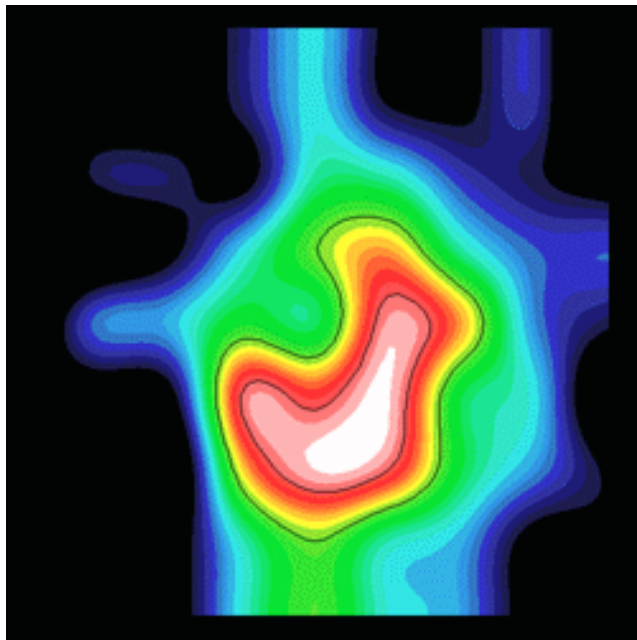
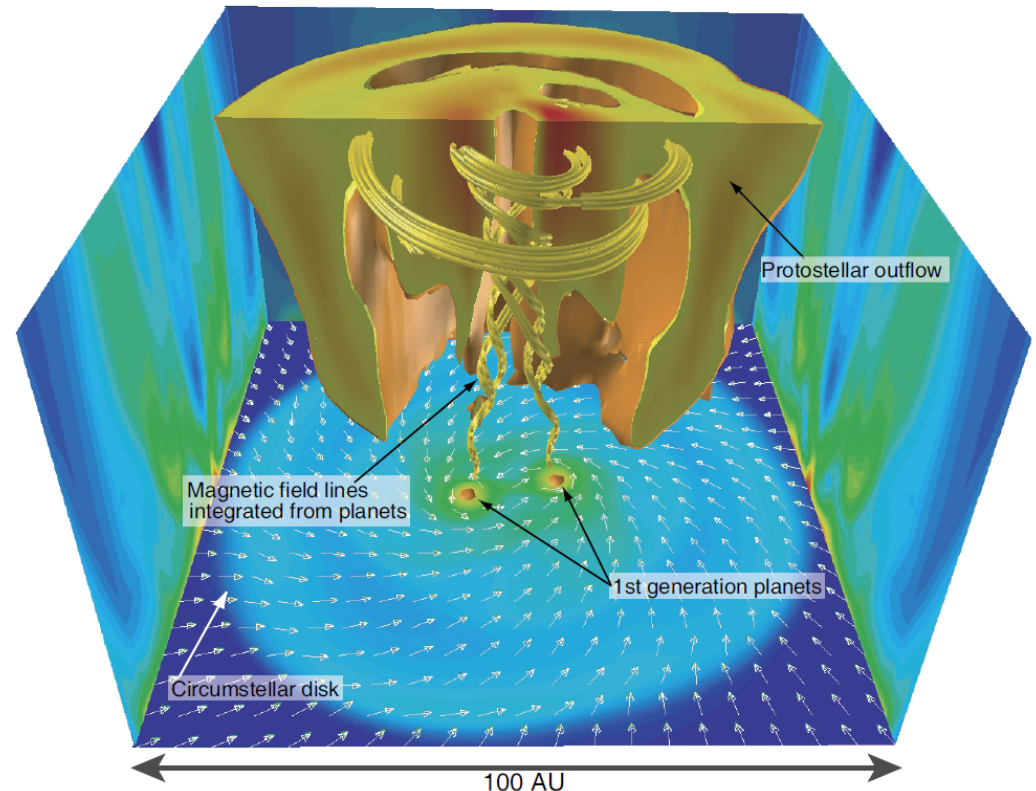
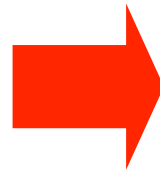


# 分子雲コアからの円盤形成過程と 重力不安定によるガス惑星形成の可能性



分子雲コア

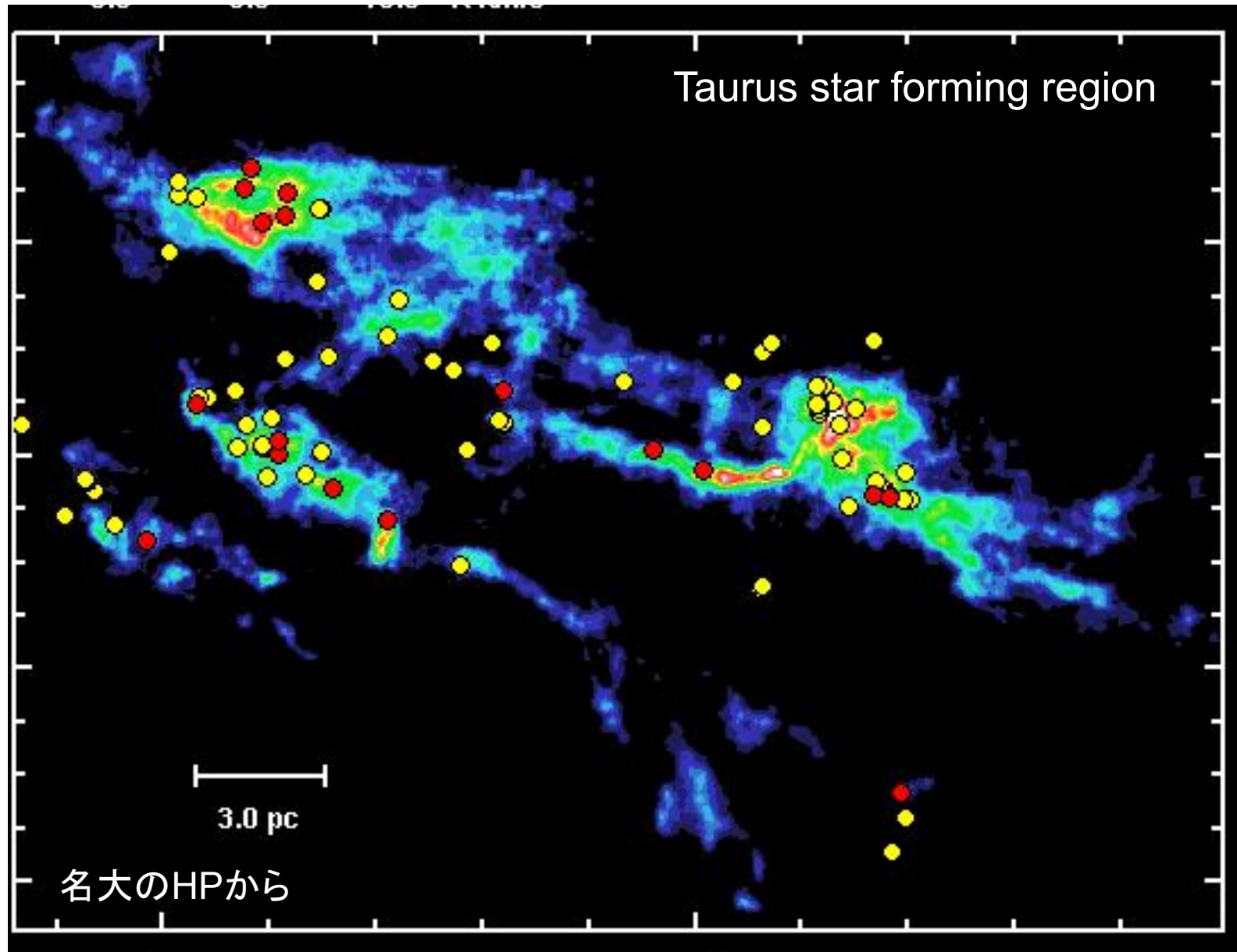


星周円盤、ガス惑星の形成

町田正博 (国立天文台)、犬塚修一郎 (名古屋大)、松本倫明 (法政大)

# 星形成領域の観測

2/38

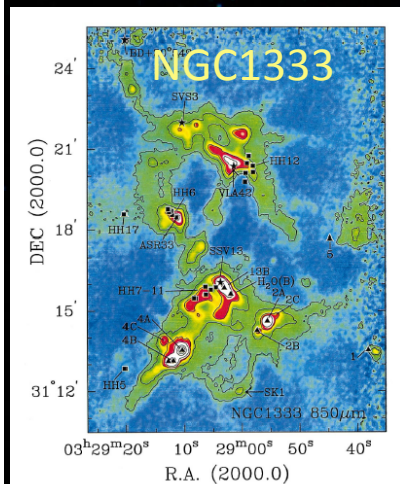


# 星形成領域での数多くのアウトフロー

3/38

## 星団形成領域 NGC1333 (Spitzer)

- NGC1333 (320 pc)
- 赤外観測
- ~150個の原始星
- 緑の筋がアウトフロー or ジェット



Star forming region  
NGC 1333  
Spitzer Space Telescope



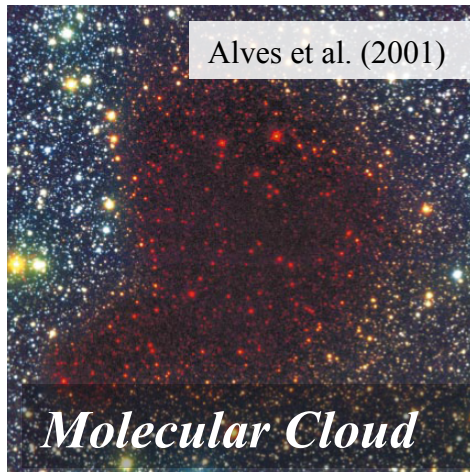
# 星形成の研究

星の初期条件

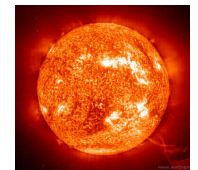
星・惑星の形成後

初期条件

結果



To MS star



Observed

Not Observed!!

Observed

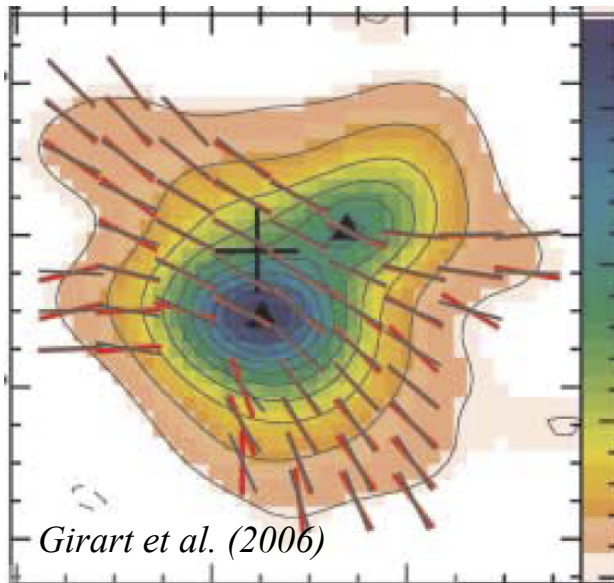
濃いガス雲の内部を直接見通せない

理論・数値シミュレーション!



