

2013/03/08@茨城大学
様々な変光現象とその観測的アプローチ

大質量星形成における輻射フィードバック

田中 圭 (京大→東北大)

中本泰史(東工大), 大向一行(京大→東北大)

細川さん, 稲吉くん, 杉山さん, 元木さん, J.C.Tan (U-Florida)

100Msunの主系列星

$L \sim 10^6 L_{\text{sun}}$, $T \sim 5 \times 10^4 \text{K}$

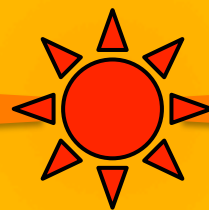
発表の流れ

1. 輻射圧問題

2. 内側の円盤構造

3. 変動との関係?

4. その他のフィードバック



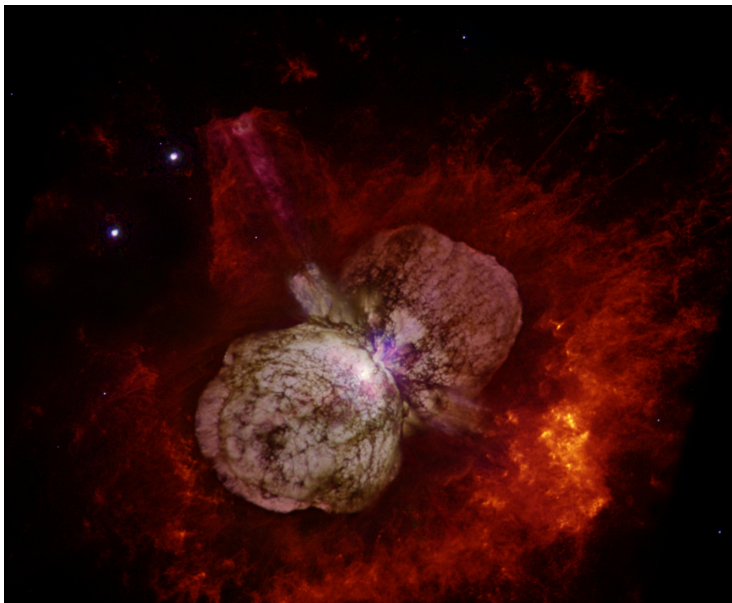
大質量星

>8Msunの恒星 (観測的には >100Msunも)

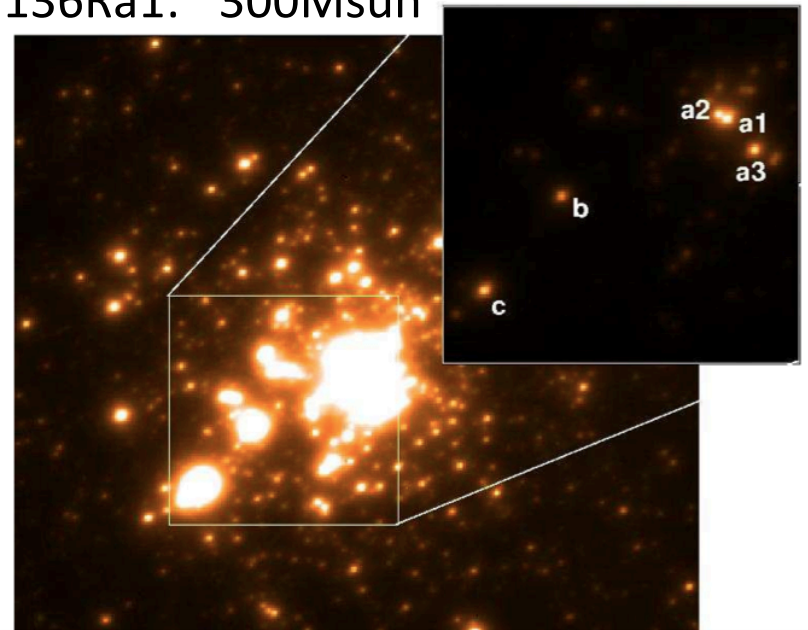
強力なFeedback (輻射, 元素合成, 超新星爆発 etc.)

宇宙の物理・化学進化に大きな影響を与える重要な天体

Eta Carinae: 100-150Msun



136Ra1: ~300Msun



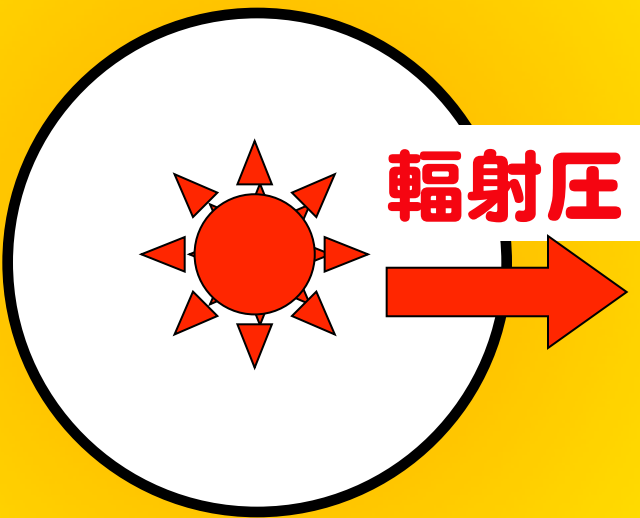
その形成条件やプロセスは未だに解明されていない…
個数が少ない、形成時間短い、エンベロープに埋もれてる…

