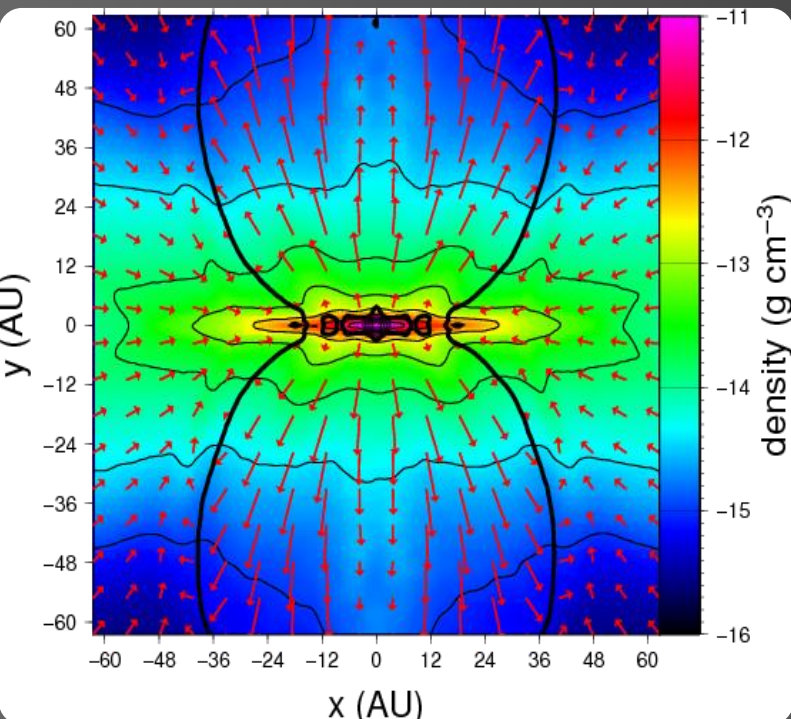


原始星形成時の 星周円盤の構造について

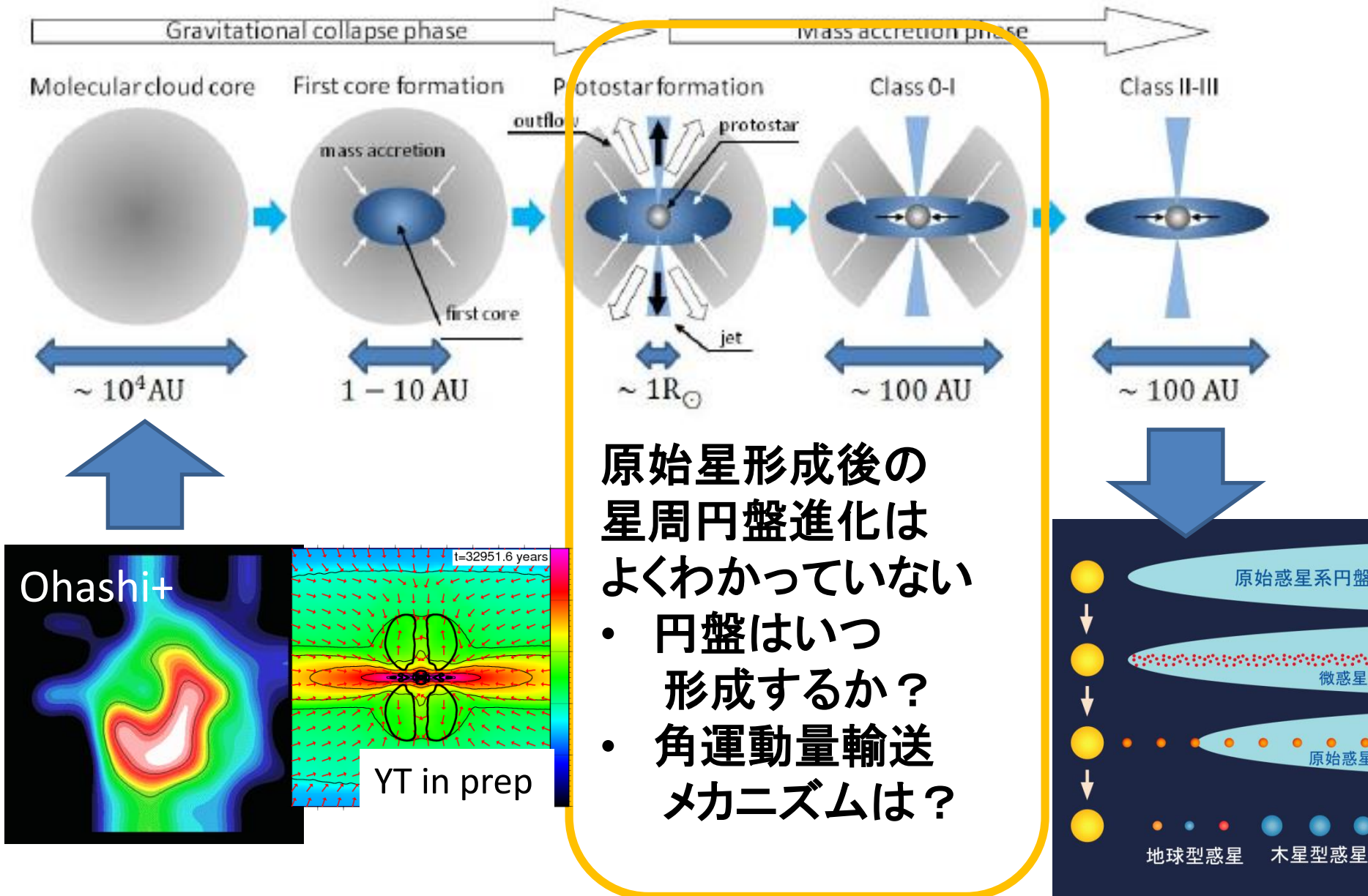


塚本裕介

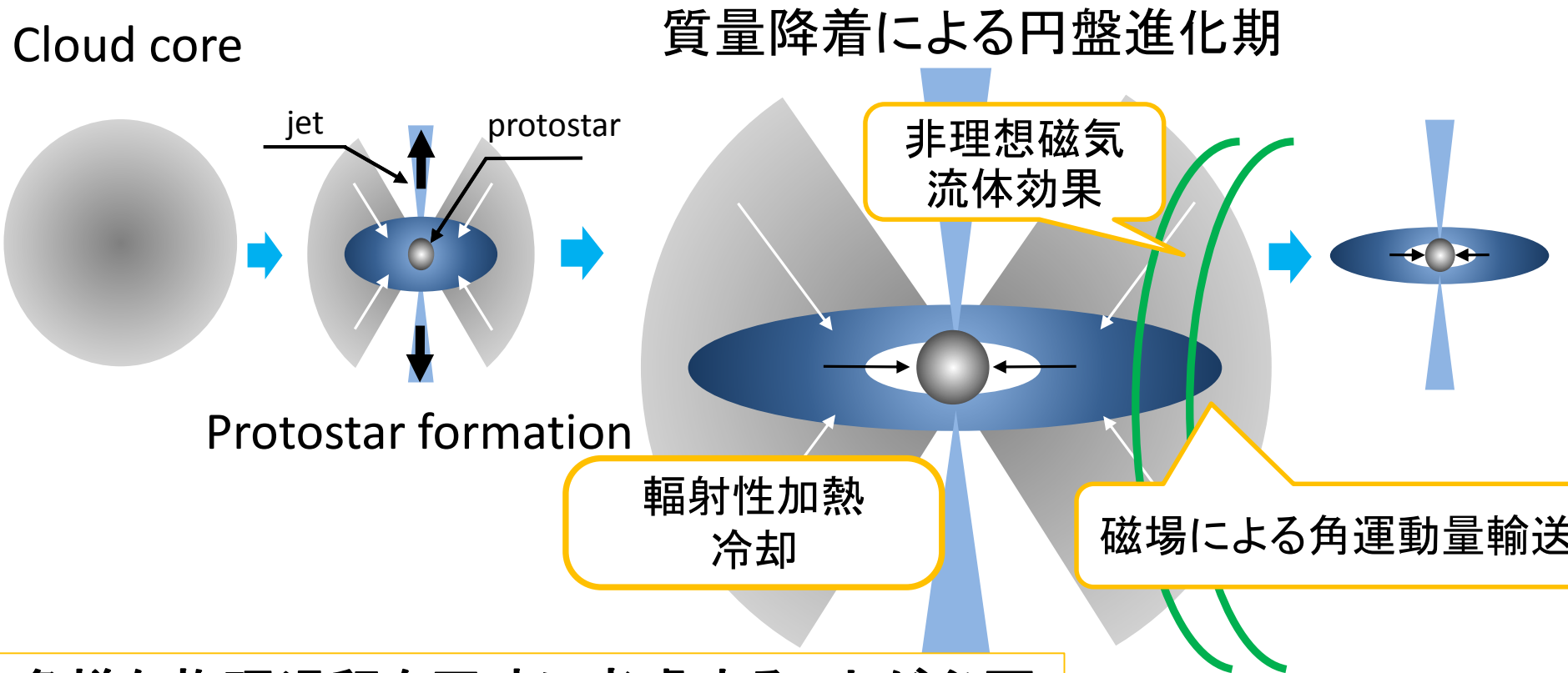
名古屋大学

岩崎一成、町田正博
奥住聡、犬塚修一郎

低質量原始星と円盤の形成進化過程



円盤形成進化において重要な物理過程



多様な物理過程を同時に考慮することが必要

- 低電離プラズマ→非理想MHD効果(オーム散逸、ホール効果、両極性散逸)が重要な役割を果たす
- 輻射輸送が原始星周囲の温度環境を決め、非理想効果の強さに影響を与える

