

星形成の理論研究： 最近の進展とこれからの課題

町田正博 (九州大学)

星形成：分子雲から星・円盤・惑星形成へ

馬頭星雲

地球

分子雲コア

星形成の研究

暗く冷たいガスの塊から、
光り輝く星が誕生する過程を理解する

副産物として出来る円盤や惑星の
形成も理解する

3×10^6 AU

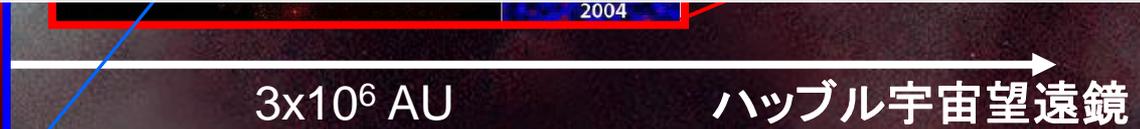
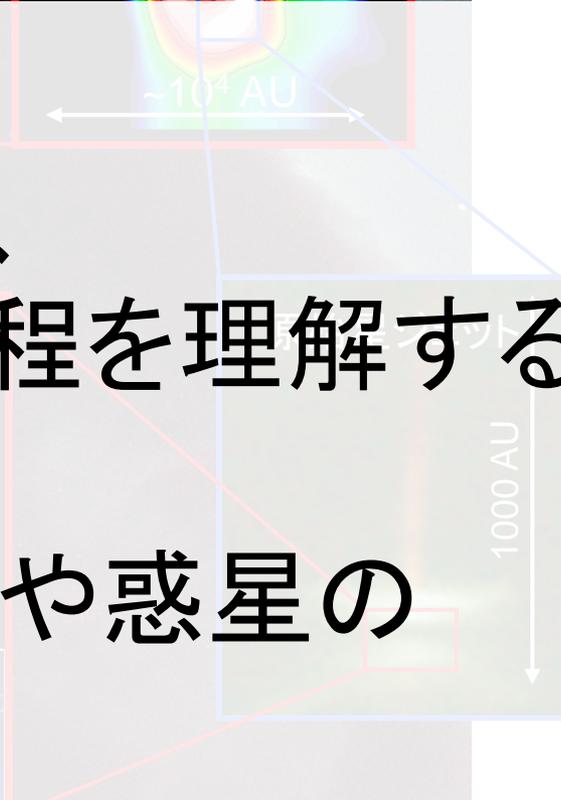
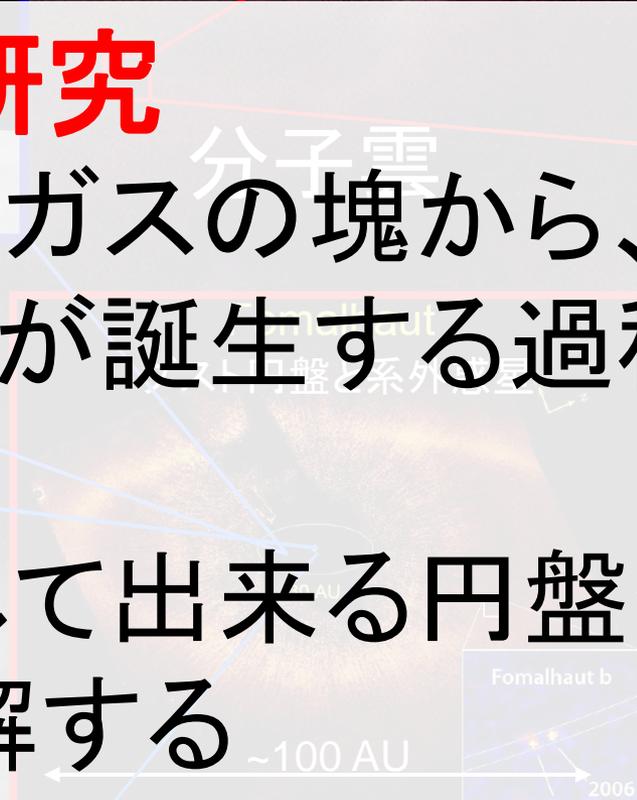
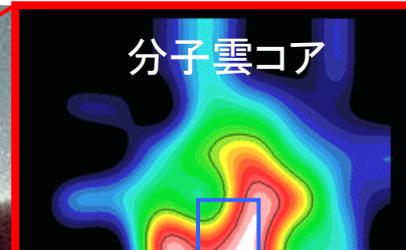
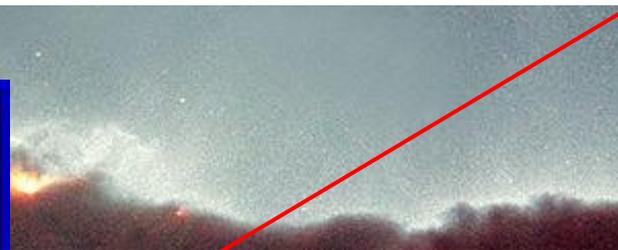
ハッブル宇宙望遠鏡

$\sim 10^4$ AU

1000 AU

~ 100 AU

Fomalhaut b
2006
2004



星形成という研究分野

□ 天文学の主たる研究分野の一つ

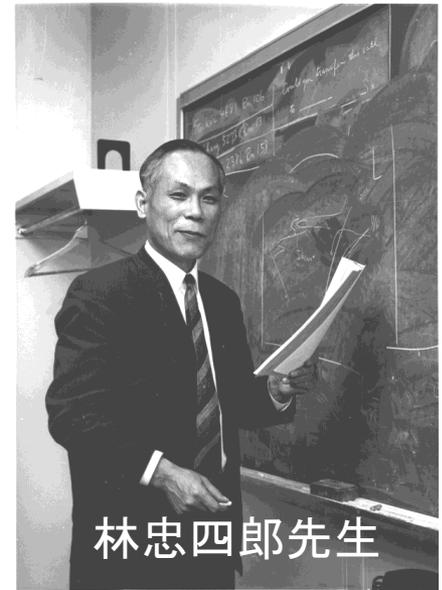
- 天文学会の公演数1位(次のスライド)
- 欧米でも重要分野:星形成と宇宙論 (D大U教授)

□ 伝統のある研究分野

- 林忠四郎先生、観山さん(天文台台長)
- 日本人の寄与も大きい
- PPVでは参加者800名中第二位が日本人(80名)
〔1位はアメリカの400人〕

□ これからさらなる発展が見込まれる分野

- 将来計画:ALMA, TMT
- 惑星形成も星形成に併合



林忠四郎先生

NASA G-68-10,414



観山台長

前回の天文学会講演数ランキング(観測機器除く)

セッションごと

1. 星・惑星形成: 97講演
2. 高密度星: 79講演
3. 星間現象: 60講演
4. 太陽: 55講演
5. 銀河: 50講演
6. 活動銀河核: 47講演
7. 銀河形成: 45講演
8. 恒星: 39講演
9. 宇宙論: 30講演
10. 太陽系: 21講演
11. 超新星爆発: 21講演
12. 銀河団: 14講演

2011年秋の天文学会@鹿児島

星形成関係

星・惑星形成・星間現象: 157講演

銀河関係

銀河・銀河形成・銀河団: 109講演

高密度星関係

高密度星・超新星爆発: 100講演

恒星関係

太陽・恒星: 94講演

その他

活動銀河核、宇宙論、太陽系: 98講演

参考: 観測機器関連

1. 地上観測機器: 117講演
2. 飛翔天体観測機器: 81講演

10年前の天文学会講演数ランキング

セッションごと

2001年秋の天文学会@群馬

1. 恒星: 48講演
2. 銀河: 42講演
3. 太陽: 39講演
4. 星・惑星形成: 37講演
5. 活動銀河核: 32講演
6. 星間現象: 30講演
7. 銀河団: 22講演
8. 太陽系: 21講演
9. 銀河形成: 15講演
10. 宇宙論: 10講演
11. 天体力学: 7講演
12. 位置天文学: 4講演

発表者がデビューした学会

研究者が多い ⇒ 重要な研究分野

しかし

研究者間の競争も激しい



高いレベルの研究(成果)

星形成関係

星・惑星形成・星間現象: 67講演

恒星・太陽: 87講演

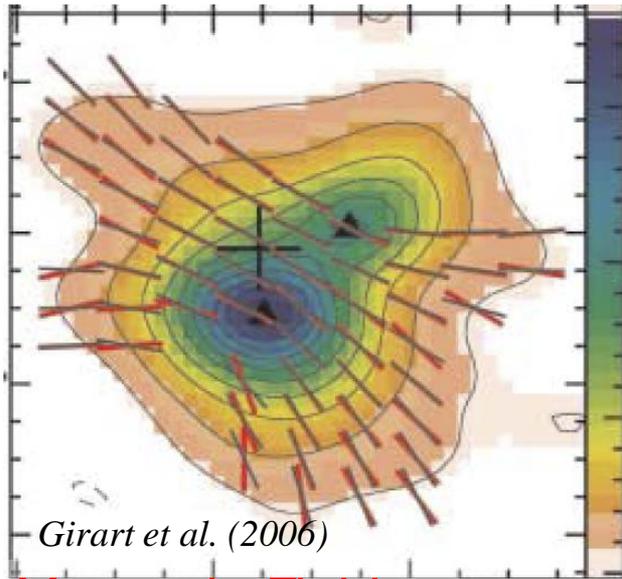
銀河関係

銀河・銀河形成・銀河団: 79講演

星・惑星形成: 2004年以降は大体1位か2位

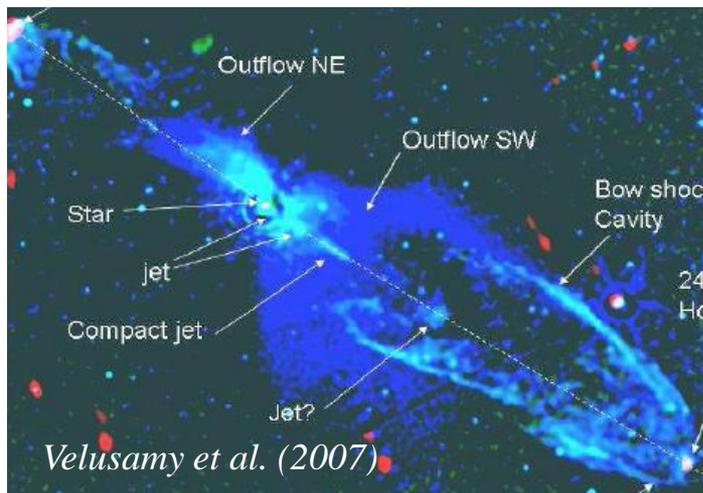
星形成は安定した研究分野！！

星形成：最近の観測の進展

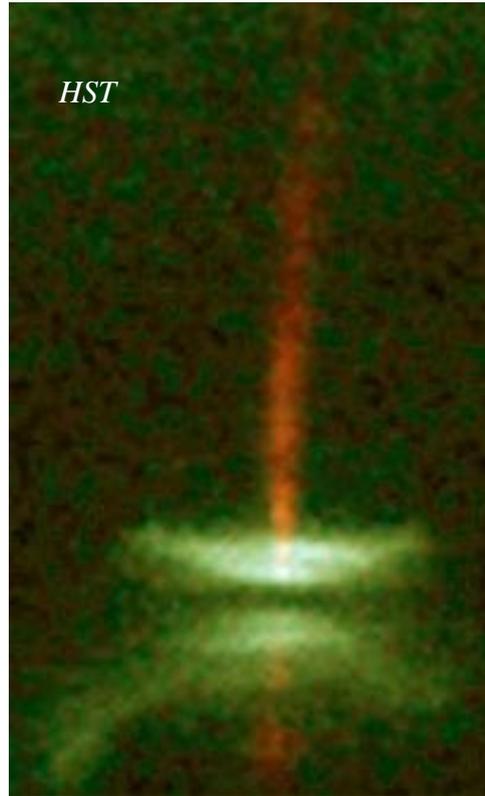


Magnetic Field

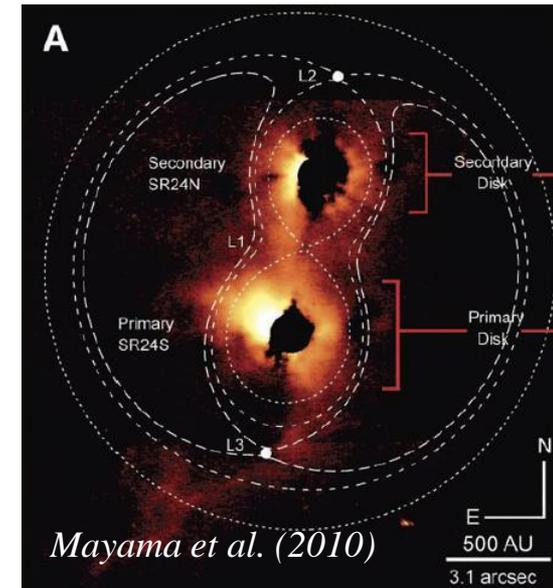
Molecular Outflow



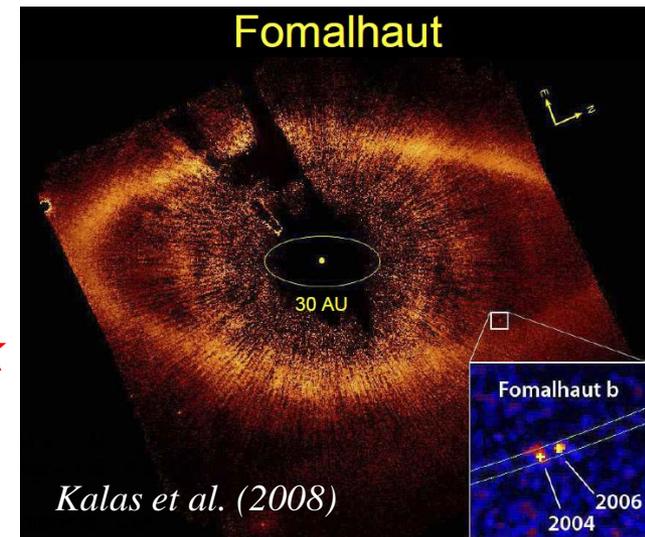
Protostellar Jet



Circumstellar Disk & Planet



Proto-Binary & Disks



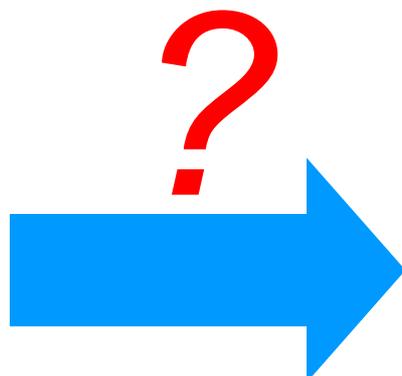
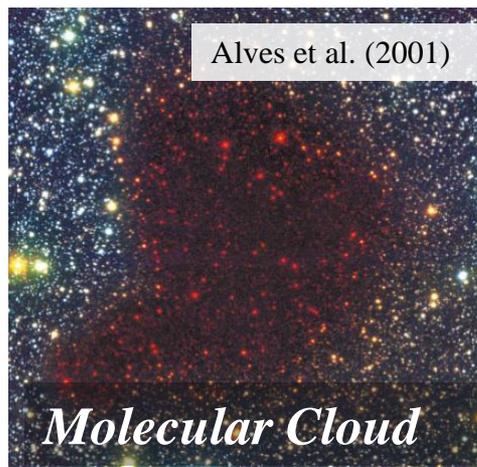
星の理論研究：観測では何が分からないのか？

星の初期条件

星・惑星の形成後

初期条件

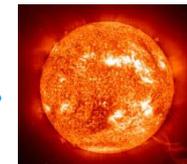
結果



星形成過程



To MS star



観測可

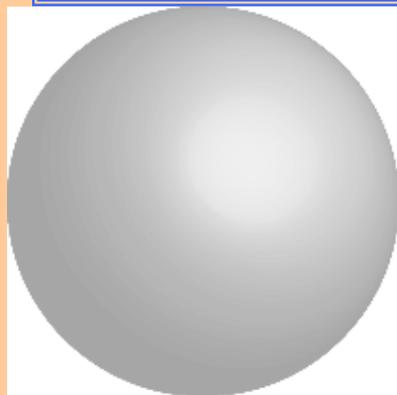
観測不可

観測可

濃いガス雲の内部を直接見通せない

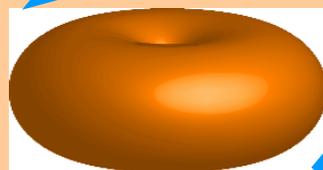
理論・数値シミュレーション!

