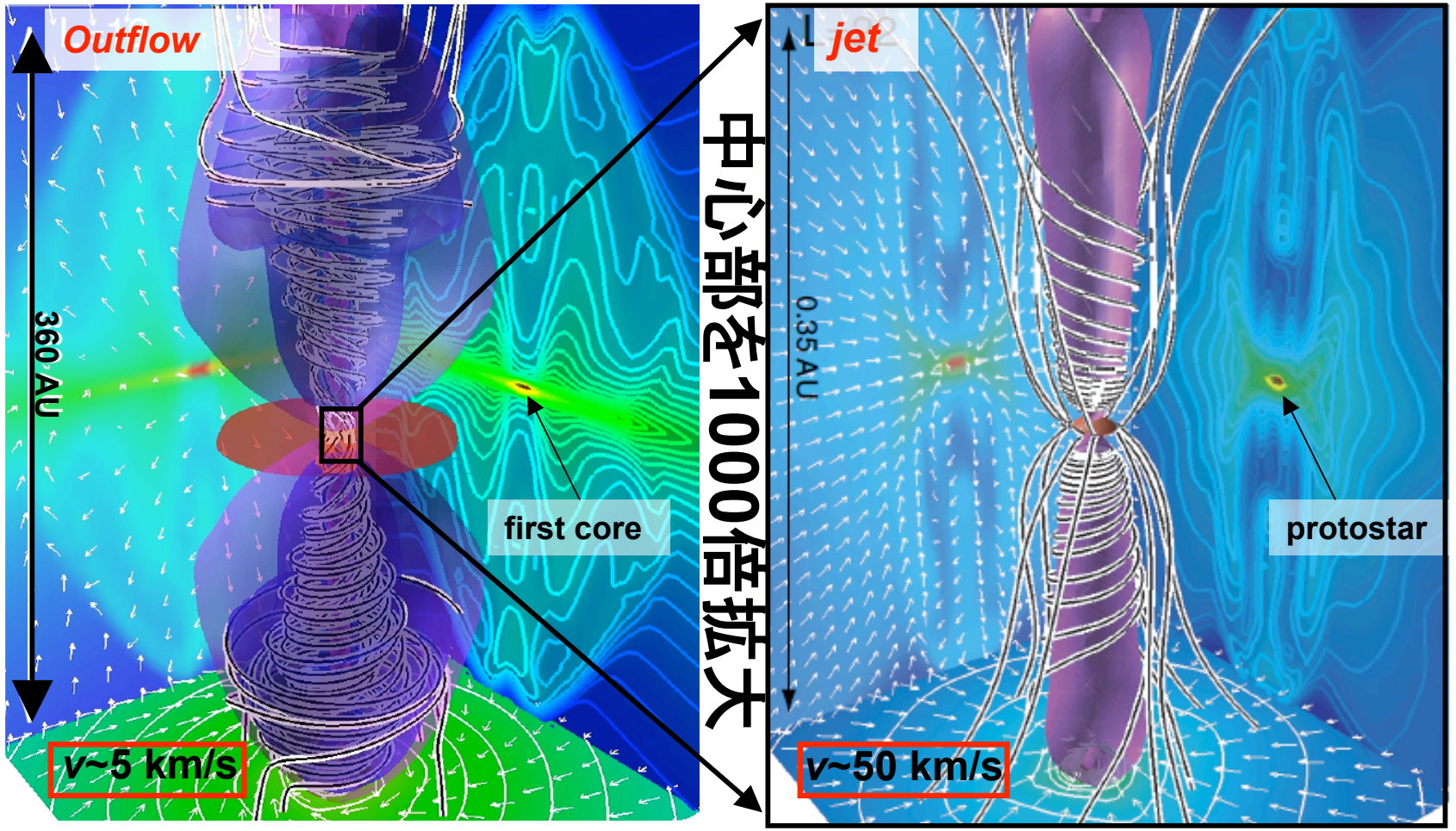
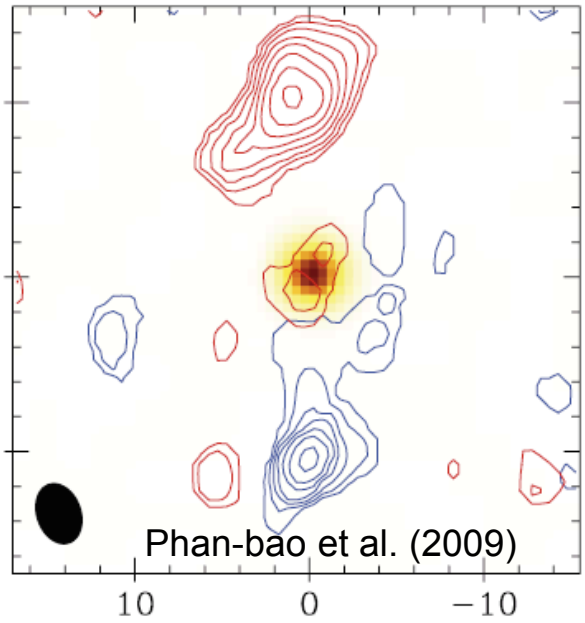
原始星形成過程でのジェットの駆動機構



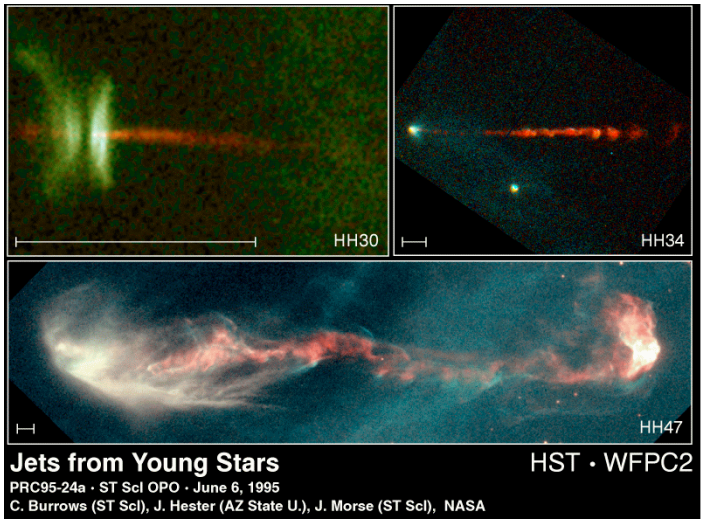
町田正博、犬塚修一郎(京大)、松本倫明(法政大)

ジェット・アウトフローは星形成で普遍的現象

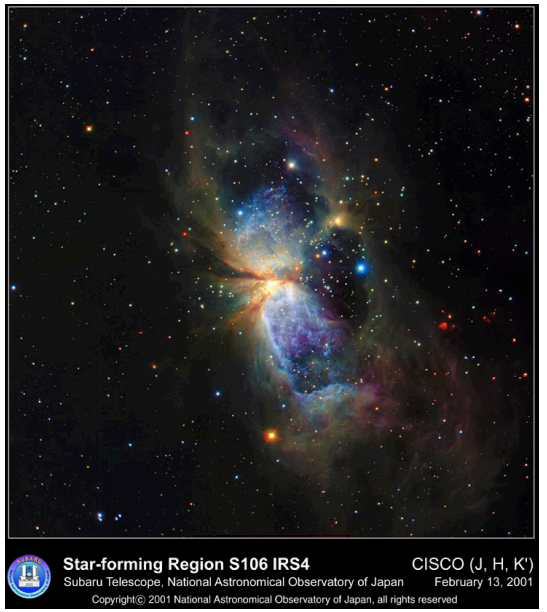
褐色矮星からのアウトフロー(～0.05 M_{sun})



小・中質量星からのジェット(~1 M_{sun})



大質量星からのアウトフロー　(～20 M_{sun})



- 星形成過程で普遍的な現象: 300以上の観測 (1980年に最初の発見、Snell, L1551)
- 星を誕生させるために、必要不可欠な現象
- エネルギーの単純な見積もりでは、磁場が重要な役割 (大質量星は？)

2成分？：ジェットとアウトフロー

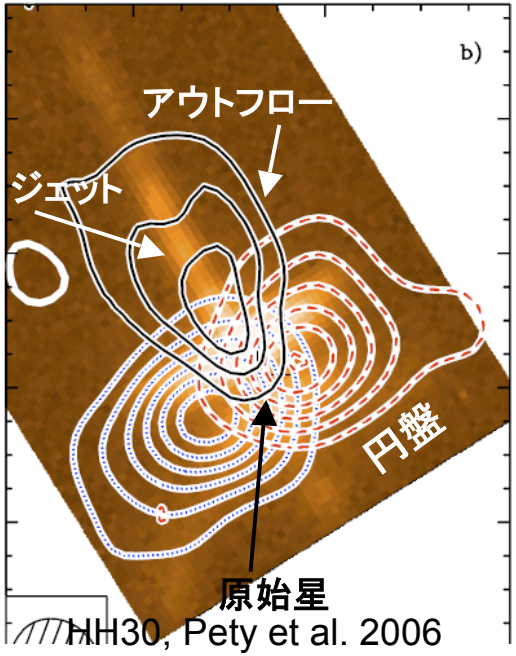
■2成分のフロー：

- ➢(分子)アウトフロー：低速 (~10 km/s), 10-1000 AU, 広い開口角
- ➢(光学)ジェット: 高速 (~100 km/s), 100-10^5 AU, コリメーションが良い

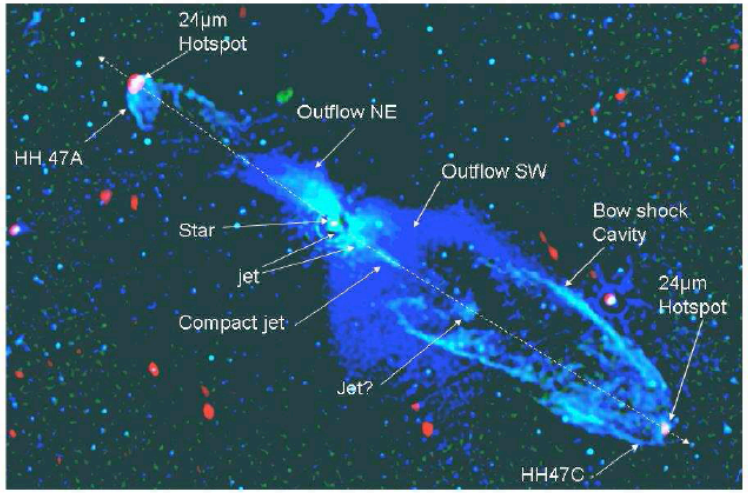
■進化段階：両方出ている天体、片方だけ見えている天体(観測の制限も)

- ➢アウトフロー：より若い天体(Class 0, I)に付随
- ➢ジェット：少し進化の進んだ天体(Class I, II)に付随

■ジェットは、アウトフローに囲まれている



HH30, Pety et al. 2006

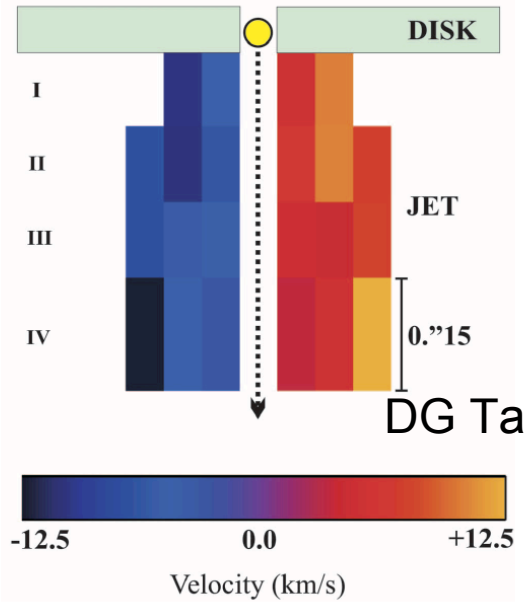


Velusamy et al. 2007

ジェット・アウトフローの回転

■ジェット・アウトフローの回転の観測　⇒　駆動メカニズムに迫る(entrainment?)

