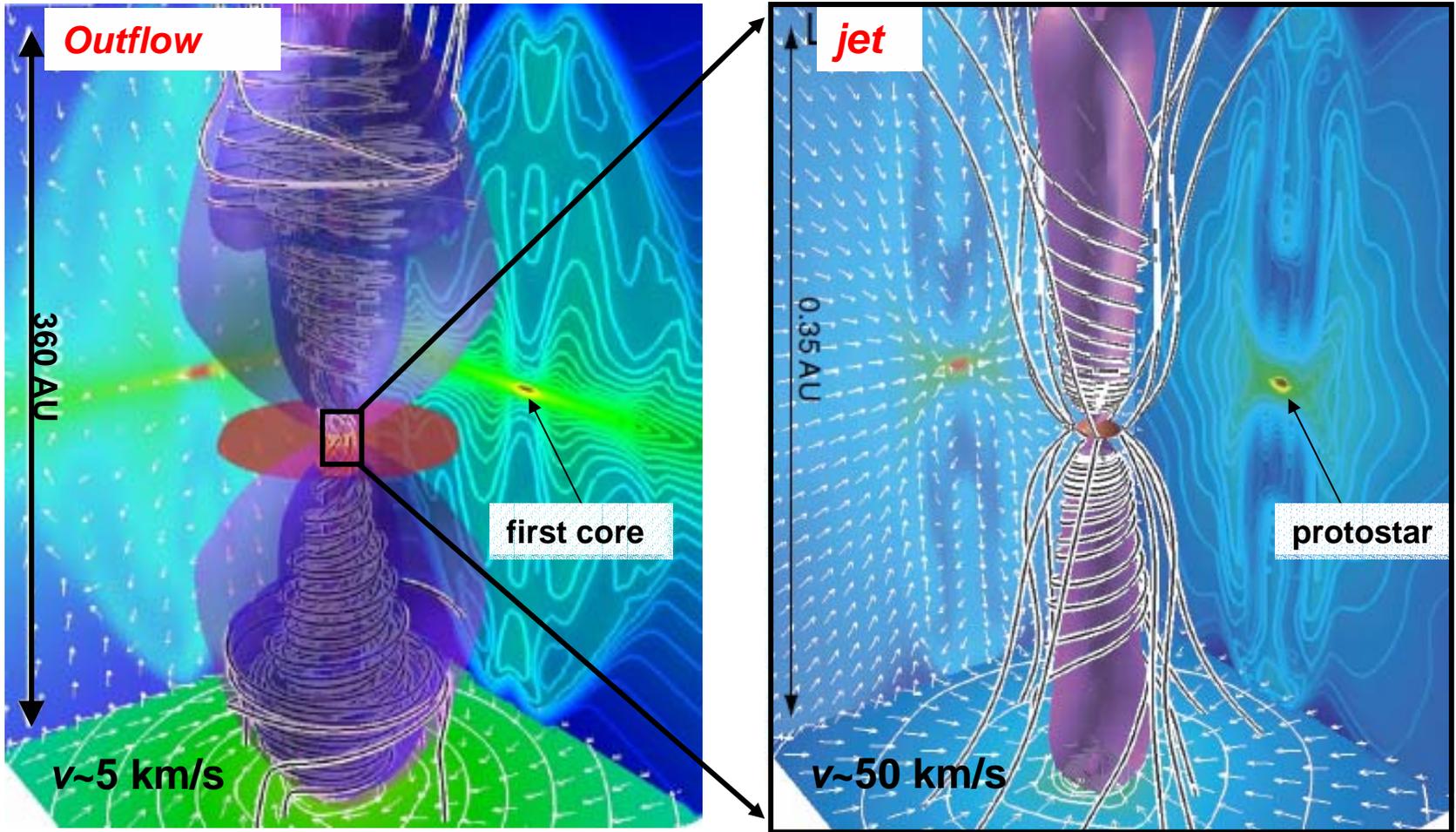


星形成過程でのジェットと アウトフローの駆動メカニズム



町田正博, 犬塚修一郎 (京都大学), 松本倫明 (法政大学)

原始星からのアウトフロー、ジェット

◆ 星形成領域でタイプの異なる2種類のフロー(**アウトフロー**、**ジェット**)が観測

◆ 現在までに400以上のフロー 星形成過程で普遍的な現象

➤ **アウトフロー**: **低速** (~ 10 km/s), $\sim 10^5$ AU, **Wide opening angle**

➤ **ジェット**: **高速** (~ 100 km/s), $\sim 10^5$ AU, **Well-collimated structure**

◆ アウトフロー、ジェット問題と解決へのアプローチ

➤ どのようなメカニズムで駆動するのか? 特徴(速度、opening angle)の違いは?

➤ 直接観測は難しい: ドライバーはsmall scale, 濃い分子雲コアに埋まっている

➤ 数値計算が必要 空間7桁、密度20桁の違い (原始星とアウトフロー、ジェット)

◆ 駆動メカニズムに関する仮説

1. アウトフローは、ジェットに引きずられて駆動 (*entrainment*)

大多数が支持、原始星周りの計算、仮定が多い(磁場の形、降着率、円盤、etc..)

2. アウトフローとジェットは、各々異なるコアから駆動する (*first core, protostar*)

◆ この研究では、

➤ **磁場の散逸を考慮して**、分子雲コア($\sim 10^4$ AU, 10^4 cm $^{-3}$)から原始星(~ 0.001 AU, 10^{22} cm $^{-3}$)形成を直接計算して、フローの駆動メカニズムを調べた

計算手法

◆ 3D Resistive MHD Nested Grid

- 解像度が必要な部分を精度の良いグリッドで覆う
- ジーンズ条件を満たすように、新しいグリッドを生成

◆ Grid size: $64 \times 64 \times 32$

($z=0$ mirror symmetry)

◆ Grid level: $L_{\max}=31$ (L: Grid Level)