基礎方程式

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \partial^\mu v^\mu$$

Equation of continuity



MHD

$$\rho \frac{Dv^\mu}{Dt} = \partial^\nu T^{\mu\nu} + \frac{\chi_F \rho}{c} F^\mu$$

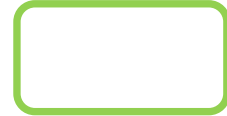
Equation of motion



RHD

$$\rho \frac{De}{Dt} = \partial^\nu T^{\mu\nu} v_\mu - 4\pi\kappa_p \rho B + c\kappa_E \rho^2 \xi$$

Energy equation of matter



Non-ideal

$$-\nabla \cdot [\{\eta_O(\nabla \times B) + \eta_H(\nabla \times B) \times \hat{B} - \eta_A(\nabla \times B) \times \hat{B} \times \hat{B}\} \times B]$$

$$\rho \frac{D\xi}{Dt} = \partial^\nu F^\nu - \partial^\mu v^\nu \mathbf{P}_{\text{rad}}^{\mu\nu} + 4\pi\kappa_p \rho B - c\kappa_E \rho^2 \xi$$

Equation of radiation energy

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{B^\mu}{\rho} \right) = \frac{B^\nu}{\rho} \partial^\nu v^\mu$$

Induction equation

$$-\frac{1}{\rho} \nabla \times \{\eta_O(\nabla \times B) + \eta_H(\nabla \times B) \times \hat{B} - \eta_A(\nabla \times B) \times \hat{B} \times \hat{B}\}$$

$$T^{\mu\nu} = -\left(p + \frac{B^2}{2}\right) \delta^{\mu\nu} + B^\mu B^\nu \quad e = \frac{1}{2} v^2 + u + \frac{B^2}{2\rho}$$

非理想磁気流体効果

◎ オーム散逸:

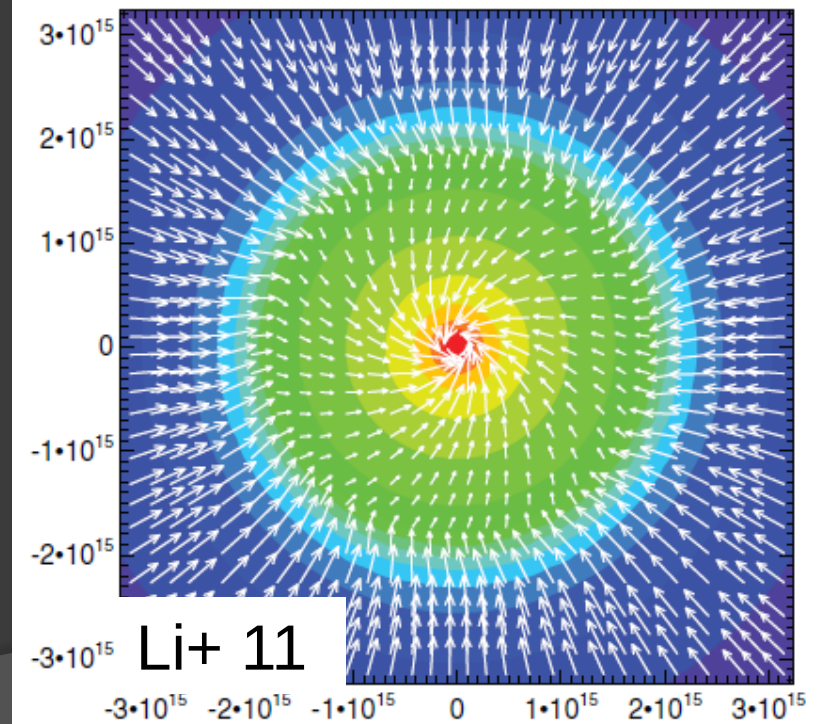
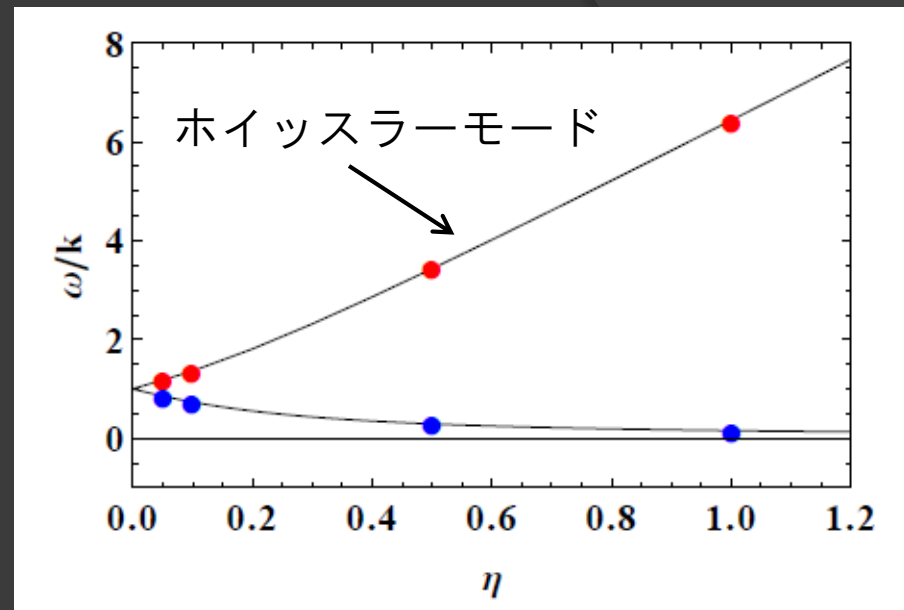
- 高密度領域で働く
- 磁場に比例しない

◎ ホール効果:

- 理想項とカップルしてAlfven速度を変える
- 磁場と回転方向が
平行の場合: 回転を抑制
- 磁場と回転方向が
反平行の場合: 回転を促進

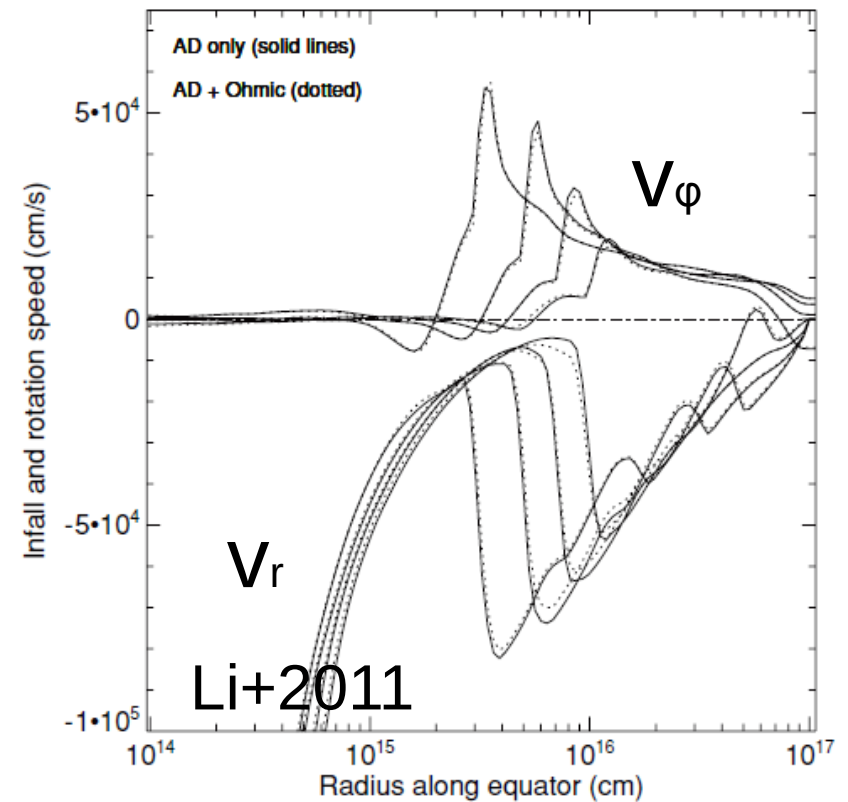
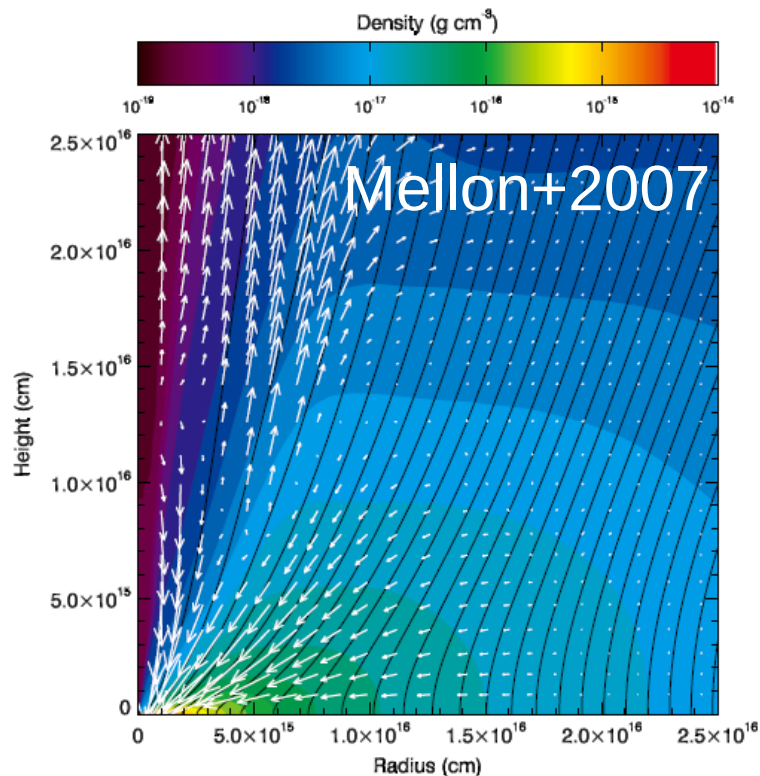
◎ 両極性散逸:

- 中密度領域で働く。
- 磁場の2乗に比例



クラス0フェーズでは円盤は形成しない？

- 観測されているような磁場強度では円盤形成が完全に抑制される (Mellon+ 07).
- 「Magnetic Braking Catastrophe (MBC)」
- 磁気散逸過程によっても解決しない



Magnetic braking catastrophに対する解決案

- ◎ 磁場と回転軸が傾いていると円盤が形成する

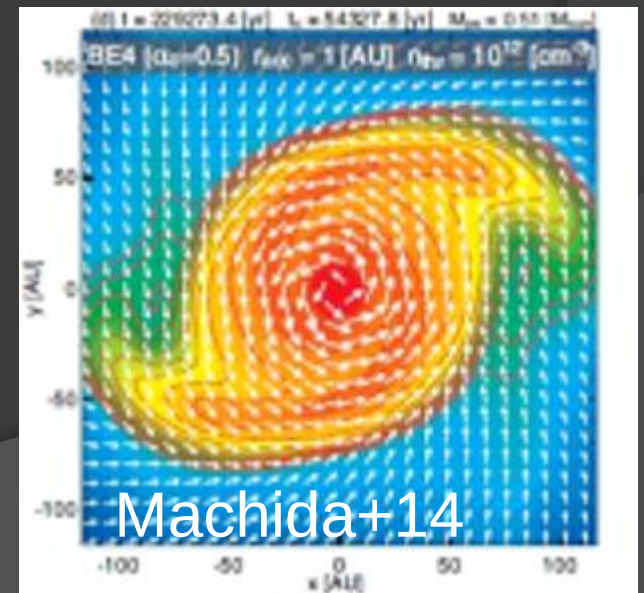
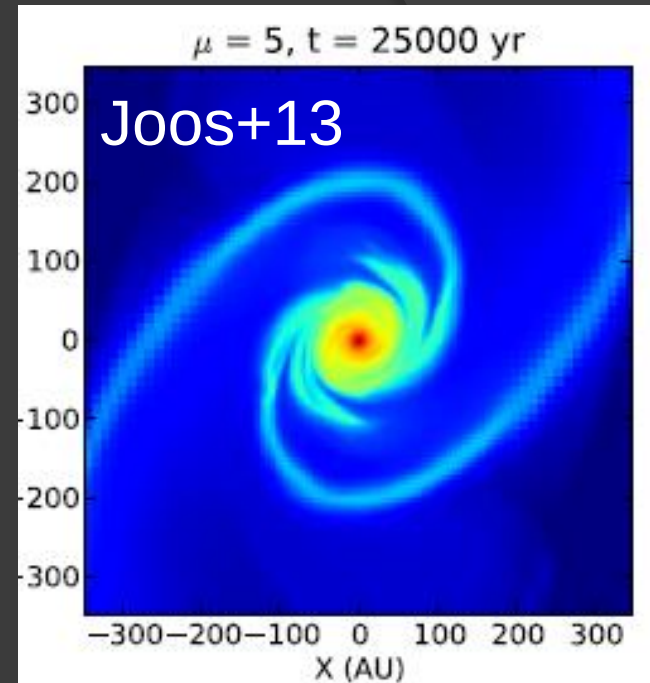
(Joos+13 3D、Ideal, simplified radiation)

- ◎ 初期分子雲コアの構造やシンクの取り扱いが重要

(Machida+14 : 3D, w Ohm, simplified radiation)

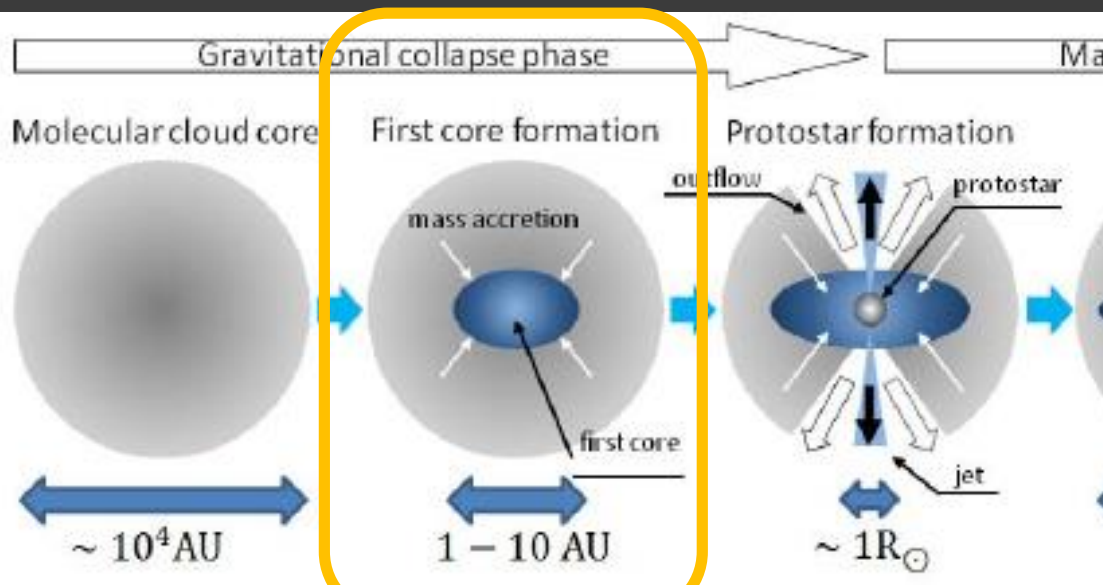
- ◎ ファーストコア段階の磁気散逸を適切に取り扱う必要あり

(Dapp+11, 1D **Ohm+Ambi+Chem network**, simplified radiation)

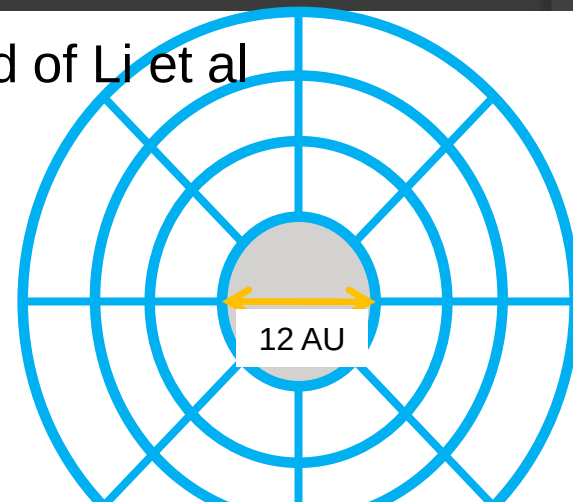


先行研究の問題点(1)(Mellon+07, Li+11,13)

- 内縁境界の半径 (シンク) が大きい(~ 6 AU)
 - 数シンク半径内 (~ 20 AU) の構造は正しく計算できない
- ファーストコア段階の密度進化を無視
 - 磁気散逸過程はファーストコア内で強く働く.



