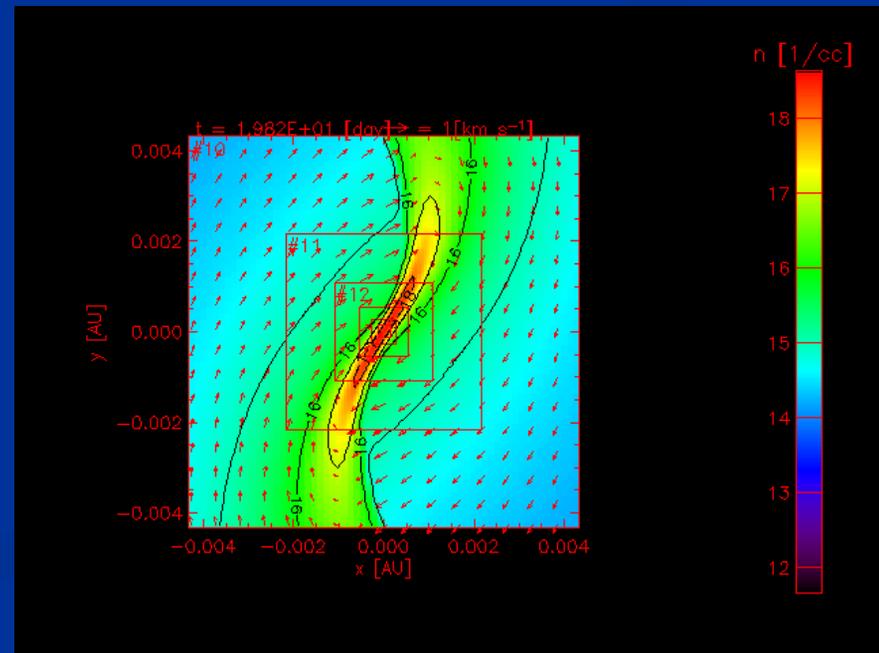
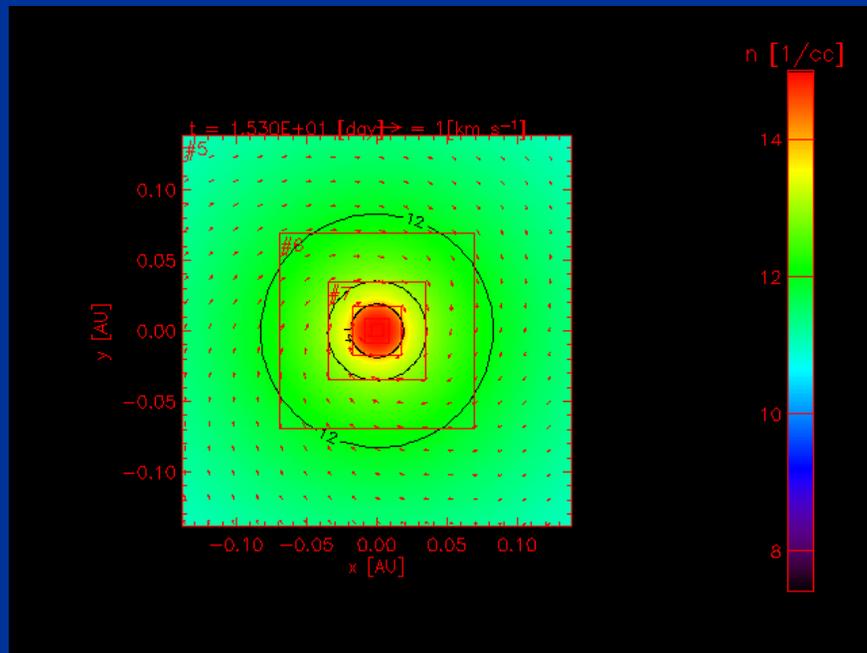


星形成寸前の進化: 断熱コア重力崩壊と 回転平衡ガス円盤の形成

西合一矢 (NAOJ), 松本倫明 (法政大), 富阪幸治 (NAOJ)



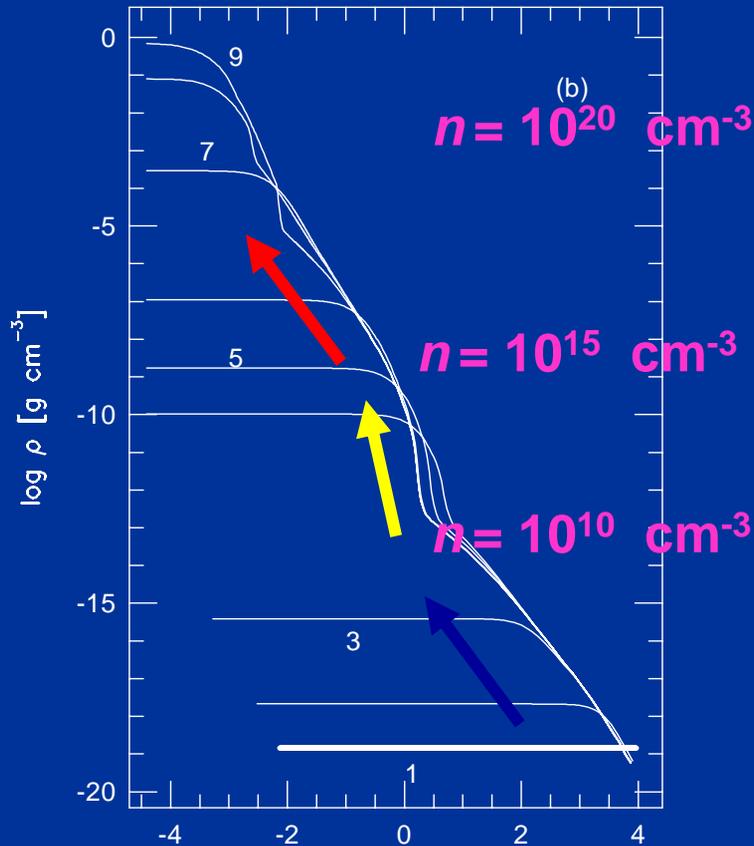
あらまし

- **Second Collapse**とは？ なぜ重要なのか？
- 数値計算で分かったことの概略
- 定量的な初期状態と結果の分類
- 3次元計算
- まとめ

球対称モデル

多次元モデル

密度分布の進化



Masunaga & Inutsuka (2000)

$l < 0.01 \sim 0.1$ AU
 $T > 10,000$ K

動的収縮
Secondary Collapse Phase

$l = 100 \sim 1$ AU
 $T = 10 - 2,000$ K

$l \sim 10,000$ AU
 $T = 10$ K

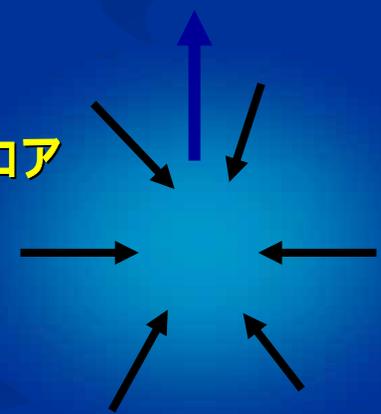
星形成(Second Core)



断熱コア(First Core)

