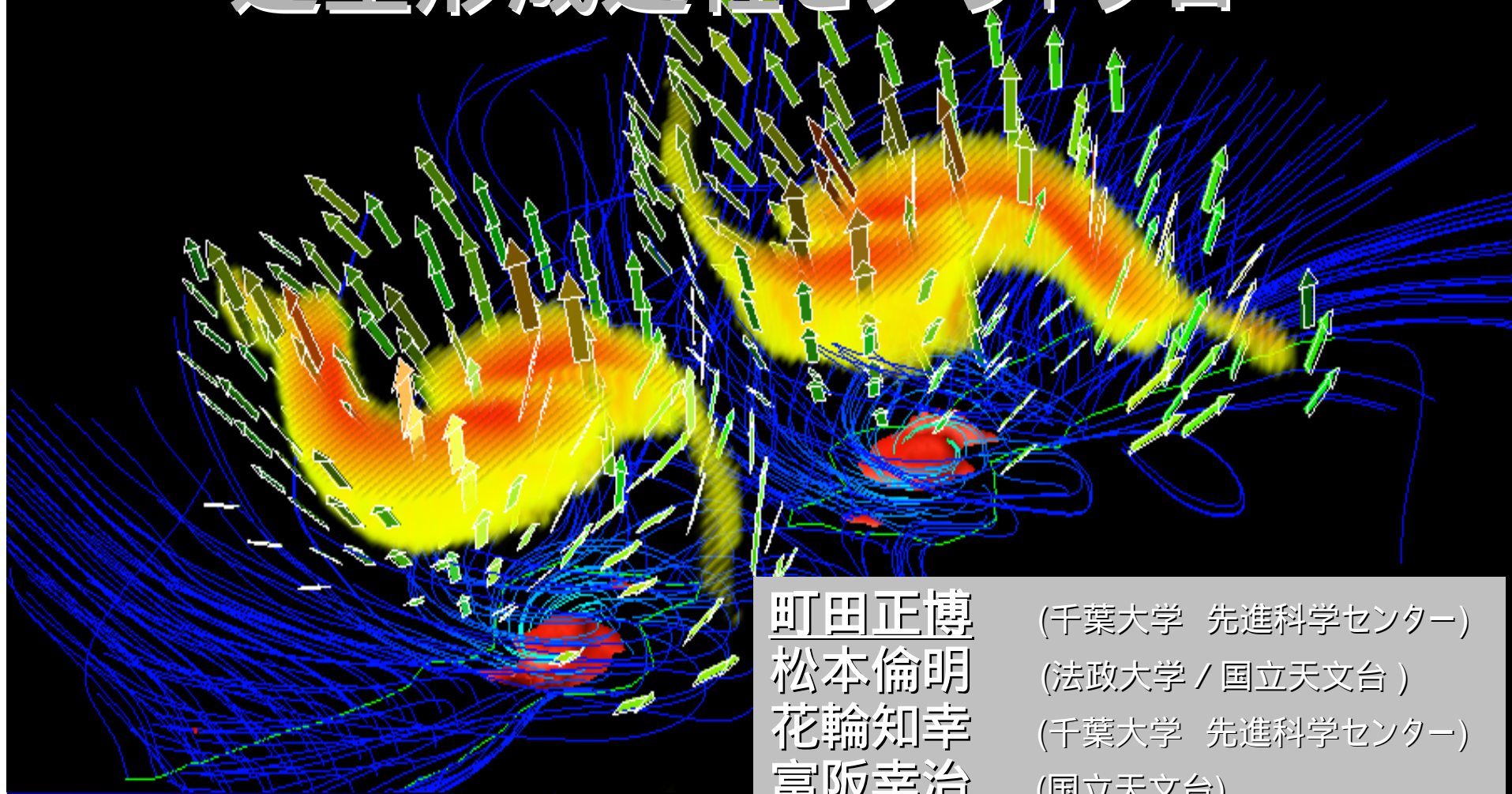


3次元MHDシミュレーションによる 連星形成過程とアウトフロー



町田正博
松本倫明
花輪知幸
富阪幸治

(千葉大学 先進科学センター)

(法政大学 / 国立天文台)

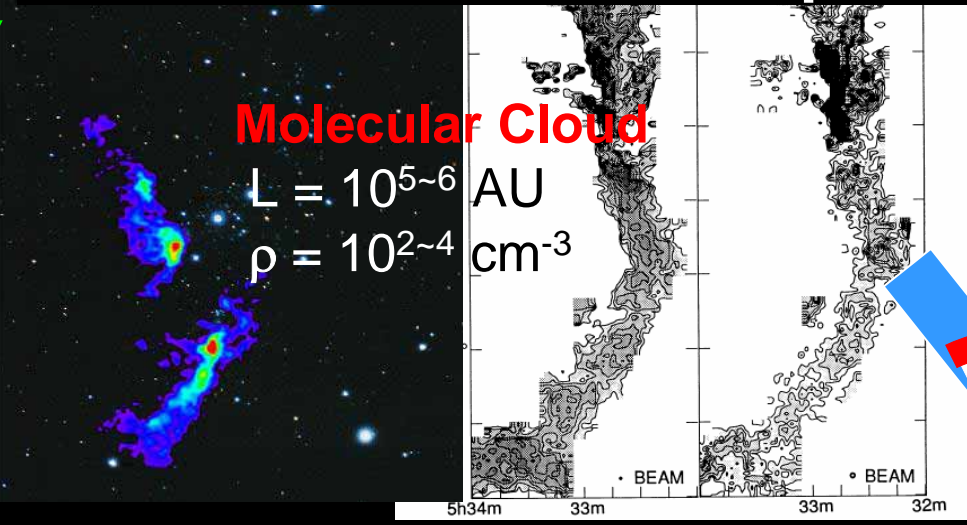
(千葉大学 先進科学センター)

(国立天文台)

Star formation process

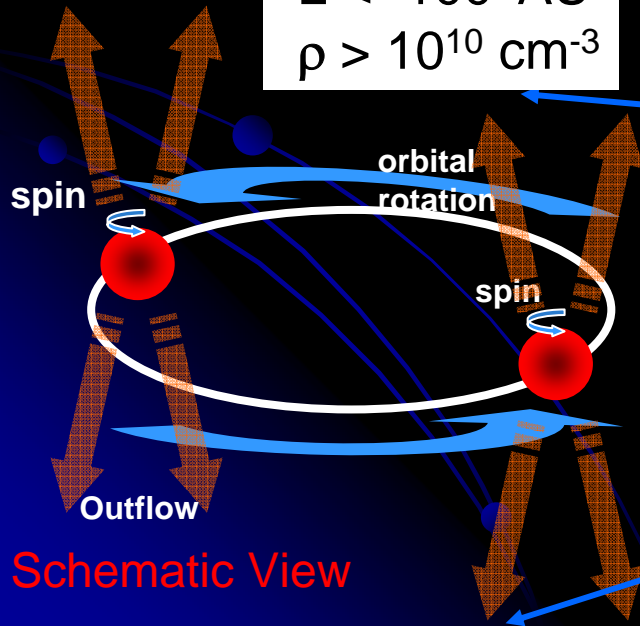
Molecular Cloud

$L = 10^{5-6}$ AU
 $\rho = 10^{2-4}$ cm⁻³

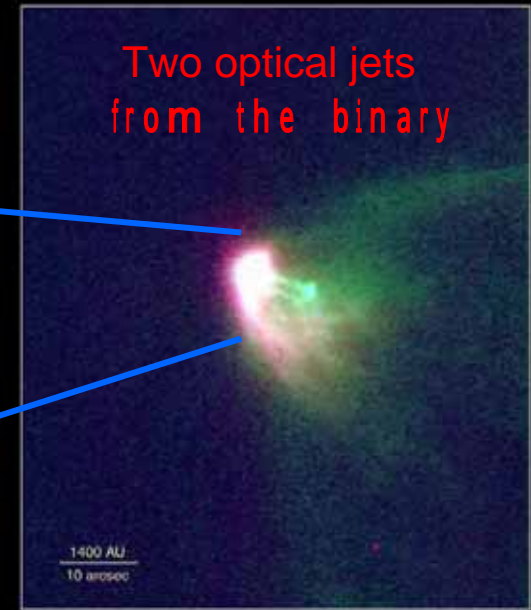
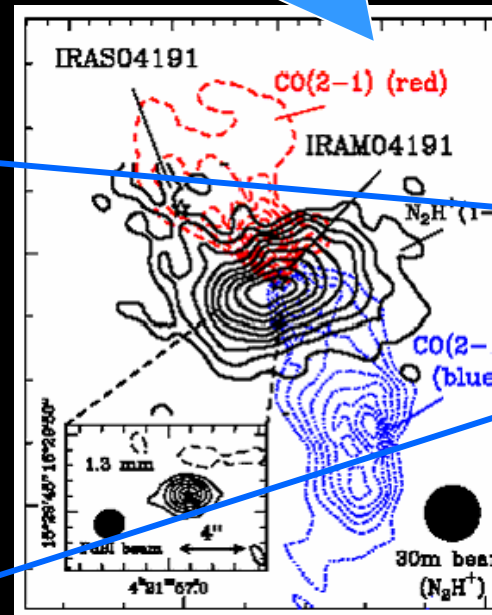


observations

$L < \sim 100$ AU
 $\rho > 10^{10}$ cm⁻³



outflow from the pre-main sequence star



Isothermal Phase

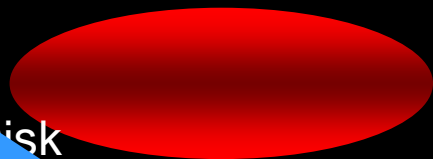
Adiabatic Phase

Molecular Cloud

- cylindrical
- magnetic Field
- rotation

$$\rho_c < 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

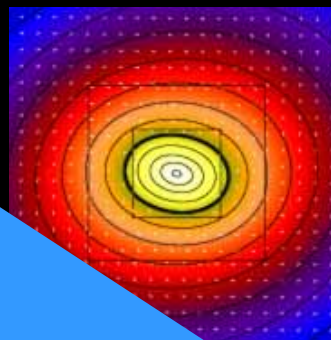
$$\rho_c > 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$



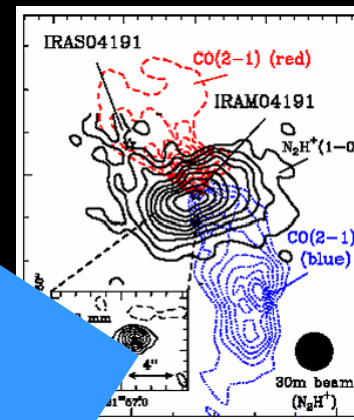
Disk

- surface density
- axis-ratio

Adiabatic Core (first core) is formed



Molecular Outflow

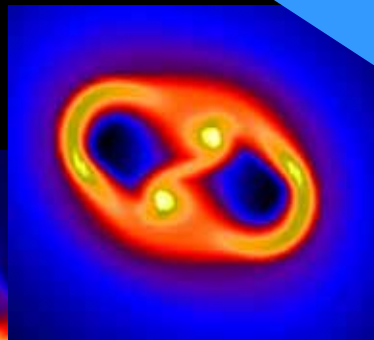


Our Study

density scale

Fragmentation

- core
- ring
- bar



$$\rho = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

$$L = 1 \sim 10^4$$

To MS star

Problems of the star (or binary) formation

観測からの示唆

1. 多くの星は連星として誕生
2. 分子雲の角運動量は形成後の星に比べて大きい $j_{\text{cloud}} \gg j_{\text{star}}$
3. 星形成領域でアウトフローが一般的に観測される
4. 分子雲は、磁場を帯び、回転している