# 星形成過程での様々な現象

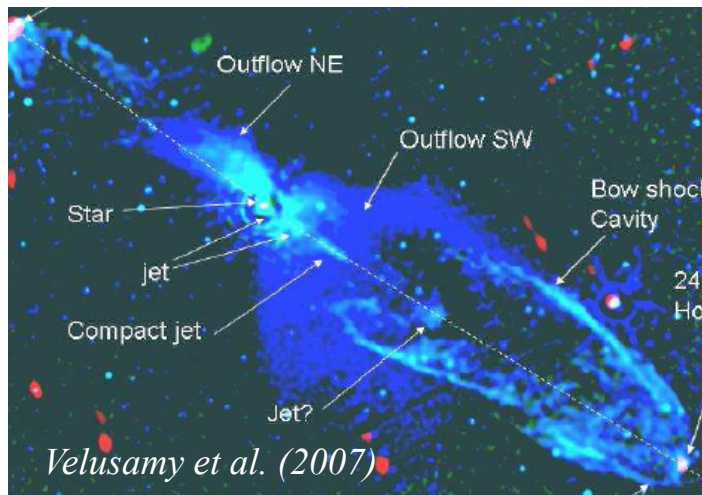
5/38



*Girart et al. (2006)*

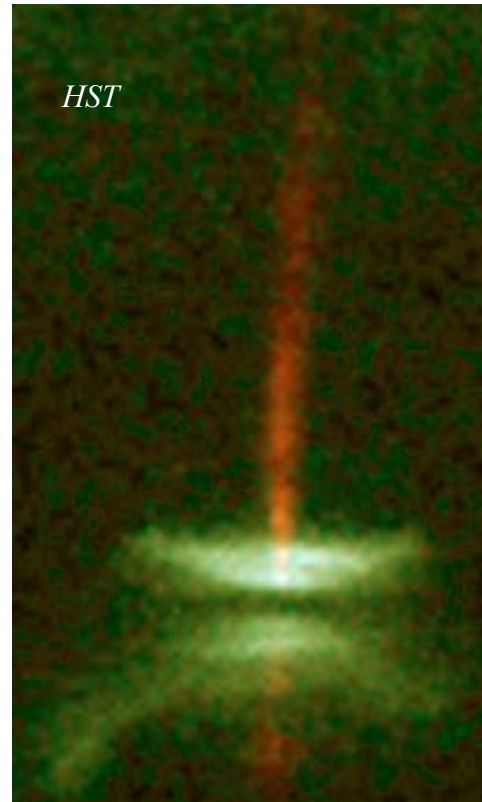
**Magnetic Field**

**Molecular Outflow**

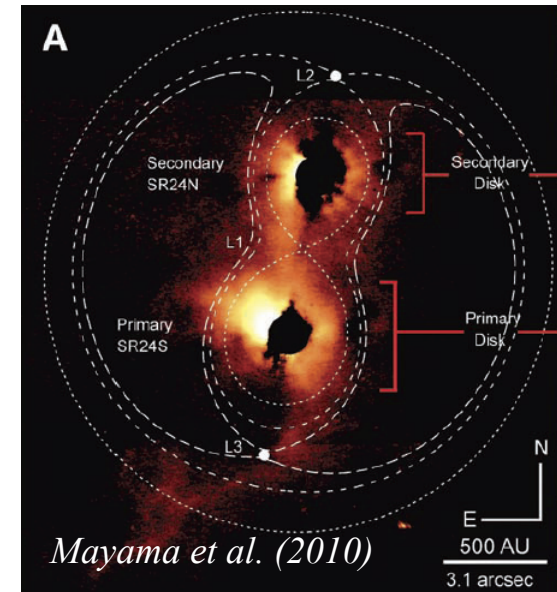


*Velusamy et al. (2007)*

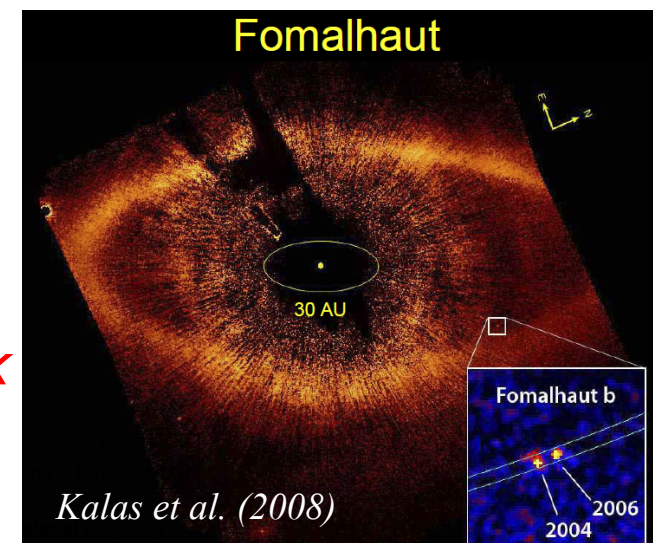
**Protostellar Jet**



**Circumstellar Disk & Planet**

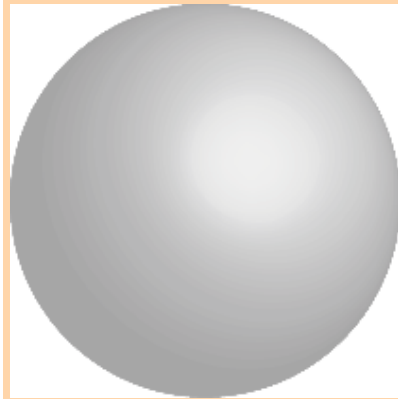


**Proto-Binary & Disks**



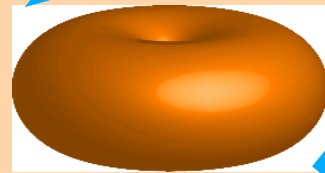
*Kalas et al. (2008)*

# 低質量星の形成過程



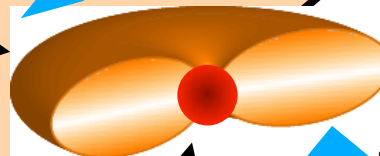
Molecular cloud core

$\sim 10^{4-6}$  yr



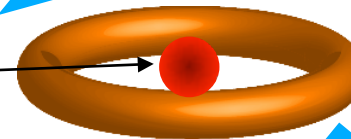
First adiabatic core

$\sim 10-10^3$  yr



Protostar

$\sim 10^{4-5}$  yr



Circumstellar Disk

$\sim 10^{6-7}$  yr



To T Tauri, MS

ガス収縮段階(前期段階)  
原始星形成前

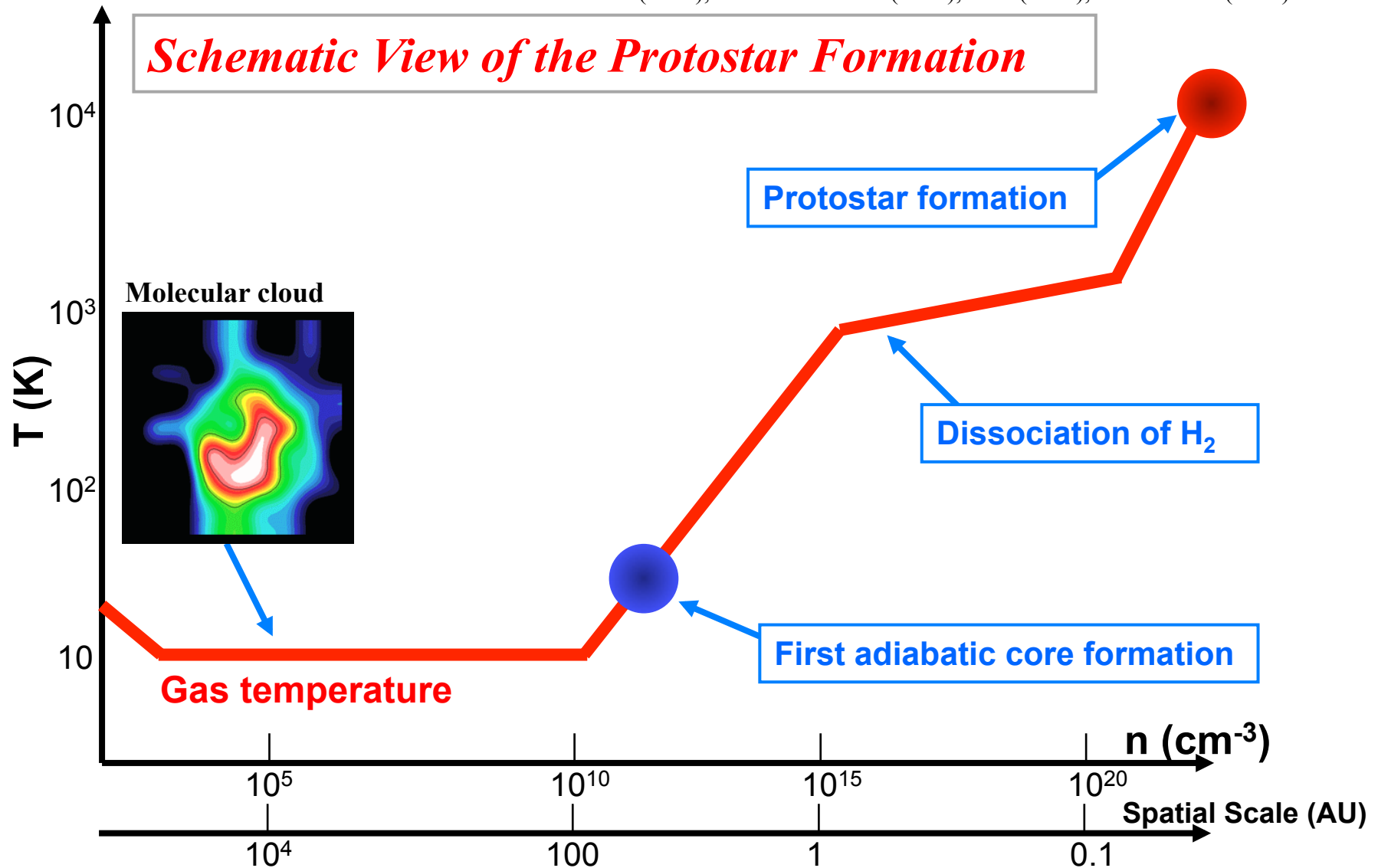
原始星形成後  
主降着期(後期段階)

# ガス収縮段階のガスの熱進化

7/38

Larson(1969), Winkler & Newman (1980), Tscharnuter(1987), Masunaga & Inutsuka(2000),  
Whitehouse & Bate(2006), Stamatellos et al.(2007), Bate (2010), Tomida et al.(2010)

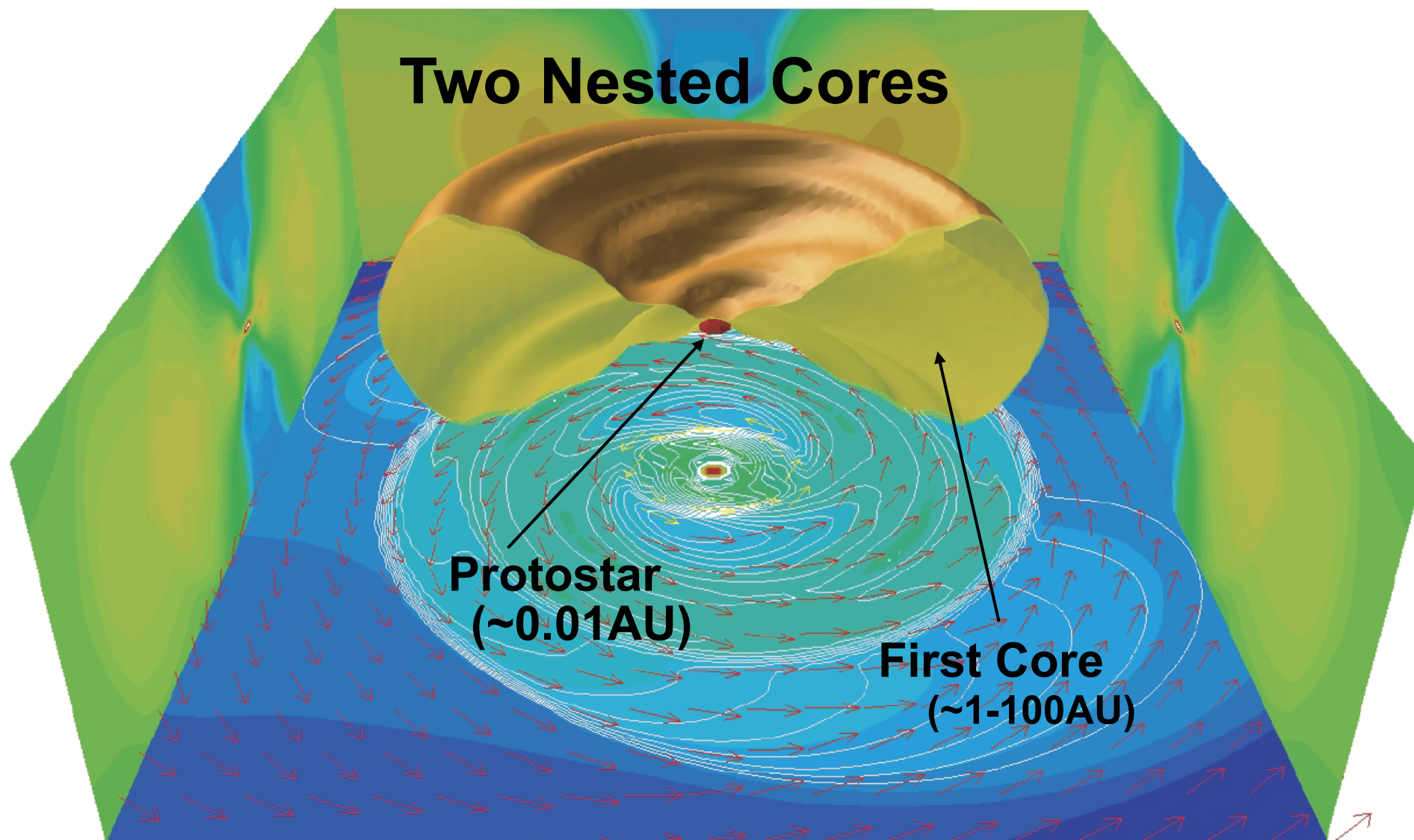
## *Schematic View of the Protostar Formation*



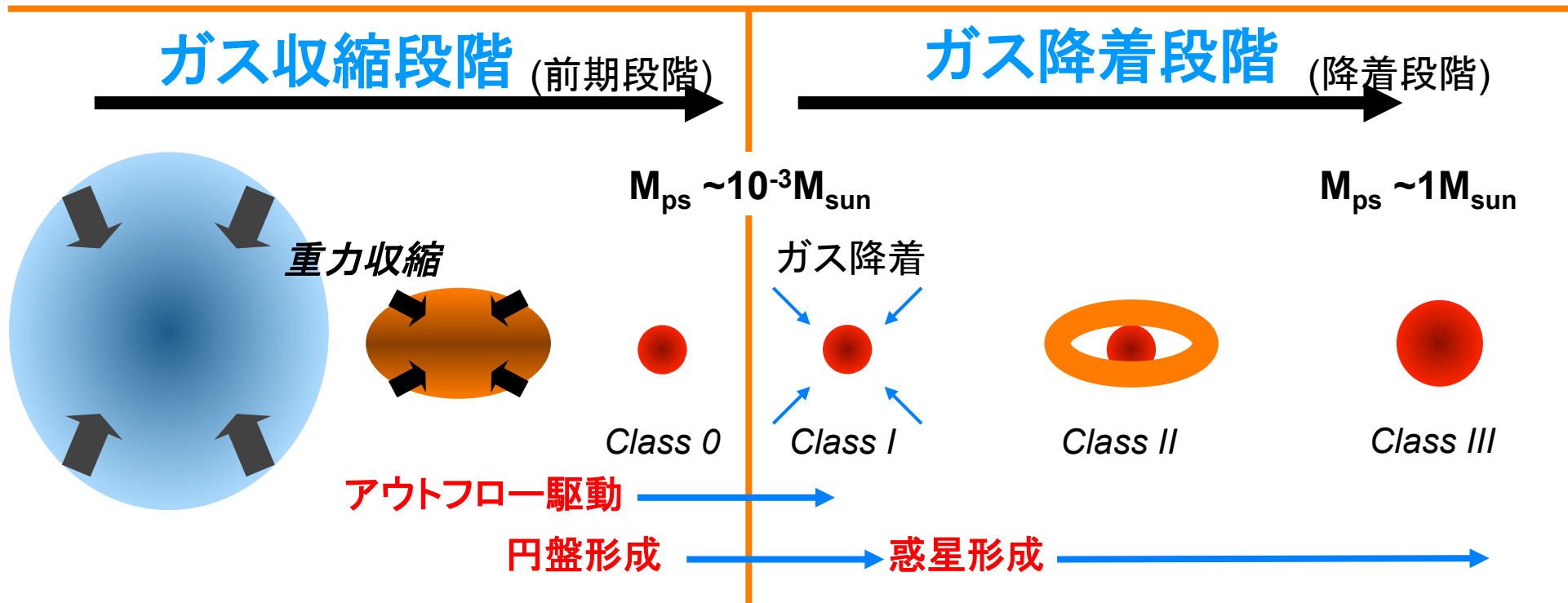


# 原始星誕生直後

8/38



# 理論：2種類の取り組み



計算開始

1. ガス収縮から原始星形成の研究
  - 適切な境界条件 ◎
  - 円盤の形成 ◎
  - 進化 ○ or △
  - 長時間進化 △

???

計算開始

2. 円盤を初期条件とした研究
  - 適切な境界条件 ×
  - 円盤の形成 ×
  - 円盤の進化 ◎ (or ×)
  - 長時間進化 ◎

困難：広範な空間スケール ( $10^5 - 10^{-3}$  AU) !

# 星形成過程での深刻な問題

- 角運動量・磁束問題
  - ジェット・アウトフロー駆動問題
  - 連星形成問題
- 前期段階
- 円盤(惑星)形成問題
  - アウトフロー・ジェットの長時間駆動
  - 星形成率と星の質量の問題
- 後期段階

ほぼ解決



# 円盤形成を調べるためには

## □星周円盤は、分子雲コアの角運動量によって形成

- 分子雲コアからの計算: 広範な空間レンジを解像
- 分子雲コア:  $\sim 10^5$  AU,  $\sim 10^4$  cm<sup>-3</sup>  $\Leftrightarrow$  原始星:  $\sim 0.01$  AU,  $\sim 10^{21}$  cm<sup>-3</sup>

## □分子雲コアからのガス降着により円盤が成長

- 長時間計算: それぞれの天体の異なるタイムスケール
- 原始星  $\sim$  day, 円盤  $\sim$  yr, 分子雲コア  $\sim 10^7$  yr
- 分子雲コアからのガス降着が終了すると円盤の成長も止まる