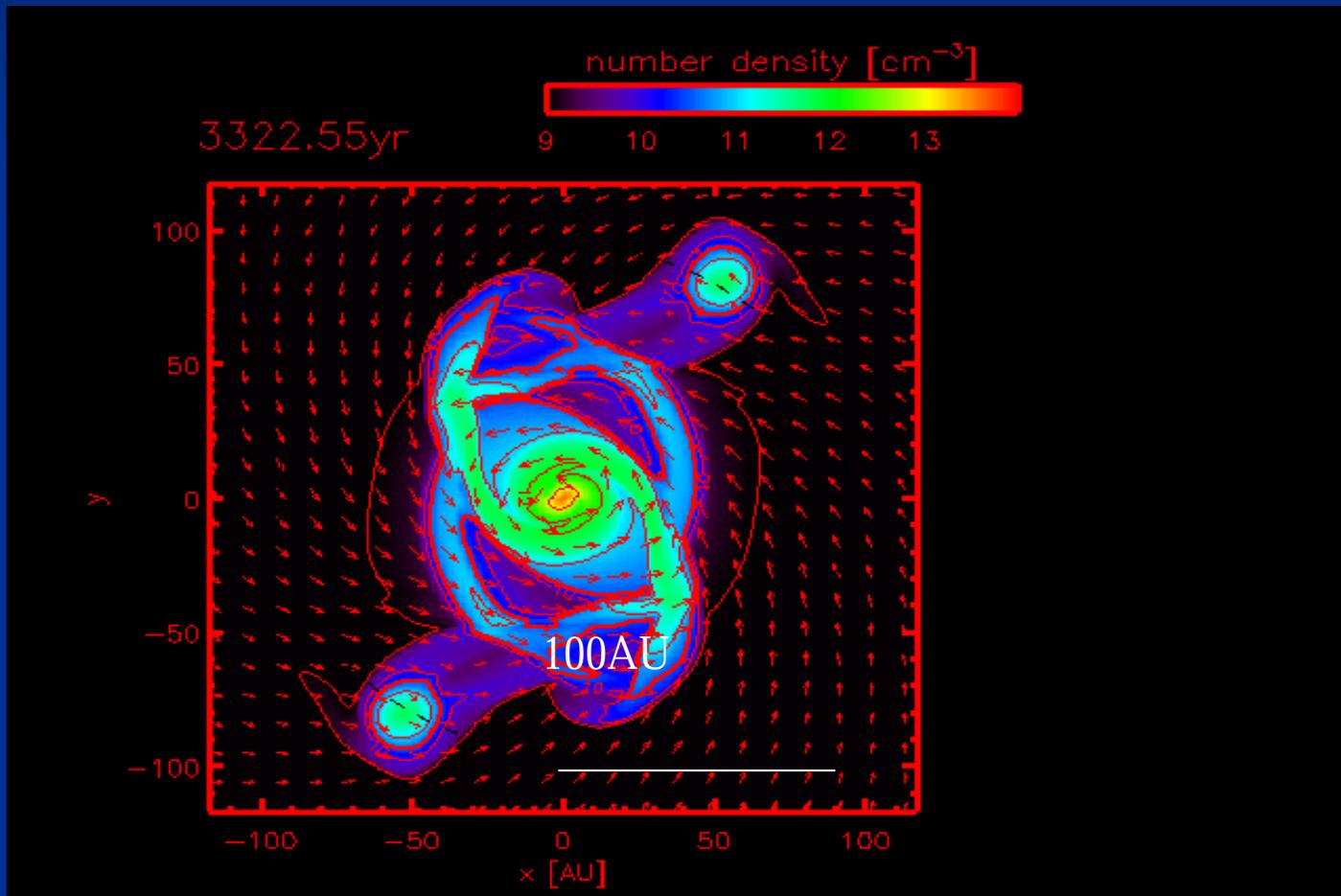


分子雲コア



球対称進化シナリオを元に標準のモデルが構築されている

First Core



Saigo et al. (2002)

Secondary Collapse Phase: 重要性

- **現在の球対称的進化モデルで十分か？**
星形成直後の質量降着率、星周円盤形成
- **連星・惑星系形成の可能性**
近接連星系形成？
- **高速の質量放出**

Secondary Collapse Phase : これまでの研究

• Boss (1989), Bonnell and Bate (1994)

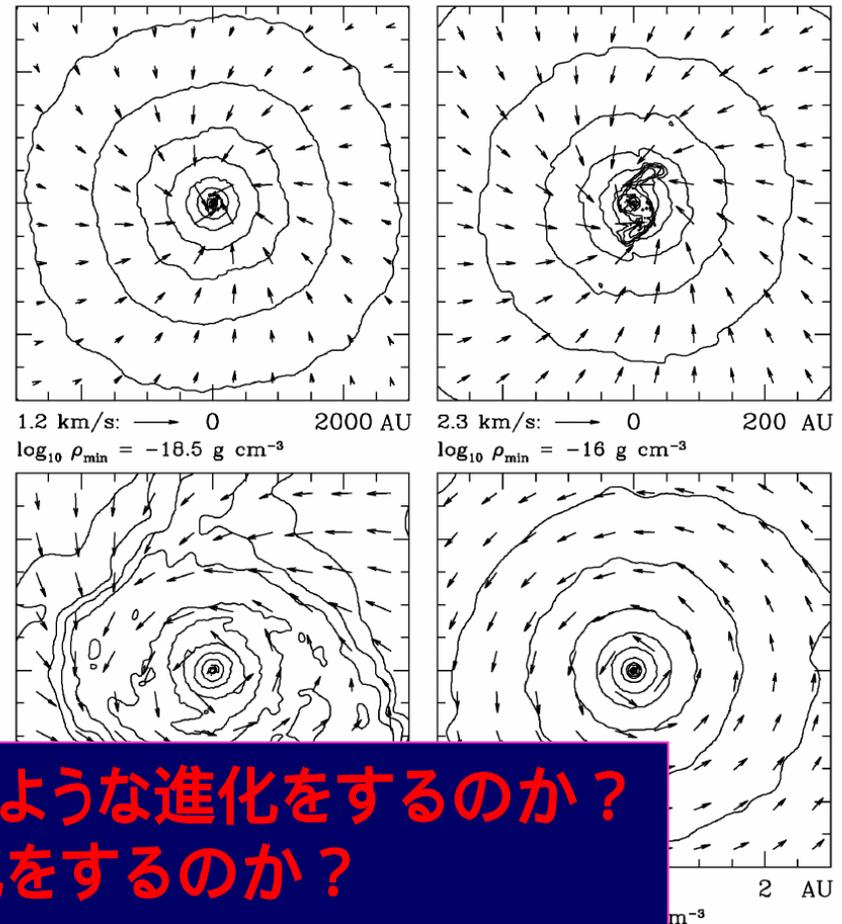
遠心力バウンスによるリング形成

しかし、初期条件がいろいろ加減(G, ρ_{\min})
包括的なパラメータサーチ

• Bate (1998)

等温段階から断熱コア段階を経て
分裂しなかった。

しかし、1モデルのみ



?

