

総合研究大学院大学 D2

国立天文台理論研究部

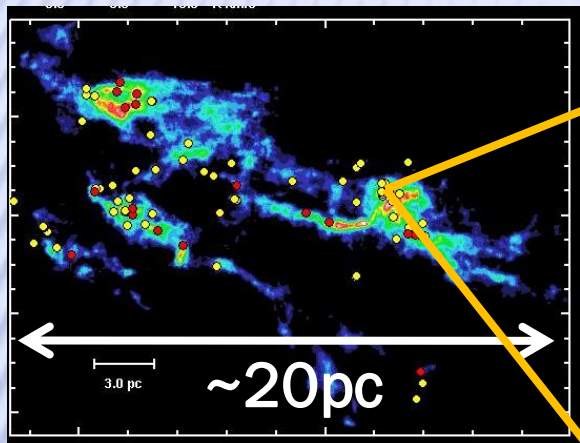
日本学術振興会特別研究員DC1 富田 賢吾

町田 正博、西合 一矢、富阪 幸治、松本 倫明

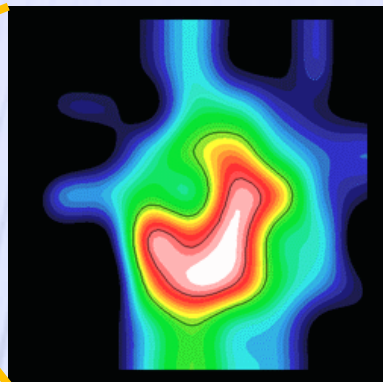
低質量分子雲コア中のファーストコア の進化と観測可能性

Reference: Tomida et al., 2010, ApJL, 725, L239

低質量星形成過程

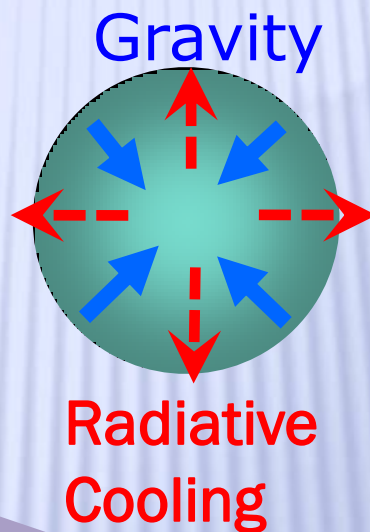


Molecular Cloud
(Taurus) Onishi+

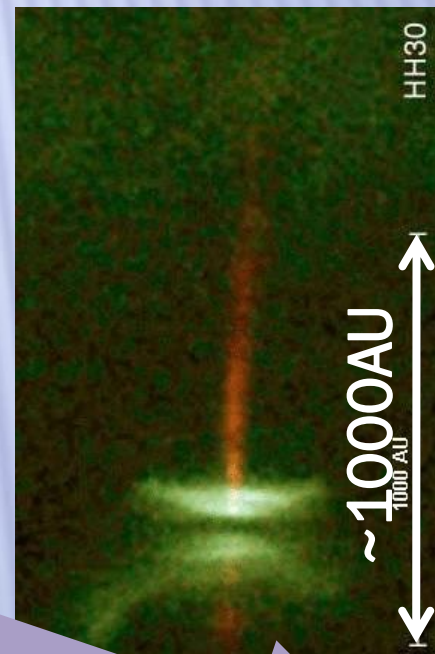


Molecular
Cloud Core

0.1 – 0.01 pc



Protostar, Disk,
Outflow, jet...



