターンによる輸送

議論

- 回転エネルギー
 - 太陽近傍の観測($Z = Z_{\text{sun}}$): $\beta_{\text{ave}} \sim 0.02$ ($\beta = 10^{-4} - 0.07$)
 - Primordialや低金属量ガス雲中の回転エネルギーは？
- 磁場の効果
 - $Z = Z_{\text{sun}}$ のガス雲中では、非常に重要: 重力エネルギーと同等
 - Primordialや低金属量ガス中では? 磁場の散逸?