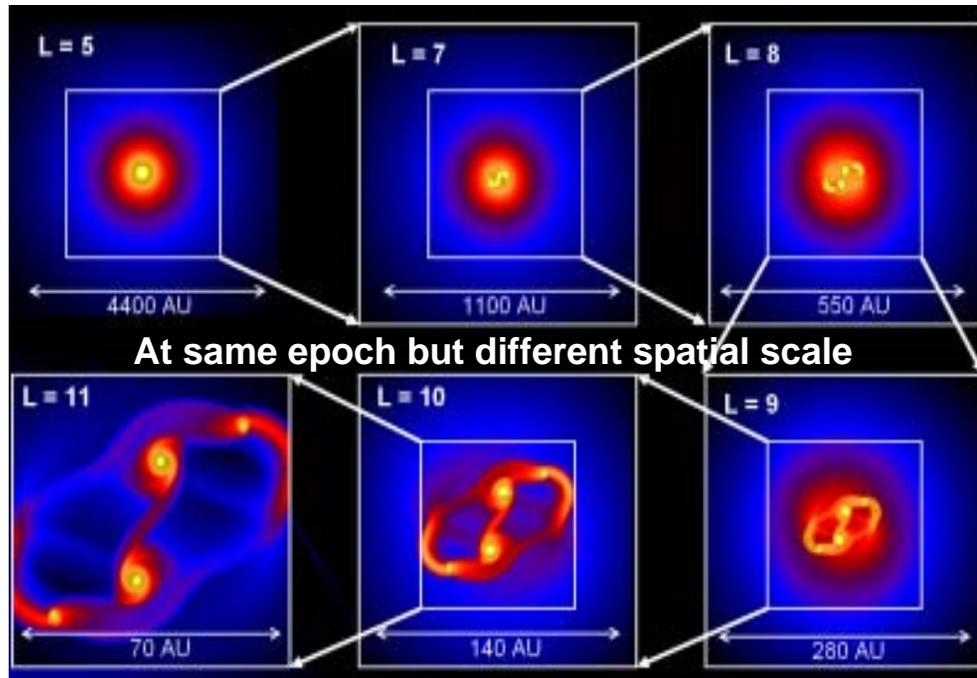
◆ Total grid number: $64 \times 64 \times 32 \times 31$

◆ Scale range: $L=10^4 \text{ AU} - 0.01 R_{\text{sun}}$, $n=10^4 \text{ cm}^{-3} - 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