どのような初期条件でどのような進化をするのか？
典型的にはどのような進化をするのか？
分裂の可能性は？

モデルと計算

基礎方程式

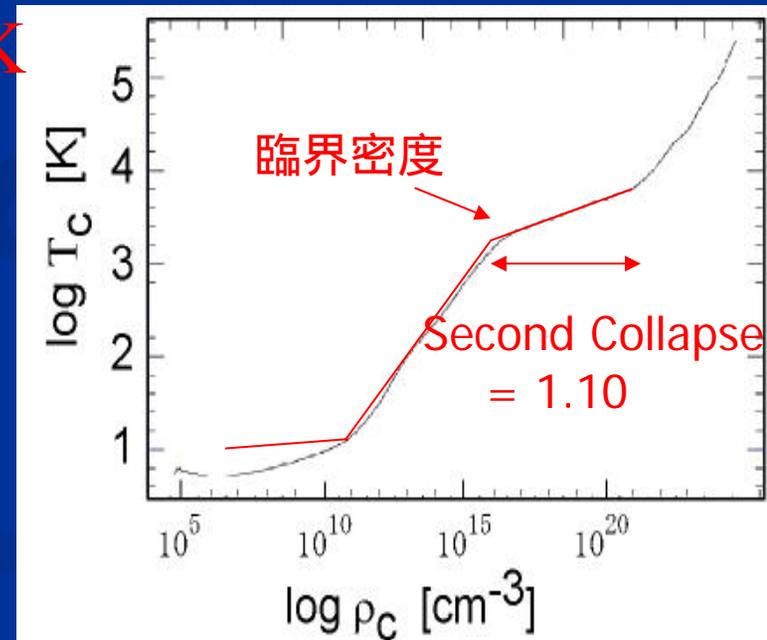
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0$$

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

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

Polytropic equation of state: $P = K \rho^\gamma$
2次元軸対称を仮定

	等温	$\gamma = 1$
断熱	$1.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	
	断熱コア	$\gamma = 7/5$
臨界密度	$2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	
	second collapse	$\gamma = 1.10$
星密度	$1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	



Masunaga & Inutsuka (2000)

