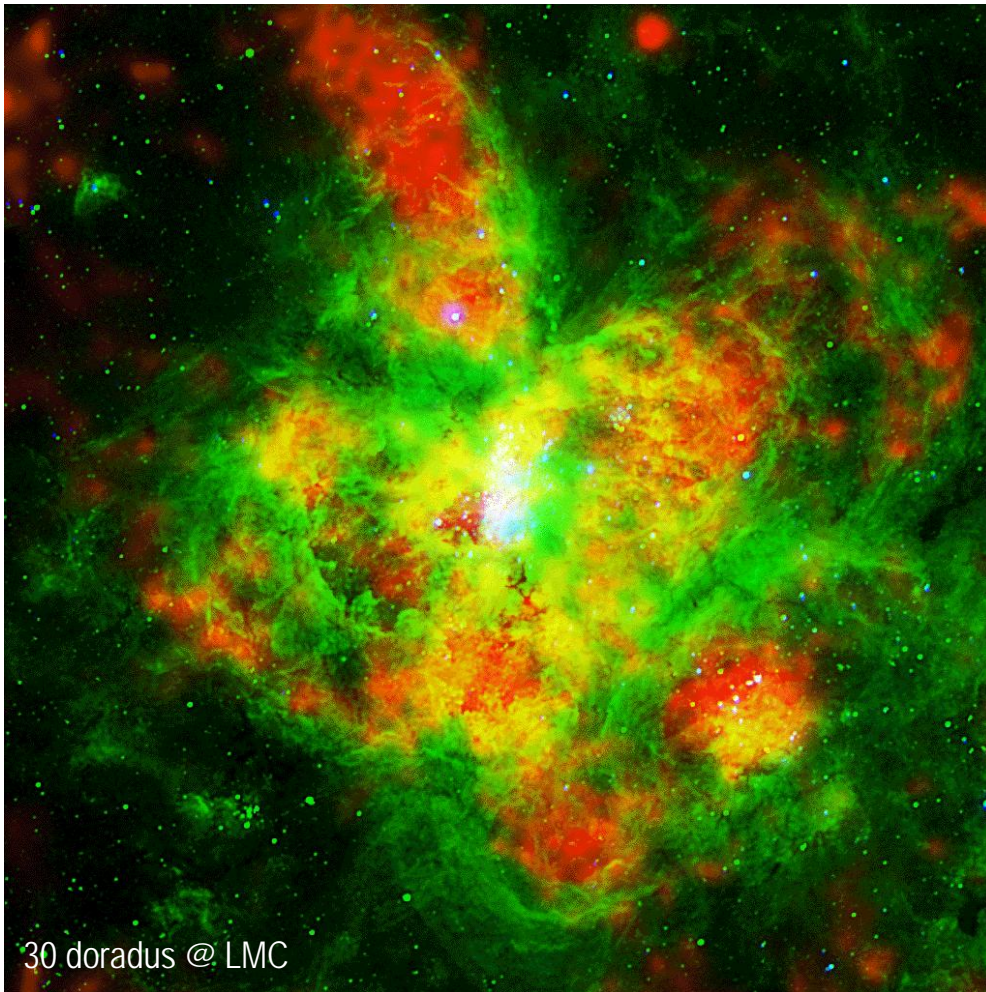


# 大質量星の形成



細川 隆史  
(国立天文台)

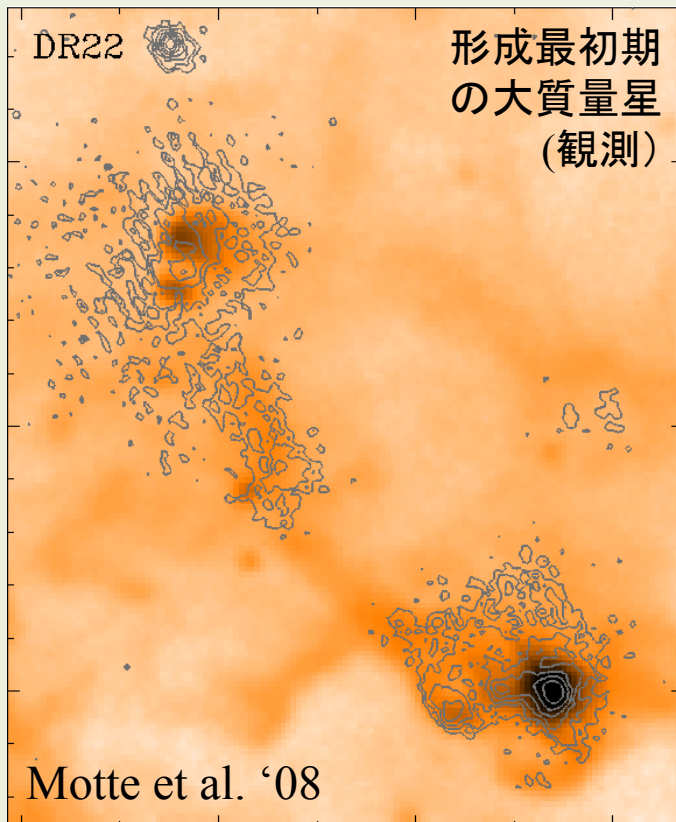
## OUTLINE

1. 問題点と現状
2. 今後の展望

# 1. 問題点と現状

大質量星の形成は、低質量星(太陽程度)の形成過程と比べて  
いまだ発展途上の分野である。

まず、積年の問題と、近年のこの分野の進展について紹介します。

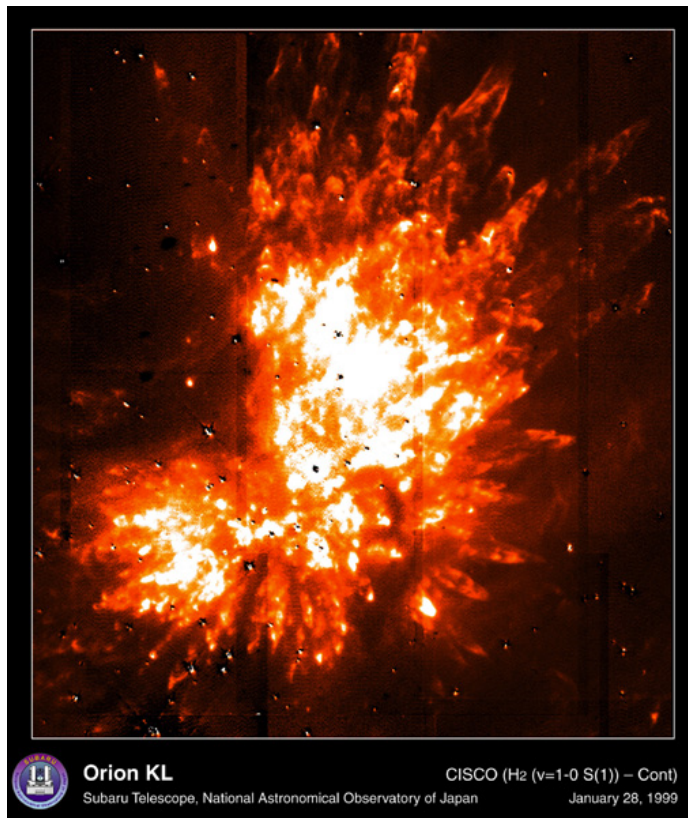


- \* 輻射圧障壁の問題
- \* 観測： 低質量星形成との違い
- \* A paradigm:  
超音速乱流コア → 大降着率

# 大質量星

- UV輻射、超新星爆発などfeedback：星間空間へのenergy input
- 重元素の合成サイト
- 始原星 (Pop III星), GRB前駆体との関連性

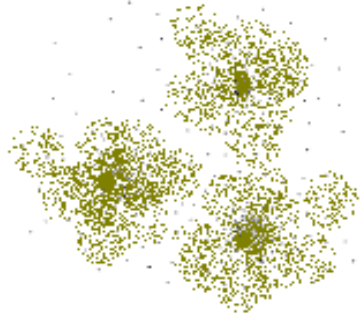
形成シナリオ未確立 (特にO型星:  $> 20M_{\odot}$ )





# 星形成の標準シナリオ (太陽質量)

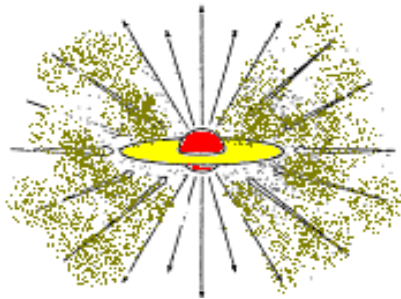
Shu, Adams & Lizano (1987)



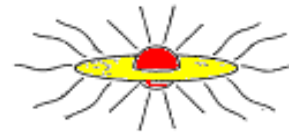
① 分子雲コアの重力崩壊



② 原始星の形成  
原始星への質量降着



③ 星風などのフィードバック  
による降着の終了



④ 原始惑星系円盤から  
惑星形成へ

$$\text{質量降着期の降着率: } \dot{M} \sim \frac{M_J}{t_{ff}} = \frac{c_s^3}{G} \sim 2 \times 10^{-6} M_\odot/\text{yr} \left( \frac{T}{10K} \right)^{3/2}$$

# 大質量星形成の問題点

大質量星には "barrier" がある

## 輻射圧障壁

降着流中のダストにはたらく輻射圧により降着が止められる

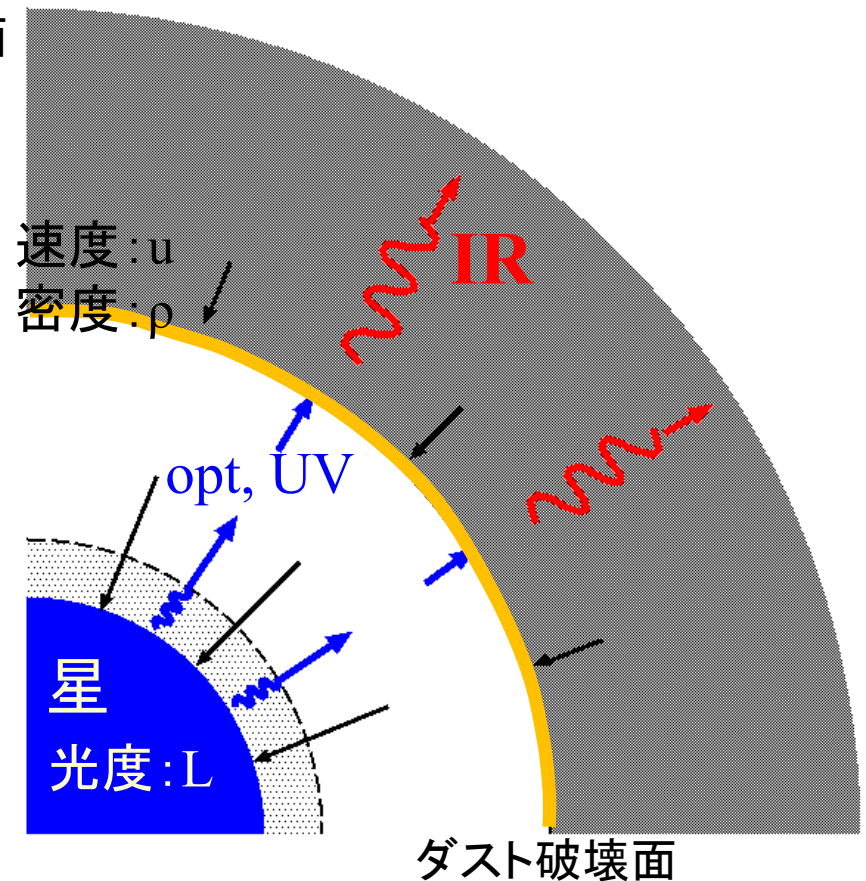
星からの輻射 (opt., UV) の大半がダスト破壊面で一度に吸収

$$\text{輻射圧: } \frac{L}{4\pi r^2 c} \quad \text{ラム圧: } \rho u^2$$

$$\text{降着できる条件: } \rho u^2 > \frac{L}{4\pi r^2 c}$$

これと連続の式  $\dot{M} = 4\pi r^2 \rho u$  を用いて

$$\dot{M} > \frac{L}{cu}$$



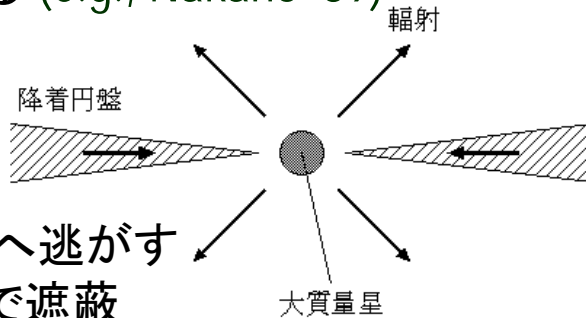
# Strength of the barrier

低中質量星の場合の降着率:

$$\dot{M} \sim \frac{M_J}{t_{ff}} = \frac{c_s^3}{G} \sim 2 \times 10^{-6} M_\odot/\text{yr} \left( \frac{T}{10\text{K}} \right)^{3/2}$$