星形成の概念図



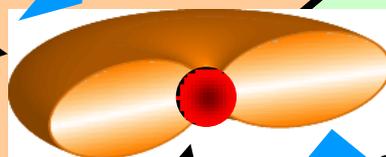
分子雲コア
~ 10^{4-5} AU

~ 10^{4-6} 年



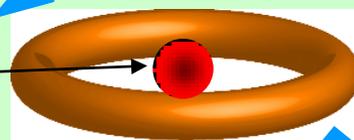
ファーストコア
~10-100 AU

~10- 10^3 年



原始星
~0.01 AU

~ 10^{4-5} 年



星周円盤

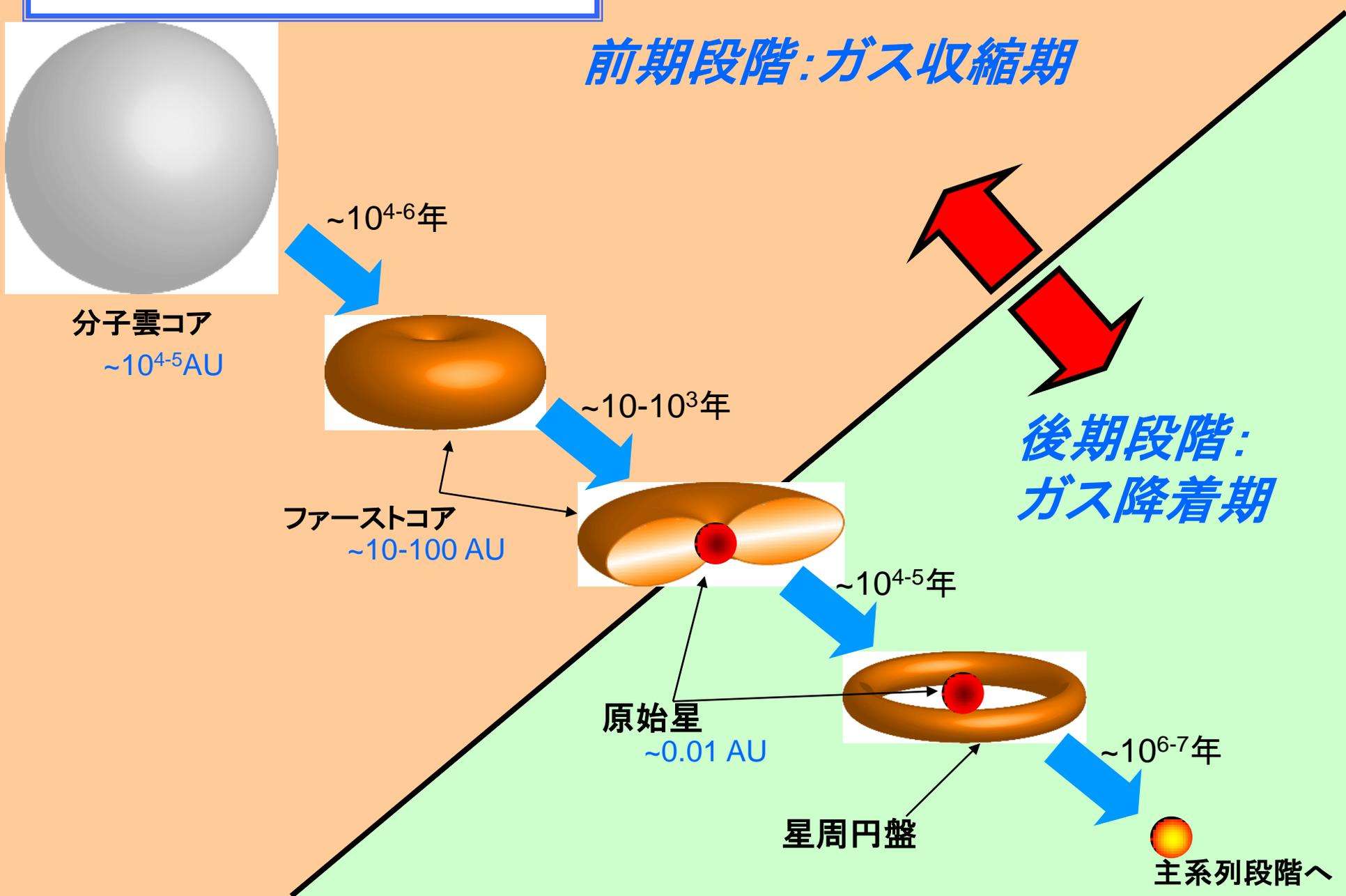
~ 10^{6-7} 年



主系列段階へ

前期段階: ガス収縮期

後期段階:
ガス降着期



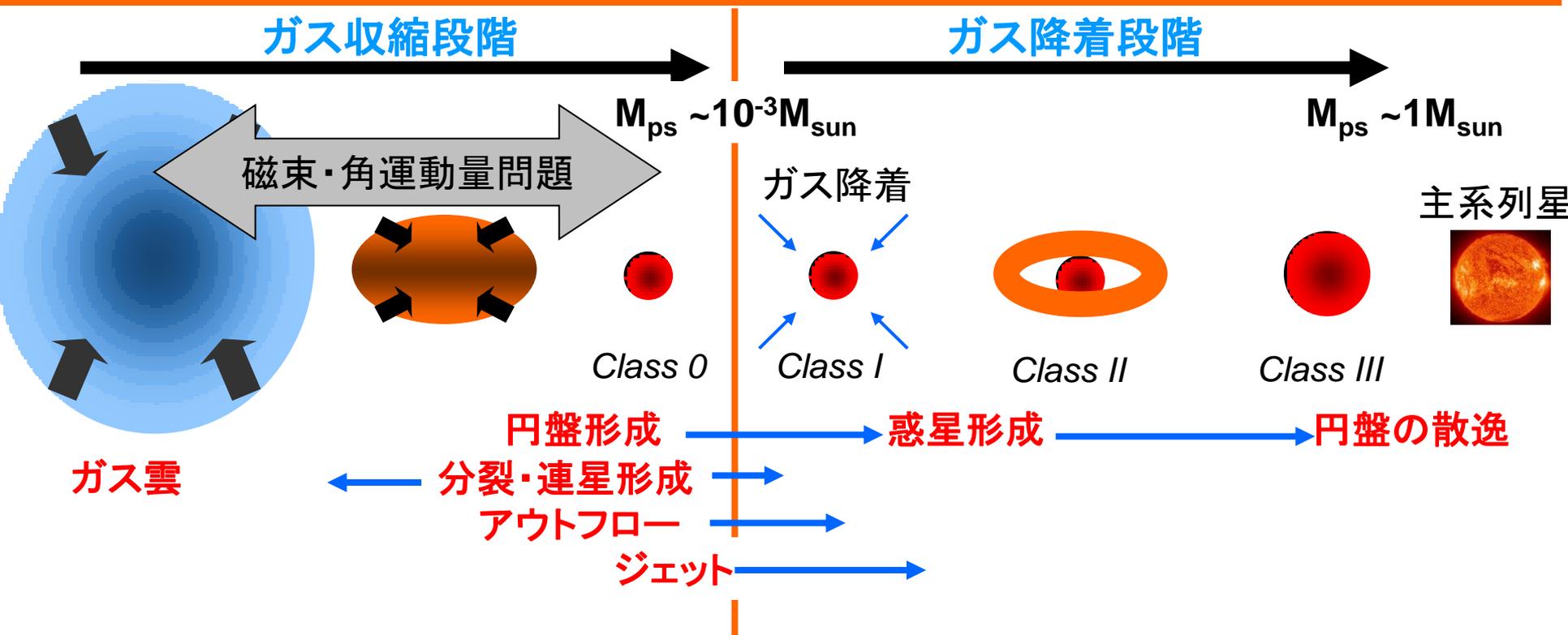
星の理論研究: 何を解明するのか?

□ ガスのかたまりから星が出来るまで

➤ 時間・空間進化: いつ? どこで?