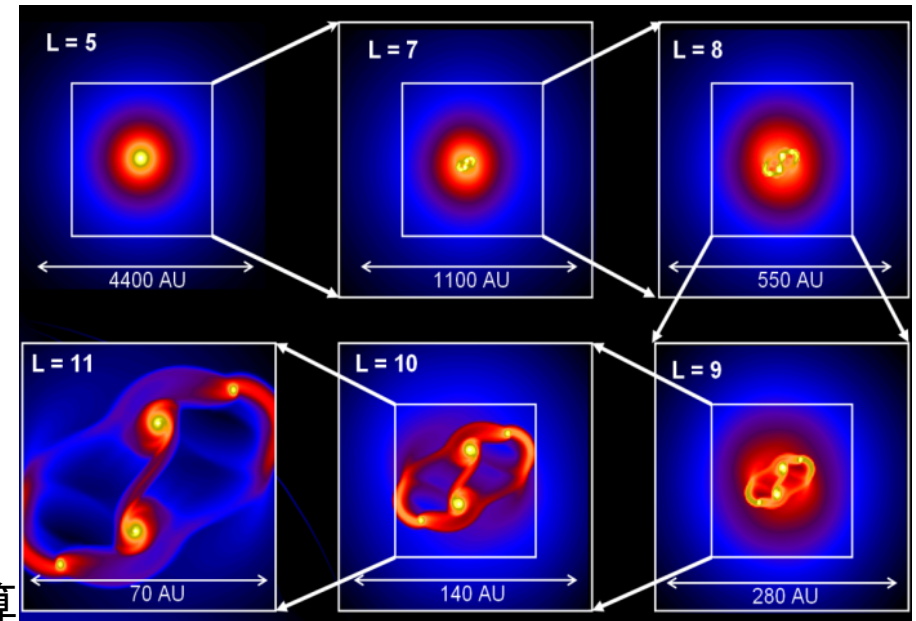
## □磁場の影響も重要

- 磁気制動による角運動量輸送、磁場の散逸
- 円盤形成条件と密接に関係

## 広範な空間スケールと調べるために

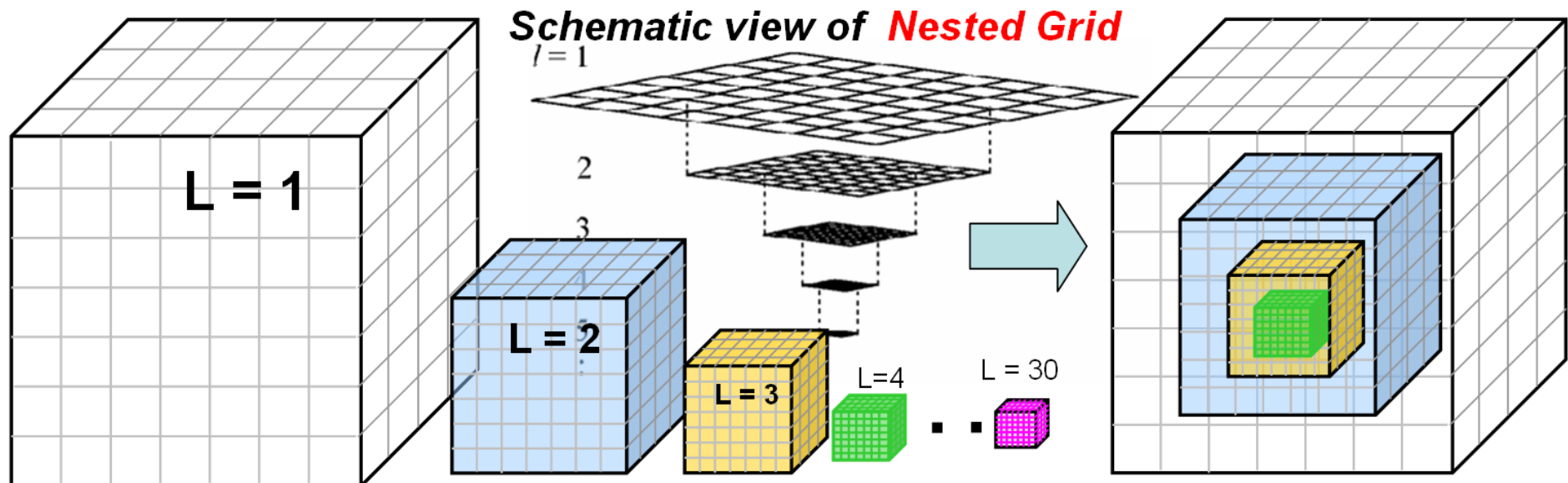
### 3D (Resistive M)HD Nested Grid Code

- 多層格子法: 広範の空間スケールを任意の解像度で計算可
- 流体: (Resistive M)HD 方程式 + 自己重力
- 分子雲コアから円盤へのガス降着終了まで計算



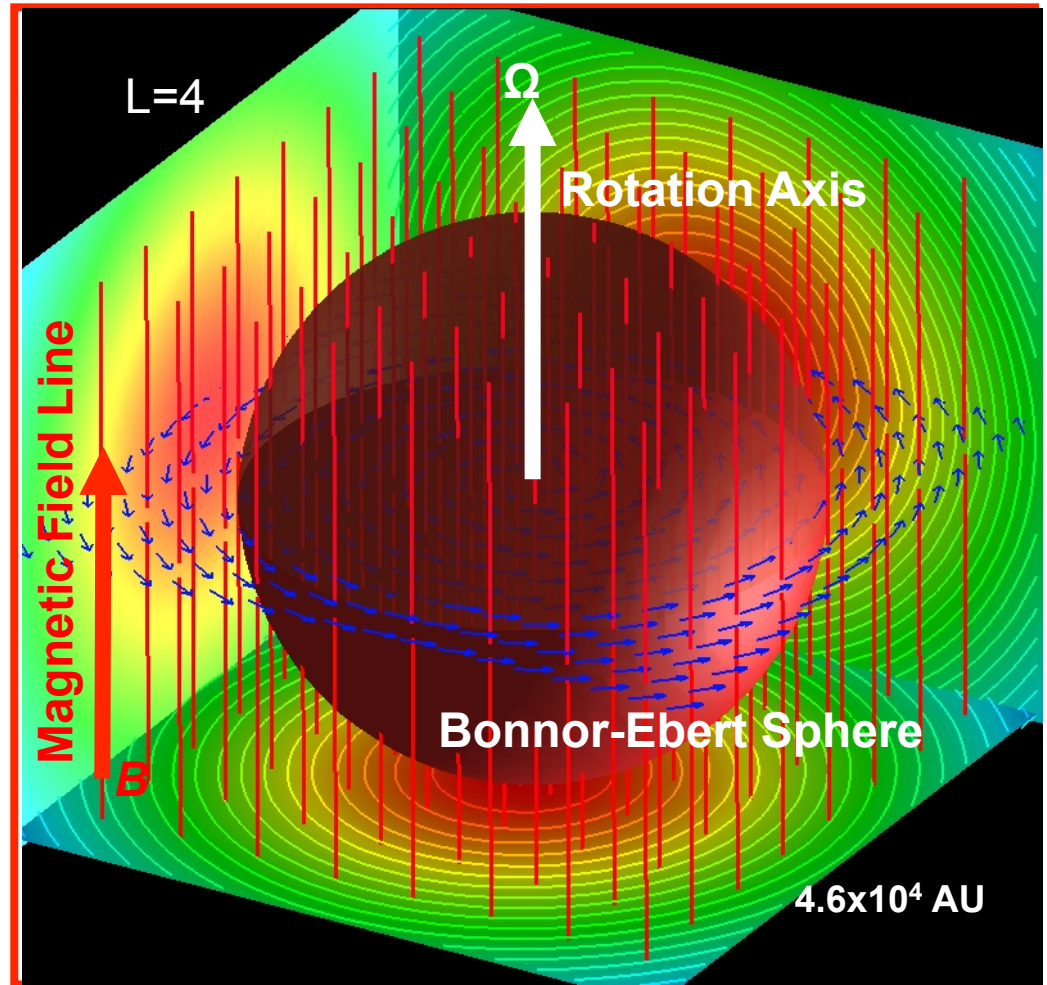
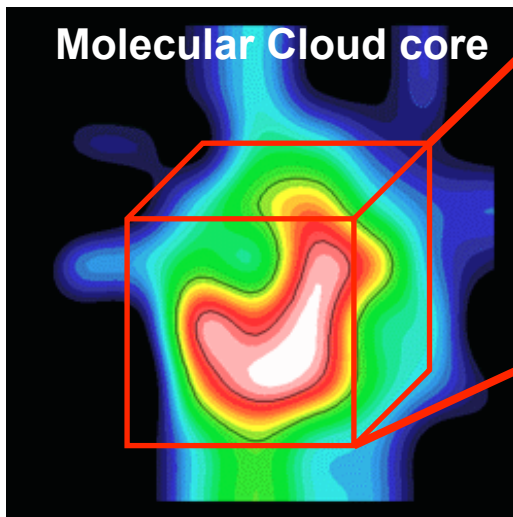
同時刻、異なる空間スケール

- **空間10桁** ( $10^{19}$  cm ~  $10^9$  cm), パーセク ~ 太陽半径まで
- **密度コントラスト20桁** ( $10^3$  cm<sup>-3</sup> ~  $10^{23}$  cm<sup>-3</sup>)



# 初期設定

- ❑ 球対称、平衡ガス球 (Critical Bonnor-Ebert Sphere)+ Rotation
- ❑ パラメータ:  $\beta$  (回転エネルギー)  
$$\beta = E_{\text{rot}} / E_{\text{grav}}$$
- ❑ Nested Grid: (128, 128, 16)
  - L=1:  $\sim 10^5$  AU,  $\Delta x = 781$  AU
  - L<sub>max</sub>=12: 70 AU,  $\Delta x = 0.5$  AU
- ❑ Sink:  
 $r < 1$  AU and  $n > 10^{13}$  cm<sup>-3</sup>



## ❑ 初期値

- 数密度 :  $n = 10^6$  cm<sup>-3</sup>
- 温度 :  $T = 10$  K
- ガス球のサイズ:  $4.6 \times 10^3$  AU
- 質量 :  $M_{\text{tot}} = 0.75$  Msun



# 基礎方程式とSink cell

(Resistive M)HD 方程式

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

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

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B},$$

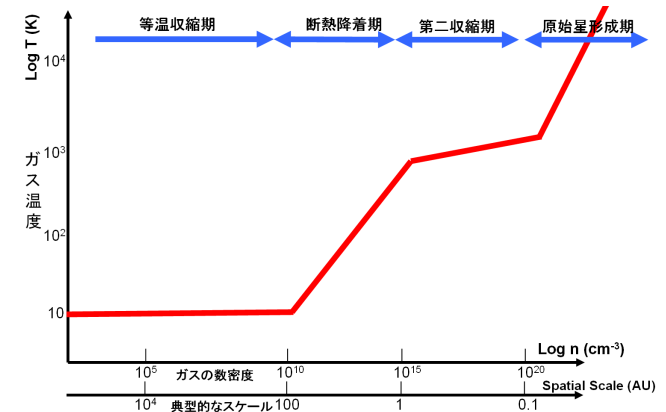
$P = P(\rho)$ , ← Masunaga & Inutsukaを用いて バロトロピック近似

$$\phi = \phi_{gas} + \phi_{ps},$$

$$\nabla^2 \phi_{gas} = 4\pi G \rho, \quad \phi_{ps} = -GM_{ps} / r$$

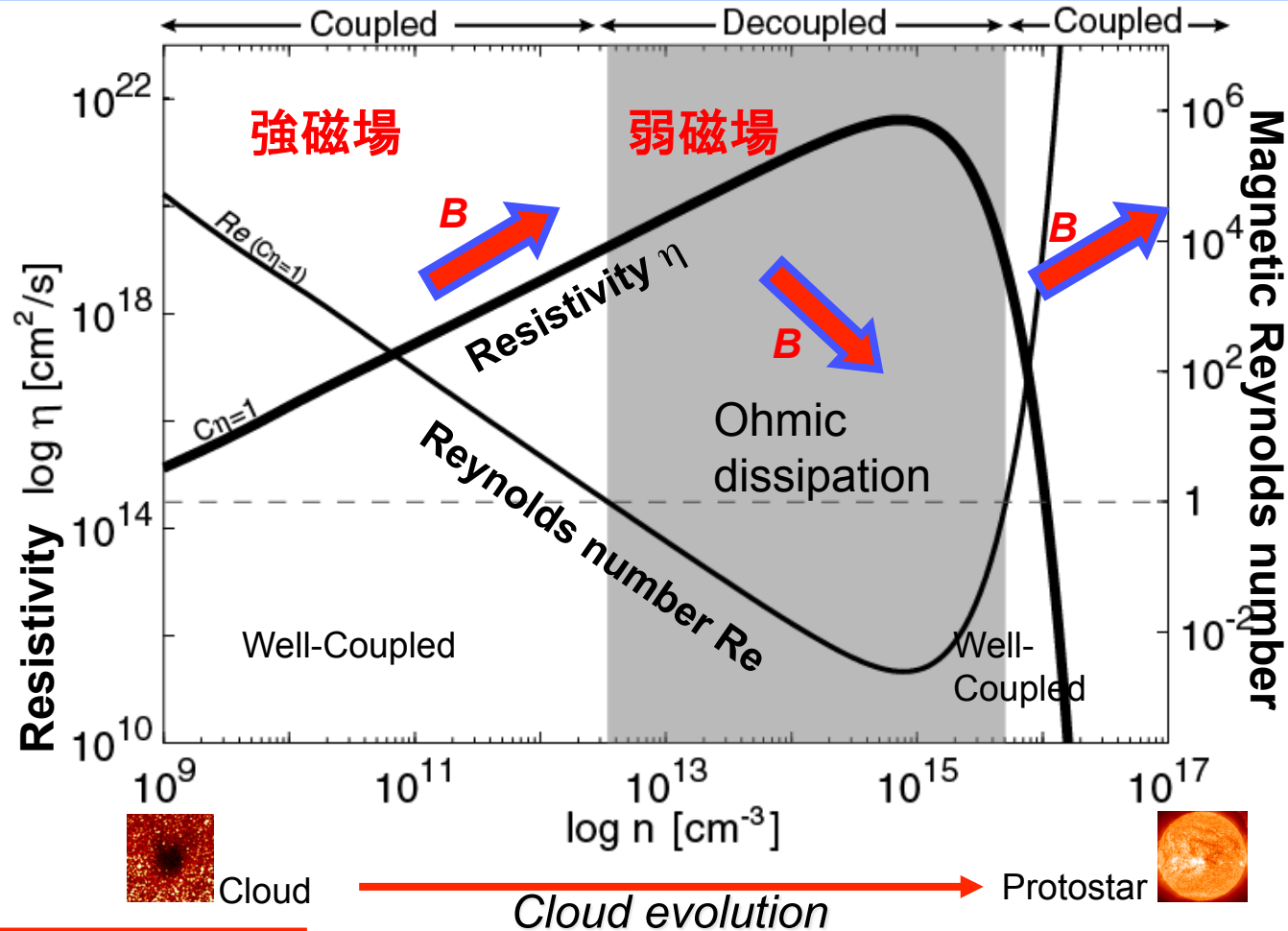
原始星(sink cell)の条件:以下の条件を満たしたガスを取り除いて、  
中心星の重力ポテンシャルに加える

- $r < 1$  AU (first coreを十分分解する条件)
- $n > 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  ( $n > 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ではほとんど分裂なし、全て星になる条件)



ガスの温度進化

# 磁場の散逸: Resistivity $\eta$ の見積り

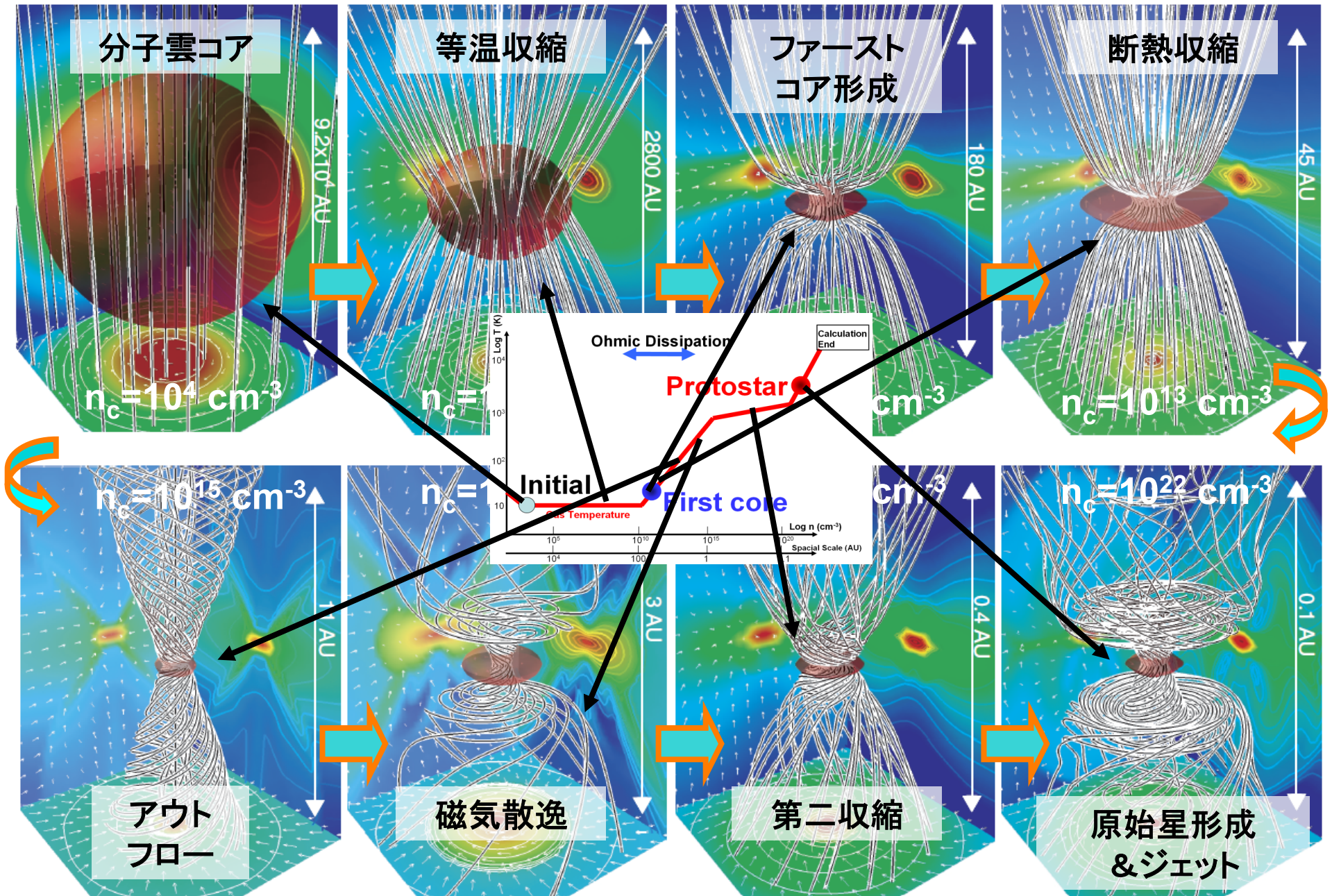


## 弱電離プラズマ

Nakano et al. (2002), Machida et al. (2007)