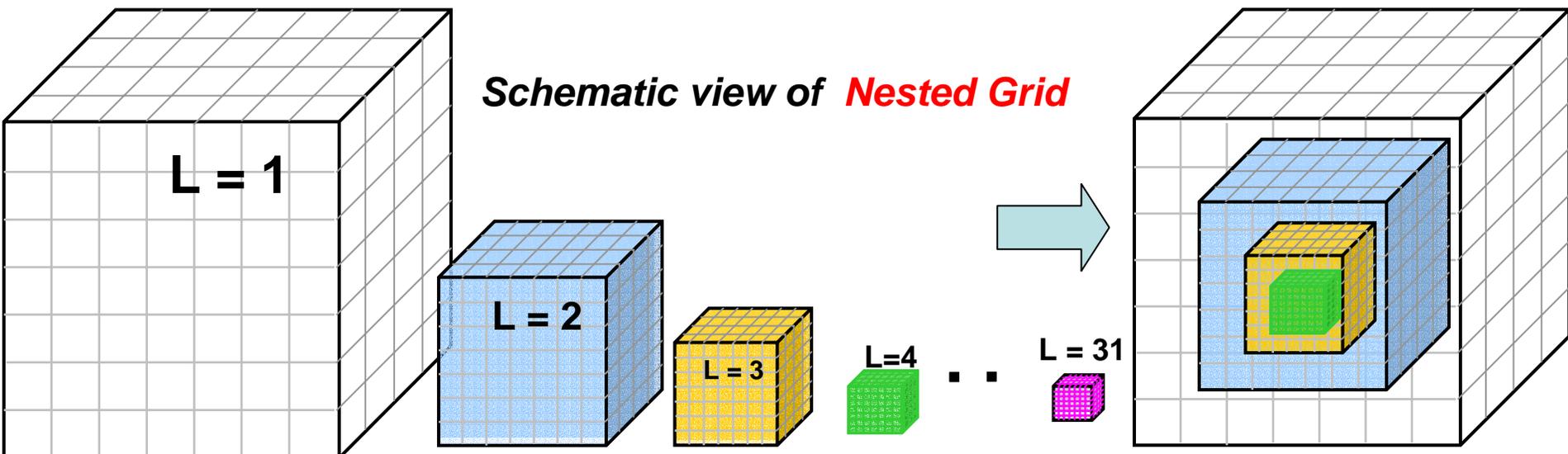
➤ 空間: ~10桁

➤ 密度コントラスト: ~20桁

➤ $L=31$ の解像度で全体を覆ったとすると: 70億 × 70億 × 35億メッシュ (64×2^30)に相当



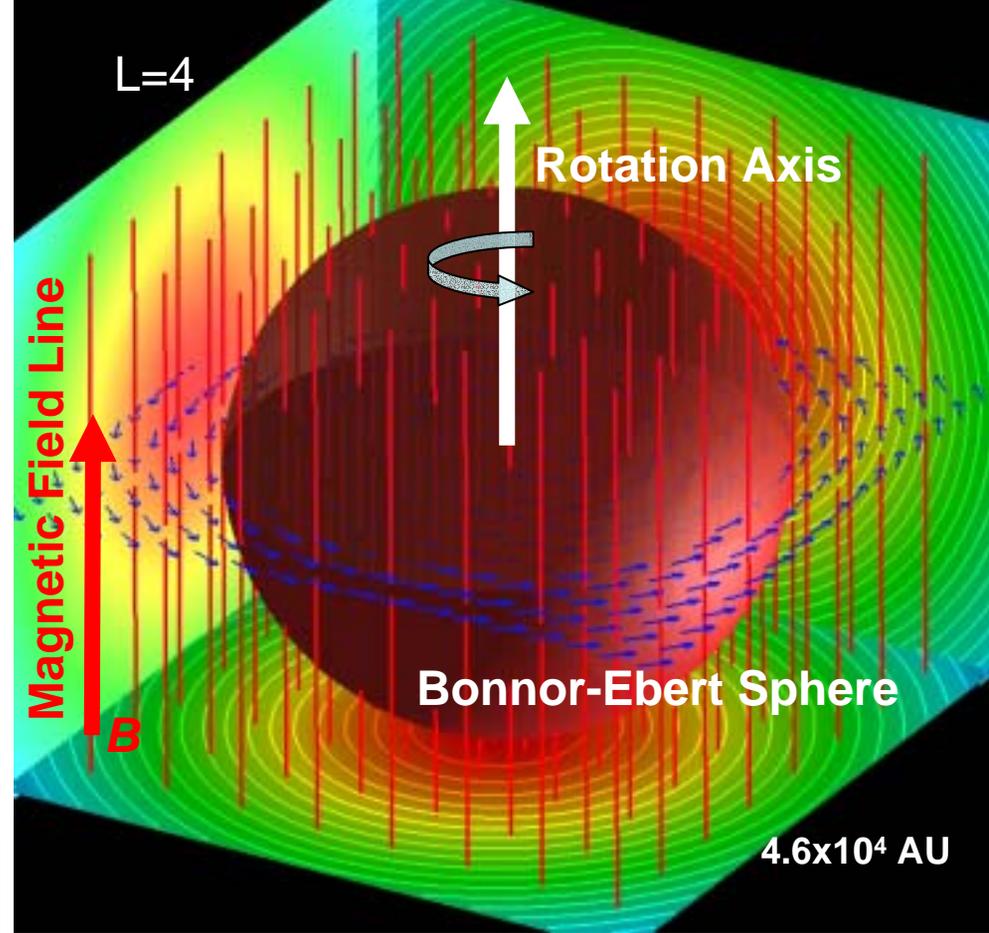
Example of Nested Grid



Initial Condition

静水圧平衡にあるガス球

- ❑ Critical Bonner-Ebert Sphere
+ 回転 + 磁場 + 微小の密度揺らぎ
- ❑ 磁力線は、回転軸に平行: $B // \Omega$
- ❑ Parameters: 磁場 (α) と回転 (ω) の度合い
 - $\alpha = B_c^2 / (4\pi\rho c_s^2)$: 磁気圧とガス圧の比
 - $\omega = \Omega / (4\pi G\rho)^{1/2}$: 角速度 (自由落下時間で規格化)
- ❑ 初期値
 - ・数密度: $n = 10^4 \text{ cm}^{-4}$ ・温度: $T = 10 \text{ K}$
 - ・ガス球の大きさ: $4.6 \times 10^4 \text{ AU}$
 - ・質量 $14 M_{\text{sun}}$



基礎方程式 (Resistive MHD eq.)

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

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

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

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

- ポリトロープ近似: $P = P(\rho)$
1次元 radiative hydro calculation の結果から近似
(Masunaga & Inutsuka 2002)

- Resistivity (η): 温度と密度の関数としてモデル化
 $\eta = \eta(\rho, t)$

(Nakano et al. 2002, Machida et al. 2006)

Result 1: 分子雲コアから原始星形成過程

1st core formation

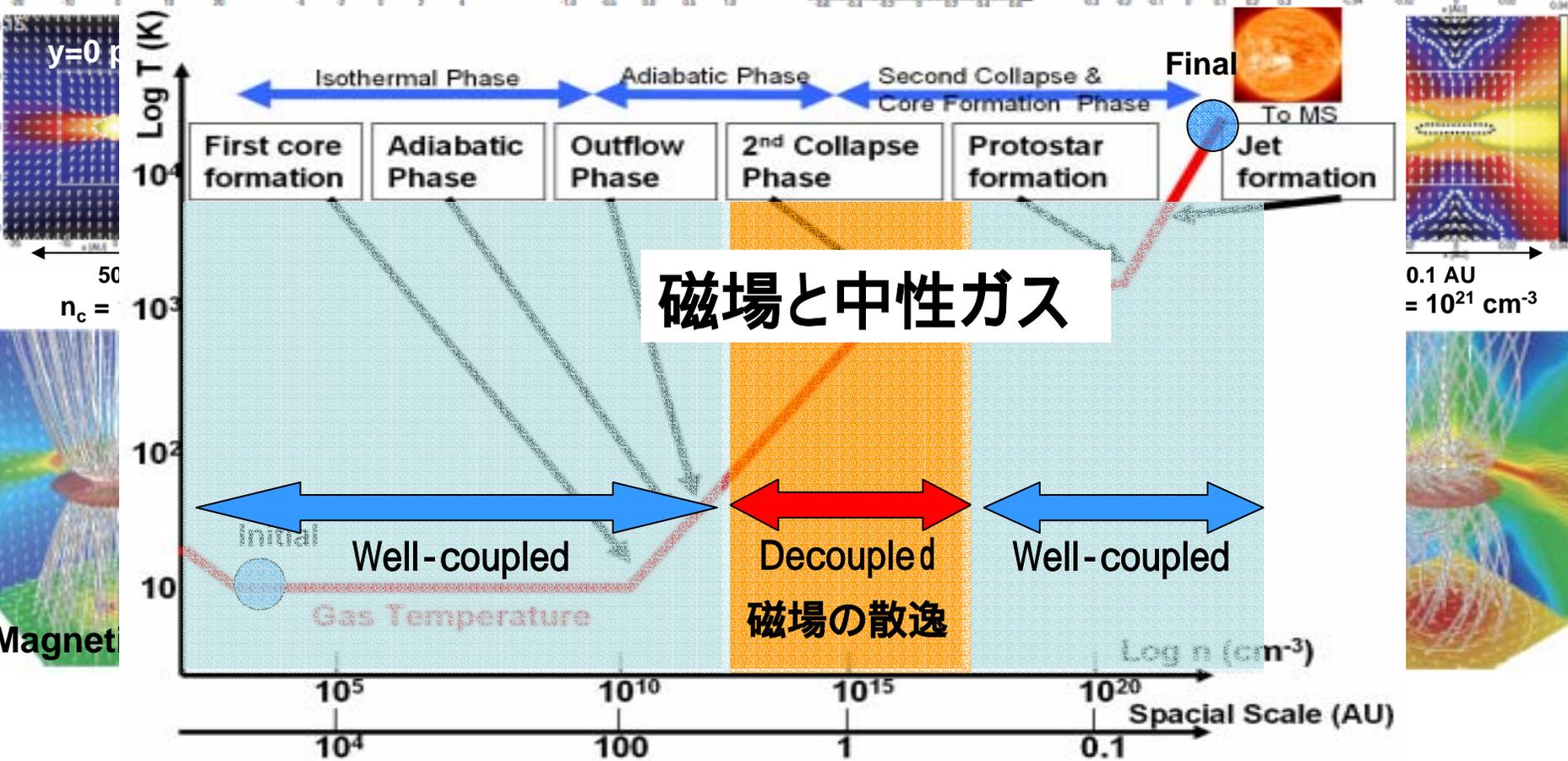
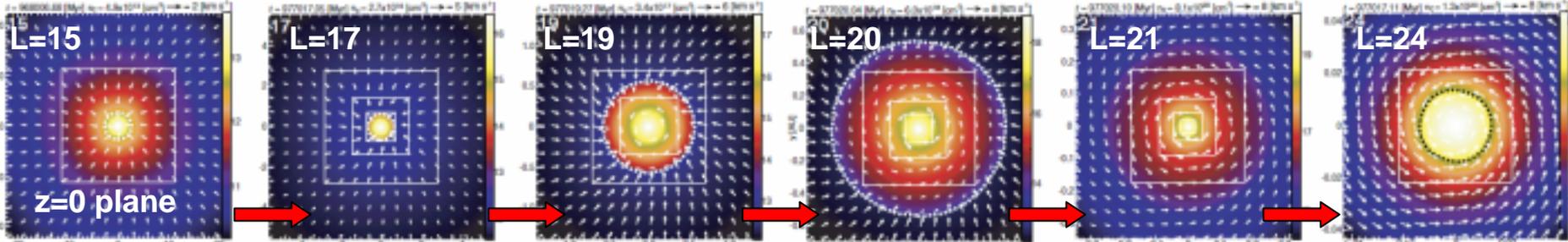
Adiabatic Phase