~1000AU
1000 AU

星形成過程

初期状態：分子雲コア

最終状態：原始星・円盤

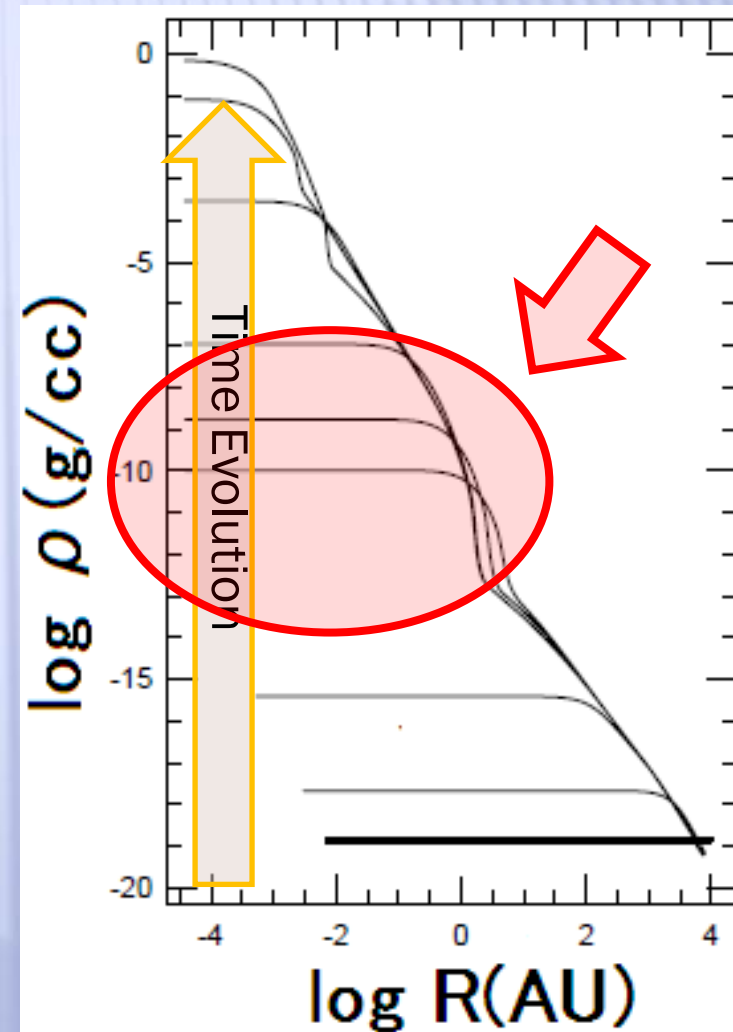
中間状態は観測困難 ⇒ 数値シミュレーション

複雑な物理過程：多次元、大ダイナミックレンジ、
磁場、輻射、(化学反応)、etc.

$$1\text{AU}/0.1\text{pc} = 5 \times 10^{-5}$$

低質量星形成過程とファーストコア

1. 分子雲コアが重力で(等温的に)収縮
 2. 中心部が高密度になり輻射冷却が非効率になる $\rightarrow \gamma > 4/3$
 \Rightarrow **ガス圧+回転で支えられた準平衡天体 = ファーストコア**
 3. **降着**によって成長し、中心温度2000Kで水素分子の解離により崩壊
 4. 第二収縮を経て原始星コア形成
- 寿命**1000年**程度の過渡的な天体
 - 観測的には未確認の“Missing Link”
ALMAのターゲットとして注目。



Masunaga & Inutsuka 2000

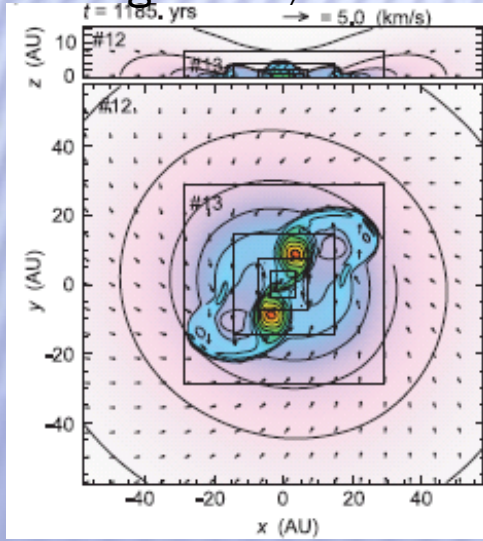
角運動量問題とファーストコア

- 角運動量問題 → 角運動量輸送が重要

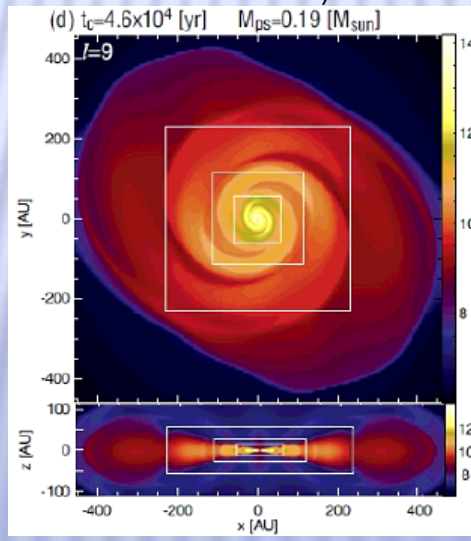
分子雲コア $j_{cl} \approx 5 \times 10^{21} \left(\frac{R}{0.1 \text{ pc}} \right)^2 \left(\frac{\Omega}{4 \text{ km s}^{-1} \text{ pc}^{-1}} \right) \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \gg j_* \approx 6 \times 10^{16} \left(\frac{R_*}{2R} \right)^2 \left(\frac{P}{10 \text{ day}} \right)^{-1} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 原始星

