

星形成過程の “ミッシングリンク”を求めて

総合研究大学院大学 / 国立天文台理論研究部 D3
日本学術振興会特別研究員DC1
富田 賢吾

共同研究者: 富阪幸治、西合一矢、川辺良平、
町田正博、松本倫明

星形成過程と数値シミュレーション

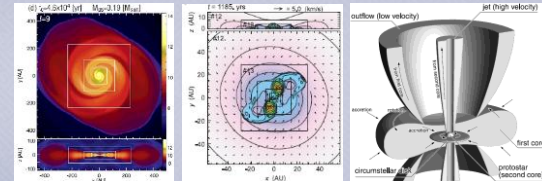
分子雲コア
~20pc
おうし座分子雲の電波観測(名大4m)

初期状態: 分子雲コア
最終状態: 原始星・円盤
進化の大筋の理論的シナリオはあるが、**未検証**
複雑な物理過程: 多次元、大ダイナミックレンジ、
磁場、**輻射輸送**(光による加熱・冷却)、(化学反応)
ALMAの稼働→直接観測と比較できるモデルが必要
⇒高度な数値シミュレーションによる研究が不可欠

原始星・円盤・ジェット
ハッブル望遠鏡
ジェット
円盤
~1000AU
更に進化
恒星
例: 太陽

ミッシングリンク: ファーストコアとは

星形成の初期にできる準平衡天体、寿命~2-3000年
重力と回転、磁場の相互作用により様々な現象が起きる
角運動量・磁束問題の舞台として重要→町田さんのtalk



Larson 1969で理論的に予測されているが現在も未確認
最近になって数例の候補天体が報告されている
←間もなく稼働するALMAで理論が直接検証できる

ファーストコアの性質

輻射磁気流体シミュレーションに基づく予言:

- 短寿命($O(1,000)$ 年) = 観測確率低($\sim 1/1000$)
 - コンパクト($<100AU$)なダストのコアとして検出される
 - SEDは暗く($<0.1L_{\odot}$)低温の黒体放射的
 - 高温の原始星に由来する中間~近赤外の放射なし
 - 低速度($<3km/s$)・大開口角の弱いoutflow、高速成分なし
- ⇒制約の多いALMA Cycle-0でも十分可能→河村さんのtalk

Band	Frequency [GHz]	Angular Resolution ["]	Maximum Scale ["]	T_b [mK]	Flux [mJy]
Properties of the Extended Configuration (baselines of ~36 m to ~400 m)					
3	100	1.56	10.5	7.6	0.14
6	230	0.68	4.5	11	0.20
7	345	0.45	3.0	20	0.37
9	675	0.23	1.5	175	3.2

ファーストコア候補天体

- L1448 IRS2E, Chen et al., 2010, ApJ, 715, 1344
最初に話題になった候補天体だが、
>25km/sの高速アウトフロー⇒既に原始星形成?
 - R CrA SMM 1A, Chen & Arce, 2010, ApJL, 720,
(詳細に議論されていない、単なる暗いコア)
 - Per-Bolo 58, Enoch et al., 2010, ApJL, 722, 33
簡単な理論モデルと比較し、整合的な天体
ただし24umで検出⇒ファーストコアよりは進化している?
 - L1451-mm, Pineda et al. (AASで発表)
理論モデルと整合的なSED・空間分布
低速($<5km/s$)でコンパクト($<100AU$)なoutflow
 - “Core B” in Lupus-I, Kawabe et al. in prep
 - “Source A” in ρ Oph, Kawabe et al. in prep
- 現時点で少なくとも6個の候補天体

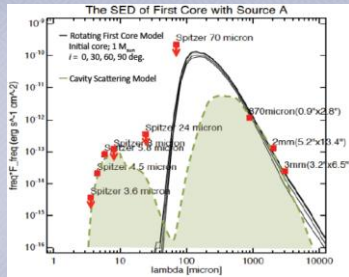
“Source A” in ρ Oph

~125pcの星形成領域にある

- ダスト連続波でコンパクト
- CS(7-6) 高密度ガスの観測
→non-LTE分子線計算と整合的
•星起源と思われる赤外成分は
4.5, 5.4um以外では未検出※
- 低速(~3km/s)CO(3-2) outflow
連続波のピークから~100AU
→タイムスケールは $O(\sim 100)$ 年
- CO: $T_b \sim 100K$, $\tau \sim 10$
アウトフローによる衝撃波加熱?
- 赤外放射の位置はCOと一致
- 高速のアウトフローなし

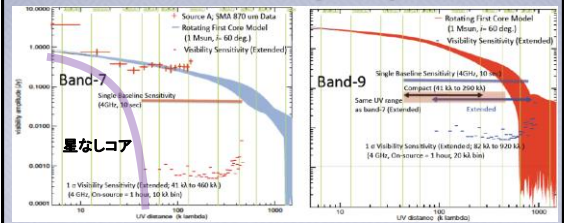
→有力なファーストコア候補

“Source A”: SED



輻射流体計算から直接求めた連続波SED:観測と非常に良く一致する。
4.5-5.4umの赤外成分はアウトフローと位置が一致することから、
Cavityから高温の散乱光が漏れている or 衝撃波からの輝線(?)