Outflow Phase

2nd collapse Phase

Protostar formation

Jet Formation



Result 2: ファーストコアからのアウトフロー

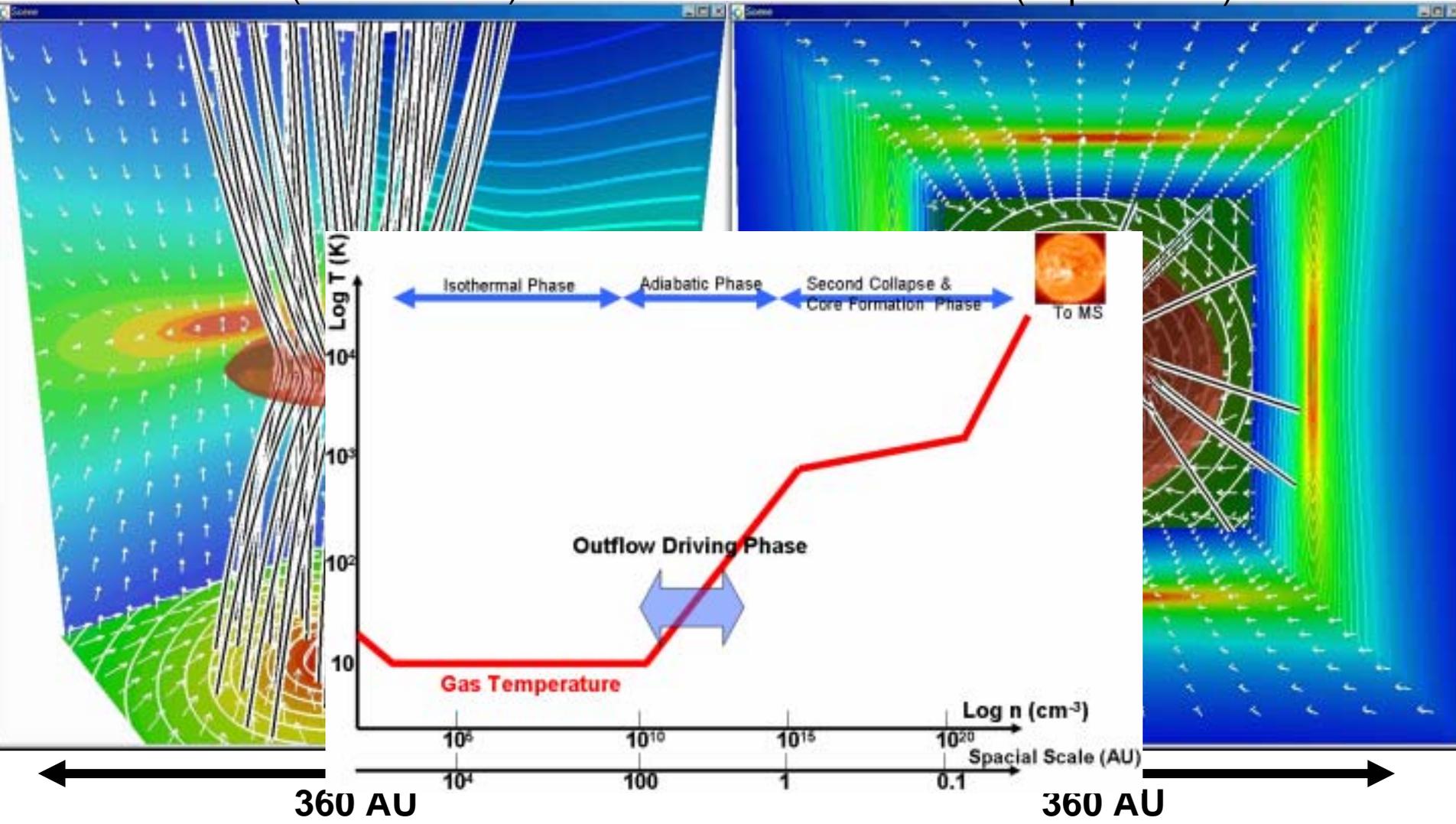
ファーストコアの周りのアウトフローの進化

➤ This animation start after the first core is formed at $n \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Model for
 $(\alpha, \omega) = 1, 0.003$

Grid level $L=12$ (Side on view)