- 関連する様々な現象 ⇒ 多くはファーストコアが舞台
 - + 双極分子流（アウトフロー）の駆動
 - + 星周円盤形成
 - + 連星・惑星形成

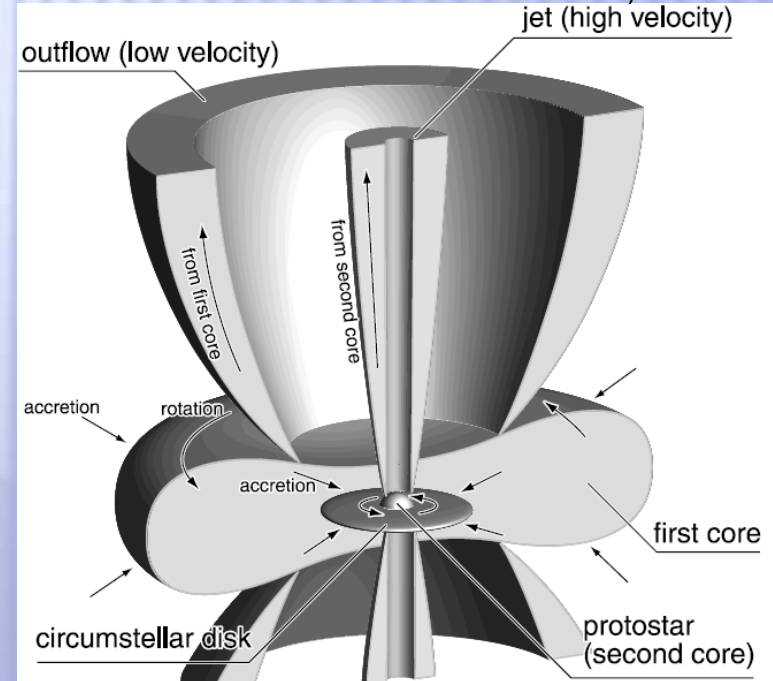
Saigo et al., 2006



Machida et al., 2010



Machida et al., 2008

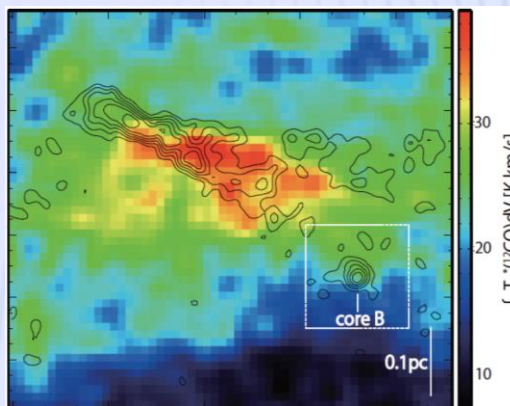


最近のファーストコア研究の進展

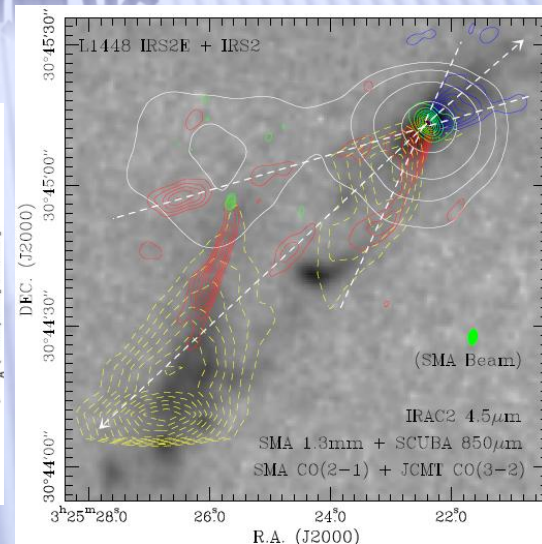
1. 半年で5例の候補天体の報告

- Chen et al., 2010
- Chen and Arce, 2010
- Enoch et al., 2010
- (Kawabe et al., in prep)
- (Pineda et al., in prep)

- 近-中間赤外で星成分なし
- ダスト連続波で暗くコンパクト
- アウトフローが弱い / 検出できない



Kawabe et al.



Chen et al.

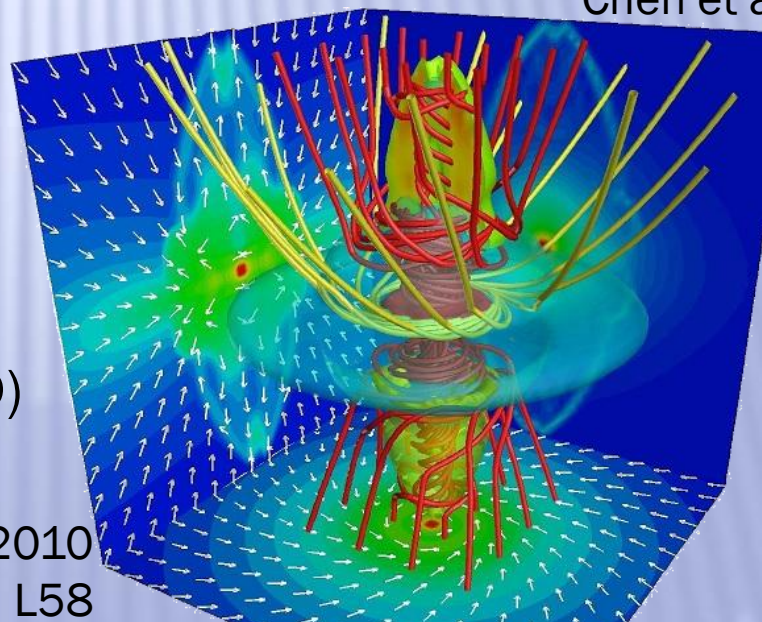
2. 3次元輻射(磁気)流体力学計算

- Bate 2010 (SPH/RHD)
- Commerçon et al., 2010 (AMR/RMHD)
- Tomida et al., 2010 (nested-grid/RMHD)