◆ 非軸対称揺らぎの成長

- 分裂(連星形成)には、非軸対称揺らぎの成長が重要
- 非軸対称性はどのように成長するか？
- 初期の揺らぎの大きさ、磁場、回転に対する依存性は？

◆ 分子雲の磁場と回転速度

- 分子雲の収縮(星形成過程)中に磁場と回転はどのように変化するか？
- Magnetic Braking は効くのか？
- 角運動量輸送、磁束問題

◆ 分裂の条件

- 分裂はどのようにしておきるのか？
- 連星と単独星はどのように決定されるのか？

◆ アウトフロー、角運動量輸送

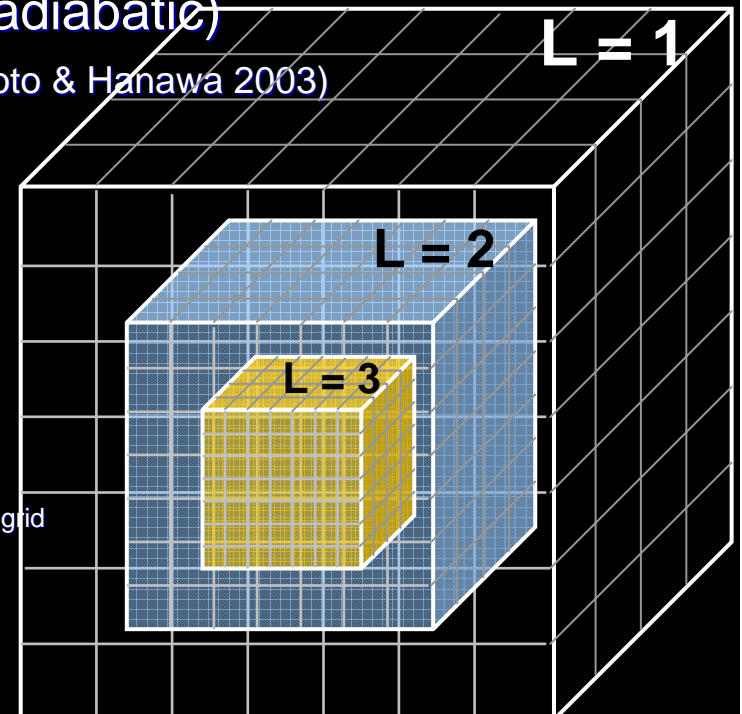
- 連星の場合、各々の星がアウトフローを駆動するのか？
- さらなるアウトフローは？
- 連星の場合の角運動量の分配(軌道、自転)は？

Numerical Method

◆ Basic Equations

$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0,$	equation of continuity
$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla P - \frac{1}{4\pi} \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B}) - \rho \nabla \phi,$	equation of motion
$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}),$	magnetic induction equation
$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho,$	Poisson equation
$P = \begin{cases} c_s^2 \rho, & \text{for } \rho \leq \rho_{\text{cri}}, \\ c_s^2 \rho_{\text{cri}} \left(\frac{\rho}{\rho_{\text{cri}}} \right)^\gamma, & \text{for } \rho > \rho_{\text{cri}}, \gamma = 7/5. \end{cases}$	isothermal phase adiabatic phase

- ◆ **Hydro:** Roe's method, polytrope (isothermal, adiabatic)
- ◆ **Self-gravity:** Multigrid Iteration Method (Matsumoto & Hanawa 2003)
- ◆ **Grid size:** 128x128x32
- ◆ **Grid level:** $L_{\text{max}}=17$ (L: Grid Level)
- ◆ **Total grid number:** 128 x 128 x 32 x 17
At the basis of the finest grid, this number of sells are corresponding to 8388608 x 8388608 x 2097152 ~ 10^{20} cells
- ◆ **Generation condition of a new grid:**
We generate the new grid before Jeans Condition is violated
 $h < \lambda_j$ (h: mesh length λ_j :Jeans length) Jeans length should be expressed with at least 8 grid
- ◆ **VPP5000@NAOJ:**
Vector type Super Computer (60 hr. x 70 models)

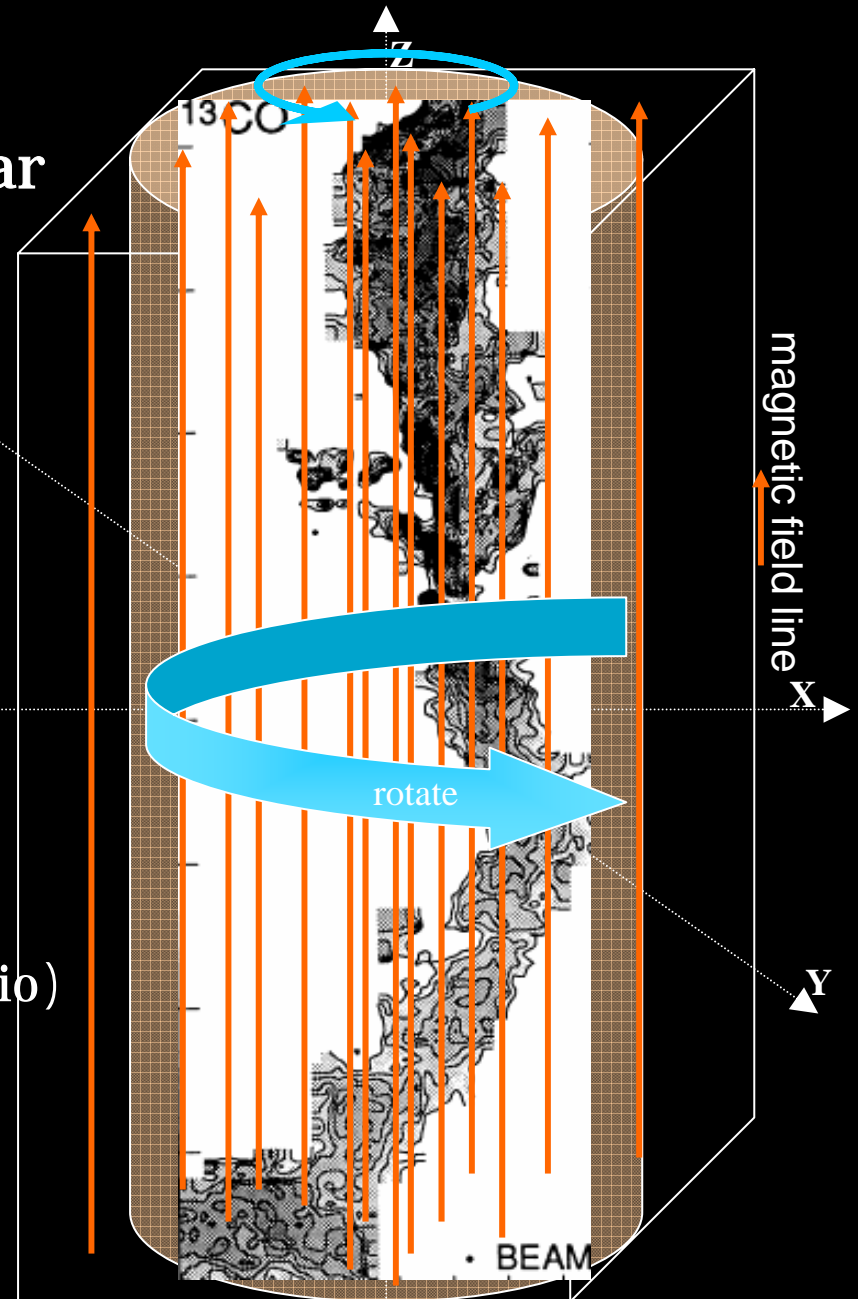


Model

- ◆ Cylindrical magnetized molecular cloud in hydrostatic equilibrium

$$\rho(r) = \rho_c \left(1 + \frac{r^2}{8H^2}\right)^{-2}$$
$$v_\phi(r) = r\Omega_c \left(1 + \frac{r^2}{8H^2}\right)^{-1/2}$$
$$B_z(r) = B_c \left(1 + \frac{r^2}{8H^2}\right)^{-1}$$
$$H^2 = \frac{c_s^2 + B_c^2/8\pi\rho_c}{4\pi G\rho_c - 2\Omega_c^2}$$

- ◆ magnetic field strength :
= $B_c^2/(4\pi\rho_c c_s^2)$
(the magnetic-to-thermal pressure ratio)
- ◆ rotation : (angular speed)
- ◆ Central density : $\rho_c = 100 \text{ cm}^{-3}$
- ◆ Temperature : $T = 10 \text{ [K]}$