分裂、アウトフロー、ジェット、磁場散逸、角運動量輸送

➤ 観測から得られる空間と時間のパーツを結びつけ、
一貫した(無矛盾)の星形成シナリオの構築



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

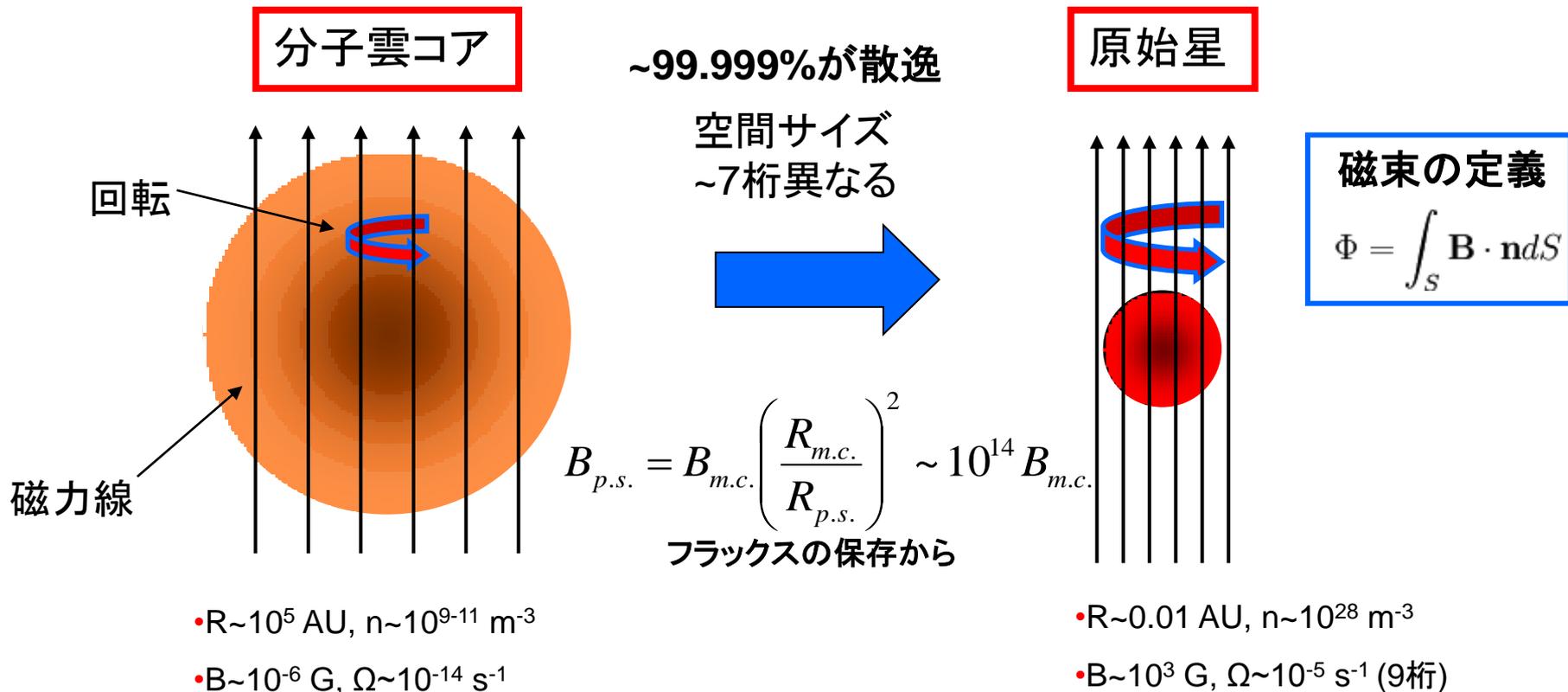
■ 星形成率と星の質量の問題

後期段階

これらの問題を解決しつつ星形成シナリオを構築する

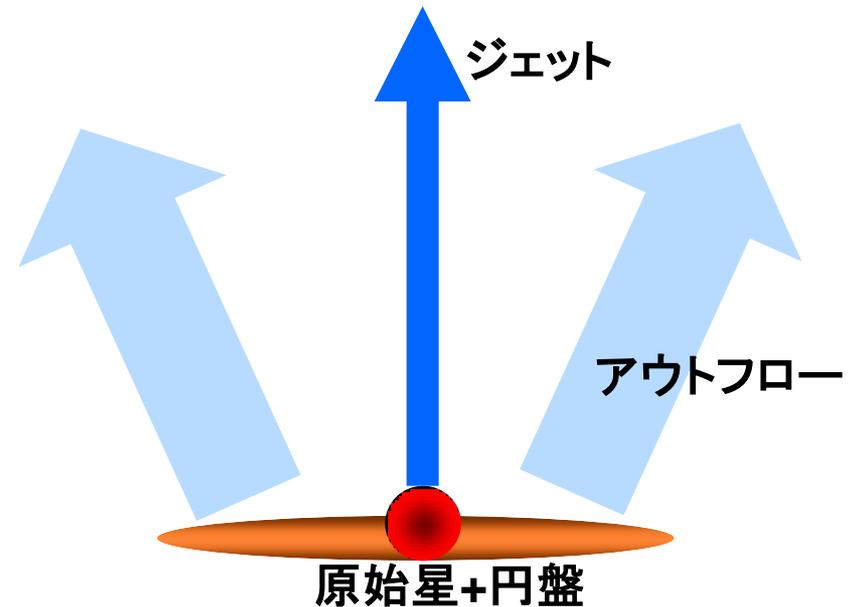
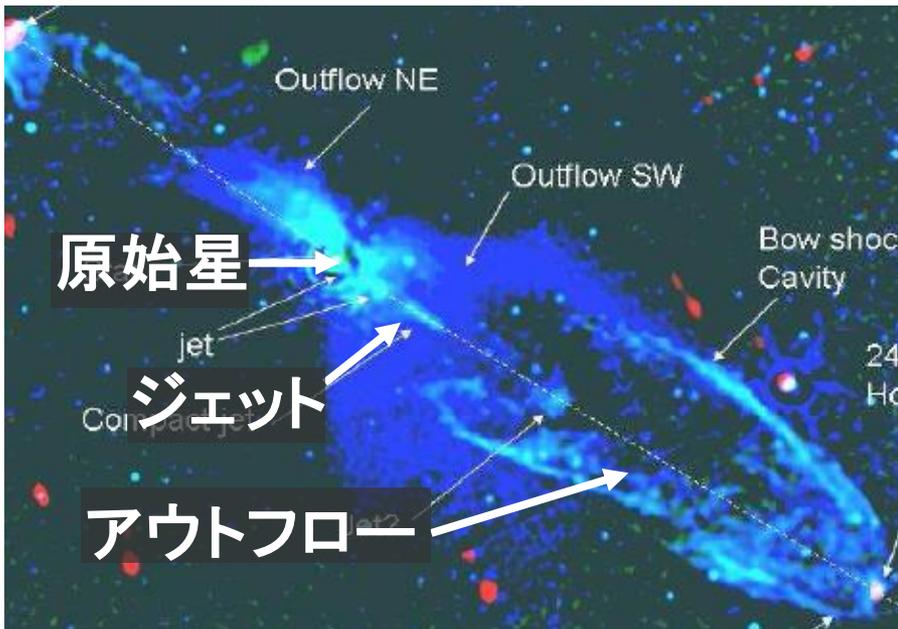
磁束・角運動量問題：星形成で最も深刻な問題

- 分子雲コアと原始星で磁束・角運動量が5桁以上も異なる
- 磁束問題： $\Phi/\Phi_{\text{cri}} \sim 1$ (分子雲) $\Leftrightarrow \Phi/\Phi_{\text{cri}} \sim 10^{-5}-10^{-3}$ (原始星)
- 角運動量問題： $J/M \sim 10^{17} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (分子雲) $\Leftrightarrow J/M \sim 10^{12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (原始星)
- 磁束保存、角運動量保存 \Rightarrow 磁束、角運動量を捨てないと星になれない



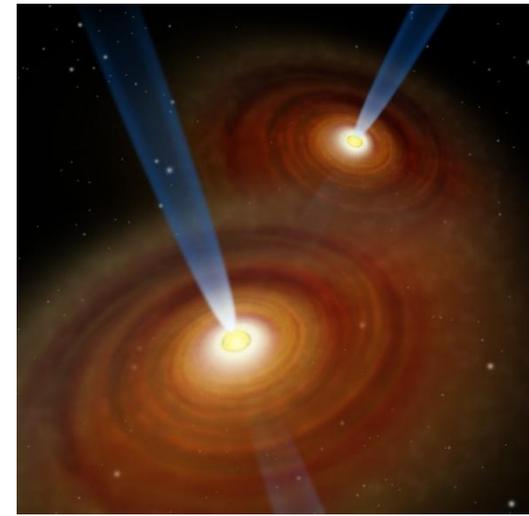
ジェット・アウトフロー問題

- 星形成過程で普遍的な現象: 300以上の観測
 - 二成分のフロー: ジェットは、アウトフローに囲まれている
 - (分子)アウトフロー: 低速 (~ 10 km/s), 広い開口角
 - (光学)ジェット: 高速 (~ 100 km/s), 非常に狭い開口角
- どのような機構で二成分のフローが駆動?



連星形成問題

- 星は連星として誕生
- 主系列星の60-80%、原始星の80-90%が連星or多重星
- 長周期連星と短周期連星の形成過程は？
- 単一の分子雲コアで誕生
 - ⇒ 星形成過程で分裂？



神戸大のHPから

これらの問題を解明するには、分子雲コアから星が誕生する過程の理解が必要

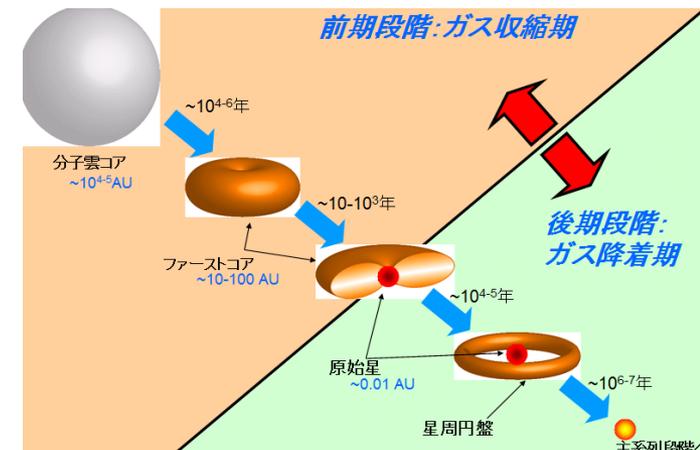
星形成の理論：自己相似解と前期・後期段階

□ 前期段階

- 等温収縮期に自己相似解に収束
- どのような初期条件から始めても答えは同じ
進化は初期の $E_{\text{rot}}/E_{\text{mag}}$ のみに依存 (1パラメータで進化が分類)
- 余計な情報(質量、密度プロファイル、回転即、磁場の分布)を捨て去る過程

□ 後期段階

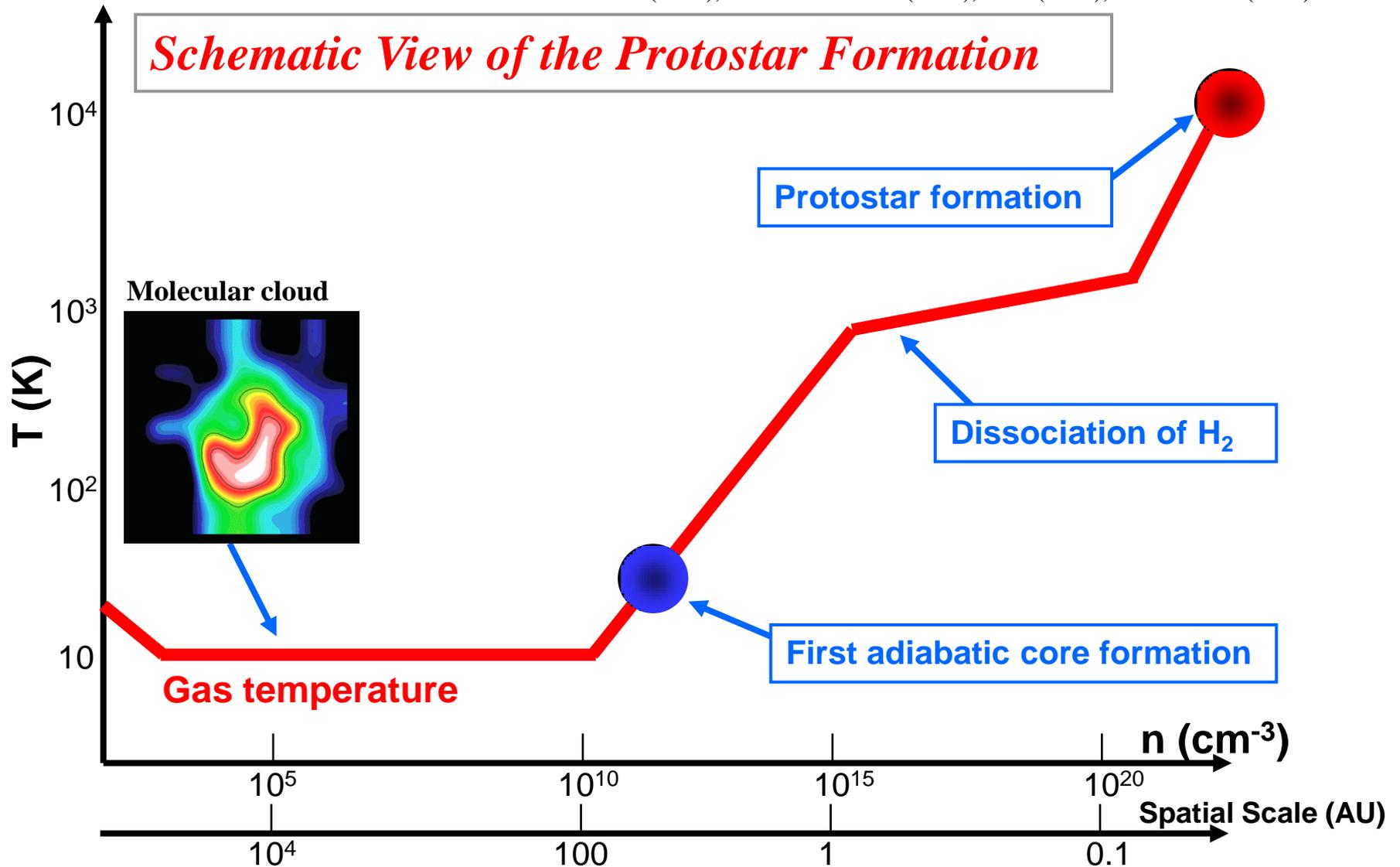
- カオス的進化 (単純な設定での解は存在するが)
- 初期に保持していたガス球の情報を思い出す
- ガス球の有限の質量、落下してくるガスの比角運動量、磁場の分布
- 星の個性を獲得：星の最終質量、円盤質量と惑星の有無、ジェット駆動...



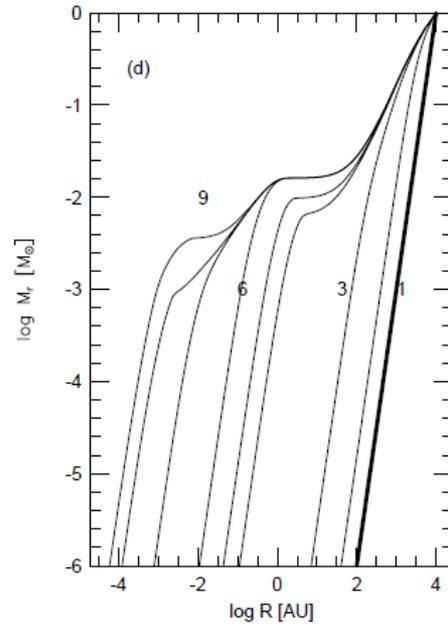
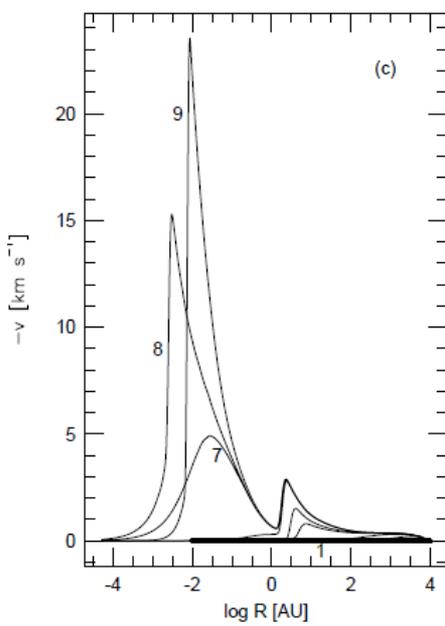
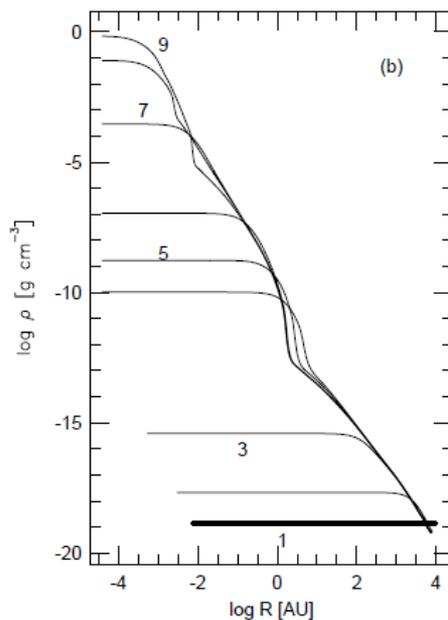
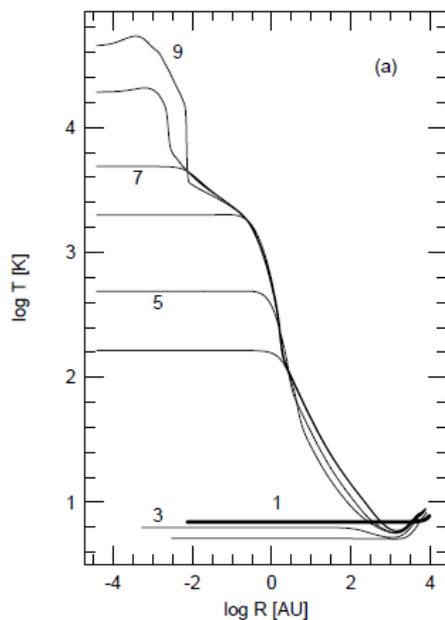
ガスの熱進化：前期段階

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



1次元球対称輻射流体計算



Masunaga & Inutsuka (2000)

□ 重力収縮していくガス球の進化を原始星形成後まで計算

□ 温度、密度、速度、質量の半径分布

□ ファーストコア

➤ $n \sim 10^{10}$ cm⁻³, $r \sim 1$ AU

➤ heating rate > cooling rate

➤ $M \sim 0.01$ Msun (Jeans 質量)

□ セカンドコア (初期原始星)