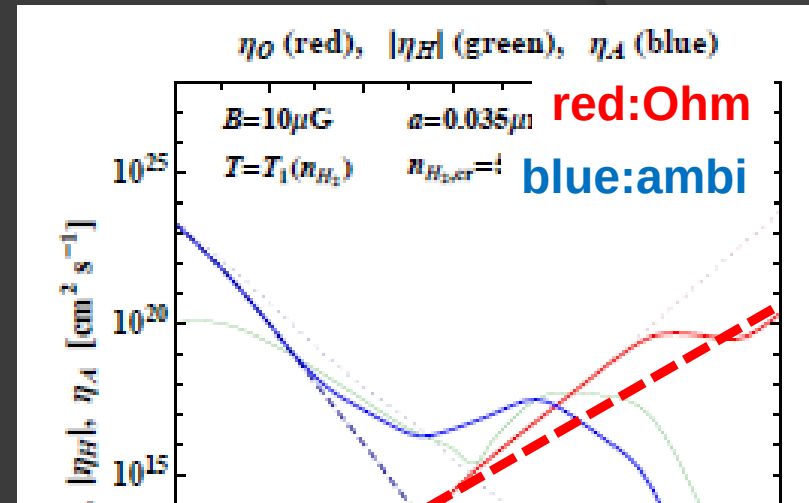
Grid of Li et al



Large sink is set from the beginning of the simulation

先行研究の問題点(2)(Machida+14,Joos+13)

- ◎ 磁気散逸の効果を簡単化
 - Joos+13は理想MHD
 - Machida+はオーム散逸のみ
- ◎ ホール効果の影響は
ほぼ調べられていない



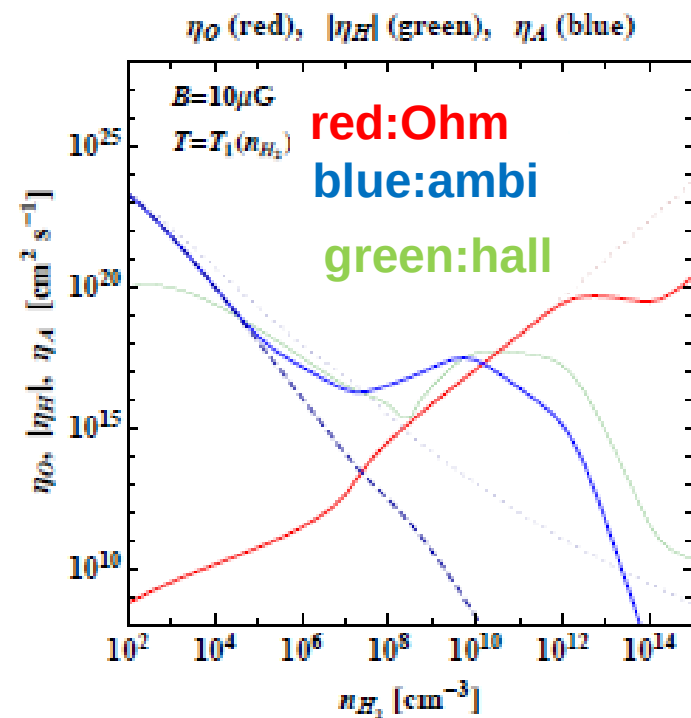
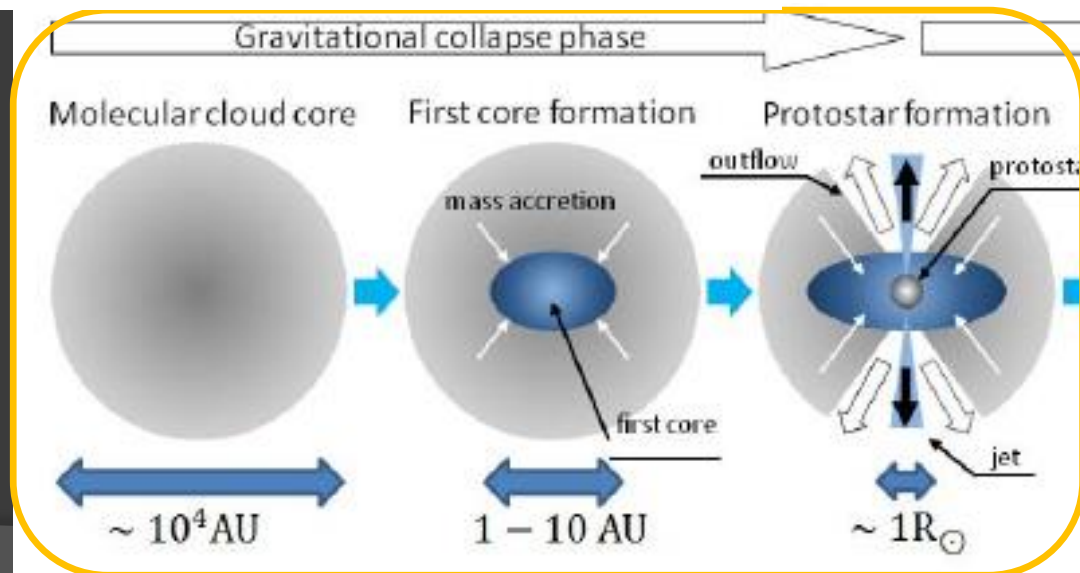
先行研究の問題点を解決するには
非理想効果と輻射輸送を考慮した
三次元シミュレーションが必要

- 磁気散逸係数を過小評価

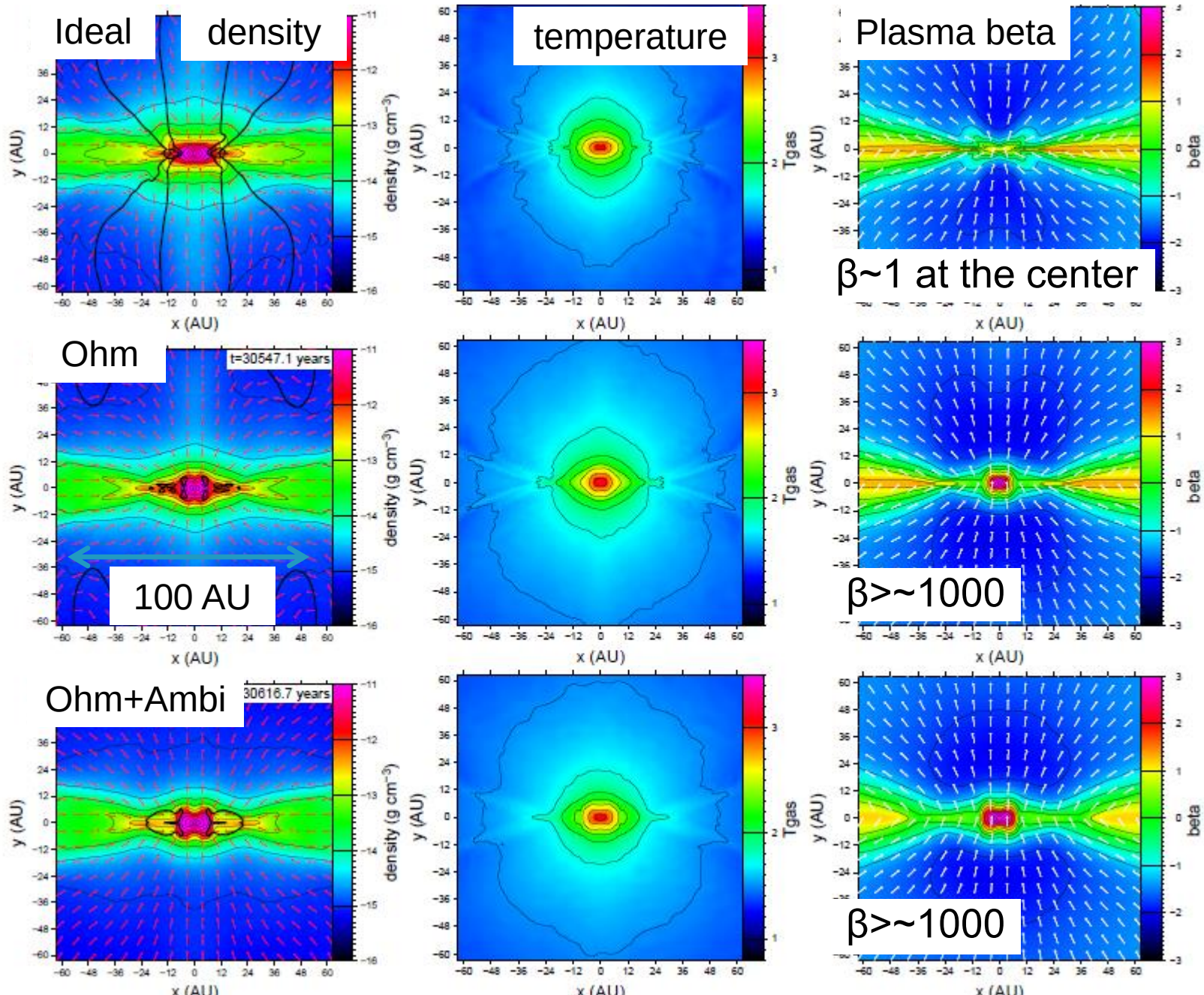
モデル

- 計算スキーム: Smoothed Particle Magneto-Hydrodynamics (Iwasaki+11)+FLD(Bate+ 06) +non-ideal scheme (YT+13, in prep)
- EOS : X=0.8,Y=0.28,Ortho-Para ratio : 3:1 (Tomida+ 13)
- Opacityモデル : Semenov(03) + Ferguson (05)
- 磁気散逸モデル :
気相の化学反応+帯電ダスト ($a=0.035\mu\text{m}$)
宇宙線による電離率: $\xi_{\text{cr}} = 10^{-17} \text{ s}^{-1}$
- 初期条件: 一様密度球
- models: モデル1 Ideal, モデル2: Ohm、モデル3: Ohm+Ambi
モデル4: Ohm+Ambi+Hall