(全て流束制限拡散近似(FLD)による)

Tomida et al. 2010

ApJL, 714, L58

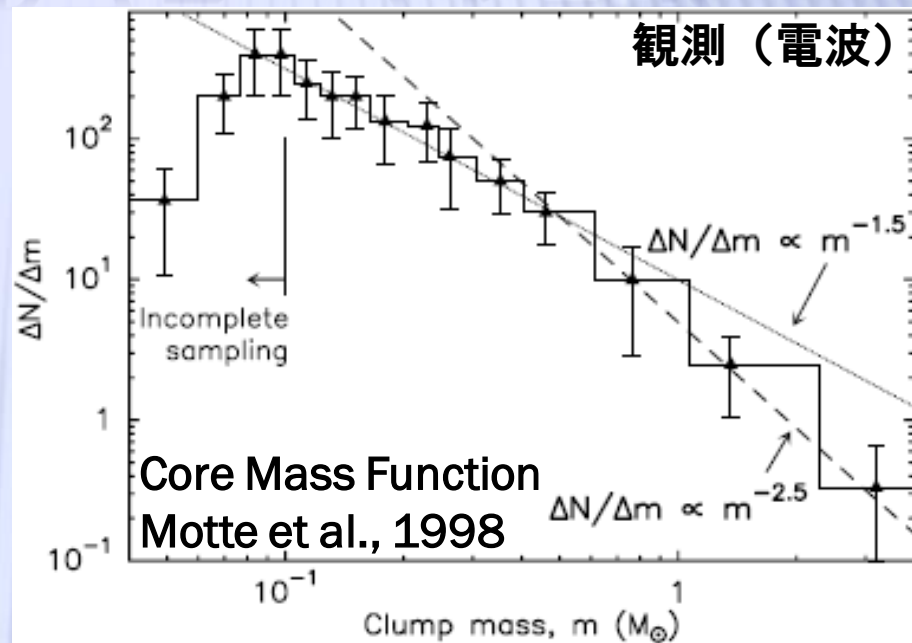


低質量分子雲コア中のファーストコア

先行研究の多くは1Ms程度が対象

しかし

- 観測的には低質量($\sim 0.1\text{Ms}$)のコアや星が圧倒的に多い \rightarrow
- 前述のファーストコア候補天体の幾つかは非常に低質量
- (半年で5例の候補天体 \rightarrow これまでの予想よりも多い?)
- (褐色矮星の形成機構?)



- 低質量分子雲中の星形成は”典型的質量”のものと同じだろうか?
 - 1Msの物は降着により動的な短い時間スケールで進化する
 - 低質量では降着だけではセカンドコラプスに達しない(?)
 - ファーストコア円盤の典型的な輻射冷却(拡散)時間は数千年程度
- \Rightarrow **輻射(磁気)流体計算**による長期進化のシミュレーション

セットアップ

3モデル：0.1Msモデルと比較用1Msモデル（回転あり/なし）

Model	Mass(M_{\odot})	Central density(g cm^{-3})	Radius(AU)	Free-fall time(yrs)	Angular velocity(sec^{-1})
<i>SI</i>	1	3.2×10^{-18}	6300	3.7×10^4	0
<i>RI</i>	1	3.2×10^{-18}	6300	3.7×10^4	4.3×10^{-14}
<i>ROI</i>	0.1	3.2×10^{-16}	630	3.7×10^3	1.4×10^{-12}

共通：3次元・多重格子・自己重力・輻射流体シミュレーション
一様回転する $T=10\text{K}$ の不安定BE球、**磁場なし**（分裂しない設定）

輻射輸送：流束制限拡散近似 (FLD, Levermore & Pomraning 1981)

