星間物質/星形成から TAOに期待すること

中村文隆(国立天文台)

今日のお話し

- 星形成研究の最近の成果の紹介
  - Herschel, Spizter, …
  - 星のIMFの起源
- TAOに期待する星形成サイエンス
  - コアから星へー質量降着過程の理解
  - 大質量星の形成
- まとめ

星形成の研究

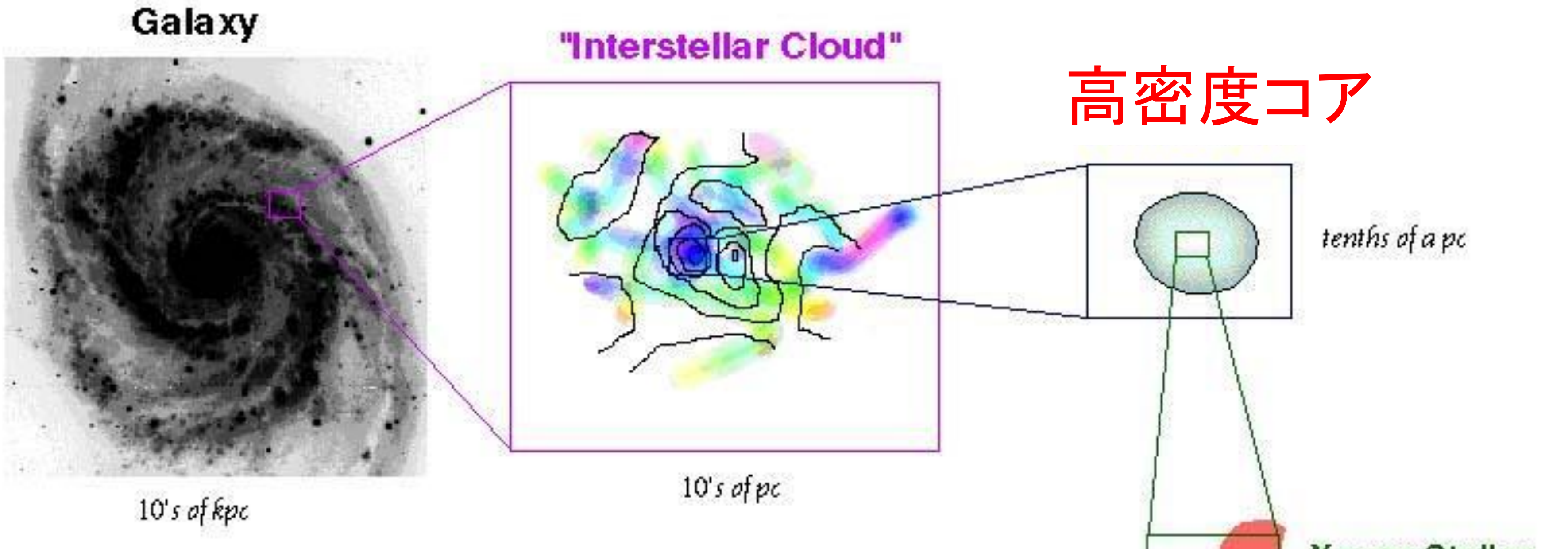
- 星は様々な環境でどのように形成されるか？
  - ●銀河の形成・進化

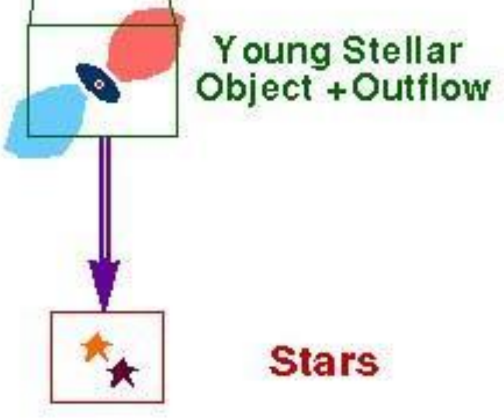
    大質量星のフィードバック、

    低い星形成率
  - ●惑星の形成・進化

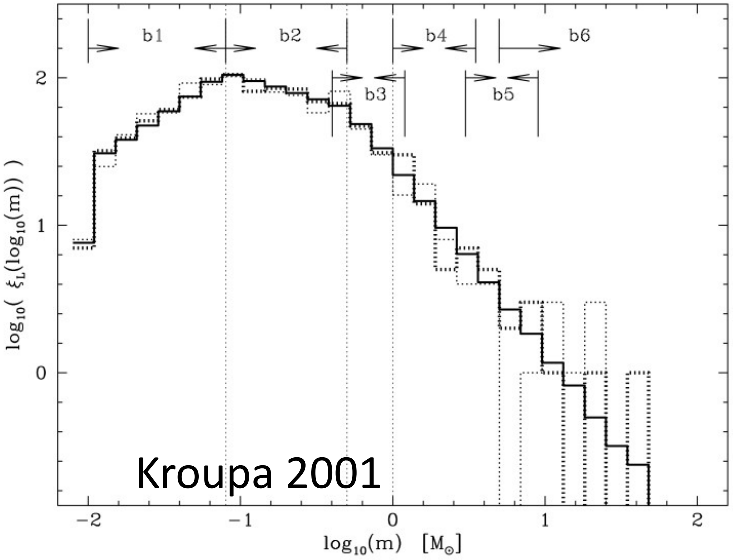
    惑星形成の初期条件

星間雲から星が誕生する過程





Note: Schematic Diagram... not int



Molecular Cloud Structures: Filaments and Cores

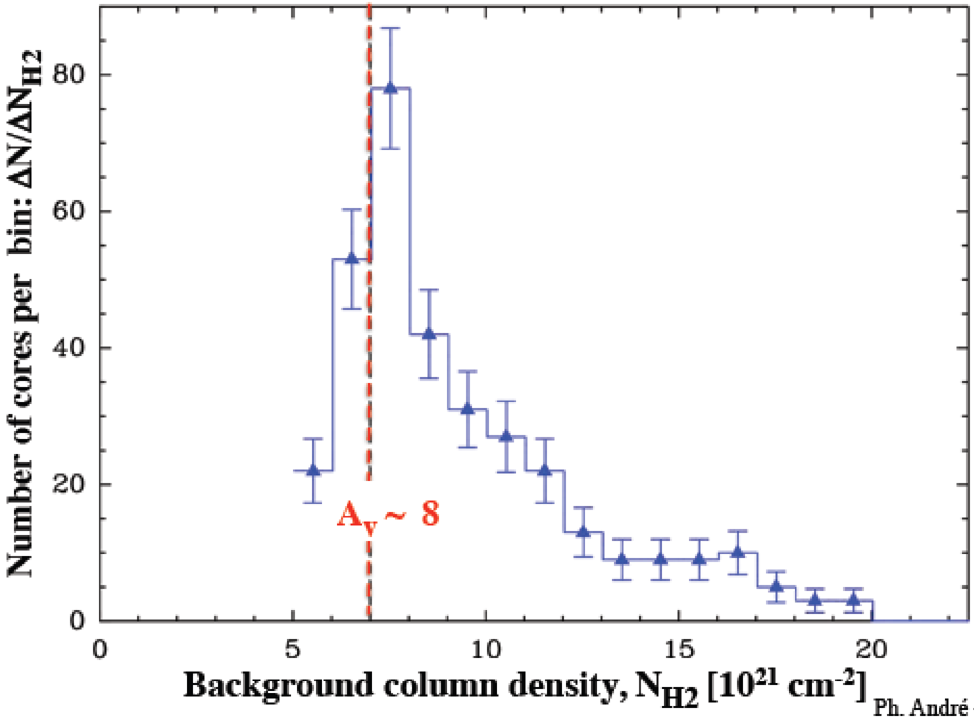
Herschel Gould Belt Survey (P. Andre)の成果

分子雲は多数のフィラメントからなる

ほとんどの高密度コアはフィラメントに沿って存在

Strong evidence of a column density "threshold" for the formation of prestellar cores

Distribution of background column densities for the Aquila prestellar cores



In Aquila, ~90% of the prestellar cores identified with *Herschel* are found above $A_V \sim 8$ ⇔ $\Sigma \sim 130\ M_\odot\ pc^{-2}$

Könyves etal. in prep

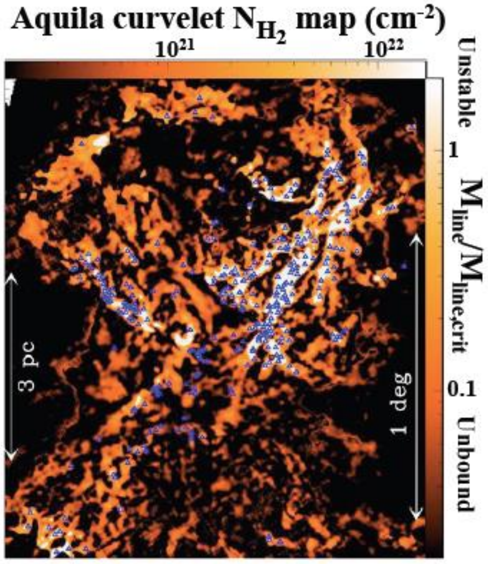
André et al. IAU270

See also:

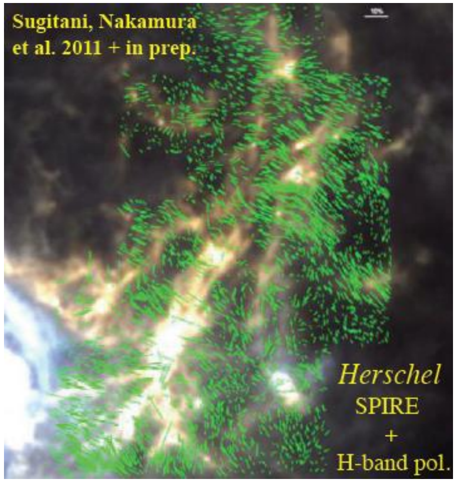
Onishi et al. 1998

Johnstone et al. 2004

Ph. André – ALMA Symposium– Hakone



André et al. 2010, A&A Special issue

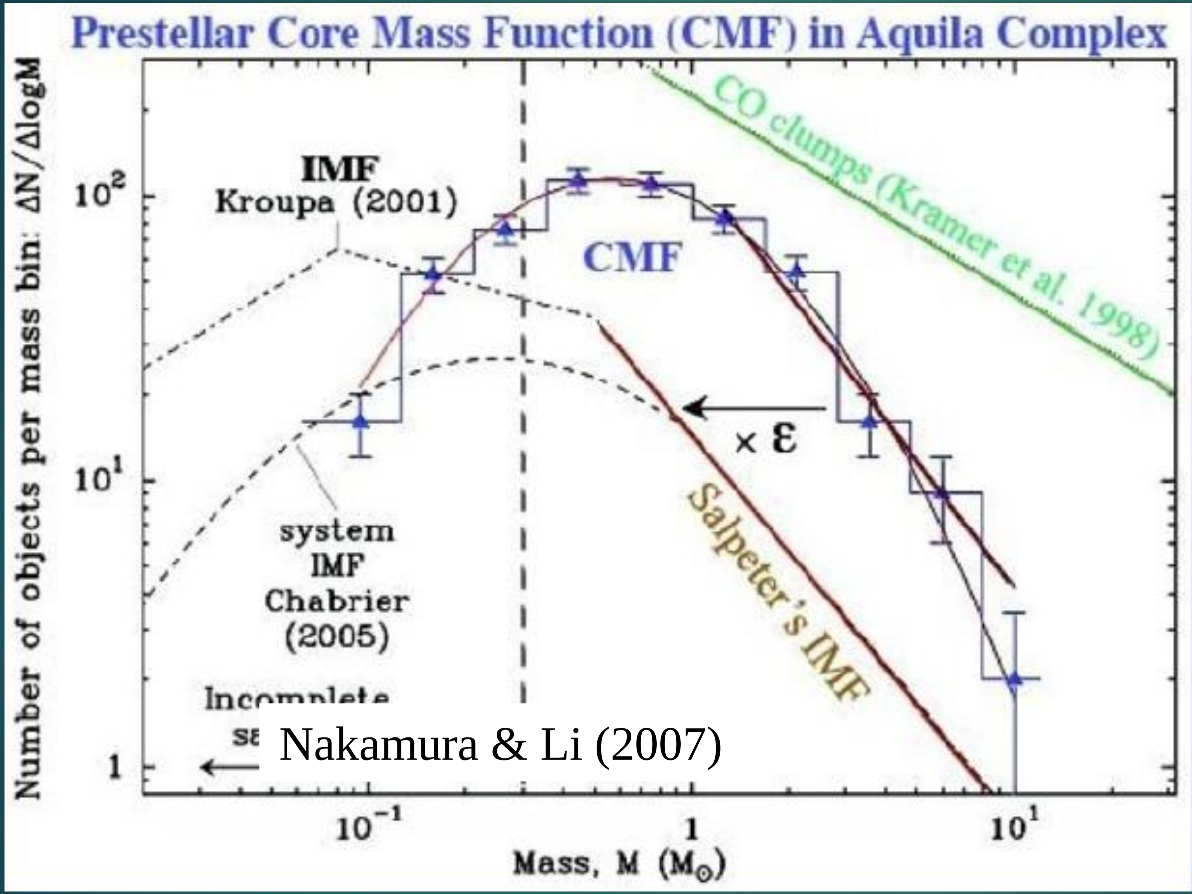


From P. Andre (2012)

Prestellar Core Mass Function (CMF)

- コアから星形成効率εで星が形成されると、星のIMFが再現できる？

CMFは？
→MHD乱流のスペクトル



(Andre 2010)

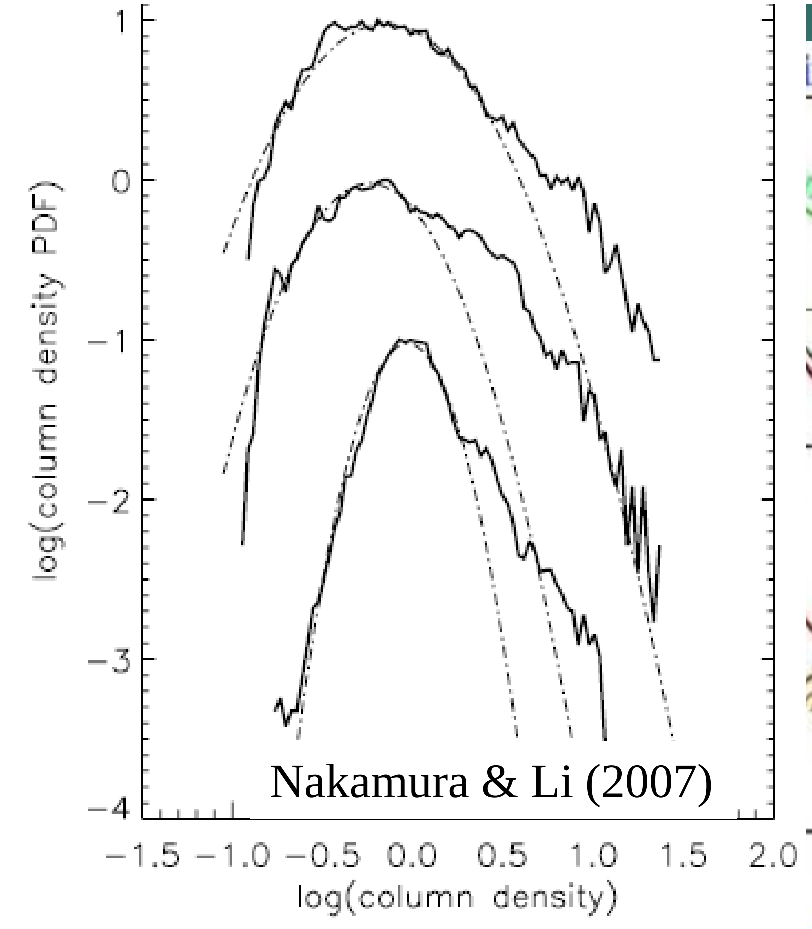
CMF→ IMF

(c.f. Motte et al. 1998)

Prestellar Core Mass Function (CMF)

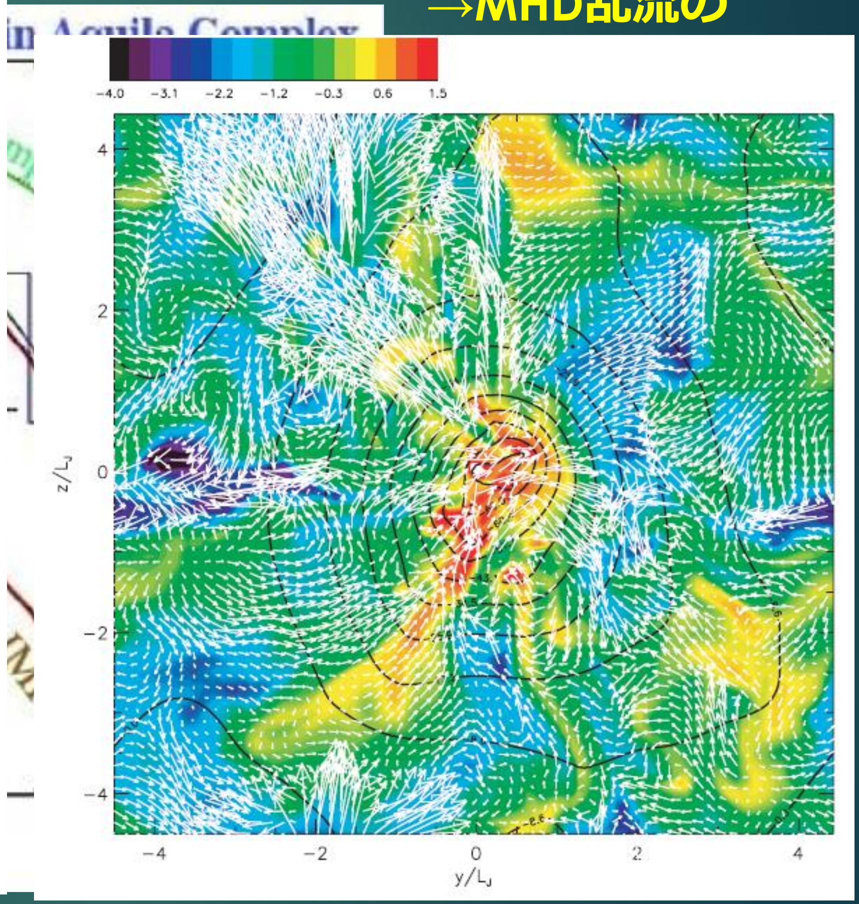
- コアから星形成効率εで星が形成されると、星の

密度のProbability Distribution Function



Nakamura & Li (2007)