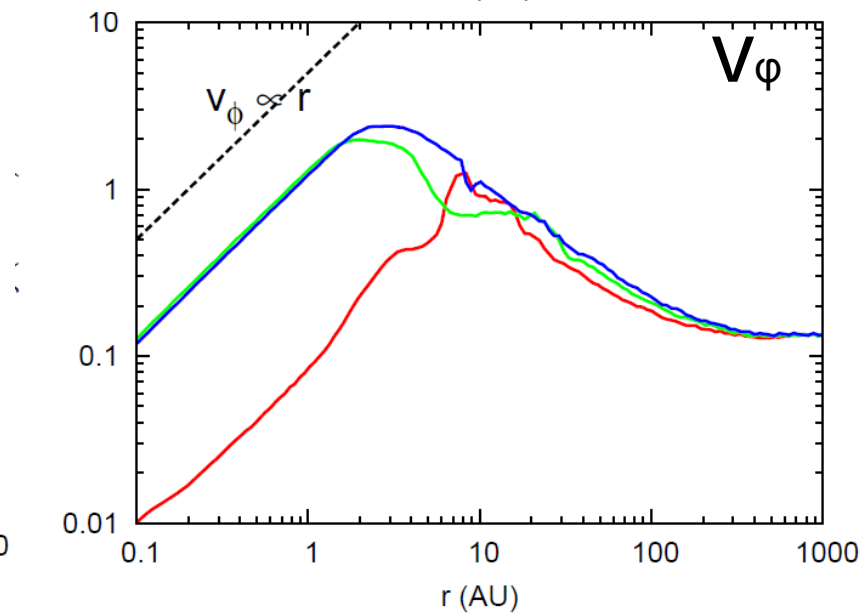
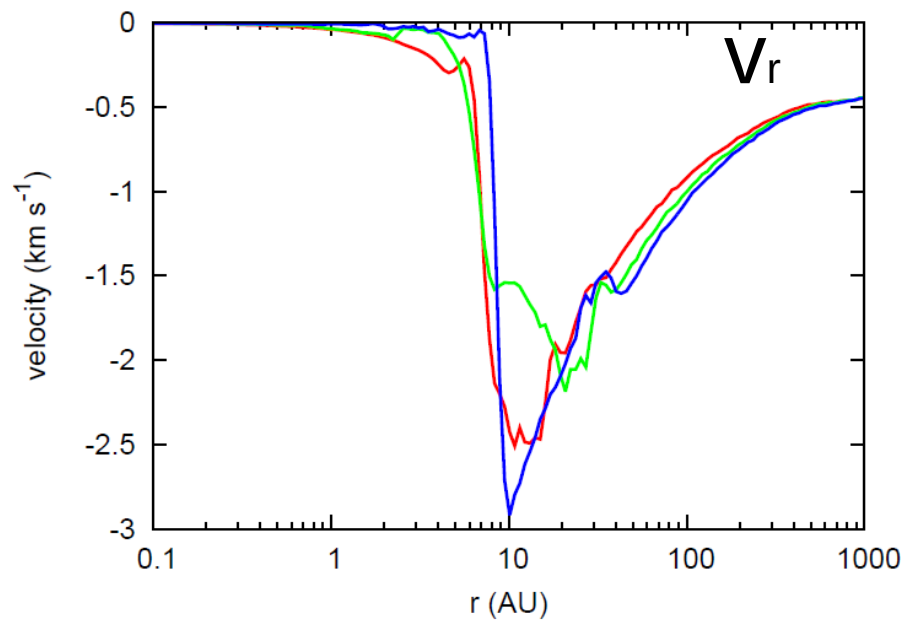
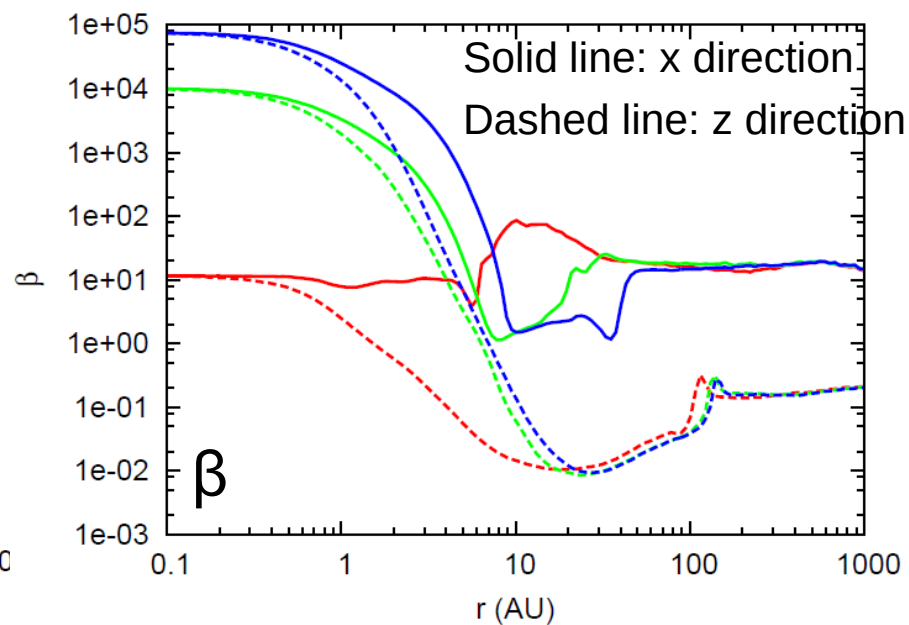
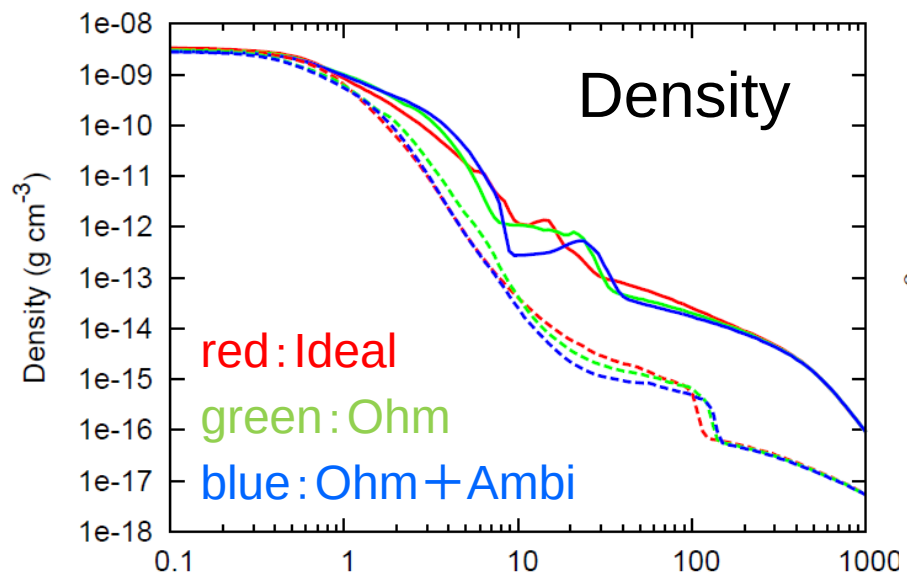
$$\alpha = \frac{E_{\text{th}}}{E_{\text{grav}}} = 0.3 \quad \beta = \frac{E_{\text{rot}}}{E_{\text{grav}}} = 0.01 \quad \frac{\Phi}{\Phi_{\text{crit}}} = 4.0$$