大質量星形成

強力な輻射圧が質量降着を跳ね返す！

～ $20M_{\text{sun}}$ で輻射圧が勝つ！

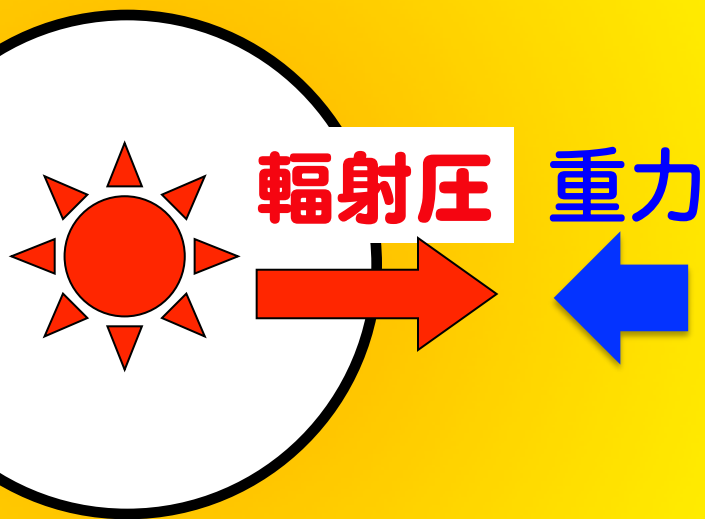
観測では $150-300M_{\text{sun}}$ も！！



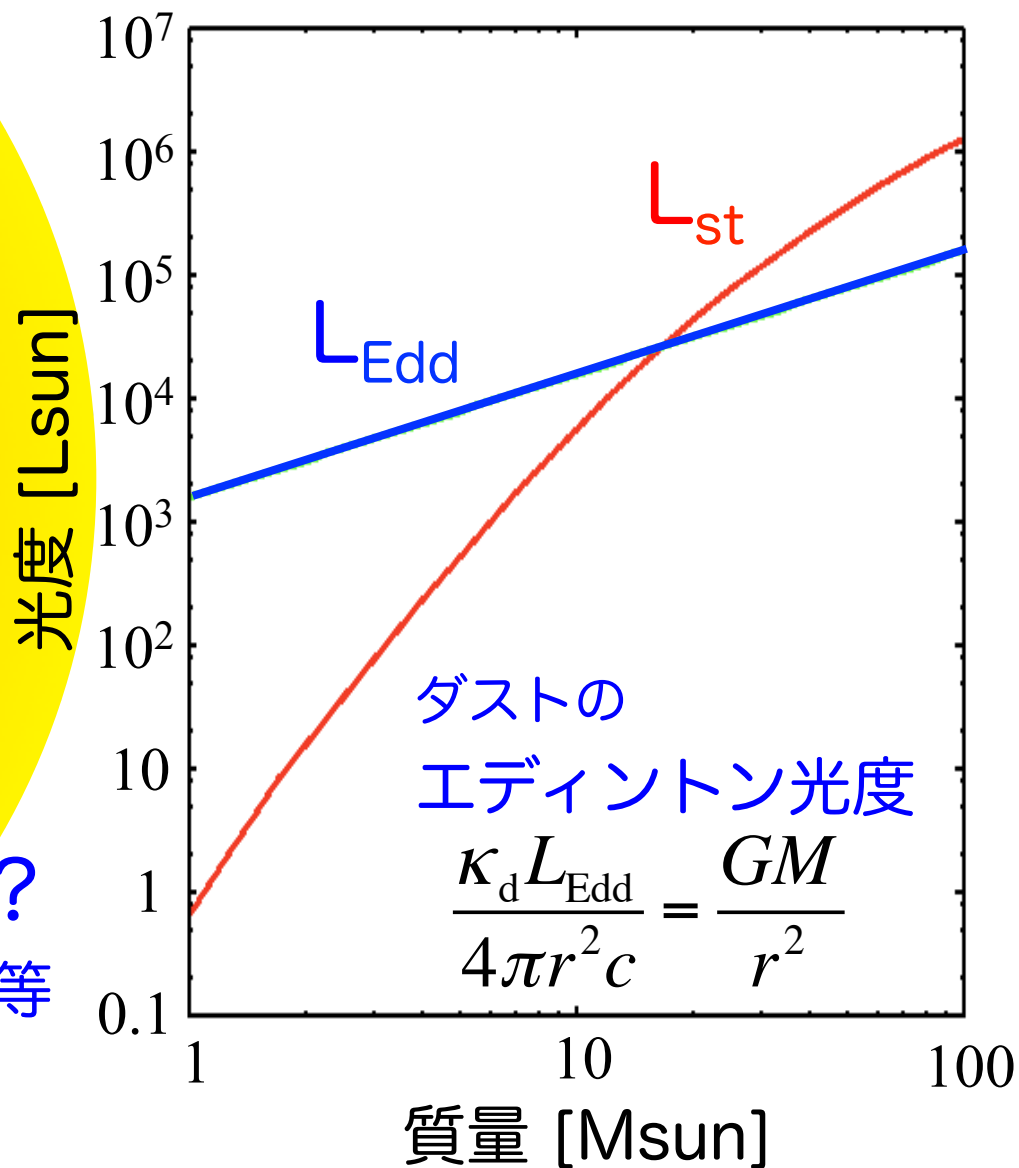
輻射圧問題！！

Kahn74, Wolfire&Cassinelli87 等

ダスト放射による輻射圧！

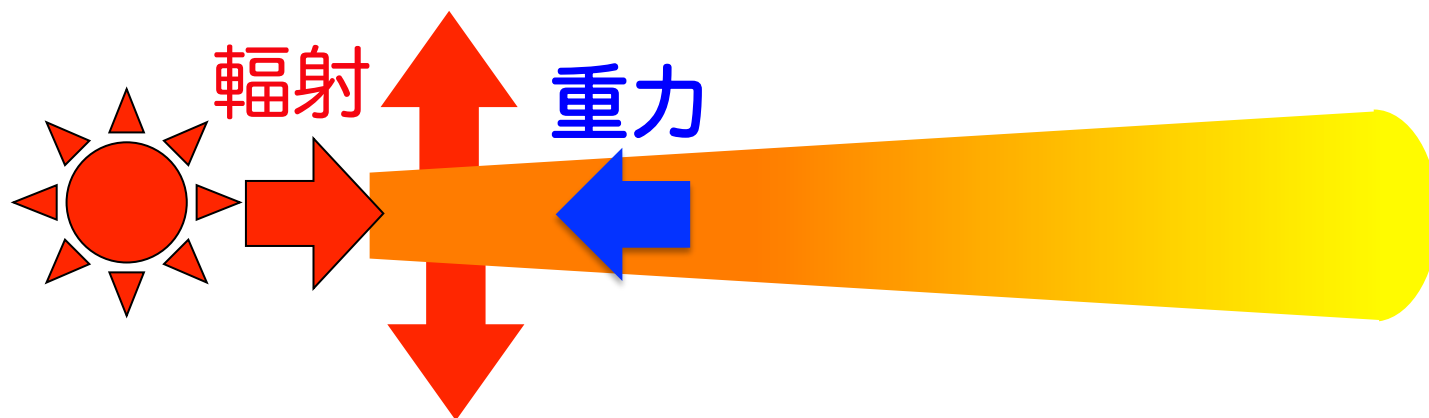


大質量星は合体で形成？
Bonnell+98等



円盤降着で輻射圧回避！！