- 低密度 ( $n < 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ): 電離度は低い ( $< 10^{-6}$ ) が  $\tau_{\text{ff}} > \tau_{\text{col}} \Rightarrow$  well-coupling
- 中間密度 ( $10^{12} \text{ cm}^{-3} < n < 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ): 電離度がさらに低下  $\Rightarrow$  オーム散逸  $\Rightarrow$  decoupled (磁場散逸)
- 高密度 ( $n > 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ): メタルの一部がイオン化  $\Rightarrow$  電荷が上昇  $\Rightarrow$  well-coupling

# 前期段階：原始星形成までの計算





# 後期段階の計算: 3種類の計算

17/38

## 1. 磁場なし、sinkなし

- ✓ 原始星を分解:  $\sim 10^5 \text{AU} - 0.001 \text{AU}$
- ✓ 短時間の計算: 原始星形成後、 $\sim 3$ 年間
- ✓ 初期円盤形成過程を調査

基本的には、前期段階の計算を長時間実行する

## 2. 磁場なし、sinkあり

- ✓ 原始星は分解しない:  $\sim 10^5 \text{AU} - 0.1 \text{AU}$
- ✓ ファーストコア ( $\sim 1-100 \text{AU}$ ) を分解
- ✓ 長時間進化を調査: 原始星形成後  $\sim 10^5 \text{yr}$

## 3. 磁場あり、sinkあり

- ✓ 磁場の効果を調べる
- ✓  $\sim 0.1 \text{AU}$ まで分解、原始星形成後  $\sim 10^4 \text{yr}$

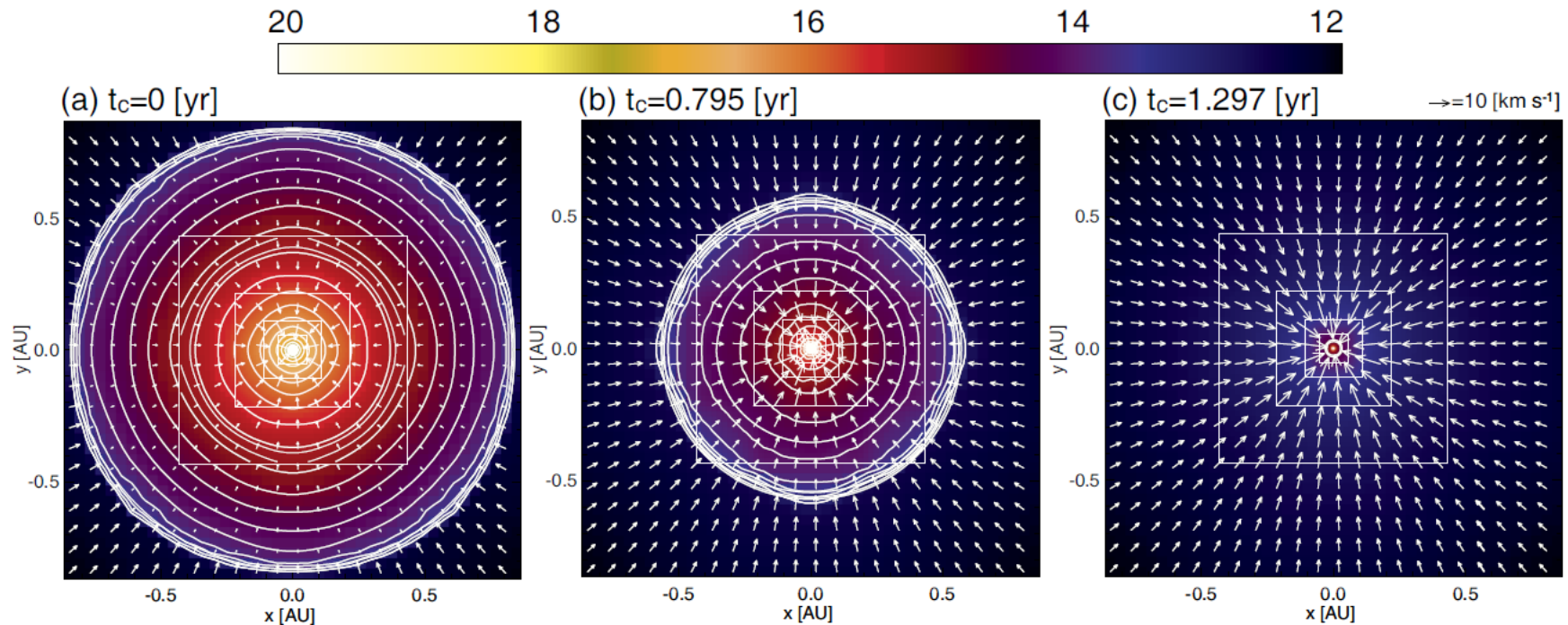
# 1. 磁場なし、sinkなしの計算

- ✓ 原始星を分解:  $\sim 10^5 \text{AU} - 0.001 \text{AU}$
- ✓ 短時間の計算: 原始星形成後、 $\sim 3$ 年間
- ✓ 初期円盤形成過程を調査

# 回転なしの分子雲コア

$$\beta_0 = 0$$

19/38



ファーストコアは、原始星形成後約1年で中心星に落下

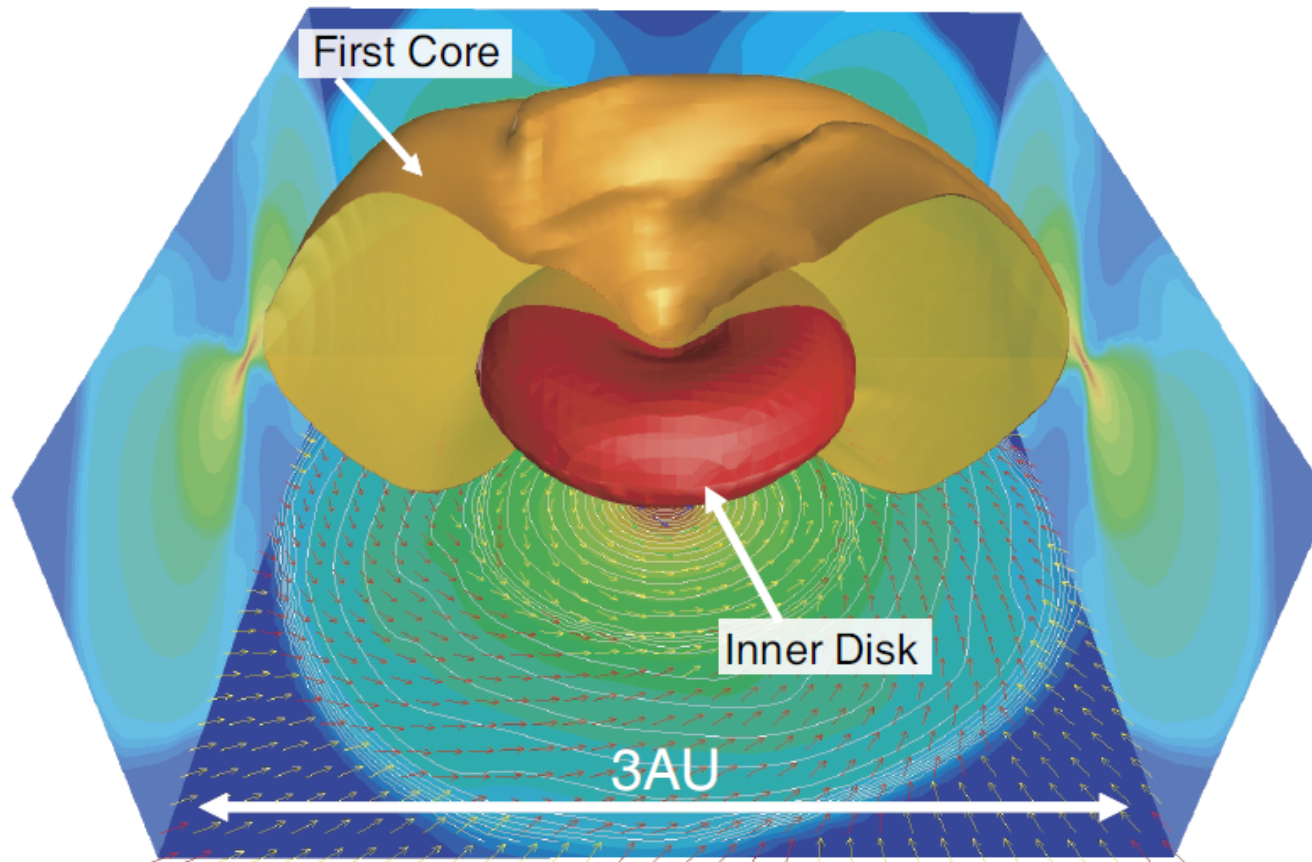
- $n \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ でガスが断熱的に  $\Rightarrow$  断熱コア(ファーストコア)の形成
- $n > 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ で $\text{H}_2$ が解離(吸熱反応)  $\Rightarrow$  ファーストコアの中心部が崩壊 (second collapse)
- 原始星形成  $\Rightarrow$  残骸ファーストコアのガスが原始星に落下

# 非常に弱い回転の分子雲コア

$$\beta_0 = 10^{-4} \quad 20/38$$

分子雲の観測の下限値と同等の回転エネルギー

$$\beta_0 = 10^{-4} - 0.07 (\text{観測})$$



ファーストコアは、ある程度回転で支えられている(ガス圧力も無視出来ない)

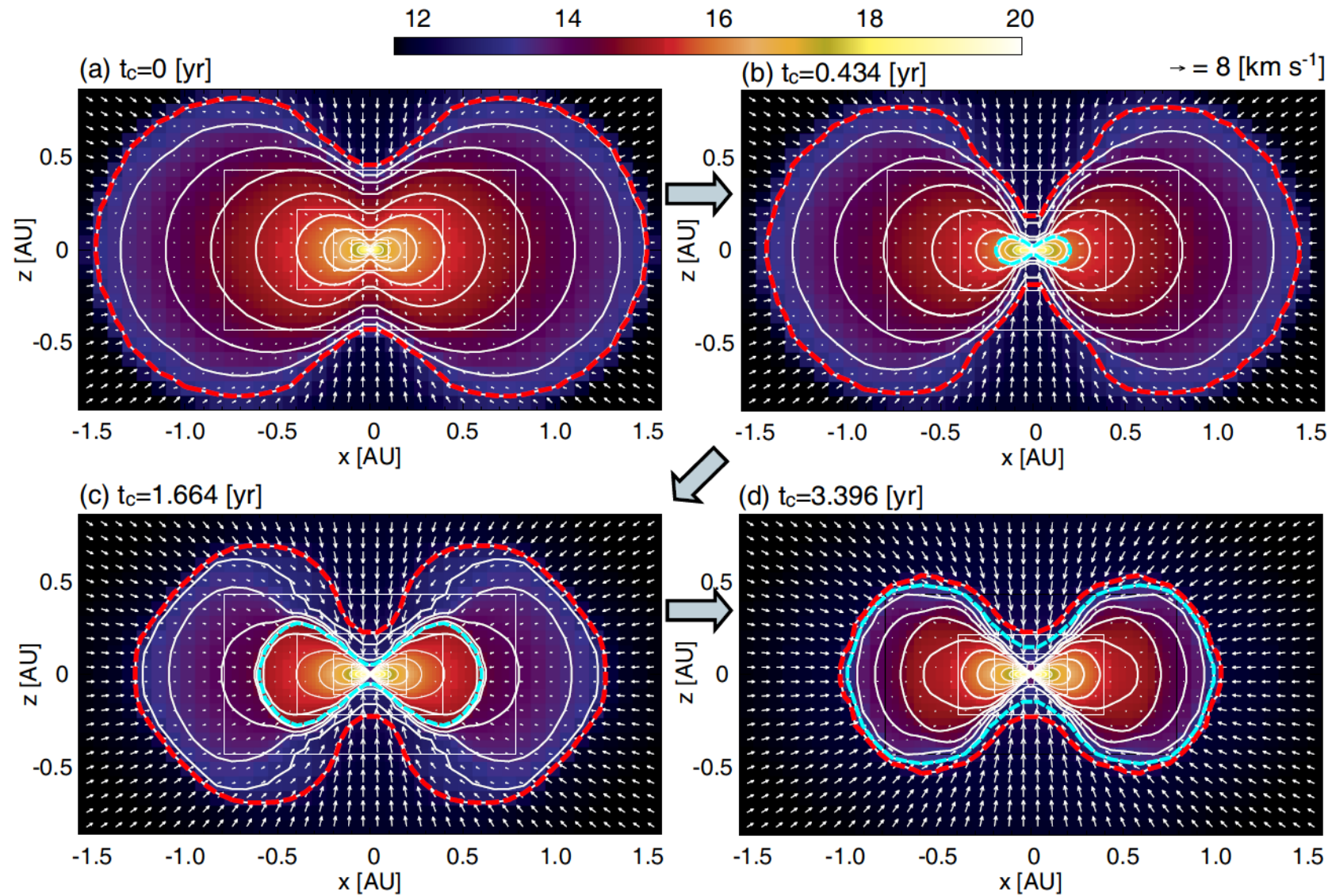
- $H_2$ 解離によるsecond collapse  $\Rightarrow$  落下ガスがスピナップ、原始星の周囲に Kepler 円盤(inner disk)