これではbarrierを突破できない

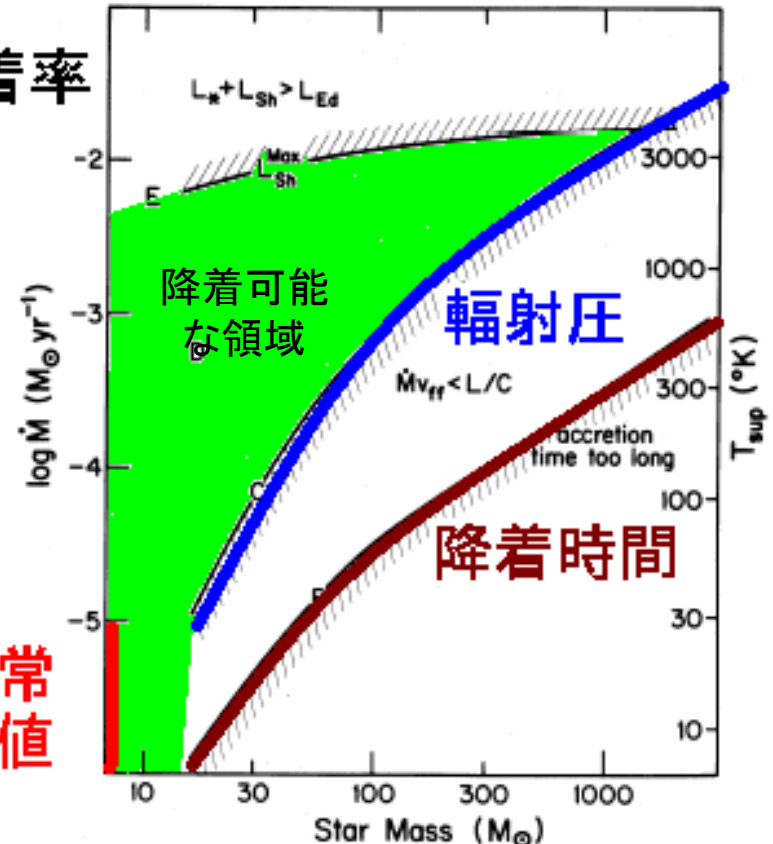
もちろん、球対称でなければ問題は軽減される (e.g., Nakano '89)



輻射: 極方向へ逃がす  
ガス: 円盤中で遮蔽

降着率と星の上限質量

降着率



形成可能な質量

Wolfire & Cassinelli (1986)

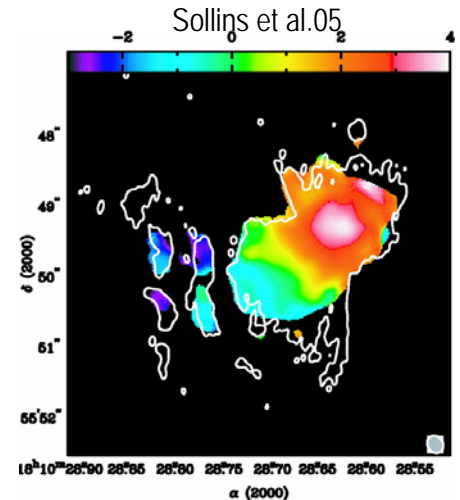
が、そもそも大質量星形成の時の降着率はこれでよいのだろうか？

# 降着率の観測

大質量原始星への降着率を観測的に見積もる

➤ **Infall motion** (e.g., Sollins et al. 05, Beltran et al. 06)

分子輝線/再結合線 profile  $\Rightarrow$  infall motion  
 $\Rightarrow$  降着率

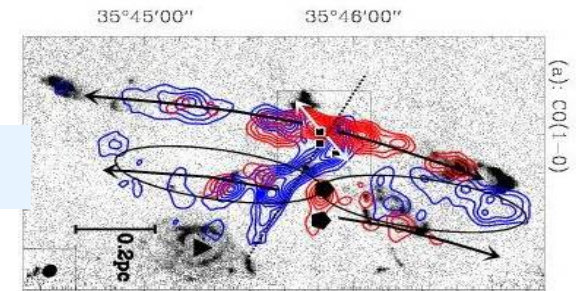


➤ **core SED fitting** (e.g., Osorio et al. 99, Kumar & Grave 08)

大光度IR源のSED (観測) + コア内部の輻射輸送計算 (理論)  
 $\Rightarrow$  降着率 (model parameter)

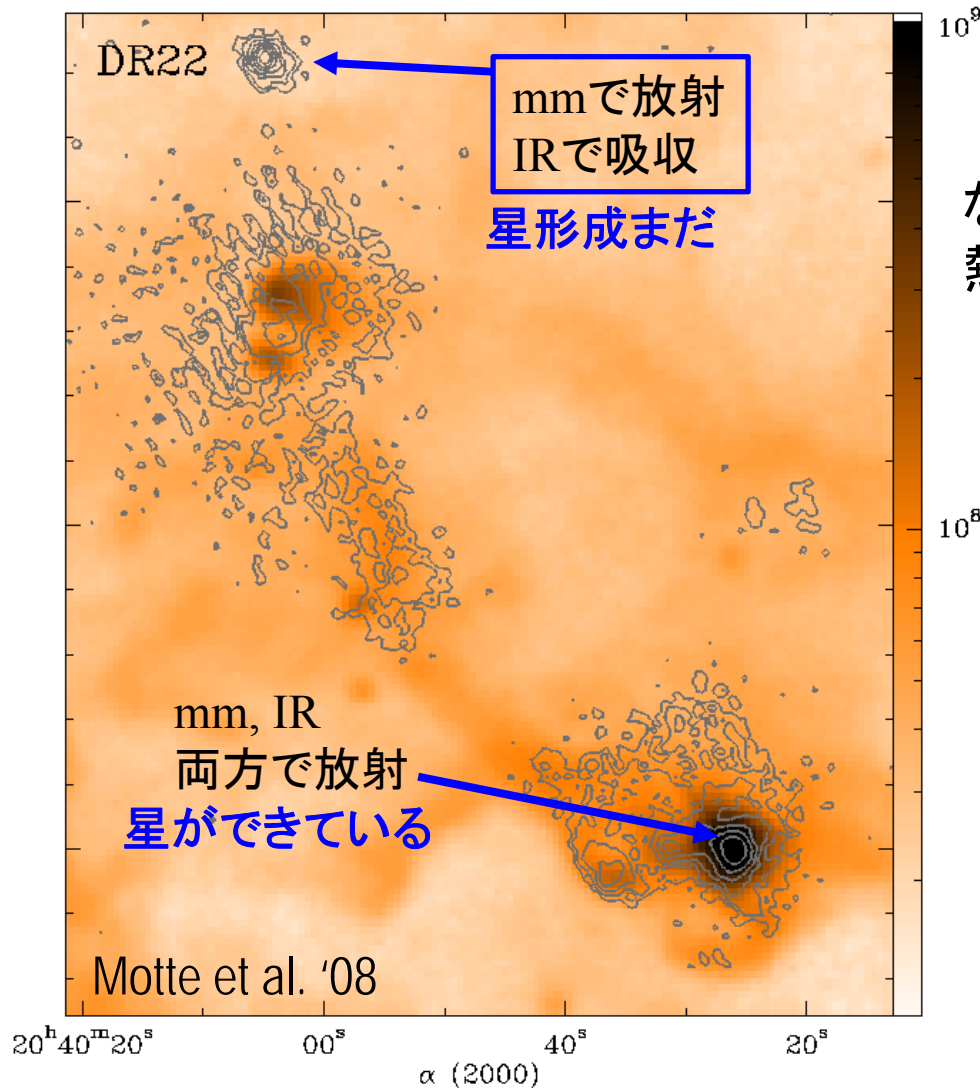
➤ **Outflow rate** (e.g., Beuther et al. 02, Zhang et al. 05)

(降着率)  $\sim$  a few  $\times$  (質量放出率)  $\Rightarrow$  降着率



ほぼ全て大降着率 ( $> 10^{-4} M_{\odot}/\text{yr}$ ) を示唆

# 大質量 星なし分子雲コア



It is important to probe  
massive starless cores

なぜなら降着率は元の分子雲コアの  
熱状態を反映するから

$$\dot{M} \sim \frac{c_s^3}{G} \propto T^{3/2}$$

質量:  $\sim 10^{2-3} M_\odot$   
半径:  $\sim 0.1 \text{ pc}$   
線幅:  $\sim 1 \text{ km/s}$

“超音速乱流コア”

低質量星を作る分子雲コアと  
大きく異なっている;

質量:  $\sim 1 M_\odot$   
半径:  $\sim 0.1 \text{ pc}$   
線幅:  $\sim 0.1 \text{ km/s}$

Image : 中間赤外線 (星で暖められたダスト)  
contour: mm波 (低温ダスト)

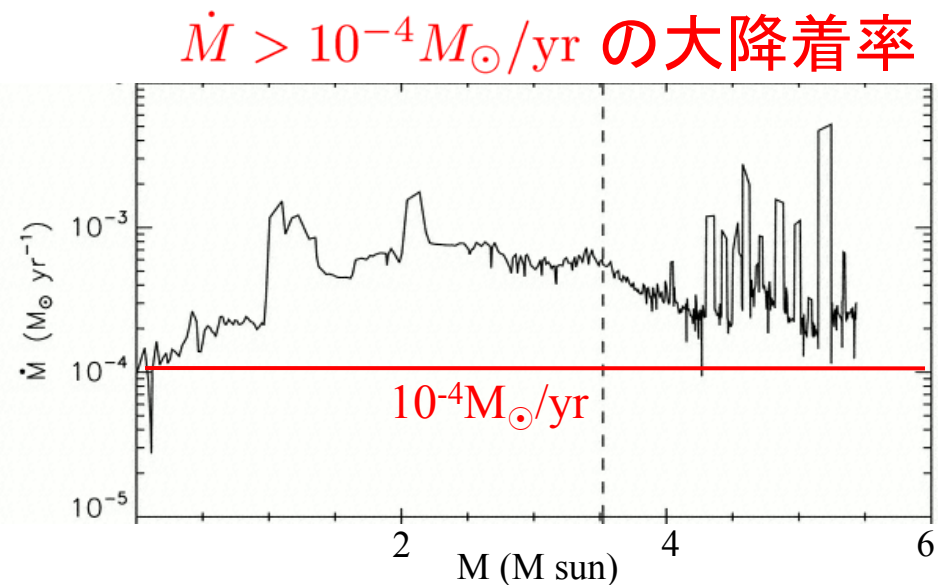
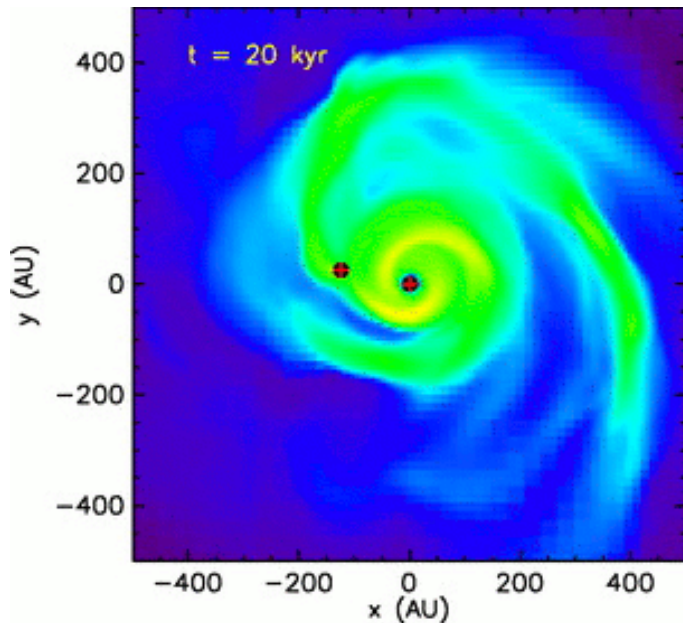


# 大降着率説

(e.g., Nakano '00, McKee & Tan '02)