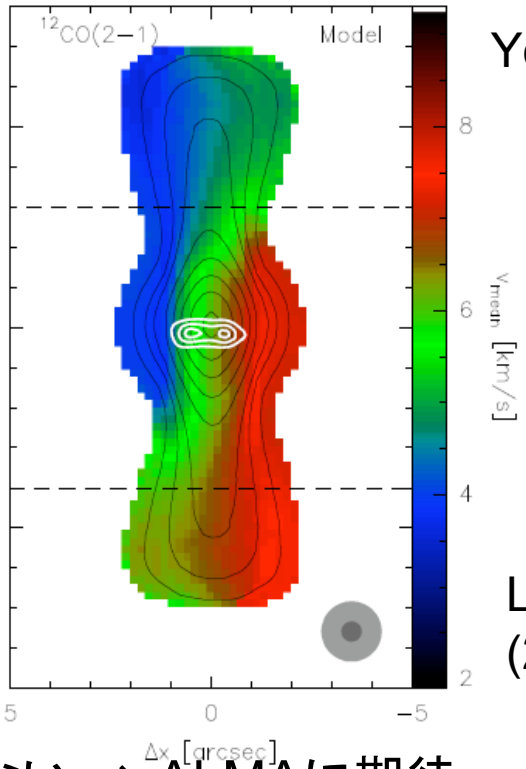
ジェットの回転？



DG Tau

Bacciotti et al. (2002)

アウトフローの回転？



Young T Tauri star in CB26

Launhardt et al. (2008)

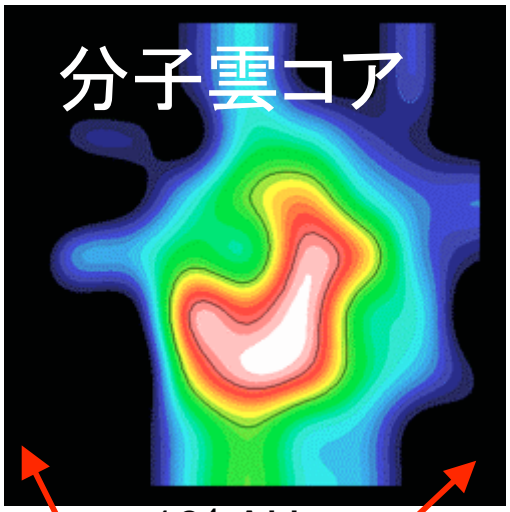
■まだ観測精度が悪く良く分からない ⇒ ALMAに期待

■ジェットの回転は意外と弱い？　逆回転も？ (Bacciotti et al. 2008)

■Entrainment説：ジェットがまず出て、アウトフローを引きずる

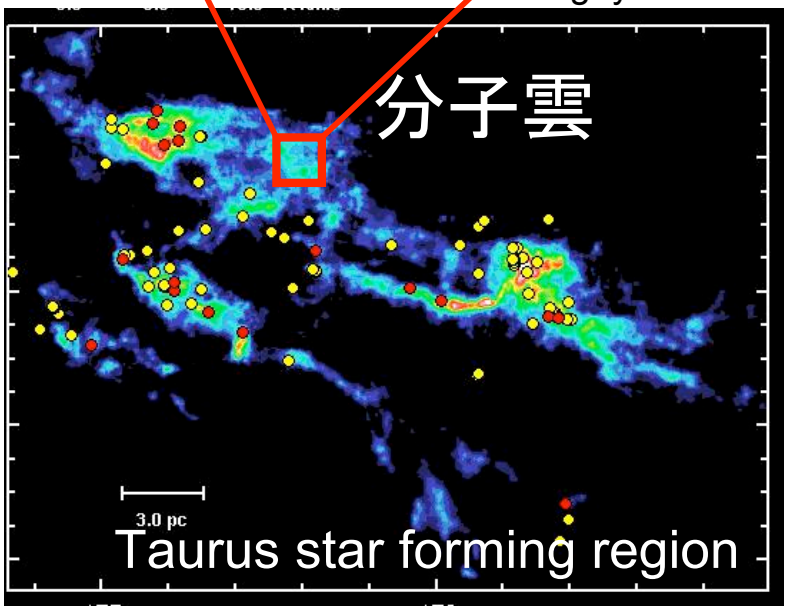
分子雲中での星形成過程：観測

星誕生の直前

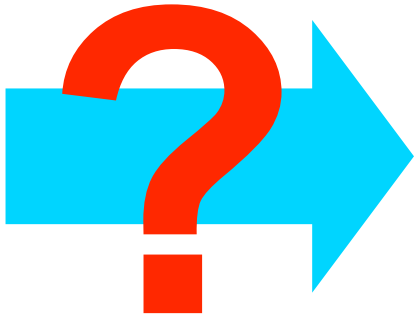


～10^4 AU

Nagoya Univ.

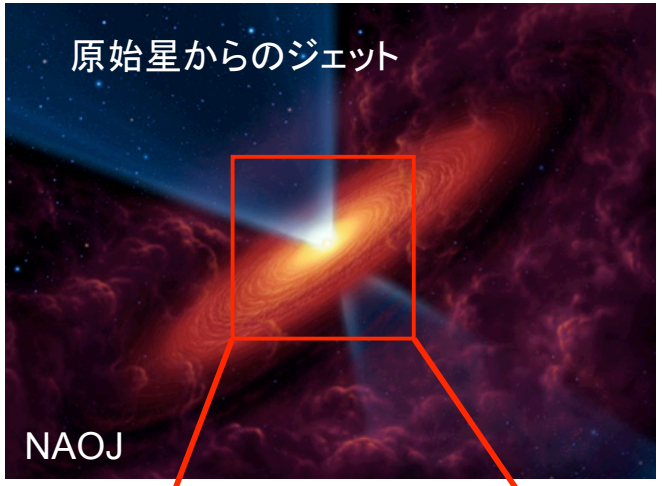


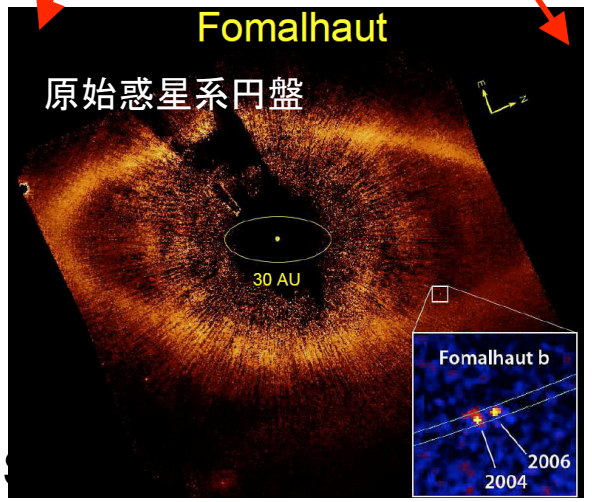
理論による理解!!