Model

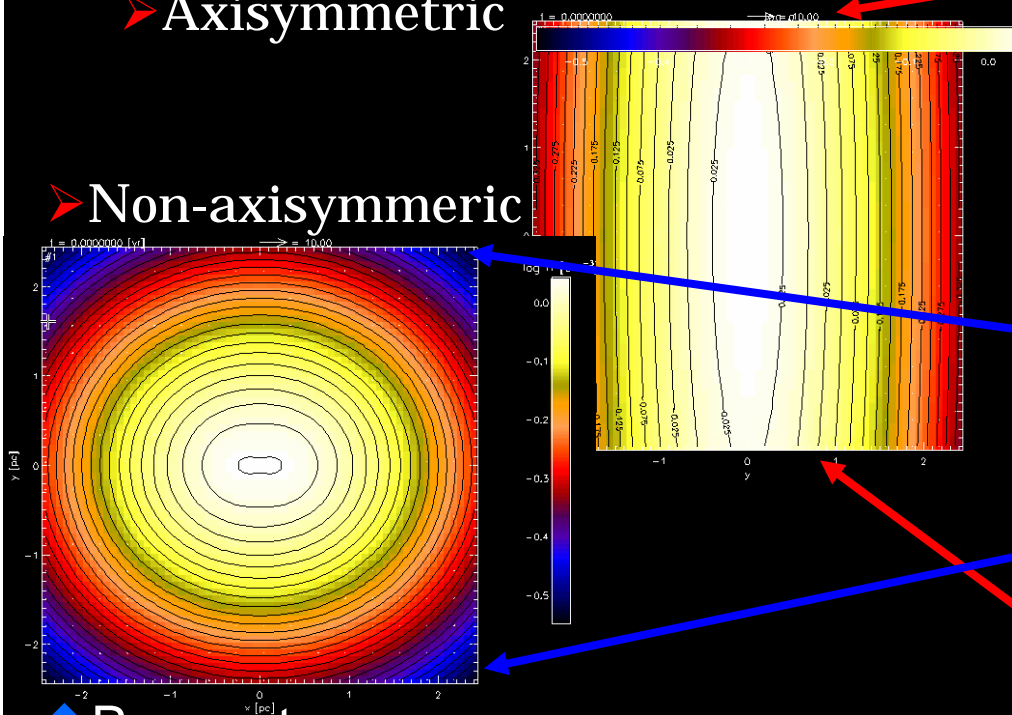
◆ Scale length

- Box size: $\sim 10^6$ [AU]
- Total mass: $M = \sim 20 M_{\text{sun}}$

◆ Perturbations

➤ Axisymmetric

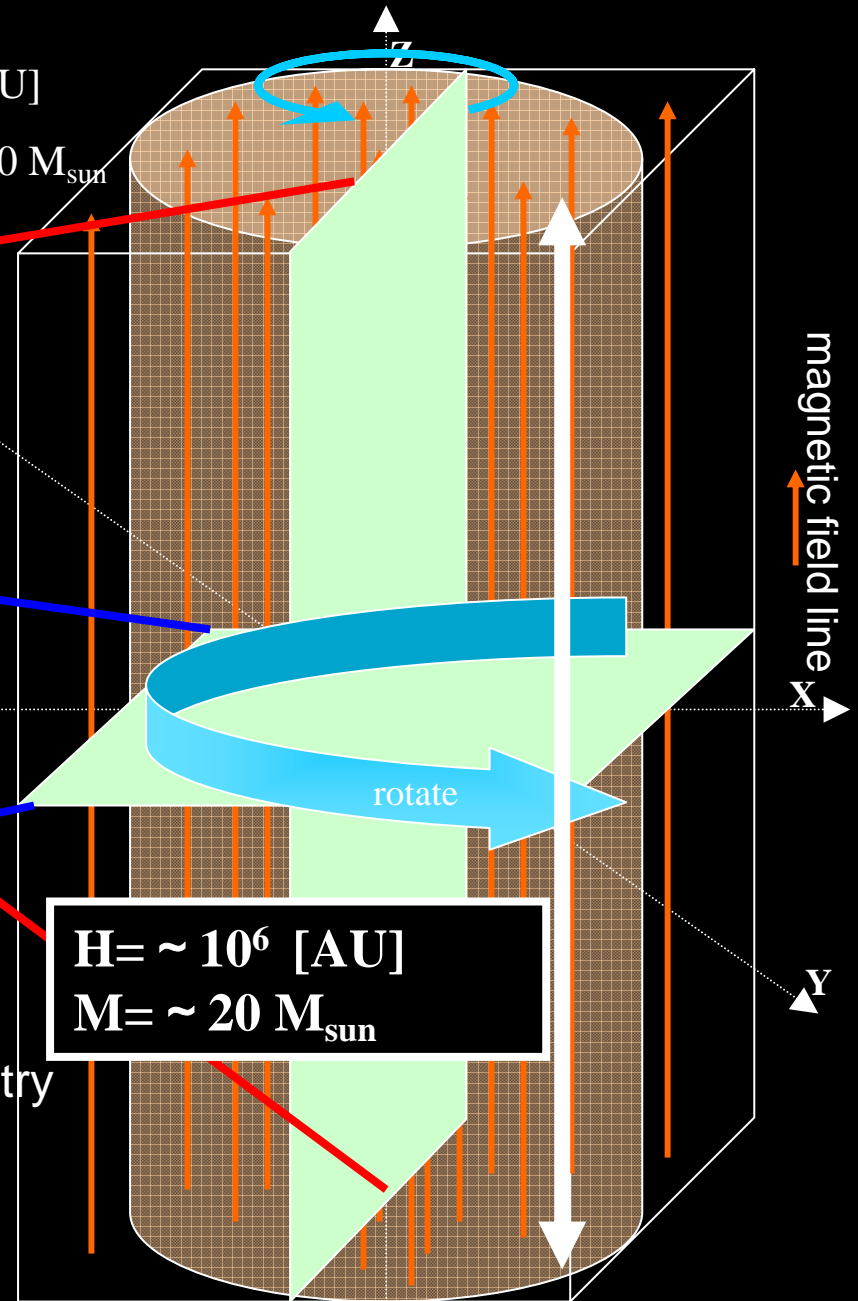
➤ Non-axisymmetric



◆ Parameters

- $A_{m2} = 0, 10^{-3}, 10^{-2}, 0.1, 0.2, 0.3$: non-axisymmetry
- $\omega = 0, 0.01, 0.1, 1, 5$: magnetic field strength
- $\Omega = 0, 0.1, 0.5, 0.7$: rotation speed

we calculate 60 models with different parameters



Results

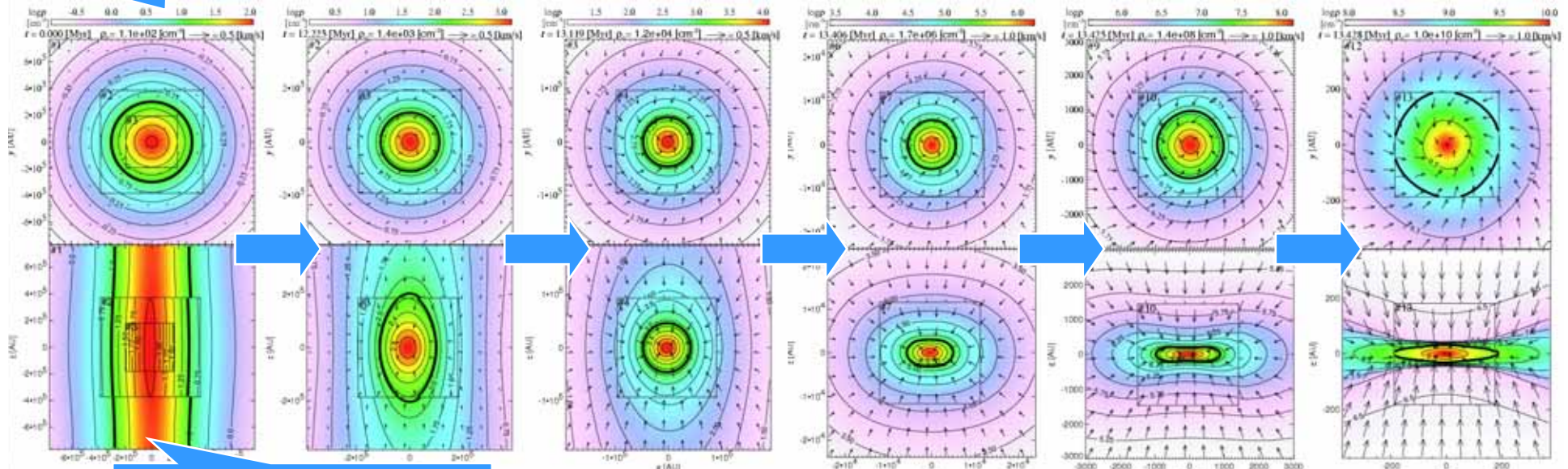
等温段階での進化($\rho_c < 10^{10} \text{ cm}^{-3}$)

典型的な進化の例 (1)

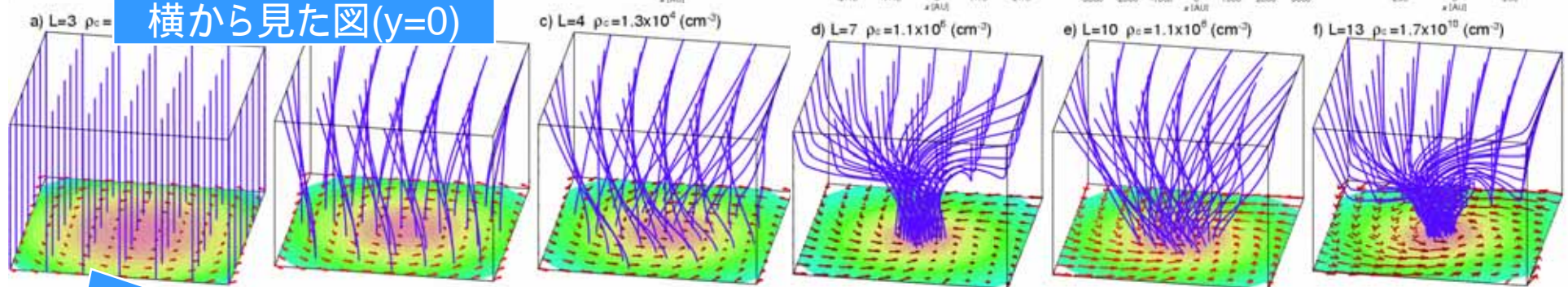
$\alpha=0.01, \omega=0.1, A_{m2}=0.01$

(初期に磁場が弱く、緩やかに回転、非軸対称揺らぎ小さい)

上から見た図(z=0)



横から見た図(y=0)



磁力線

左から密度: $10^2, 10^3, 10^4, 10^6, 10^8, 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Grid: L=1, 2, 3, 6, 9, 12 段目

カラー: ガス密度

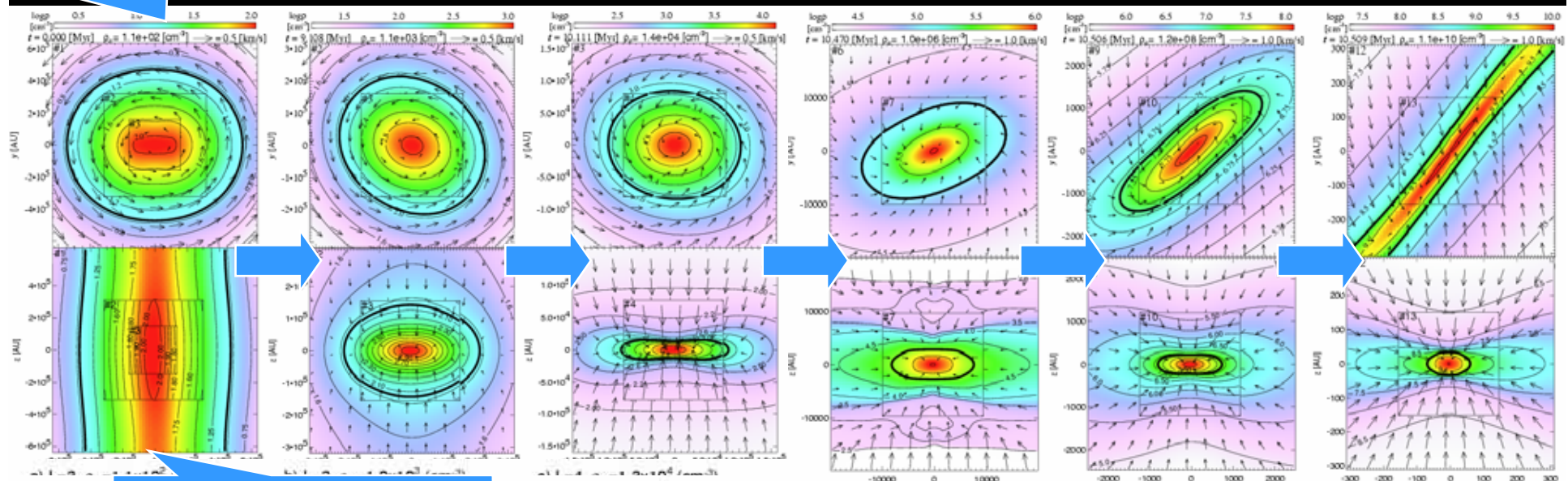
緩やかにdisk形成
非軸対称性はほとんど成長無し
磁力線を強く巻き込む

典型的な進化の例 (2)