First Coreの重力崩壊：結果の概略

初期は回転平衡なFirst Core

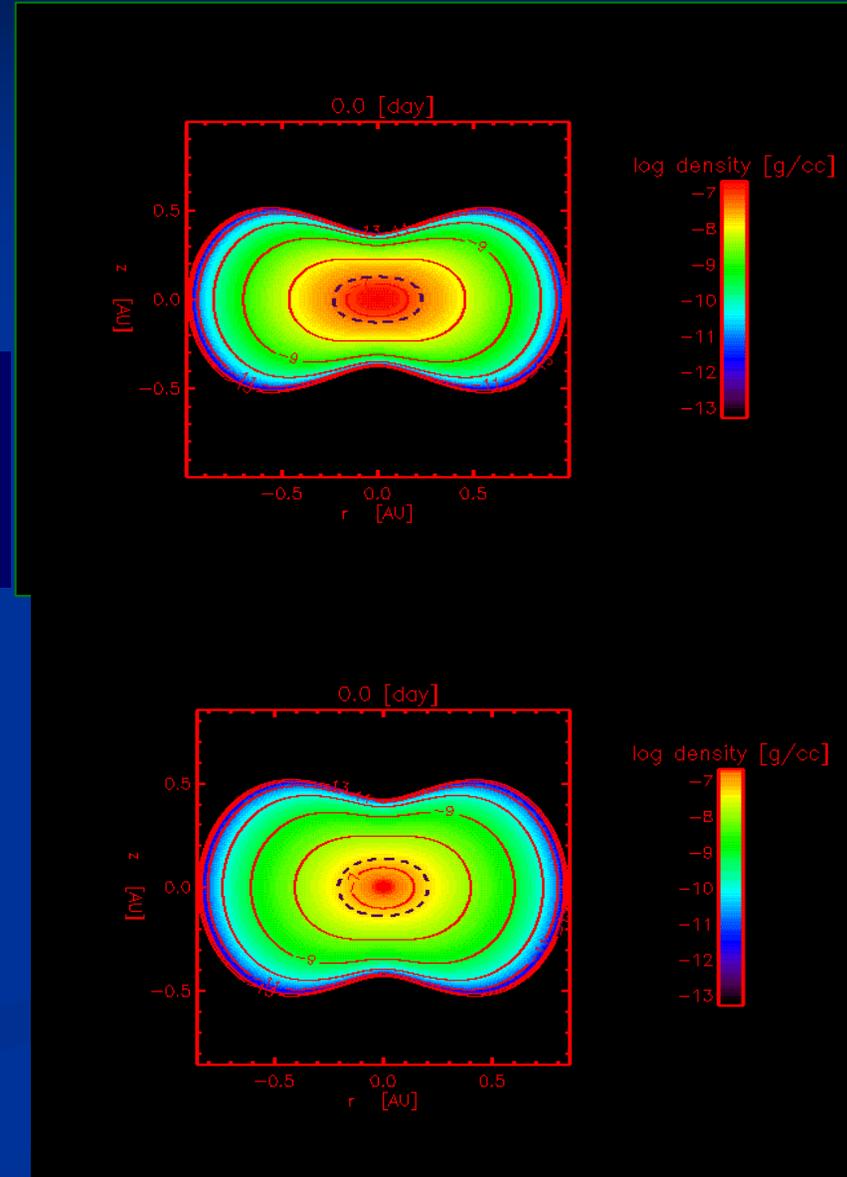
- ・比較的速く回転：重力崩壊しない
- ・典型的or少しだけ速い回転の時：

星 (Second Core) 形成前に、
回転平衡なガス円盤の形成 (1.5th 天体)
が形成！

- ・典型的な回転の強さの時：

バウンス(?)により
1.5th 天体は、薄く不安定となった。
連星系形成？

- ・ゆっくり回転：星密度まで一気に重力崩壊
single star？



1.5th 天体形成の条件を探る

回転する平衡断熱コア (First Core) の進化 & 重力崩壊

準平衡状態



Infalling Envelopeからの質量降着

中心が密度上昇、半径が縮小

重力不安定: second collapse段階

まず、**回転平衡な断熱コアの安定性、準静的進化を調べる。**

平衡状態 Self-Consistent Field Method (Hachisu 1986)を改良

*double polytropic cloudに改良。 $(n_R, n_Z) = (512, 512)$

パラメーター: 回転の速さ ω

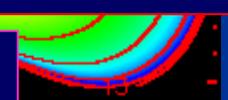
中心密度 ρ_c

$\omega=0$ 回転なし

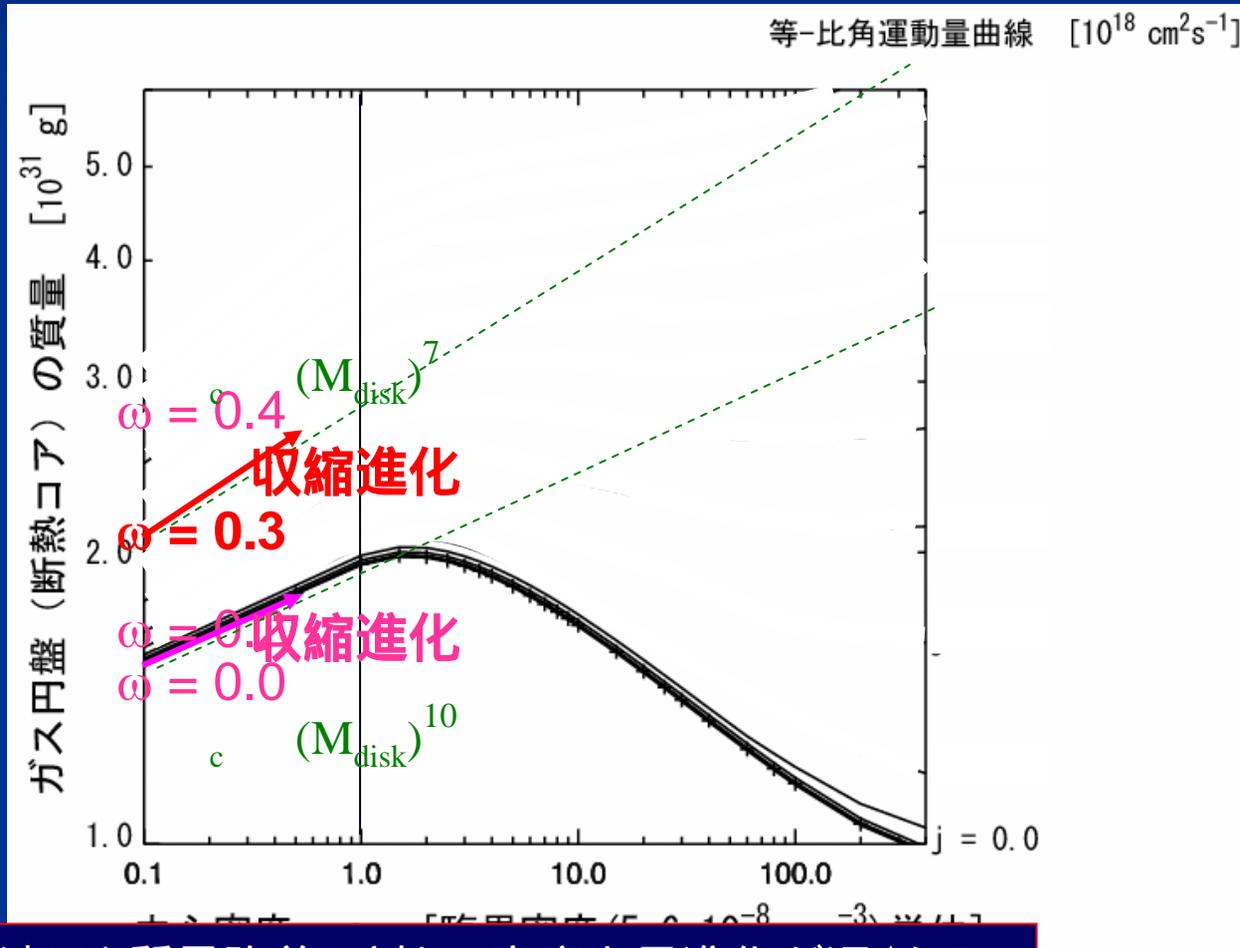
$\omega=0.2-0.3$ 等温段階での典型的な値。
(Matsumoto 1997, 2003)

$\omega=0.5$ ケプラー円盤 (回転最強)

進化は無次元化した回転 $\omega = \frac{\Omega}{\Omega_c} t_{ff}$ でよく分類されることが分かった。

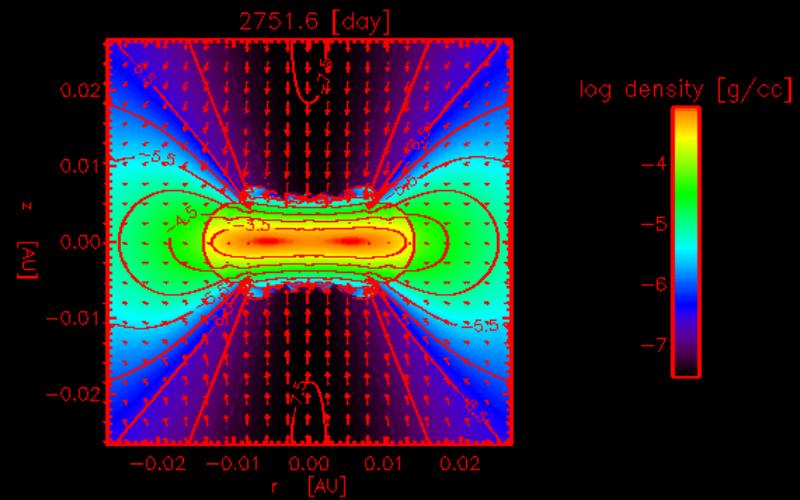
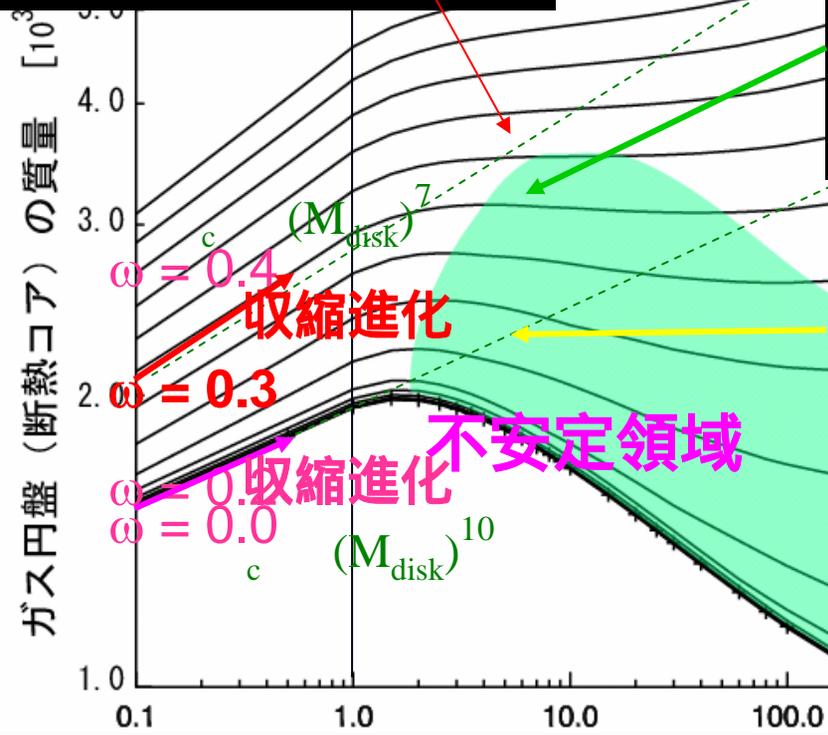
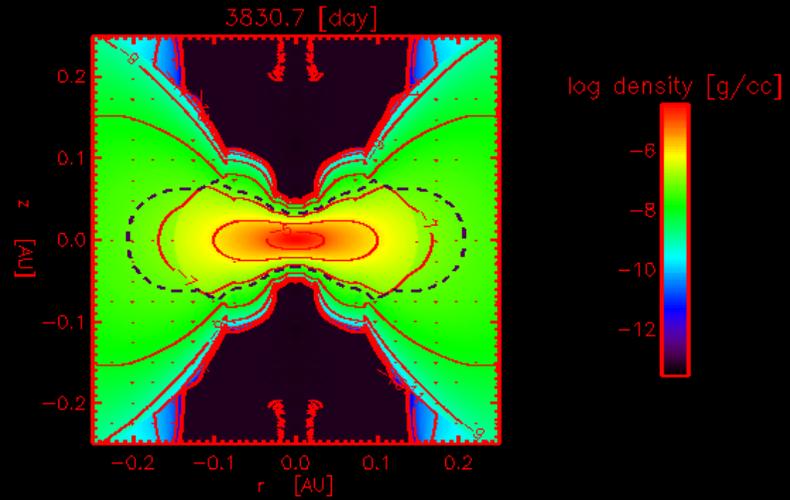
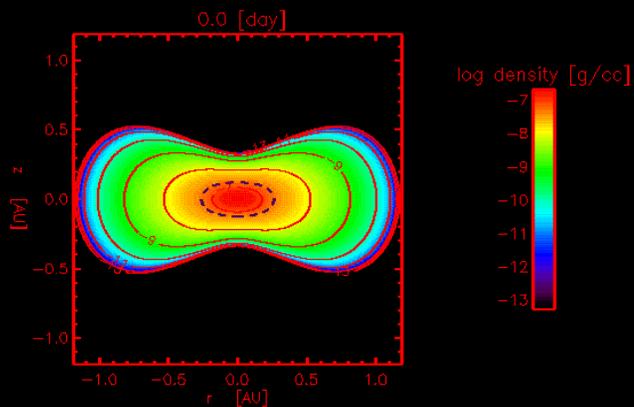