CMFは？
→MHD乱流の

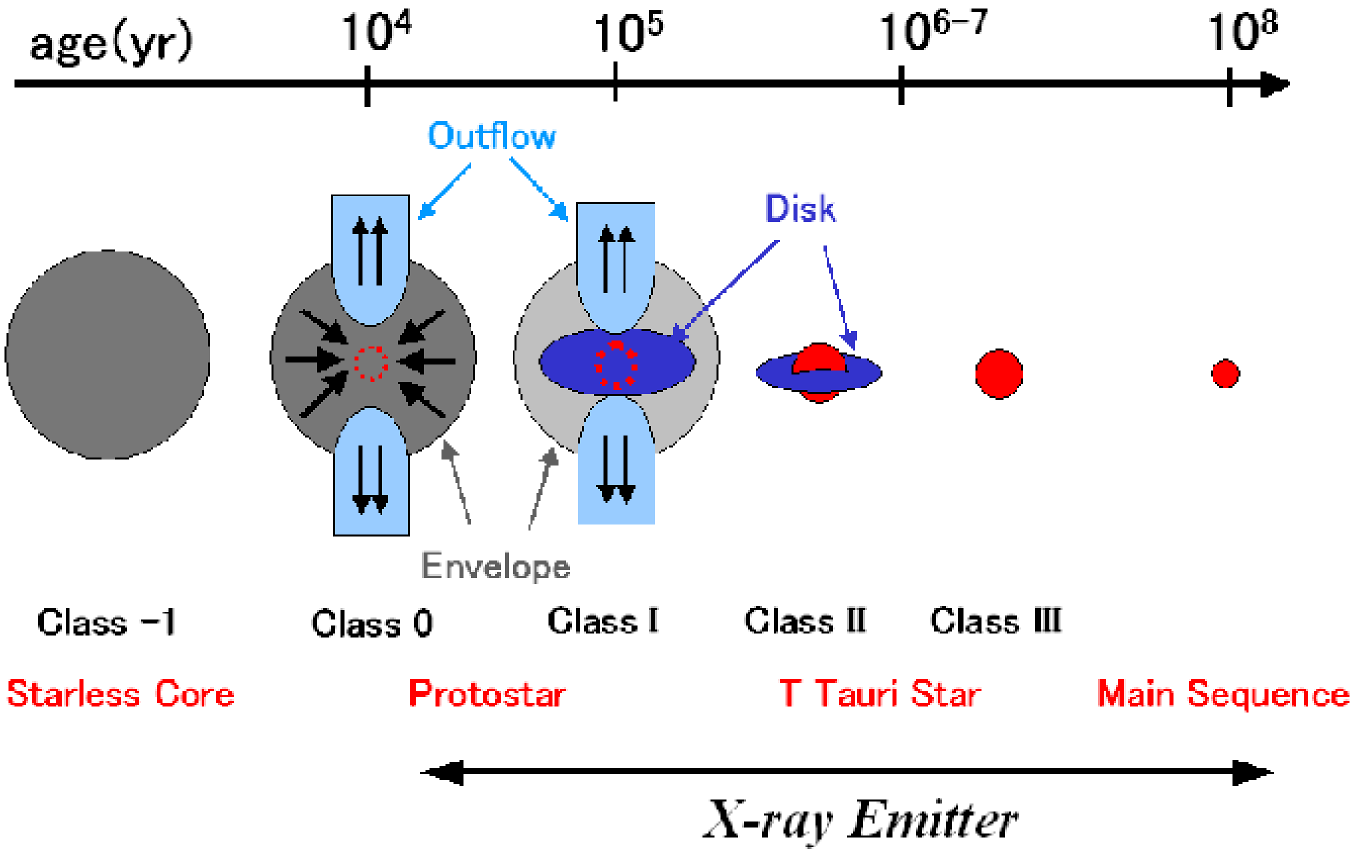


(Andre 2010)

CMF→ IMF

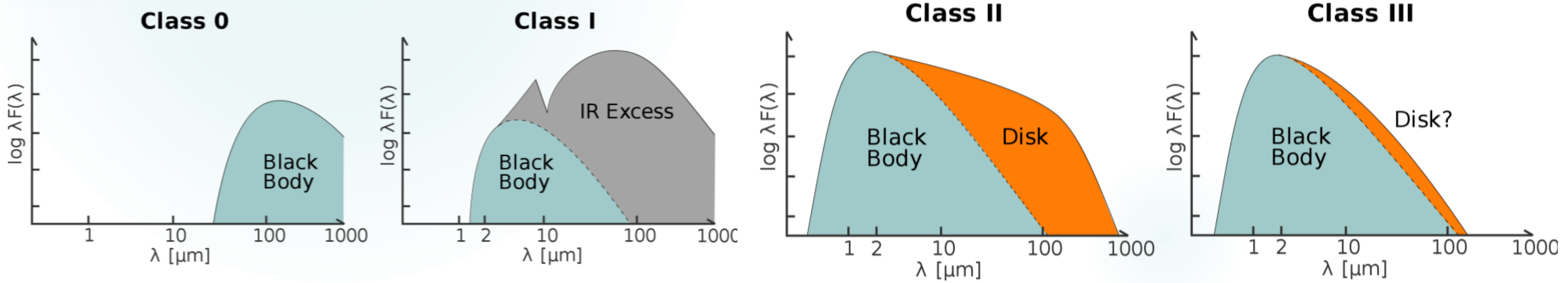
(c.f. Motte et al. 1998)

コアから星へ



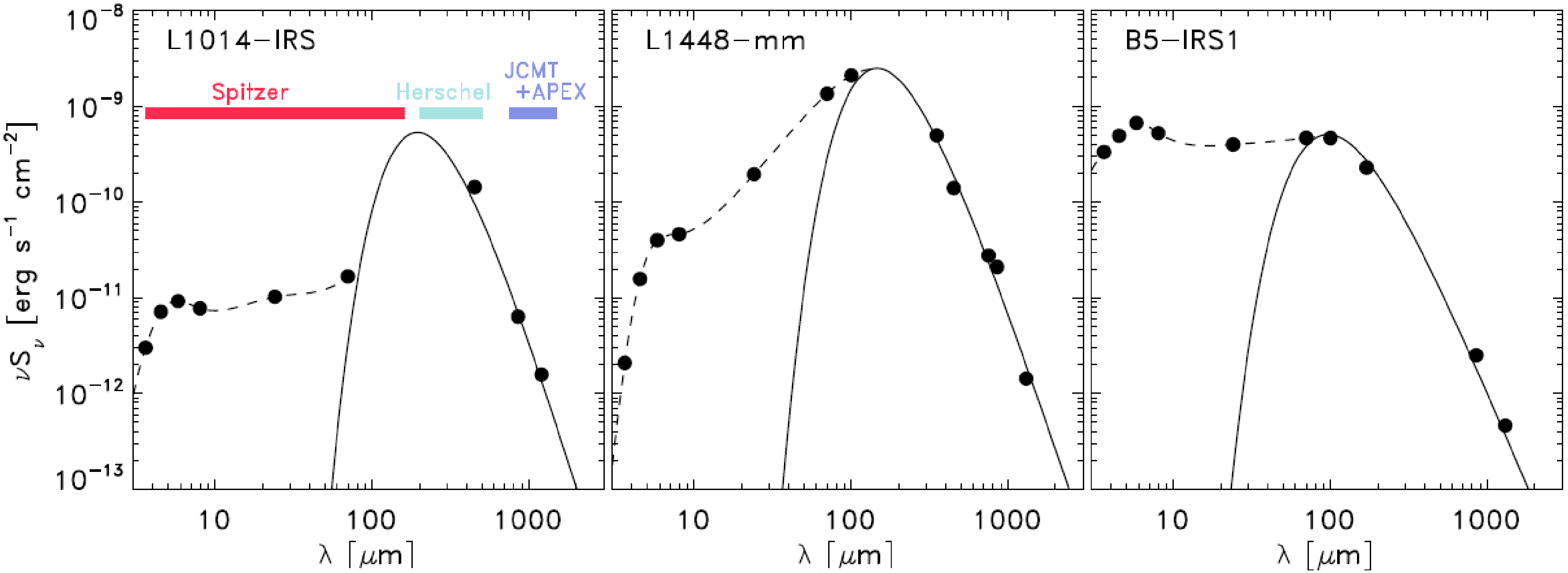
From Y.Tsuboi 2014

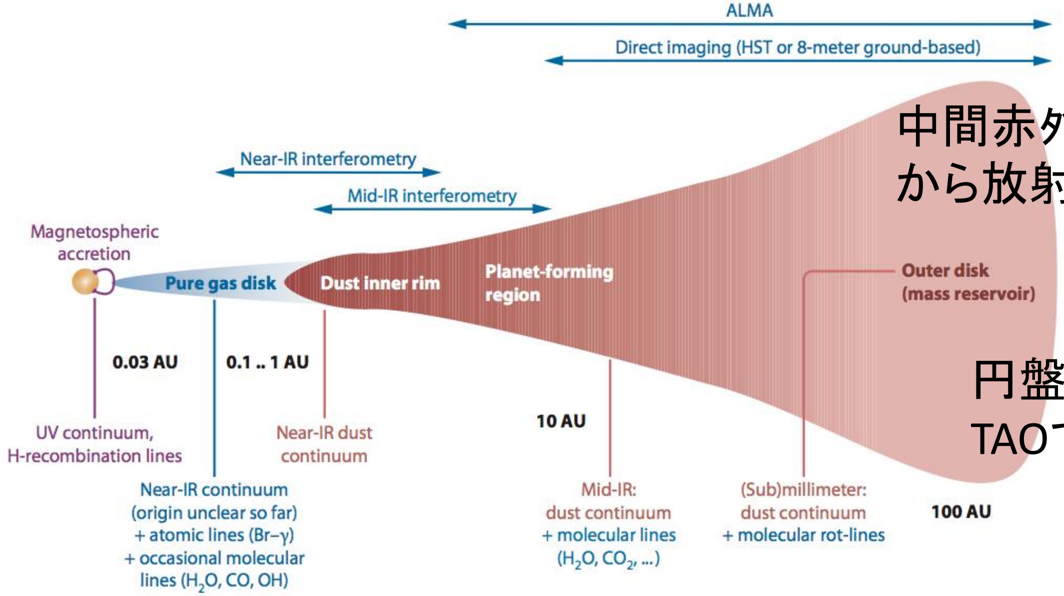
(e.g., Masunaga & Inutsuka)