EOS: ideal $\gamma = 5/3$ （←現実的状態方程式を現在実装中）

Opacity: Semenov et al., 2003 + Ferguson et al., 2005

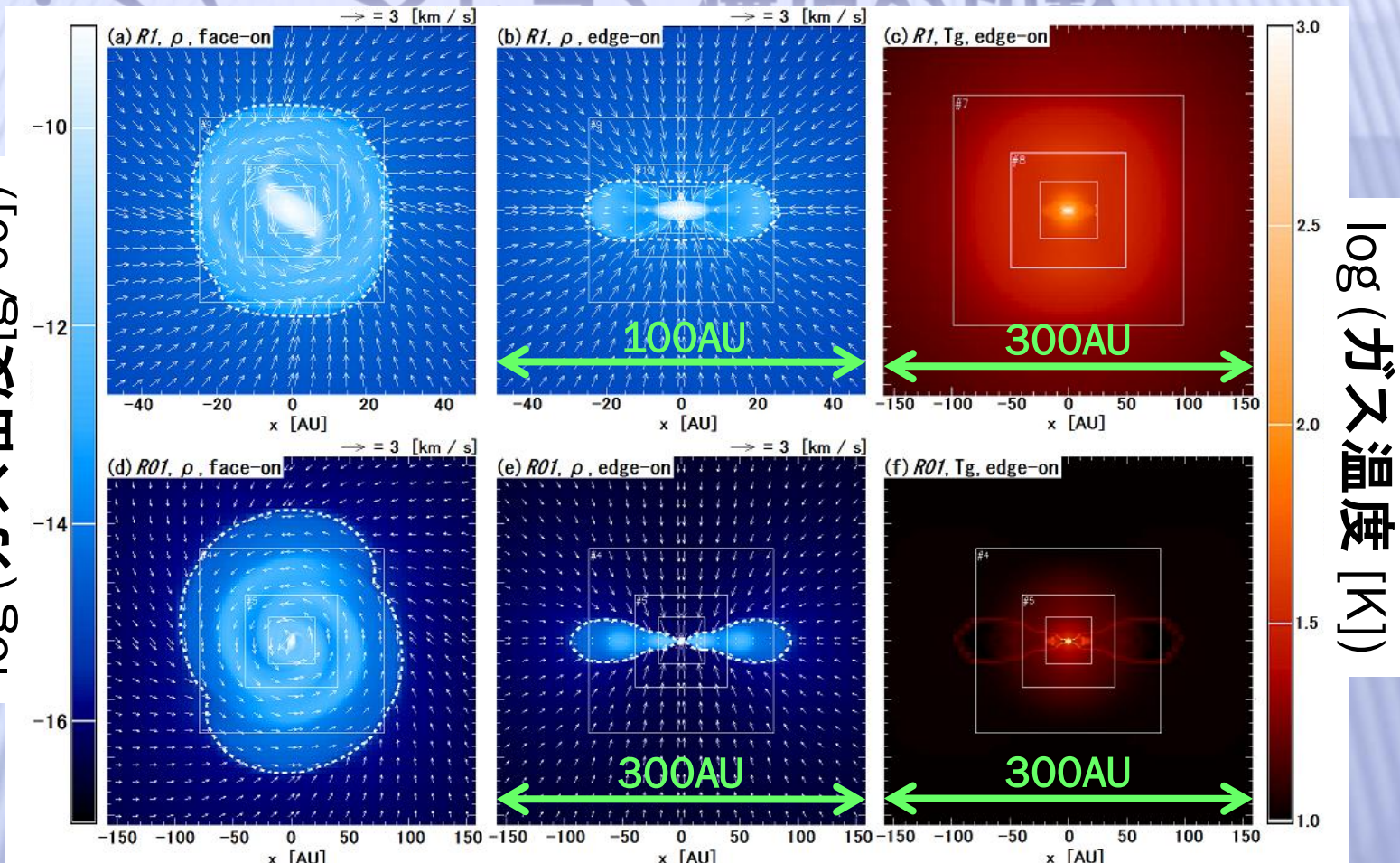
解像度: 16 Meshes / Jeans length $\rightarrow 0.1\text{AU}$ @ ファーストコア表面

計算には国立天文台及びJAXAのNEC SX-9を利用

結果：ファーストコア構造の比較

1Ms
3000年

log(ガス密度 [g/cc])