断熱コア(First Core)の重力崩壊



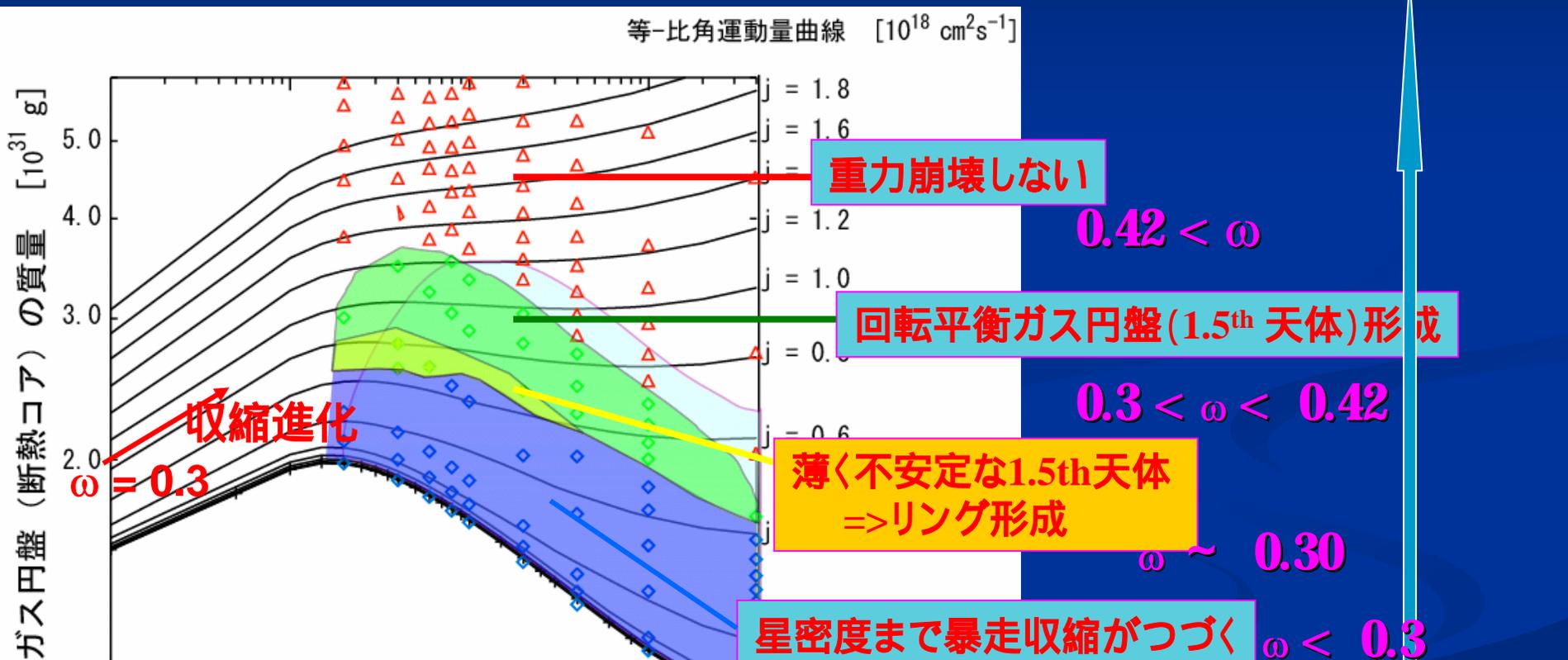
回転が速いと質量降着に対して密度上昇進化が遅くなる。

First Co



回転が速いと質量降着に対して密度上昇進化が速い。
 回転が速いと重力崩壊しない。

1.5th 天体形成の条件



初期の回転が $\omega \sim 0.3$ 程度の中ぐらいの速さ(典型的な値)の時、
 原始星コアの形成前に、一旦、回転平衡な天体(1.5th Objects)が形成！