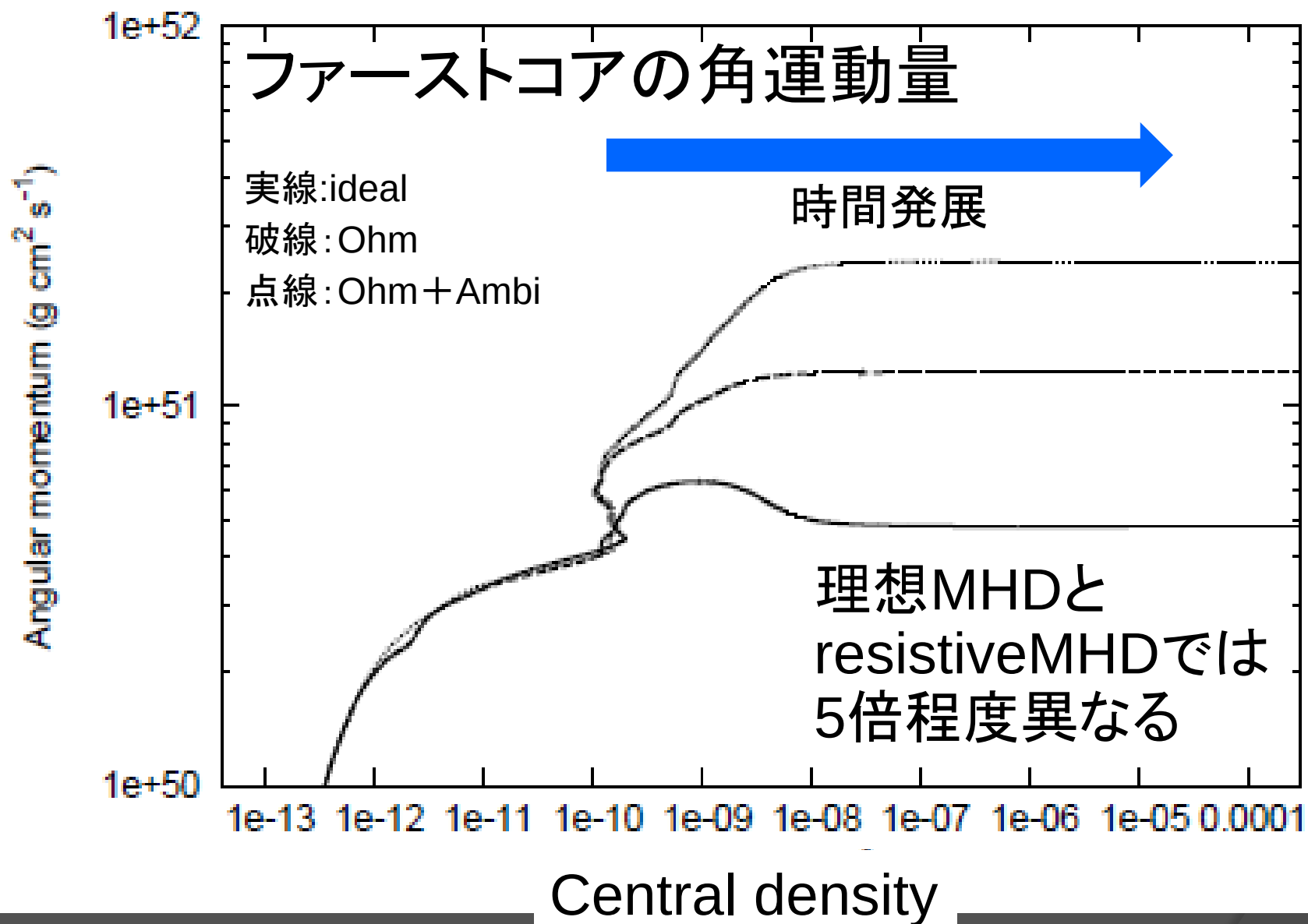
ファーストコア周囲の構造



ファーストコア段階のプロファイル



ファーストコア角運動量への磁気散逸の影響



ファーストコア角運動量へのホール効果の影響

Angular momentum

磁場の向きが異なるだけで
一桁以上変化!