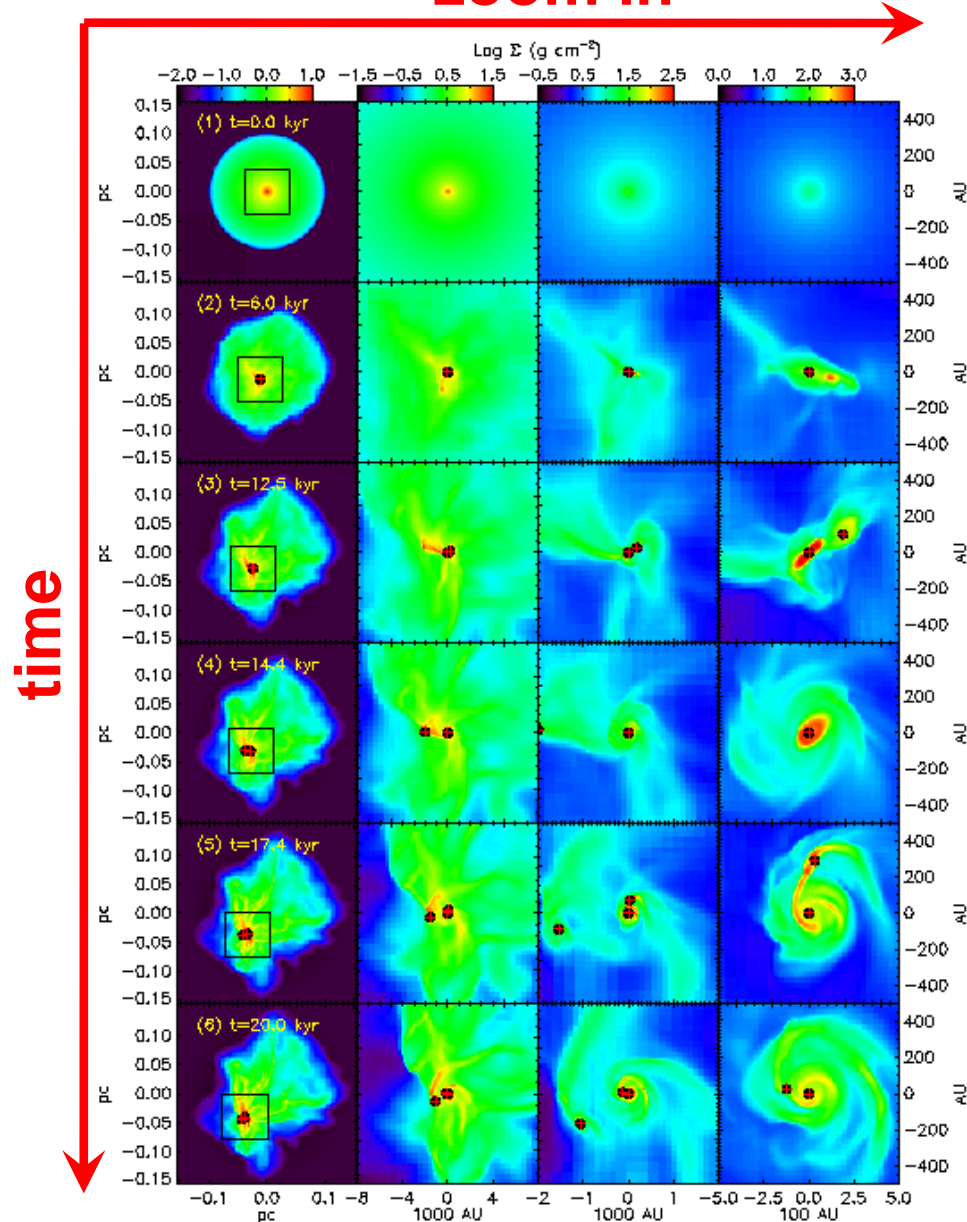
- 超音速乱流コアを初期条件とする  $\dot{M} \sim \frac{c_s^3}{G} \propto T^{3/2}$
- $c_s \rightarrow v_{\text{turb}}$  により大降着率が予想
- 降着流のラム圧により、輻射圧障壁を乗り越える

超音速乱流コアcollapseの輻射流体計算 (Krumholz et al. '07)



# 輻射流体 simulation

zoom in



Krumholz, Klein & McKee, '07

- 3次元
- adaptive mesh refinement
- 輻射：gray FLD近似
- 磁場なし

超音速乱流コア



自己重力円盤を通じた  
rapid mass accretion

O型星のmass rangeでも  
降着は止まらない

## 2. 今後の展望

大質量星の形成は、(分子雲コアcollapse) ⇒ (質量降着) という流れであっても、その様相は低質量星の場合と大きく異なることがはっきりしてきた。さらに今後どのような展望が考えられるだろうか？

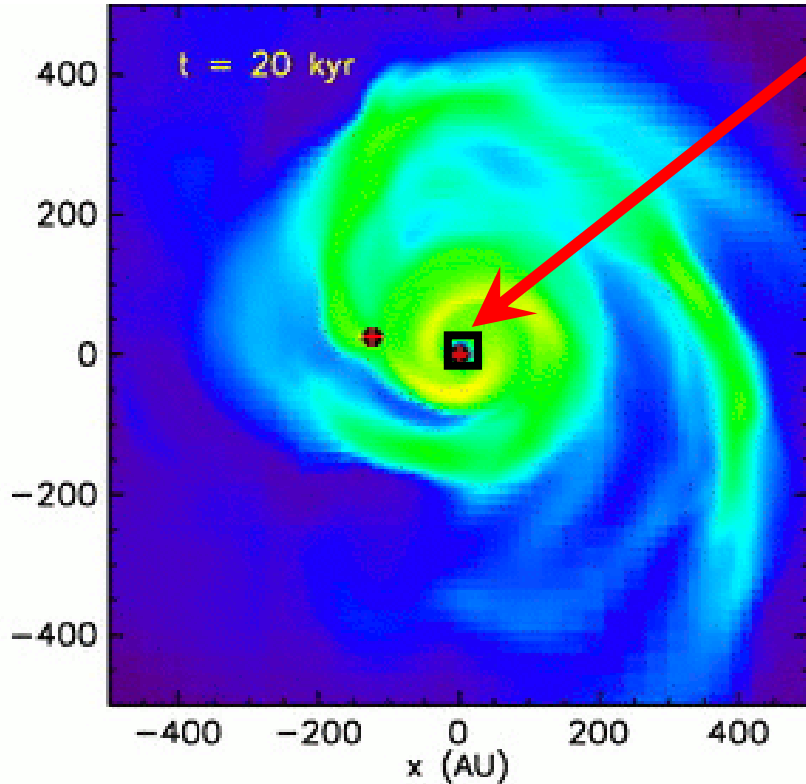
銀河系の最大質量星:Pistol star



- \* 大質量原始星の進化
- \* どこまで重い星ができればよいか？
- \* 始原星形成との関係とALMA

# A “target”

Krumholz, Klein & McKee, '07



“Protostar”,  
but just “sink” in simulations

- ガス : in-going, 輻射 : out-going
- Sink内部はtime stepを非常に短く取る必要があるため

星内部およびごく近傍の物理過程  
はほとんど調べられていない:

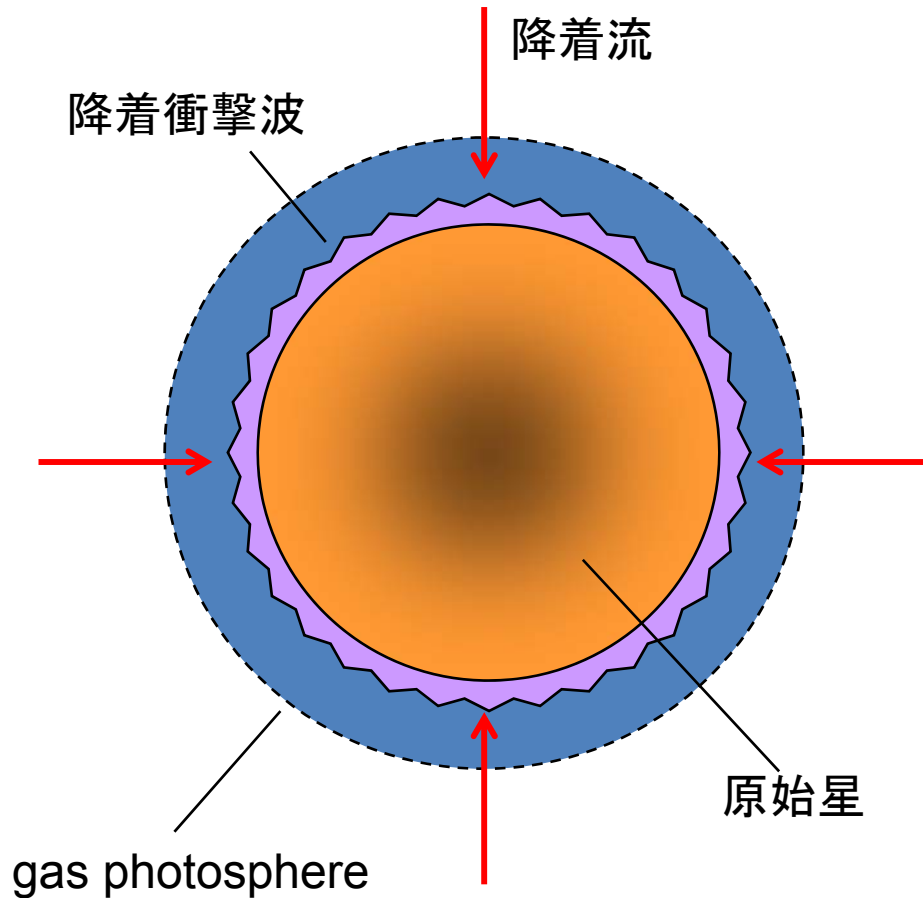
- 原始星進化
- outflow噴出
- 近接連星形成



# Our Approach

大降着率のもとで原始星の進化 ( e.g., 半径, 光度) がどうなるか  
原始星の構造を解いて調べる ( Hosokawa & Omukai '09, ApJ, in press )

Basic eq.: 4 stellar structure eqs.



$$\text{Continuity : } \frac{\partial r}{\partial m} = \frac{1}{4\pi\rho r^2}$$

$$\text{Momentum : } \frac{\partial P}{\partial m} = -\frac{Gm}{4\pi r^4}$$

$$\text{Energy : } \frac{\partial l}{\partial m} = \epsilon_{\text{nuc}} + T \left( \frac{\partial s}{\partial t} \right)_m$$

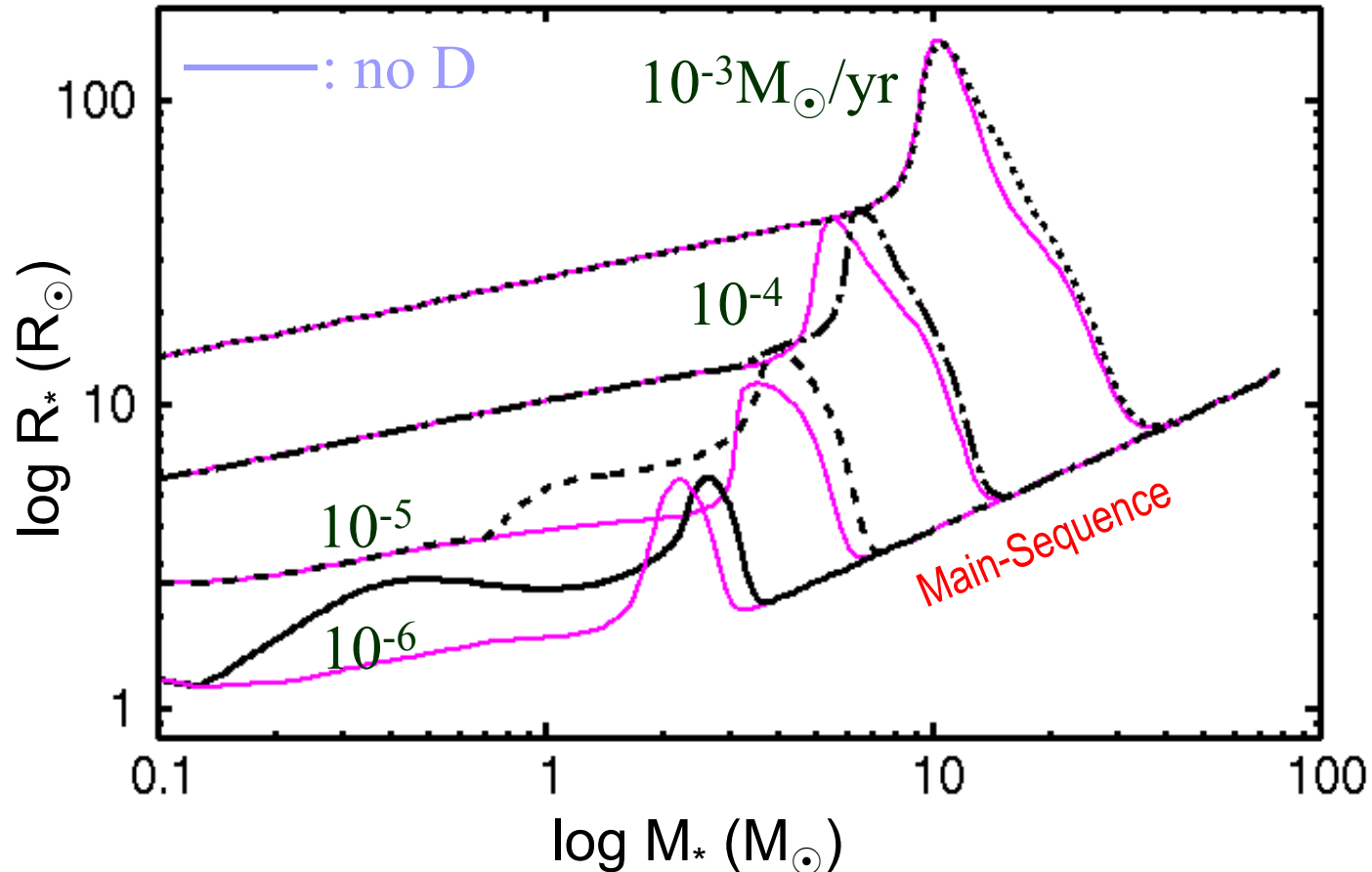
$$\text{Heat transport : } \frac{\partial T}{\partial m} = -\frac{T}{P} \frac{Gm}{4\pi r^4} \nabla$$