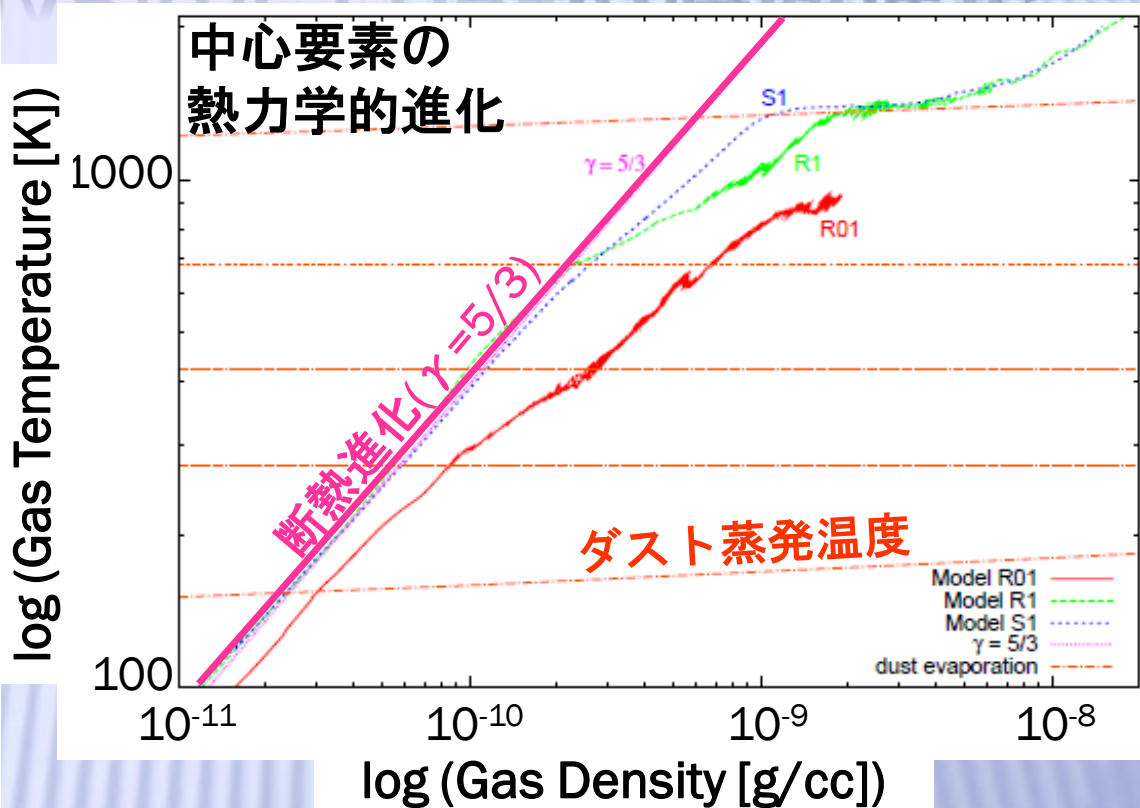
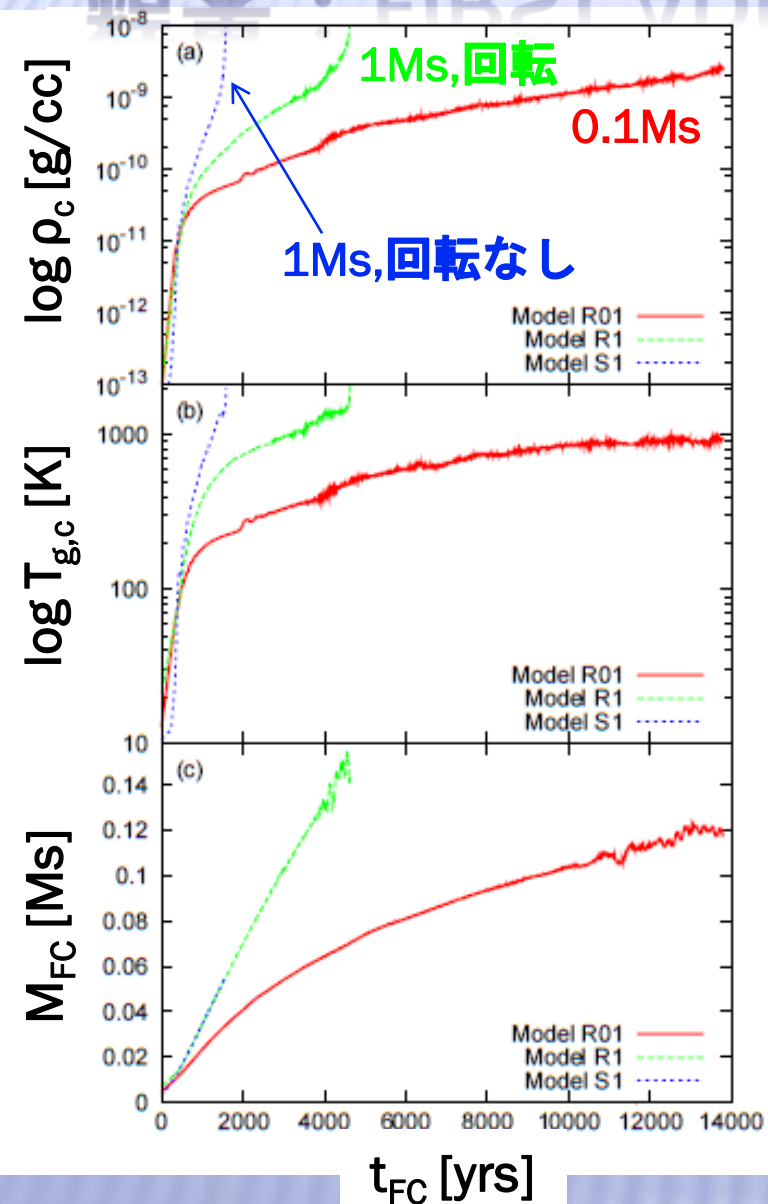
0.1Ms
10000年

log(ガス温度 [K])

同じファーストコア質量の時に比較 (スケールの違いに注意)