原始星のSED

Jorgensen et al. (2008)





中間赤外線は円盤やエンベロープから放射される

円盤は100AUスケール（～1“）
TAOで円盤を分解するのは難しい

Luminosity Problem

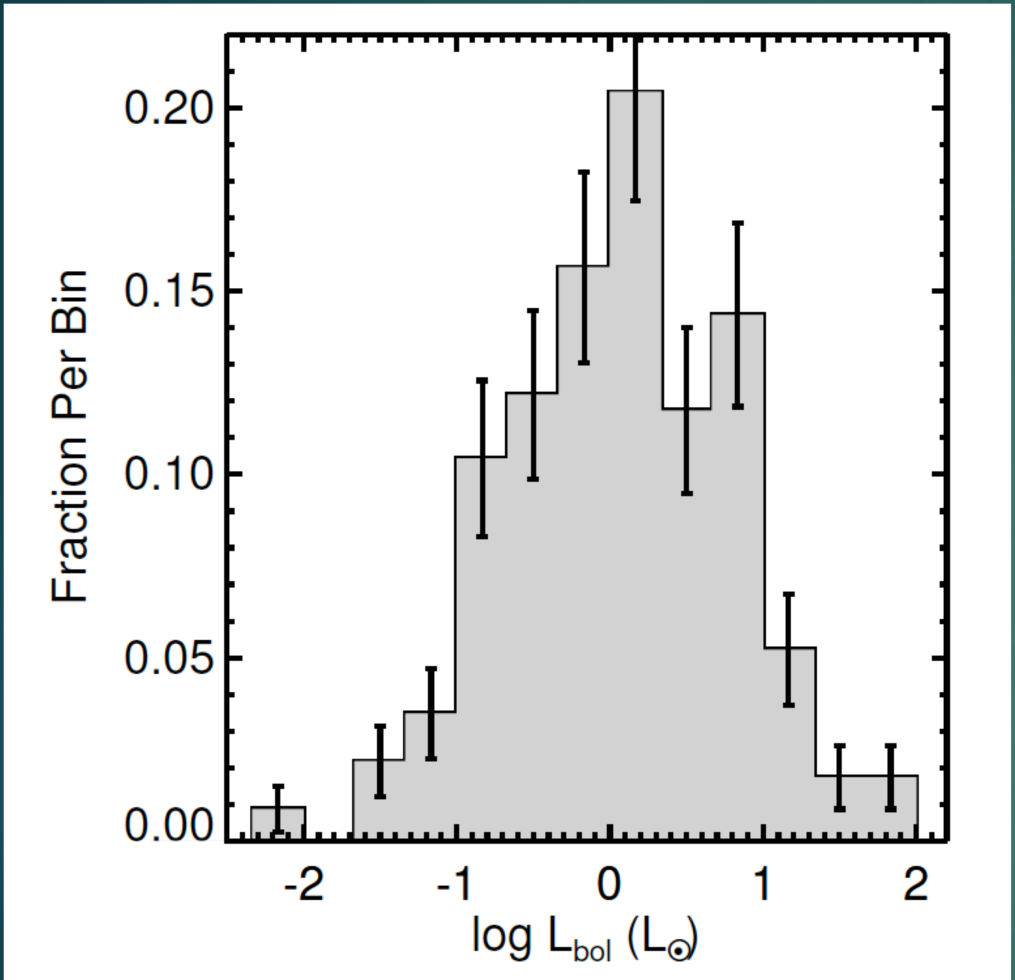
- 原始星の光度は理論モデルの予想よりもずっと暗い(Kenyon et al. 1990)
- $\langle L_{obs} \rangle \sim 2L_\odot$ for Class 0/I (Enoch et al. 2009)
- 質量降着から予想される光度

$$L_{acc} = f\frac{G\dot{M}M}{R}$$

$$= \frac{0.75 \times G \times 0.25 M_\odot \times 2.5 \times 10^{-6} M_\odot / yr}{2.5 R_\odot}$$