外部の定常降着流とshock条件で  
接続

- 降着率一定 :  $10^{-6} M_{\odot}/\text{yr} \leq \dot{M} \leq 10^{-2} M_{\odot}/\text{yr}$

# 原始星進化：降着率の依存性

## 星質量－半径 関係



降着率が大きいと、

- 同質量で原始星の半径が大きい
- 主系列に達する質量が大きい

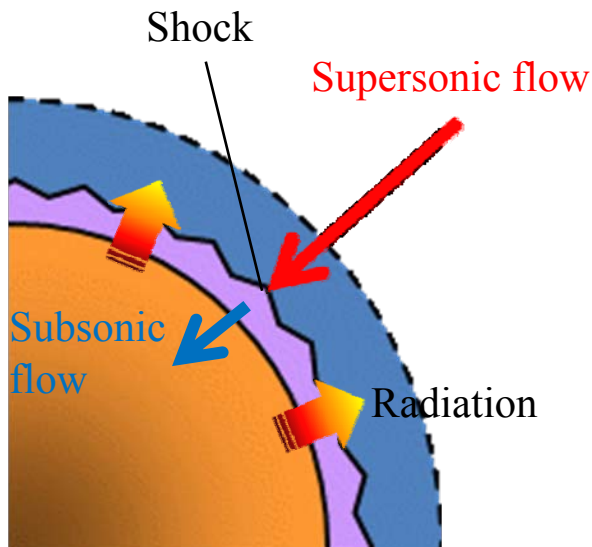
# Why large $R_*$ with high $\dot{M}$ ?

星内の典型的密度、圧力:  $\rho \sim \frac{M}{R^3}$   $P \sim G \frac{M^2}{R^4}$

単原子理想気体の単位質量あたりエントロピー:  $s$

$$s = \frac{3\mathcal{R}}{2\mu} \ln \left( \frac{P}{\rho^{5/3}} \right) + s_0 \quad \longrightarrow \quad R \propto M^{-1/3} \exp \left[ \frac{2\mu}{3\mathcal{R}} (s - s_0) \right]$$

(同一質量で) エントロピーが大きいと半径が大きい



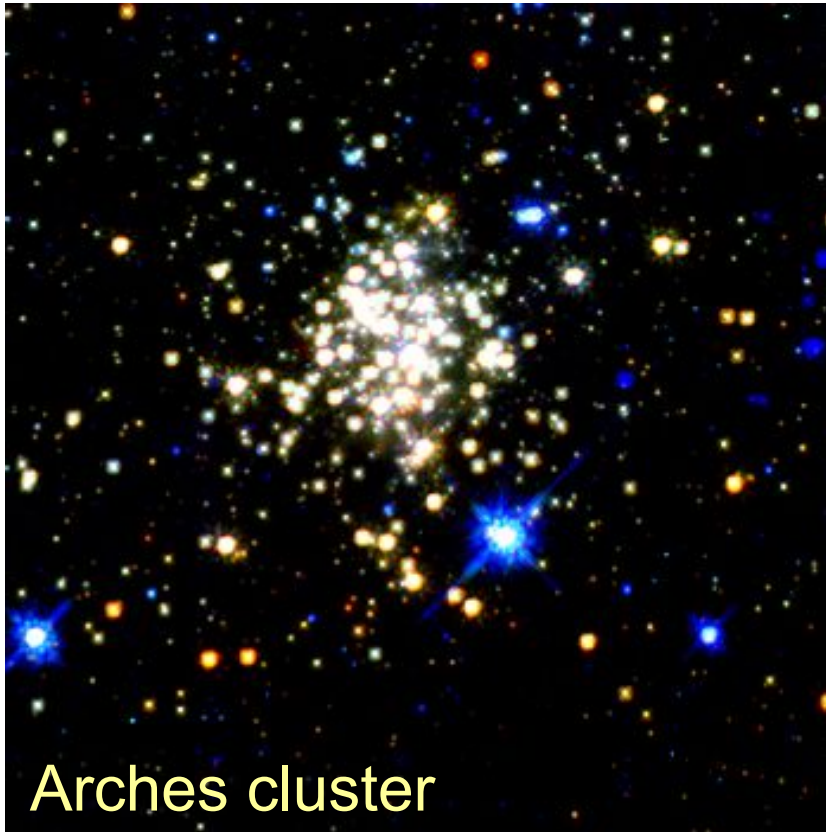
エントロピー生成 @ Accretion shock

降着率大  $\longrightarrow t_{\text{acc}} \ll t_{\text{cool}}$  @ post-shock

降着率大  $\longrightarrow$  エントロピー大  $\longrightarrow$  半径大

# 主系列星の最大質量

どこまで重い星ができればよいか？



Arches cluster

- ▶ 銀河系の最重量星: Pistol star  
~  $150 M_{\odot}$
- ▶ IMF cut-off  
十分若い大質量星団 ( $>10^4 M_{\odot}$ )  
でも、 $150 M_{\odot}$  以上の星が無い  
(Salpeter IMF下ではもっとあるはずだが)  
(e.g., Weidner & Kroupa '04 : R136  
Figer '05 : Arches cluster )

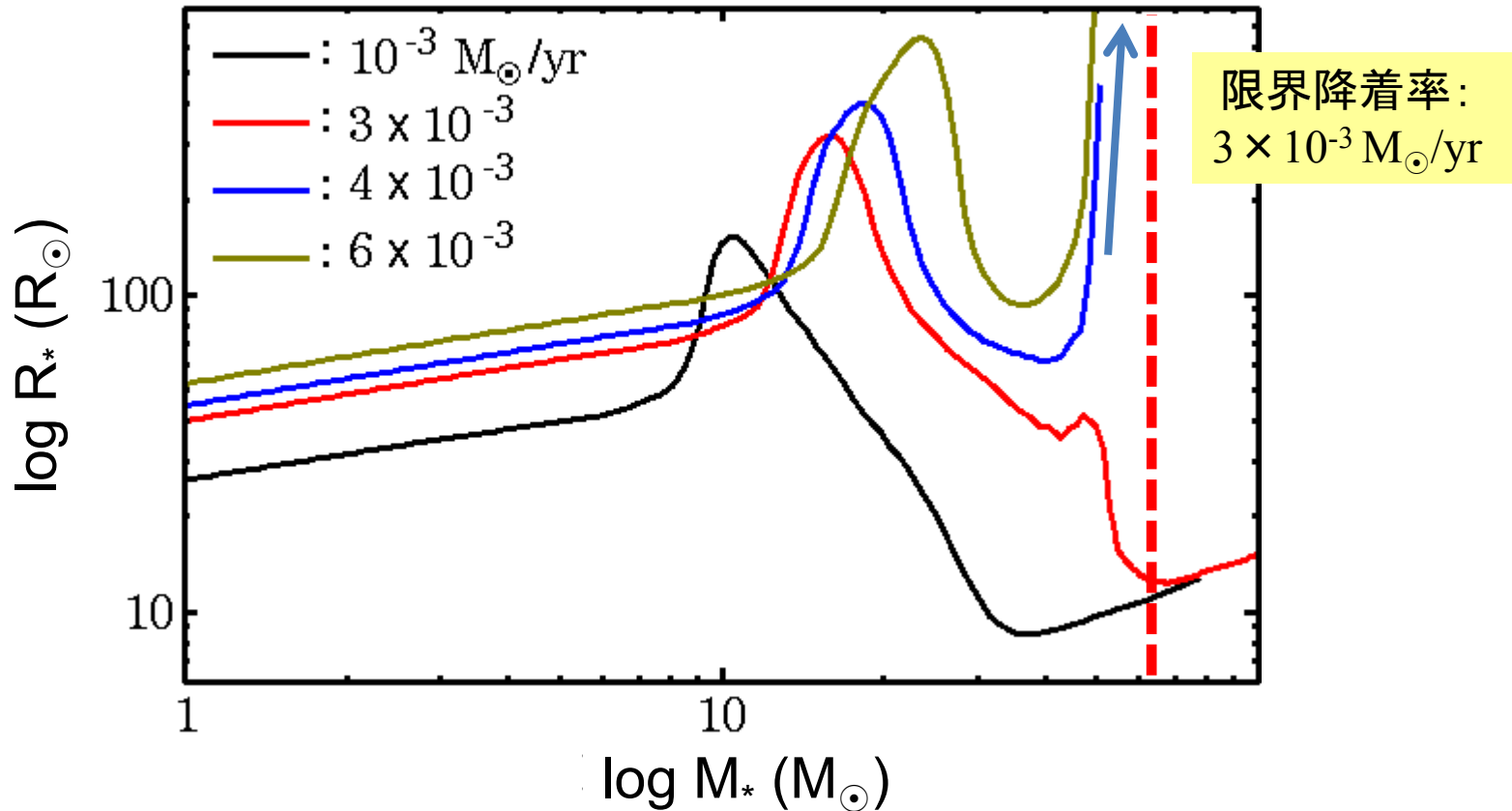
なぜか  $150 M_{\odot}$  程度より重い星はできないようである。

c.f. ) pair-instability SN :  $140 M_{\odot}$  -  $260 M_{\odot}$



# (準)エディントン光度限界

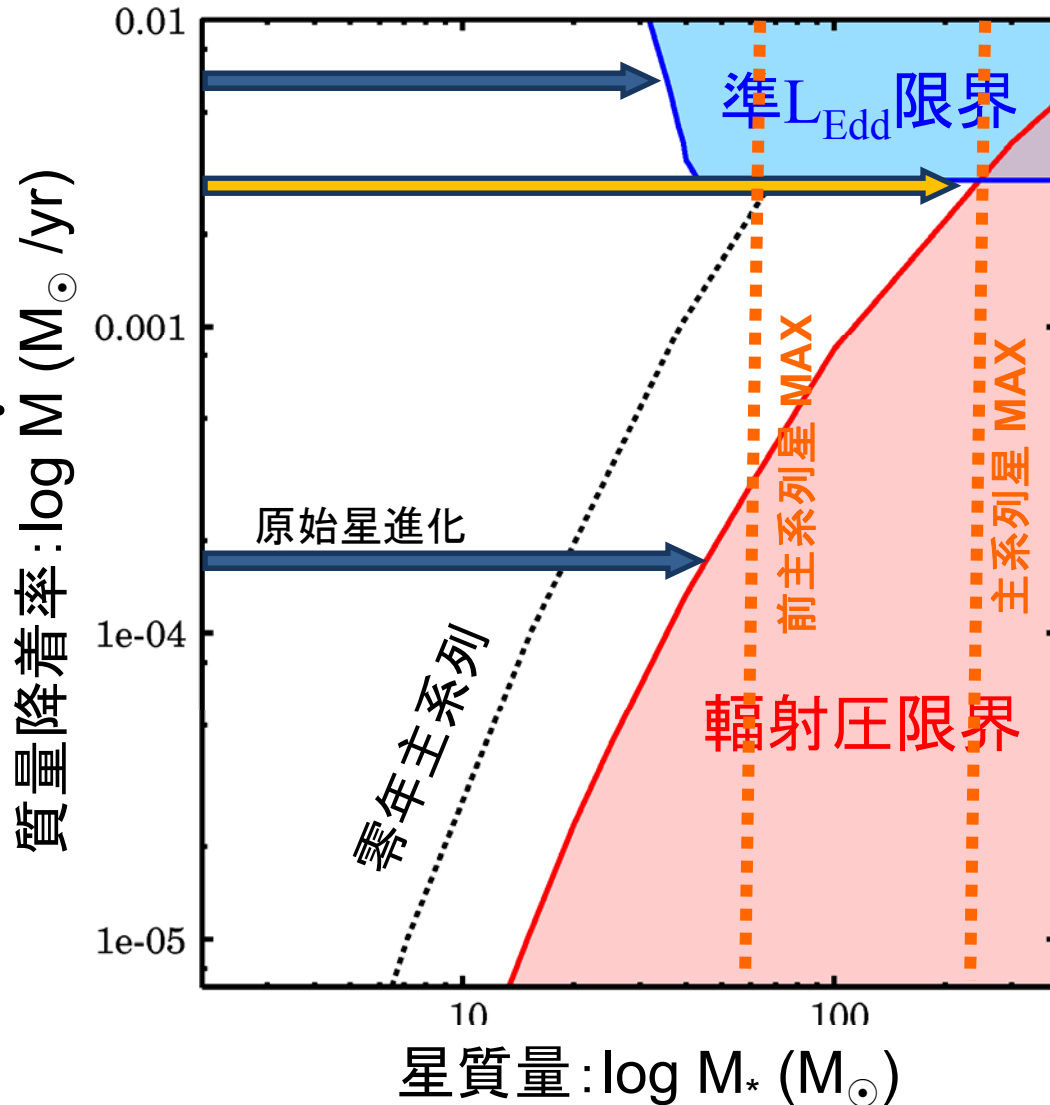
さらに大降着率下での原始星進化



- あまりにも降着率が大きすぎると、途中で急激な膨張に転じる
- (原始星全光度:  $L_* + L_{\text{acc}}$ ) ~ (エディントン光度) のため
- 前主系列の星には約 $60M_{\odot}$ で質量の上限がある