➤ $n \sim 10^{21}$ cm⁻³, $r \sim 0.01$ AU

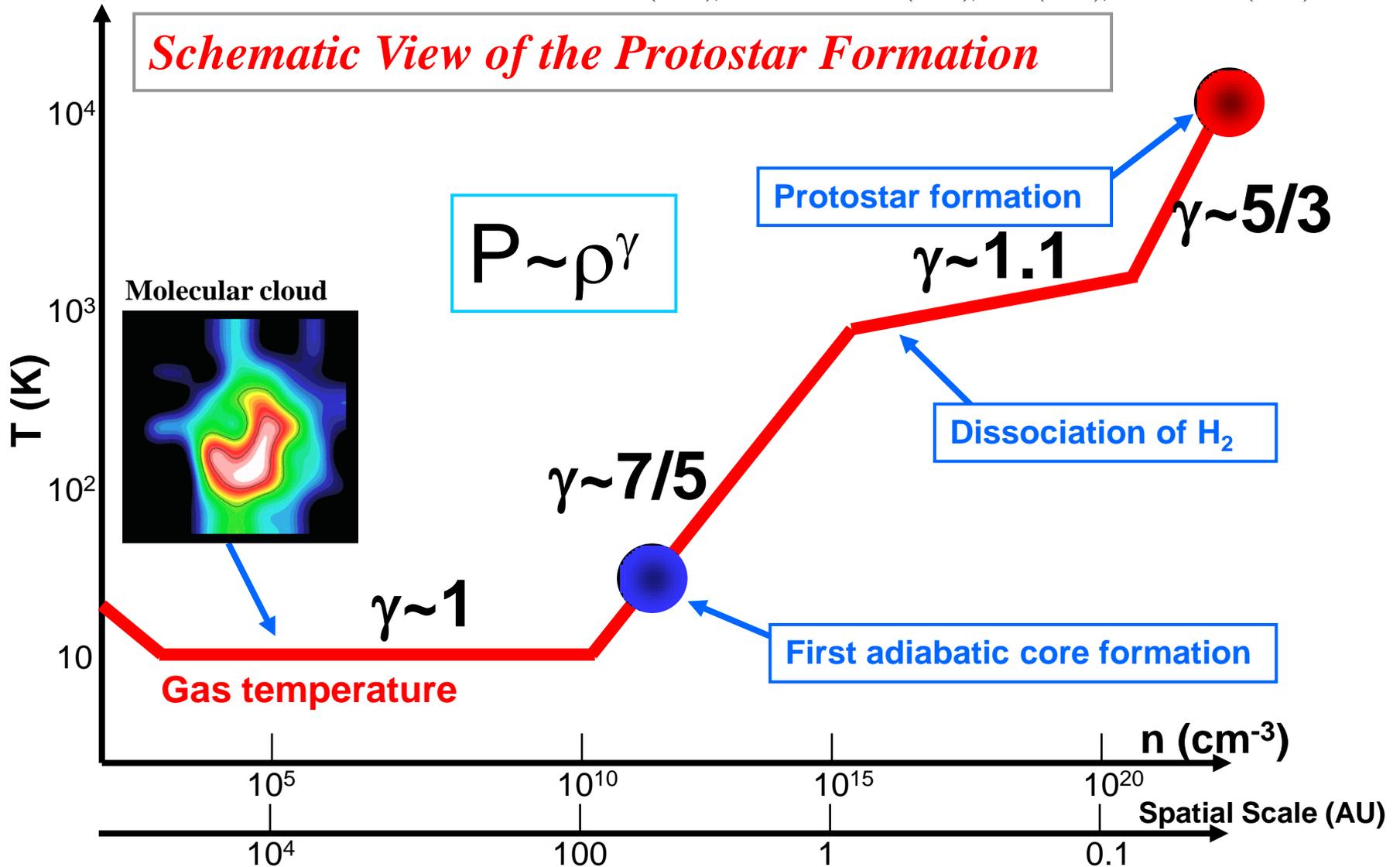
➤ H₂の解離終了

➤ $M \sim 0.001$ Msun (Jeans 質量)

ガス収縮段階のガスの熱進化

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



ガスの収縮と重力の γ

□重力の γ

単位質量あたりの力

$$\text{重力} = -\frac{GM}{r^2} \propto r^{-2}$$

$$\text{圧力勾配} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \propto \frac{\rho^{\gamma-1}}{r} \propto r^{-3\gamma+2} \quad (\text{ここで、} \rho \propto r^{-3})$$

重力が圧力勾配に打ち勝つには

$$\gamma < \frac{4}{3}$$

□実際の進化は、重力の $\gamma \sim 1$ ① 1.4 ① 1.1 ① 1.67
等温期 断熱期 第二収縮期 原始星形成期

前期段階の進化

□ 等温収縮期 ($\gamma \sim 1, n < 10^{10} \text{ cm}^{-3}$)

- 相似解に収縮、解に従って進化
- 回転・磁場を考慮した自己相似解も存在

□ 断熱降着期 ($\gamma \sim 7/5, 10^{10} \text{ cm}^{-3} < n < 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)

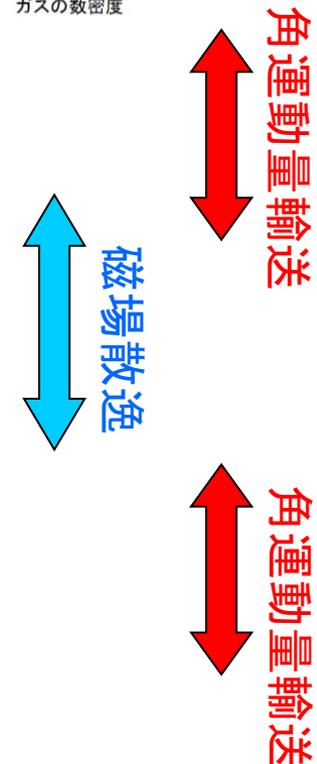
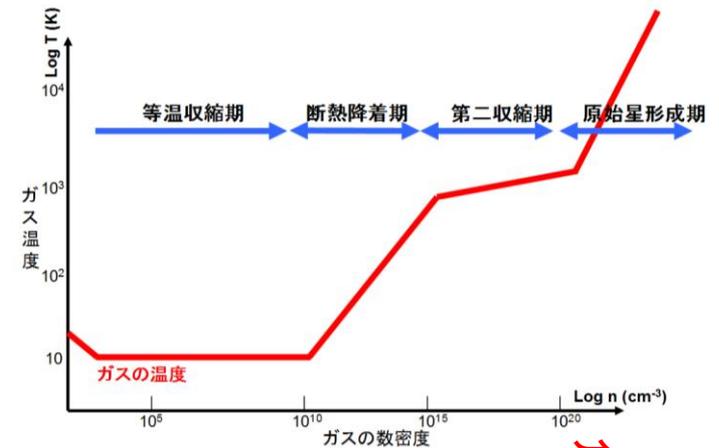
- ファーストコア形成
- 収縮が一旦止まる、コアへのガス降着で中心密度が緩やかに増加
- 回転タイムスケール < ガスの収縮タイムスケール \Rightarrow 分裂, 連星
- 磁力線がねじられる \Rightarrow アウトフロー

□ 第二収縮期 ($\gamma \sim 1.1, 10^{16} \text{ cm}^{-3} < n < 10^{21} \text{ cm}^{-3}$)

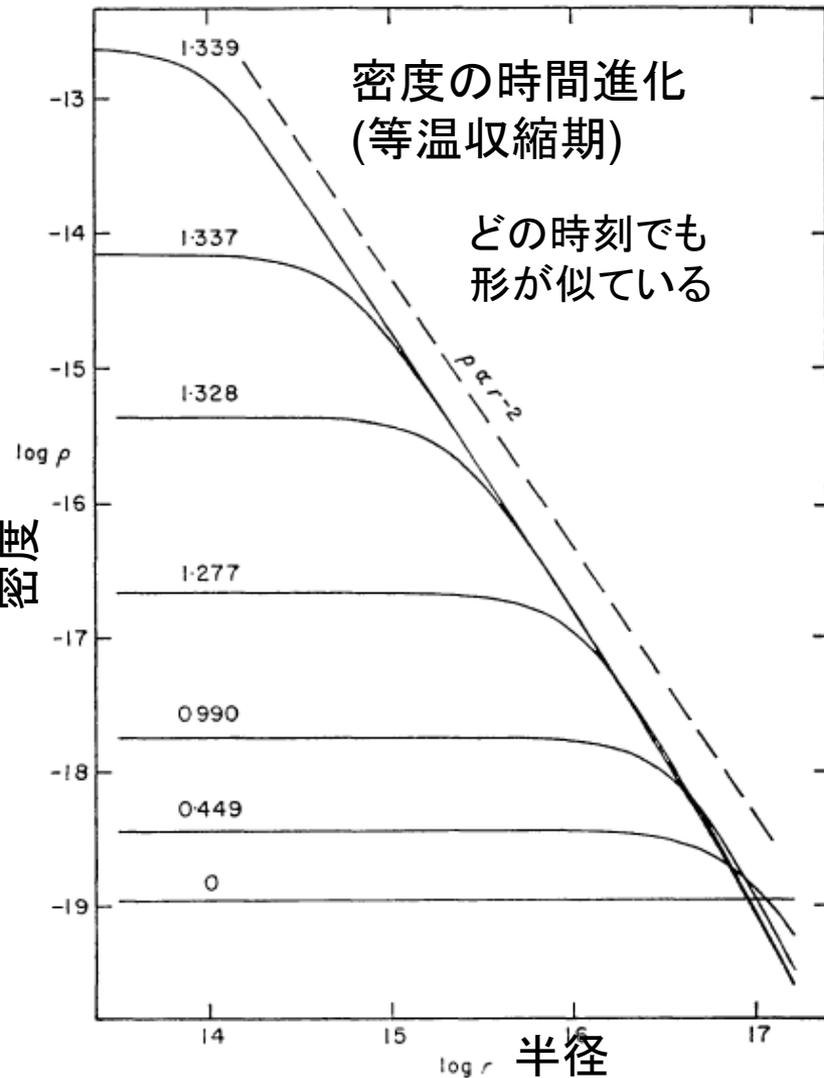
- 収縮のタイムスケールが短い
- しかし、 $\gamma \sim 1.1$ の回転解が存在しないため、たまに分裂 \Rightarrow 近接連星

□ 原始星形成期 ($\gamma \sim 5/3, n > 10^{21} \text{ cm}^{-3}$)

- 原始星の誕生
- 磁力線のねじれによりジェット of 駆動



等温収縮期: 自己相似解



Larson (1969)の計算

- 重力収縮していくガス球の進化を計算
- 以下のような相似座標では

$$x = \frac{r}{c_s |t - t_0|} \quad \rho(r, t) = \frac{\rho(x)}{4\pi G (t - t_0)^2}$$

密度分布は等しい \Rightarrow 相似解

自己相似解

異なるパラメータの解が、適当な規格化によってある無次元変数による一つの解に帰着する

外層の情報を捨て去る

中心のガス質量は密度上昇と共に減少
相似座標では、質量が流れ出すように見える

\Rightarrow (外層の)情報を外に捨て去る

\Rightarrow 収縮する中心の情報のみが重要

(初期の密度、速度・磁場分布に依存しない)

どのような初期条件から始めても、同じ密度分布が実現 \Rightarrow 初期条件依存性なし

多次元計算の初期条件と基礎方程式

(Resistive M)HD 方程式

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

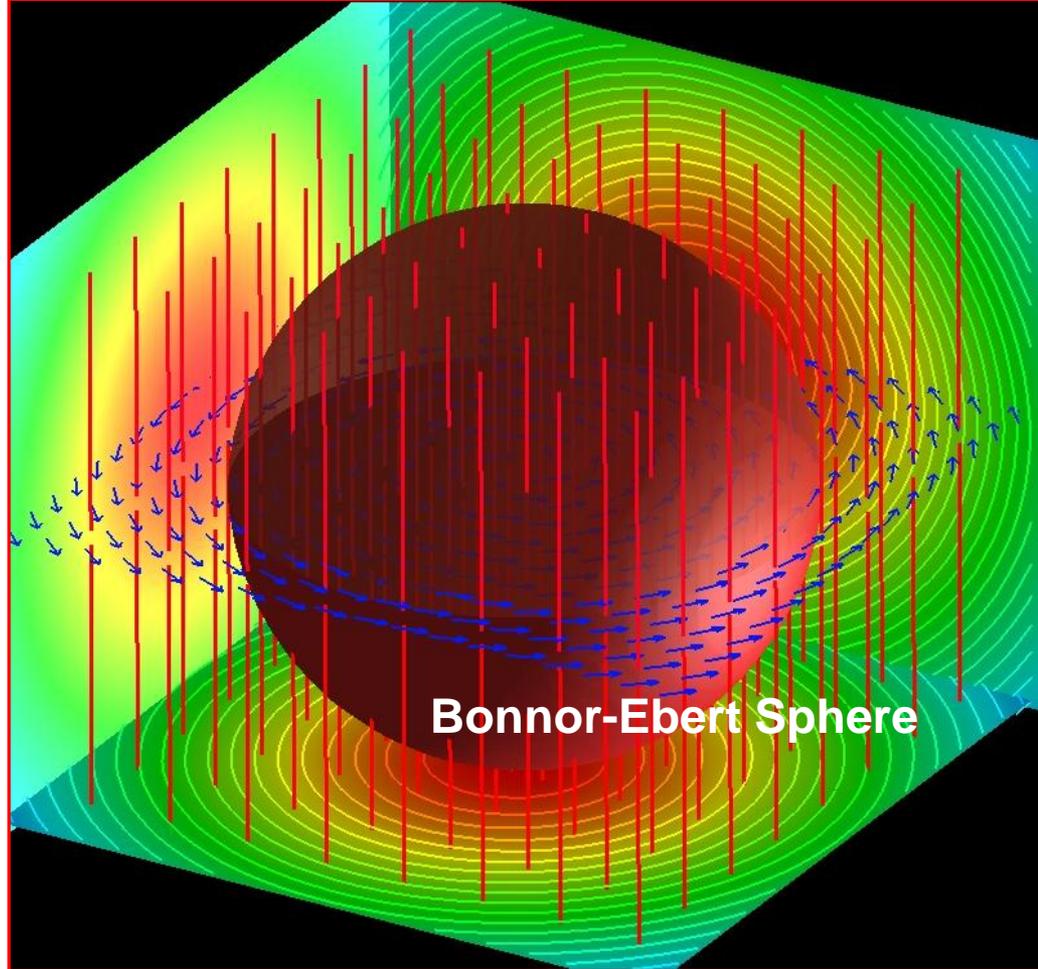
$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla P$$

$$-\frac{1}{4\pi} \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B}) - \rho \nabla \phi,$$