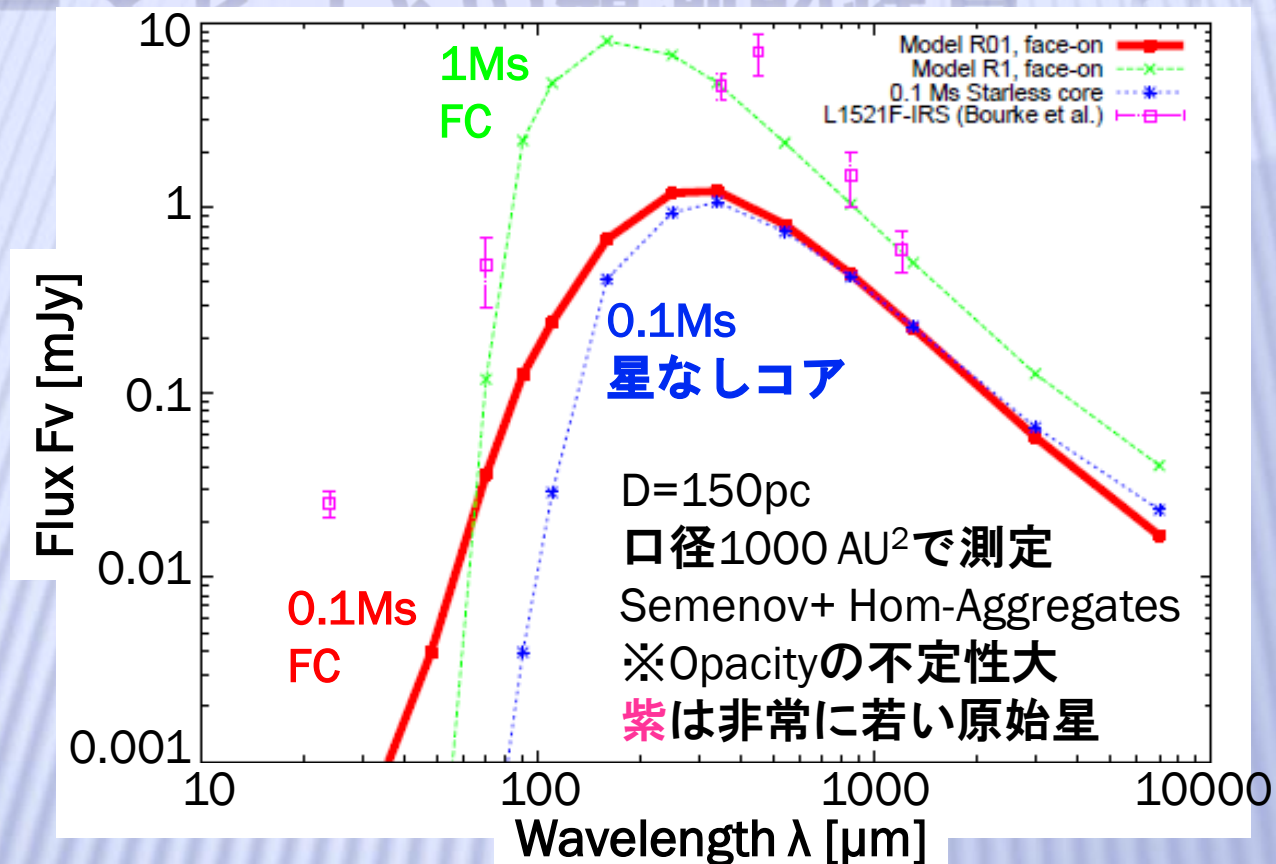
- 低質量モデルで大きなファーストコア円盤 ← 角運動量分布
- 低密度・低温の外層 ← 低降着率 + 輻射冷却の効果 ⇒ 観測的性質

結果：FIRST ADIABATIC COREの時間進化



- 低質量モデルの進化は大きく異なる
- 低質量モデルは**13,000年**以上の寿命 (cf. $t_{ff} \sim 4,000$ yrs \rightarrow 存在確率大)
- 低質量モデルでは輻射冷却が重要
- ダストの性質(蒸発)が進化に影響