円盤は星形成の過程で自然にできるはず



“Flash-light effect”

円盤降着でダスト放射輻射圧は克服できる！

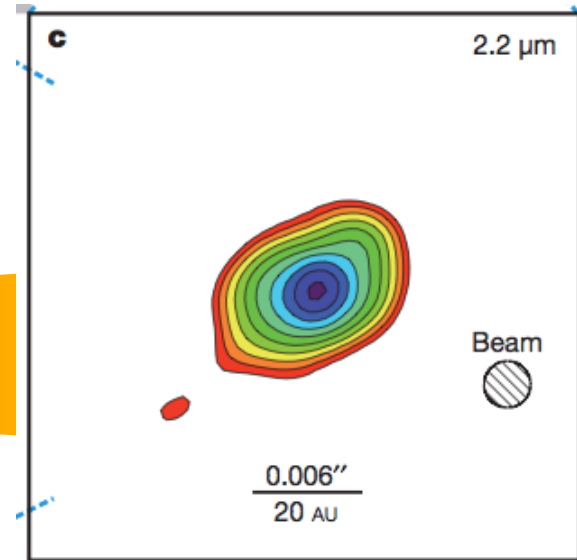
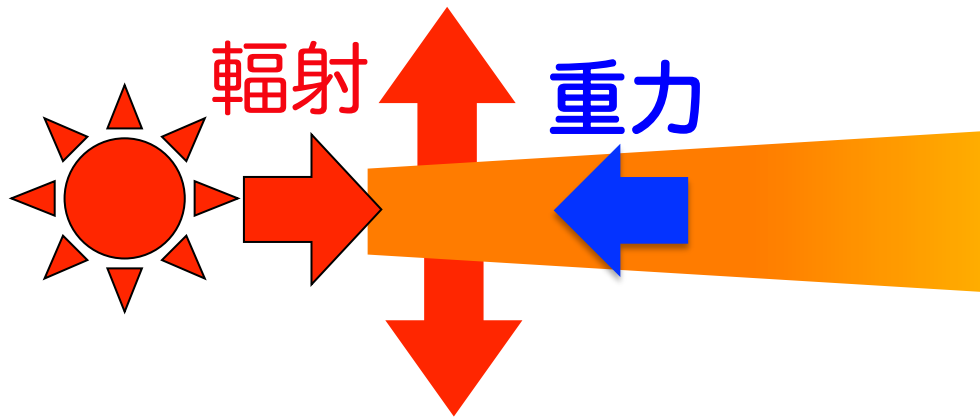
理論：Nakano85, Jijina&Adams96,

2D計算：Yorke&Sonnhalter02, Kuiper+10

3D計算：Krumholz+09, Kuiper+11

円盤降着で輻射圧回避！！

Kraus+10

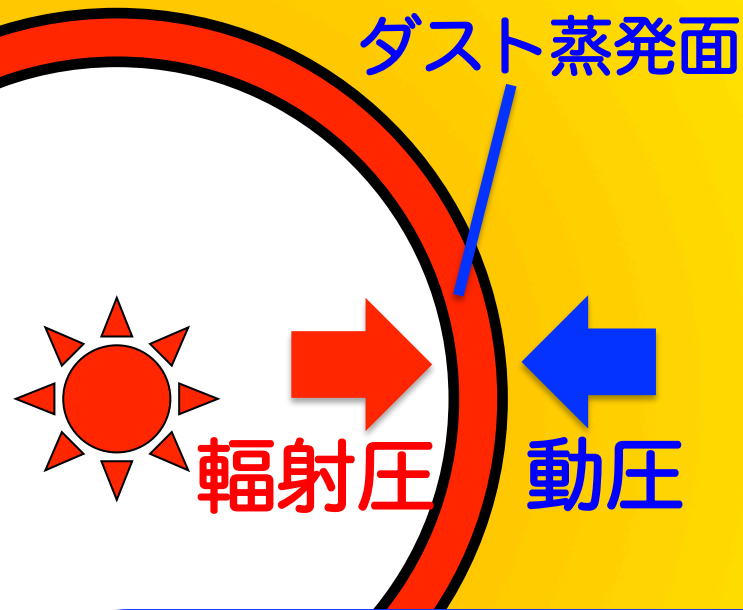


“Flash-light effect”