$$\sim 5.9 L_\odot$$

原始星の光度の分布



- 平均値

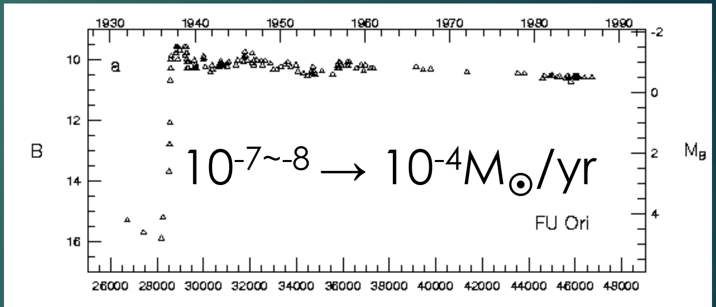
  $L_{bol} = 4.3\ L_\odot$

- 中間値

  $L_{bol} = 1.3\ L_\odot$

- 範囲　3 - 4 桁にわたる

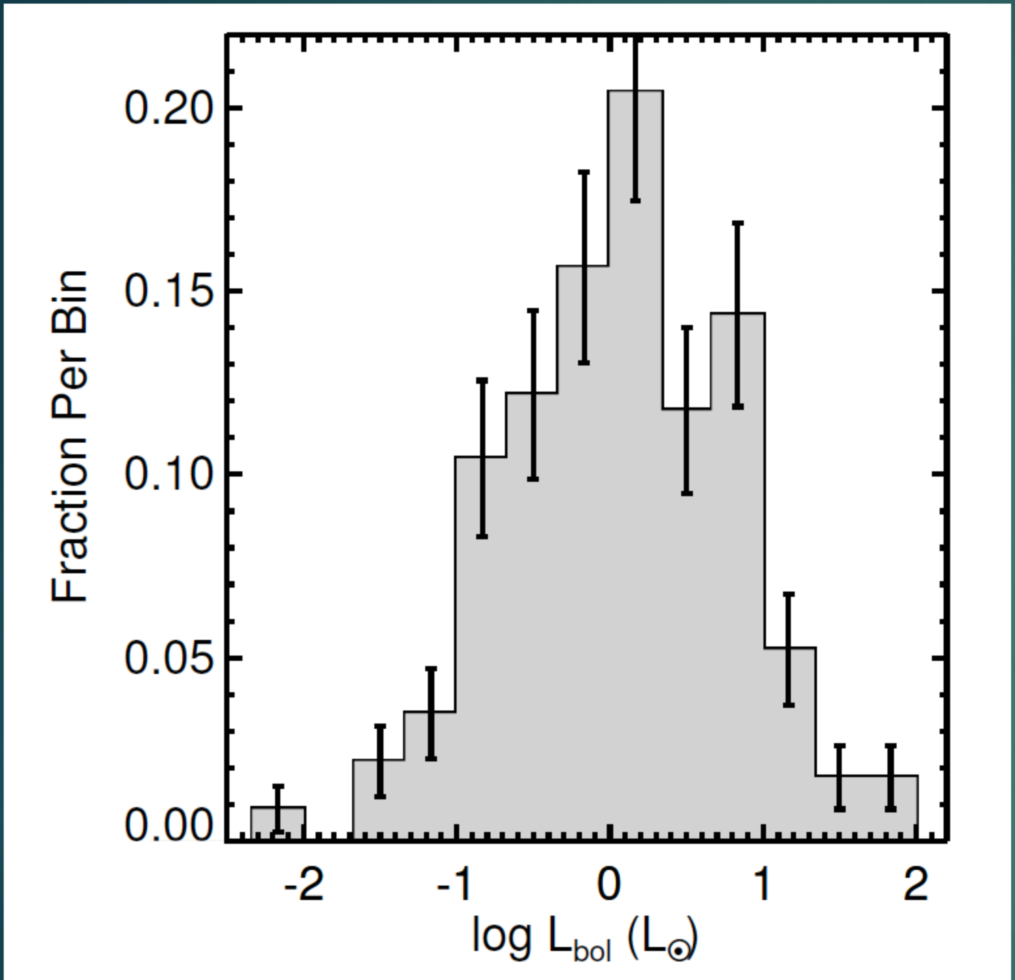
  $0.01 – 69\ L_\odot$

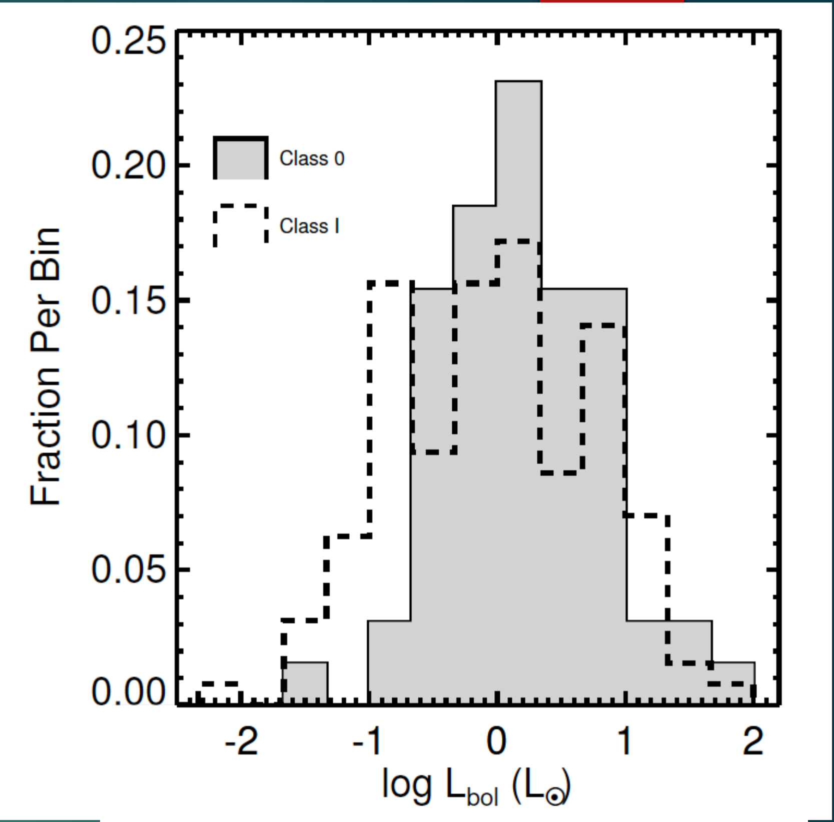


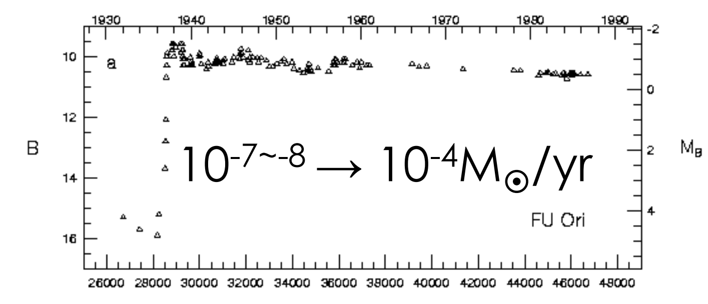
星周構造・エンベロープ構造の多様性
→星の最終質量を決める

Dunham et al. (2012)
spritzer c2d+GB

原始星の光度の分布



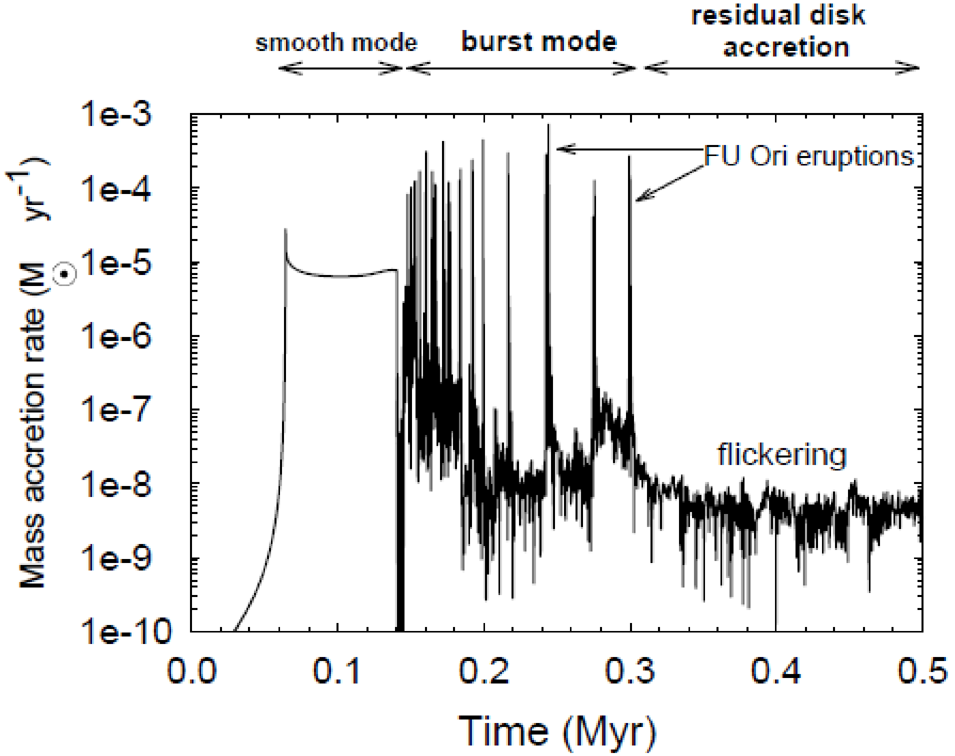


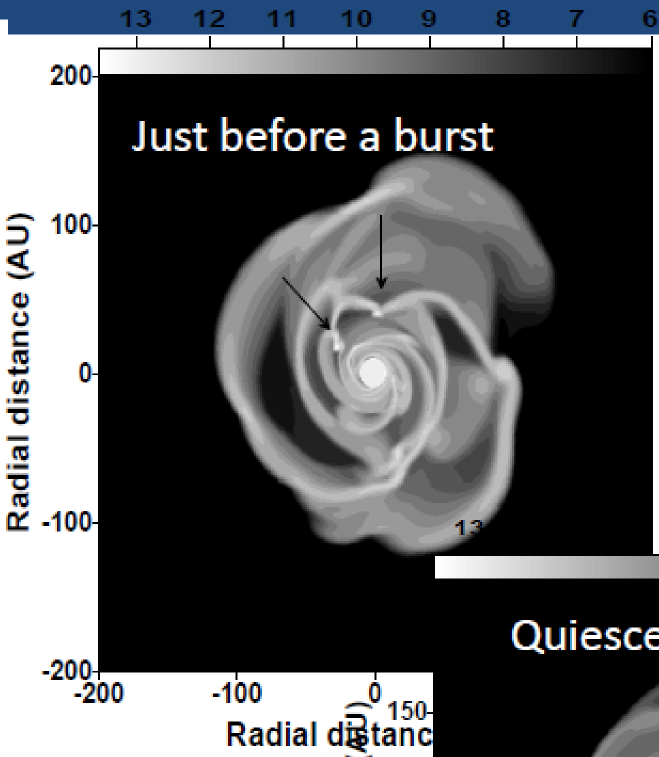


星周構造・エンベロープ構造の多様性
→星の最終質量を決める

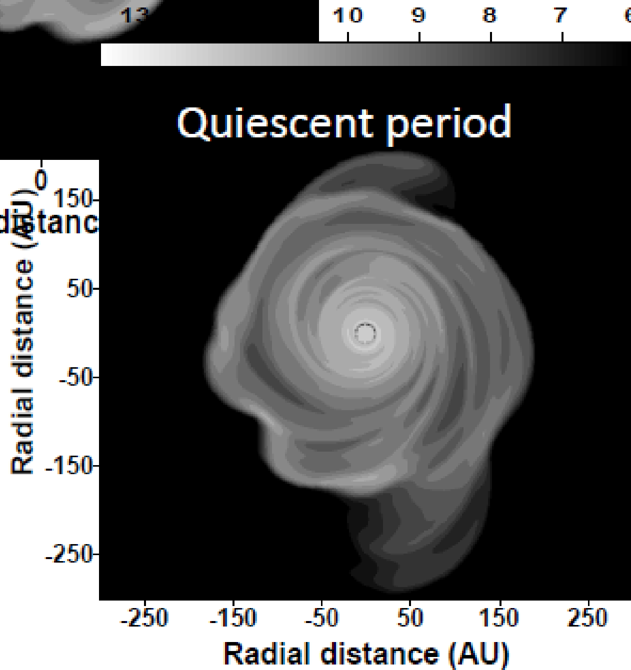
Dunham et al. (2012)
spritzer c2d+GB

Key Results for Early Accretion Phase





Nonlinear instability → clumps → efficient angular momentum transport



Bursts of accretion occur during the early accretion phase, as clumps are formed and driven inward. This is followed by a more quiescent phase that is still characterized by flickering accretion.

from Basu 2011

Vorobyov & Basu (2006)

Episodic Accretionの頻度

- Np = Bursting sourceの数~20 (observed in last 70 yr)
- N* = 星形成率~ 0.016個/yr (Offner & McKee 2011)
- <m$_f$> ~ 0.5M$_\odot$

$$\Delta t_{high} = \frac{N_p}{\dot{N}_*} \sim \frac{20}{0.016\,/\mathrm{yr}} \sim 1200\ \mathrm{yr}$$

降着時間の0.1-1%

$$f_{epi} = \frac{\dot{M}_{high}\Delta t_{high}}{< m_f >} \sim \frac{10^{-4}\, M_\odot/\mathrm{yr} \times 1200\ \mathrm{yr}}{0.5\,\mathrm{M}_\odot} \sim 0.24$$