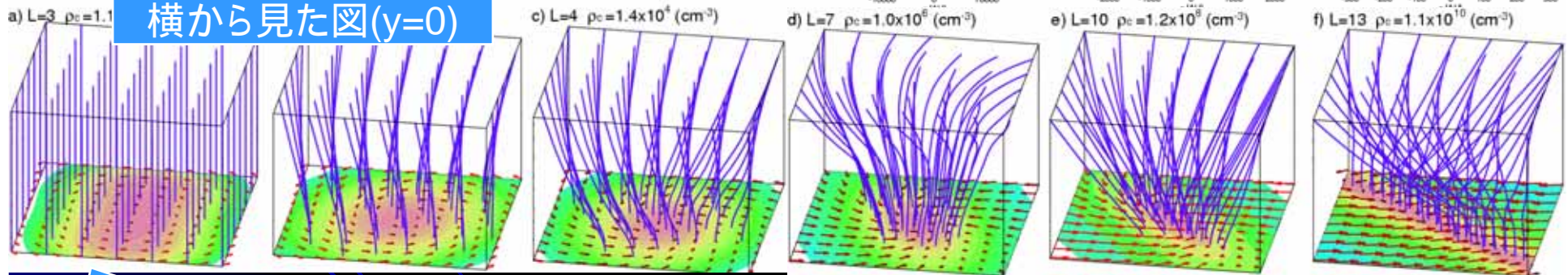
$\alpha=1.0$, $\omega=0.5$, $A_{m2}=0.2$

(初期に磁場が強く、高速で回転、非軸対称揺らぎ大きい)

上から見た図(z=0)



横から見た図(y=0)



磁力線

左から密度: 10^2 , 10^3 , 10^4 , 10^6 , 10^8 , 10^{10} cm^{-3}

Grid: L=1, 2, 3, 6, 9, 12 段目

カラー: ガス密度

急速なdisk形成
等温段階でのバー形成
バー形状の磁力線

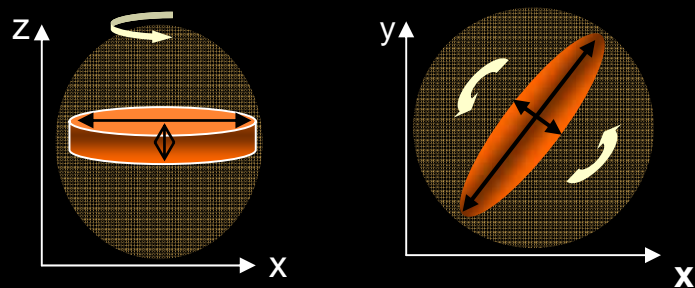
扁平率(disk)と 軸比(bar)の成長

等温段階での形状の違いは何に依存しているか？

(分裂には非軸対称性が必要)

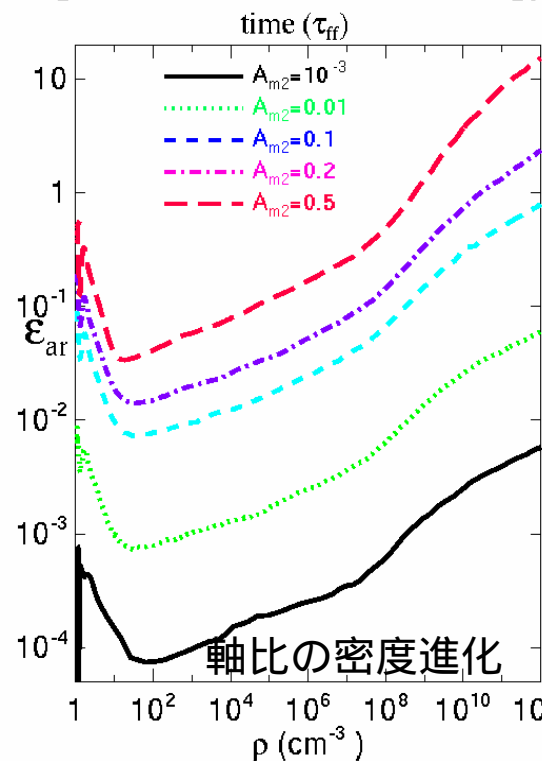
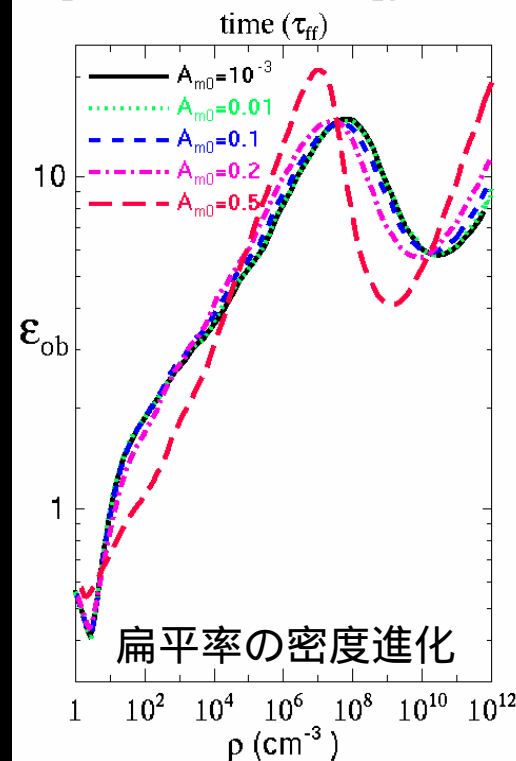
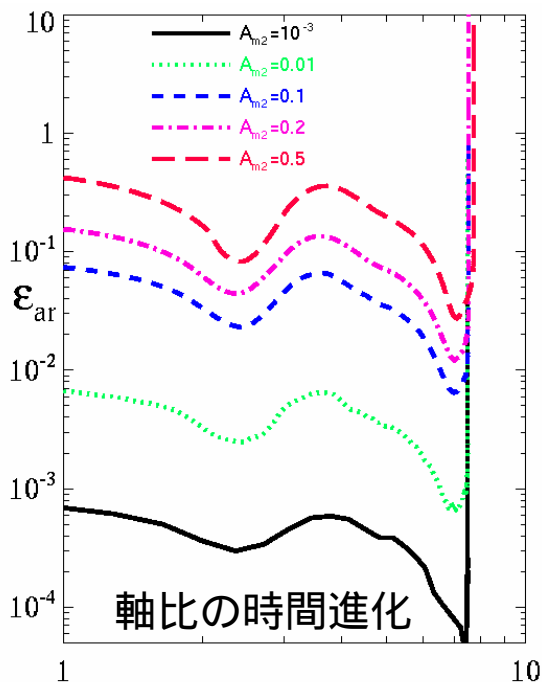
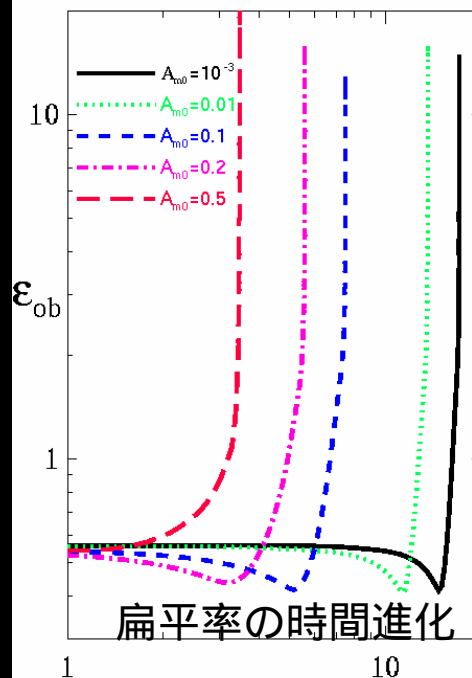
$$\text{oblateness} \equiv \frac{\sqrt{h_{\text{long}} h_{\text{short}}}}{h_z}$$

$$\text{axis-ratio} \equiv \frac{h_{\text{long}}}{h_{\text{short}}}$$



- ▶ 扁平率: diskの度合いを示す (大きいほど薄い円盤)
- ▶ 軸比: バーの成長具合を示す (大きいほど細長い棒)

図は異なる初期値(軸対称、非軸対称)に対する扁平率、軸比の成長
初期値に対する依存性は無い
進化のスピードが異なるだけ



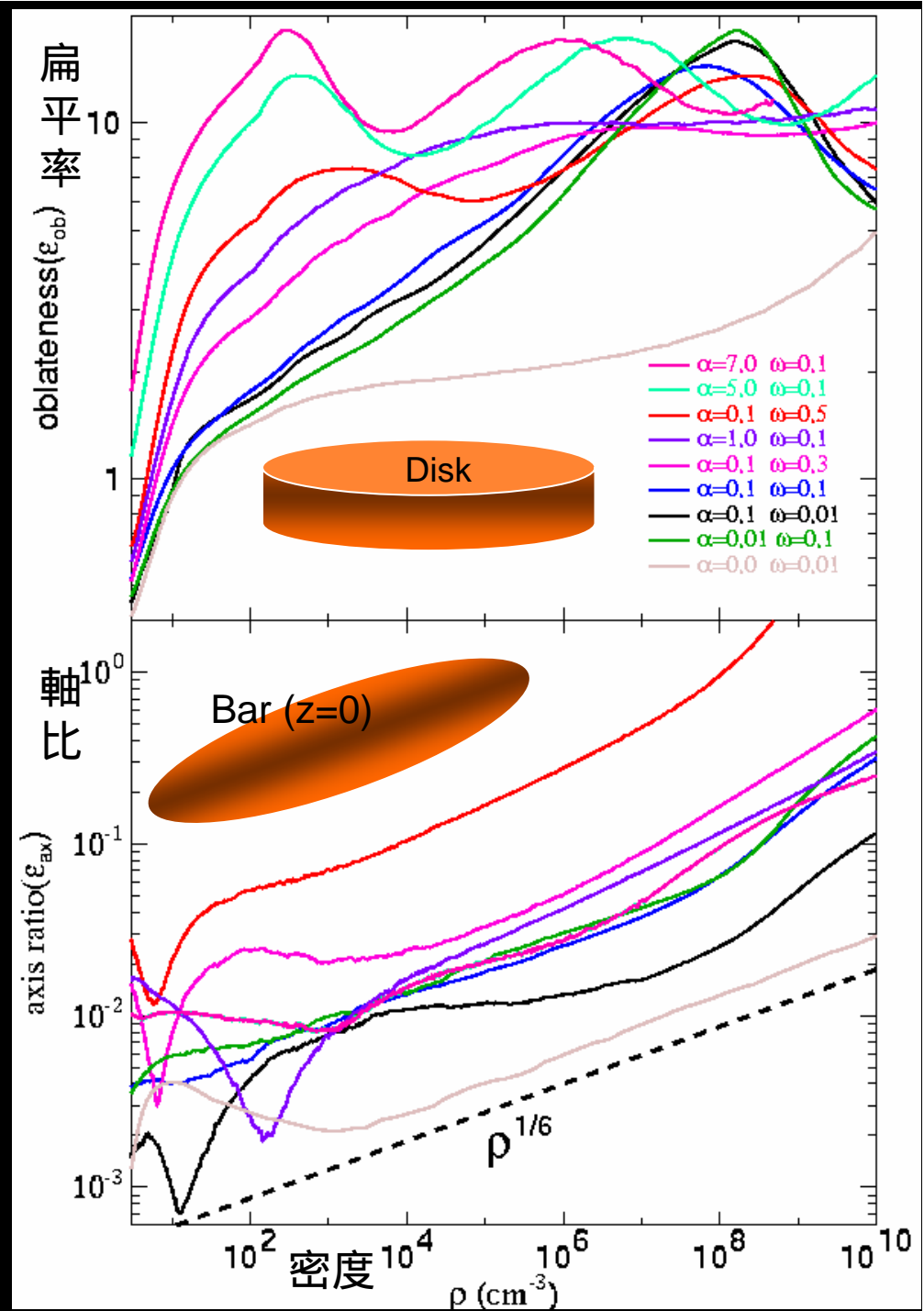
磁場の強さ、回転速度による 扁平率と軸比の成長

- 初期の磁場、回転速度が大きい程く disk を形成する (磁気圧、遠心力)
- 非軸対称性の成長率は磁場、回転に依存しない
 - ・ Matsumoto & Hanawa 1999 (回転あり、磁場なし)
 - ・ Nakamura et al 1997 (磁場あり、回転無し)
 - ・ 磁場、回転の両方がある場合も同じ結果
- 非軸対称揺らぎは、disk を形成してから成長をはじめる