# 主系列星と前主系列星の最大質量

各降着率下での零年主系列の位置  
+ 準エディントン光度限界



主系列に達する為の  
最大降着率:  $3 \times 10^{-3} M_{\odot} / \text{yr}$

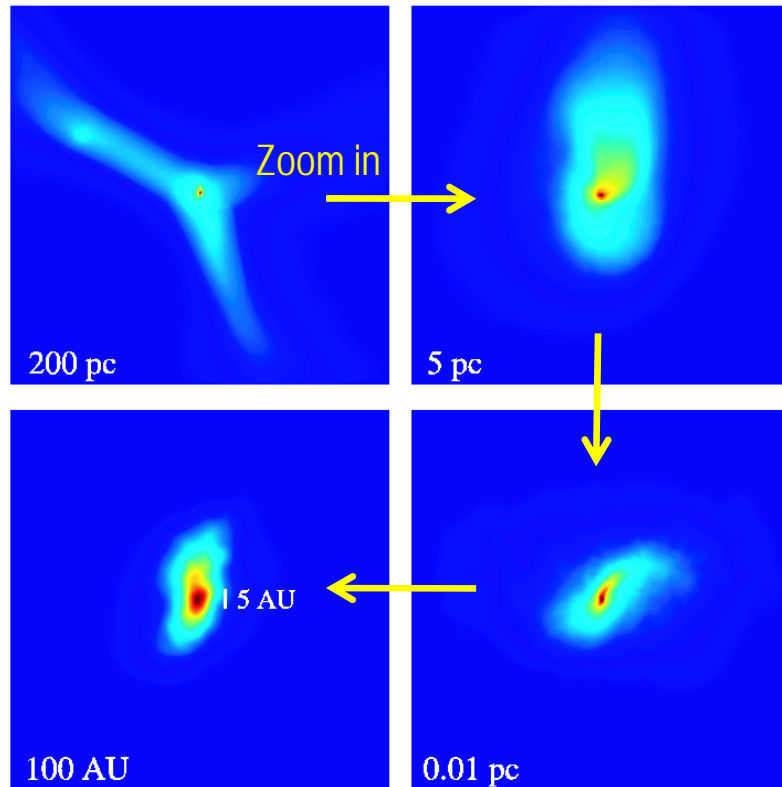
この時の進化が最大質量を  
与える。

前主系列星 : 約 $60M_{\odot}$   
主系列星 : 約 $250M_{\odot}$

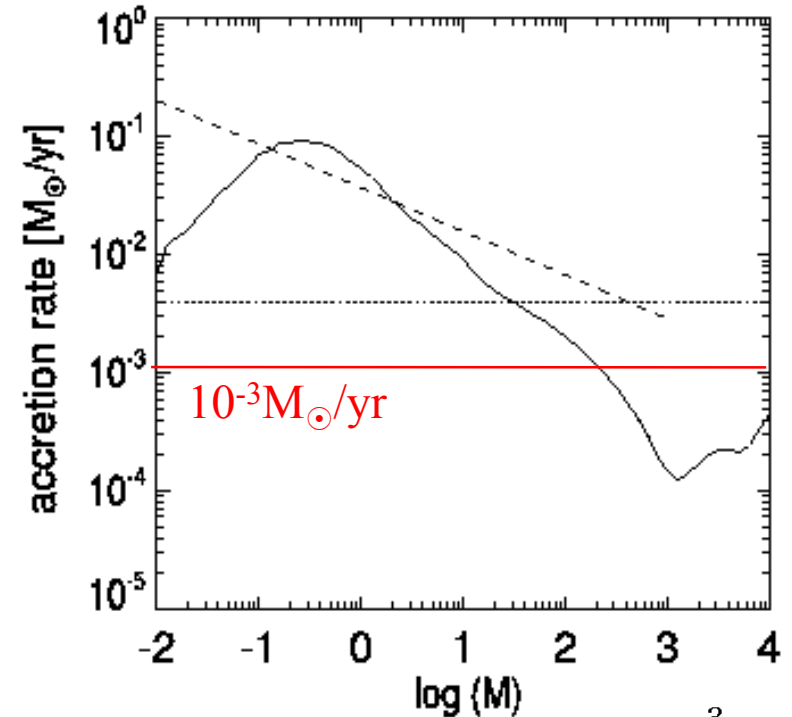
# 始原星形成：宇宙最初の星形成

Yoshida et al. 06    ダークマターハロー中のガスコア重力収縮  
3D simulation

密度分布の射影図 ( $z \sim 19$ )



降着率の時間進化



$$\dot{M} \sim \frac{c_s^3}{G} \propto T^{3/2}$$

もともとのガスが高温のため ( $\sim 1000\text{K}$ )、降着率が大きい  
超音速乱流コア (現在) で予想される降着率と、偶然同程度

# 金属量とfeedback過程

降着を止め得る過程が金属量によってどのように変わるか？

## ▶ 銀河系の星形成 ( $Z=Z_{\odot}$ )

ダストにはたらく輻射圧が降着を止めるのに非常によく効く。(Wolfire & Cassinelli 86他)

## ▶ 始原星形成 ( $Z=0$ )

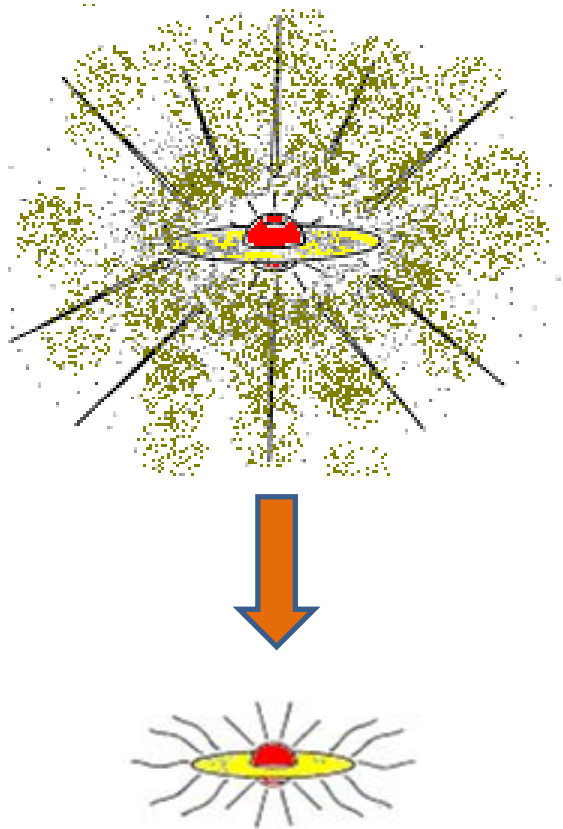
ダストなし⇒輻射圧barrierなし

- 元のガス雲全部降り積もるまで止まらない:

$$M_* \sim 1000M_{\odot}$$

- 電離領域形成による円盤蒸発で止まる:

$$M_* \sim 100M_{\odot} \text{ (e.g., McKee \& Tan 08)}$$



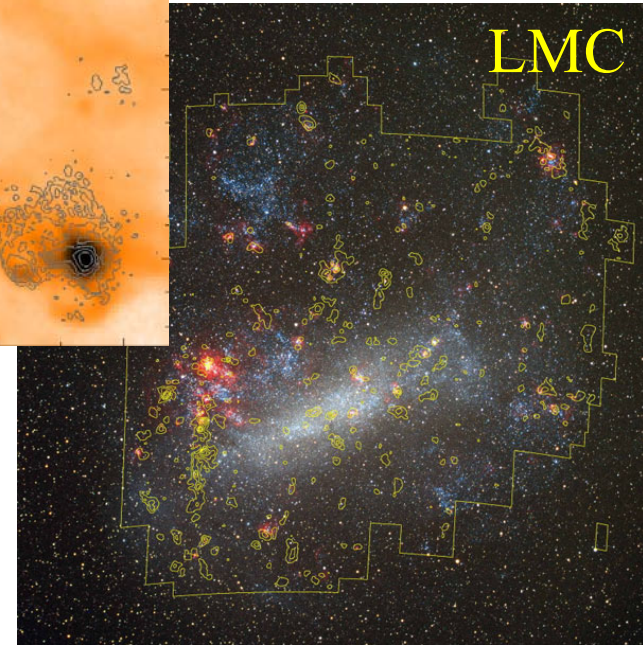
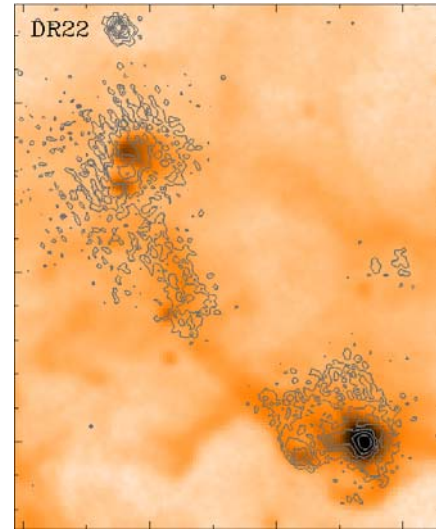
星の最終質量を決める上で極めて重要  
これからの課題



# Toward ALMA



大質量星なしコア



- 分解能:  $0.1-0.01$  arcsec  $\rightarrow$   $0.02$  pc 以下 @ マゼラン雲 ( $0.1Z_{\odot}$ )
- 大質量星なしコアの内部構造:  
超音速乱流コア  $\Rightarrow$  大降着率 説の検証
- 金属量などの環境の効果 も調べることができる

# Summary

## 1. 大質量星形成の問題点と現状

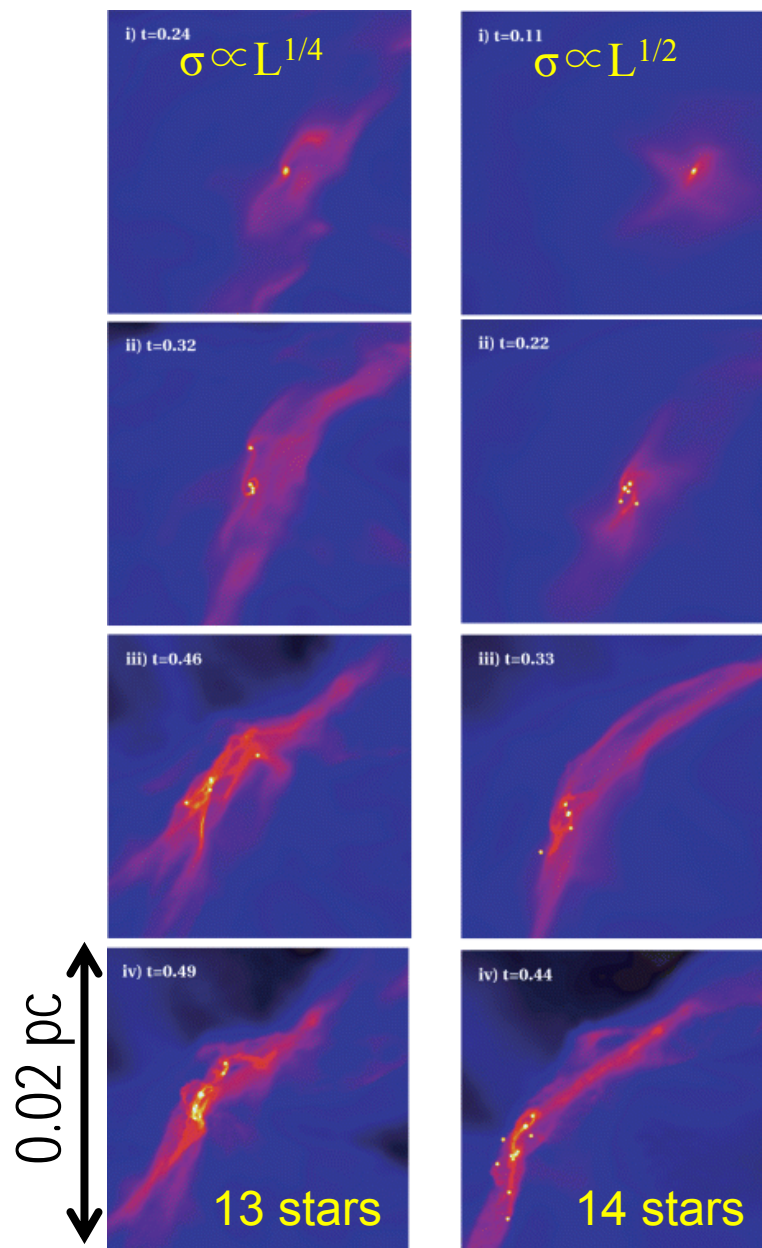
- \* 輻射圧障壁問題： いかにして突破するか長年の問題  
standardな降着率では足りない
- \* しかし、そもそも大質量星形成は低質量星の形成過程とは違う。  
観測 ⇒ 異なる 初期条件(乱流卓越)、降着率(大)
- \* これら観測事実を結びつけるシナリオとして、超音速乱流コアを初期条件とする大降着率説が提唱された。