円盤降着でダスト放射輻射圧は克服できる！

ダスト蒸発面には直接星の光が当たってる…

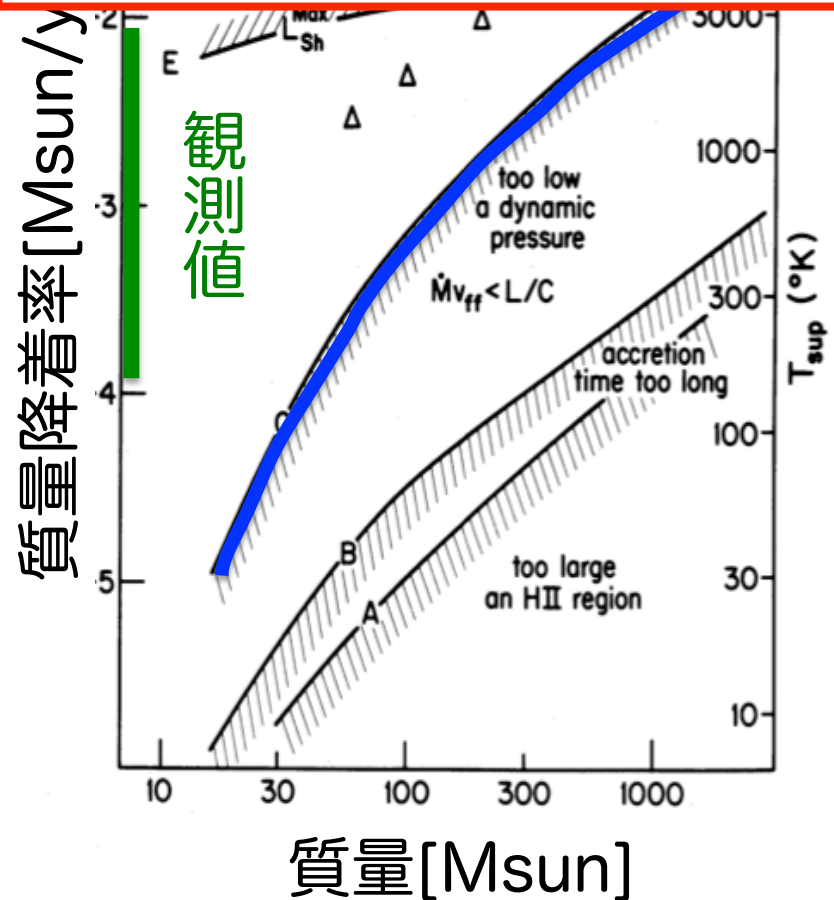
中心星輻射による輻射圧！



球降着を仮定した条件
円盤降着では？

Wolfire&Cassinelli 1987
球対称降着での動圧条件

$$\frac{L}{4\pi r^2 c} < \frac{\dot{M}}{4\pi r^2} u_{ff}$$



ダスト蒸発面より内側の円盤

dust-free円盤 ~10AU



これまでのシミュレーションでは解像できていない
また、円盤構造を理論的に調べておくことは重要

dust-free円盤の構造を調べ

ダスト蒸発面の輻射圧問題を再考察した

(KT&Nakamoto10,11)

発表の流れ

1. 輻射圧問題

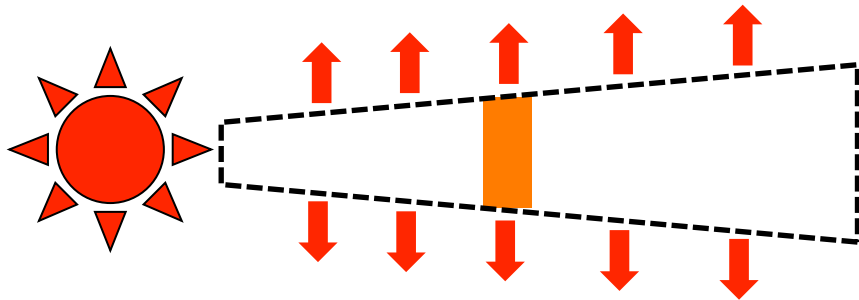
2. 内側の円盤構造

3. 変動との関係？



計算モデル

計算モデル



仮定はいろいろ

- 光学的に厚い!
- 幾何学的に薄い
- ケプラー回転
- 局所熱平衡
- 定常降着
- 中心星輻射無視
など

基礎方程式

定常降着

$$v\Sigma = \frac{\dot{M}}{3\pi} \left(1 - \sqrt{\frac{r_*}{r}} \right)$$

α 粘性

$$v = \alpha c_e H$$

静水圧平衡

$$H = \frac{c_e}{\Omega_K} \quad c_e^2 = \frac{1}{\rho} \left(\frac{k_B T \rho}{\mu m_H} + \frac{4\sigma T_m^4}{3c} \right)$$