星形成過程

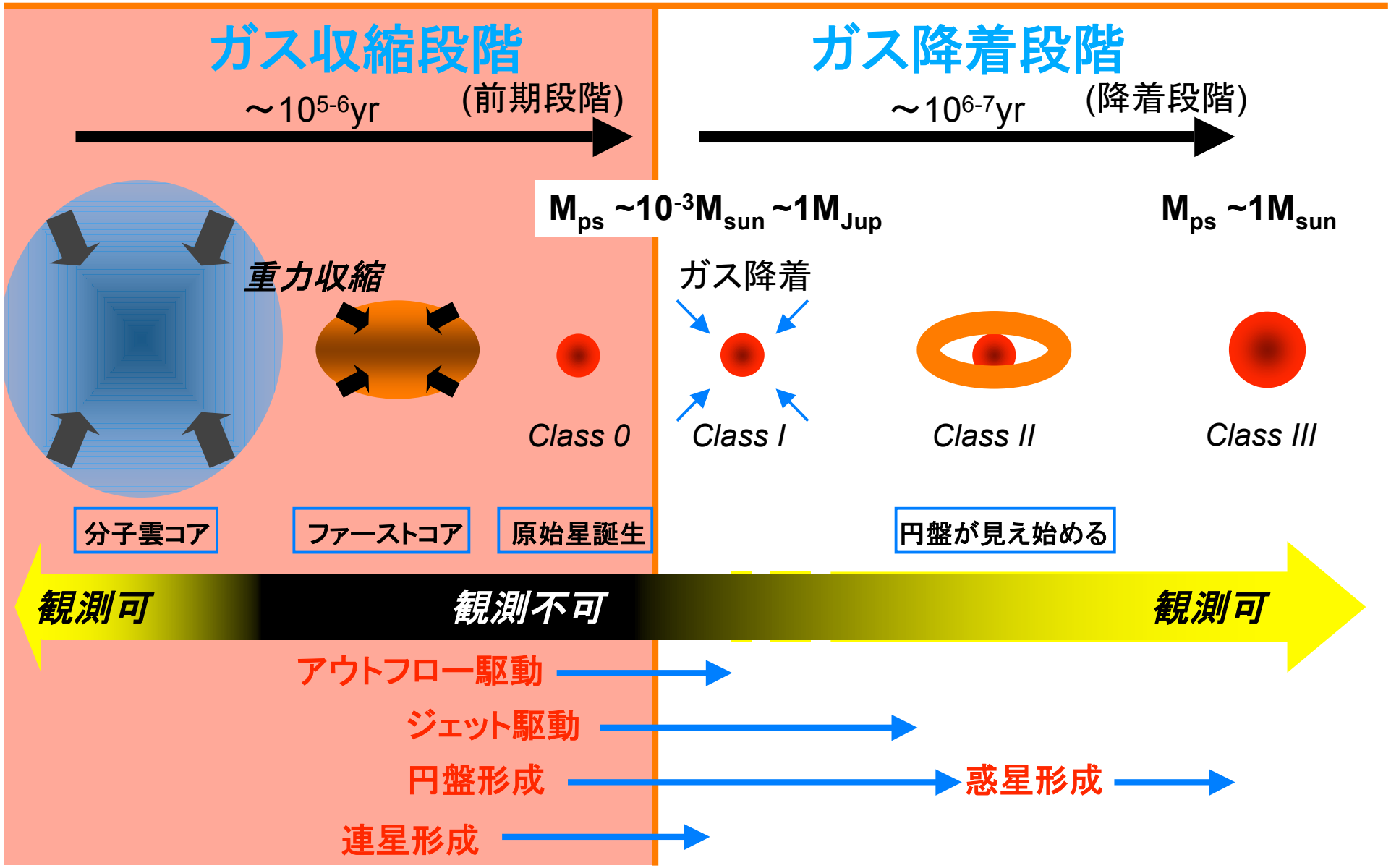
星誕生の直後



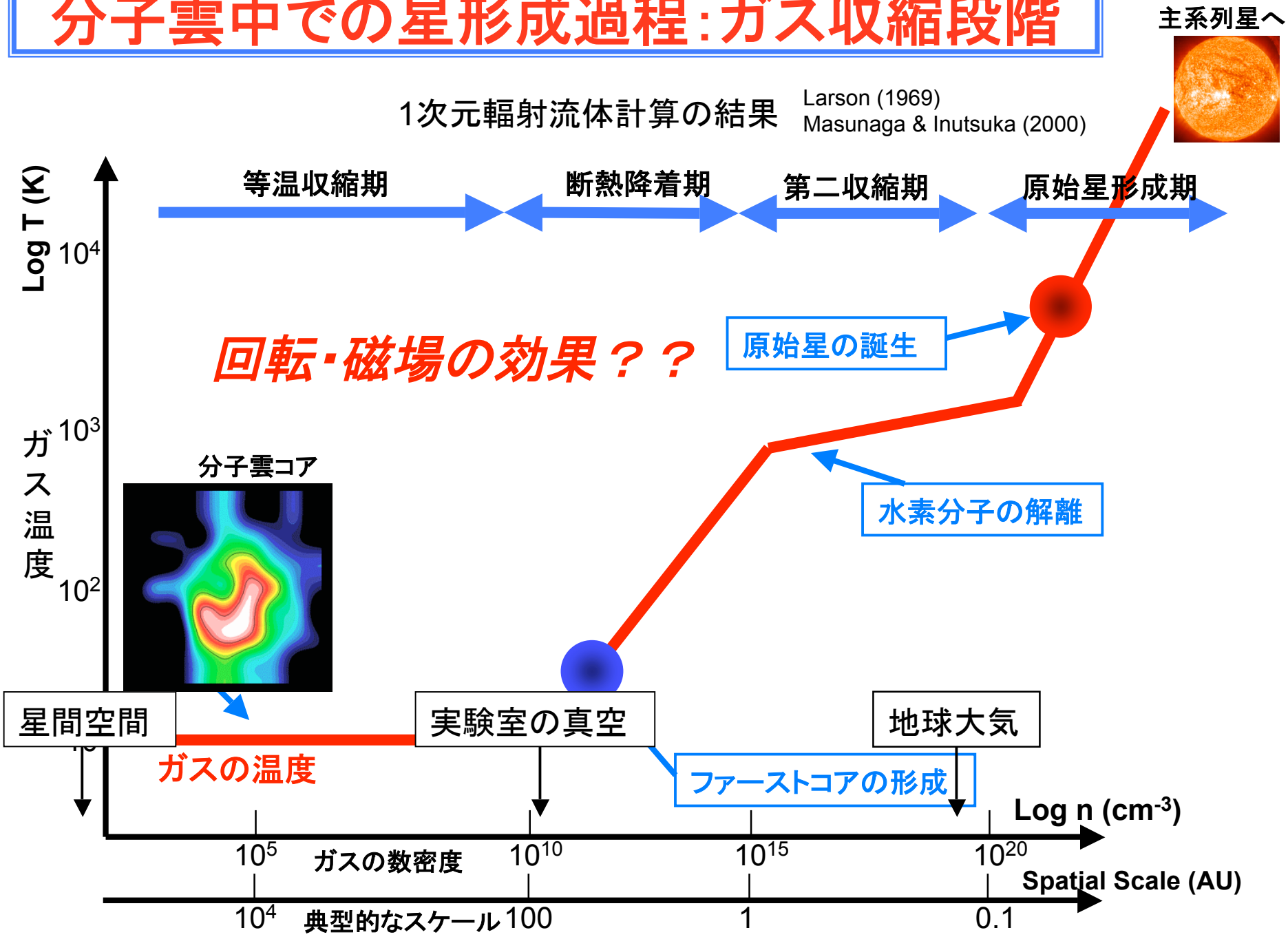


分子雲中での星形成過程：理論

2つの段階の星形成過



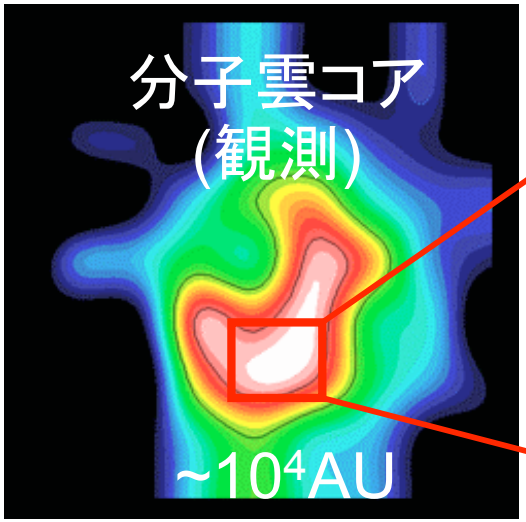
分子雲中での星形成過程:ガス収縮段階

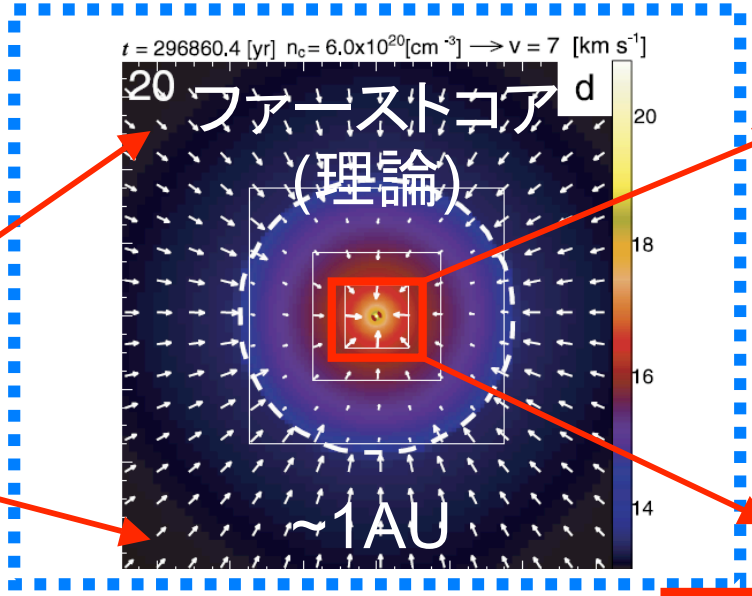


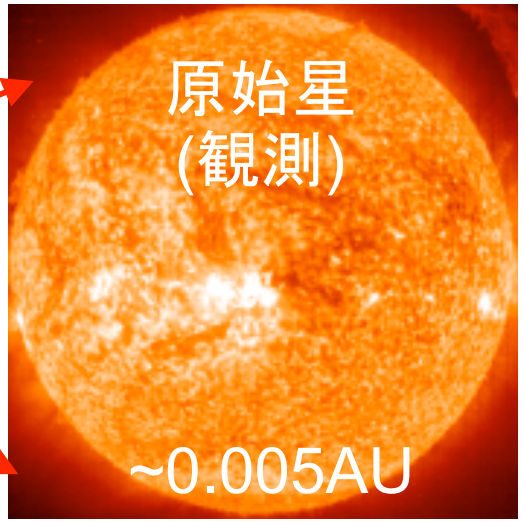
スケールの比較

?

進化全体で
100万分1に収縮！



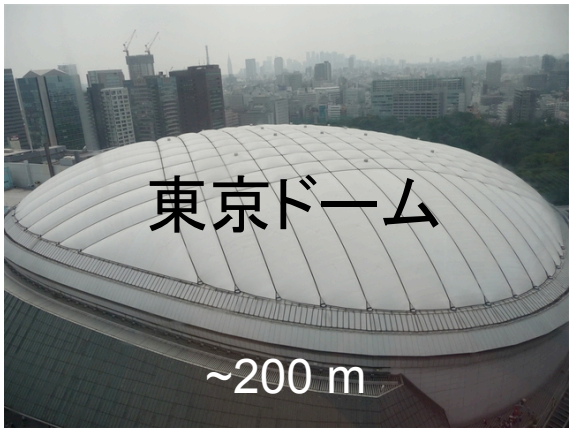


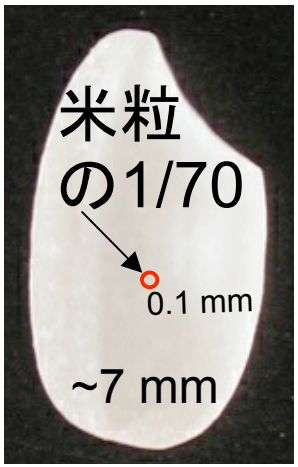


~1/10000

~1/200

分かりやすい単位系





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[illegible]問題

前期段階

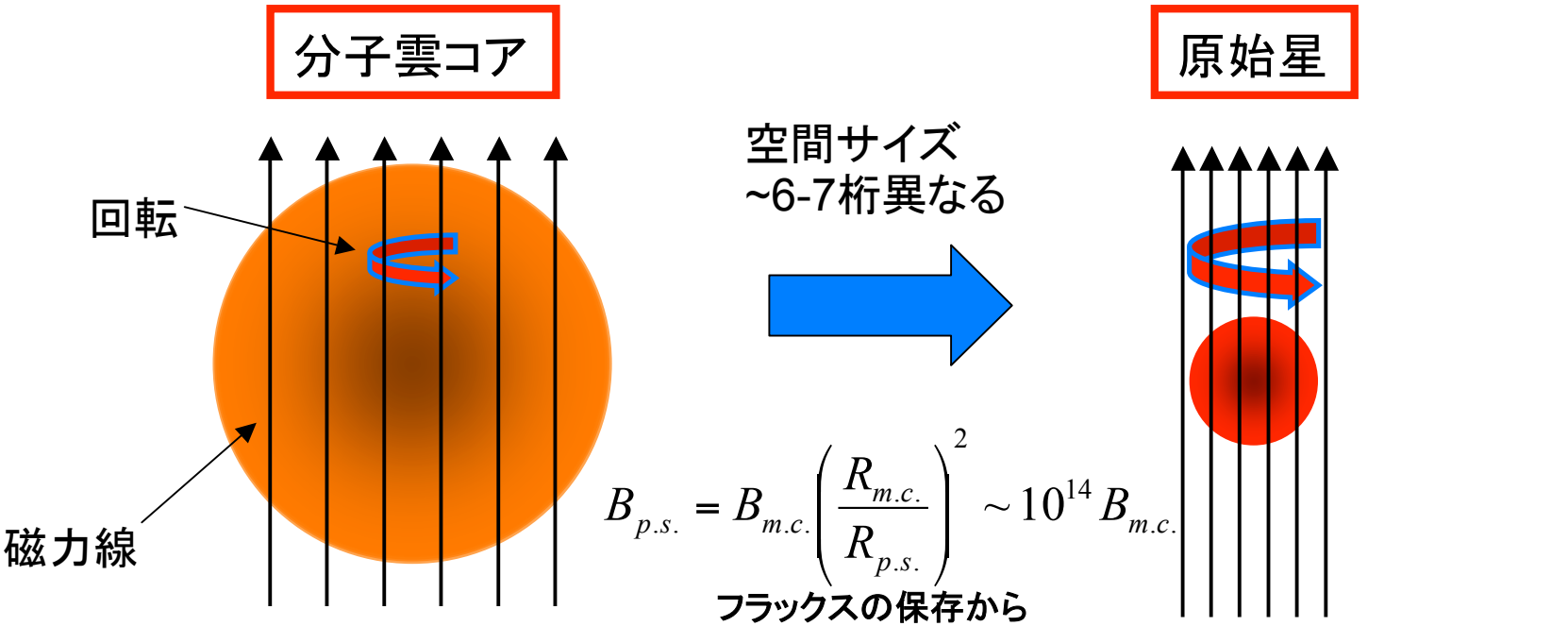
- ジェット・アウトフローはどの進化段階で駆動？
- どこから駆動？
- 何故、2種類の異なる特徴(コリメーション、速度)？
- 角運動量、磁場強度との関係？
- 駆動メカニズム？

[illegible]階

- 星形成率と星の質量の問題

磁束・角運動量問題とは、

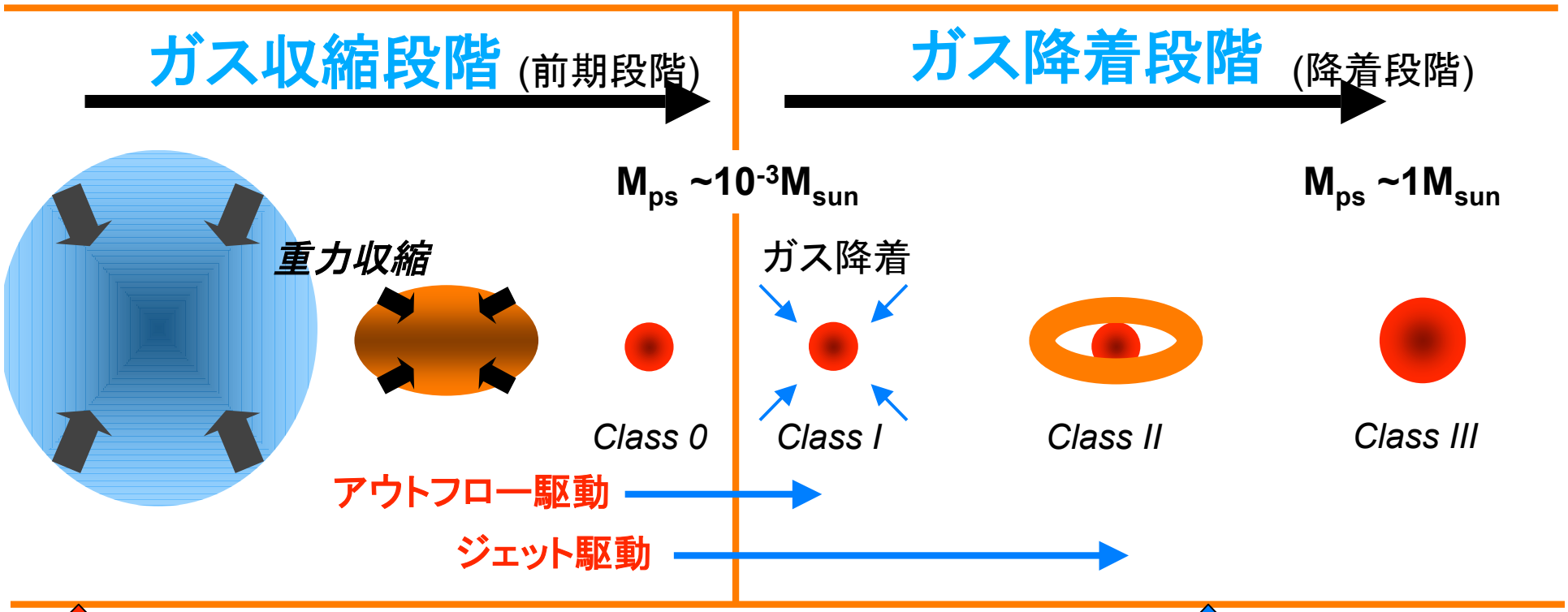
- 磁束問題: Φ/Φ_{cri}~1(分子雲) ⇔ Φ/Φ_{cri}~10^{-5} (原始星)
- 角運動量問題: j~10^{21} $cm^2 s^{-1}$(分子雲) ⇔ j~10^{16} $cm^2 s^{-1}$(原始星)
- 磁束保存、角運動量保存　　99.999%抜ける
- 磁束、角運動量を捨てないと原始星になることが出来ない



- R~10^5 AU、n~$10^{3\text{-}5}$ cm^{-3}
- B~10^{-6} G, Ω~10^{-14} s^{-1}

- R~1 R_{sun}、n~10^{22} cm^{-3}
- B~10^3 G, Ω~10^{-5} s^{-1} (9桁)

理論：2種類の取り組み



計算開始 → ??? ← 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 ◎
- 駆動メカニズム ◎
- ジェットの伝播 △
- 長時間進化 ×