“Source A”: Visibility Amplitude分布

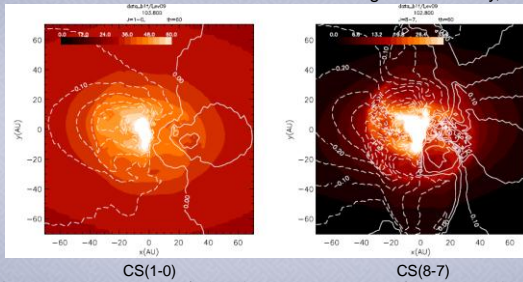


Visibility Amplitude: 干渉計の観測量、輝度分布の空間フーリエ成分
SMA 870umで観測したVADはシミュレーションとよく一致
星なしコアよりも顕著にフラットな分布→中心集中した構造がある
ALMA Cycle-0なら・・・Band 7, Extendedで3倍細かい構造に迫れる
Band 9なら直接円盤状の構造を分解できる可能性さえある

分子輝線強度の予測

Tomisaka and Tomida,
PASJ in press(1104.2438)

Integrated intensity, $i=60^\circ$

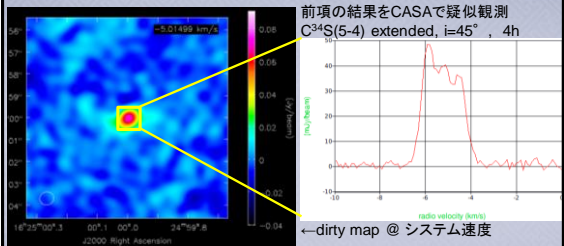


CS(1-0)

CS(8-7)

後処理のNon-LTE輻射輸送計算によりCS分子の回転遷移を計算
速度場等より多くの情報を含む観測も理論計算と直接比較が可能に

シミュレータによる疑似観測



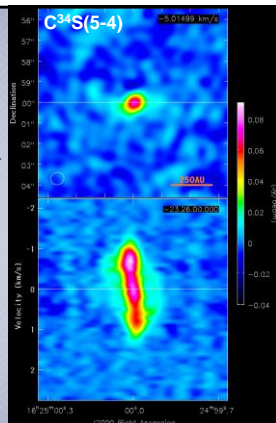
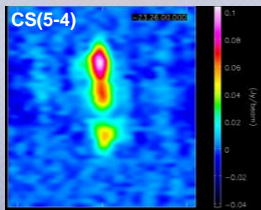
前項の結果をCASAで疑似観測
C³⁴S(5-4) extended, $i=45^\circ$, 4h

←dirty map @ システム速度

ALMAはこれまでにない分解能と波長による観測を可能にする
→信頼できるモデルによる具体的な観測予測が極めて重要
実際にこの計算を基に小スケールのkinematics(円盤やアウトフロー)
を調べるというプロポーザルを理論家筆頭で投稿した

Position-Velocity diagram

CSは外層による吸収が強いため
(or広がった成分のresolve-out)
中心部の情報が一部失われる。
C³⁴Sは存在量は少ないが同程度
の強度があり、小スケールの構造を
調べるのに適した分子輝線である。



まとめ

輻射(磁気)流体計算に基づく観測的性質の予言

- ◆ 連続波 Spectral Energy Distribution
- ◆ 連続波 Visibility Amplitude Distribution
- ◆ 分子輝線強度分布←Non-LTE分子線輸送計算
⇒恣意的な仮定を置くことなく理論と観測を直接対比

ファーストコア候補“Source A” in ρ Oph

- ◆ 輻射流体モデルと整合的な観測予測を多数示す
- ◆ ALMA Cycle-0における観測提案

観測の進展(ALMA等)+理論の進展(輻射磁気流体計算)
=理論と観測を統合する新しい展開

★理論だけ・観測だけの視野の狭い研究では勝てない

⇒理論・観測を横断する共同研究、人材が求められる