Ohm+Ambi+Hall

cyan: 磁場反平行

magenta: 磁場平行

$1e+52$

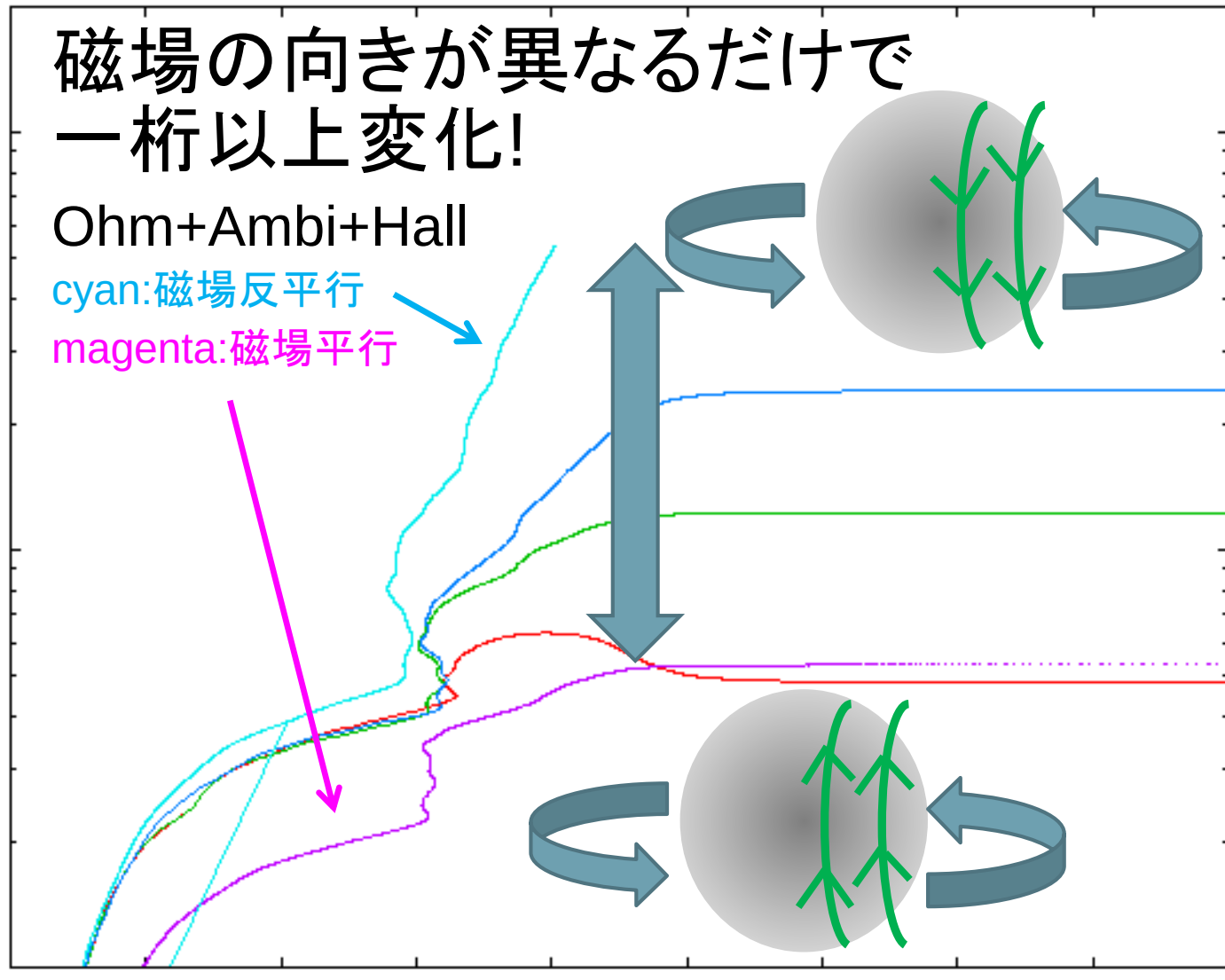
$1e+51$

$1e+50$

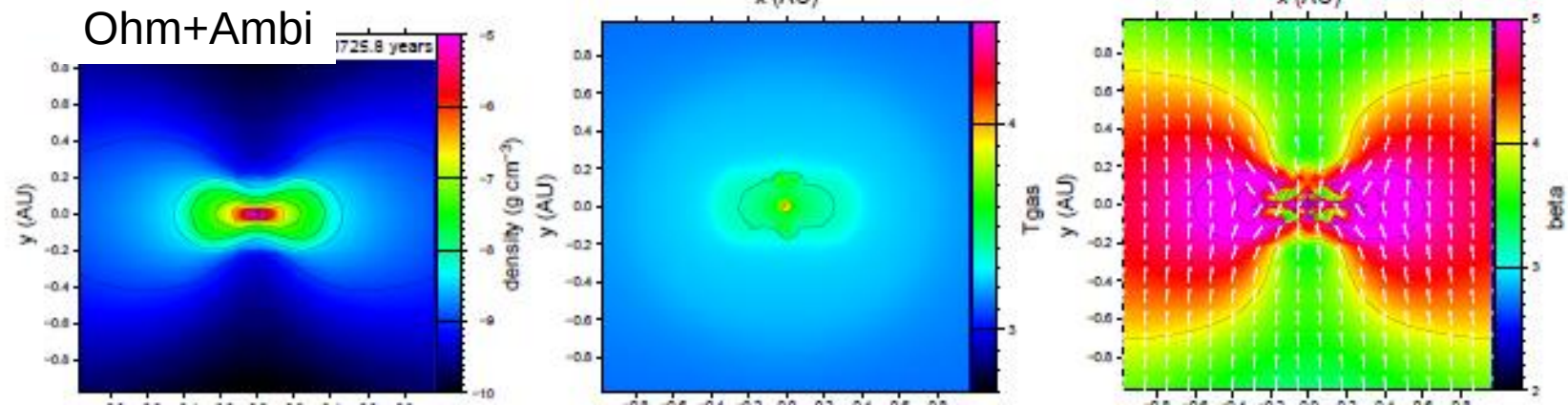
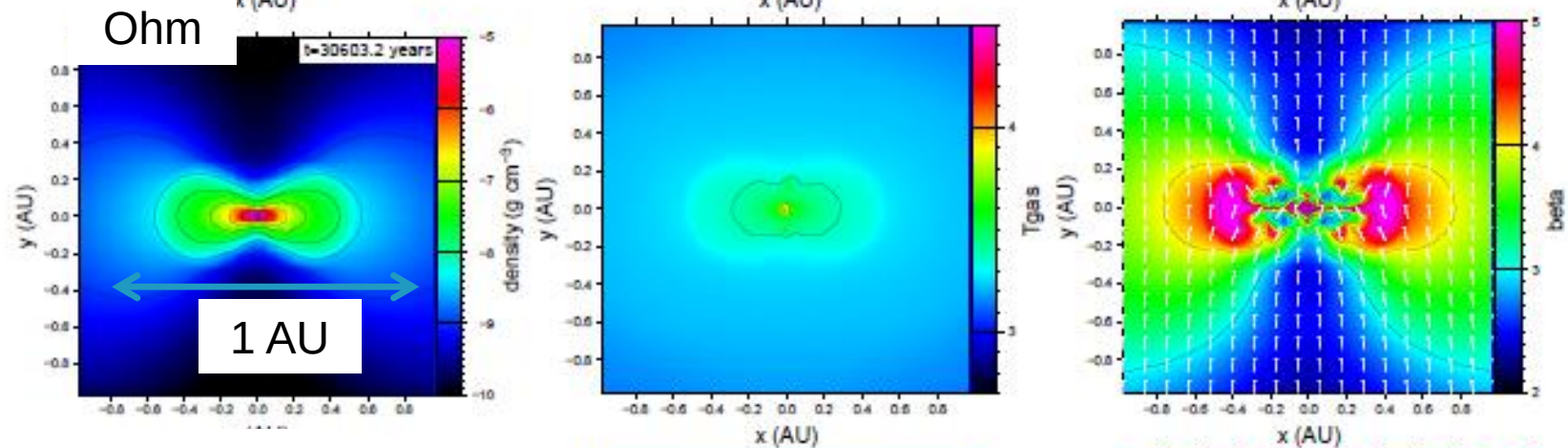
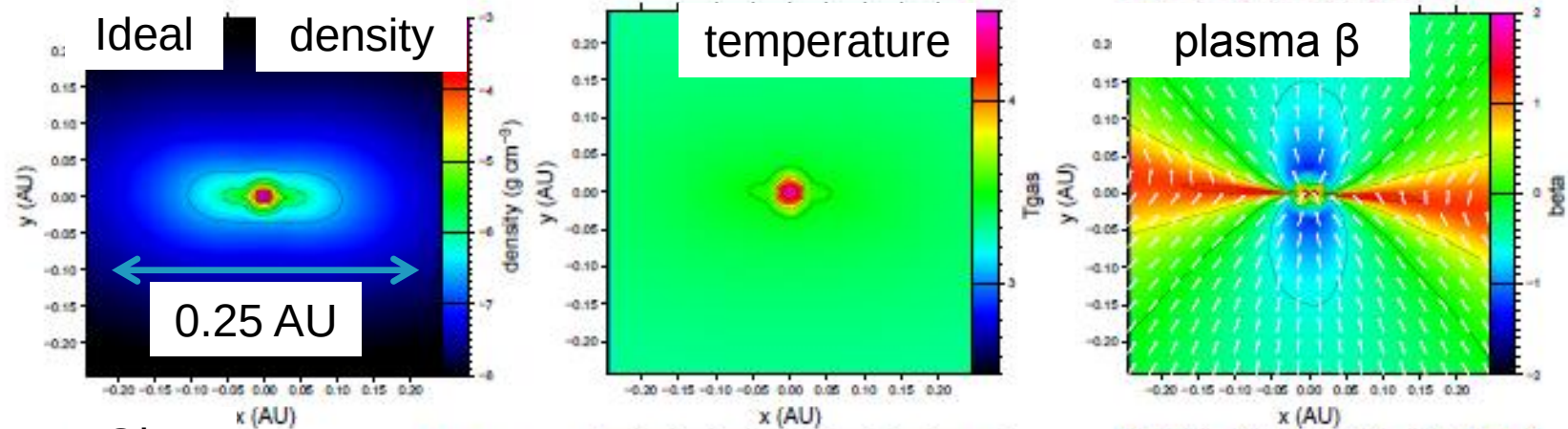
$1e-13$ $1e-12$ $1e-11$

Central density

7 $1e-06$ $1e-05$ $1e-04$

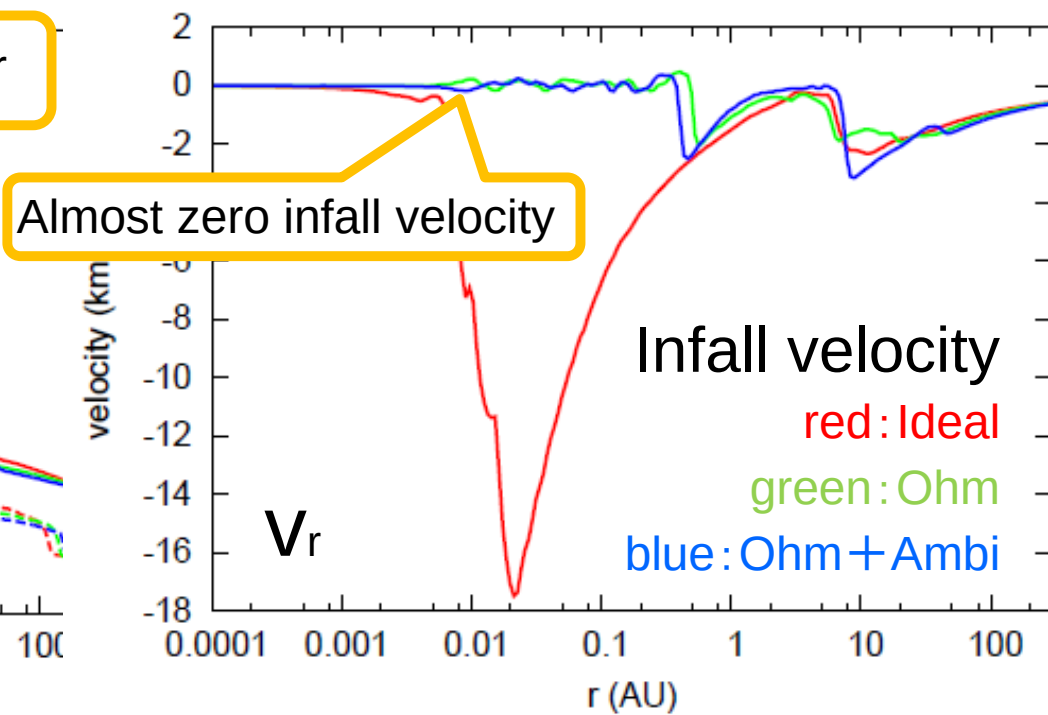
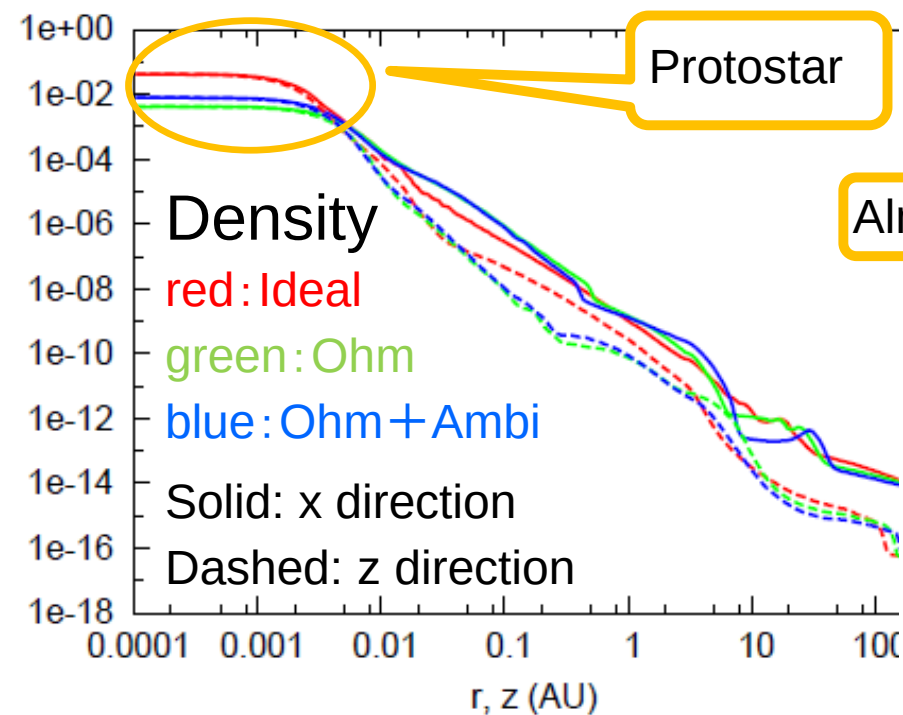
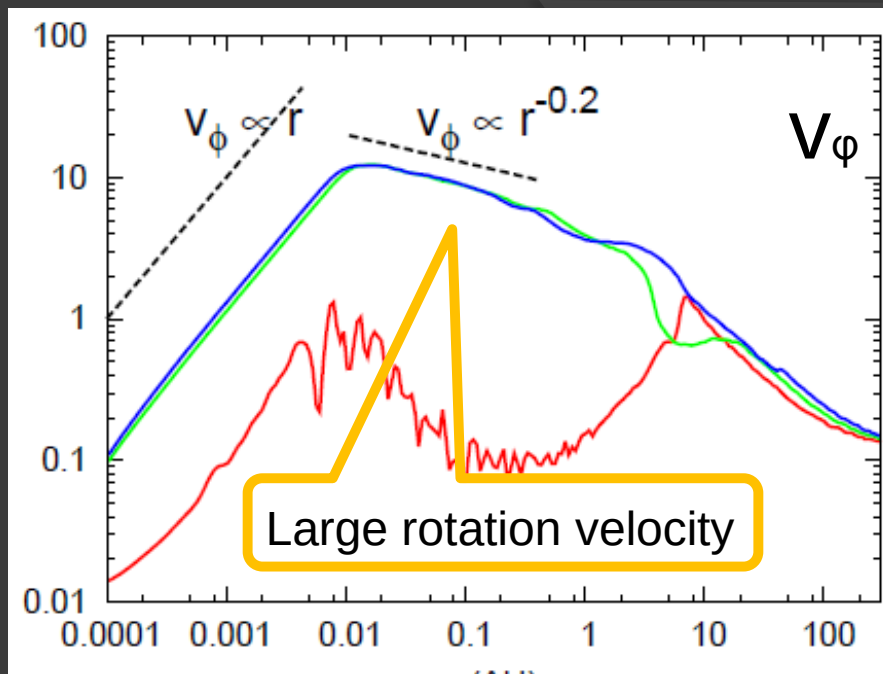