## 2. 今後の展望

- \* 原始星進化：降着率が大きいとやはり異なる。  
非常に大半径 ( $100R_{\odot}$ ) ⇒ 輻射温度 低
- \* 最大質量問題：無限に重い星ができていけない ( $\leq 150 M_{\odot}$ )  
原始星進化の重要性 ← 準Eddington限界
- \* 始原星形成との関係とALMA： to be studied

# Supplement Pages

# Massive Turbulent Core : Fragmentation?



Turbulent massive coreで本当に  
大降着率の大質量形成が起こるか？

Dobbs, Bonnell & Clarke '05

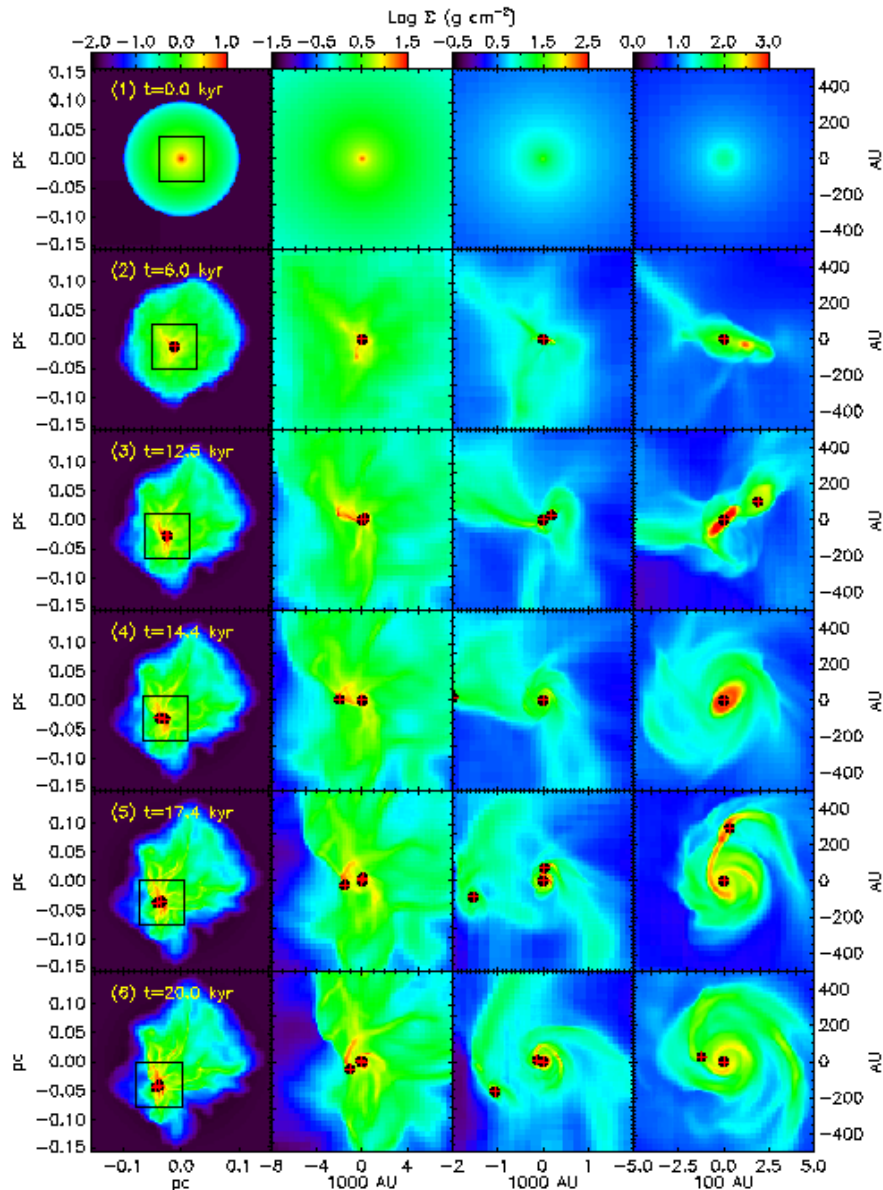
- 3-D SPH simulation
- barotropic E.O.S
- sink particle

Supersonic turbulence  
⇒ shock dissipation で分裂  
⇒ むしろ星団

個々のprotostarの降着率： $10^{-5}M_{\odot}/\text{yr}$ 程度



# 3-D RHD simulation



Krumholz, Klein & McKee, '07

3-D RHD + sink particle (mesh法)

原始星からのfeedback(輻射)込み

Not barotropic approx.

原始星からの輻射で温度↑

→ Jeans mass↑

分裂は抑えられる。

大降着率OK  $\sim 10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$

TABLE 2  
STATISTICS OF STARS FORMED

Run	$N_{20}$	$N_{\text{formed}}$	$N_{\text{merge}}$	$M_1 (M_{\odot})$	$M_{\text{other}} (M_{\odot})$	$f_{\text{merge}}$
100A	3	6	0	5.4	0.54	0.04
100B	4	7	3	8.9	0.31	0.12
200A	4	6	2	8.6	0.54	0.06
100ISO	7	23	6	7.4	1.5	0.31

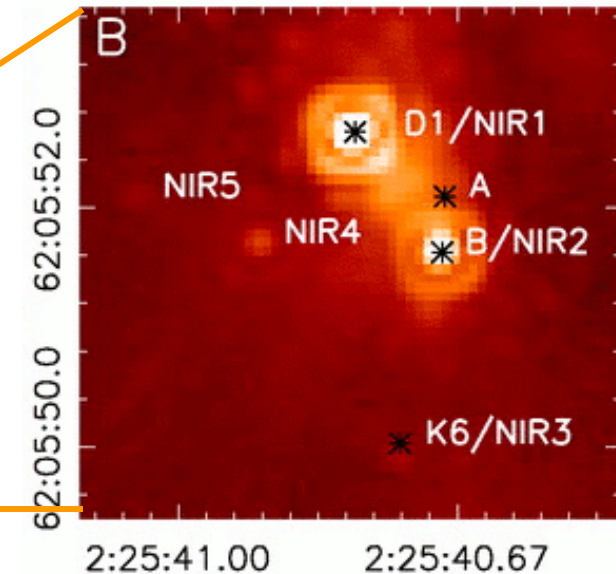
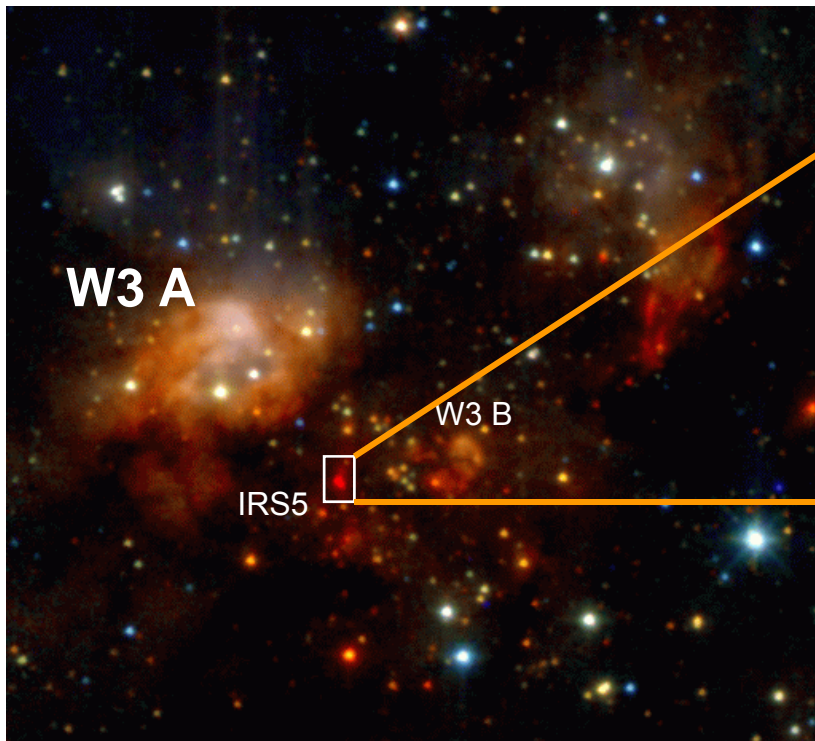
NOTE. Col. (2): Number of stars present at 20 kyr. Col. (3): Total number of stars formed over the 20 kyr evolution, including those that have merged. Col. (4): Number of significant merger events. Col. (5): Mass of primary star to 20 kyr. Col. (6): Total mass of all stars but the primary at 20 kyr. Col. (7): Fraction of primary's mass acquired by mergers.

# 合体説は？

合体が効くために必要な星密度：  $10^8 \text{ stars/pc}^3$  (Bonnell et al. '98)

Galactic Densest Cluster : W3 IRAS5 (embedded)

NIR image in W3 region

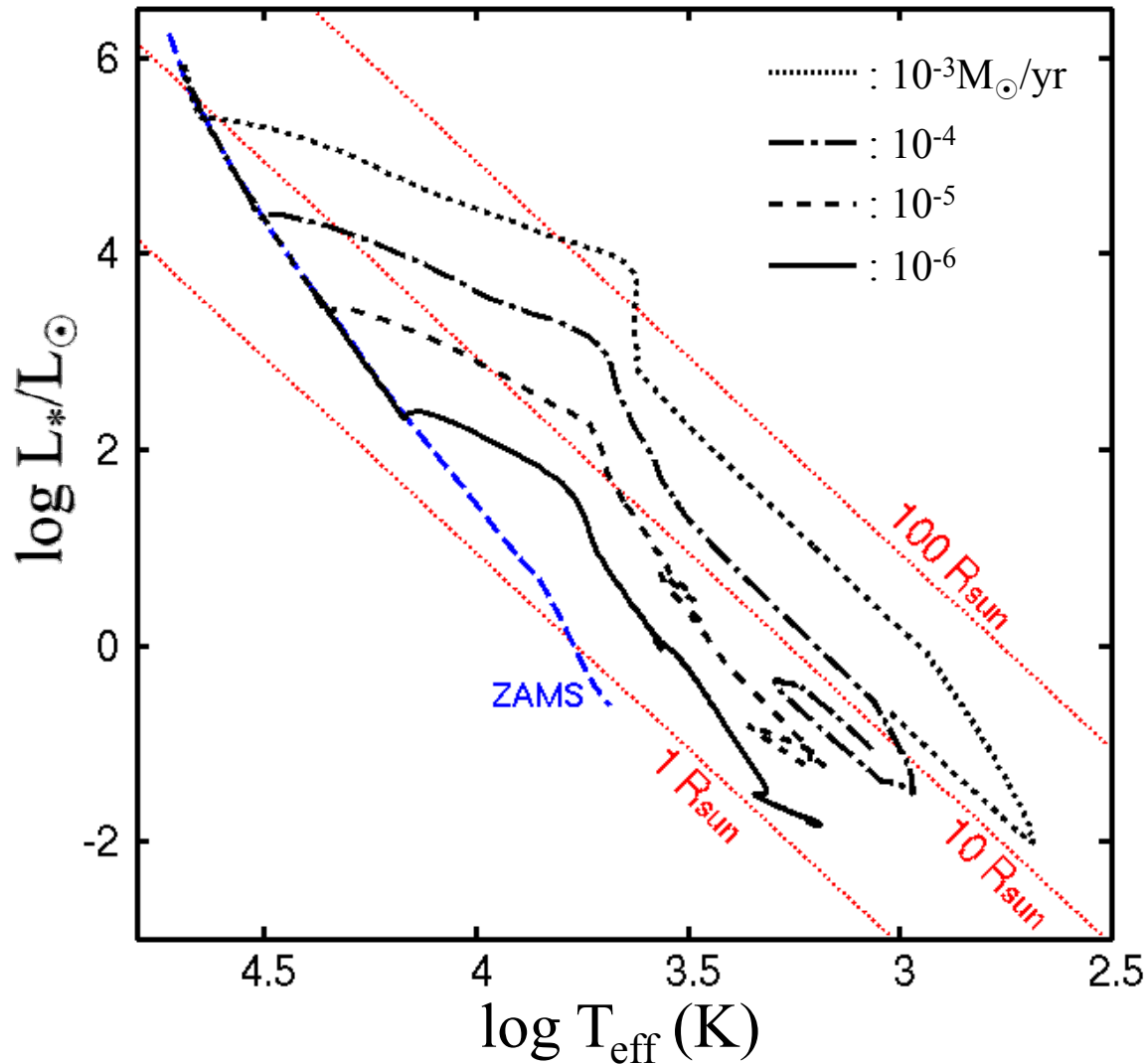


Megeath et al. '05; imaging by HST

$10^6 \text{ stars/pc}^3$

ガスがあるともっと低い星密度でも効く？ (Stahler et al. '00)