困難：広範な空間スケール (10^{5}-10^{-3} AU)！

2. 円盤からのジェットの研究

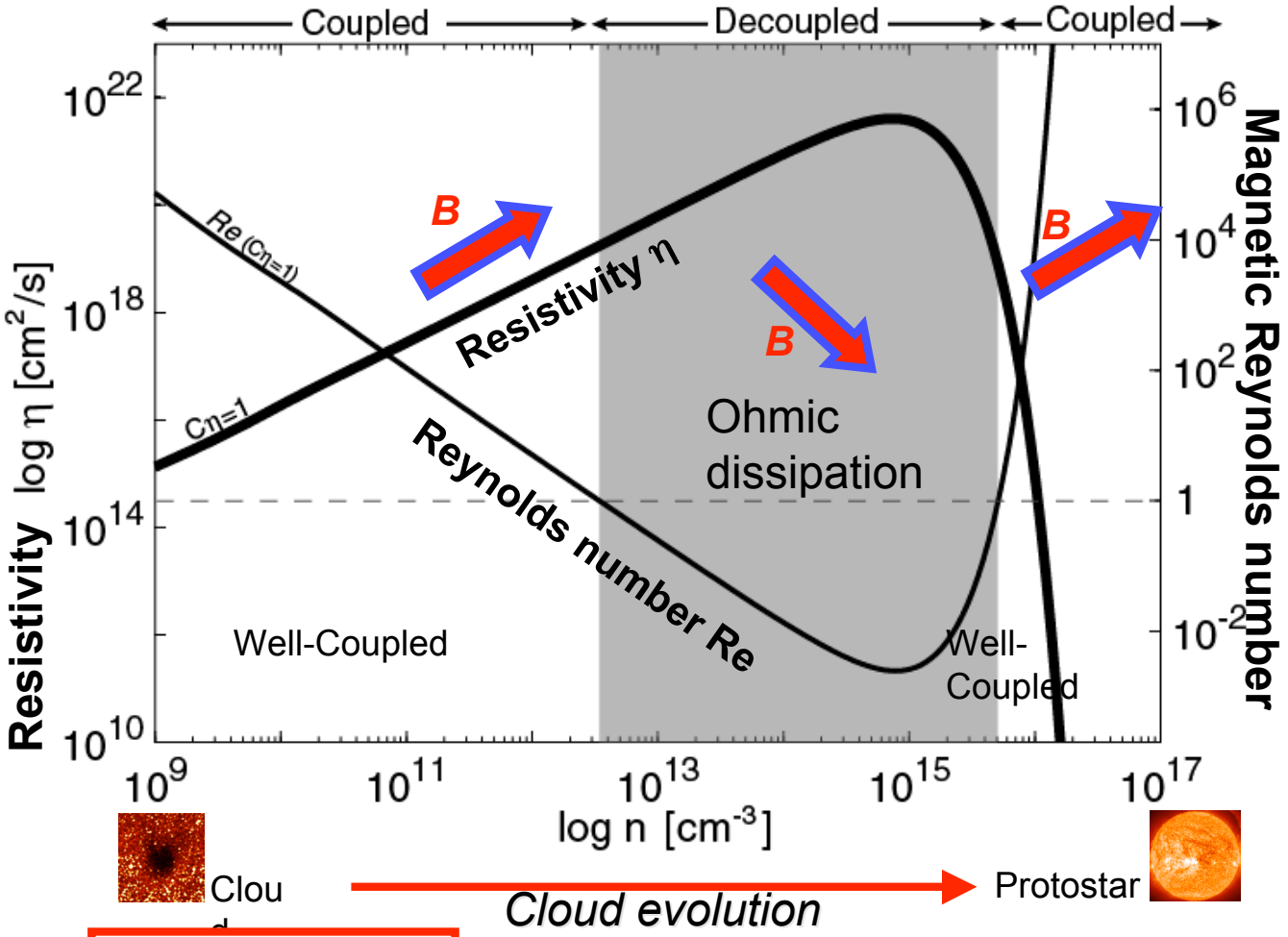
- 適切な境界条件 ×
- 駆動メカニズム △
- ジェットの伝播 ○
- 長時間進化 ○

原始星ジェット研究の取り組み

赤字：ガス収縮から原始星形成の研究
青字：円盤からのジェットの研究

- 1969：分子雲コアからの原始星形成、自己相似解(球対称, 1D, Larson)
- 1980：原始星ジェットの発見(Snell)
- 1982: 磁気流体、Disk wind (Blandford & Payne)
- 1985:ジェットの非定常磁気流体シミュレーション (Uchida & Shibata)
- 1986：Disk windモデルを原始星に適用(Pudritz & Norman)
- 1994：ShuのX-wind モデル
- 2000代：原始星と円盤をモデル化した2D／3D シミュレーション, entrainment model
- 1998-2002： 収縮する分子雲コアからのアウトフロー (断熱段階, 2D, Tomisaka)
- 2004-09：磁気星間雲の進化の研究(断熱段階、3D, Hosking & Whitworth 2004, Machida et al.2004, 2005a,b, Price & Bate 2007, Hennebelle & Fromang 2008)
- 2006：原始星形成までの直接計算(Machida et al. 2006, Banerjee & Pudritz 2006)

磁場の散逸:Resistivity ηの見積り



Resistive MHD eq.

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

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

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

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

P=P(ρ)

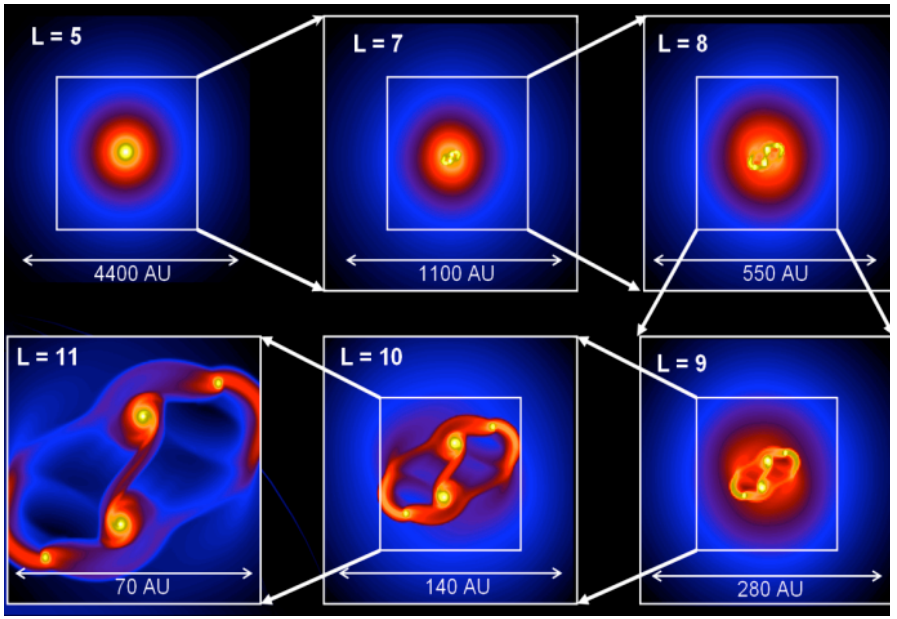
Nakano et al. (2002)
Machida et al. (2007)

弱電離プラズマ

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

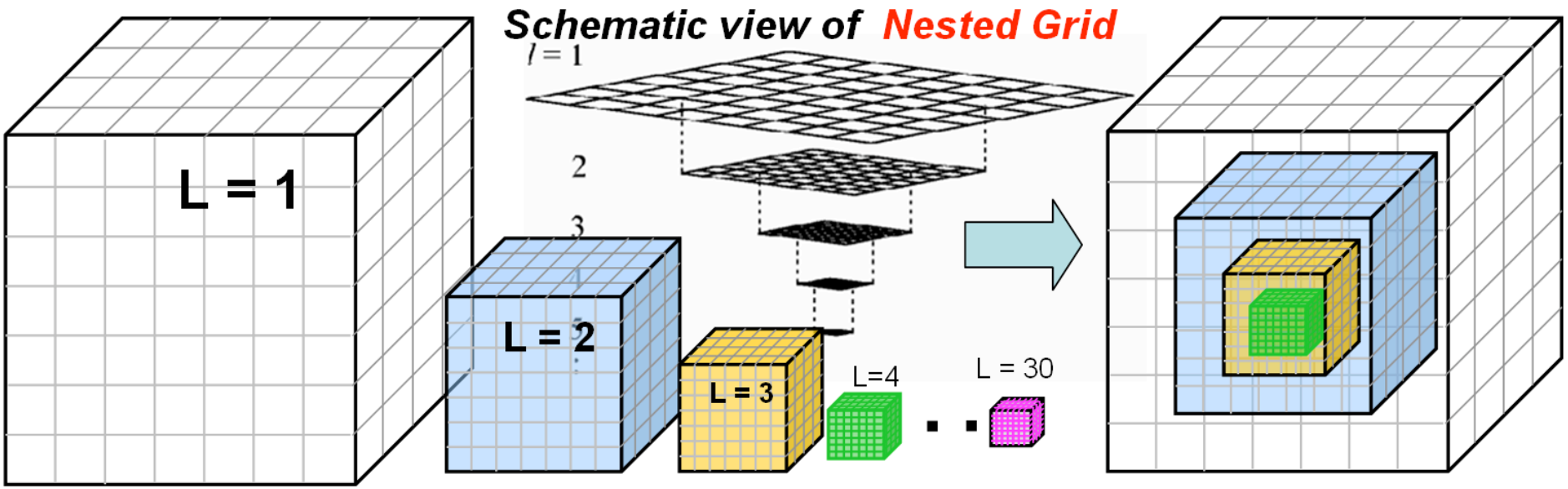
多層格子法＋3D Resistive MHD Code

以後我々の取り組み



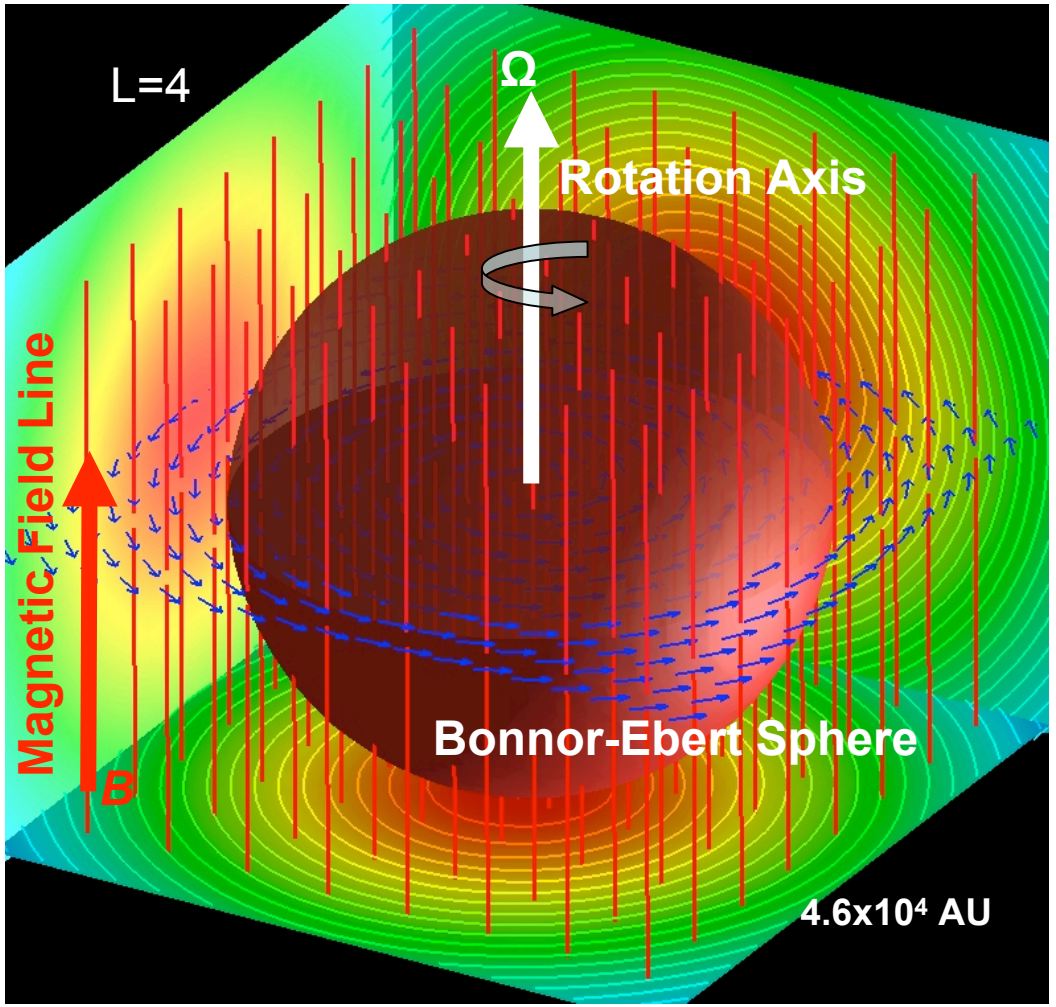
同時刻、異なる空間スケール

- 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 MHD 方程式 + 自己重力
- 星形成に適用：分子雲コアから原始星まで計算
  - ***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^{-3}~10^{23} cm^{-3})