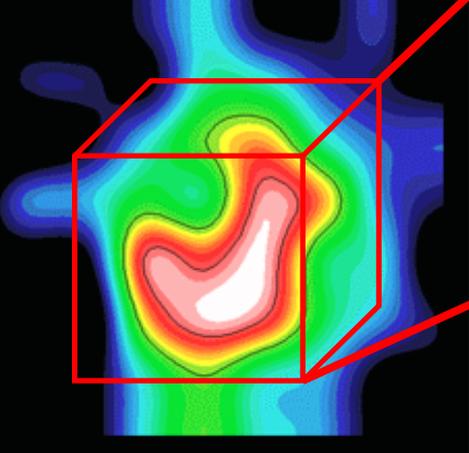
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B},$$

$$P = P(\rho), \quad (\text{バロトロピック近似})$$

$$\nabla^2 \phi_{gas} = 4\pi G \rho,$$

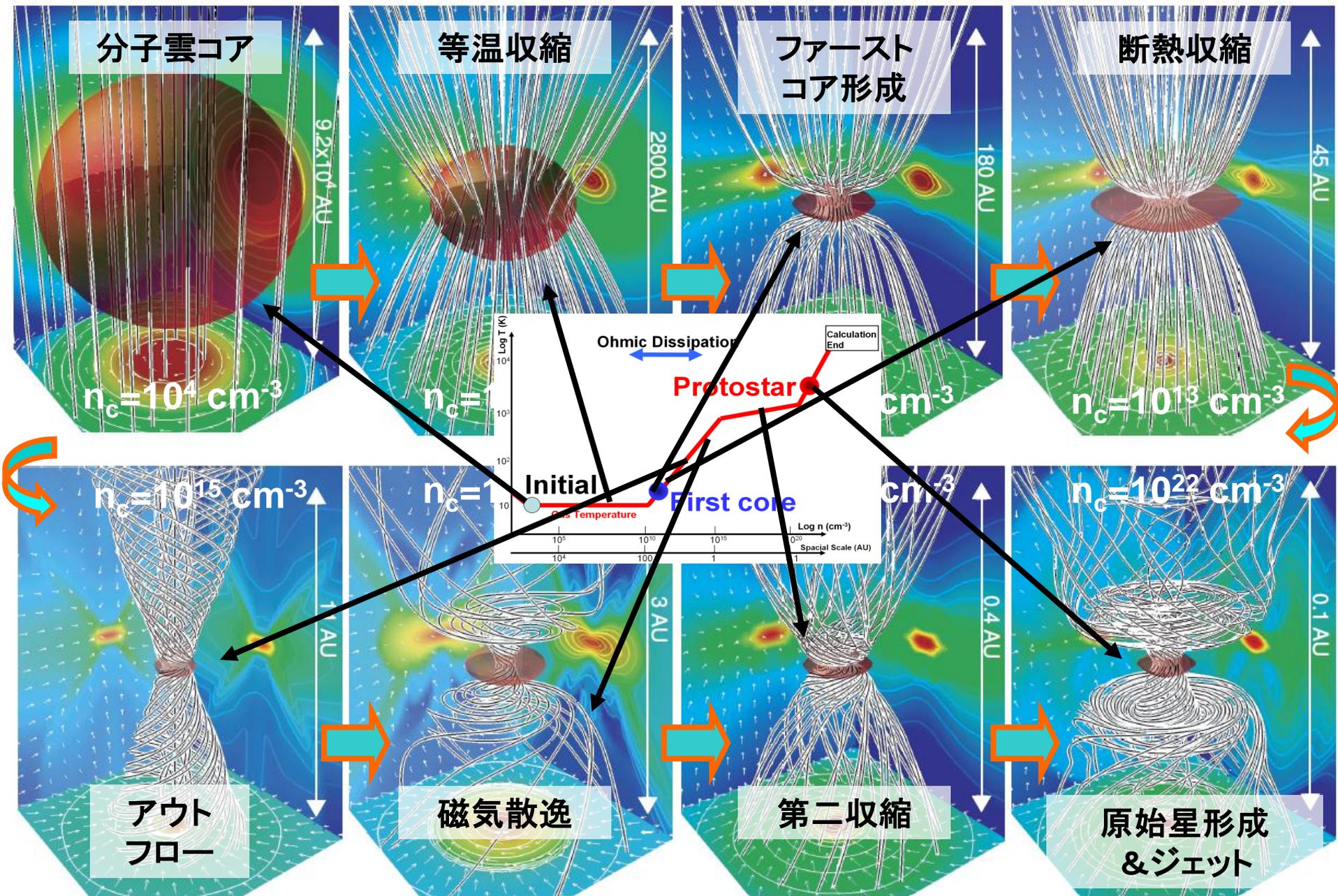


Molecular Cloud core



- Bonnor-Ebert球:重力と圧力勾配で得られる平衡解
- 観測される分子雲コアはB.E.球とよく一致
- 実際には、どのような初期条件でも進化は変わらない

前期段階：等温収縮から原始星形成まで



ガスの収縮と回転

とりあえず磁場の効果を見ない

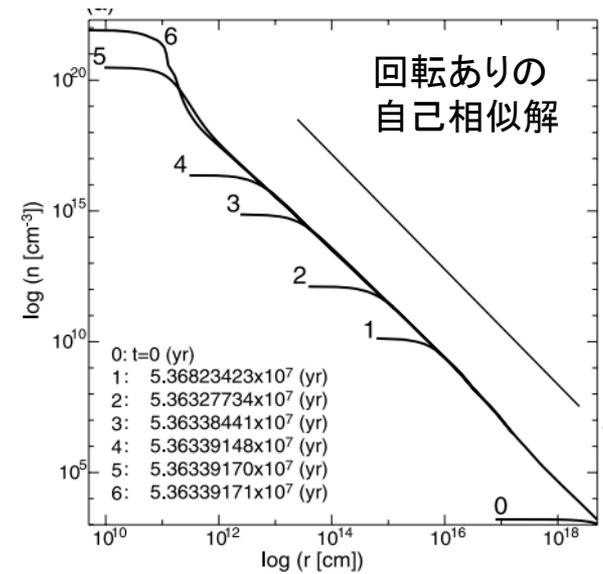
□ 等温収縮期

➤ 回転ありの自己相似解: 円盤状収縮

□ 断熱降着期

➤ 解が存在しない

➤ 非線形: 分裂 or スパイラル構造(数値計算)

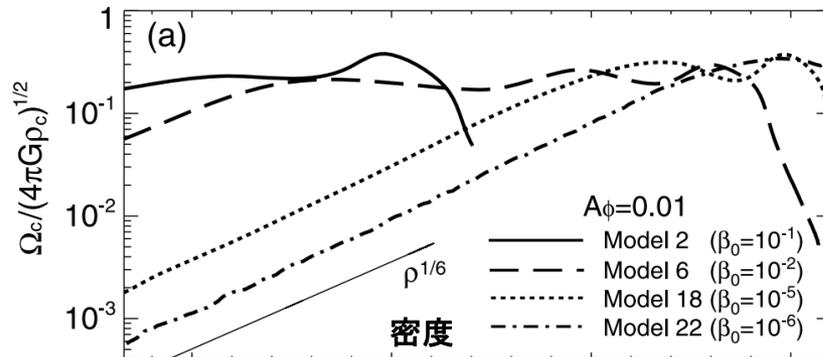


回転が等温期の進化に影響を与える条件

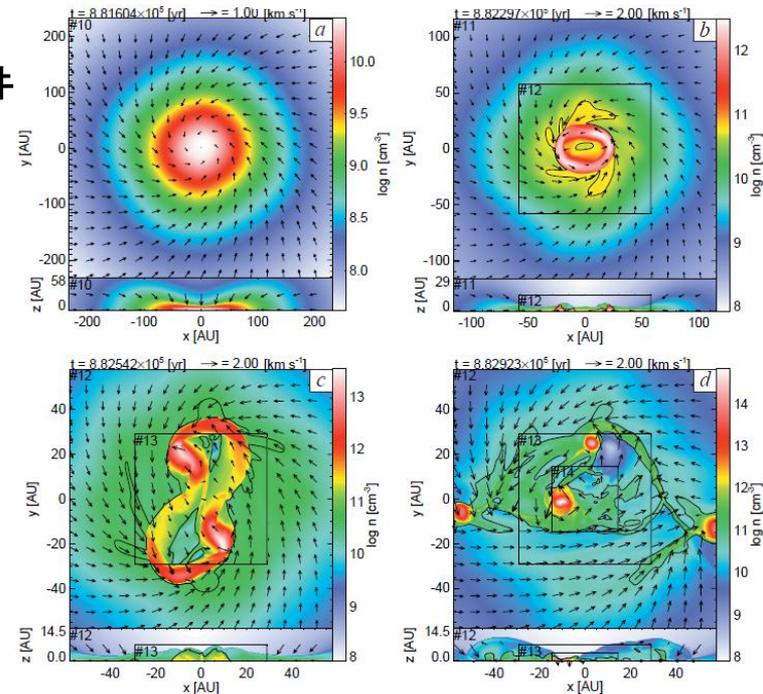
$$\frac{\Omega_c}{\sqrt{4\pi G \rho_c}} \sim 0.2 - 0.3 \quad \leftrightarrow \quad E_{\text{rot}} \sim (0.04 - 0.09) E_{\text{grav}}$$

等温収縮期に球対称コラプスから円盤コラプスに移る条件

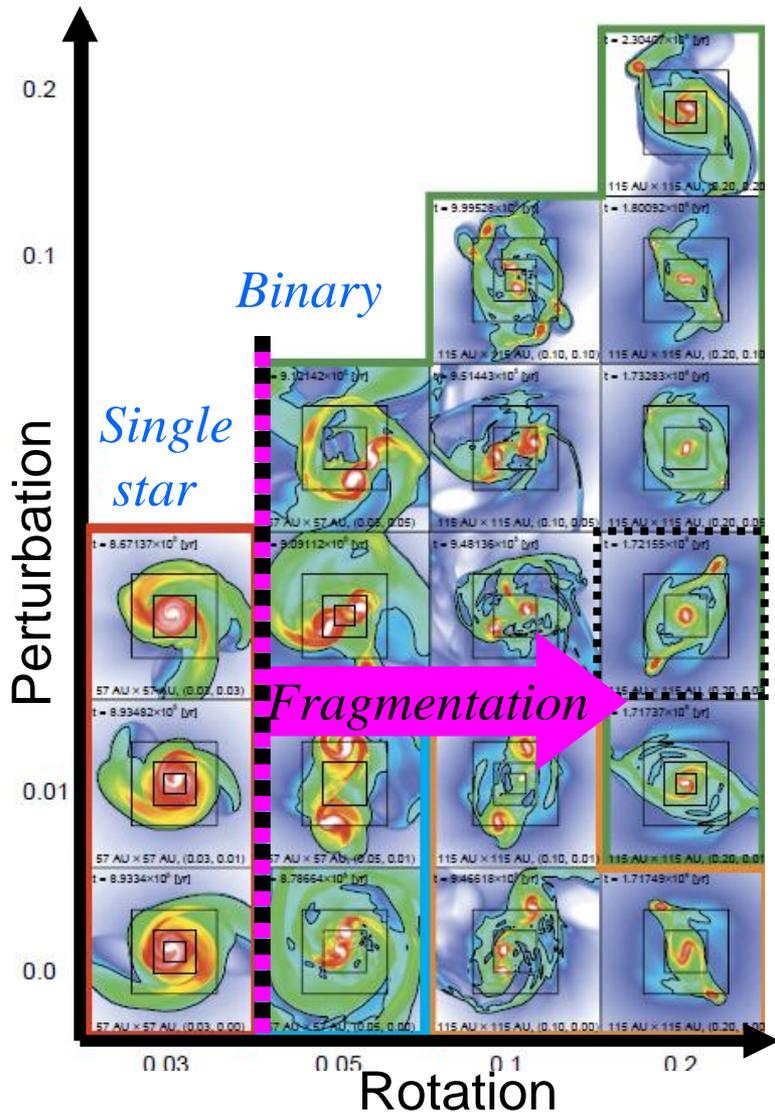
$$\frac{\Omega_c}{\sqrt{4\pi G \rho_c}} \sim \rho^{1/6} \Rightarrow \rho^0 \text{ (収束後)}$$



断熱降着期の分裂



断熱降着期：回転と分裂



□ 等温収縮期

- 回転ありの解が存在 ⇒ 分裂しない
- 初期にあまりに不安定で自己相似解に従わないと分裂 (Tsuribe & Inutsuka 2000)

□ 断熱降着期

- 収縮解なし、収縮が一時的に止まる
- 回転の効果：非線形 ⇒ 数値シミュレーションが必要
- 断熱降着期に以下の条件が満たされていると必ず分裂して連星・多重星に

$$\frac{\Omega_c}{\sqrt{4\pi G\rho_c}} \sim 0.2 - 0.3$$

- これは、単に回転入りの自己相似解に達したという条件
- 連星間距離：~100AU (典型的な値)