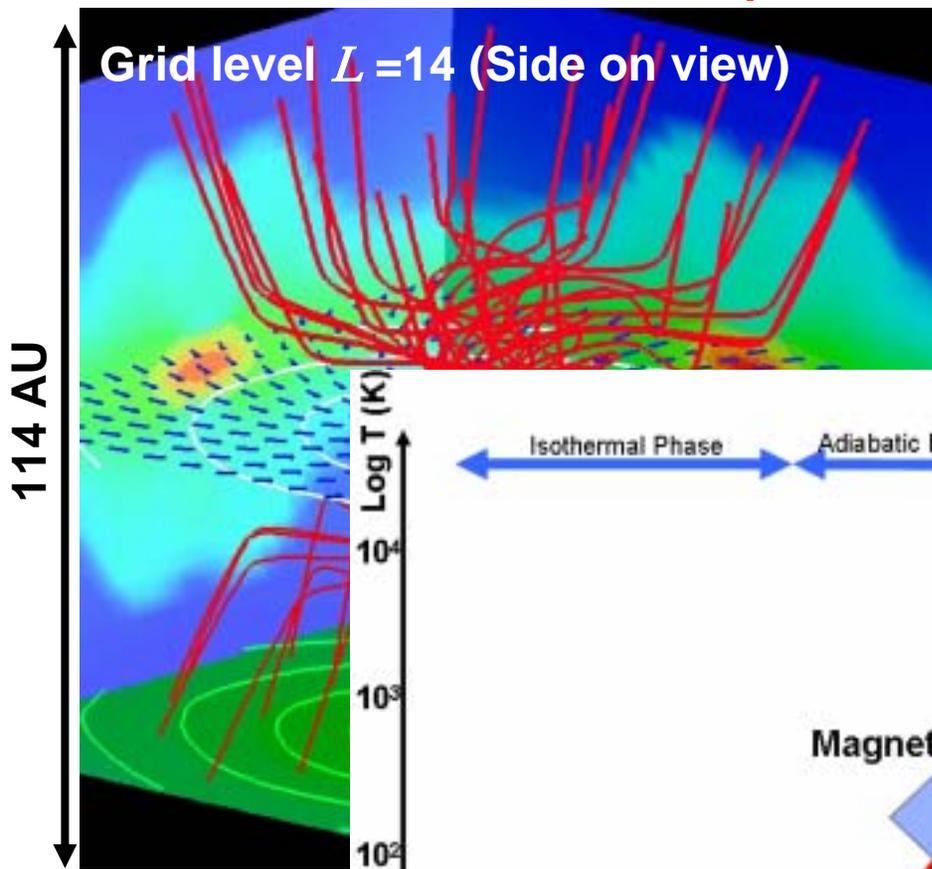
Grid level $L=12$ (Top on view)