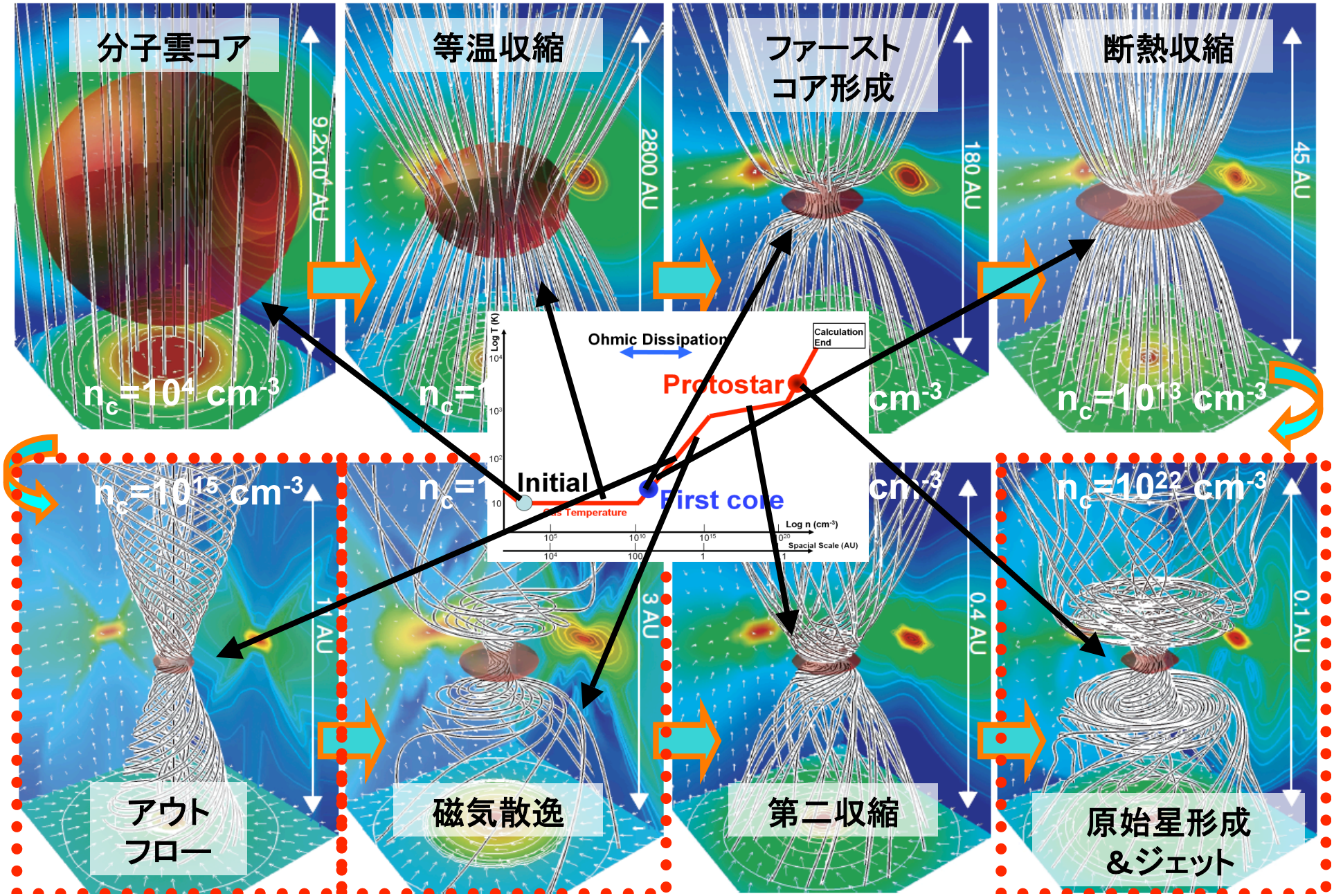
シミュレーションのセッティング

- 球対称、平衡なガス雲＋微小揺らぎ (収縮を促進)
- 磁場、回転(パラメータ)
- スパコンで計算
  - Maximum grid level: 31
  - (l, j, k) = (128, 128, 128)x 31
  - グリッド生成条件：Jeans長を分解
  - 因みに、一様グリッドだと・・・ (1千億x1千億x1千億 のmesh必要)
    - → 計～10^{33}メッシュポイント

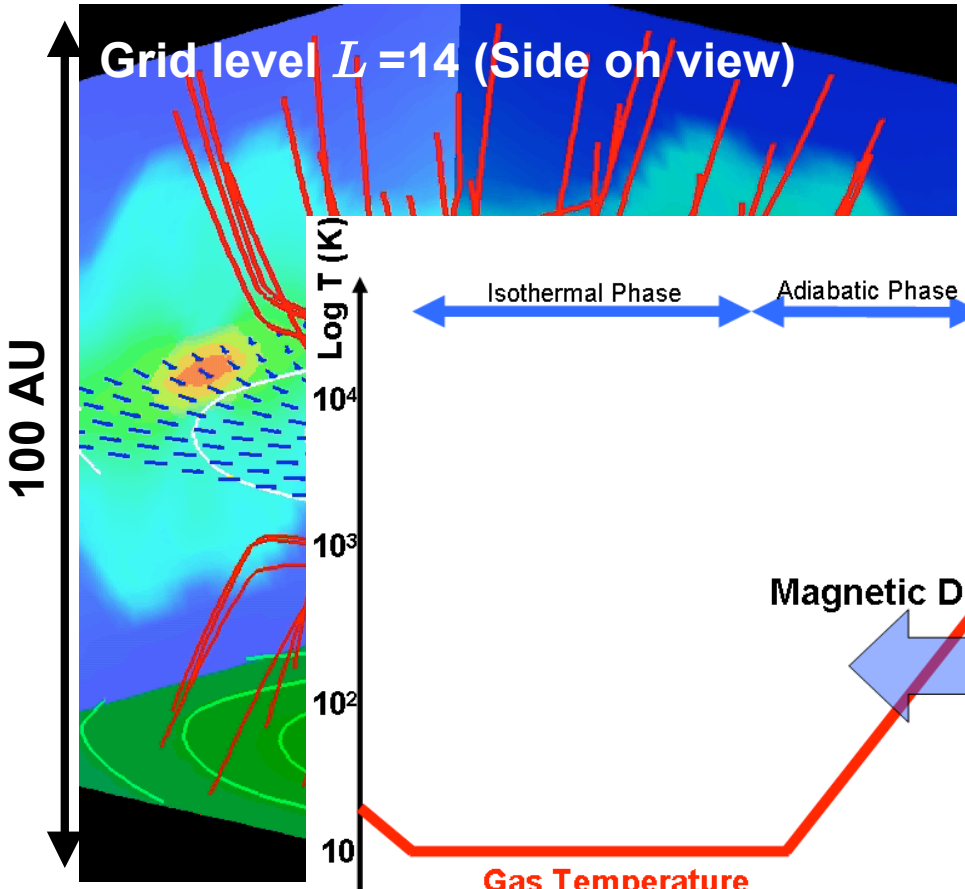


- 初期値
  - 中心密度：$n=10^4$ cm^{-3}
  - 温度: T=10 K
  - スケール: L = 4.6x10^4 AU
  - 磁場強度：～10^{-6} G
  - 質量: M =14 M_{sun}
  - 角速度：～10^{-14} s^{-1}

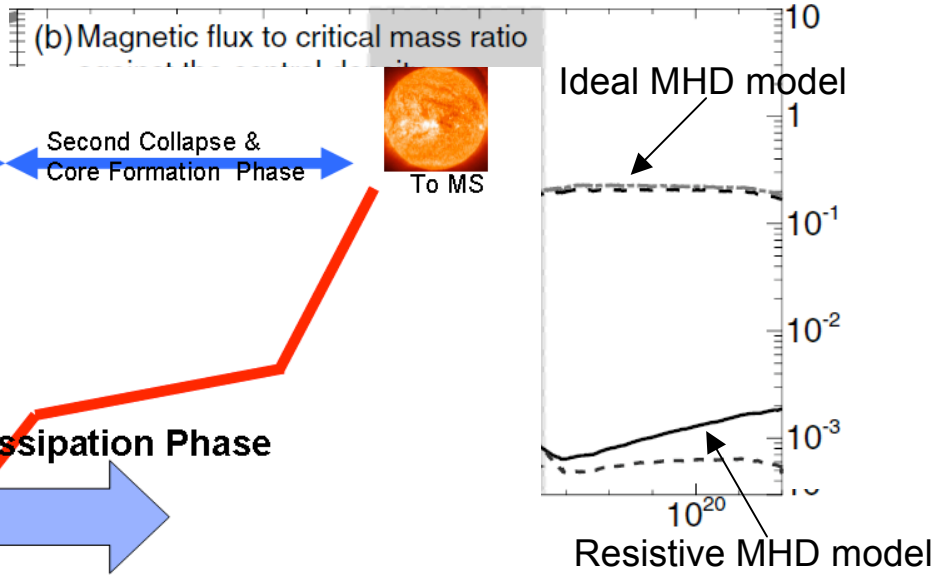
分子雲コアから原始星形成までの直接計算(世界初)