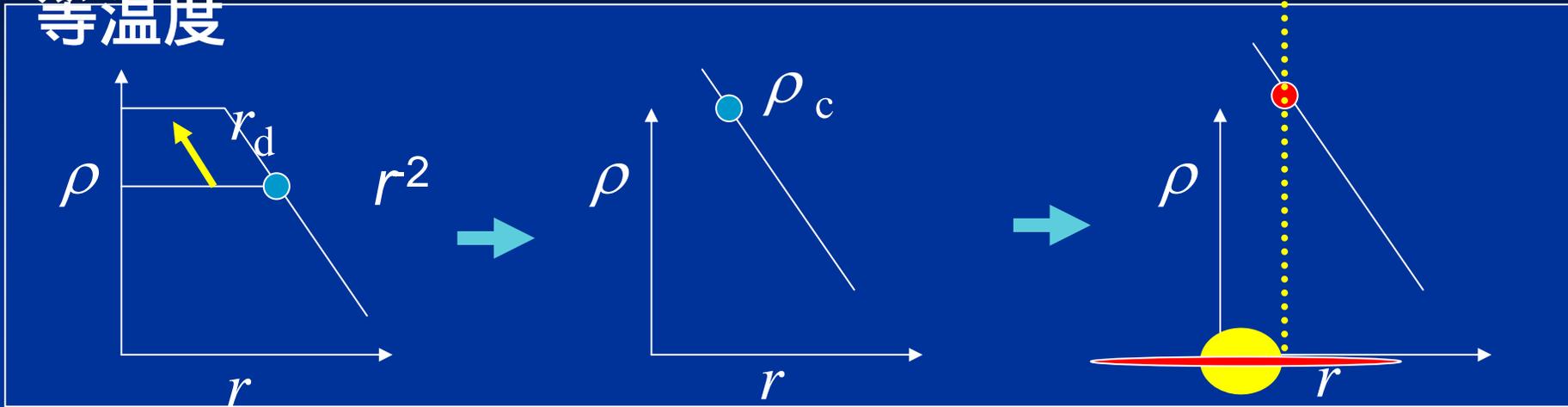
10¹⁵cm⁻³

10¹⁶cm⁻³

10¹⁷cm⁻³

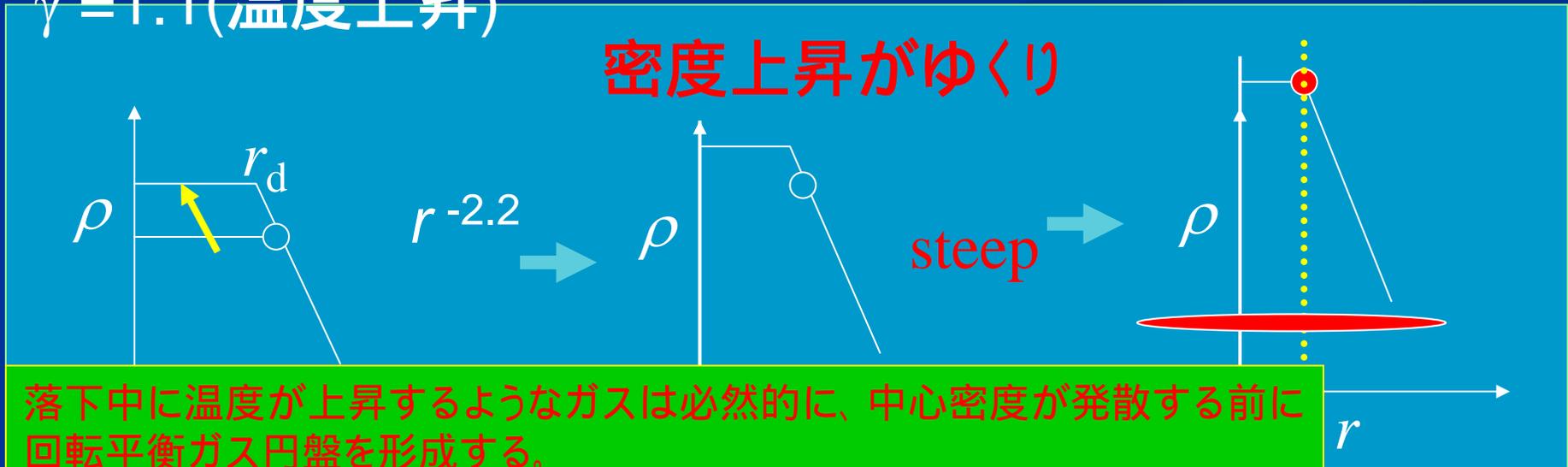
回転平衡ガス円盤形成のメカニズム

等温度



Centrifugal Radius

$\gamma = 1.1$ (温度上昇)



密度上昇がゆくり

steep

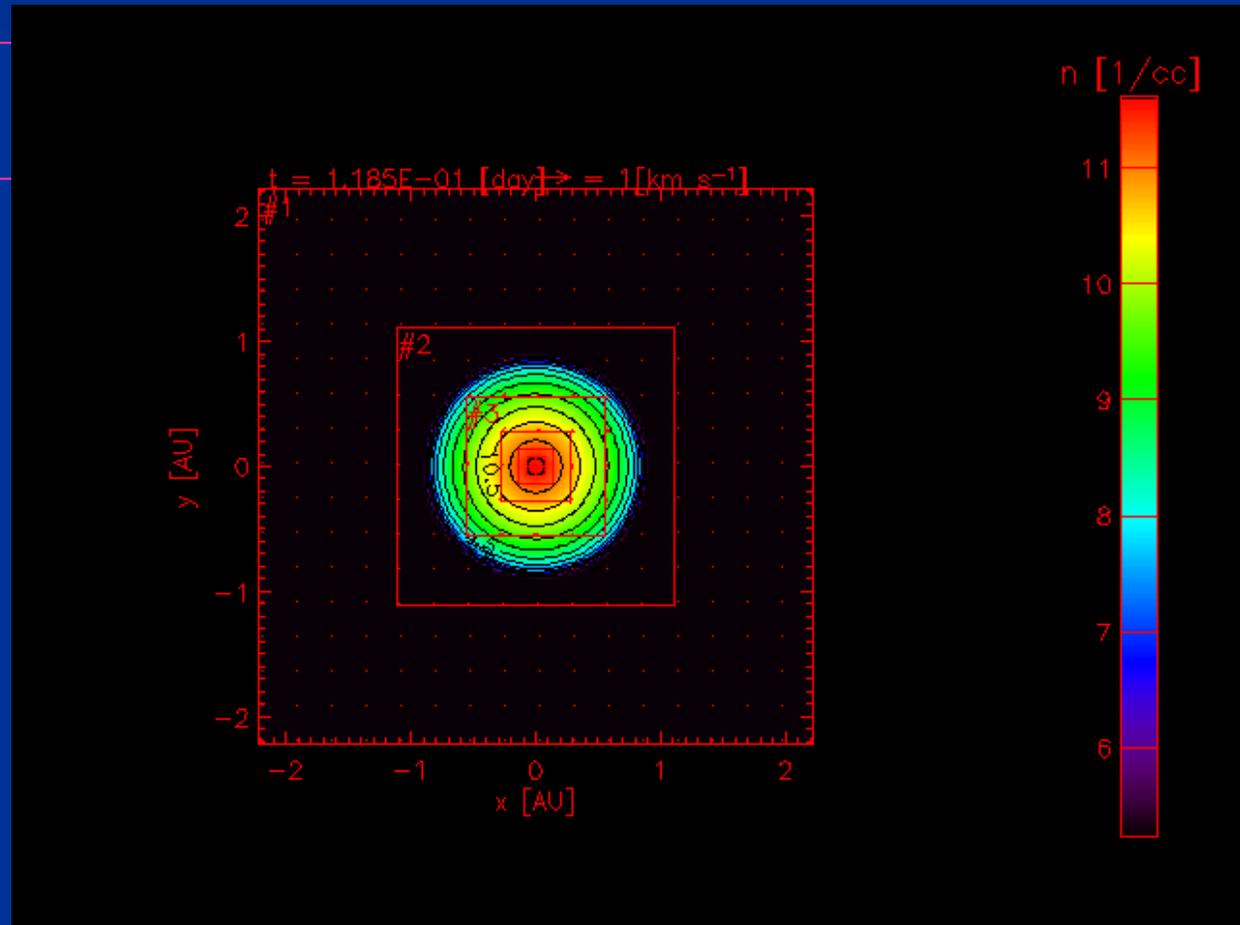
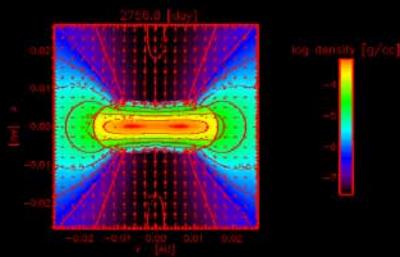
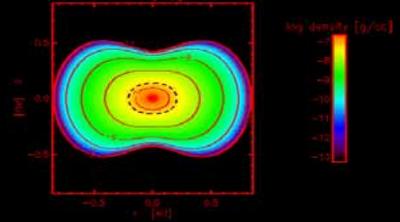
落下中に温度が上昇するようなガスは必然的に、中心密度が発散する前に回転平衡ガス円盤を形成する。