粘性加熱 + エネルギー輸送

$$\sigma T_m^4 = \frac{3GM_* \dot{M}}{8\pi r^3} \left(1 + \frac{3\kappa_R \Sigma}{8} \right)$$

オパシティ

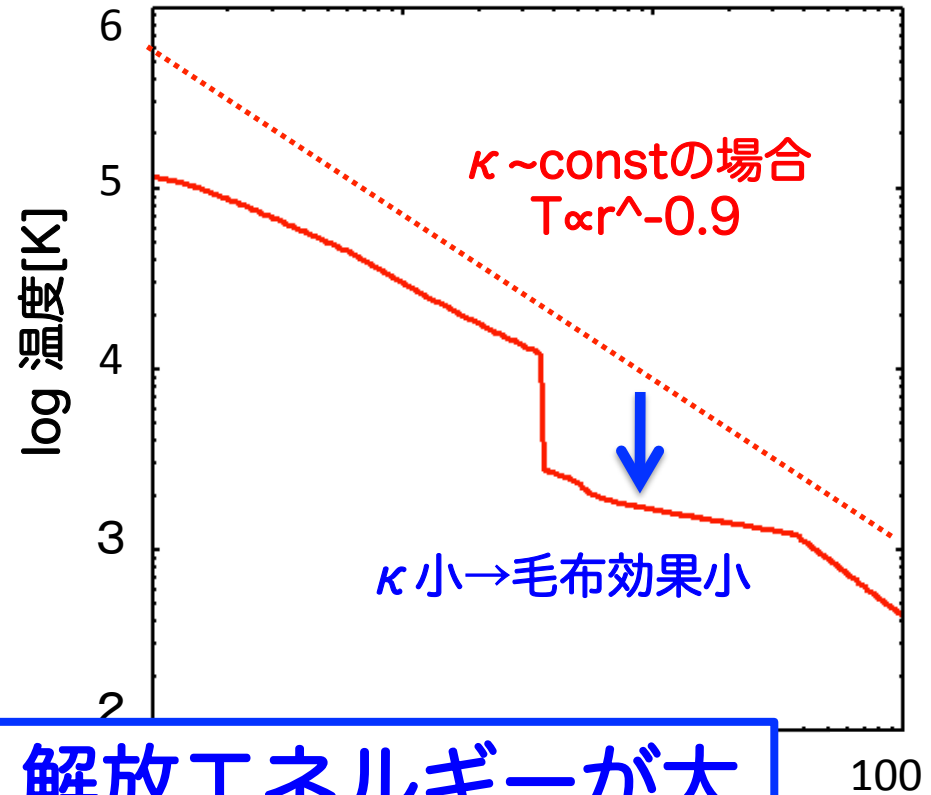
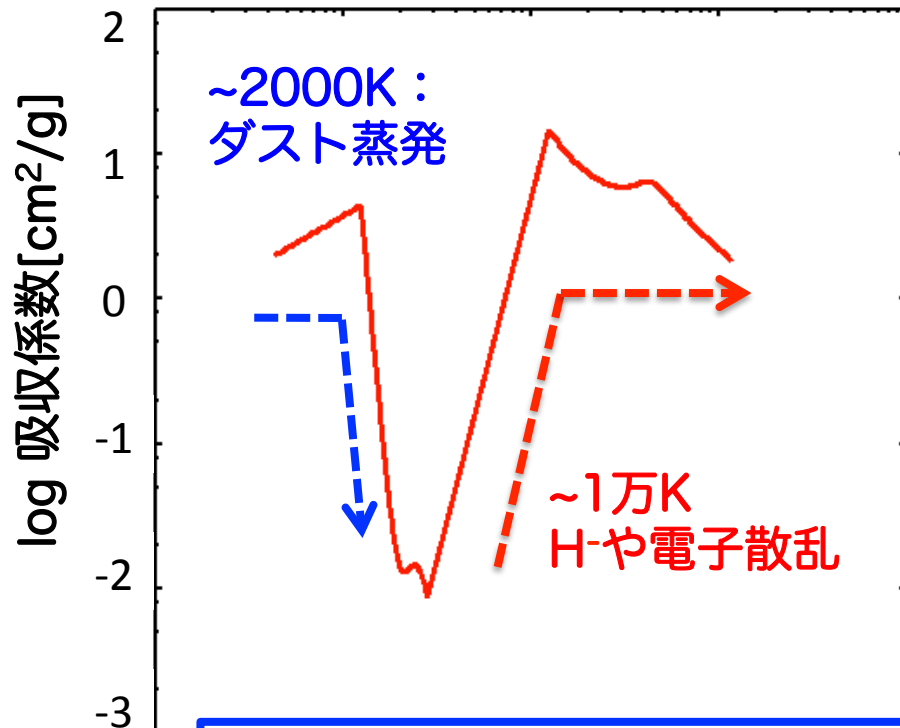
ガス:

OPALとAlexandar&Ferguson(1994)

ダスト: Ruden&Pollack(1991)