まとめ

磁場、回転

初期の disk 形成
非軸対称揺らぎの成長
等温段階でのバーの形成



分子雲コアの磁場と回転速度の成長

解析的には

角運動量保存、磁束の保存から

$$\frac{j}{M} = \text{const} \quad \frac{\Phi}{M} = \text{const} \quad \left(M = \frac{4\pi r^3 \rho}{3} \right)$$

球対称 Collapse の場合

$$\frac{j}{M} = \frac{r^2 \Omega}{4\pi r^3 \rho / 3} = \text{const} \rightarrow \Omega \propto \rho^{2/3} \quad \frac{\Phi}{M} = \frac{\pi r^2 B_z}{4\pi r^3 \rho / 3} = \text{const} \rightarrow B_z \propto \rho^{2/3}$$

よって

$$\frac{\Omega}{\tau_{\text{ff}}} \propto \frac{\Omega}{\sqrt{\rho}} \propto \rho^{1/6} \quad \sqrt{\frac{P_{\text{mag}}}{P_{\text{th}}}} \propto \frac{B}{\sqrt{\rho}} \propto \rho^{1/6}$$

円盤状 (disk) Collapse の場合

$$M = \pi r^2 \Sigma \quad \Sigma = \rho H \quad H = \frac{c_s}{\sqrt{2\pi G \rho}}$$

$$\frac{j}{M} = \frac{\pi r^2 \Omega}{\pi r^2 \Sigma} = \text{const} \rightarrow \Omega \propto \rho^{1/2} \quad \frac{\Phi}{M} = \frac{\pi r^2 B_z}{\pi r^2 \Sigma} = \text{const} \rightarrow B_z \propto \rho^{1/2}$$

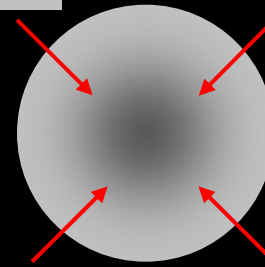
よって

$$\frac{\Omega}{\tau_{\text{ff}}} \propto \frac{\Omega}{\sqrt{\rho}} \propto \text{const} \quad \sqrt{\frac{P_{\text{mag}}}{P_{\text{th}}}} \propto \frac{B}{\sqrt{\rho}} \propto \text{const}$$

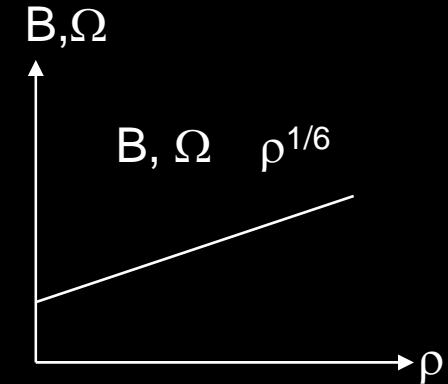
磁場の強さを基準にとると

角速度: $\omega / B = \text{const}$

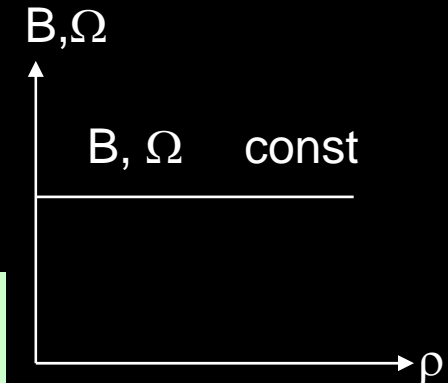
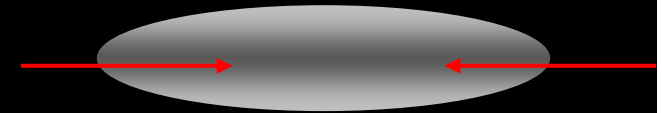
密度: $\rho^{1/2} / B = \rho^{-1/6}$ (球対称崩壊) $\rho / B = \text{const}$ (円盤崩壊)



球対称Collapse



Disk Collapse



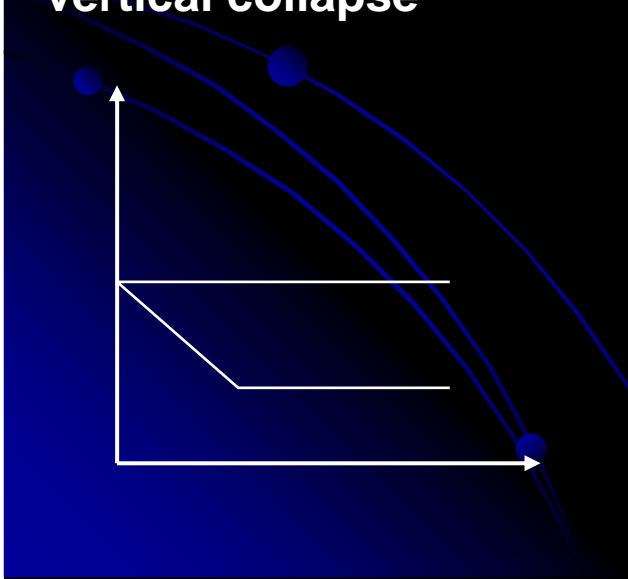
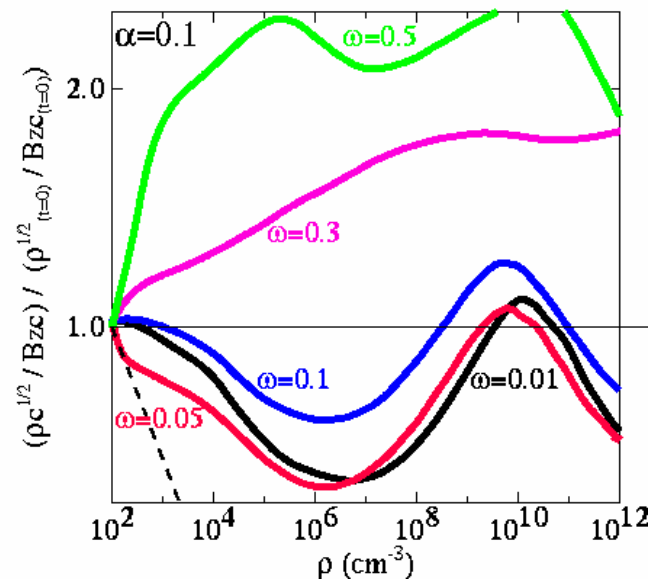
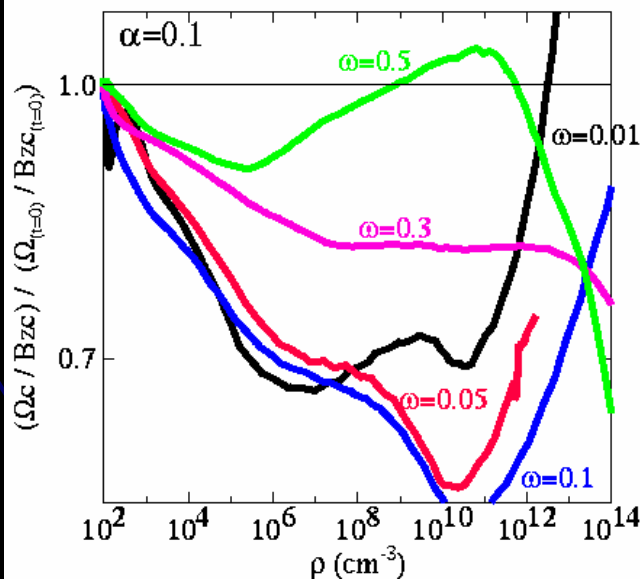
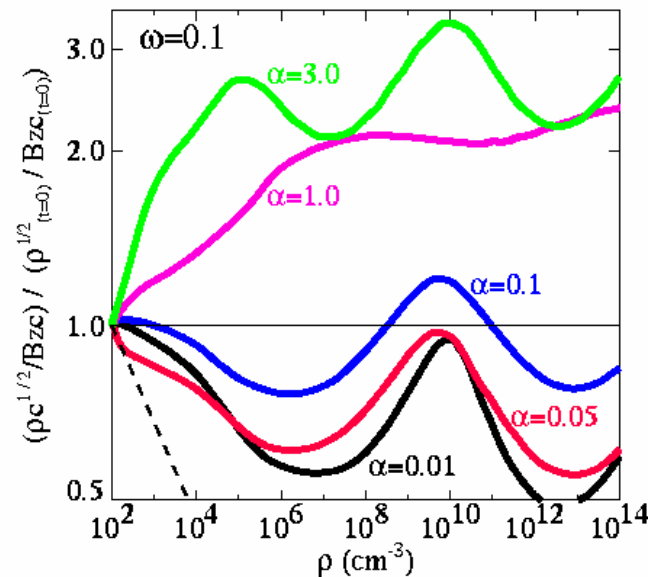
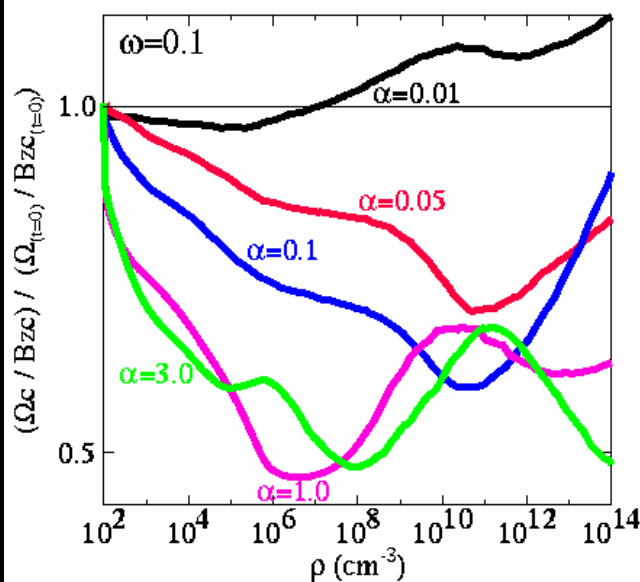
パラメータごとの 磁場と回転速度の成長

角速度: $\omega / B = \text{const}$
 密度: $\rho^{1/2} / B = \rho^{-1/6}$ (球対称崩壊)
 $\rho / B = \text{const}$ (円盤崩壊)