星の質量の1/4

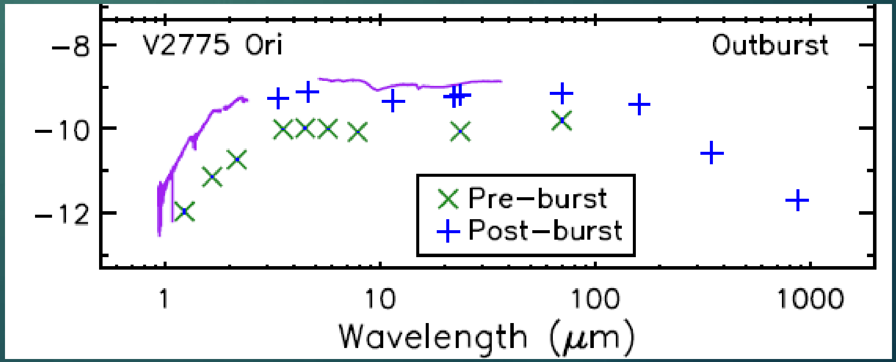
Offner & McKee (2012)

TAOによる観測

- 広域観測による原始星のclassification
  星周構造
  ALMA（1“スケールの構造）との連携

- 原始星の光度変化のモニタリング観測

- 原始星への質量降着過程(Luminosity Problem)の解明

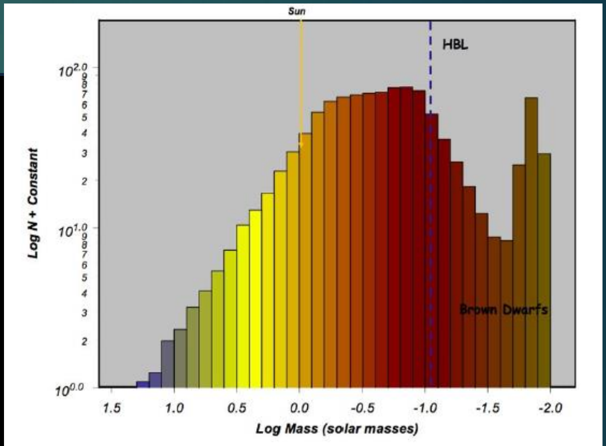


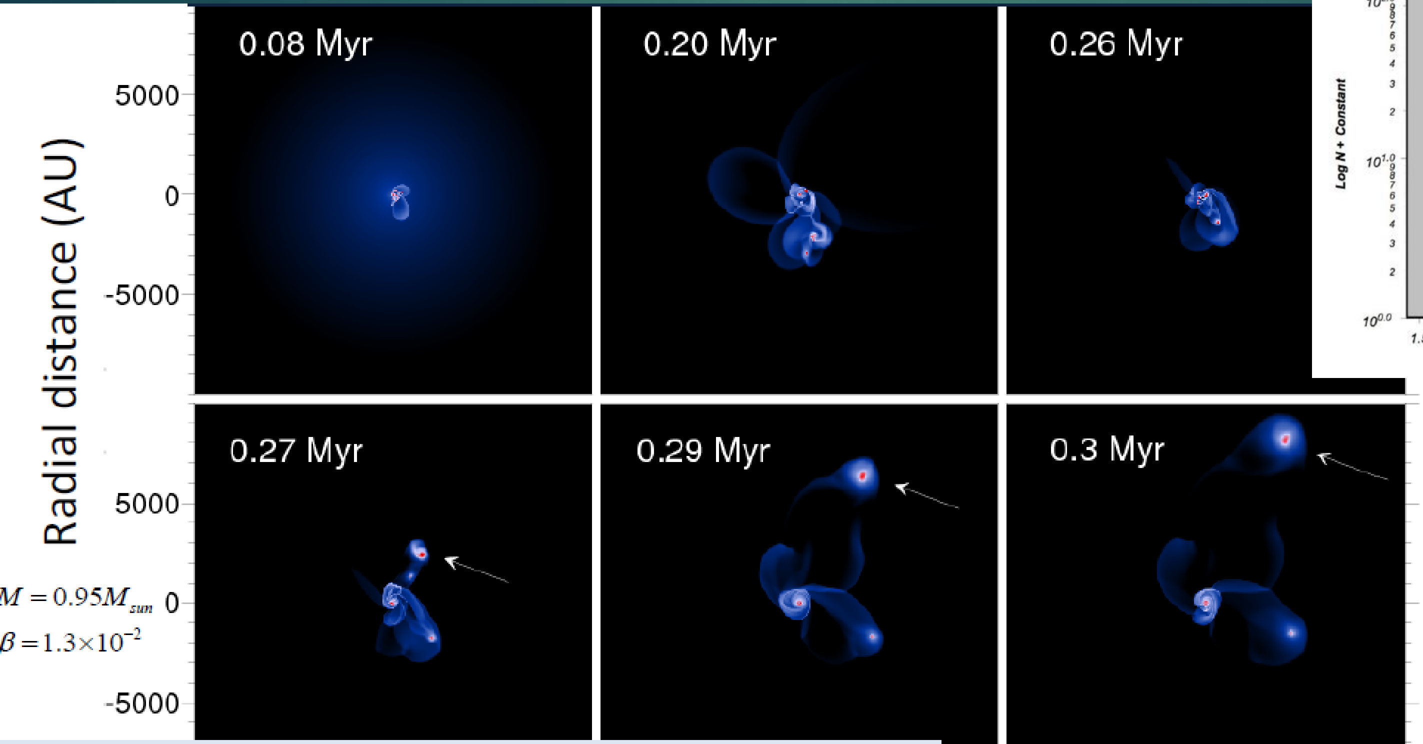
小質量天体(小質量星･褐色矮星･惑星質量天体)

- 小質量天体(褐色矮星・惑星質量天体)の形成メカニズム

ejection vs. core collapse

Orion Trapezium ClusterのIMF





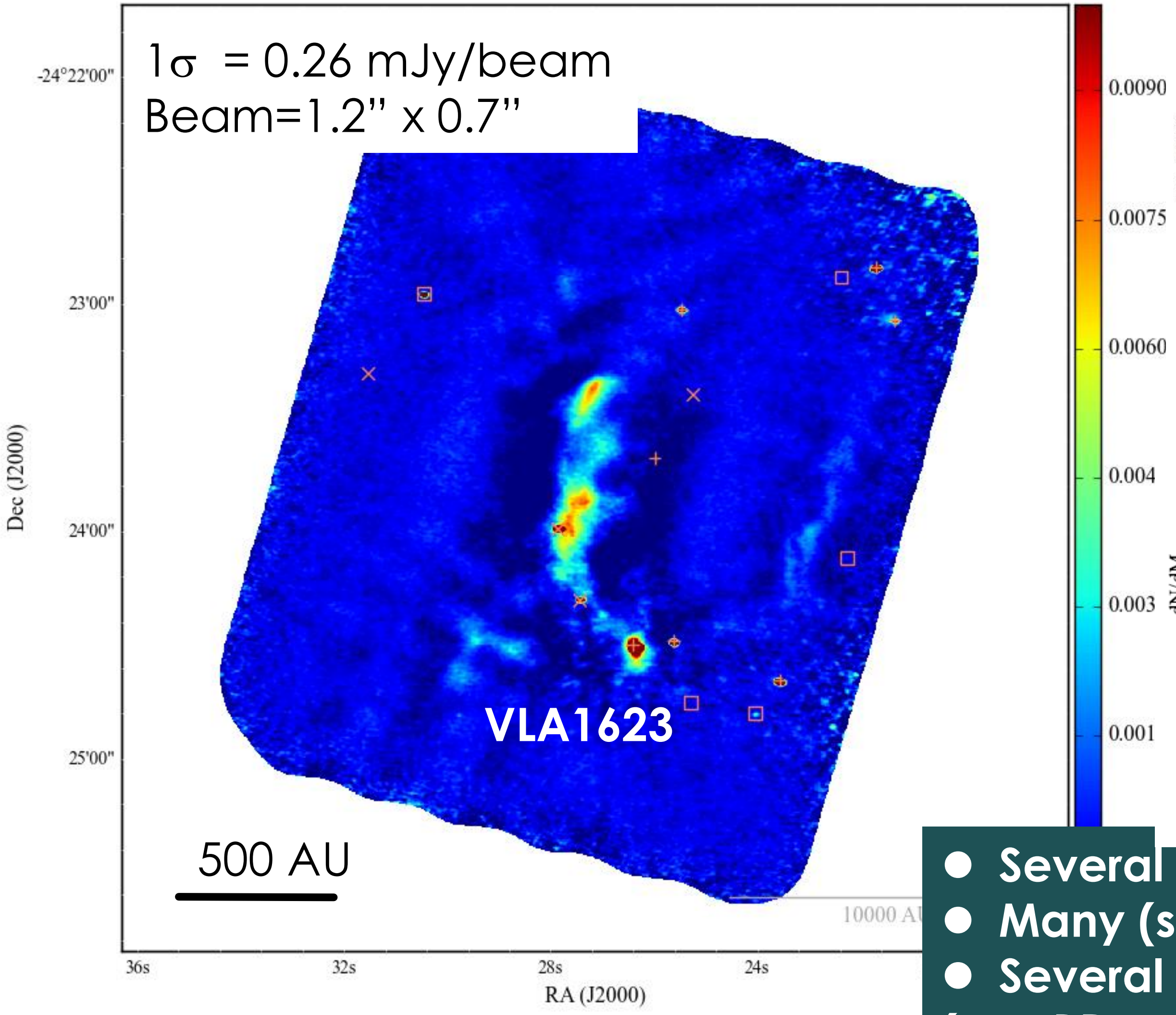
Ejection correlated with higher mass and angular momentum in initial state.