計算結果

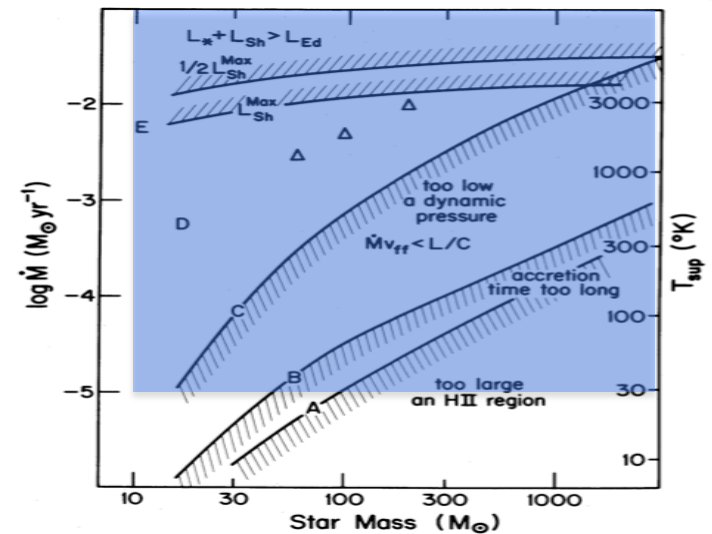
結果: $100M_{\text{sun}}$, $10^{-4}M_{\text{sun}}\text{yr}^{-1}$



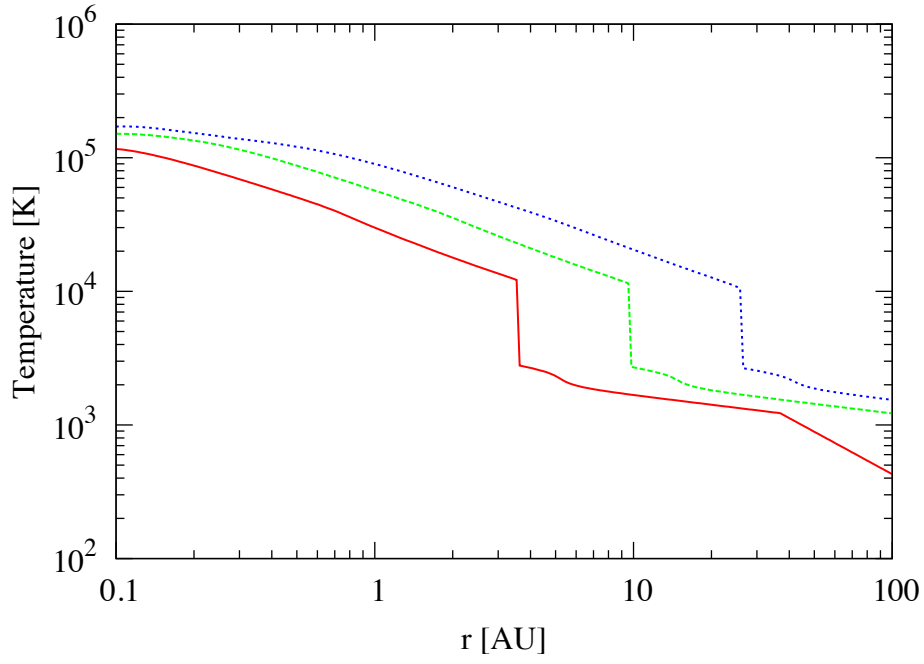
大質量・大降着率 = 解放エネルギーが大
面密度大・オパシティ大 = 毛布効果が大
 \rightarrow 内縁では円盤温度が~10万K!!