原始星周囲の構造

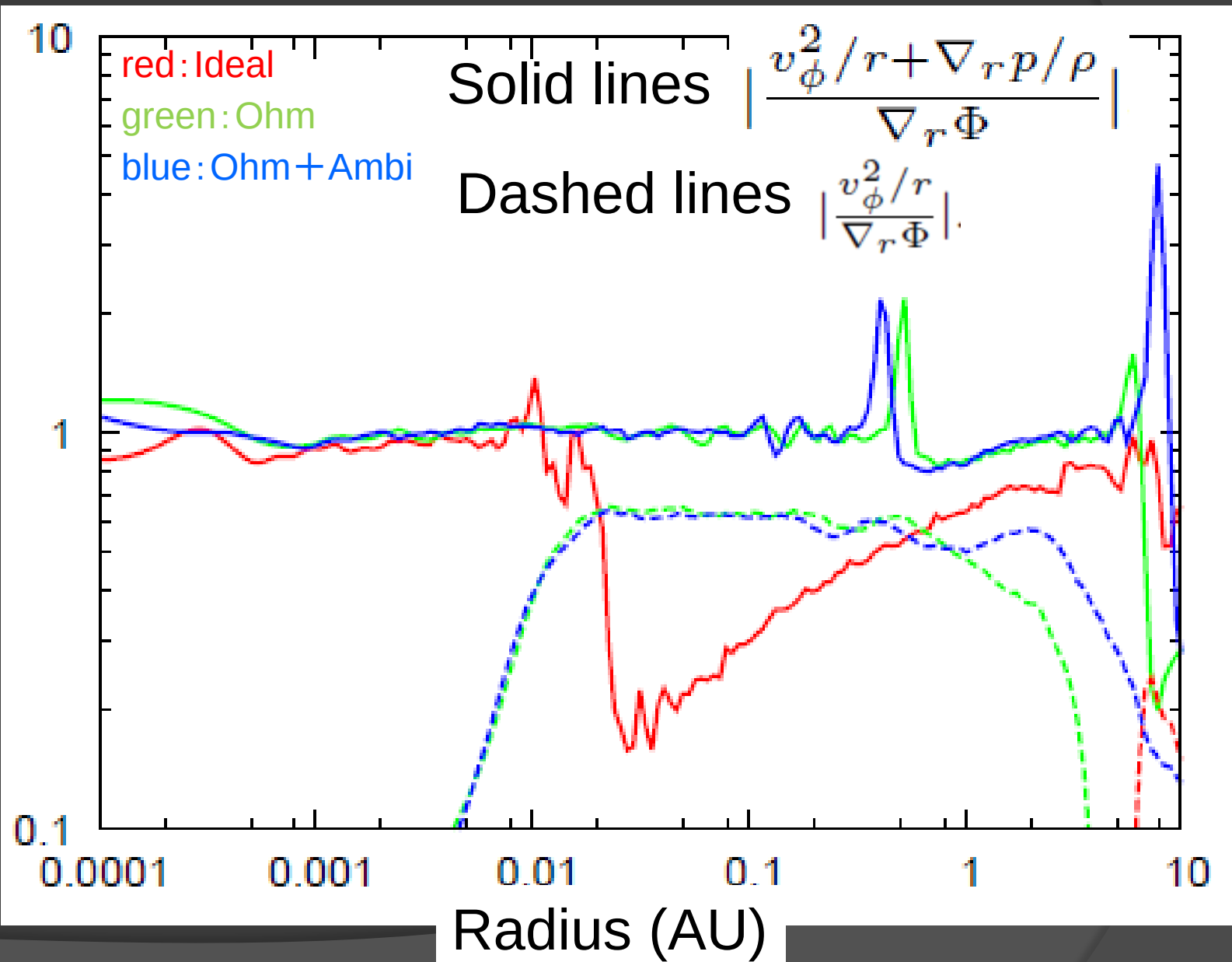


原始星周囲のプロファイル

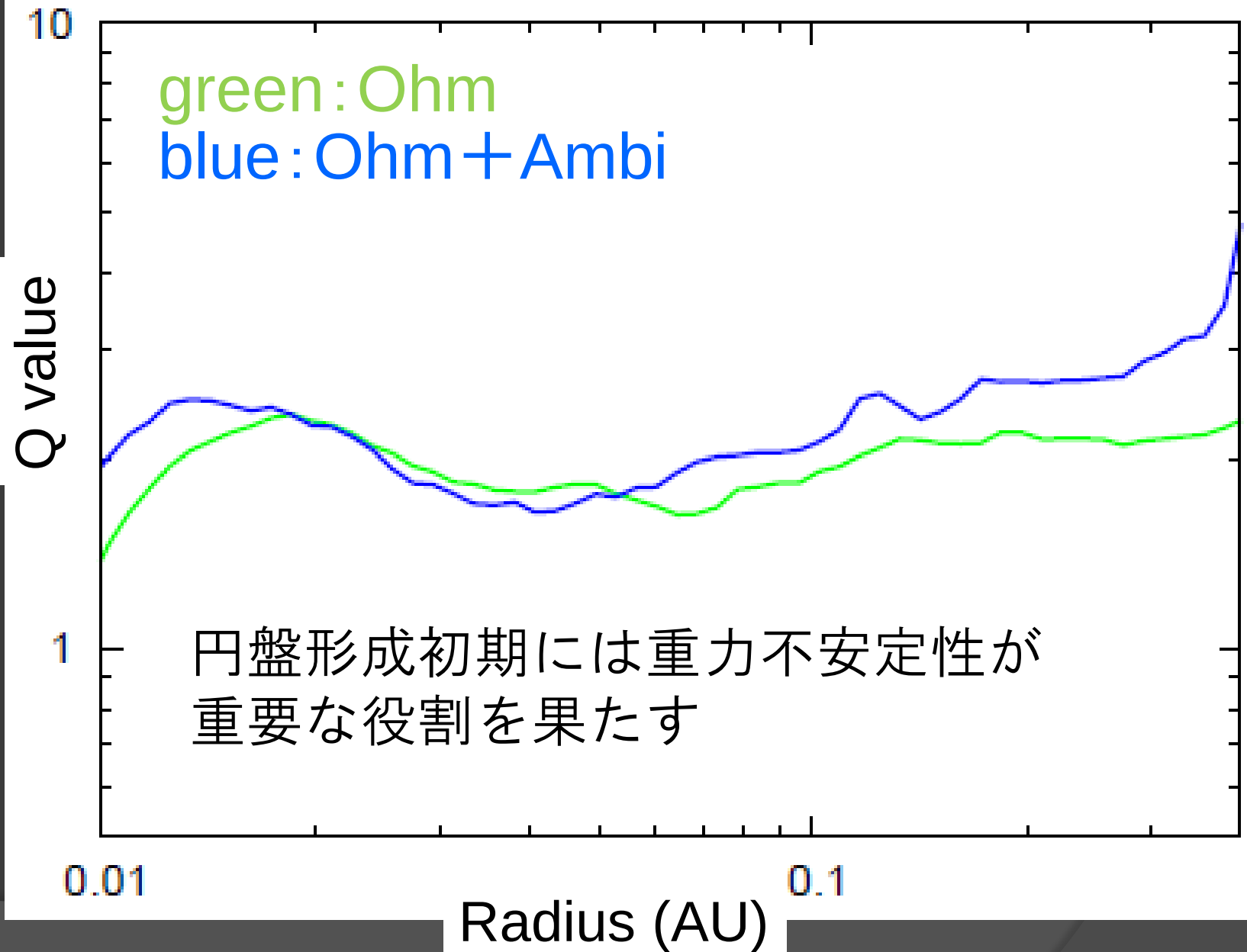
- 「円盤」が原始星周囲に形成
- ファーストコアがそのまま円盤に進化
→ファーストコアの角運動量が重要



「円盤」は本当に回転サポートか？



円盤のQ値



まとめ

世界初のSPHによる
非理想RMHDシミュレーション
を行った

- Magnetic braking catastropheは
 - (1) 磁気散逸
 - (2) 中心領域の十分な分解能によって解決する
- ホール効果によってファーストコアの角運動量は磁場と回転軸の向きによって一桁以上変わる

→ コア内磁場の向きによって
円盤サイズが異なる!