# 弱回転モデルの時間進化

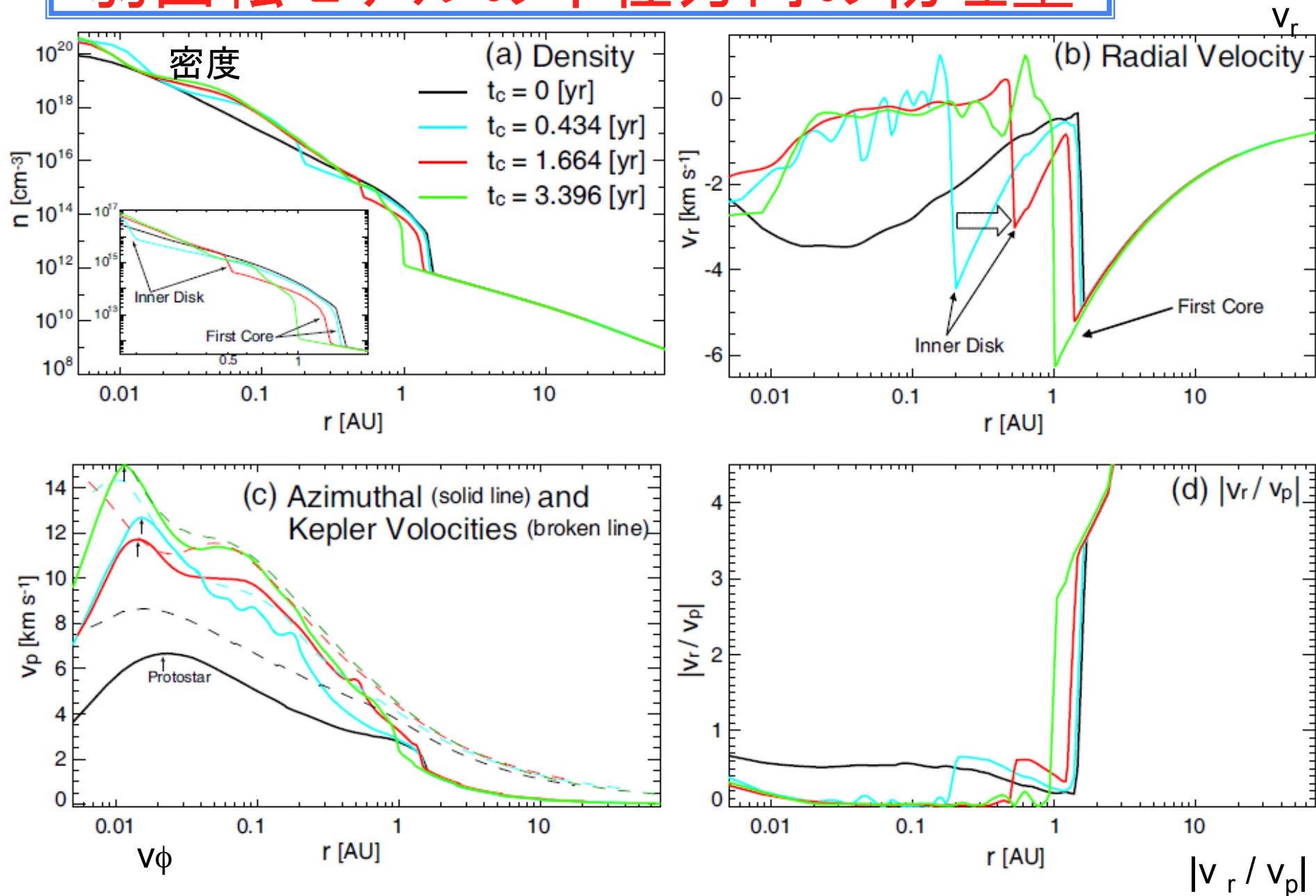
21/38

原始星形成後、約3年でinner diskとファーストコアが合体して、単一のKepler円盤を形成



# 弱回転モデルの半径方向の物理量

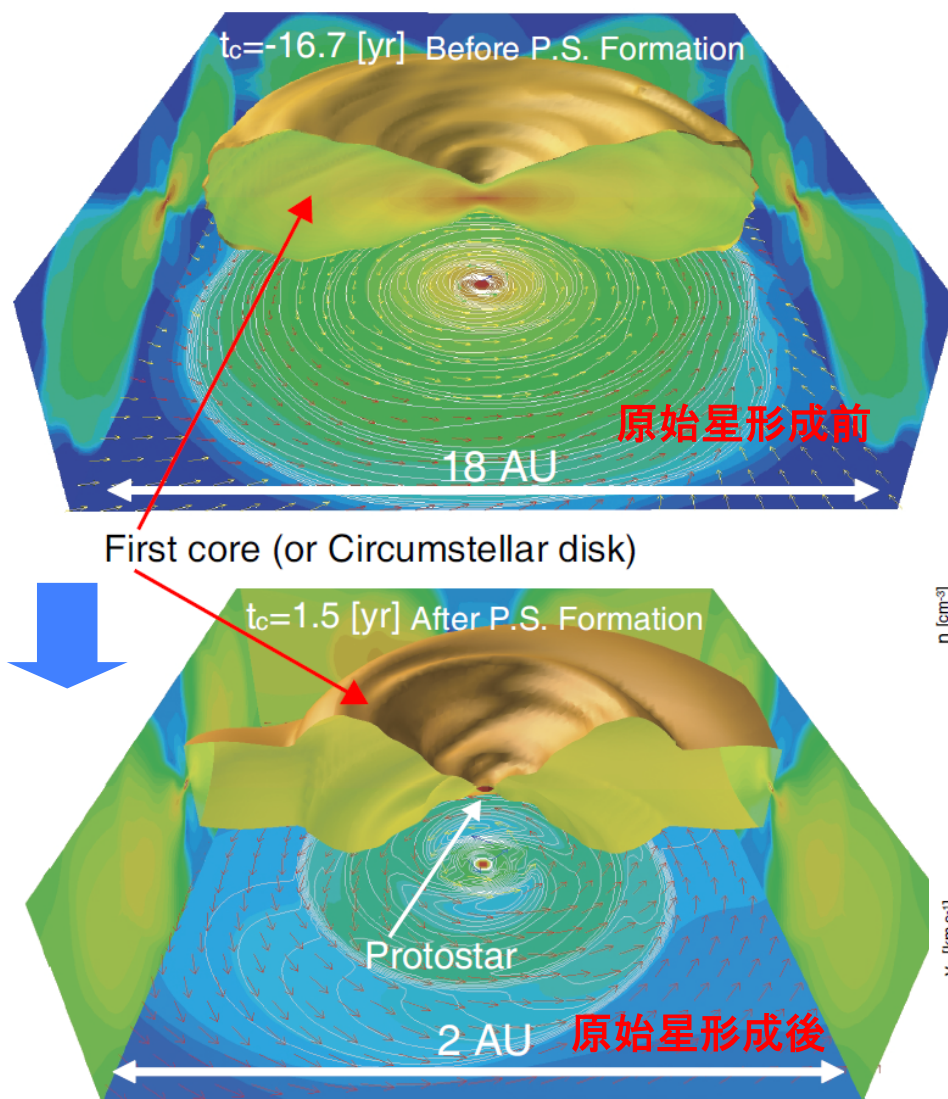
22/38



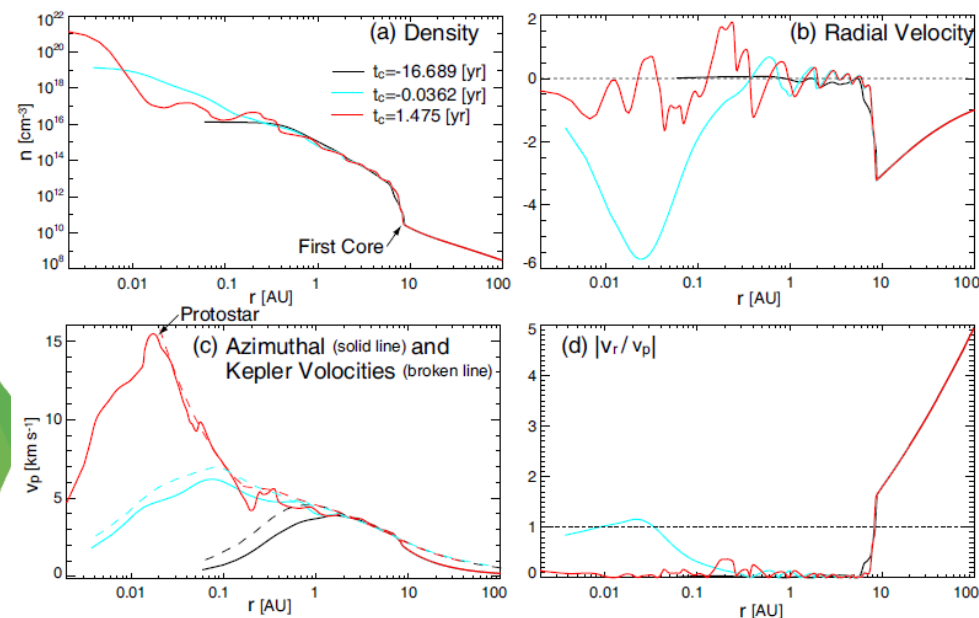
# 観測と同程度の回転を持つ分子雲コア

原始星形成前に既にKepler円盤(Kepler回転するファーストコア)

$$\beta_0 = 10^{-3}$$



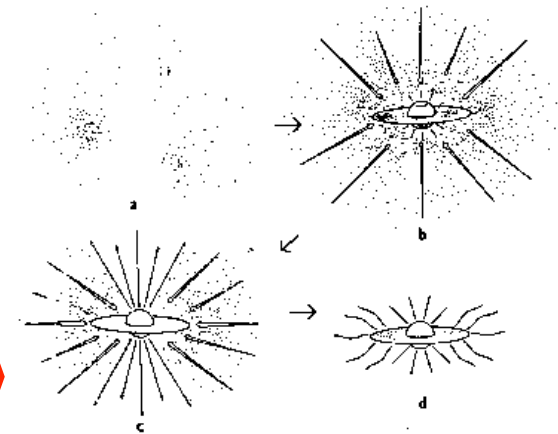
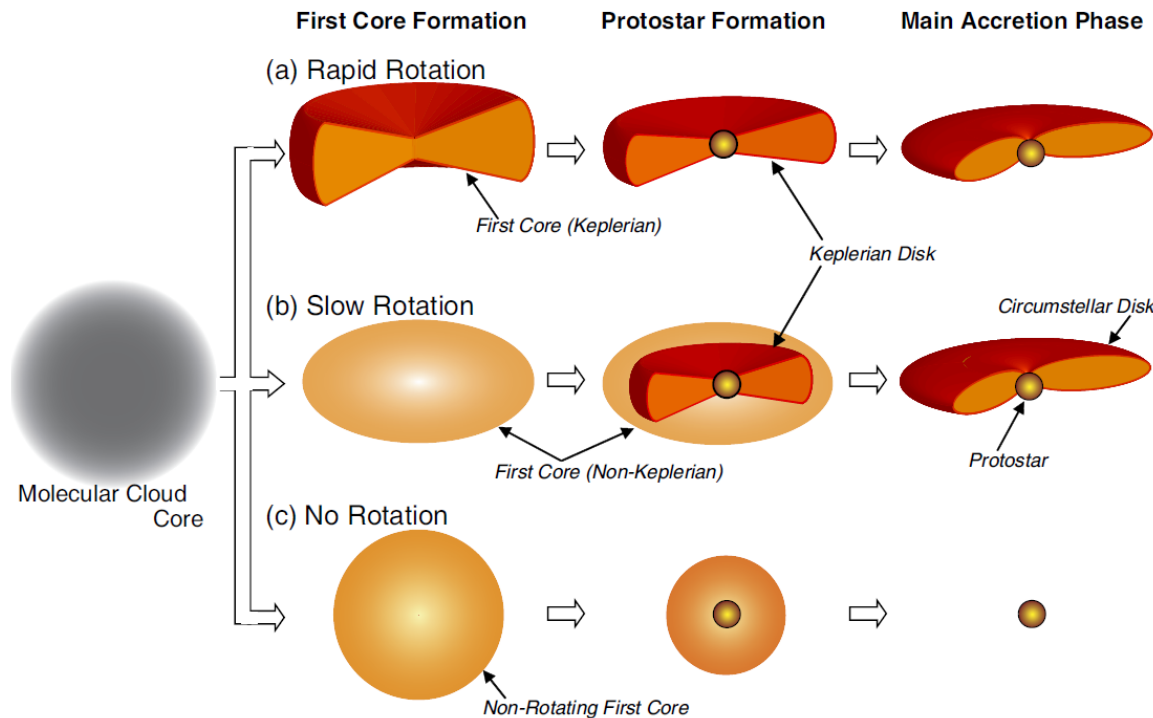
- 最も現実的なモデル
- 原始星は、Kepler円盤の中で誕生
- Keplerファーストコア中で密度が徐々に上昇  
⇒ 原始星の誕生
- 最初から単一の円盤



# 原始星直接計算のまとめ

24/38

- ファーストコアが直接星周円盤(Kepler円盤)になる
  - ✓従来は、原始星形成直後に星に落下して消滅すると考えられていた
  - ✓実際には、回転によって支えられて星周円盤へと進化
- 質量:  $\sim 0.01 M_{\text{sun}}$ , サイズ: 1-10 AU
  - ✓ 原始星よりもmassive, 突然 $\sim 10\text{AU}$ の円盤の出現
- 原始星は、円盤の中で誕生(古典的描像と大きく異なる)
- ファーストコアサイズを分解すれば、良い



Classical Picture

Shu, Adams & Lizano (1987)



## 2. 磁場なし、sinkあり

- 原始星は分解しない:  $\sim 10^5 \text{AU} - 0.1 \text{AU}$
- ファーストコア( $\sim 1-100 \text{AU}$ )を分解
- 長時間進化を調査: 原始星形成後  $\sim 10^5 \text{yr}$

# 結果：異なる $\beta_0$ と円盤

$$\beta_0 = 10^{-4} \text{ }^{26/38}$$

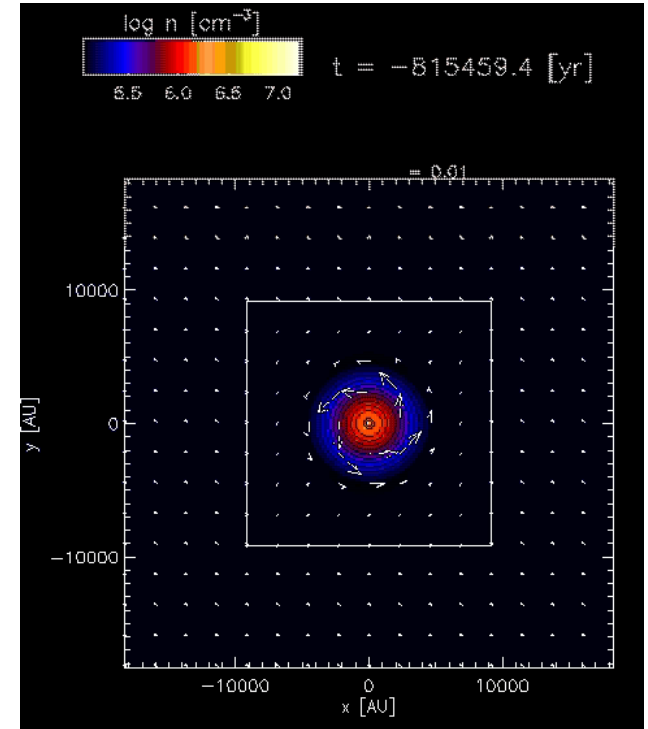
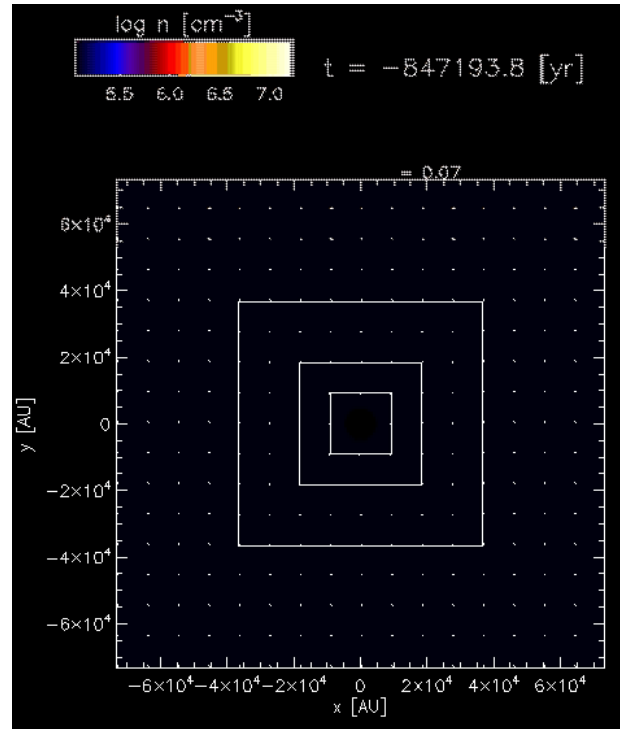
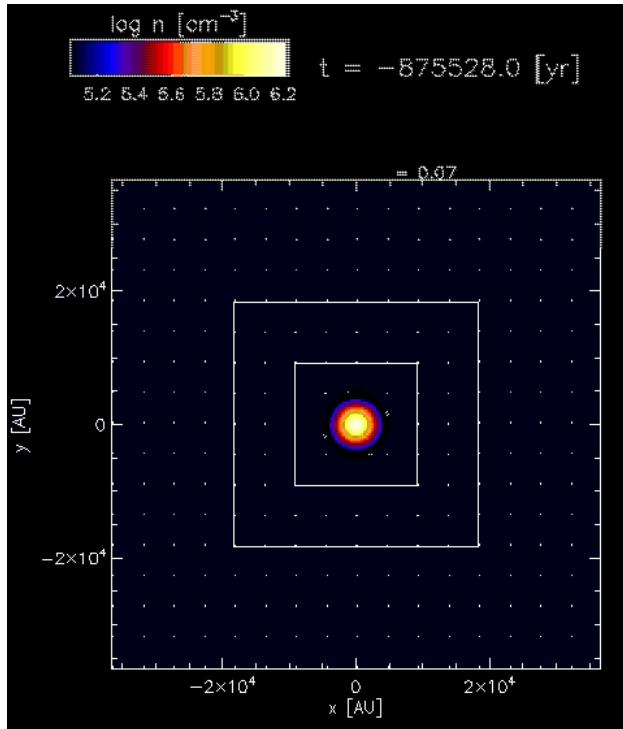
高速回転