広いパラメタ範囲に対して

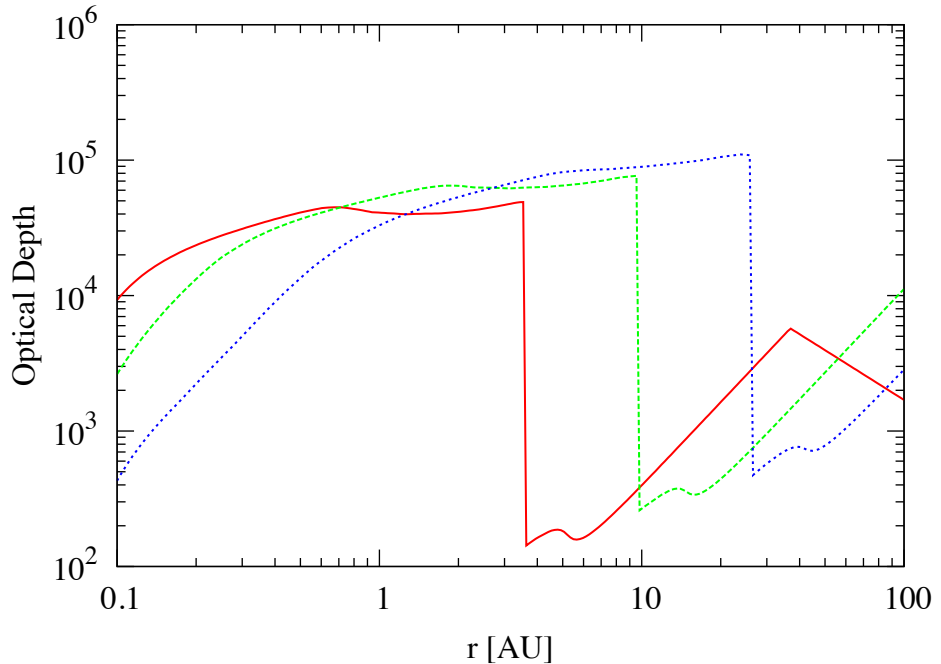
- 内縁付近は電離領域
- 全領域光学的に厚い円盤



円盤温度

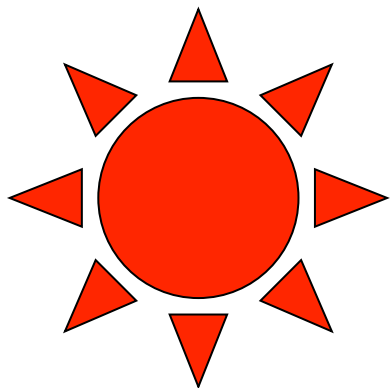


光学的厚さ

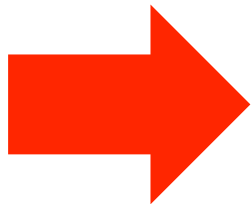


輻射圧問題の 再考察

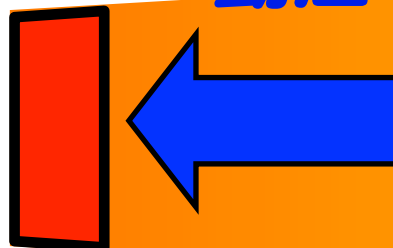
輻射圧問題@ダスト蒸発面



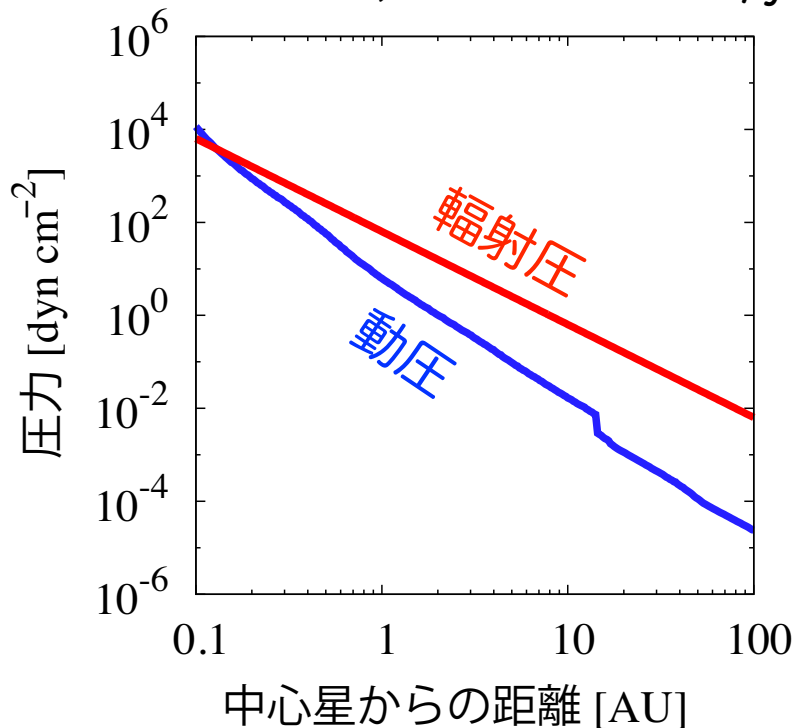
輻射圧



動圧



100Msun, 3×10^{-3} Msun/yr

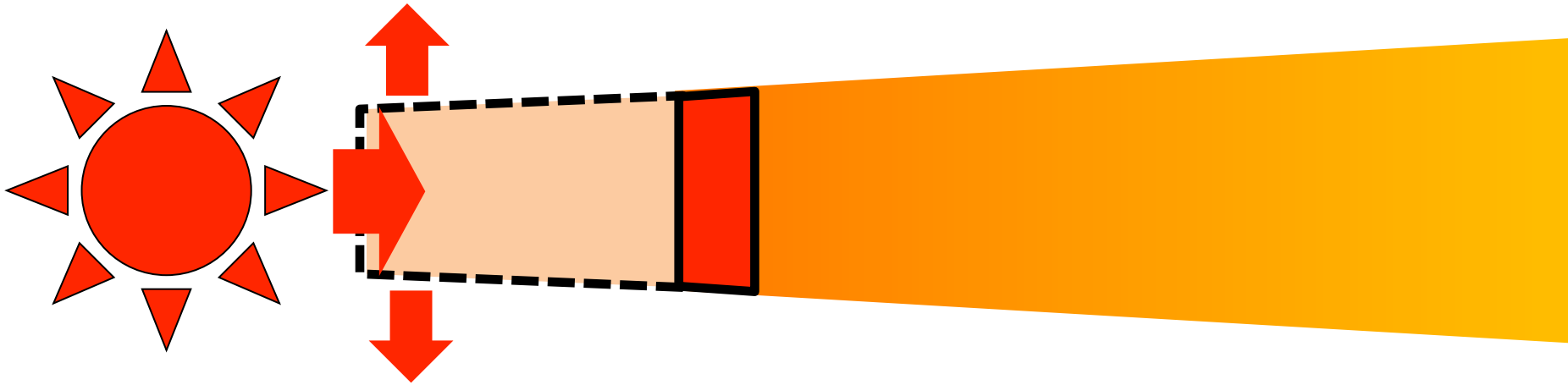


円盤降着では
速度が遅い → 動圧は弱い

$$(\rho u^2)_{\text{disk}} \approx \alpha \frac{H}{r} (\rho u^2)_{\text{spherical}}$$