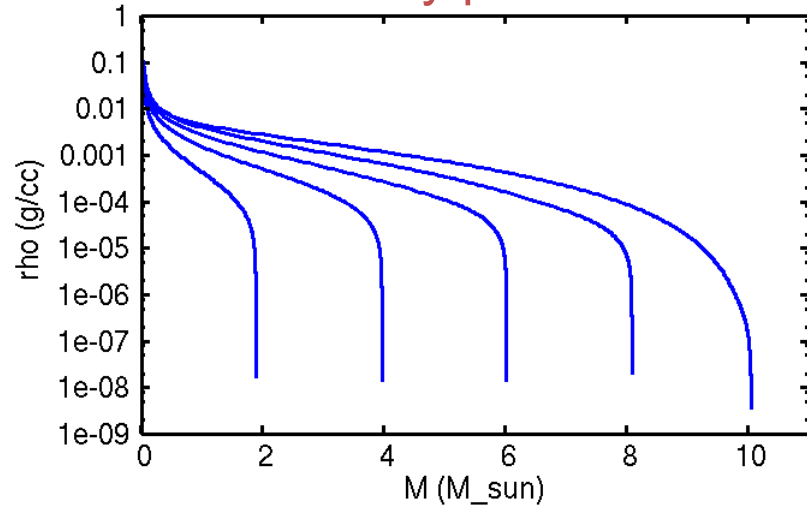
# Evolution track in H-R diagram



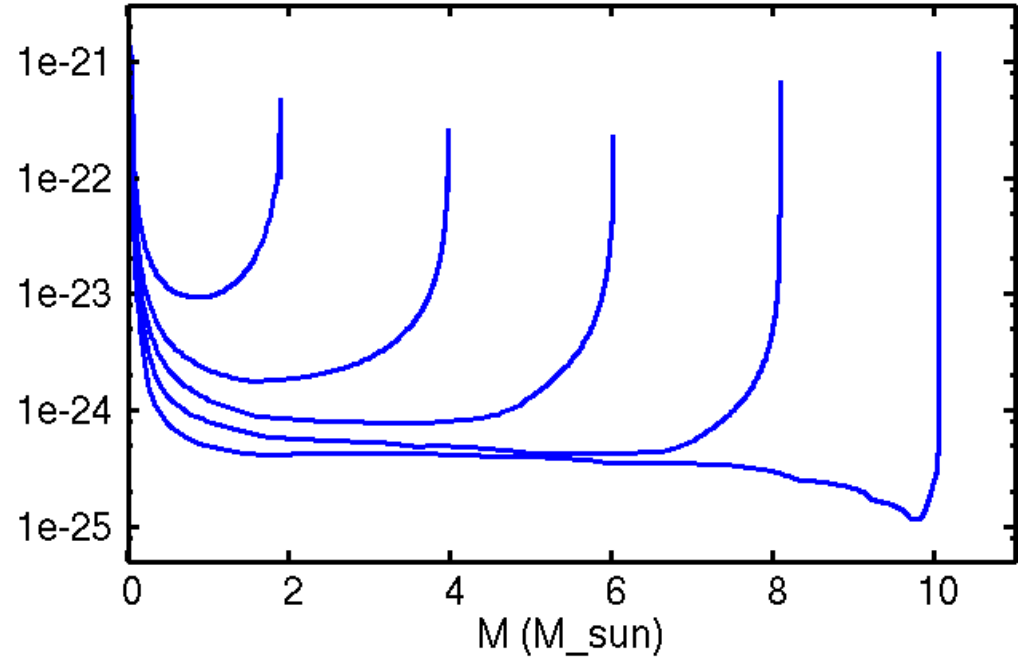
大降着率では主系列のより上部を通り、大質量で主系列に至る

# Opacity decrease

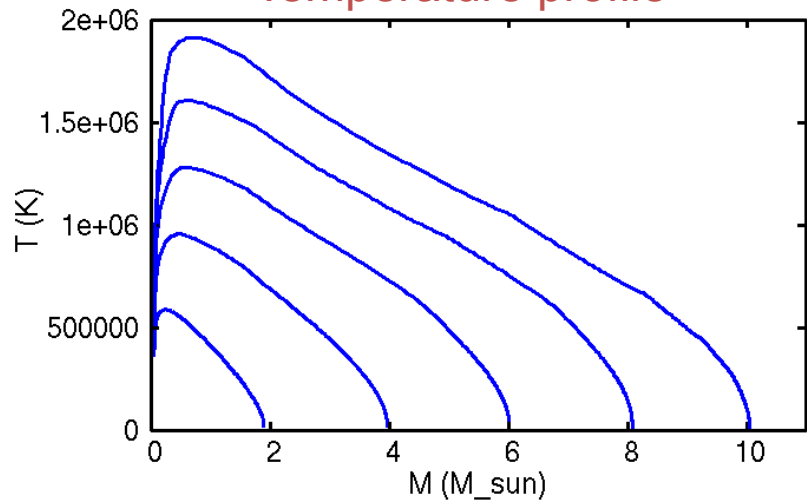
Density profile



Profile of  $\rho T^{-3.5}$



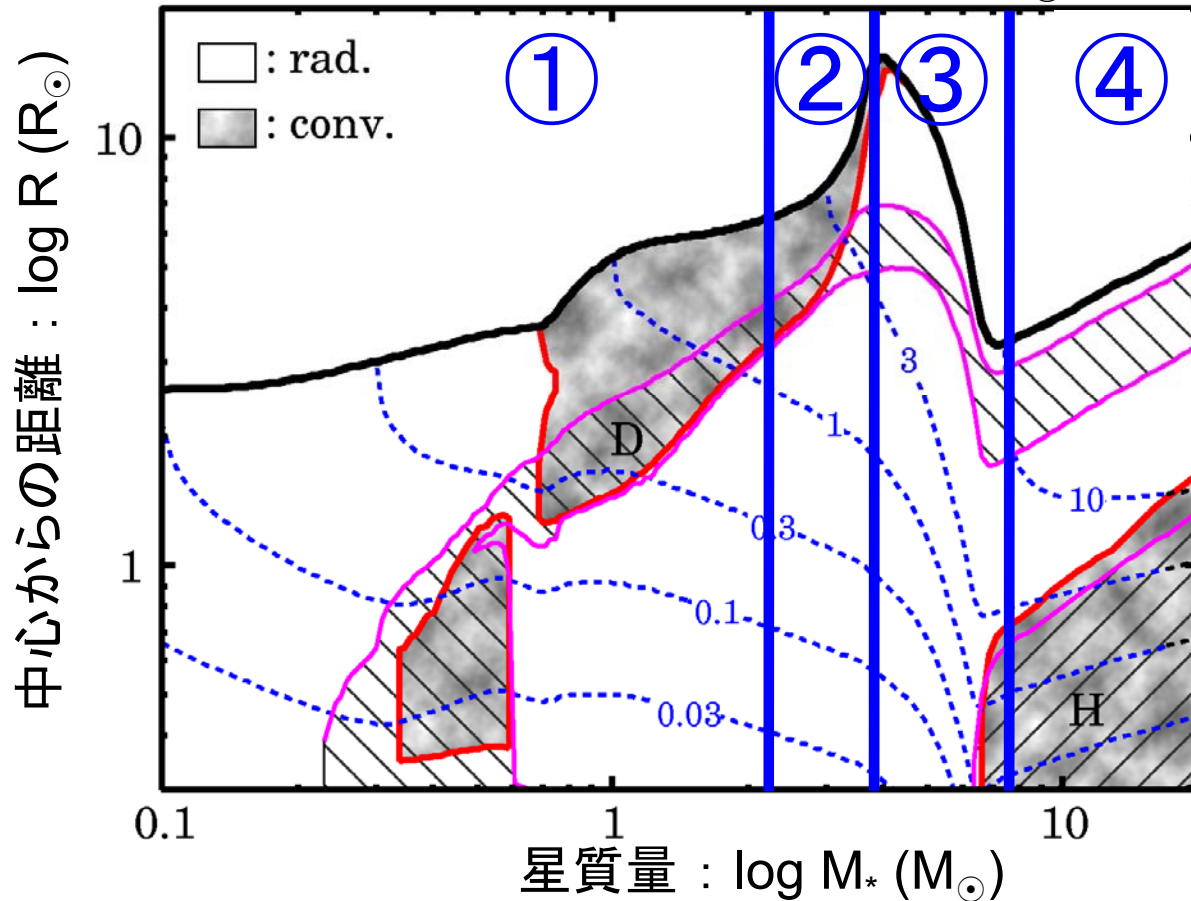
Temperature profile



主に星質量が増えた時の星内部の温度上昇により、opacityは減少する。

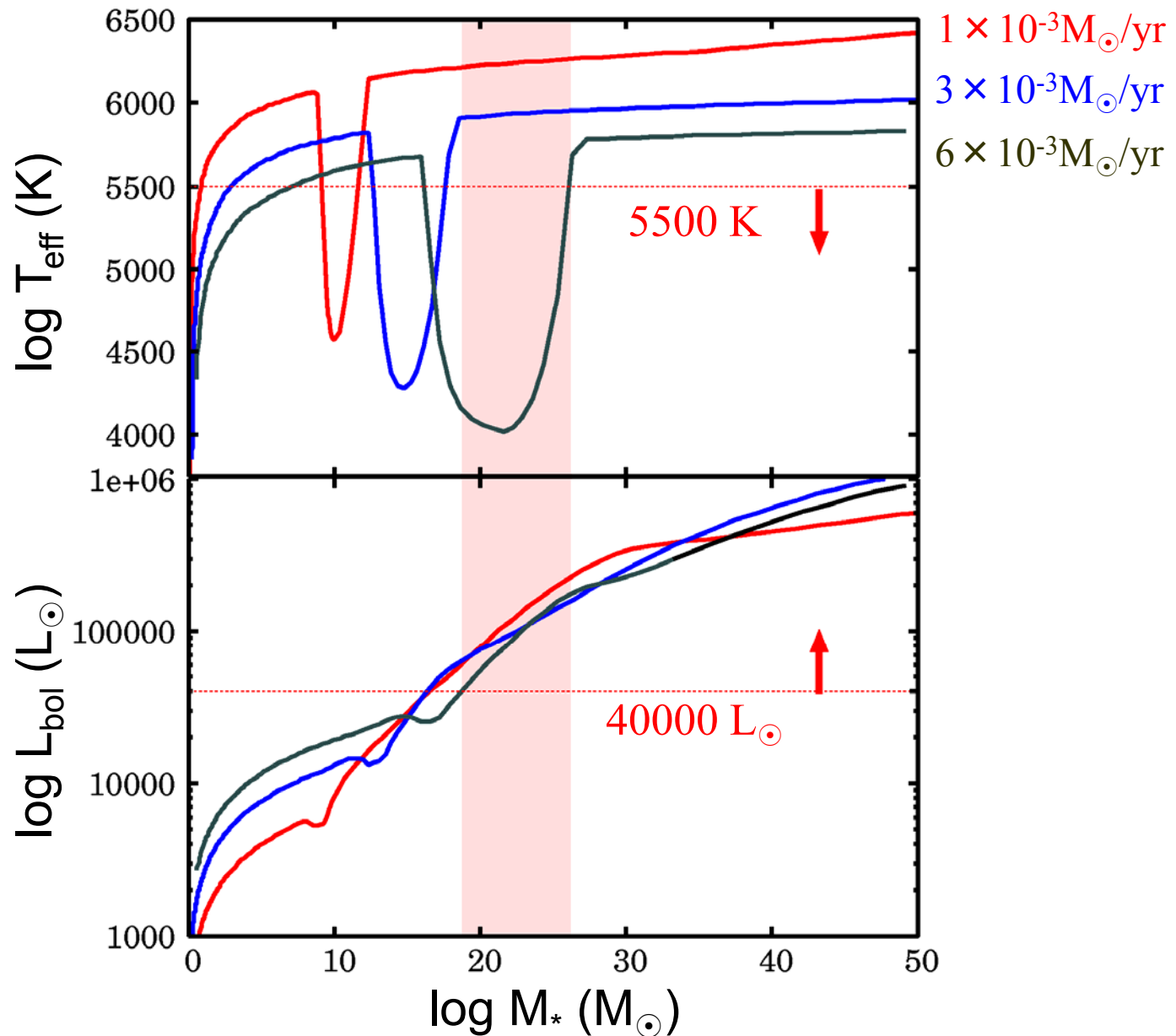
# 低降着率下での原始星進化

内部構造 :  $\dot{M} = 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$



① はじめゆっくり膨張 ⇒ ② 急激に膨張  
⇒ ③ 収縮 ⇒ ④ 水素燃焼 (主系列)