$$\beta_0 = 10^{-2}$$

普通の回転

$$\beta_0 = 10^{-3}$$

低速回転

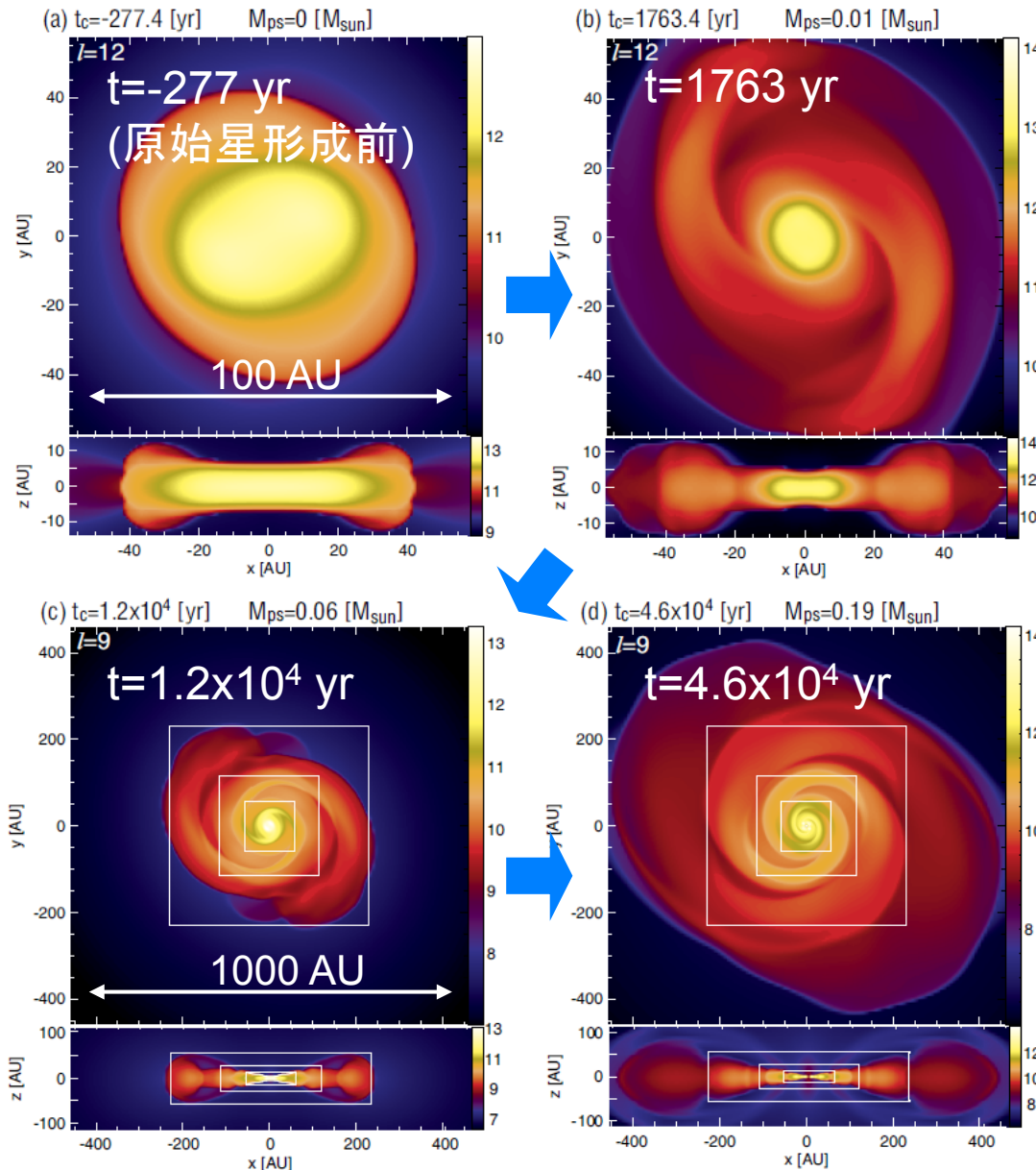


- Massive disk
- Gravitational unstable
- Gas planets ( $\sim 8M_J$ )
- $M_* = 0.03 M_{\text{sun}}$  (final)
- $M_{\text{disk}} = 0.13 M_{\text{sun}}$  (final)

- Massive disk?
- Marginal stable?
- Spiral Pattern
- $M_* = 0.18 M_{\text{sun}}$  (final)
- $M_{\text{disk}} = 0.05 M_{\text{sun}}$  (final)

- Less massive disk?
- Gravitational stable?
- Non-axisymmetric disk
- $M_* = 0.31 M_{\text{sun}}$  (final)
- $M_{\text{disk}} = 0.02 M_{\text{sun}}$  (final)

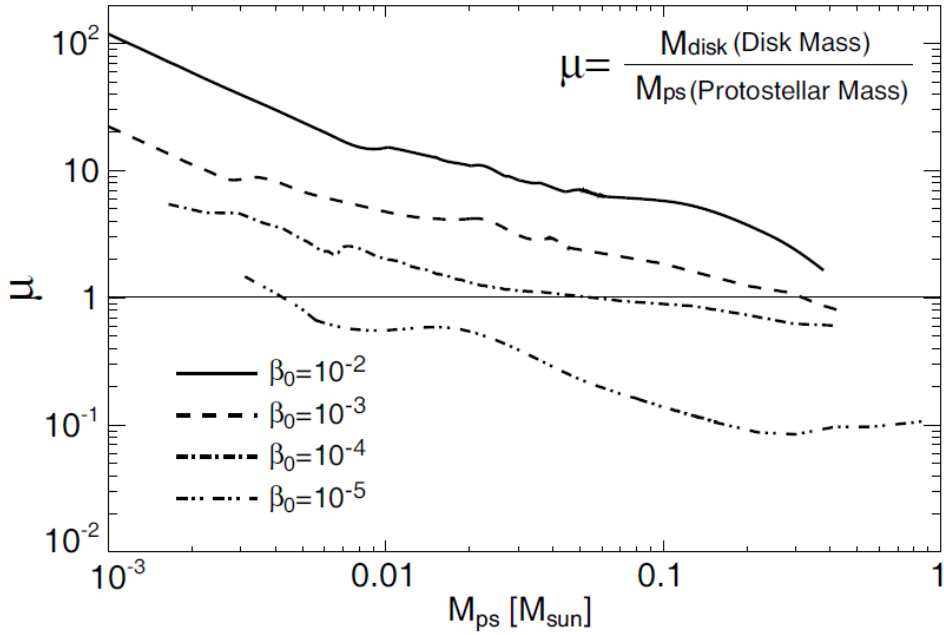
# 平均的な回転を持つ分子雲コア中での円盤進化 27/38



$$\beta_0 = 10^{-3}$$

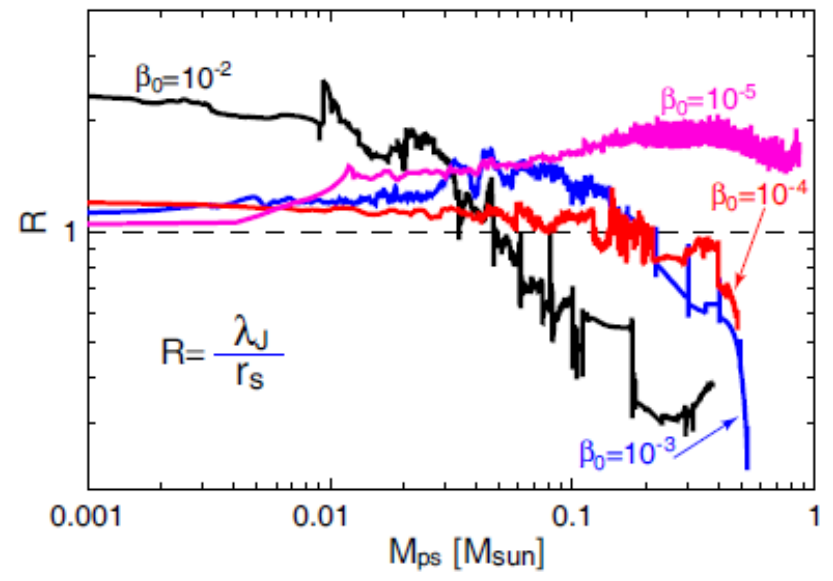
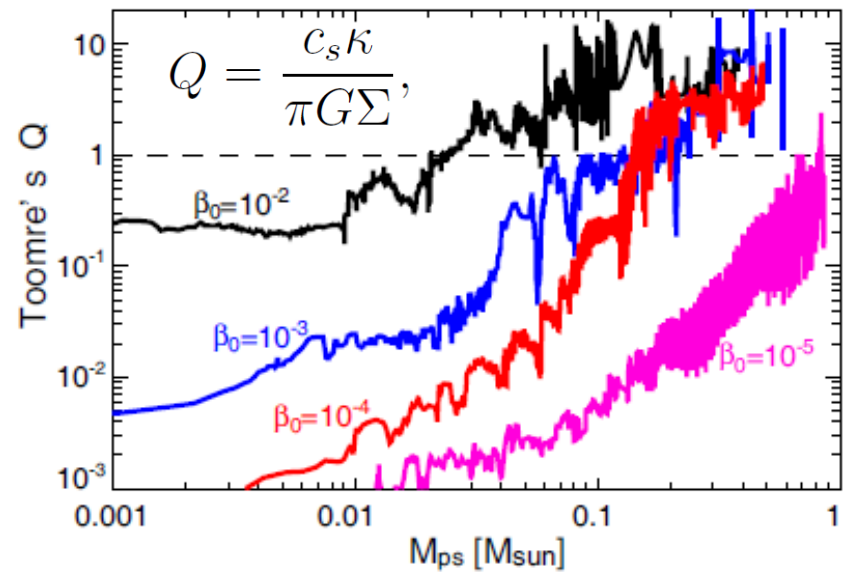
- 原始星形成前に円盤構造
- 時間と共に、薄い円盤に進化
- 分裂はしない
- グローバルなスパイラルパターンが効率的に角運動量を輸送するため

# 円盤質量と不安定性



- 主降着段階の終わりまで、  
円盤質量 > 原始星質量
- つまり、円盤は重力的に不安定
- しかし、分裂はしたり、しなかったり
- 早期段階では、Jeans長よりもサイズ  
が小さいため安定
- 後期段階では、グローバルなスパイラル  
が効率的に角運動量輸送すると分裂なし