磁場の効果

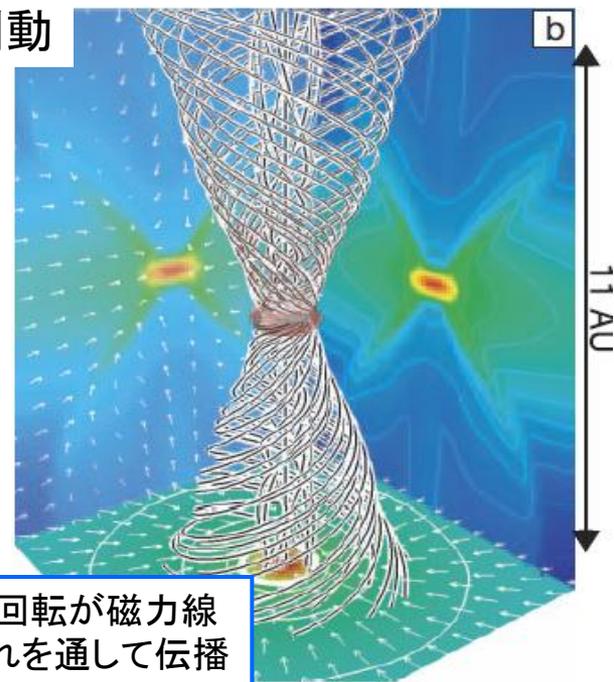
□ 等温収縮期

- 磁場ありの自己相似解: 円盤状収縮
- 回転・磁場がある場合でも解が存在

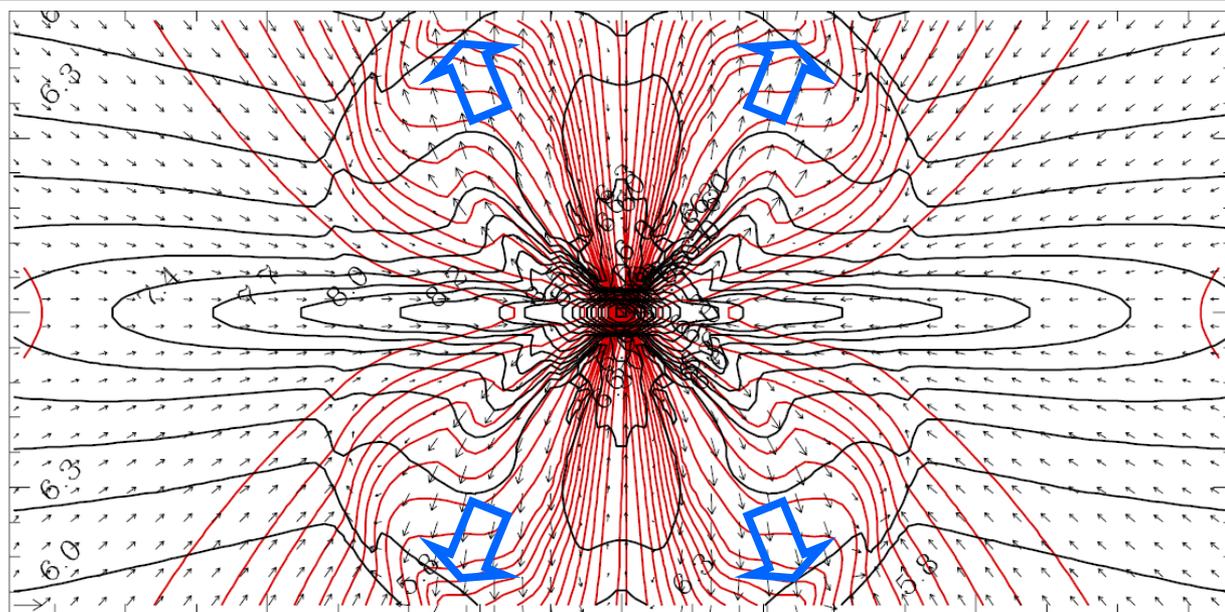
□ 断熱降着期

- 収縮が一時的に止まる
- 回転タイムスケール < 収縮タイムスケール
⇒ 磁力線がねじられる
⇒ 磁気制動、磁気遠心力風

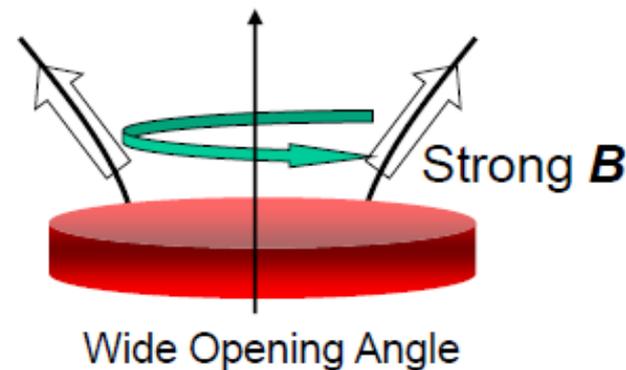
磁気制動



円盤の回転が磁力線のねじれを通して伝播



磁気遠心力風



磁力線に沿って回転円盤から角運動量をもったガスが流出

等温収縮から断熱降着期の解の収束：磁場・回転の効果

□ 等温収縮期にBとΩは、一定の値に収束

$$\frac{\Omega_c^2}{(0.2)^2 4\pi G \rho_c} + \frac{B_{zc}^2}{(0.36)^2 8\pi c_s^2 \rho_c} = 1$$

□ 磁場、回転がある場合も自己相似解が存在

□ 多次元でも分子雲の進化は、1パラメータ B/Ω ($=\xi$)

□ $\xi > \xi_{\text{cri}}$: 磁場優勢

- 主にアウトフローによって角運動量輸送
- 分裂なし

□ $\xi < \xi_{\text{cri}}$: 回転優勢

- 弱いアウトフロー
- 分裂による角運動量輸送(軌道角運動量)

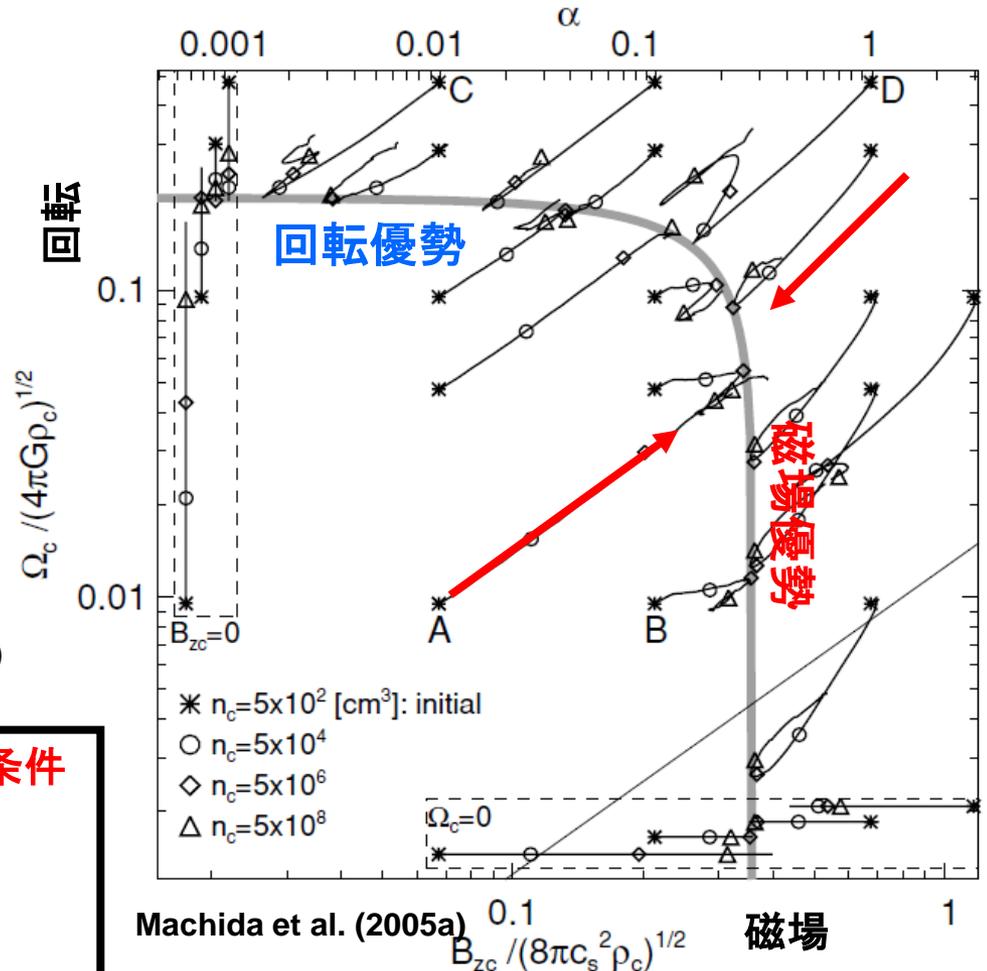
等温収縮に解が収束 ⇒ その後の進化で初期条件の影響が現れない

⇒ 前期段階の星形成シナリオの一意性 (1パラメータのみで表現可能)

・ 矢印は進化の方向

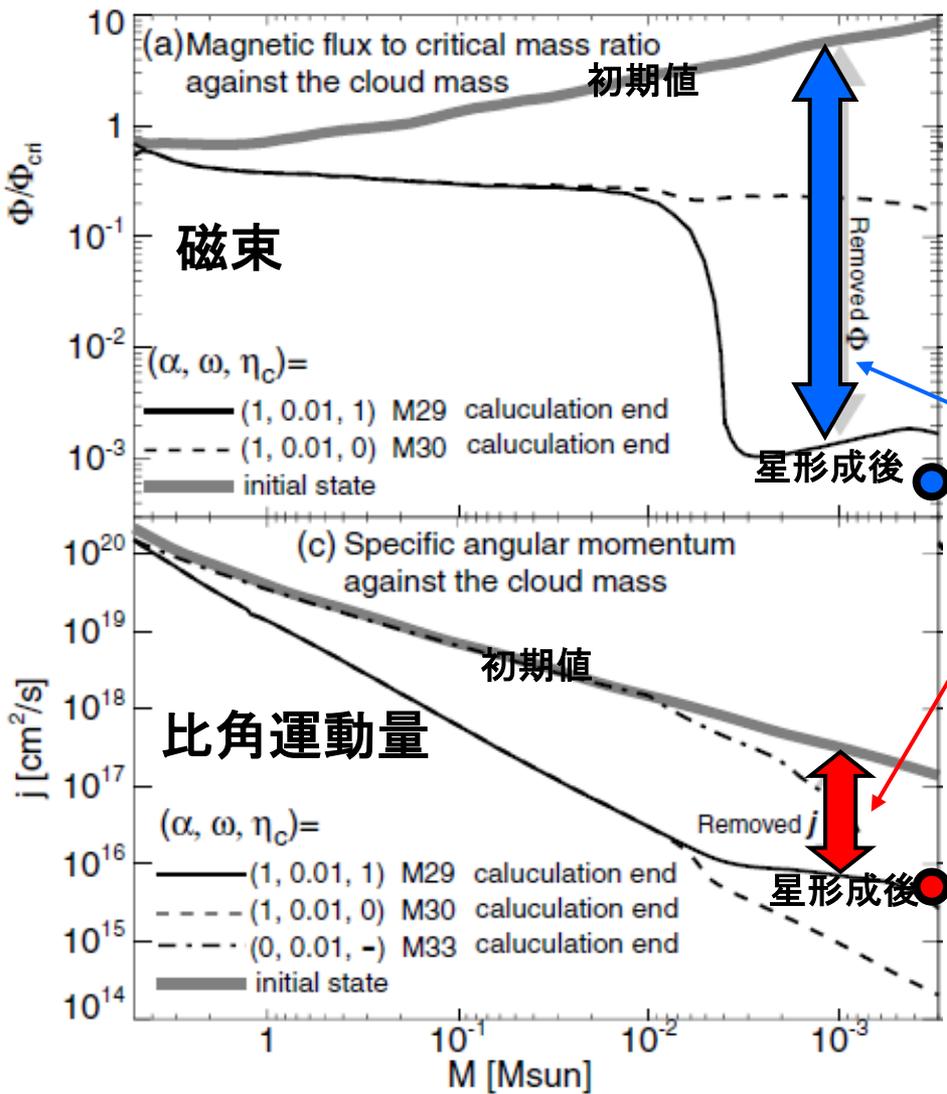
・ x軸: 磁気/熱エネルギー · y軸: 回転/重力エネルギー

Magnetic Flux – Spin 関係



Machida et al. (2005a)

角運動量・磁束問題の解決



➤ **磁場の散逸**: オーム散逸, $\sim 100\text{KG}$ の磁場

➤ **角運動量輸送**: 磁気制動、アウトフロー、 $\sim \text{days}$ の回転周期

オーム散逸

アウトフローと磁気制動

● 典型的な原始星の磁束の観測値

● 典型的な原始星の角運動量の観測値

← 中心から積分した質量

第二収縮期の分裂と連星形成

(Machida et al. 2008)

長周期連星

短周期連星

単星

➤ 第二収縮期も相似解が存在しないため分裂可

➤ 回転⇒分裂を促進

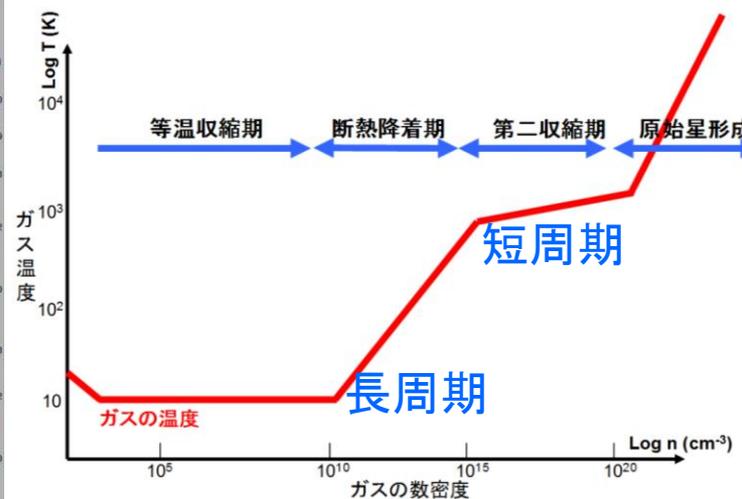
➤ 磁場⇒分裂を抑制
(角運動量輸送)