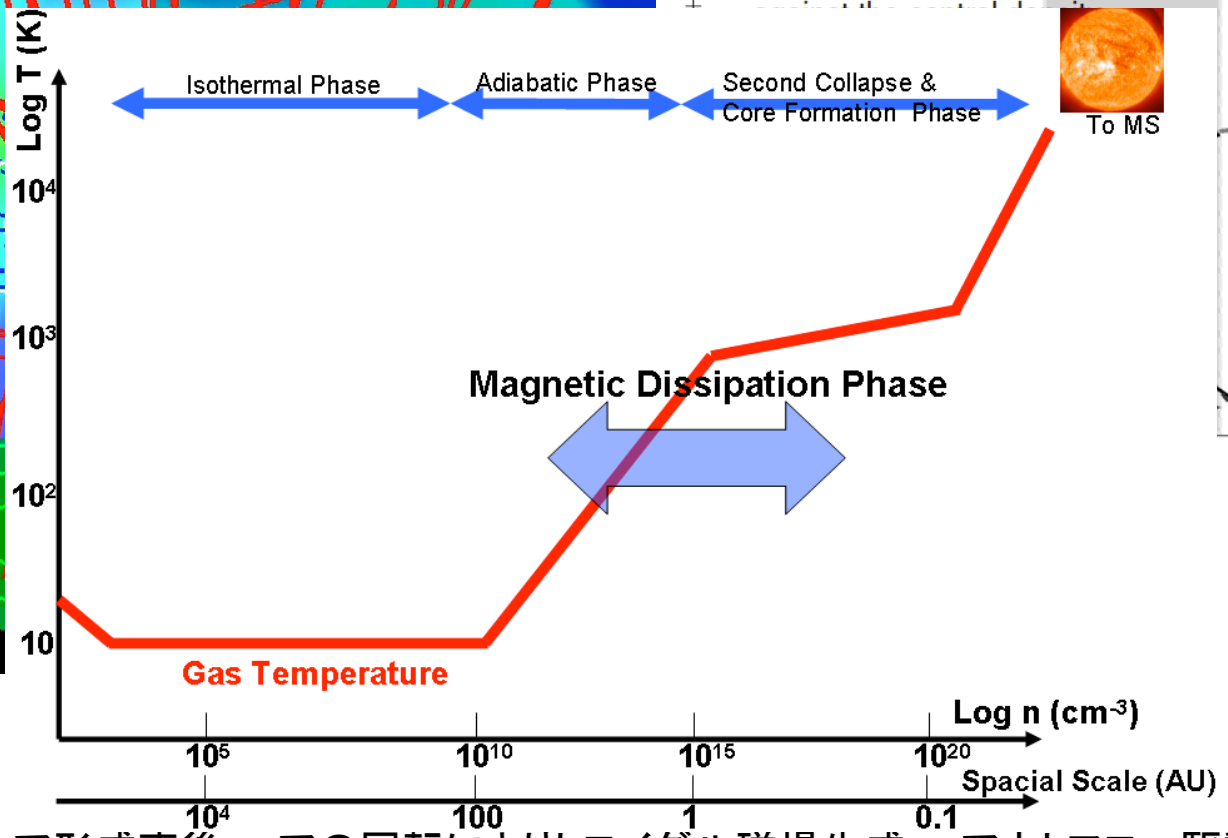
磁場の散逸：Ohmic dissipation



磁束 vs 中心密度



磁場の進化



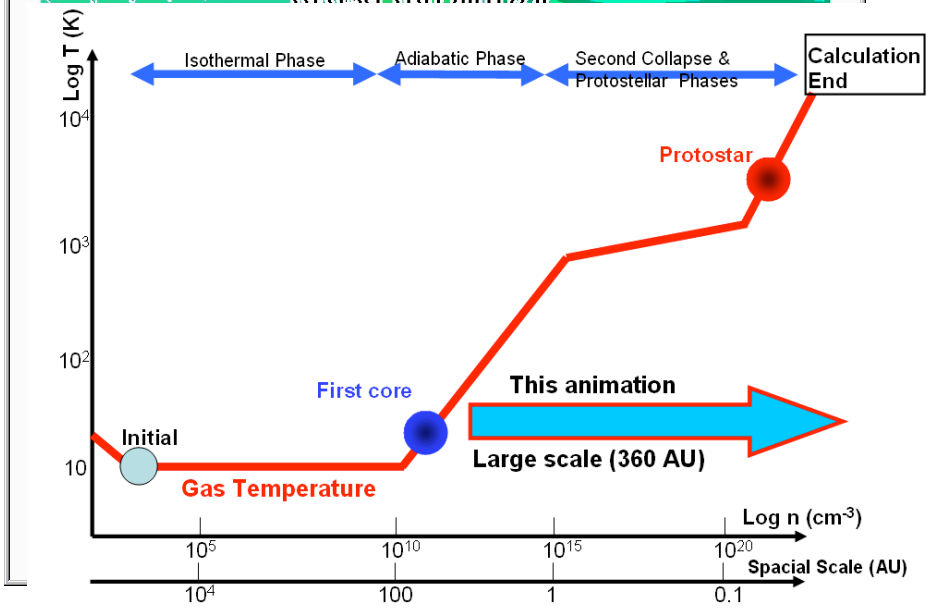
- ファーストコア形成直後：コアの回転によりトロイダル磁場生成⇒ アウトフロー駆動
- ファーストコア内部：Ohmic dissipationがeffective ⇒磁場の散逸 ⇒磁力線とガスがdecouple
  - 磁力線：磁気テンションにより引き伸ばされる
  - ガス：高速で回転
- 高密度：磁場とガスが再びカップル　⇒磁場の再増幅

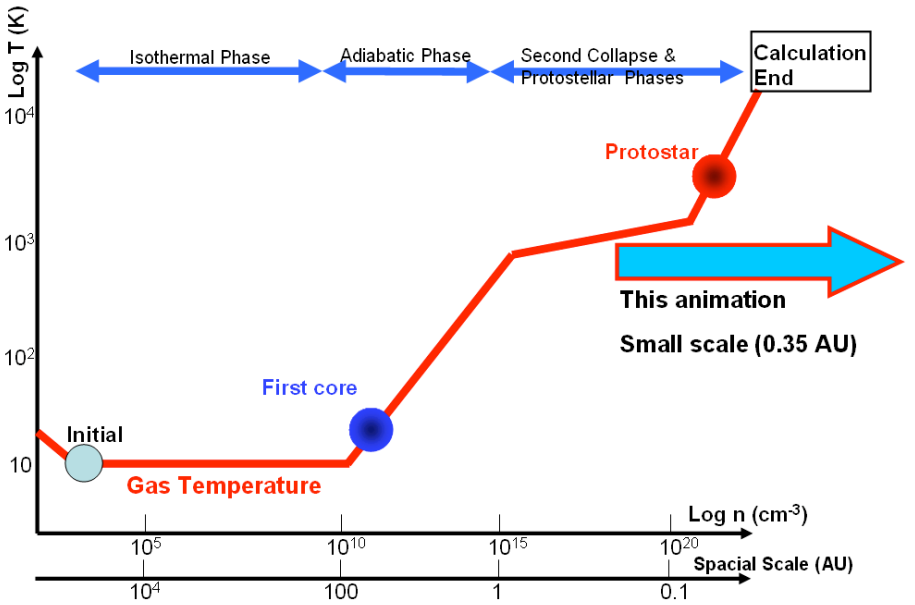
異なるコアから異なる2つのフロー

ファーストコアからのアウトフロー

原始星(セカンドコア)からのジェット

Two distinct flows appear in the collapsing cloud!!





***v*~5 km/s**
L=14

360 AU

0.35 AU

***v*~50 km/s**
L=25

進化の段階で2種類の異なるフロー

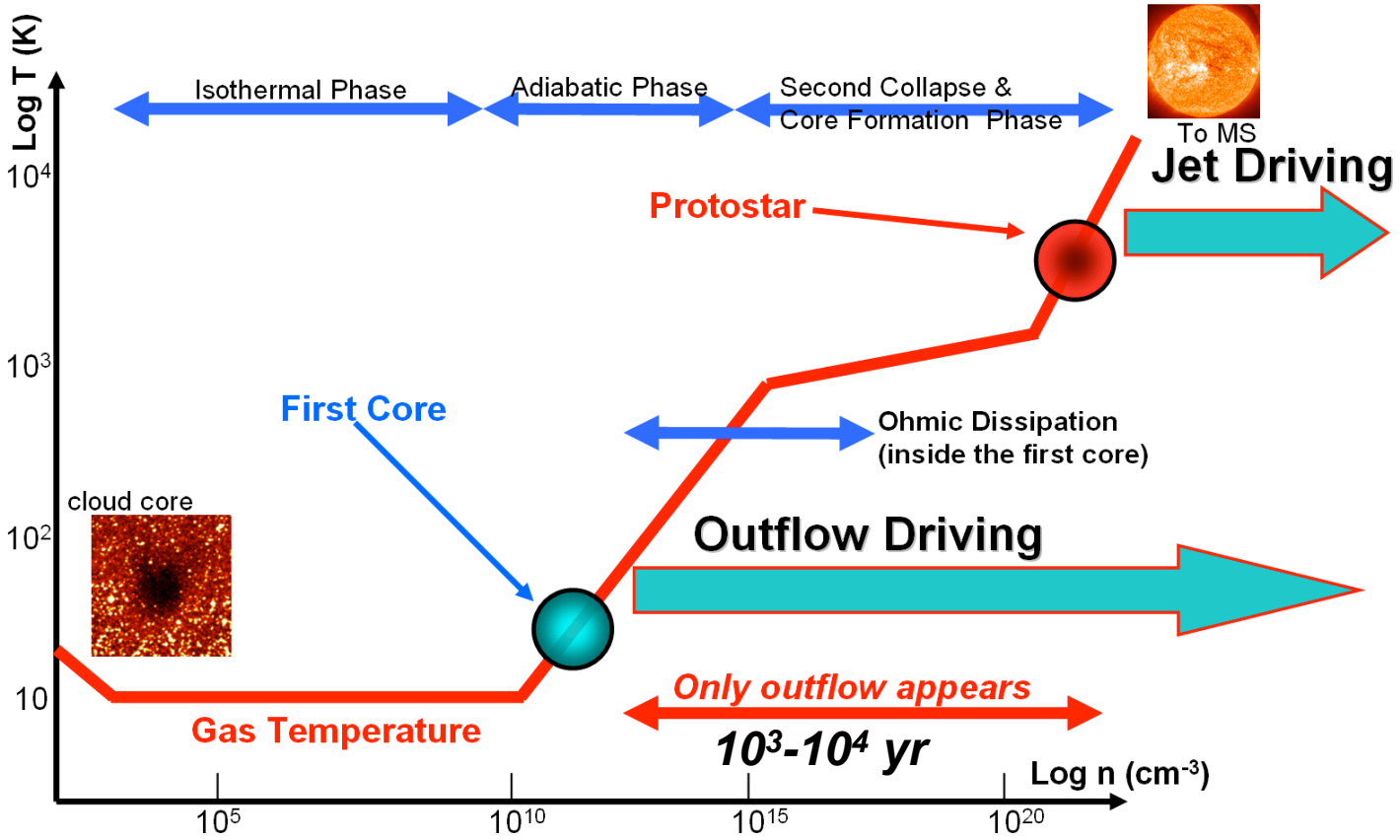
- ファーストコア

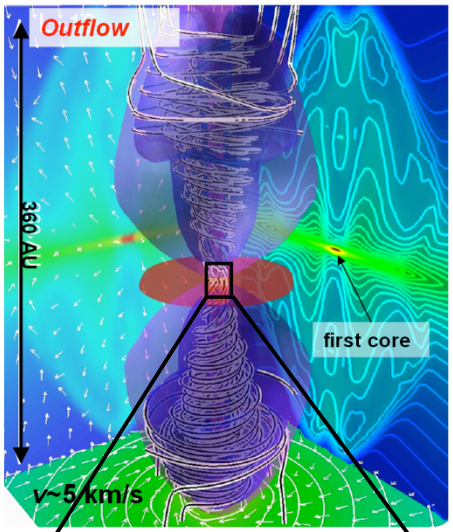
  n~10^{11} cm^{-3}, r~10-100 AU

- セカンドコア(原始星)