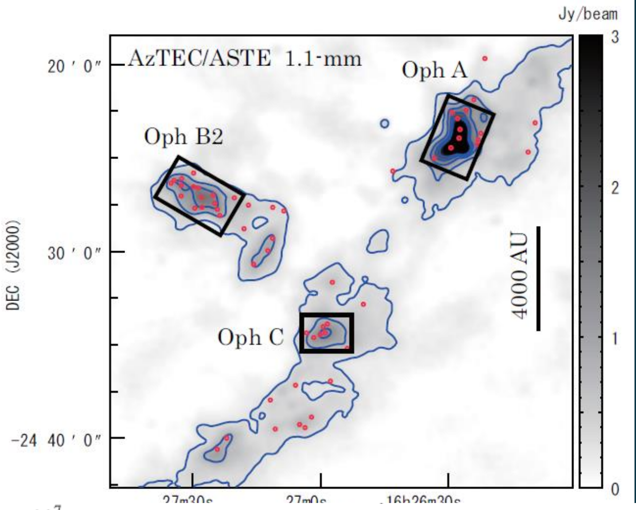
Basu & Vorobyov (2011)

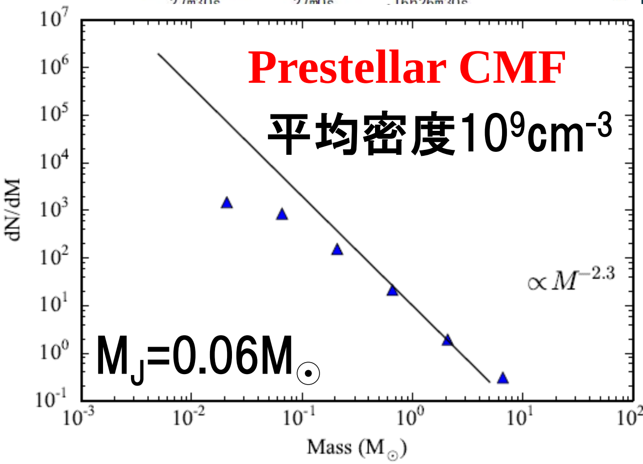
Continuum image of the Oph A region

ALMA cycle-2 (PI Nakamura)

1.3mm continuum map 7m+12m combined







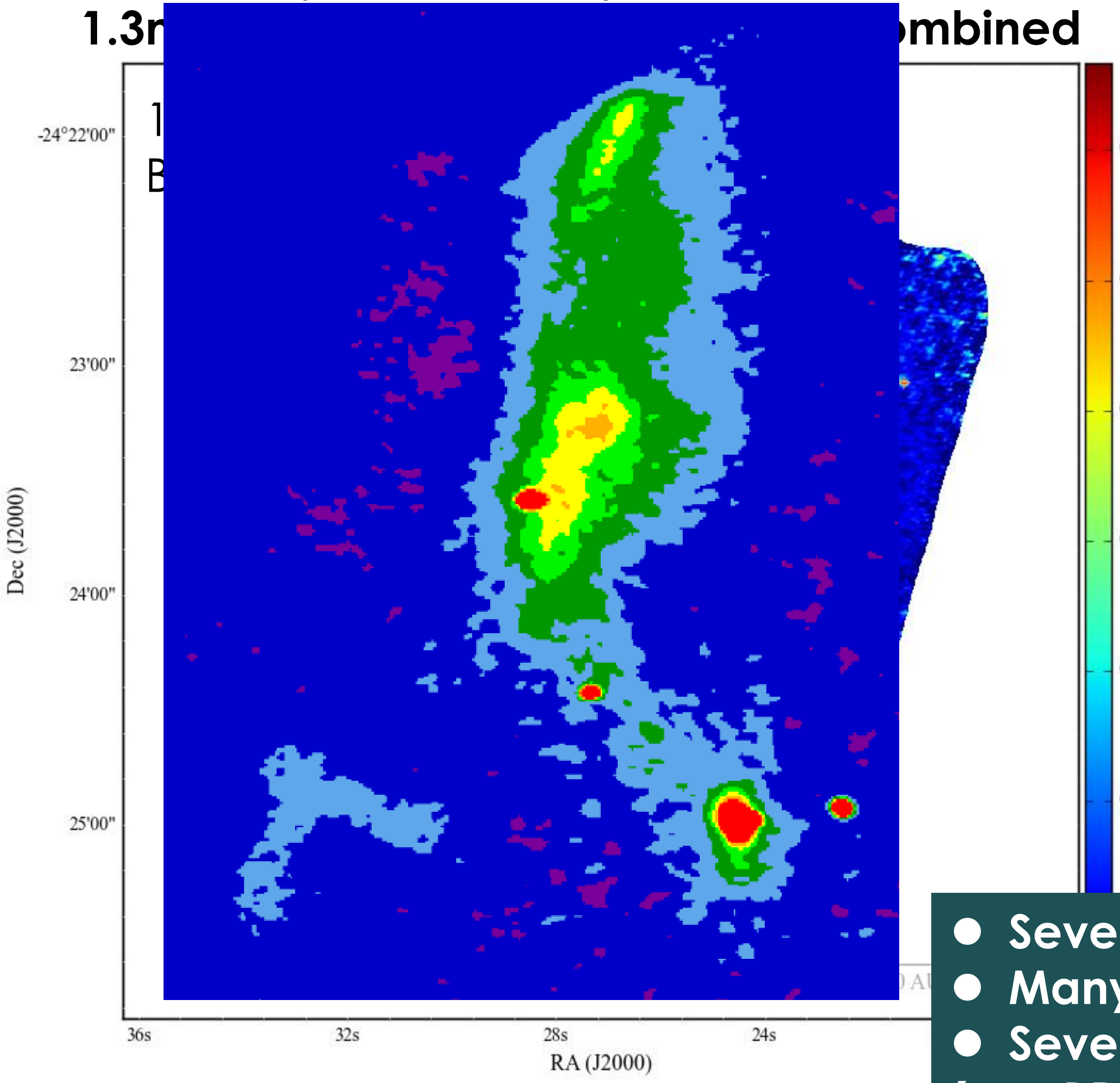
- Several strong protostellar sources
- Many (spatially-extended) starless
- Several small compact sources

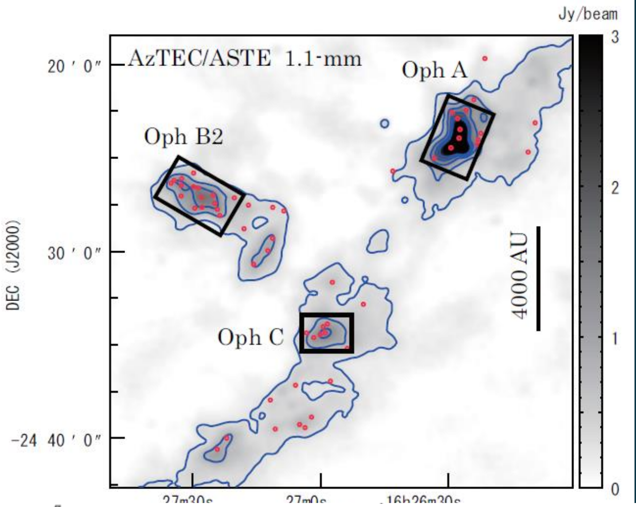
(pre-BD and proto-BD candidates?)

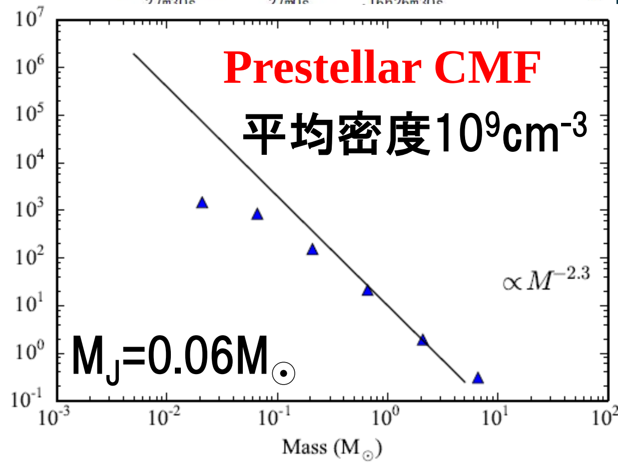
Continuum image of the Oph A region

ALMA cycle-2 (PI Nakamura)

1.3m ... ombined







- Several strong protostellar sources
- Many (spatially-extended) starless
- Several small compact sources

(pre-BD and proto-BD candidates?)