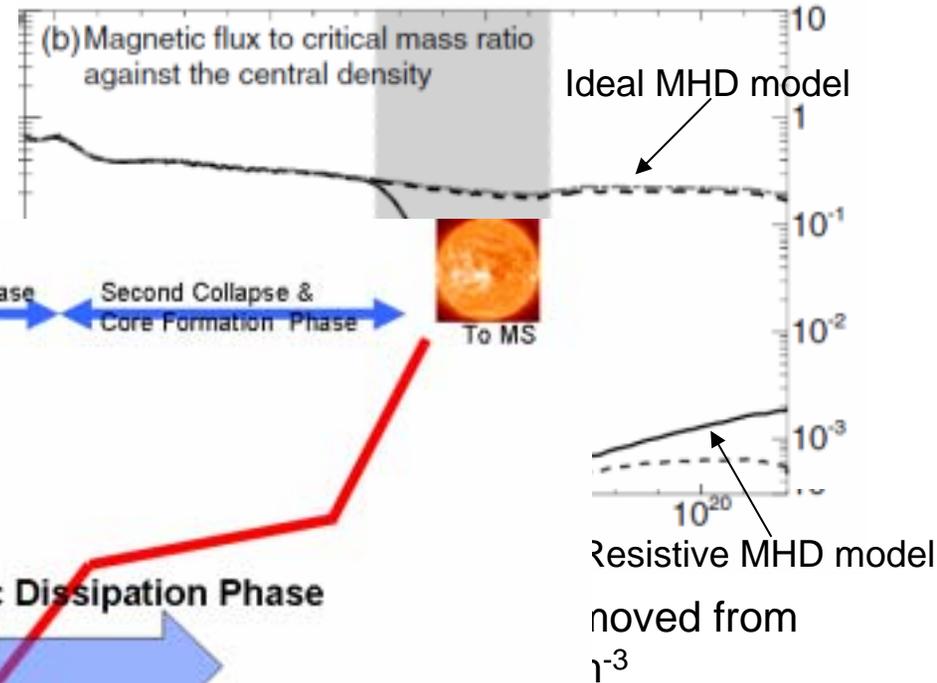
360 AU

360 AU

Result 3: Ohmic Dissipationによる磁場の散逸

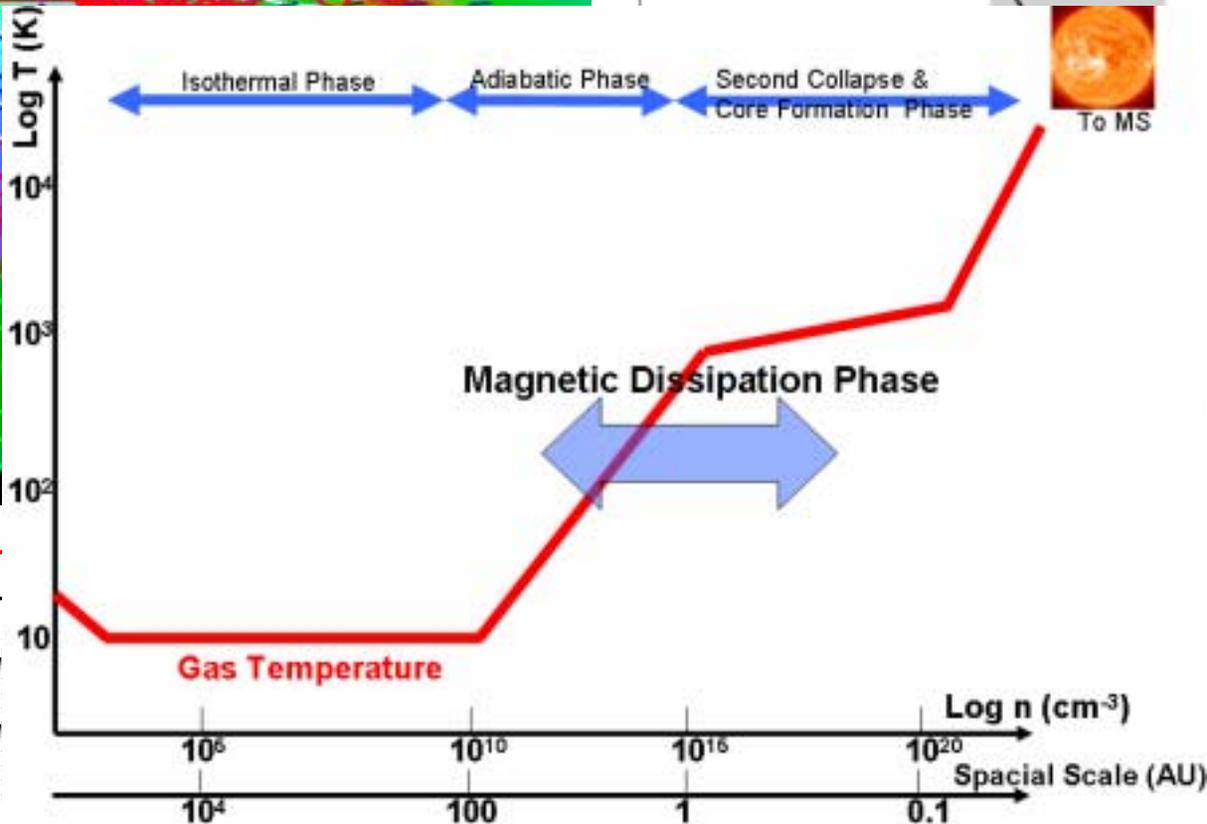


Magnetic flux against the central density



Evolution of $t\tau$

- ◆ $n = \sim 5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
- ◆ $10^{11} \text{ cm}^{-3} < n < 1$
- ◆ $10^{13} \text{ cm}^{-3} < n < 1$



- ◆ $10^{16} \text{ cm}^{-3} < n < 10^{20} \text{ cm}^{-3}$: Second collapse, B Fieldがneutral gasと再びカップル, 磁場が再び増幅
- ◆ $n > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$: 原始星形成, B_r, B_ϕ が再び増幅する

Result 4:原始星からのジェット

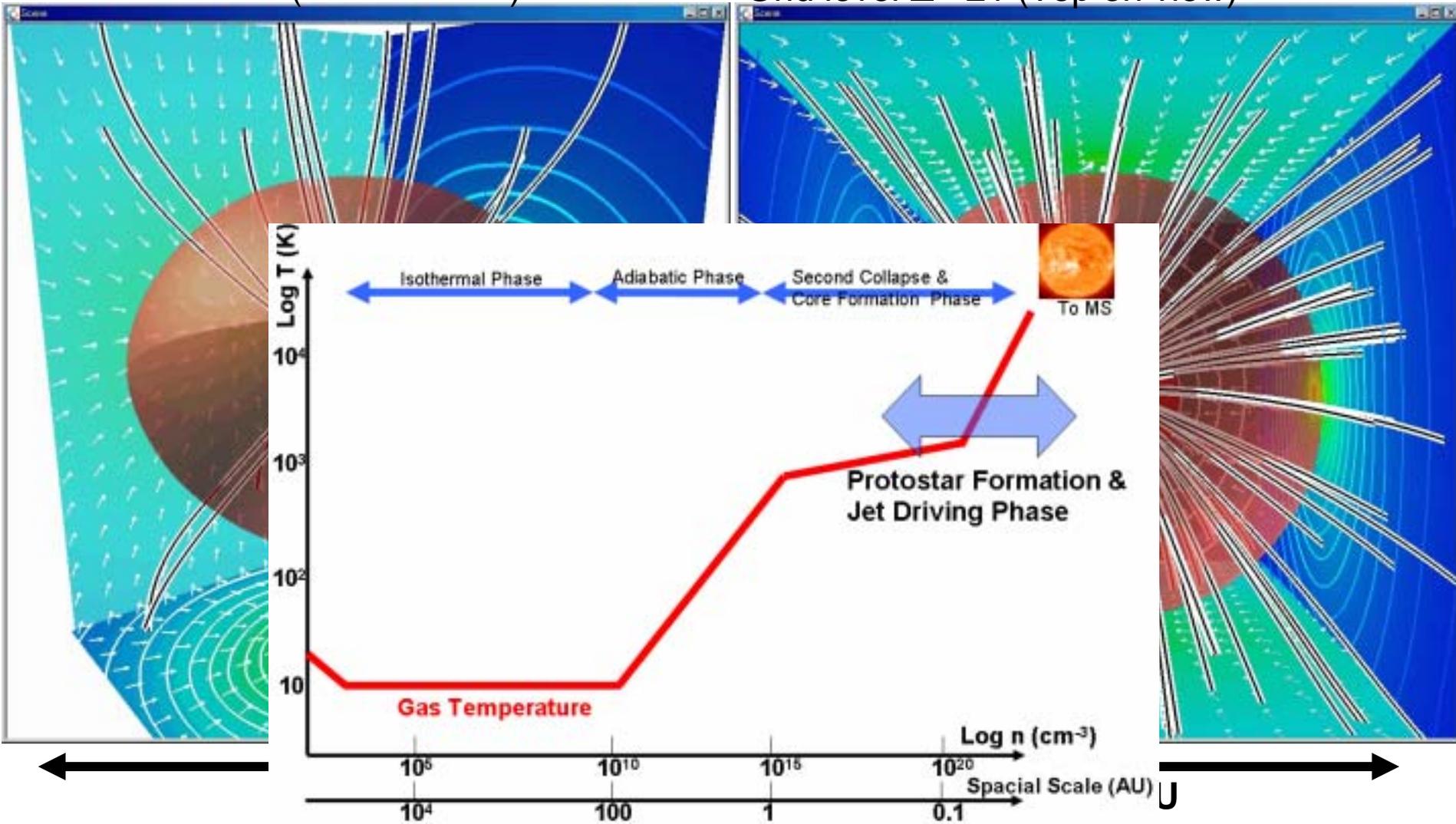
原始星の周りのジェットの進化

➤ This animation start before the protostar is formed at $n \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