連星系形成？

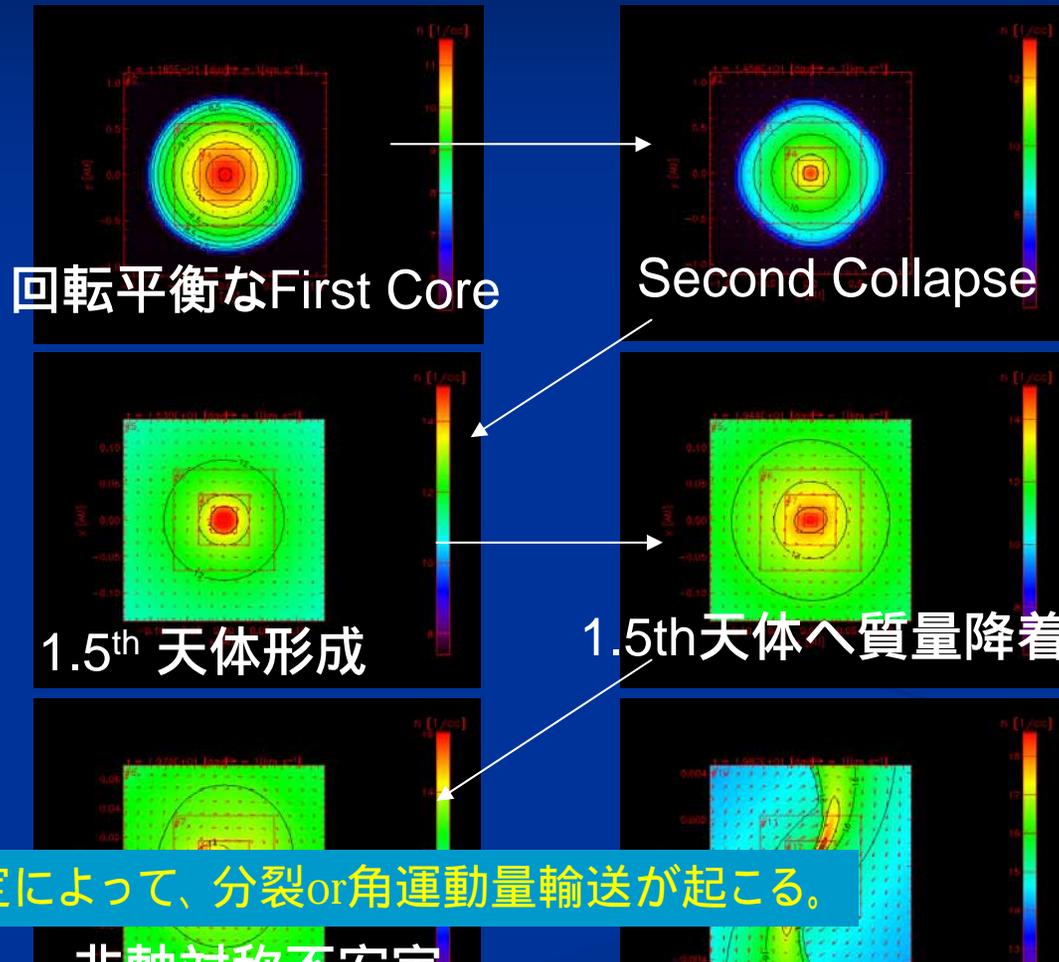
3次元数値シミュレーションでこのモデルで分裂が起こるのか調べてみた。
Nested coed (nx,ny,nz)=(128,128,16) 13levels

$$\omega = 0.32$$
$$\rho_{c0} = 4 \rho_{crit} = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

2D simulation



1.5th天体の形成と進化



非軸対称不安定によって、分裂or角運動量輸送が起こる。

しかし、収縮が止まってしまった後の進化は、熱的進化を正しく計算しなおさないといけない。

まとめ

断熱コア(First Core)と星コア(Second Core)の間には、これまで考えられていなかった進化段階である回転平衡ガス円盤(1.5th 天体)段階がある。

- 断熱コア(First core)の回転の大きさが $0.30 < \tau_c t_{\text{ff}} < 0.42$ の場合、1.5th 天体が形成される。
- 形成される1.5th天体は、初期の回転が小さいほど激しいバウンスにより不安定である。特に断熱コア段階の典型値である $\tau_c t_{\text{ff}} \sim 0.3$ の場合、リング構造を形成した。
- 3次元計算によると非軸対称不安定が発生した。
近接連星形成の可能性？

連星系形成？

3次元数値シミュレーションでこのモデルで分裂が起こるのか調べてみた。
Nested coed (nx,ny,nz)=(128,128,16) 13levels

$$\omega = 0.32$$
$$\rho_{c0} = 4 \rho_{crit} = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