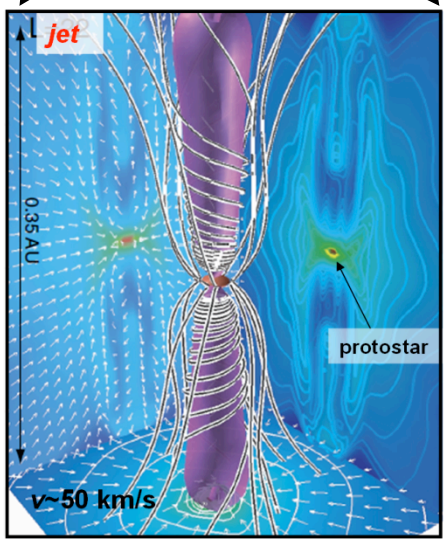
  n~10^{21} cm^{-3}, r~0.01 AU

原始星形成の計算：各々のコアからフローが駆動





1000 times close-up



■断熱コア形成　⇒　$\tau_{rot} < \tau_{collapse}$ ⇒　磁力線が捻られ始める

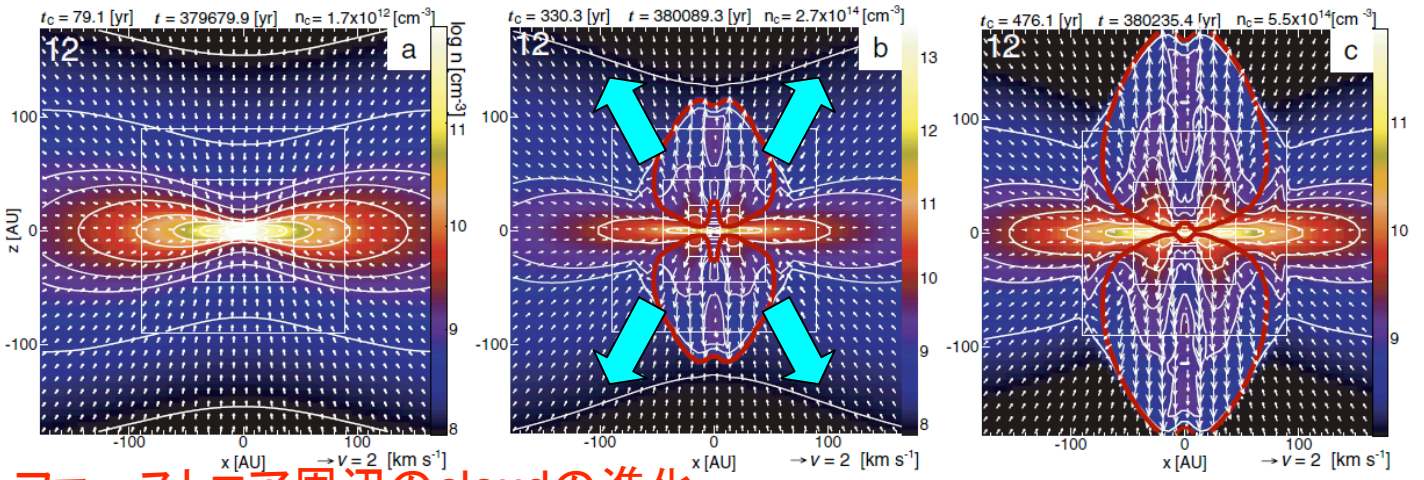
⇒　フロー駆動

■各々のコア：スケール、磁場強度が大きく異なる

- ファーストコア：Ohmic dissipationの経験ない、強磁場
- セカンドコア：Ohmic dissipationを経験、弱磁場

異なる二種のフロー

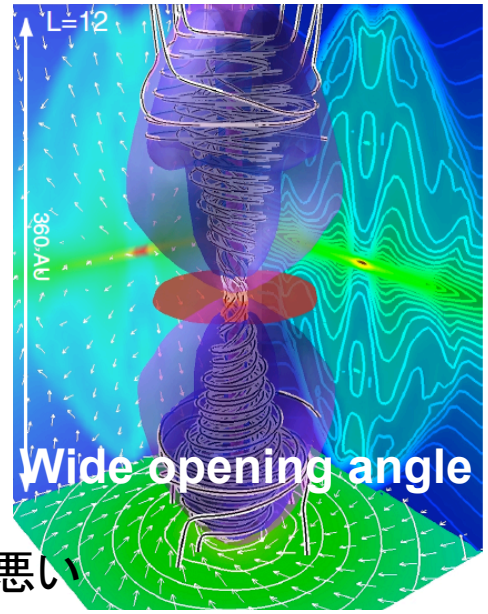
アウトフローとジェットの進化

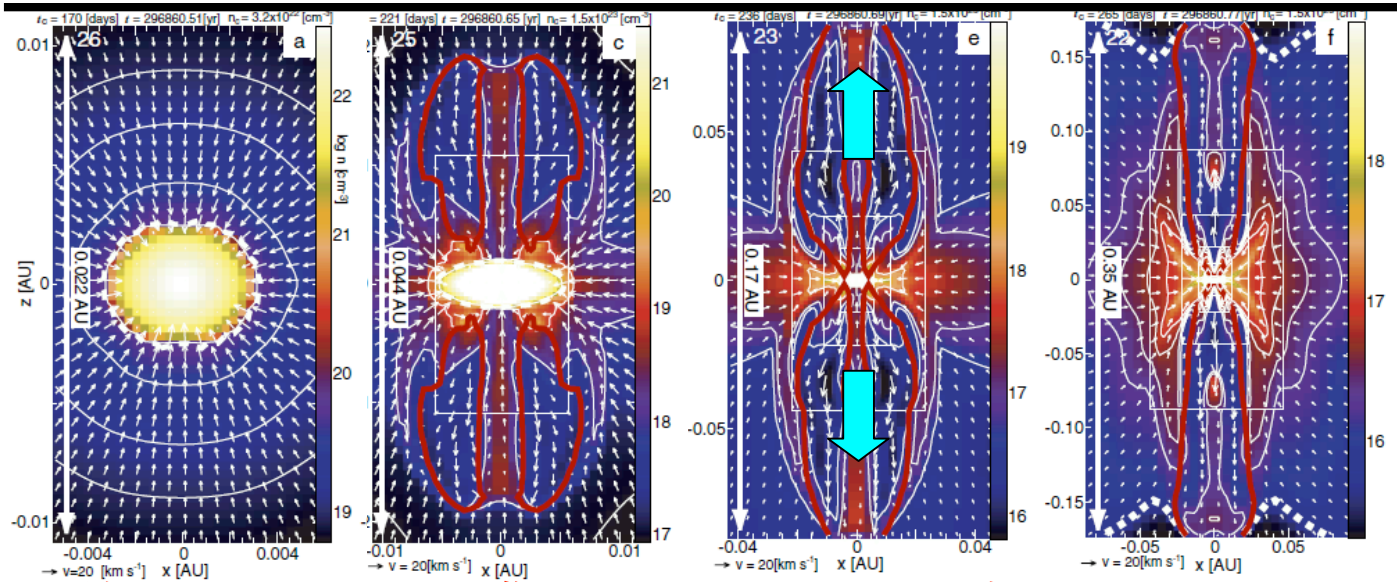


ファーストコア周辺のcloudの進化

アウトフローは形を保ったまま自己相似的に成長する、collimationは悪い

Vertical/Radial ~ const

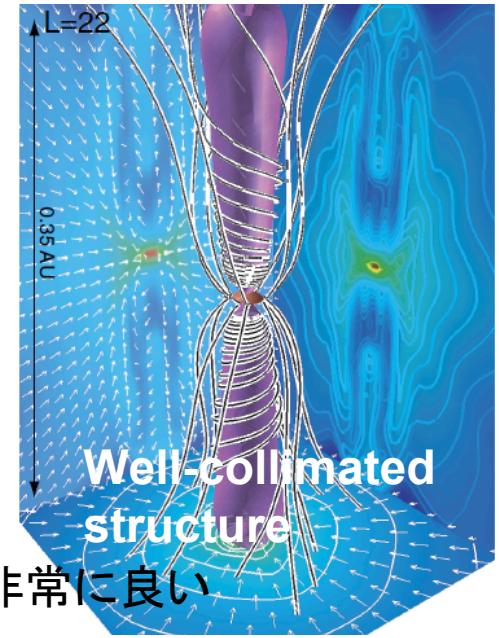




原始星周辺のcloudの進化 (ファーストコアの内側)

ジェットは、回転軸の沿って上下方向(のみ)に広がる、collimationは非常に良い

Vertical/Radial ~ increase



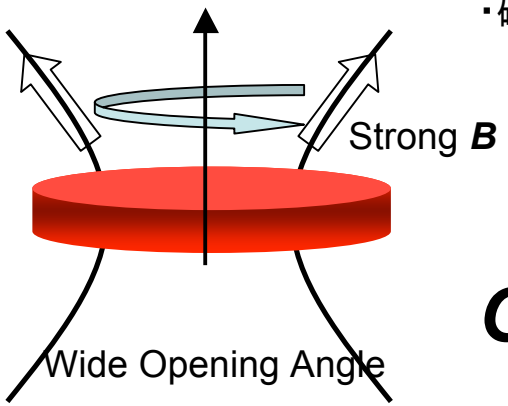
ジェットとアウトフローのcollimation

Dominant Mechanism (駆動体近傍)

ファーストコアの周りの力

Lorenz ≒ Centrifugal ≒Thermal Pressure

磁気遠心力駆動型



・磁場強い
・磁力線に沿ったフロー

β~1-10

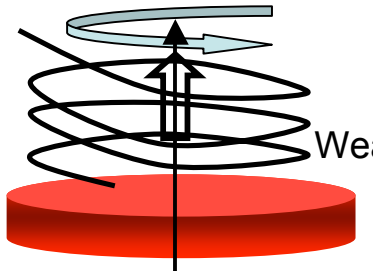
Outflow

磁気遠心力駆動 ⇒ First core, Outflow

原始星の周り の力

Centrifugal ≒ Thermal Pressure >> **Lorentz**

磁気圧駆動型



・磁場弱い
・回転軸に沿ったフロー

β>1000

Jet

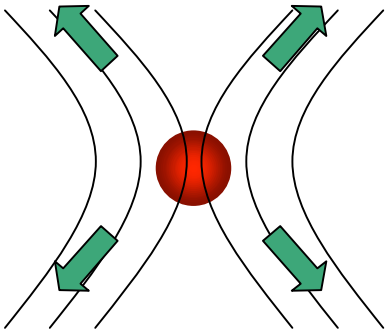
磁気圧駆動⇒ Protostar, Jet

磁力線の形状 (フローの伝播)

ファーストコアの周辺の磁場

$B_r \fallingdotseq B_z \fallingdotseq B_\phi$

Outflow ⇒ Wide

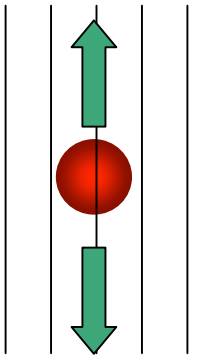


砂時計型

原始星の周辺の磁場

$B_z >> B_r \fallingdotseq B_\phi$

Jet ⇒ Narrow



まっすぐな磁力線
(オーム散逸と磁気テンション)

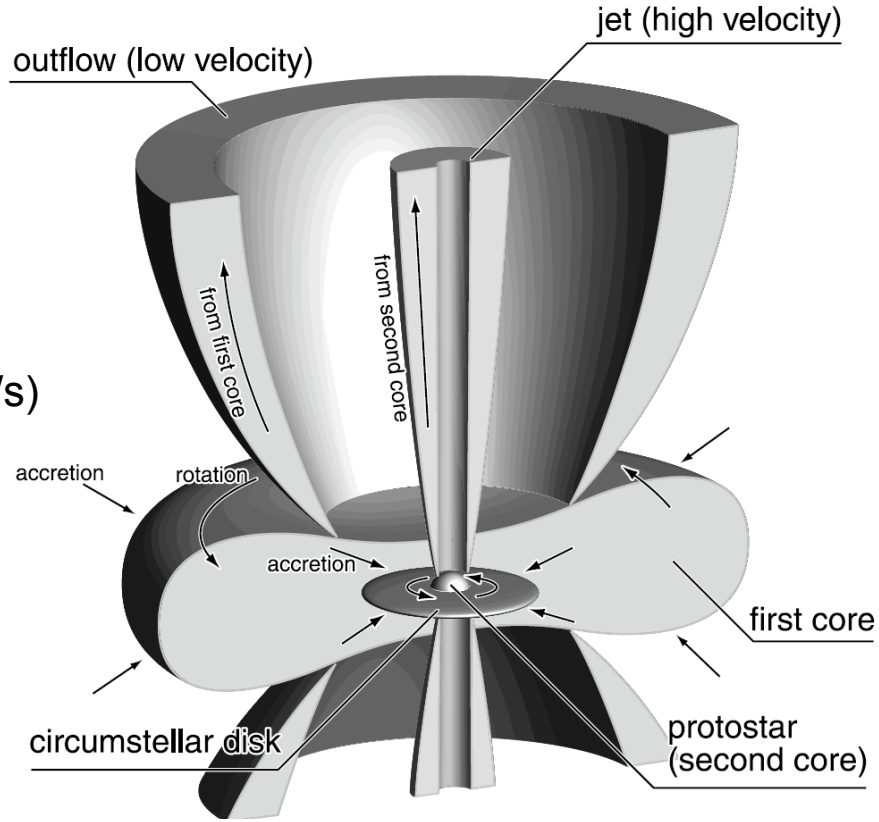
速度の差と観測との比較

計算の結果、アウトフローとジェットの特徴を自然に再現出来た

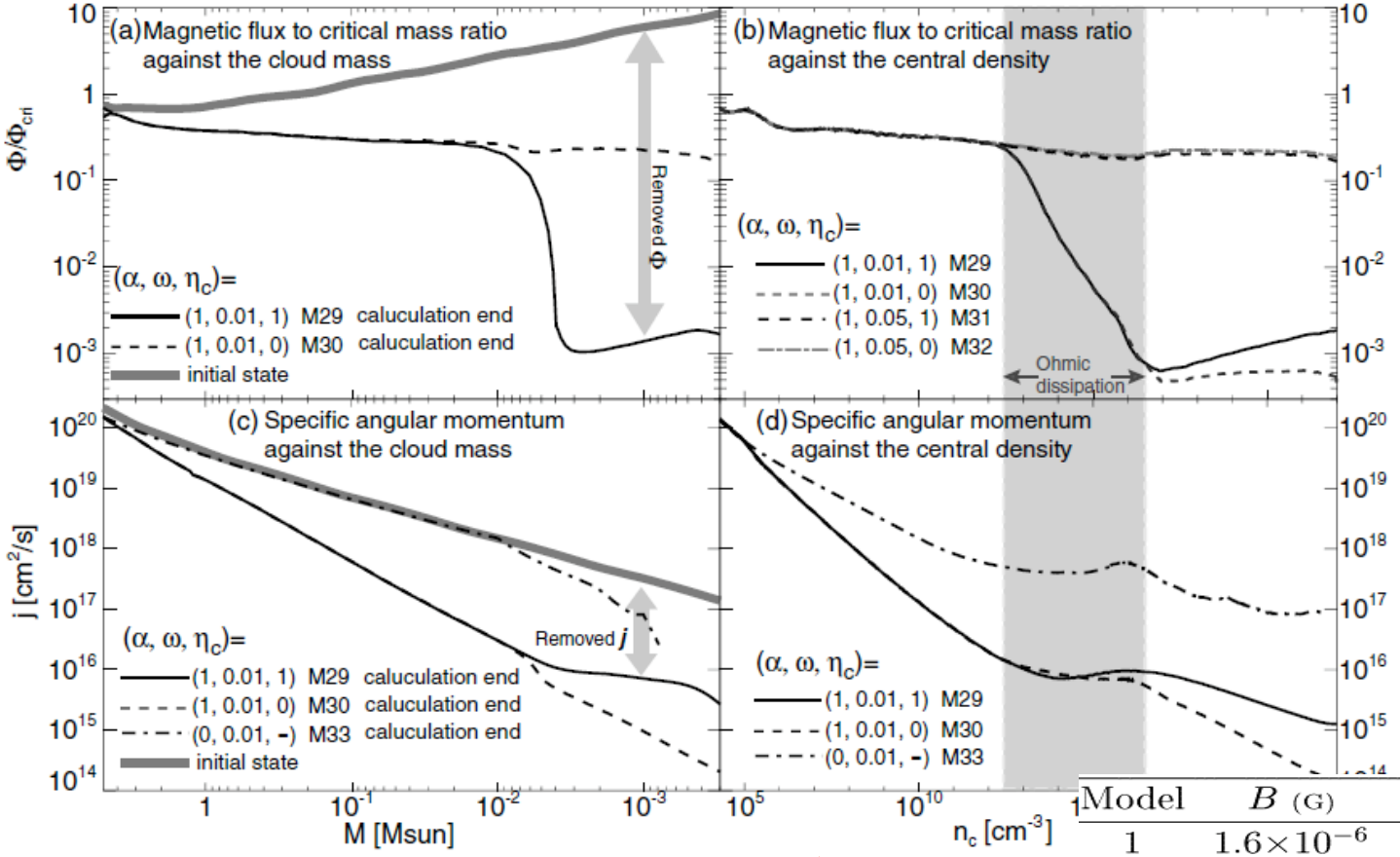
	Driver	Speed	collimation	Mechanism	Configuration of B
Outflow	First core	Slow **(5 km/s ⇒ 50 km/s)**	△	Magneto-centrifugal	Hourglass
Jet	Second core (protostar)	High **(50 km/s ⇒ 500 km/s)**	◎	Magnetic pressure	Straight