$$\lambda_c = \frac{2c_s^2}{G\Sigma} [1 + (1 - Q)^{1/2}]^{-1}$$



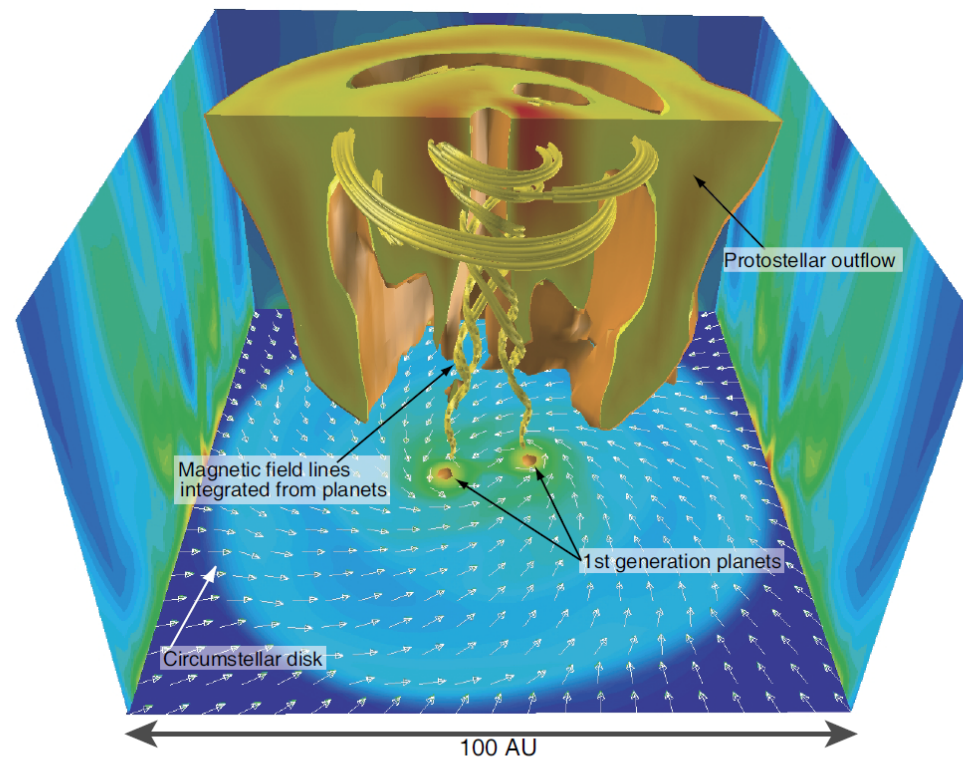


## Sinkあり、磁場なし計算まとめ

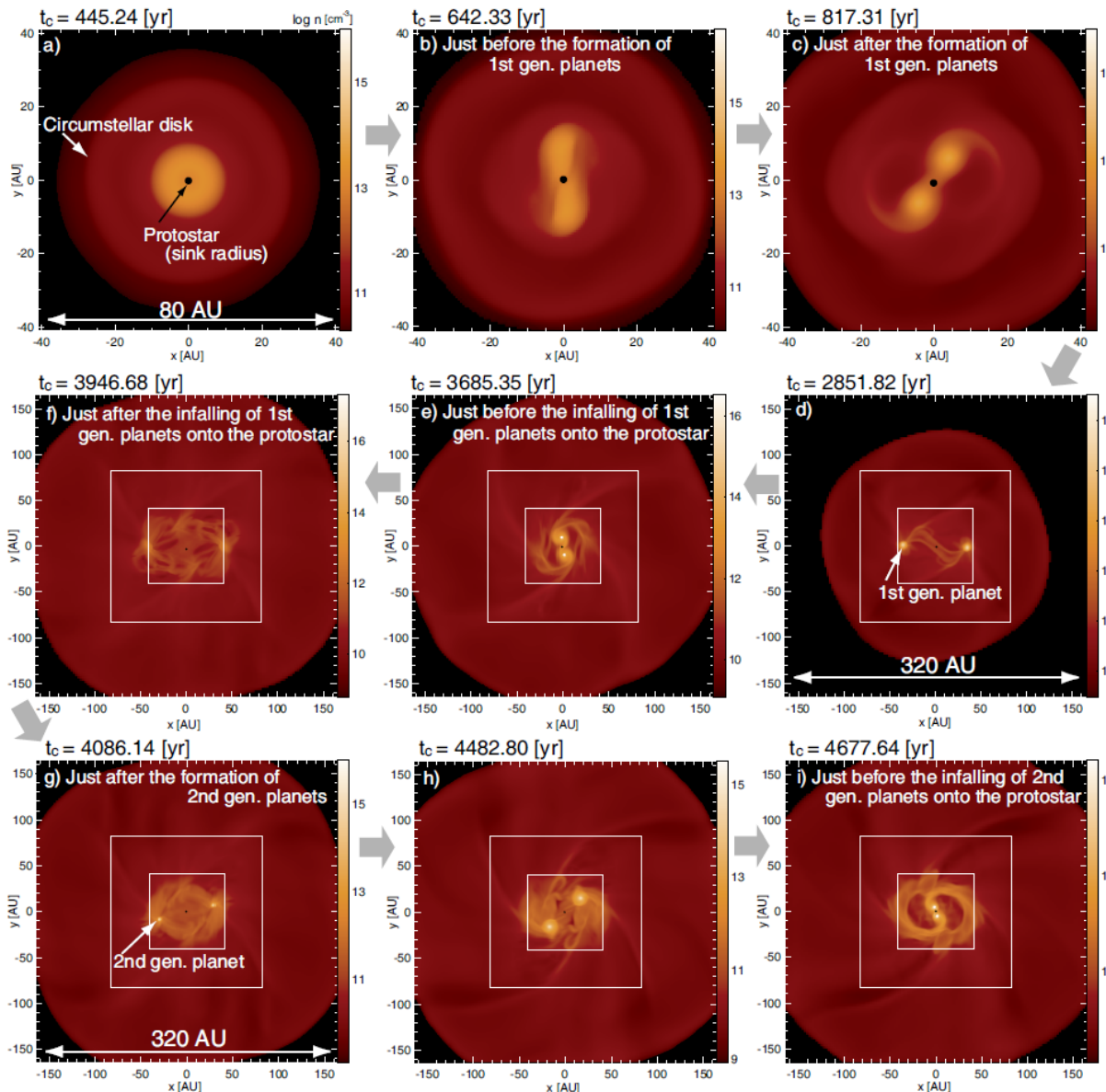
- 主降着期(原始星形成後  $\sim 10^4$ - $10^5$  yr)に、 $\sim 1$  AUから $\sim 100$ - $300$  AUまで円盤が成長
- 円盤質量が原始星質量を卓越
- 分裂条件
  - グローバルなスパイラル構造が発展するまでに分裂するか
  - グローバルなスパイラルが出来ると効率的に角運動量輸送して分裂を抑える
- しかし、円盤はmassive ( $\gg 0.1 M_{\text{sun}}$ )
  - この後の段階で分裂するだろう(coolingの重要性)

### 3. 磁場あり、sinkあり

- 原始星は分解しない:  $\sim 10^5 \text{AU} - 0.1 \text{AU}$
- ファーストコア( $\sim 1-100 \text{AU}$ )を分解
- 長時間進化を調査: 原始星形成後  $\sim 10^4 \text{yr}$
- 磁場の効果を考慮(Ohmic dissipation)
- 最も現実的なモデル



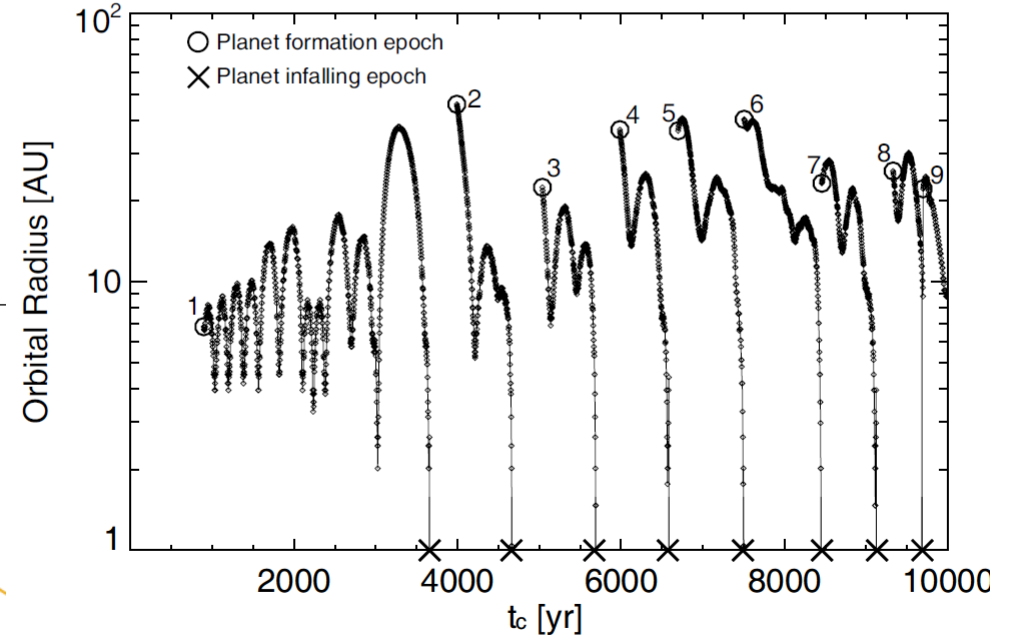
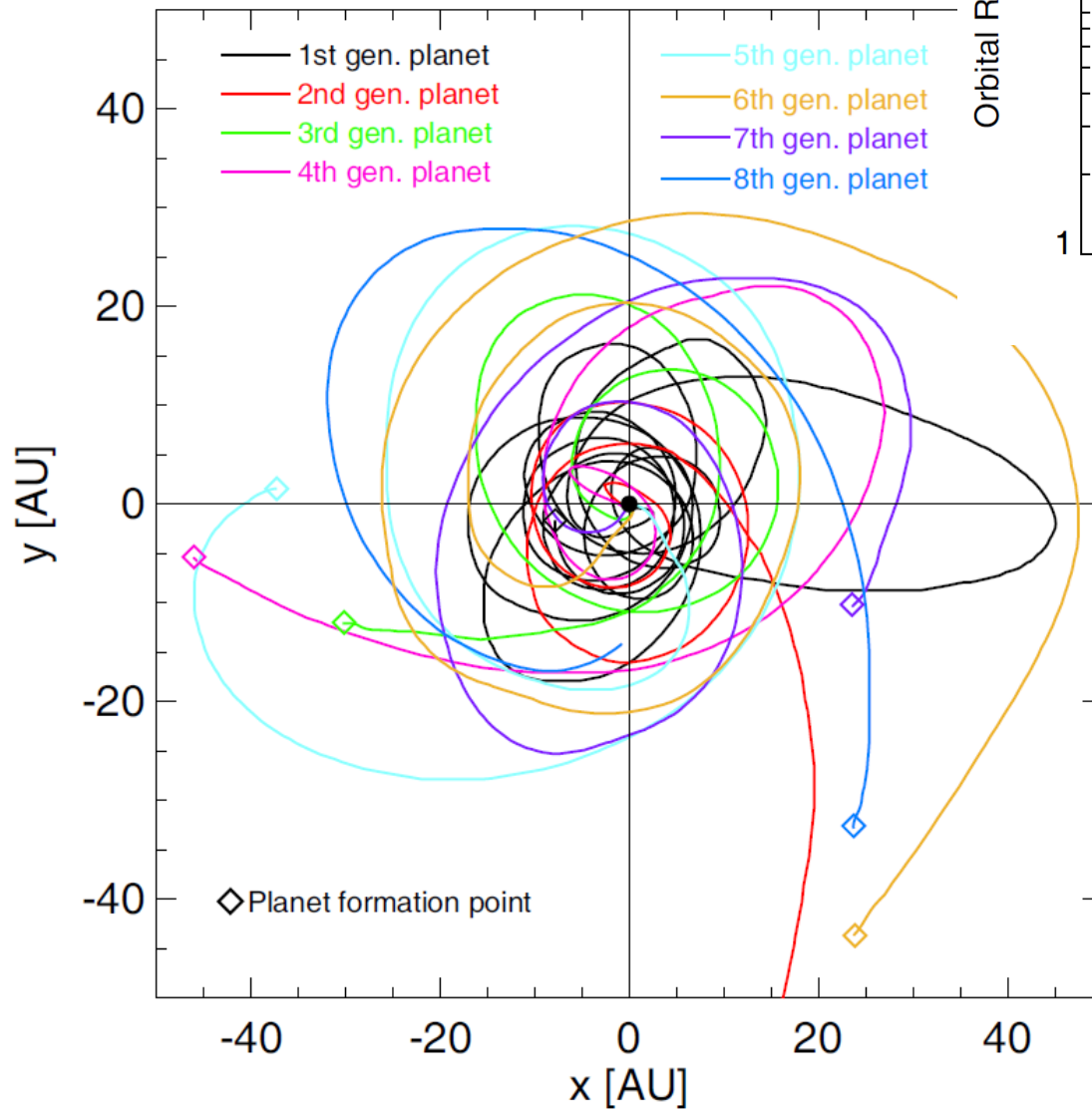
# 円盤中でのガス惑星形成と落下



- グローバルスパイラルは現れない
- Magnetically inactive zone (項面密度領域)で面密度が増加
- 分裂⇒惑星形成
- 惑星の摂動により角運動量輸送、中心星へのガス流入
- 惑星と円盤との重力相互作用により中心星へ落下
- 高密度領域で角運動量輸送メカニズムが無くなる
- 面密度が再び増加
- 第二世代の惑星形成へ

# 再帰的惑星形成

分裂 ⇒ 惑星形成 ⇒ 落下 ⇒ 円盤質量増加  
⇒ 分裂 ⇒ 惑星形成 ⇒ 落下…



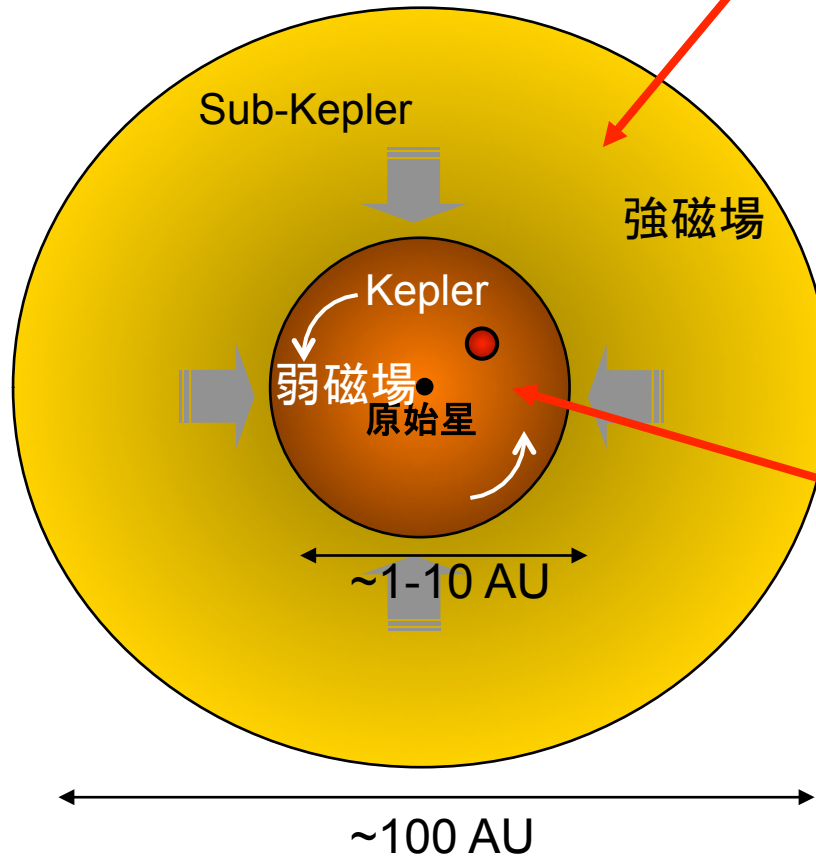
- 9世代にわたる惑星形成
- 最後の世代は生き残った
- 円盤質量は自己調整される



# 再帰的惑星形成(分裂)のメカニズム

33/38

円盤を上から見た図



**Magnetically Active zone**

- 低面密度領域 ⇒ 磁場と中性ガスがカップル
- 円盤は、磁気テンション+遠心力(圧力)サポート
- 磁気制動による角運動量輸送 ⇒ 分裂なし
- 効率的に内側にガスが流れる
- グローバルスパイラルの成長を妨げ

**Magnetically Inactive zone**

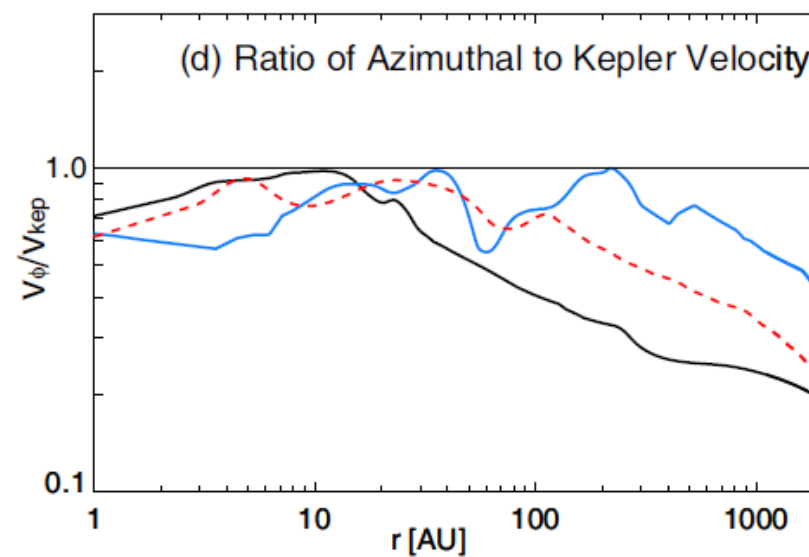
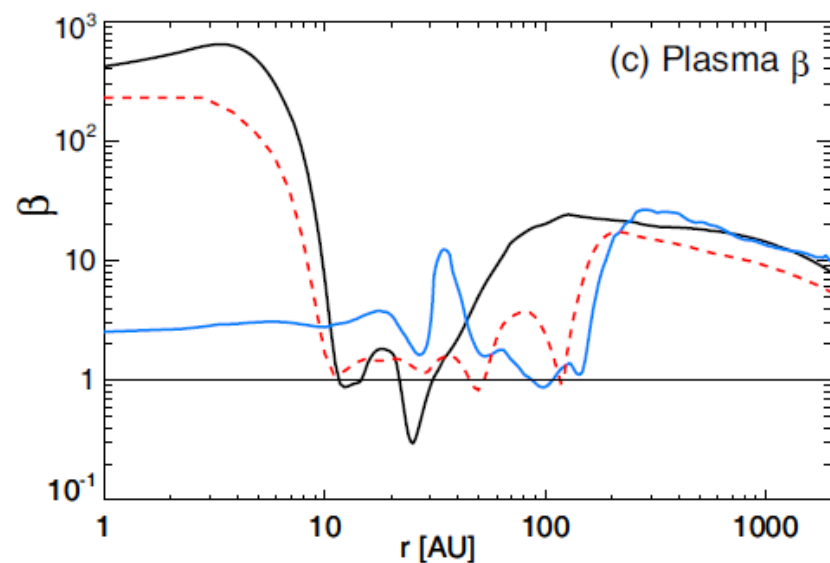
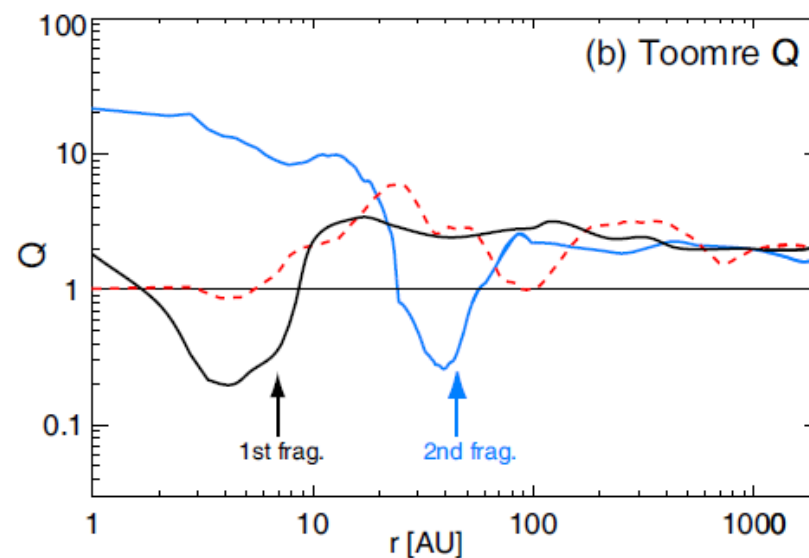
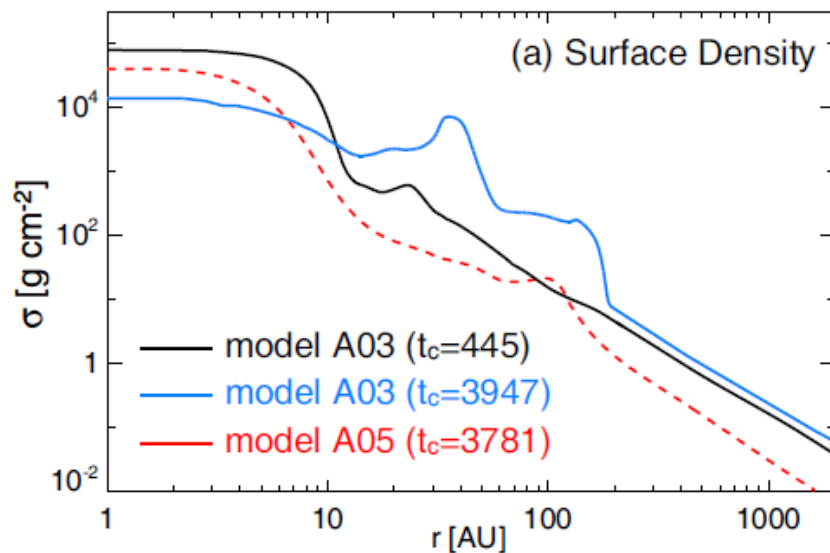
- 高面密度領域 ⇒ 磁場と中性ガスがデカップル
- 外側からのガス流入により、さらに面密度の上昇
- 磁気制動による角運動量輸送なし
- 円盤は、遠心力サポート(Kepler円盤)
- グローバルスパイラルの成長は妨げられる  
← 外側のactive zoneでスパイラルが発展しないため
- 角運動量が輸送出来ない ⇒ さらなる面密度の増加
- 分裂