Model for
 $(\alpha, \omega) = 1, 0.3$

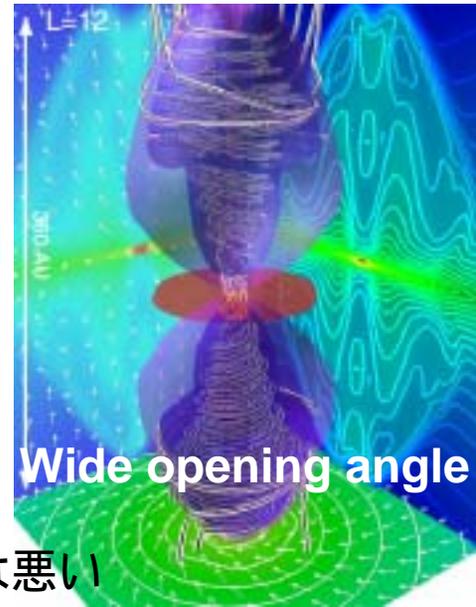
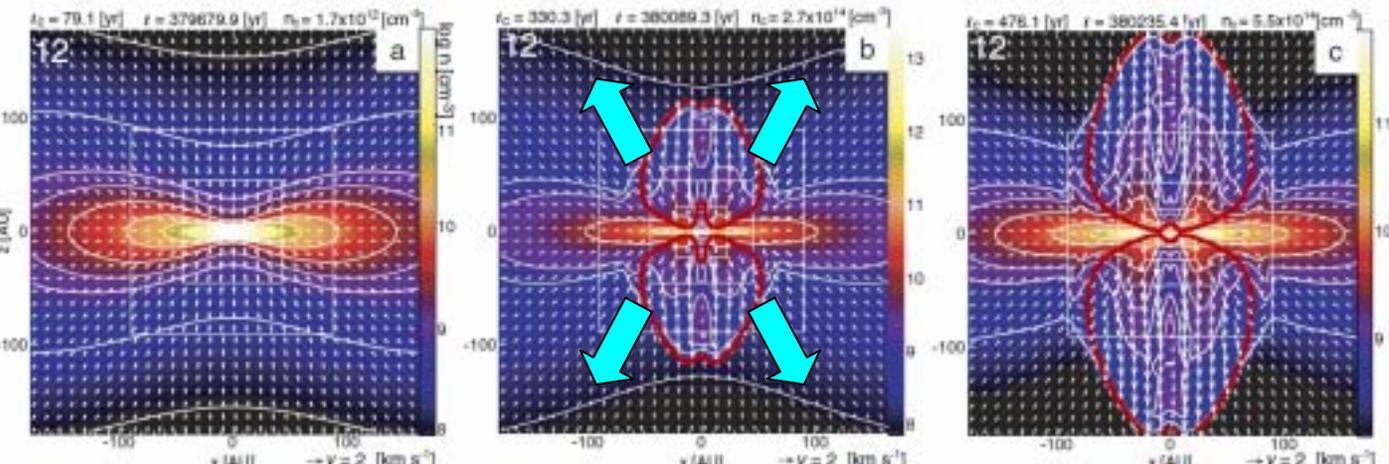
Grid level $L = 21$ (Side on view)

Grid level $L = 21$ (Top on view)