➤ 磁場が強い場合、角速度は大きい場合は、上記解と合わない

➤ 磁場が強い場合は、magnetic brakingによる角運動量輸送

➤ 回転、磁場が強い場合は、動径方向の収縮が抑えられ vertical collapse



コアが持つ磁場と角速度

磁場と回転速度は右の値に収束する

$$\text{Blue Box} + 0.32 \text{ Red Box} = 0.04$$

3種類の進化の軌跡

(1) spherical collapse

$$\omega/\rho^{1/2}, B/\rho^{1/2}, \rho^{1/6}$$

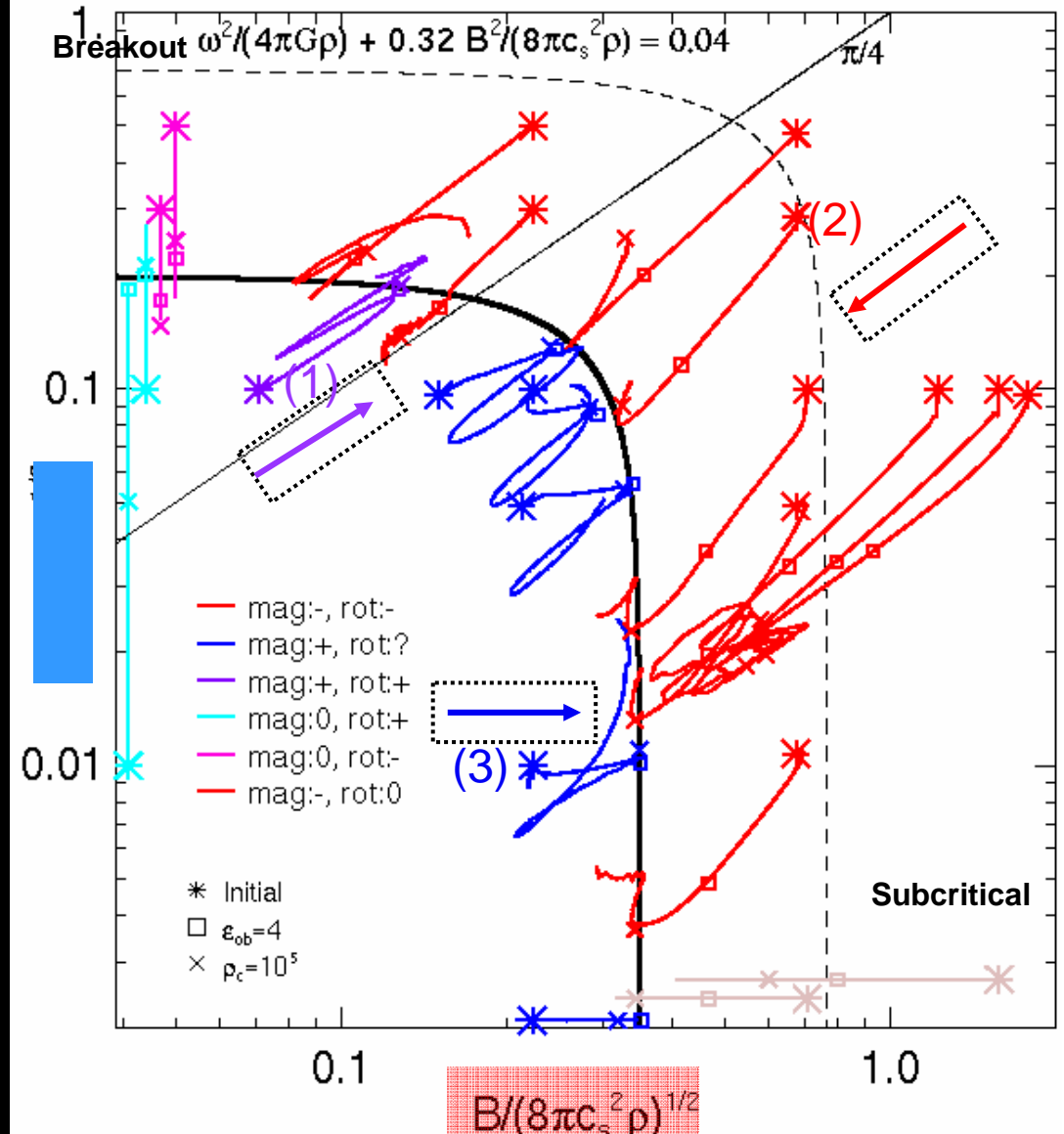
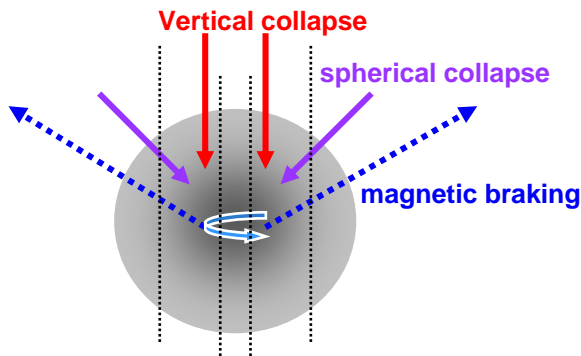
(2) Vertical collapse

ρ : increase $B, \omega \approx \text{const}$
(for magnetic pressure or centrifugal force)

(3) spherical collapse

+ magnetic braking

$$B/\rho^{1/2}, \rho^{1/6}; \omega \approx \text{const}$$



パラメータの違いによる分裂のパターンの違い

断熱段階でのコアの形を表示

X軸: 初期の磁場の強さ

Y軸: 初期の回転速度の大きさ

Z軸: 初期の非軸対称揺らぎの大きさ

z=0
plane

ω

$A_{m2}=0$

$A_{m2}=0.01$

$A_{m2}=0.2$

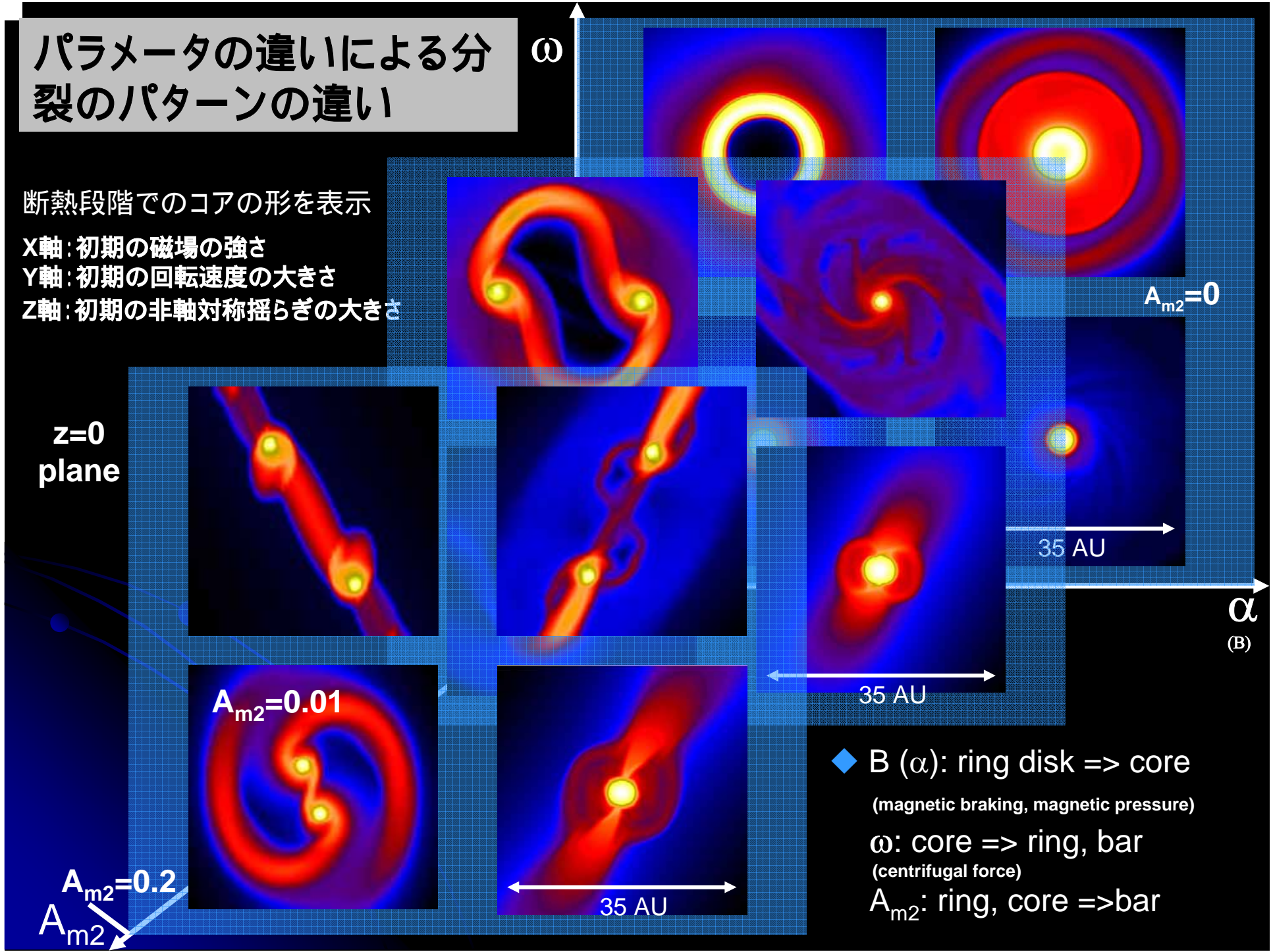
35 AU

35 AU

35 AU

α
(B)

- ◆ B (α): ring disk => core
(magnetic braking, magnetic pressure)
- ω : core => ring, bar
(centrifugal force)
- A_{m2} : ring, core => bar



分裂条件と分裂パターンの分類

軸比と扁平率の進化の図

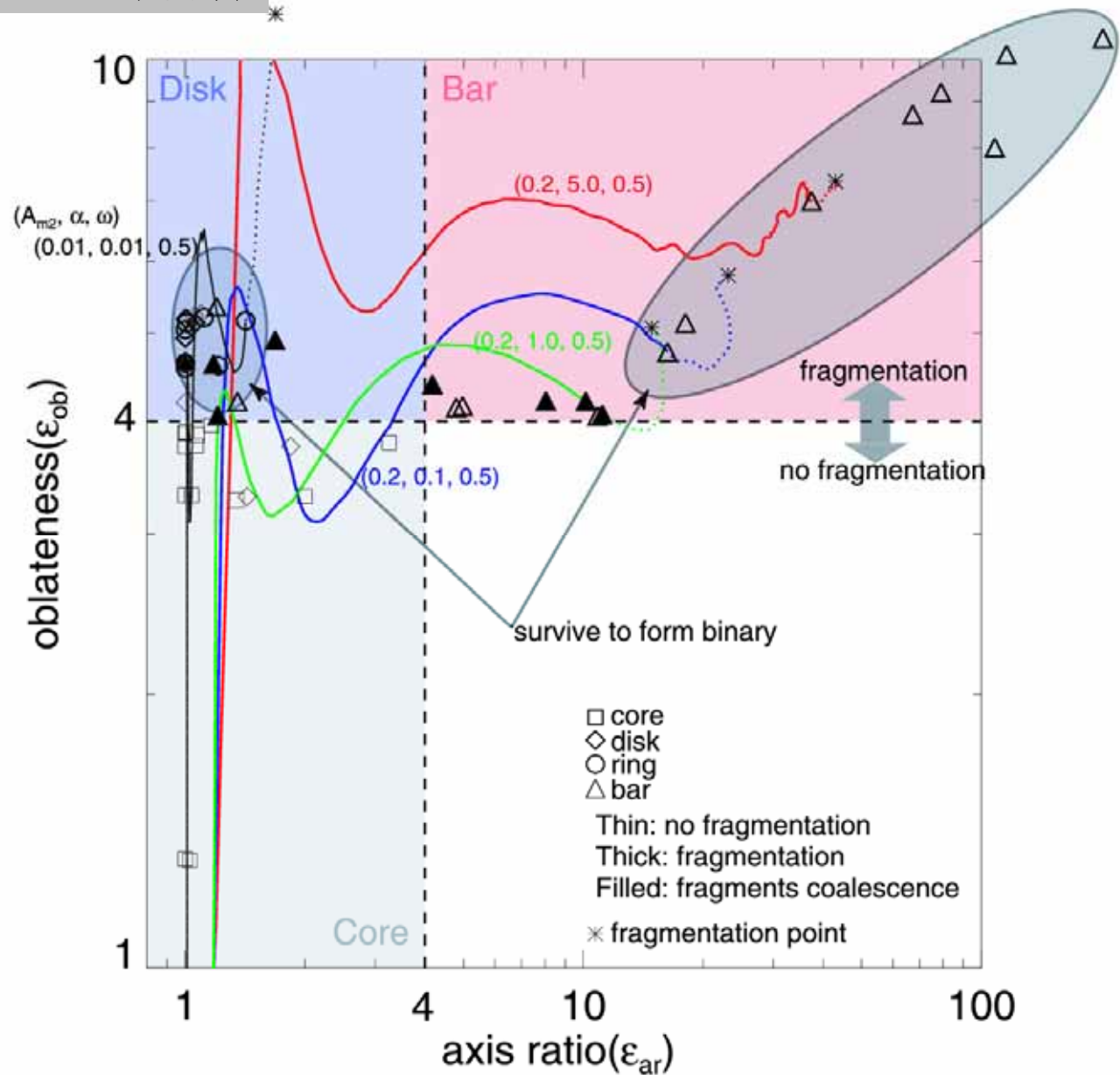
- ・横軸: 軸比 縦軸: 扁平率
- ・4本の線は進化の軌跡
- ・シンボルの場所は等温段階最後の軸比と扁平率の値
- ・シンボルの形は分裂のパターン
- ・影の部分(右側)は連星として生き残ったもの
- ・60 modelをプロット