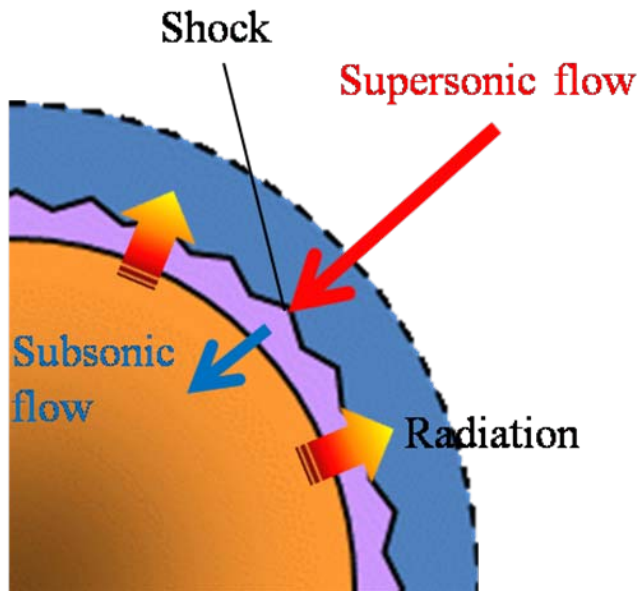
# Sign of high $\dot{M}$ ? ③





# Difference of outer boundary

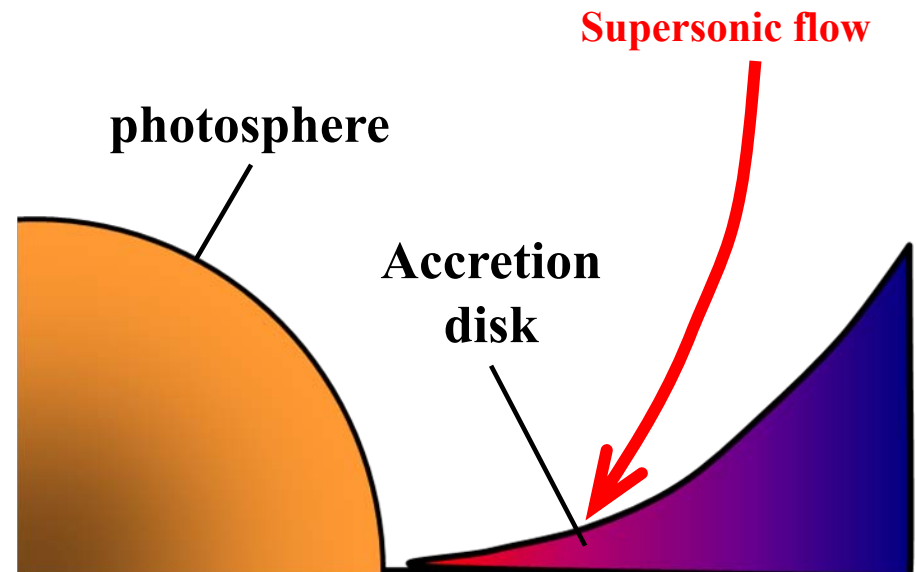
## Shock boundary condition



Accretion flow structure is solved, and connected with the protostar by the shock jump condition

**High influx of entropy**

## Photospheric boundary condition



Gas softly accretes to the protostar through the disk. Flow structure is not solved, but ordinary photospheric boundary is adopted.

**Low influx of entropy**

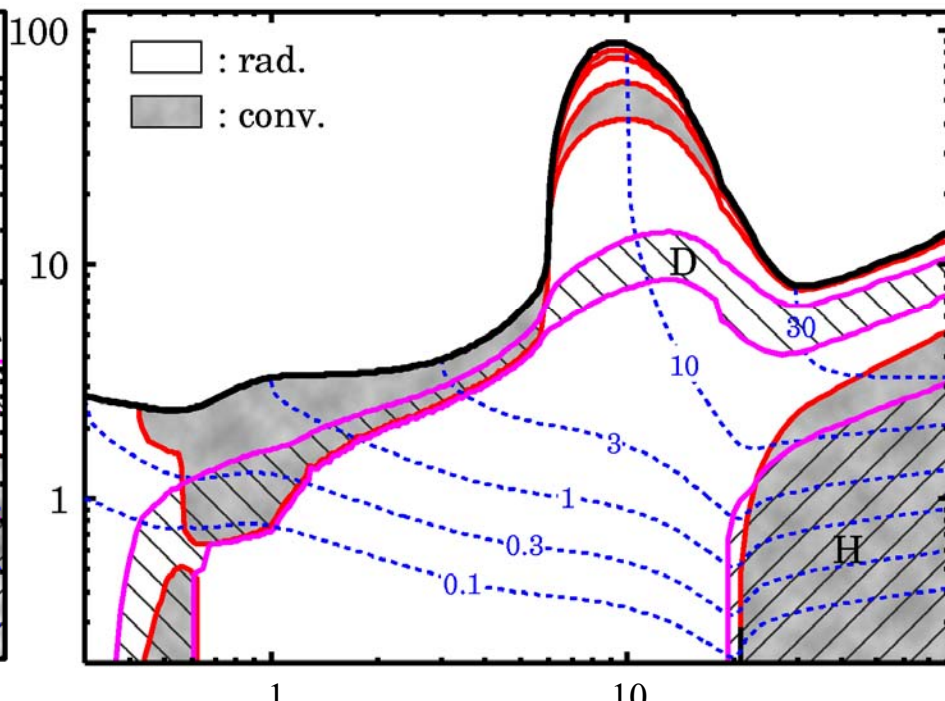
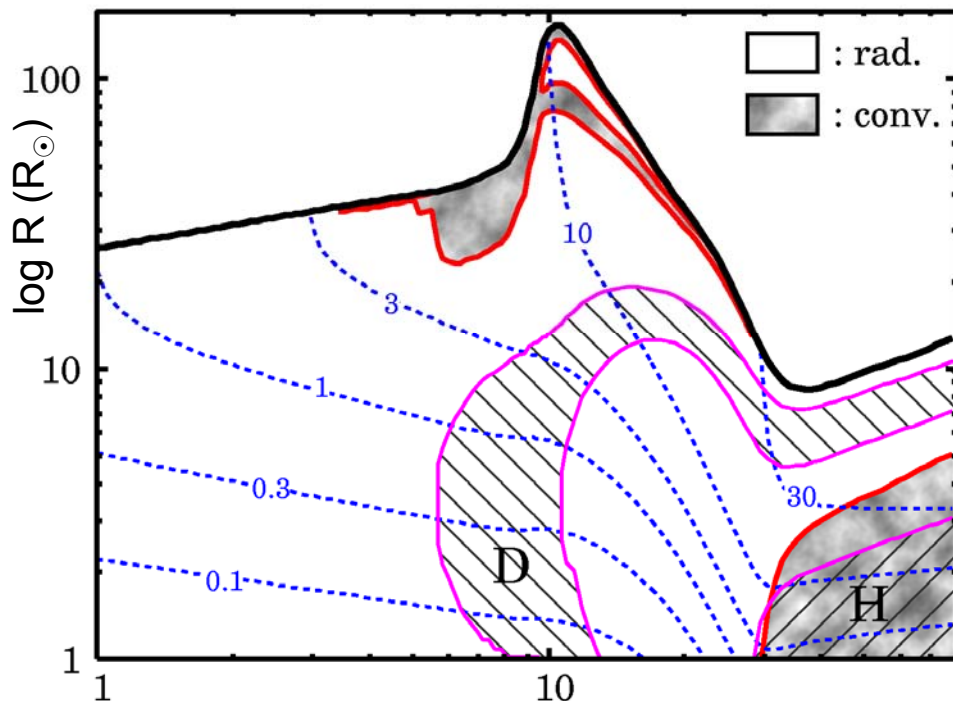
# Effect of different boundaries

inner structure

$$\dot{M} = 10^{-3} M_{\odot} / \text{yr}$$

[Shock boundary]

[Photo boundary]



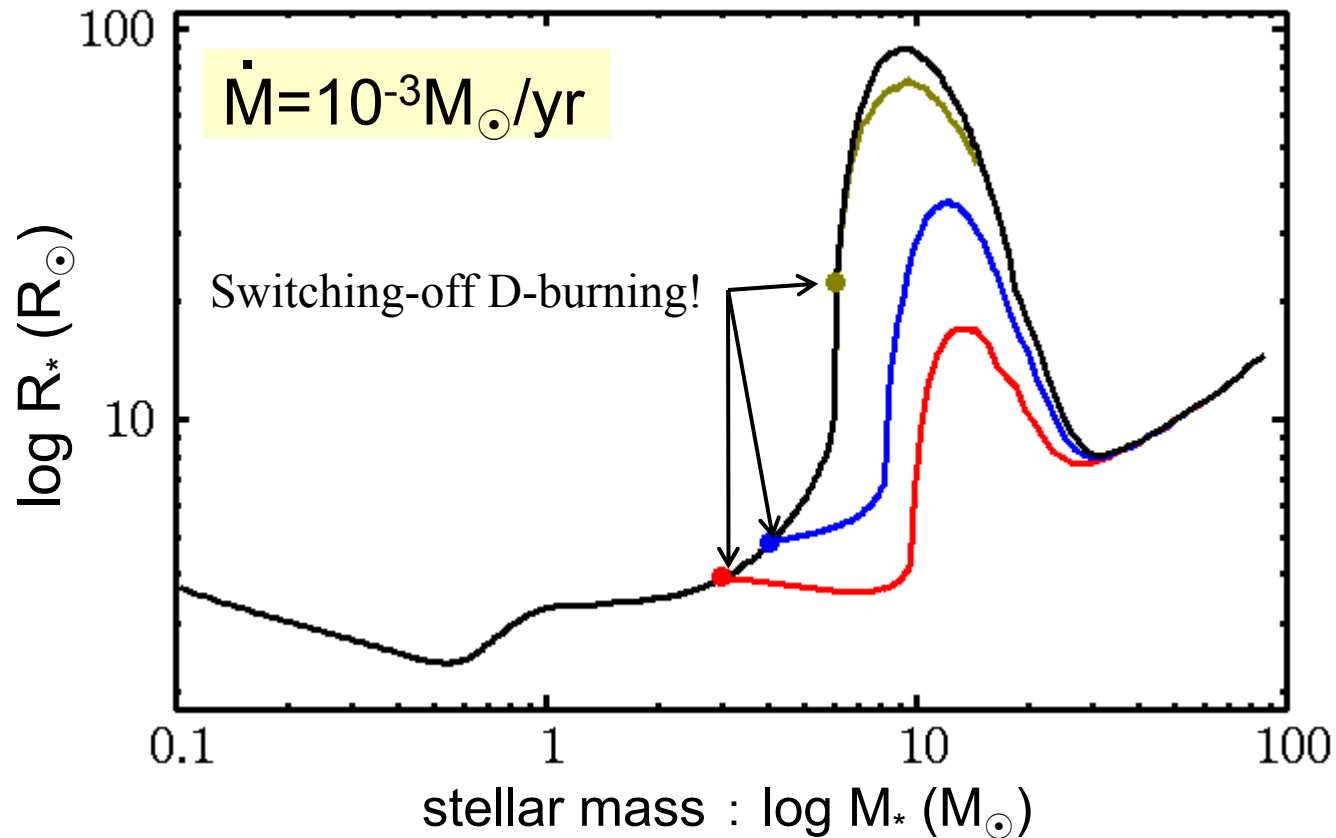
stellar mass :  $\log M_{*} (M_{\odot})$

$\log M_{*} (M_{\odot})$

- Early evolution ( $< 10 M_{\odot}$ ) is different, **but similar at  $M > 10 M_{\odot}$** ;
- maximum stellar radius of  $\sim 100 R_{\odot}$
  - arrival to the ZAMS at  $\sim 30 M_{\odot}$

# D-burning with photo b.d.

## Mass-radius relation



D-burning as well as propagation of the luminosity wave contribute to swelling of the protostar.