Result 5: ジェットとアウトフローの進化

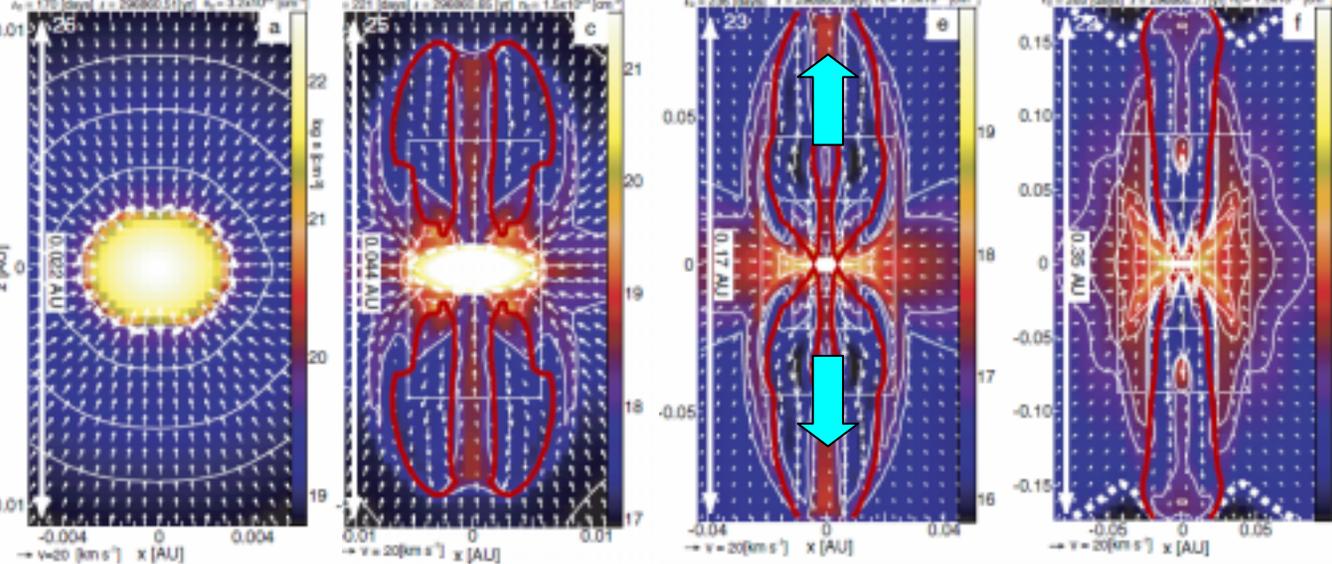
Vertical/Radial ~ const



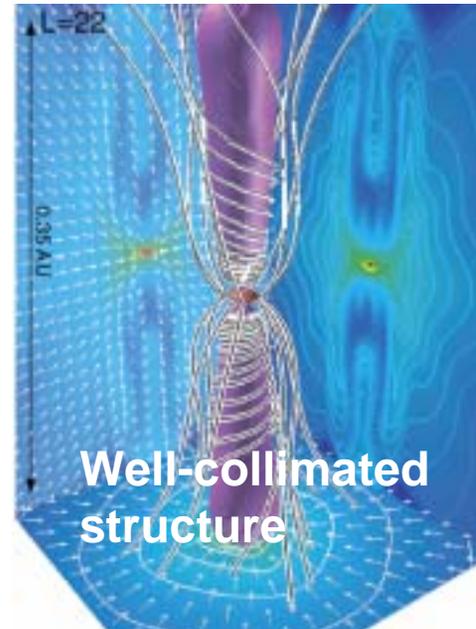
ファーストコア周辺の進化

アウトフローは、形を保ったまま自己相似的に広がる, コリメーションは悪い

Wide opening angle



Vertical/Radial ~ increase



原始星周辺の進化 (ファーストコアの内側)

ジェットは回転軸に沿って広がる, コリメーションは時間と共に良くなる

Well-collimated structure

議論: ジェットとアウトフローのCollimationの違い

◆ 重力に対抗する力(磁場、回転、ガス圧)の強さ

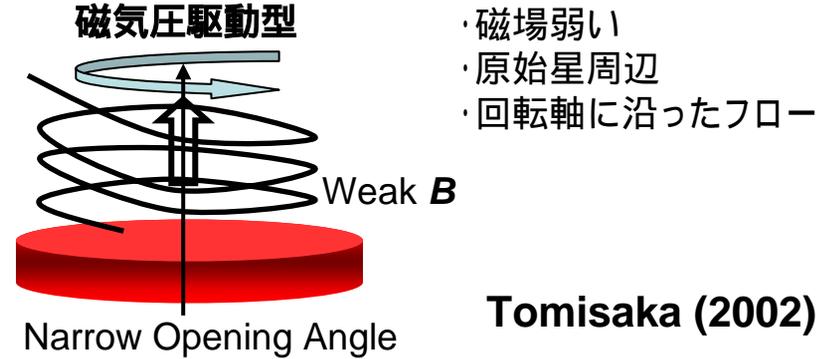
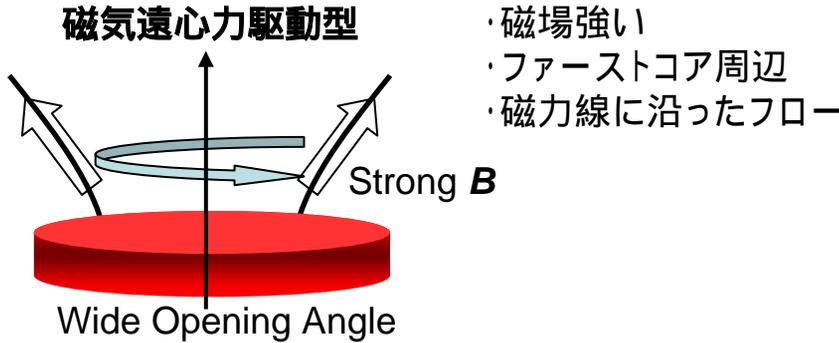
ファーストコアの周り (アウトフロー)

Lorenz Centrifugal Thermal Pressure (inflow)

原始星の周り (ジェット)

Centrifugal Thermal Pressure >> Lorenz (inflow)

Dominant Mechanism



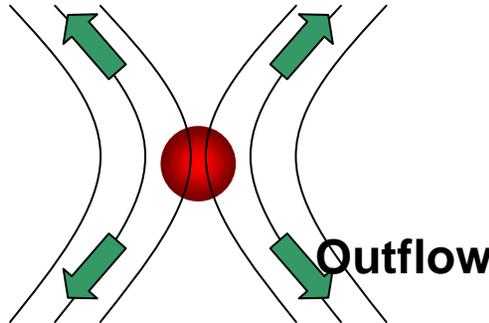
◆ 磁力線の形状

➤ アウトフローとジェットは、磁場によってガイド(伝播方向を制限): outflow → wide, jet → narrow

First coreの周辺の磁場

B_r B_z B_ϕ

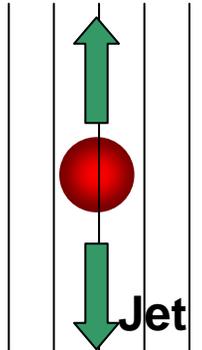
砂時計型



Protostarの周辺の磁場

$B_z \gg B_r$ B_ϕ

まっすぐな磁力線
(オーム散逸と磁気テンション)



計算結果と速度差

各々のフローの特徴：アウトフローとジェットの特徴を自然に再現出来た!!

	Driver	Speed	collimation	Mechanism	Configuration of B
Outflow	First core	Slow (5 km/s 50 km/s)		Magneto-centrifugal	Hourglass
Jet	Second core (protostar)	High (50 km/s 500 km/s)		Magnetic pressure	Straight

▶ アウトフロー、ジェットの速度の違いは、第1コアと原始星のKepler Speed(重力ポテンシャル)の違い

✓ **First core**: $\sim 0.01 M_{\text{sun}}$, 1 AU, **Protostar**: $\sim 0.01 M_{\text{sun}}$, $\sim 1 R_{\text{sun}}$

▶ 各々のコアが $1 M_{\text{sun}}$ まで増加したとき、アウトフローとジェットの速度は、10倍増加 ($v_{\text{kepler}} \propto M^{1/2}$)

✓ **Outflow**: $\sim 5 \text{ km/s}$ ($0.01 M_{\text{sun}}$) $\sim 50 \text{ km/s}$ ($1 M_{\text{sun}}$)

✓ **Jet**: $\sim 50 \text{ km/s}$ ($0.01 M_{\text{sun}}$) $\sim 500 \text{ km/s}$ ($1 M_{\text{sun}}$)

まとめ

▶ アウトフローは、jetによってentrainmentされるのではなく、ファーストコアによって駆動する

▶ アウトフローとジェットの特徴の違いは、周辺の磁場の強さ、磁力線の形状、重力ポテンシャルの違いから (or 磁気散逸を経験したかどうか)