分裂片の分類

- コア: 分裂無し
- リング: 分裂、軸比2以下
- バー: 分裂、軸比2以上

- ◆ **分裂条件:**
等温段階で扁平率が4以上 (1:4の薄い円盤)
- ◆ **分裂片が生き残る条件:**
軸比が2以下 (ring)
or 10以上 (bar)

$$\epsilon_{ob} > 4 \text{ and } \epsilon_{ar} < 2 \text{ or } > 10$$



(Machida, Matumoto & Tomisaka 2004)

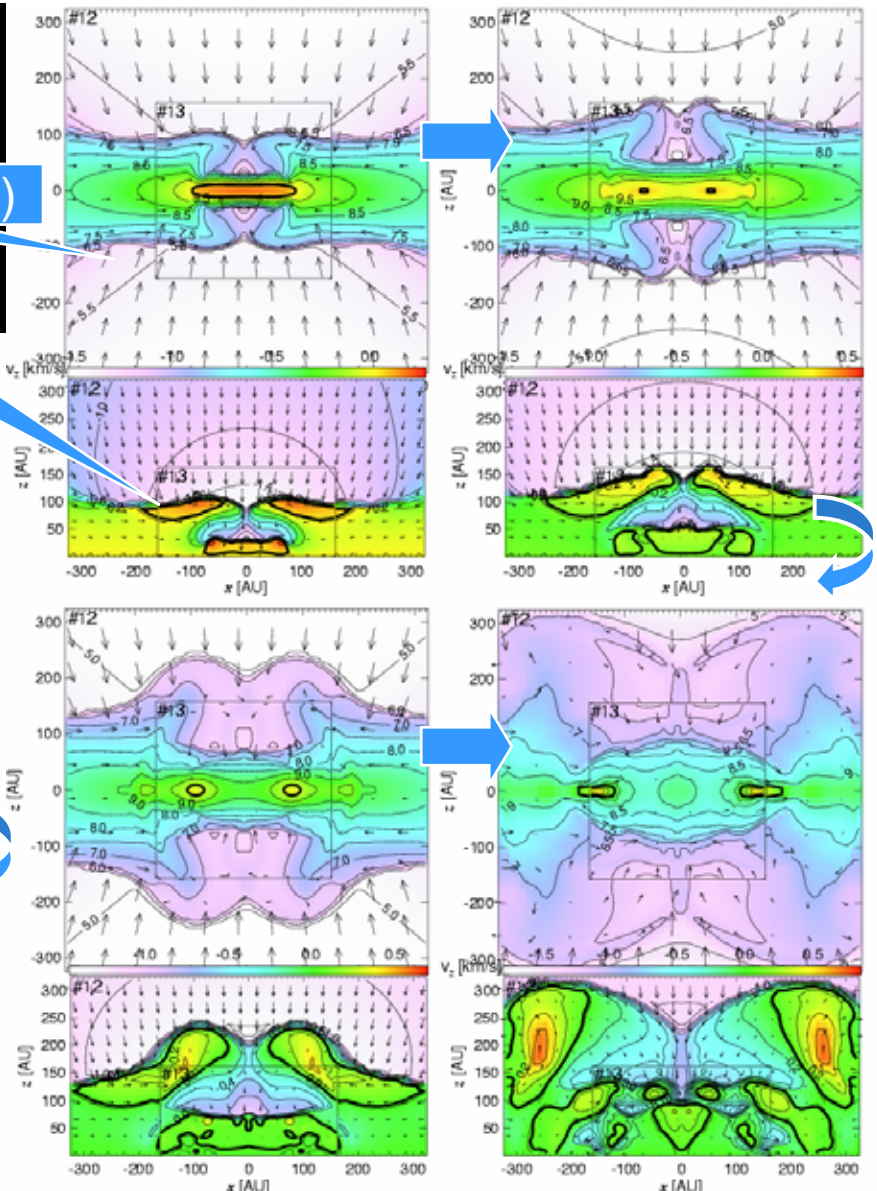
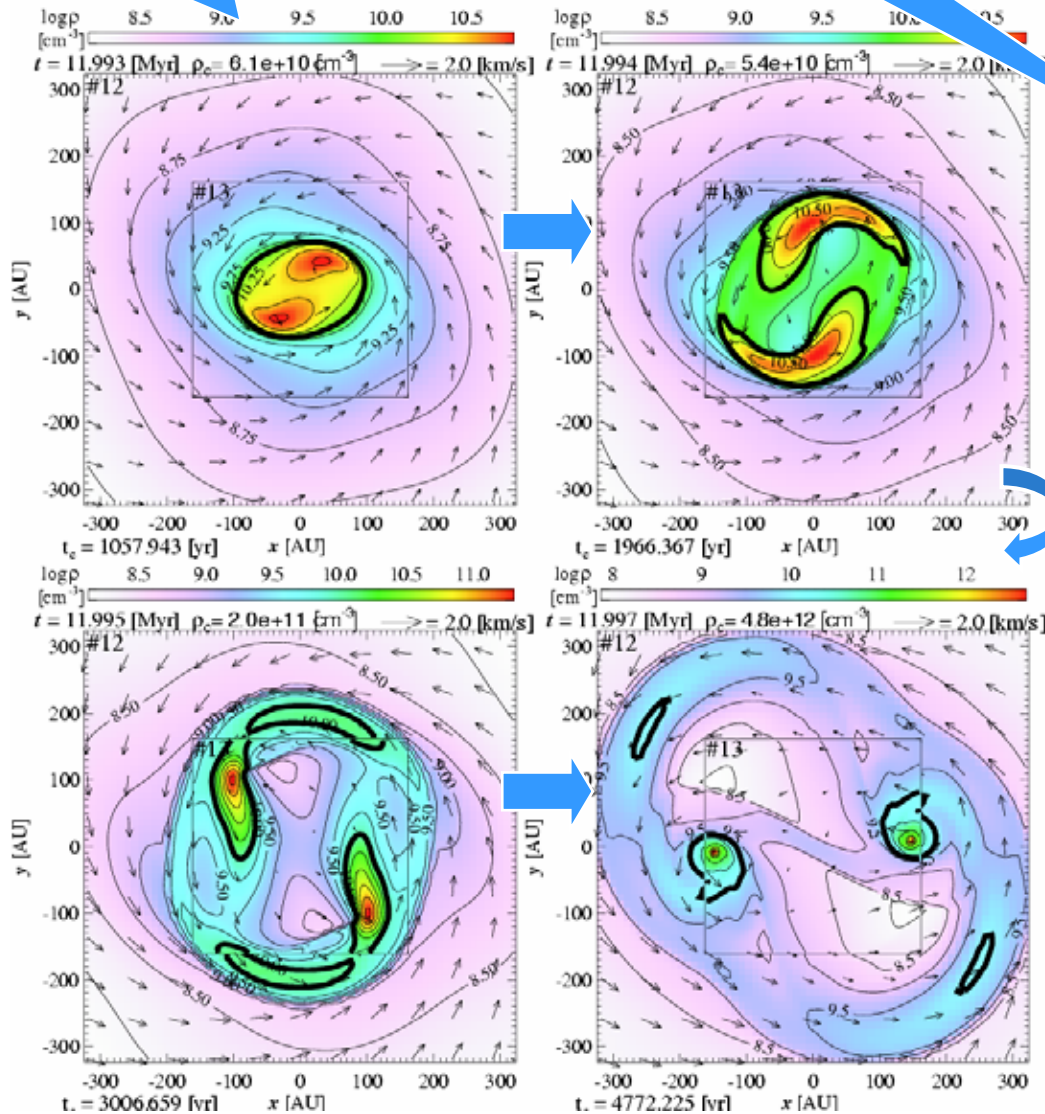
分裂の分類 (1) (リング分裂)

断熱段階
($\rho_c > 10^{10} \text{ cm}^{-3}$)

横から見た図(y=0)

上から見た図(z=0)