➤ 連星形成条件は、1パラメータで記述可

磁気エネルギー／回転エネルギー

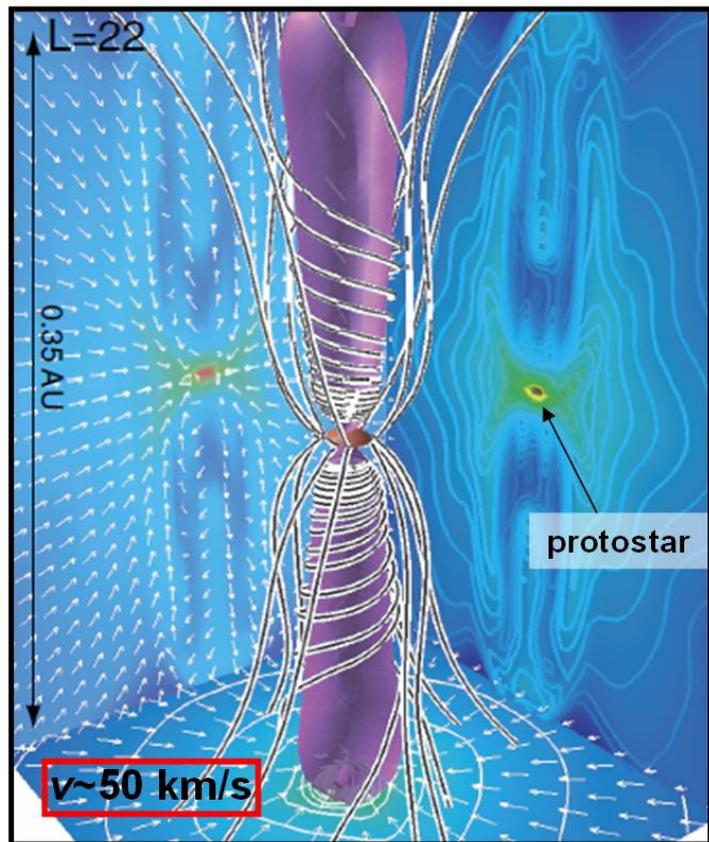
遅い ← 回転 → 速い

弱い ← 磁場 → 強い

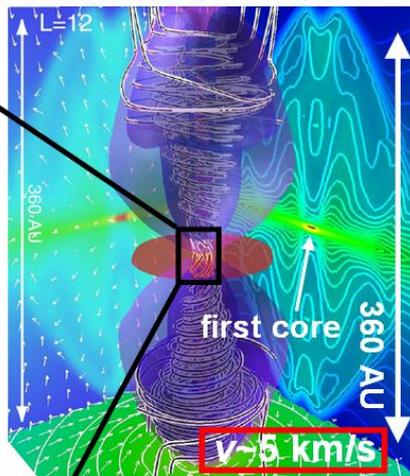


原始星形成期：高速ジェットの出現

Protostellar Jet



Protostellar Outflow

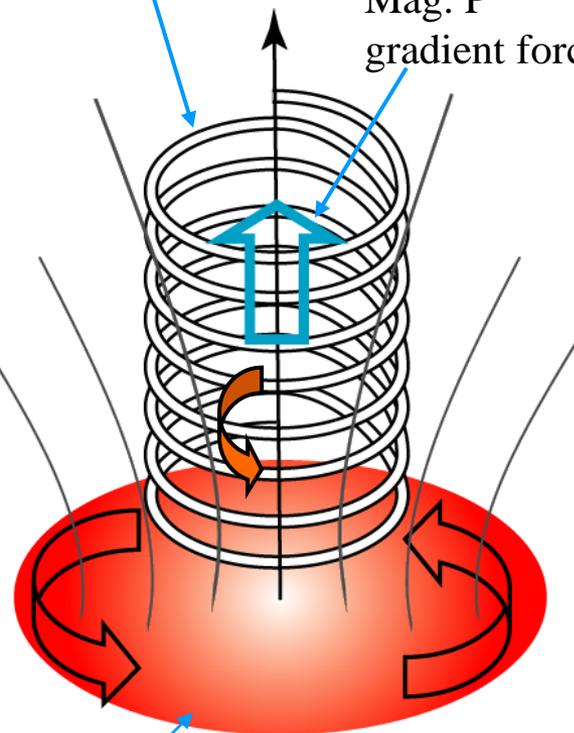


1000 times close-up

Very weak field

Strong toroidal field by protostar's rotation

Mag. P gradient force



Protostar

磁気圧勾配ジェット

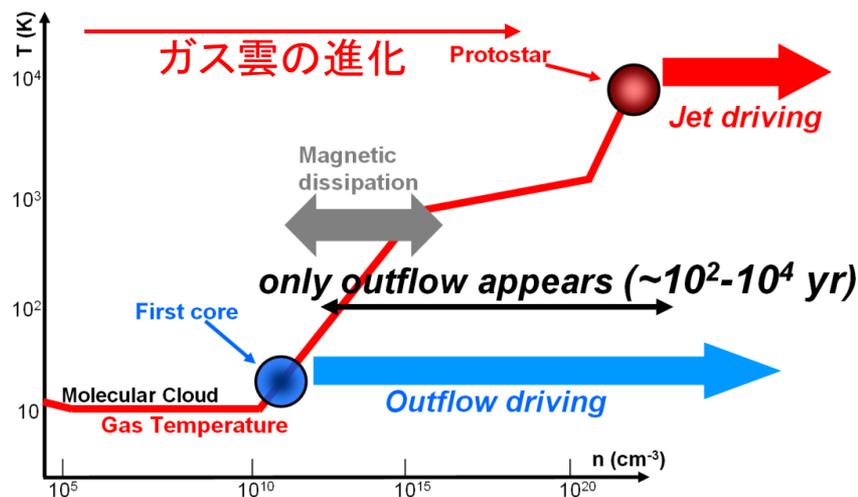
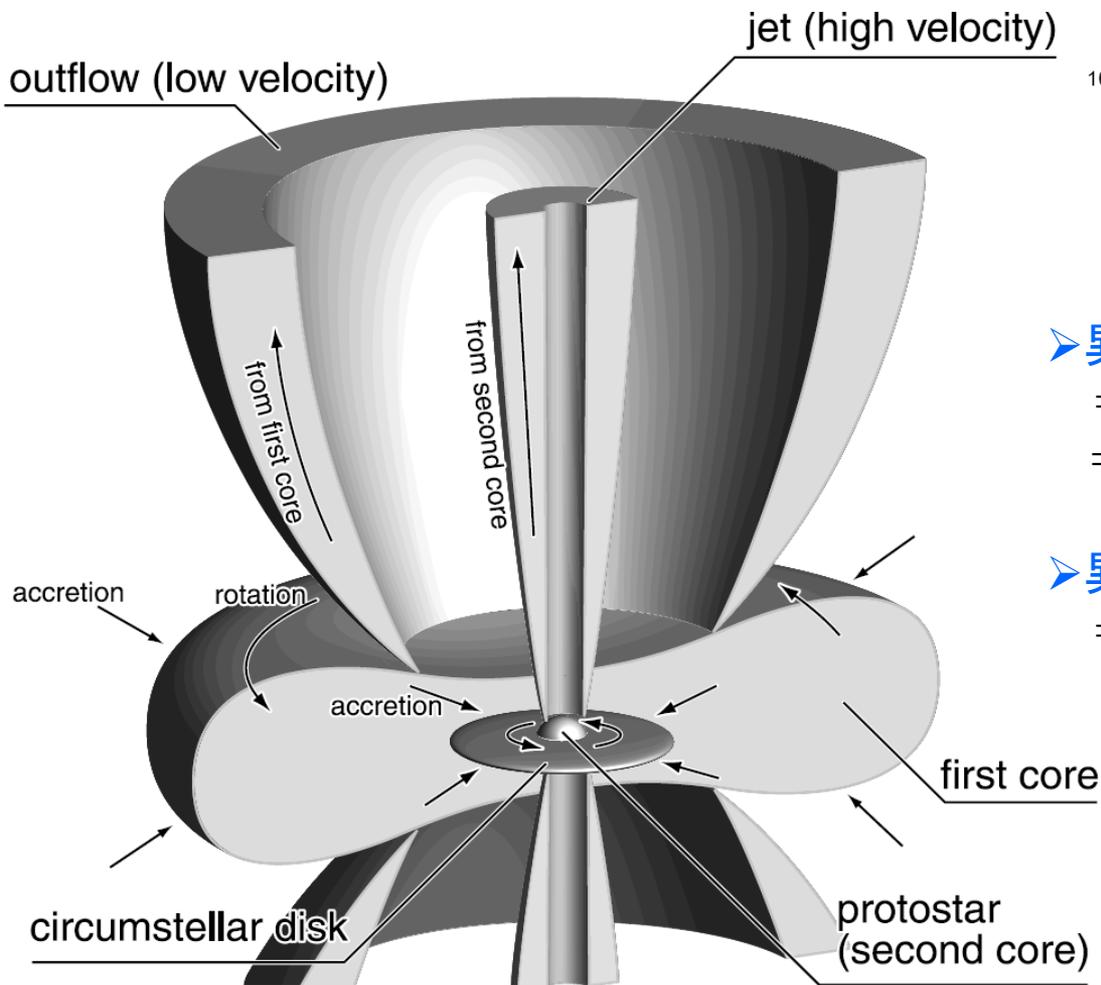
Machida et al. (2008)

原始星形成期：収縮が止まり原始星形成

- 回転タイムスケール < 収縮タイムスケール ⇒ ジェット駆動
- 磁気散逸により弱磁場のため磁気遠心力風は出ない
- 磁力線がねじられて、磁気圧勾配力により駆動
- 深い重力ポテンシャルから高速のフロー ⇒ 角運動量輸送

2成分のフローと出現時期

2つの駆動体(ファーストコアと原始星)から2成分のフロー



異なる速度:

- ⇒ 異なる重力ポテンシャル
- ⇒ 出現場所のケプラー速度

異なるコリメーション

- ⇒ 異なる駆動メカニズム
- 磁気遠心力風 v.s. 磁気圧駆動風

最近の計算：輻射の効果

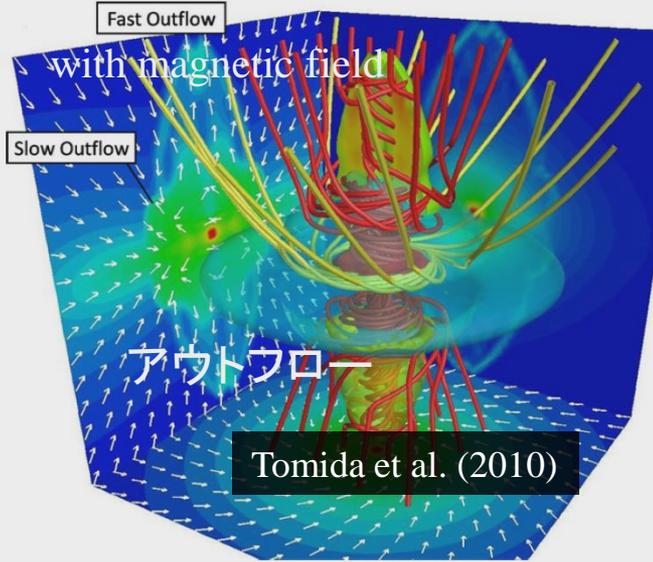
計算機や数値計算手法の発展で輻射輸送を考慮した計算が可能に

with magnetic field

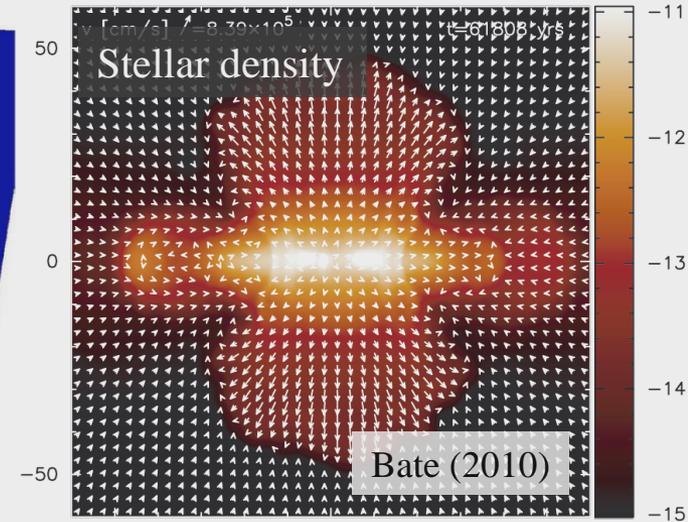


連星形成

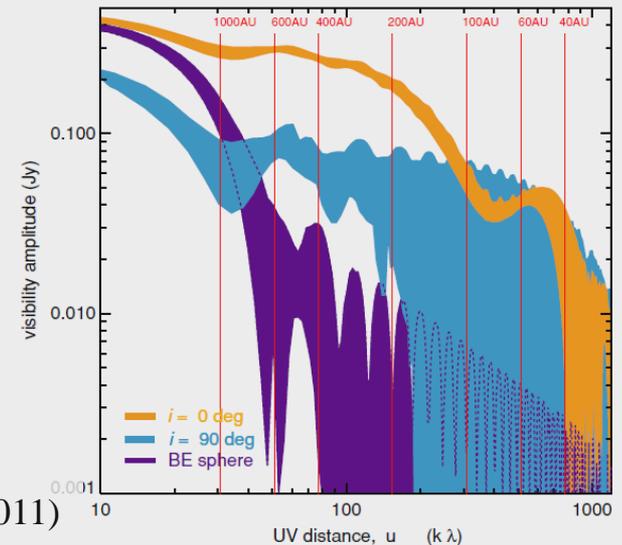
Commerçon et al. (2010)



Tomida et al. (2010)



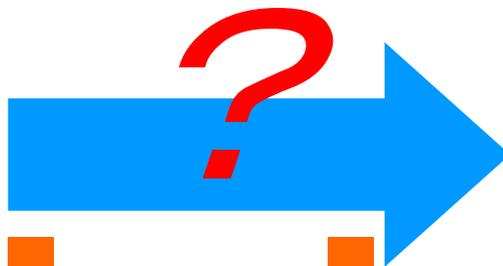
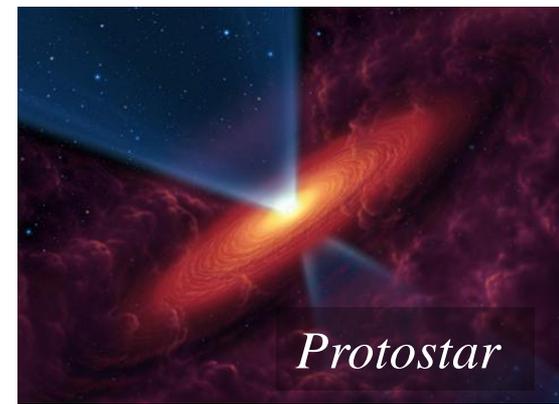
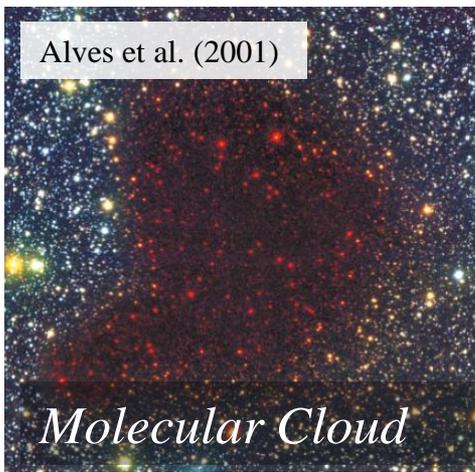
- 今までのシナリオが正しいか？
- 新しい現象
- 観測と直接比較するためには、輻射輸送計算が必要



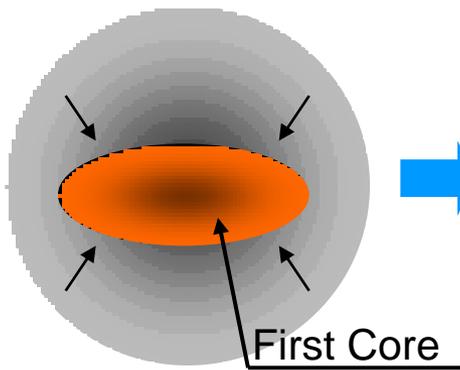
Tomida et al. (2011)

Figure 5. Visibility amplitude distributions of the $0.1 M_{\odot}$ first core model and a $0.1 M_{\odot}$ Bonnor–Ebert sphere as a model of a starless core. The first core model shows clearly shallower distribution compared to the starless core. The edge-on configuration shows more widely scattered visibility amplitude corresponding to its oblate morphology.