TAOによる小質量天体の観測

- 星団形成領域には小質量コアが多数存在する。
  コアの進化段階を探るうえで赤外線観測は重要

  ALMA観測との連携: 広域観測から
  小質量天体の同定・発見

- 褐色矮星・惑星質量天体などの小質量天体はejectionモデルでは、星形成領域で発見できるはず

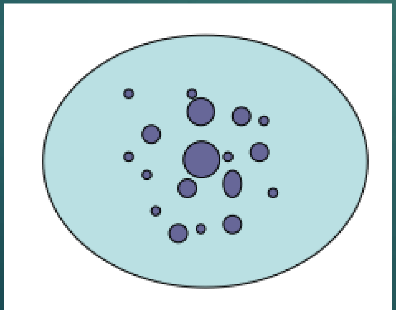
大質量星形成

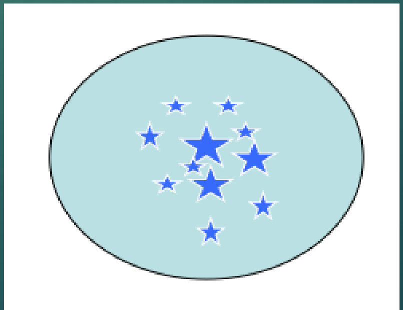
- 研究意義：大質量星は数は少ないが、放射エネルギーは大きく、銀河の進化に多大な影響を及ぼす
- 現状：サンプル数が不足・十分な分解能の観測情報も不足

- 大質量星・星団形成メカニズムは理解が進んでいない

turbulent core vs competitive accretion

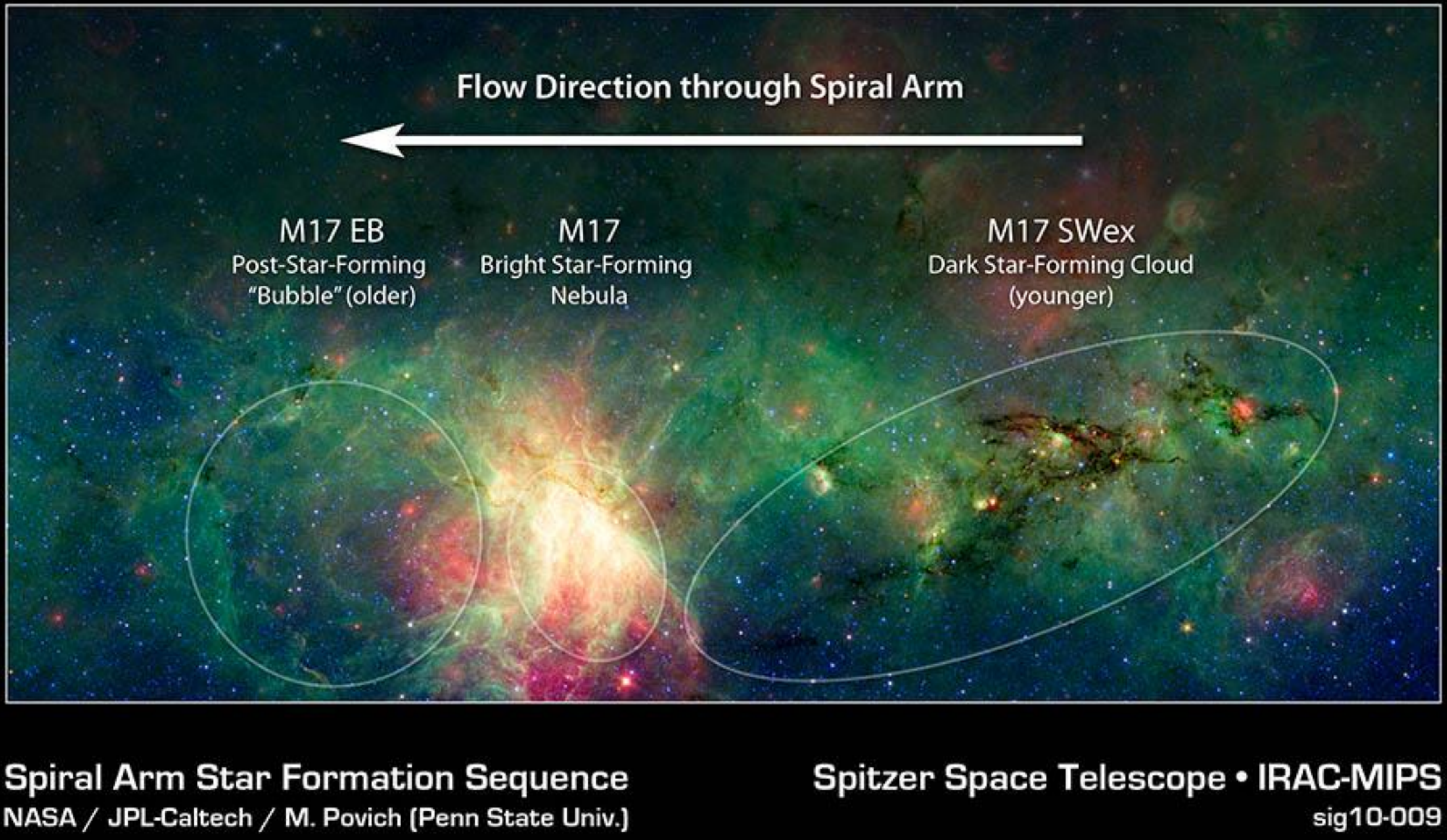
(理論的にはエンベロープ構造は違うはず)





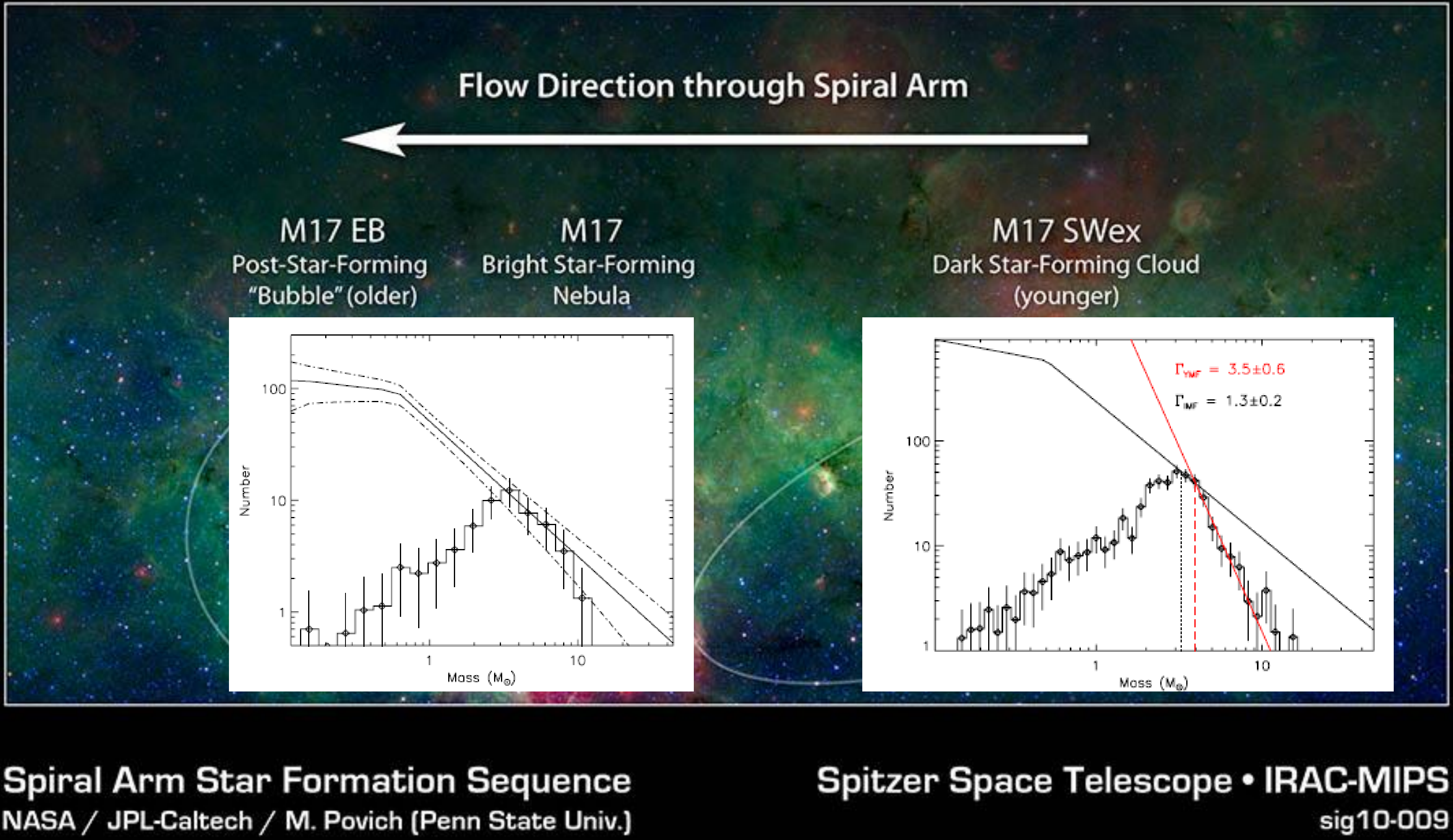
大質量星の形成時期

d ~ 2100 pc



大質量星の形成時期

d ~ 2100 pc



TAOによる大質量星形成過程の解明

- SWIMS, MIMIZUKUによる近傍のIRDC, 若い星団の観測
  - IRDCのstar formation activityを探る
  - protostarの同定、SEDによるclassification
  - high-mass protostar (Hα, Pashen α)
- 大質量星の形成過程の解明
  - 降着過程、エンベロープ構造
- 大質量星の形成時期の解明
  - M17と同様の質量関数か？
  - 大中質量星のclassification

まとめ

- 星形成研究を推進する上で、まだまだサンプル数が不足しているので、TAOによる星形成領域の広域観測を推進する価値は高い
- 数キロパーセク以内の星形成領域の広域観測による原始星の進化段階の同定
- 原始星への質量降着過程の解明
- 大質量星形成領域（IRDC）のサーベイ観測