- 速度の違いはファーストコアと原始星の Kepler Speed(重力ポテンシャル)の違い
  - ✓ First core: ~0.01 M_{sun} ($1M_{sun}$) ~1 AU
    ⇒ ~ km/s (~50 km/s)
  - ✓ Protostar: ~0.01 M_{sun} ($1M_{sun}$) ~1 R_{sun}
    ⇒ ~10 km/s (~500 km/s)

アウトフローは、ジェットによるentrainment ではなく、ファーストコアから直接駆動



角運動量・磁束問題の解決

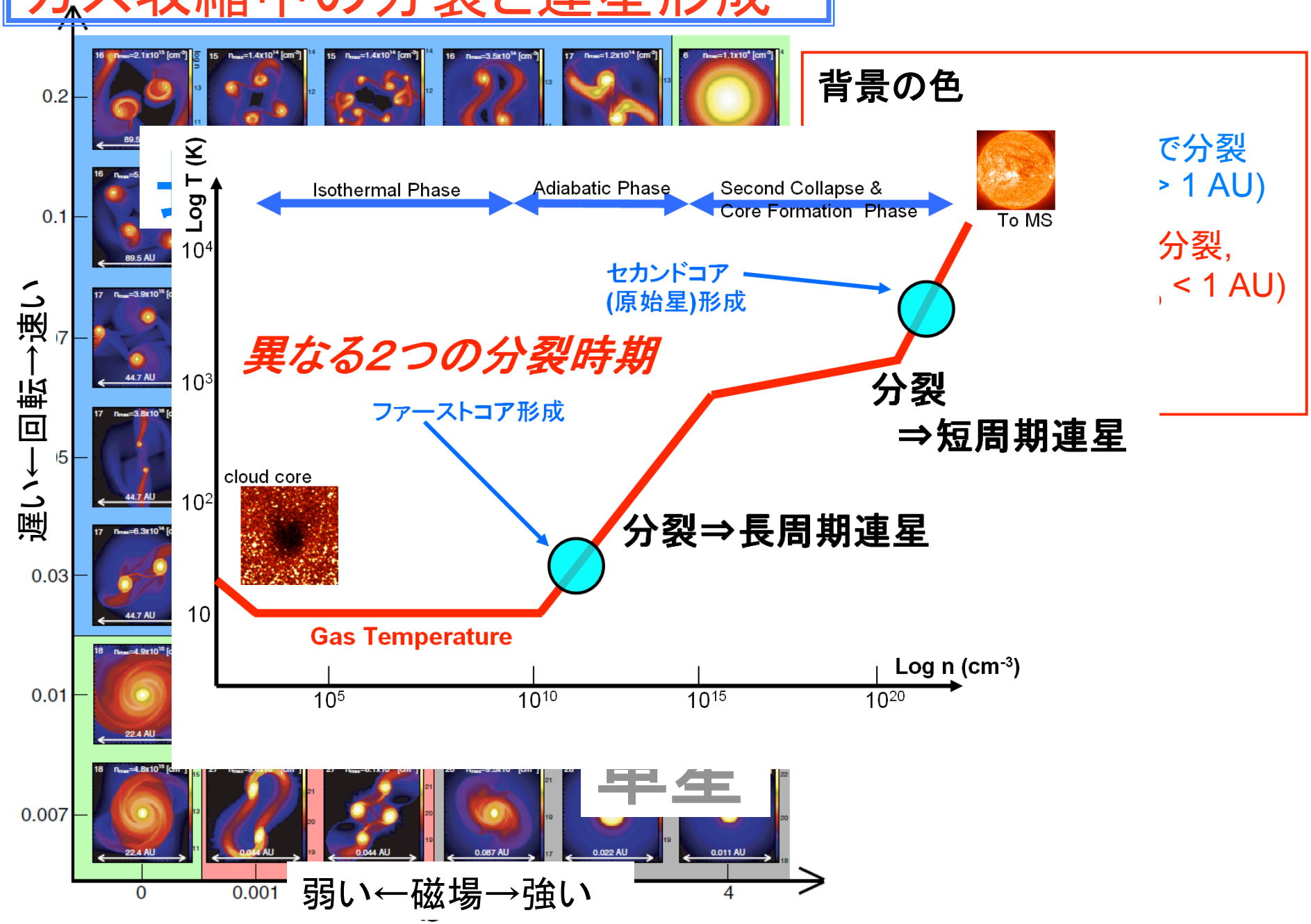


観測の原始星の磁場強度、回転周期が再現出来た

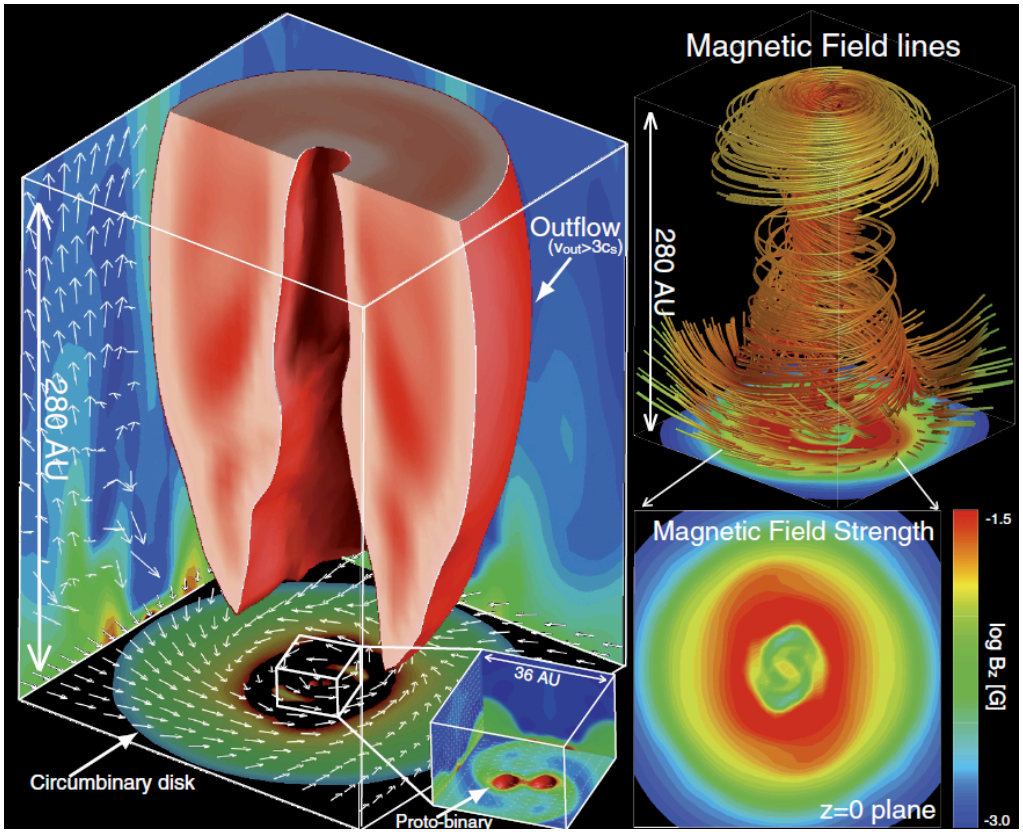
- ~kGの磁場、~daysの回転周期
- 磁束の抜き取り：オーム散逸
- 角運動量輸送：磁気制動、アウトフロー、ジェット
- 99.9%の角運動量が輸送された

Model	B (G)	Ω (s^{-1})	B_f (G)	P (day)
1	1.6×10^{-6}	0	512	∞
2	1.6×10^{-6}	2.0×10^{-17}	681	109
3	1.6×10^{-6}	2.0×10^{-16}	480	11.1
4	1.6×10^{-6}	2.0×10^{-15}	115	3.68
5	3.2×10^{-6}	2.0×10^{-15}	112	4.21
6	16×10^{-6}	2.1×10^{-15}	898	5.56
7	16×10^{-6}	1.3×10^{-14}	302	5.38
8	32×10^{-6}	7.0×10^{-16}	2189	3.0
9	32×10^{-6}	7.0×10^{-15}	411	2.1
10	0	2.1×10^{-14}	—	4.86

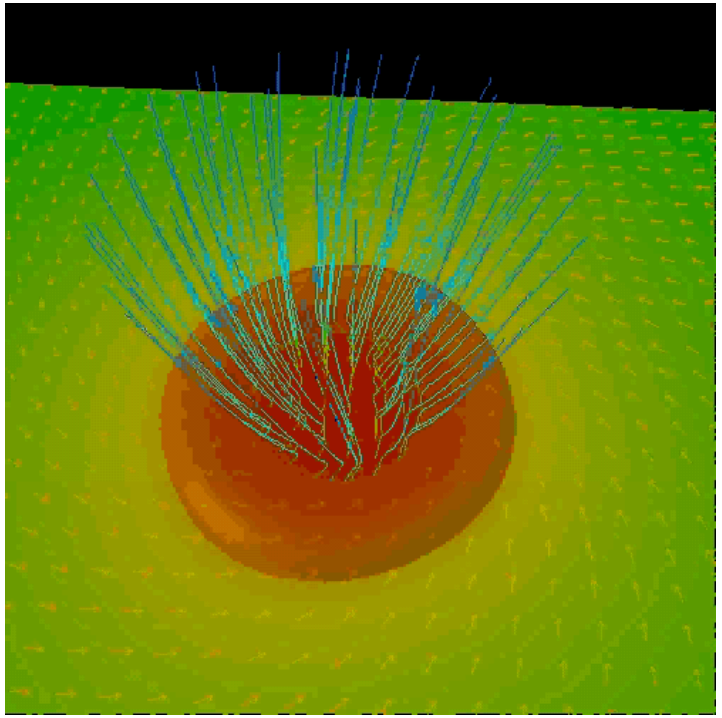
ガス収縮中の分裂と連星形成



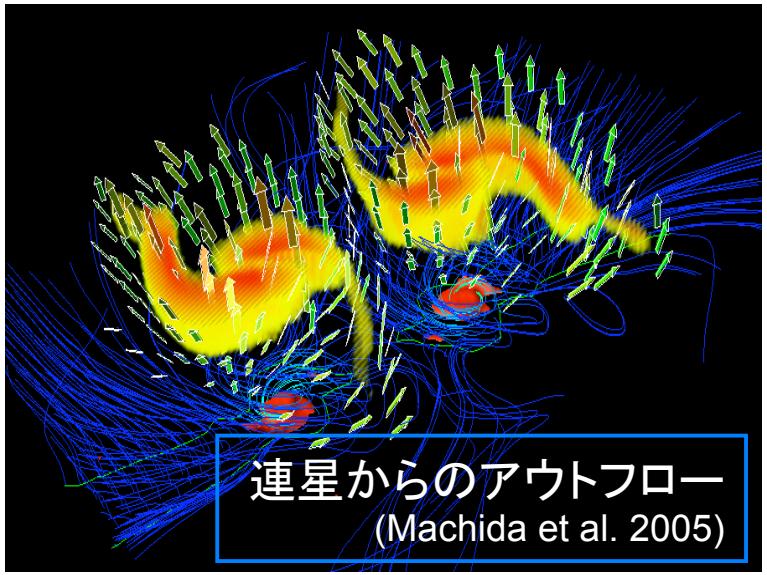
連星形成とアウトフロー



周連星円盤からのアウトフロー
(Machida et al. 2009, in preparation)



円盤の分裂とアウトフロー



- 星のほとんどは連星
  ⇒　連星からのアウトフロー、ジェットが重要

まとめ＆今後の課題

観測

- ジェット、アウトフローは、星形成過程で普遍的
- 2成分の異なる特徴を持つフロー(ジェット、アウトフロー):1成分では説明不可
- 高速成分が低速成分に取り囲まれる

理論：収縮段階は大体終了

- 分子雲コアから直接、原始星形成 (3Dシミュレーション)
- 収縮ガス中で異なる2つのコア(ファーストコア、原始星) ⇒　異なる2種類のフロー
- フローは、コア周囲の磁場強度と重力ポテンシャルの違いにより特徴付けられる
- ジェット・アウトフローは角運動量輸送(つまり星の形成)に不可欠

今後の課題

- 観測:フローの根元の観測、磁場の形状、回転　⇒　モデルの妥当性
- 理論:降着段階の研究、円盤形成(惑星形成)、フローの長時間進化、星形成率