前期段階まとめ

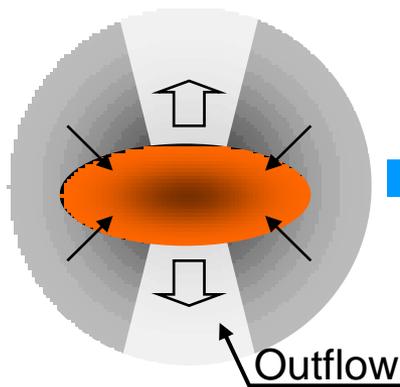


星形成前に円盤状構造の形成



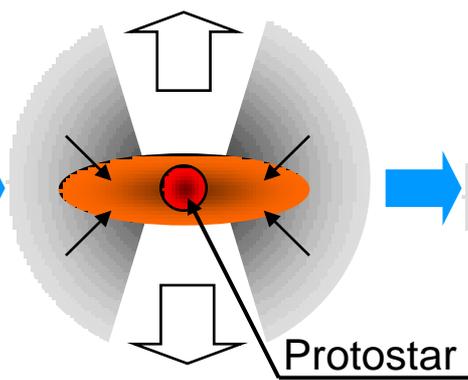
分裂・連星形成

星形成前に分子アウトフローの駆動



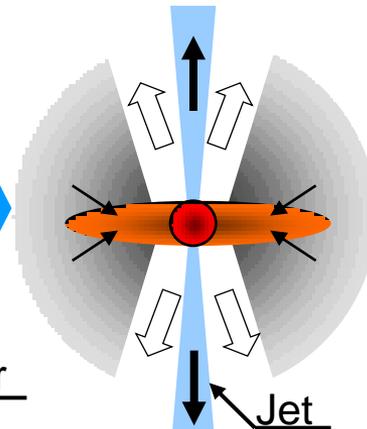
磁場の散逸
角運動量輸送

原始星形成



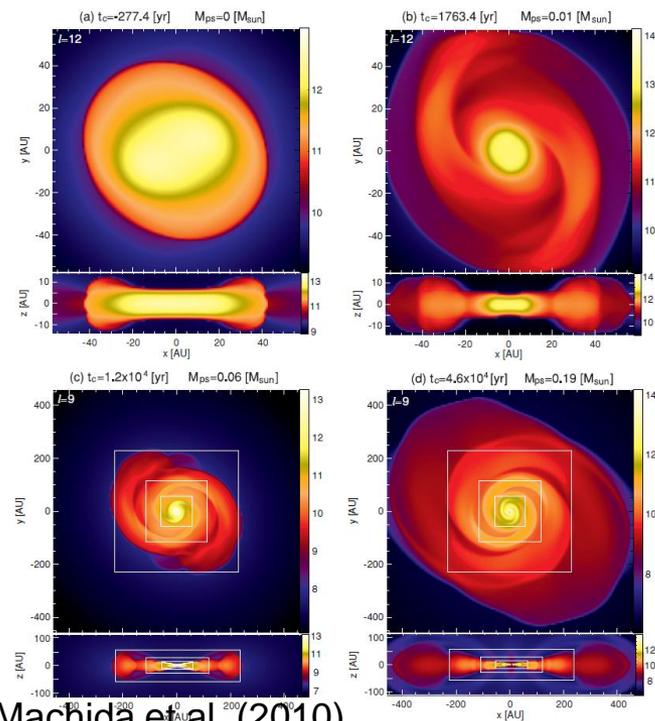
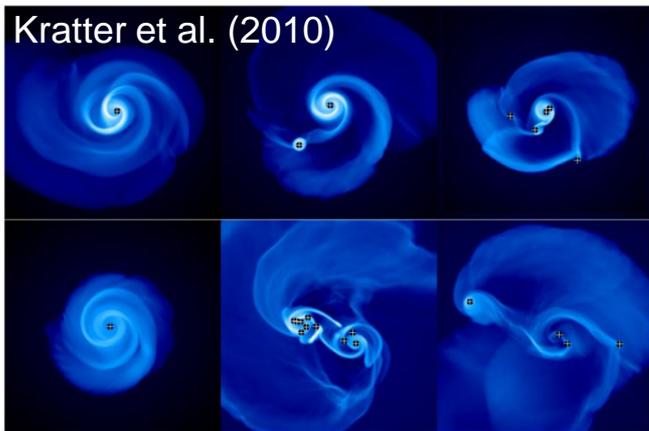
低速アウトフローの内側で高速ジェット駆動
円盤の重力不安定による連星・惑星形成

ジェット駆動



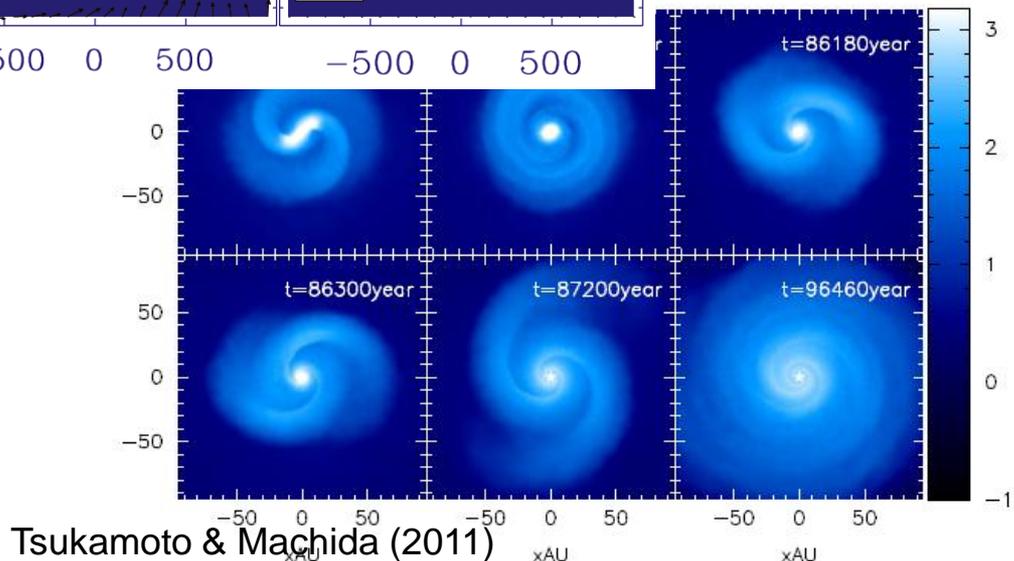
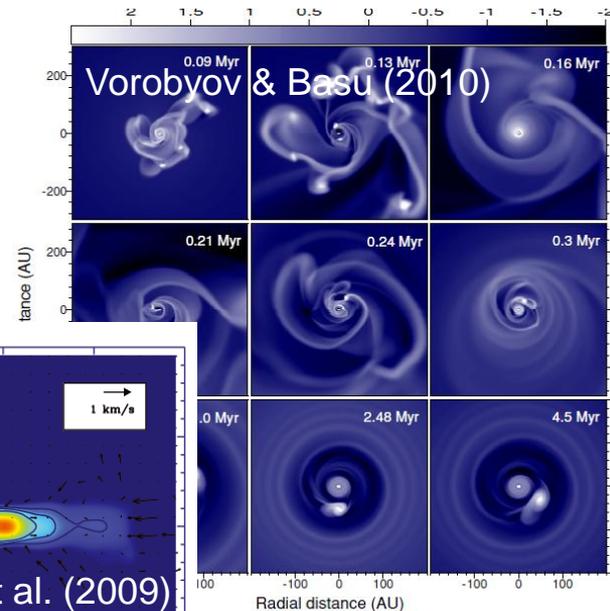
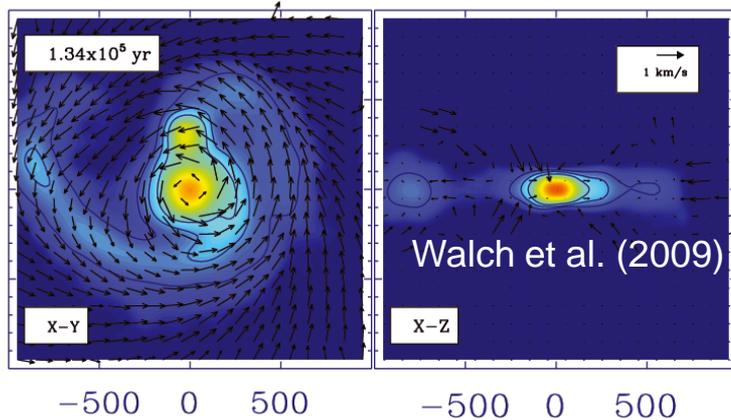
後期段階(円盤形成・惑星形成段階)ダイジェスト1

非線形なので数値シミュレーションが必要



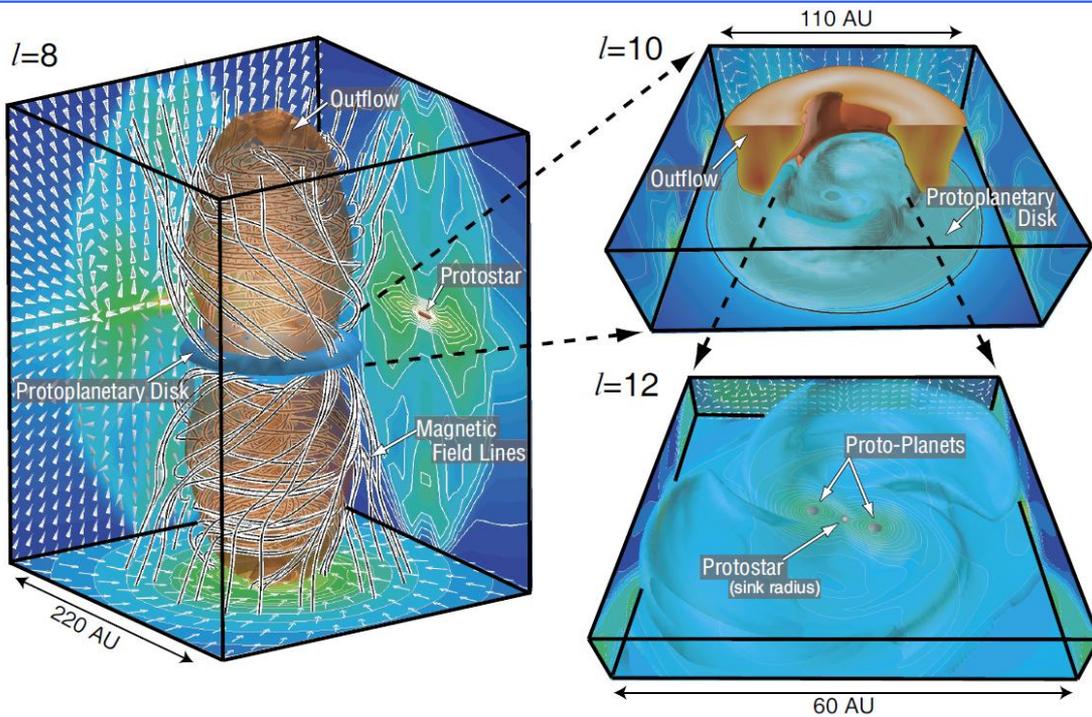
Machida et al. (2010)

磁場を考慮しない計算例

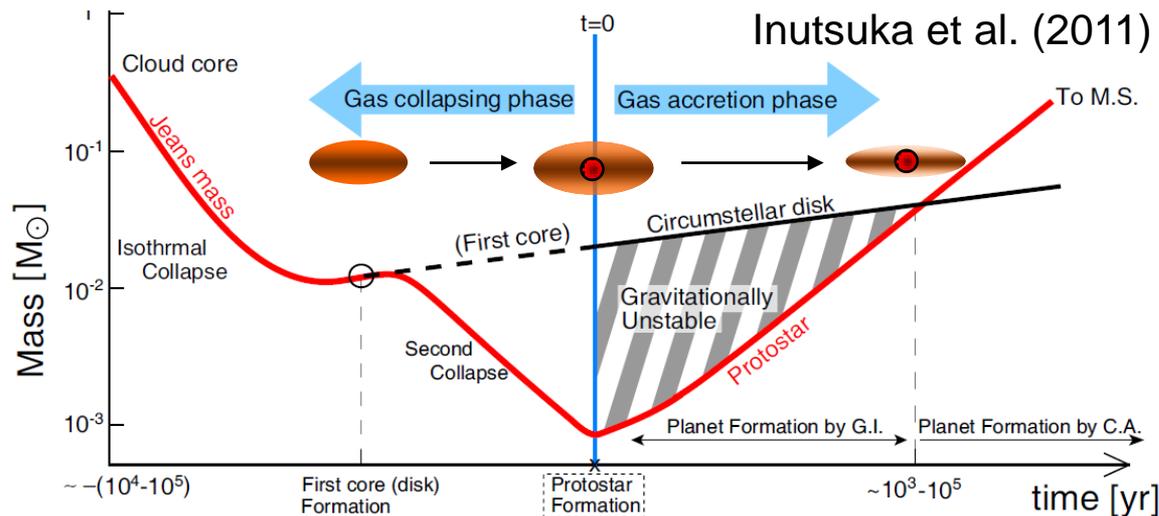


Tsukamoto & Machida (2011)

後期段階(円盤形成・惑星形成段階)ダイジェスト2



- 分子雲コアからの計算
- 星形成、円盤形成、ガス惑星形成
- 若い段階の円盤はmassive
重力不安定モードによる惑星形成が一般的
- 磁場の効果も重要



現時点での到達点と今後の研究領域



まとめ

□星形成は天文学の主要な研究分野

□理論家の役割

- 一貫した星形成理論の構築
- 観測出来ない領域、タイムスケールでの星形成過程を理解
- 観測されている現象(アウトフロー、ジェット、円盤、連星)の理論的説明

□星形成の問題

- 磁束・角運動量問題:磁場の散逸、磁場の効果による角運動量輸送
- 連星形成問題:回転による分裂、軌道角運動量
- アウトフロー、ジェット問題:2つの異なるコアから異なるメカニズムで駆動
- 未解決問題はまだまだたくさんある(特に後期段階とその後)

□前期段階と後期段階

- 前期段階はある程度理解 ⇔ 後期段階はこれから

□今後は、星形成分野はさらに活性化:ALMA, TMT