$$Q = \frac{c_s k}{\pi G \Sigma},$$

# 円盤中での磁場強度の違いが分裂を促進 34/38

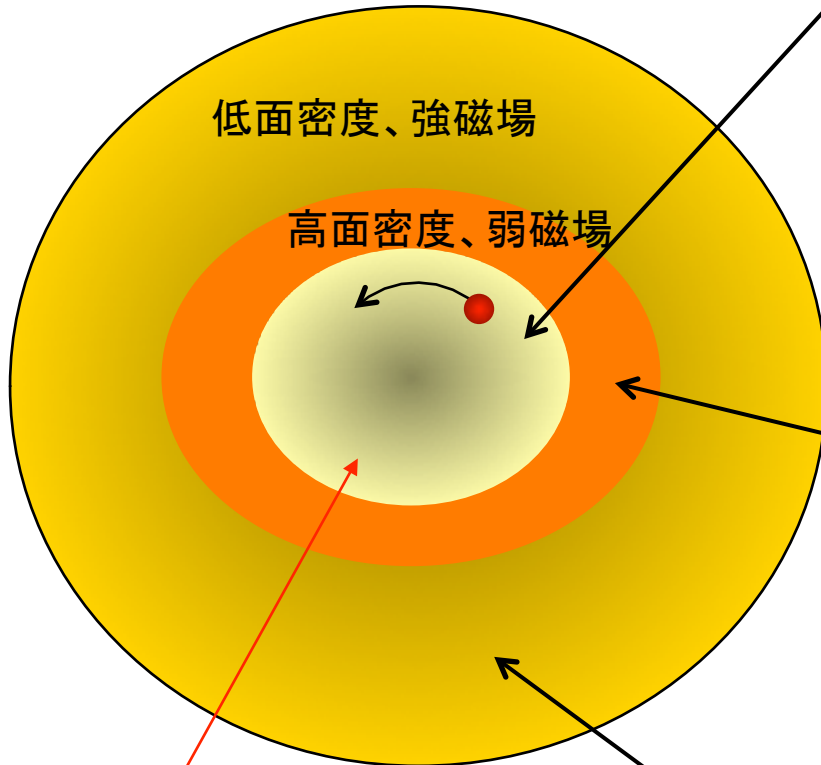
プラズマ $\beta$ =ガス圧/磁気圧

↑ Magnetically active or inactive zone



# 第一世代惑星形成後

円盤を上から見た図



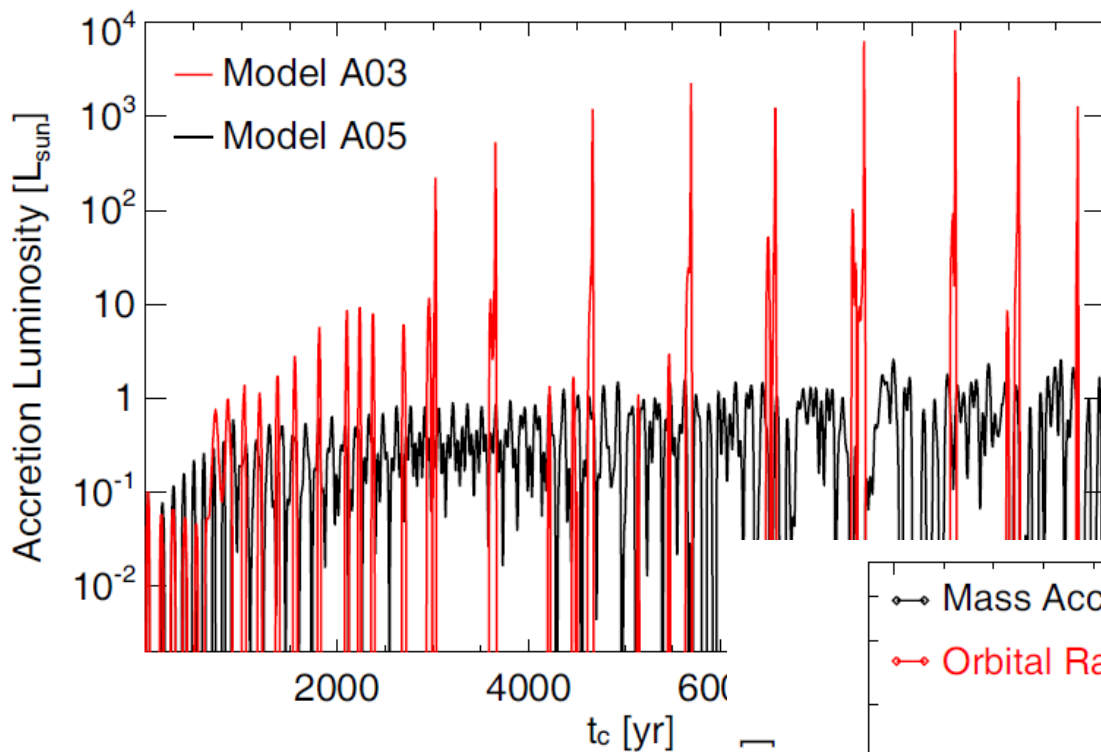
- 惑星が円盤の内側をかき乱す
- 角運動量輸送、重力散乱
- 低面密度に  $\Rightarrow$  磁場と中性ガスがカップリング
- 磁気制動による角運動量輸送  
 $\Rightarrow$  惑星落下後の分裂を抑制

- 惑星が円盤の外側からのガス降着を妨げる
- 面密度の増加  $\Rightarrow$  磁場の散逸
- 角運動量輸送機構がなくなる
- 分裂 (第二世代以降の惑星形成)

比較的低面密度、  
ある程度強い磁場

- 低面密度領域、磁気制動による角運動量輸送
- ガスを内側に輸送  $\Rightarrow$  分裂なし

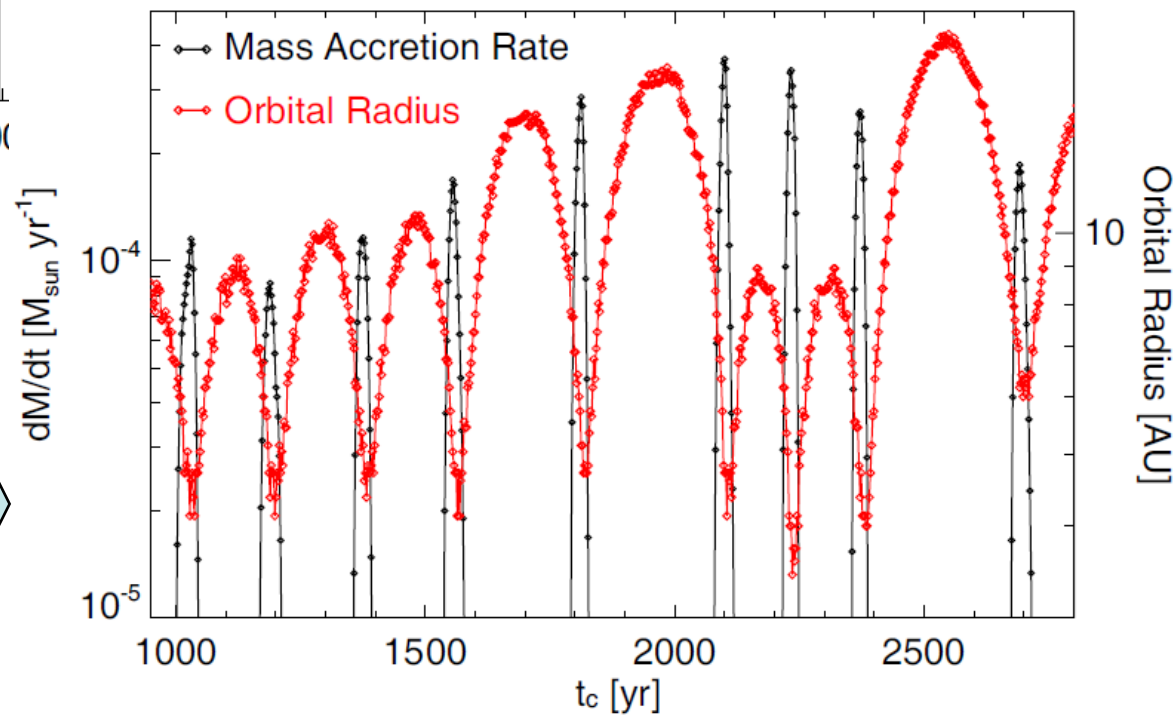
# 原始星のaccretion luminosityで惑星軌道を同定？



← accretion luminosity

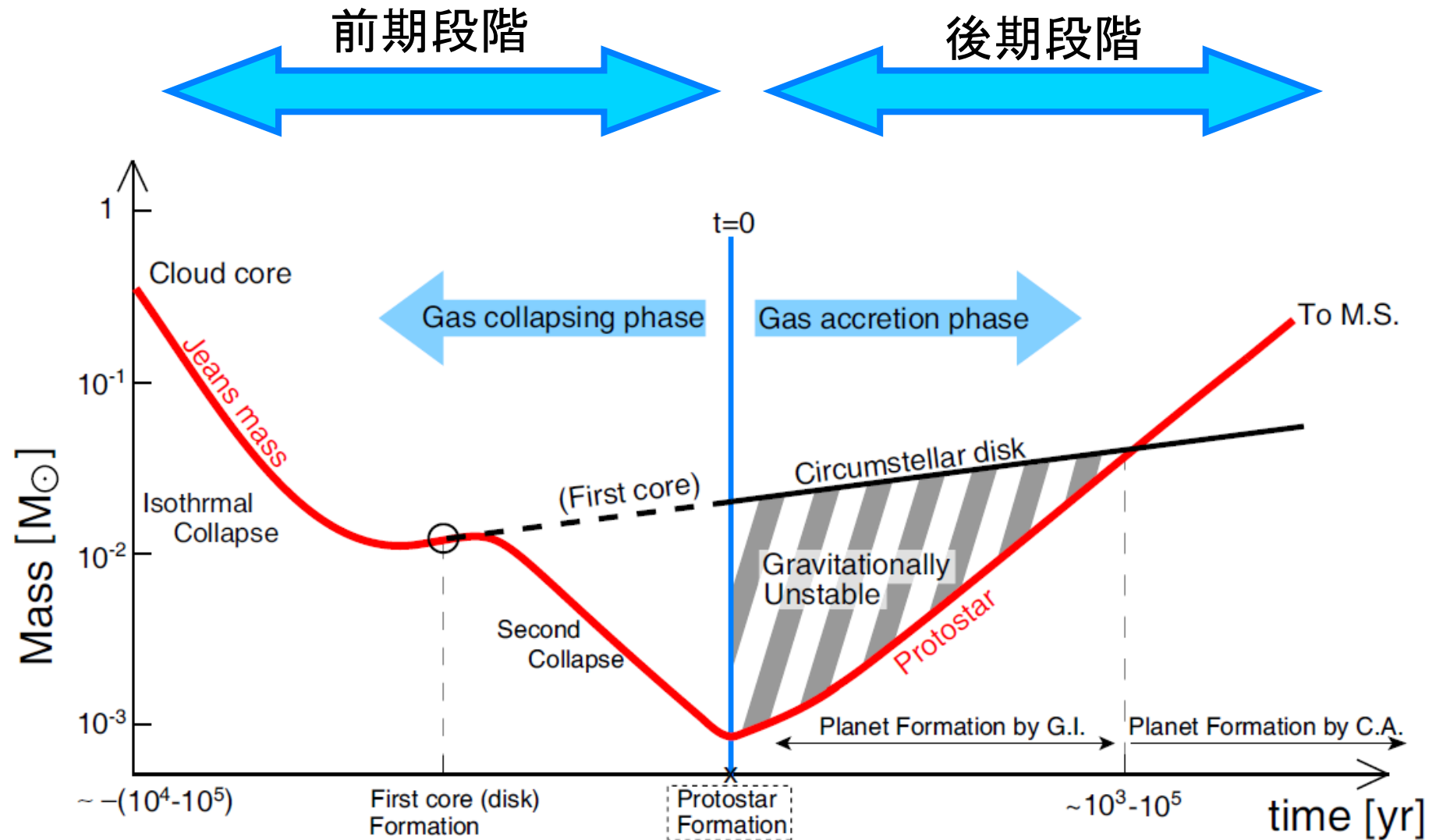
$$L_{\text{sun}} = G \frac{M_{\text{ps}} \dot{M}_{\text{ps}}}{r_{\text{ps}}},$$

質量降着率と惑星の軌道 →





# 本質的に円盤は重力不安定になる



犬塚、町田、松本(2010)

原始星の誕生

- 星形成後期段階の円盤形成とその進化を調べた
- 円盤は、(原始)星形成前から存在する
- 原始星は、(Kepler回転する)1-10 AUスケールの円盤中で誕生
- 星は誕生した瞬間には円盤を保持している
- 原始星形成後、 $\sim 10^4$ - $10^5$  yrで星周円盤は、 $\sim 100$  AUまで達する
- 主降着段階では、原始星質量よりも星周円盤の方が重い
- 磁場の効果でグローバルなスパイラルパターンが抑制される
- Magnetically inactive regionにガスが蓄積して分裂が起こる
- 再帰的惑星形成により円盤質量は自己調整される
- 主降着段階のaccretion luminosityから惑星の存在と軌道を同定可能