アウトフロー



- 分裂片は外側に移動
- 広範囲、弱いアウトフロー
- リング残骸、分裂片からのアウトフロー

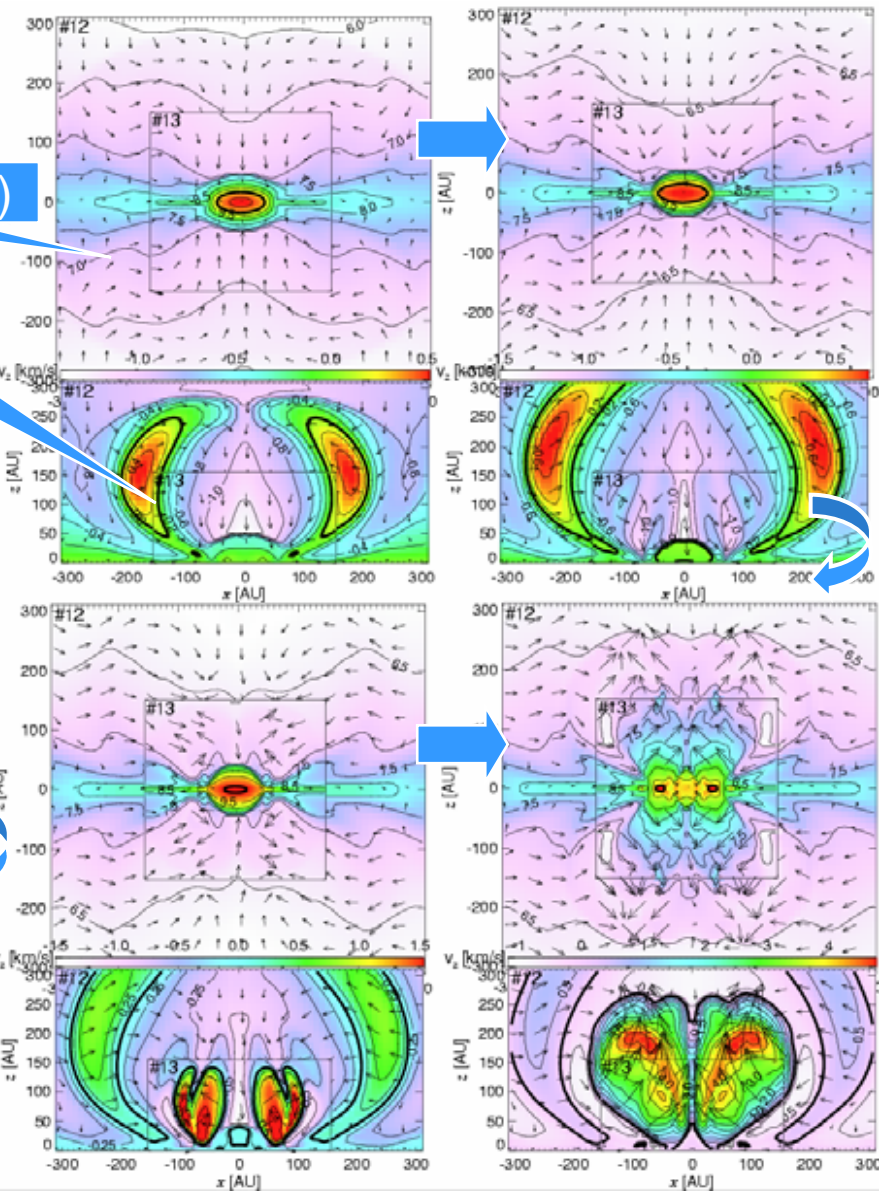
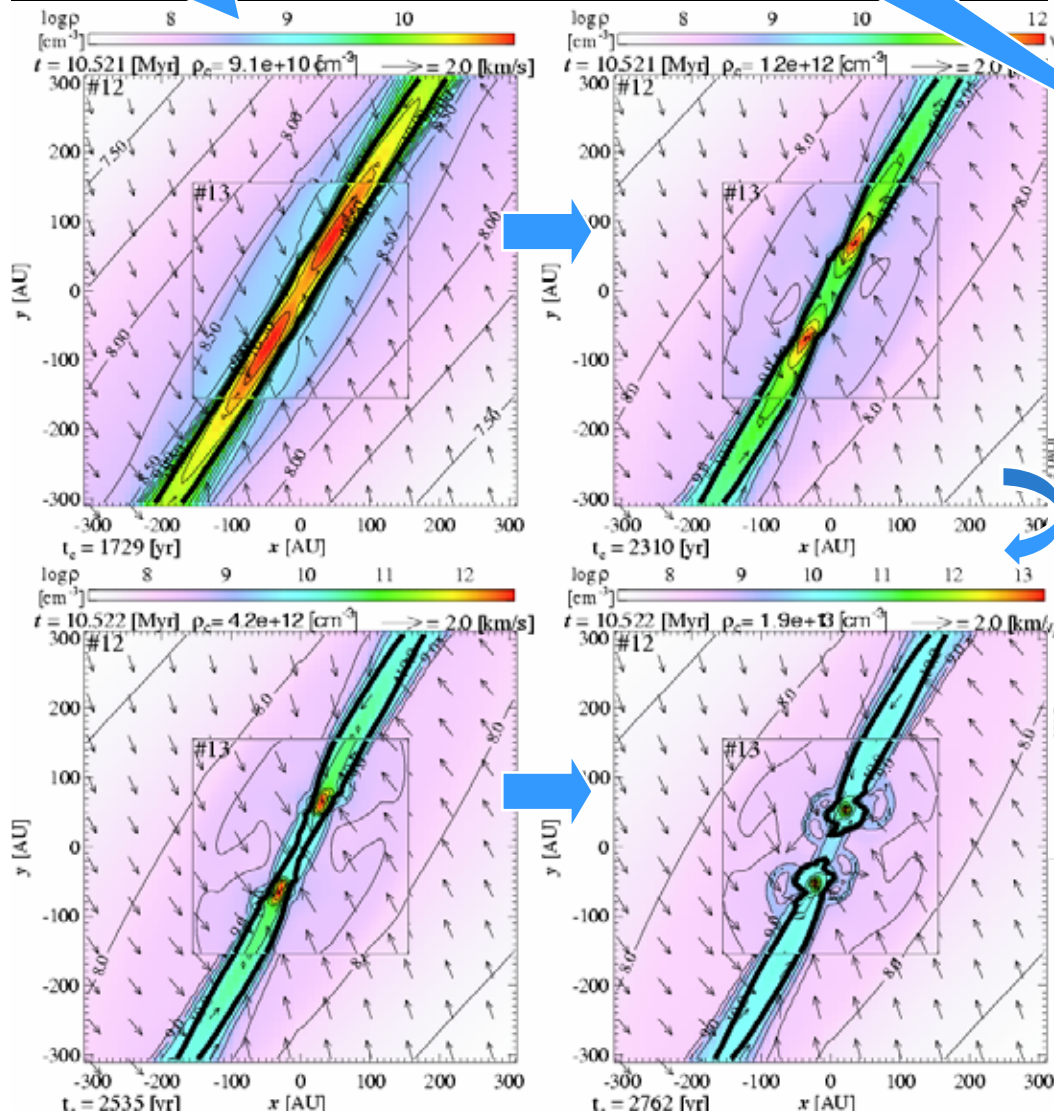
分裂の分類 (2) (バー分裂)

断熱段階
($\rho_c > 10^{10} \text{ cm}^{-3}$)

横から見た図(y=0)

上から見た図(z=0)

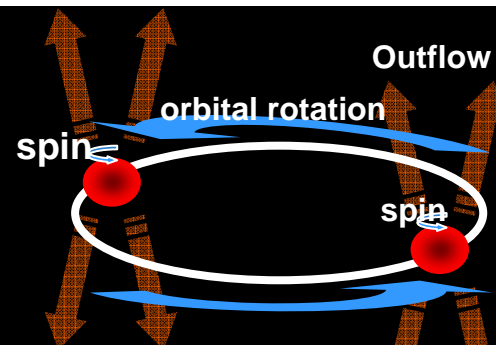
アウトフロー



- 分裂片は中央に移動
- 狭い領域、強いアウトフロー
- バー残骸、分裂片からのアウトフロー

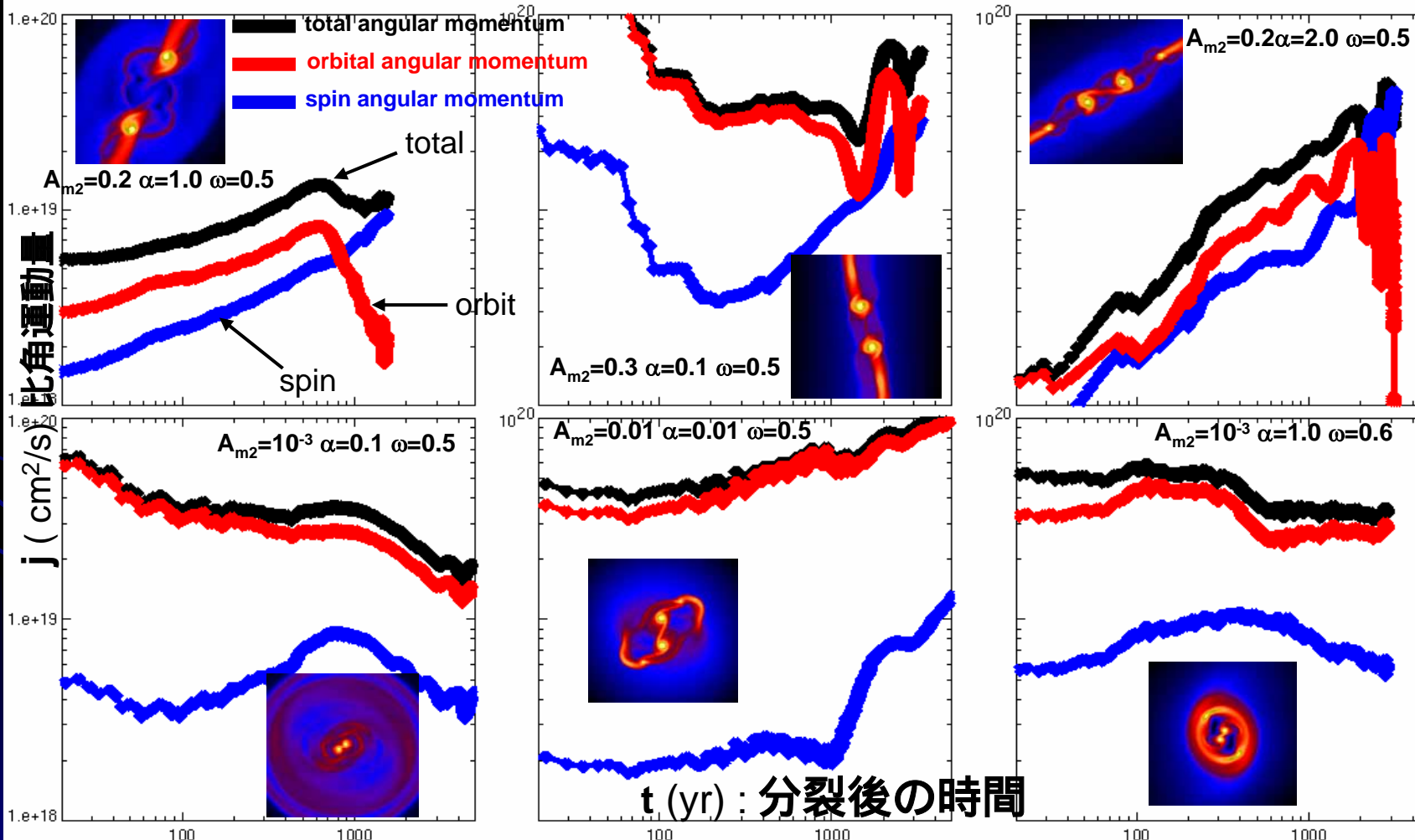
分裂のタイプによる角運動量再分配

分裂のパターンによって軌道角運動量と自転角運動量への分配が異なる



bar $j_{\text{spn}}/j_{\text{orb}} \sim 1.0$ (upper panels)

バー
分裂
=>



リング
分裂
=>

ring $j_{\text{spn}}/j_{\text{orb}} \sim 0.1$ (lower panels)

Summary

3D MHD Nested Grid simulationを用いて連星形成について研究した

◆ 非軸対称揺らぎの成長

- 非軸対称揺らぎの成長率は初期の揺らぎの大きさ、磁場、回転に依存しない
- 非軸対称揺らぎは、disk形成後成長を始める

◆ 分子雲の磁場と回転速度

- 分子雲が持つ磁場と回転速度はある値に収束する
- 磁場強:magnetic braking 磁場、回転強:vertical collapse

◆ 分裂の条件

- 等温段階の形状によって決定
- 扁平率4以上の薄い円盤
- 軸比2以下のリングまたは10以上の細長いバーが連星として生き残る

◆ アウトフロー、角運動量輸送

- 二種類のアウトフロー:バー、リングの残骸、分裂片
- リング 分裂 角運動量 軌道:大, 自転:小, アウトフロー:広い, 弱い
- バー分裂 角運動量 軌道:小, 自転:大, アウトフロー:狭い, 強い