ファーストコアの観測的性質：SED



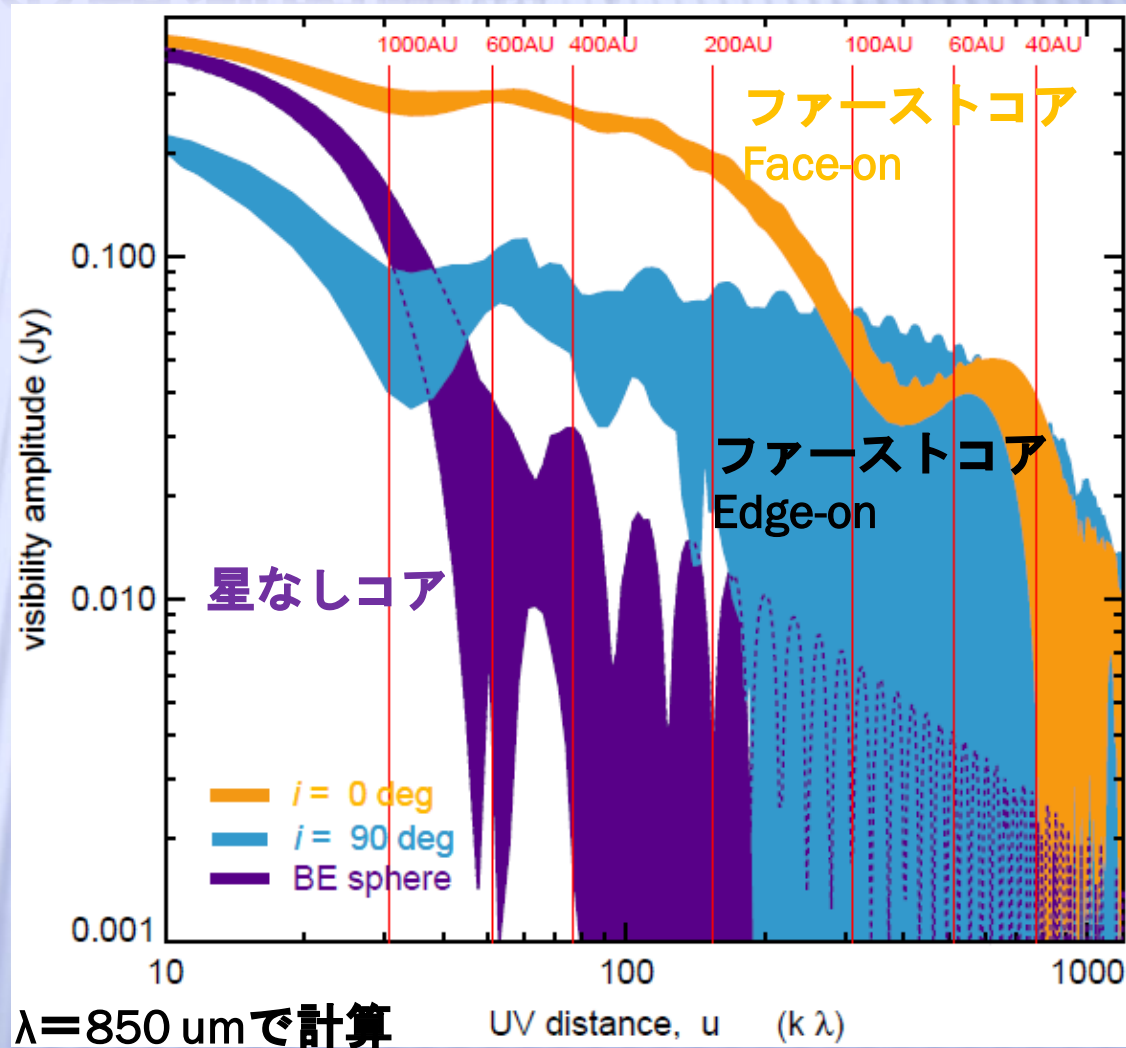
- 電波：0.1Msモデルは1Msと比べてやや暗いが、ファクター2~3
- 遠赤外：1Msモデルが卓越←温かいガスの質量が大きい
- 中間赤外：低質量モデルが上回る←外層が薄く内側が見える
- 暗いが、低質量モデルでもALMAやHerschel等で十分観測可能

ファーストコアの観測的性質：VISIBILITY

FCは赤外域で暗いので
Starless Coreと区別する
方法を考える必要がある
→ Visibility Amplitude
(輝度分布のフーリエ成分
電波干渉計の観測量)

ファーストコアは顕著に
フラットな分布を示す
←細かい構造の存在

SEDで候補を選出して
干渉計で検証するという
戦略で同定できる



(来年度からのALMAの初期運用から十分狙えるターゲット)

まとめ

- 低質量分子雲中のファーストコアの輻射流体計算
 - 降着が弱いため進化が遅く、大幅に**長寿命**($>10^4$ 年)
 - **輻射冷却**の影響を強く受けた異なる進化
- 輻射輸送計算を後処理で行い、**観測的性質**を調べた
→ 暗いがHerschelやALMAで観測/区別可能
- これまでの予測より**高い存在確率**、十分な**観測可能性**
⇒ 低質量分子雲中の星形成初期段階について、理論から観測の戦略まで一貫した新しいモデルを提案
- 輻射流体計算：大質量星だけでなく長期進化も面白い
- 発展：現実的状態方程式と磁場の散逸の実装
- ALMAの稼働に向け野辺山他観測のグループとも連携

比較

従来のファーストコア

低質量分子雲中のファーストコア

寿命	O(1000 年)	O(10000 年)
進化	主に降着による	降着だけでは不十分 輻射冷却+角運動量輸送
分子雲コア数	—	$\times 10^?$
形成確率	~ 1	???
存在確率	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	~ 1
観測可能性	明るさは十分だが 確率は低い	暗いが観測可能

議論

- このような低質量分子雲コアがコラプスする可能性自体は低い
→寿命は長いのでそれなりの数が存在することが期待される
- 逆に見つからなければ？→不安定化する確率が非常に小さい
⇒CMFとIMFの低質量側を関連付ける機構の手がかりになる
- 磁場の影響？
 - 寿命を縮める：効率的な角運動量輸送
 - 寿命を伸ばす：アウトフロー質量放出、磁場によるサポート
 - ファーストコア段階では磁場の散逸が重要になる
 - ⇒非理想MHD(+現実的状态方程式)計算コードを開発中
- 低質量コアを不安定化する機構：外圧、輻射、衝突による圧縮
- 降着を抑制する機構：アウトフロー、散乱による放出
などが重要と考えられる⇒存在確率に環境依存性がある可能性