centrifugally supported disk

mass accretion

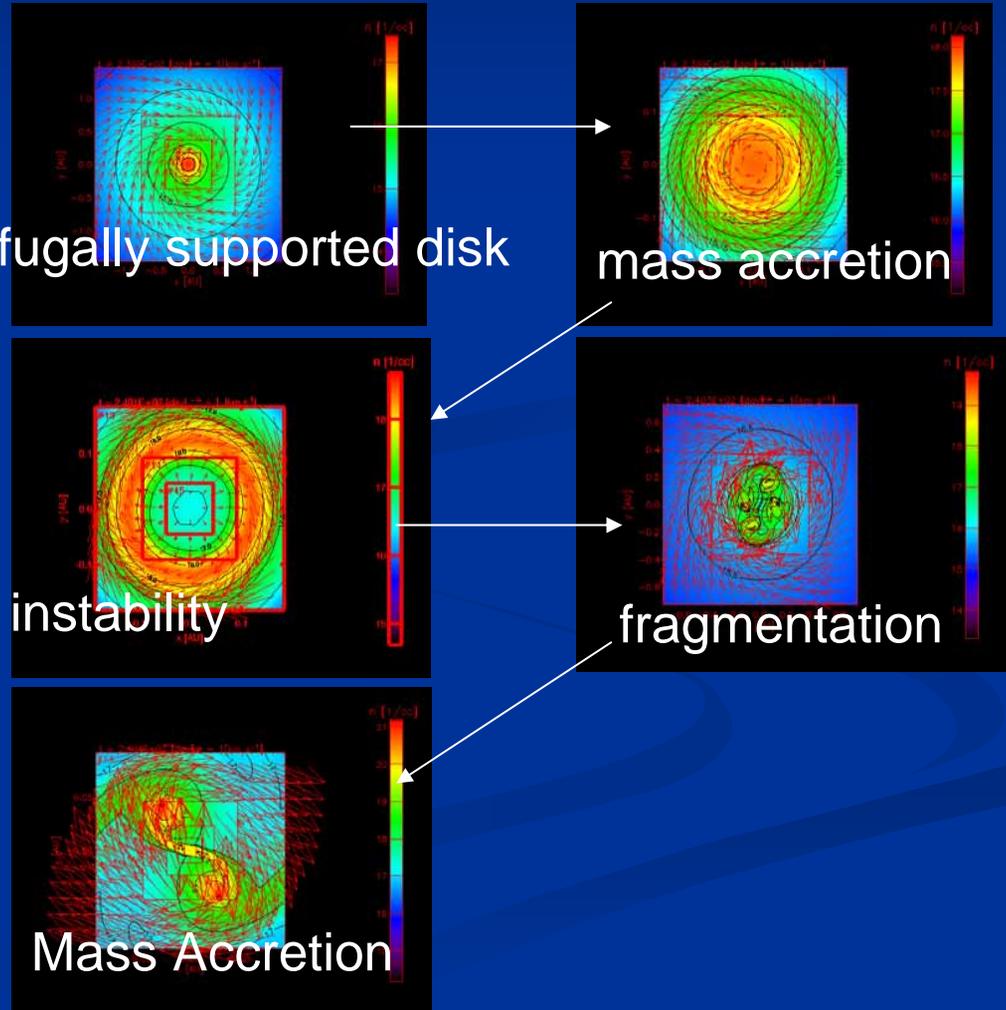
他の角運動量分布の場合

初期にフィラメント

ring instability

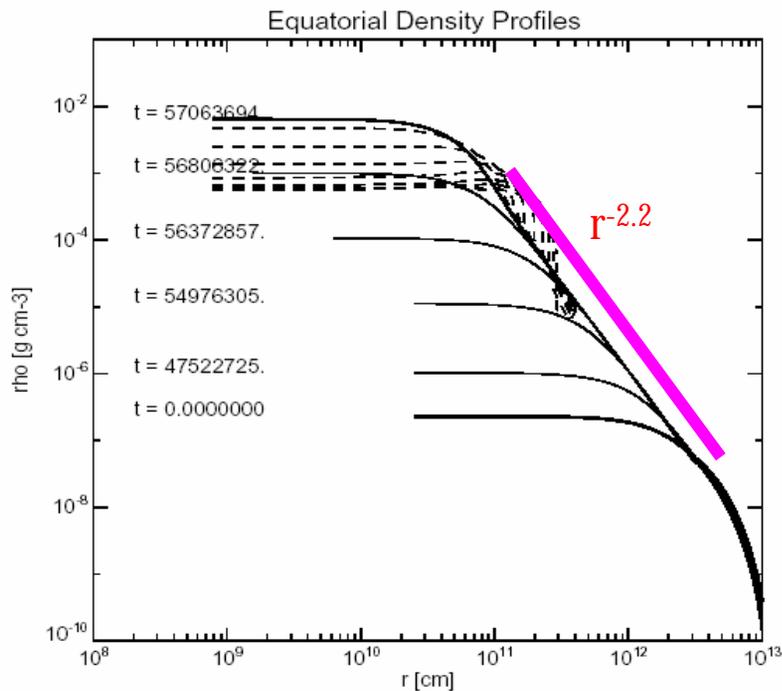
fragmentation

Mass Accretion

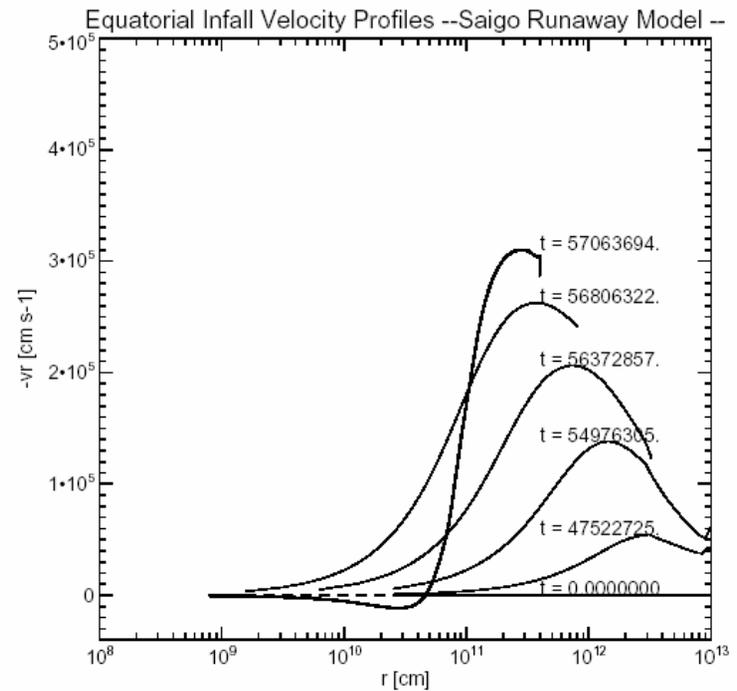


Centrifugal supported disk

密度分布



落下速度分布



連星系形成のシ

1. 等温段階での分裂

Miyama et al. (1984), Boss & Myhill (1995), Tsuribe & Inutsuka (1999)

初期に非常に不安定なガス雲
収縮中に変形分裂？

非常に大きなスケールの分裂

2. 断熱コア形成時に分裂

Truelove et al. (1998), Matsumoto et al. (2003)

Machida (この後すぐ)

もっとも広く受け入れられている
100AUスケールの分裂

3. Secondary Collapse段階での分裂

Boss (1989), Bonnell and Bate(1994), Bate (1998)

? 分裂しないと思われている？
< 1AUスケールの分裂

$n = 10^4$
 $l \sim 10,000$

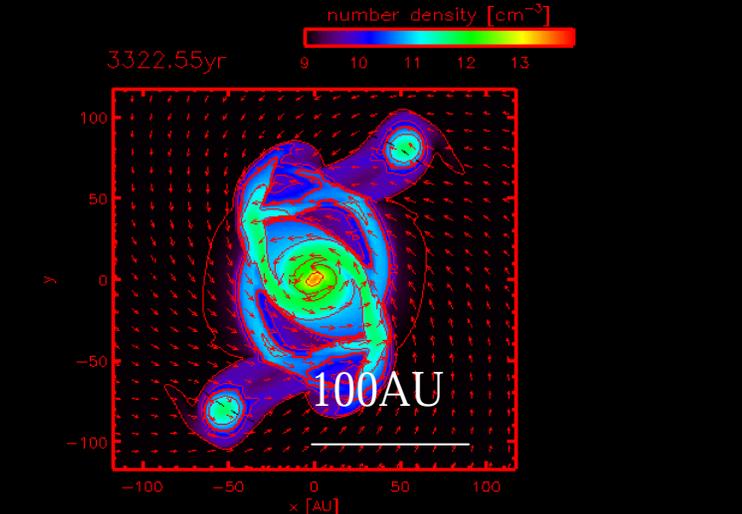


$n = 10^{10}$
 $l \sim 100$ AU

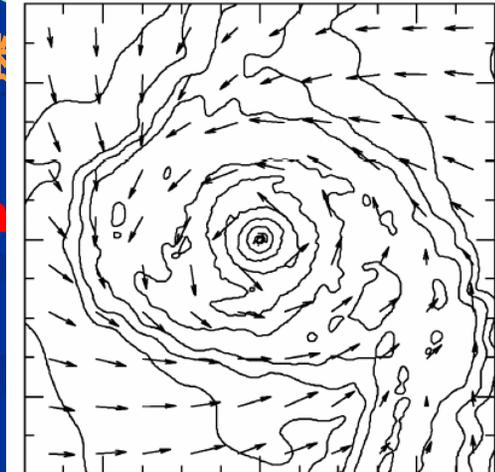


臨界密度
 $n = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
 $l \sim 1$ AU

$n = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$



質量降着 & 収縮



4.4 km/s: → 0 20 AU