ダスト蒸発面への直接照射

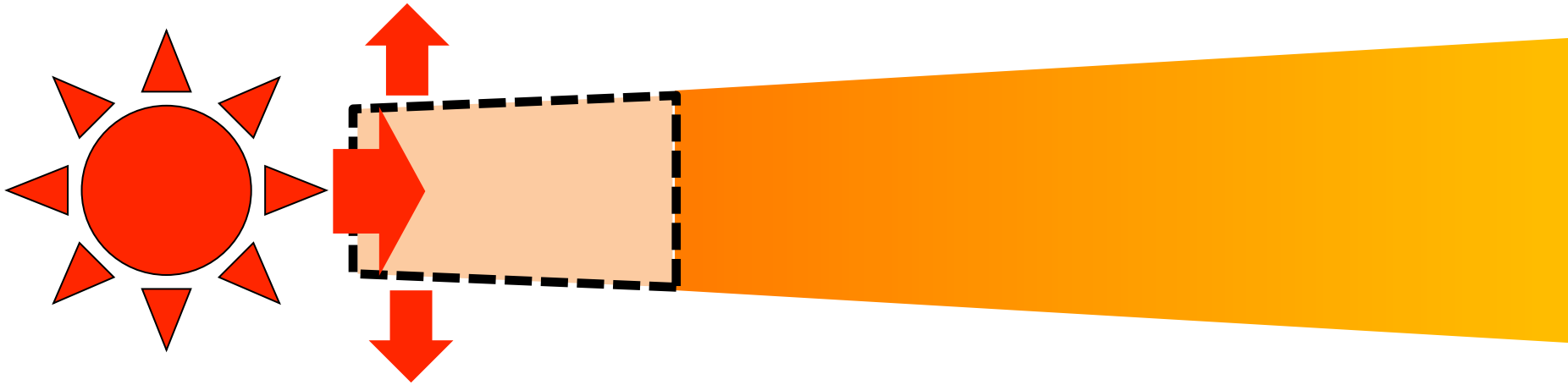
光学的に厚いdust-free円盤



ダスト蒸発面でも輻射圧は問題ない

直接照射の影響は星近傍に…

星近傍での直接照射



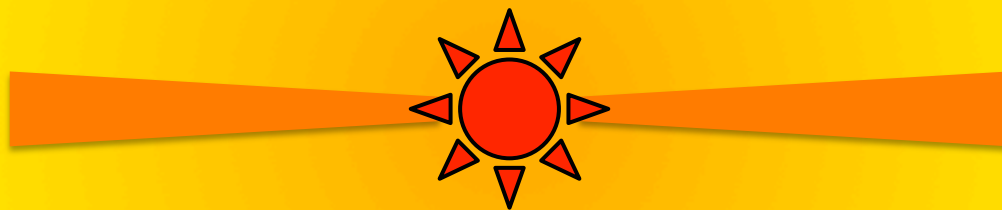
$$\frac{\kappa_{\text{gas}} L}{4\pi r^2 c} \lesssim \frac{GM}{r^2}$$

ガスのオパシティは
ダストのオパシティよりも小さい！！
ほぼ重力優勢領域になる！！

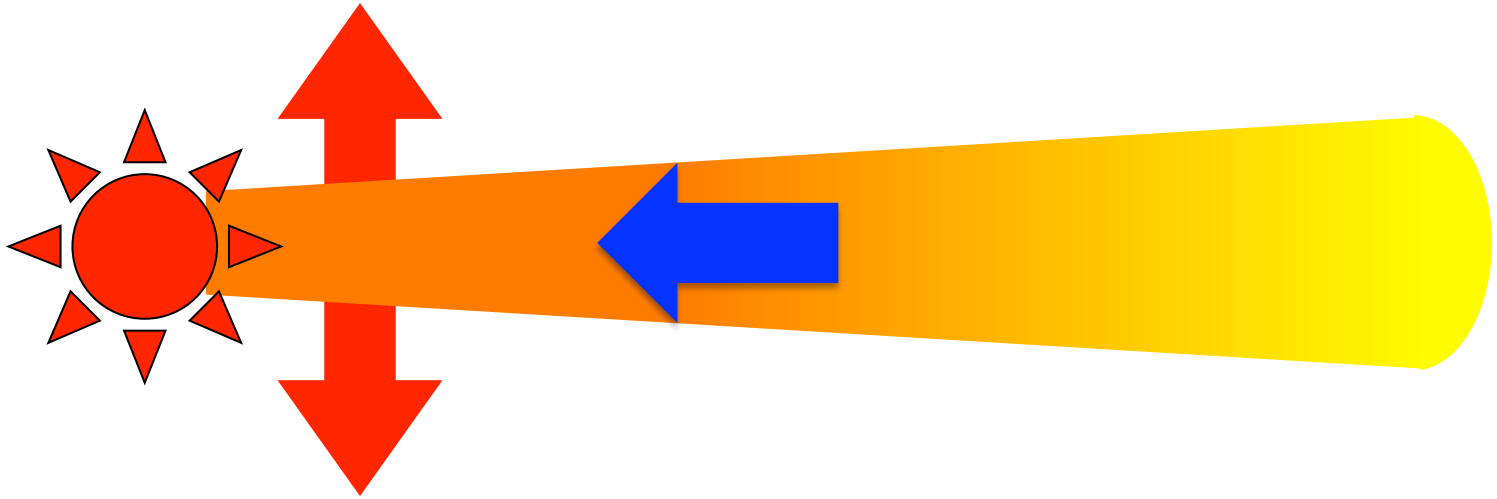
輻射圧問題は円盤降着で解決！

発表の流れ

1. 輻射圧問題
2. 内側の円盤構造
3. 変動との関係?



観測的検証は可能なのか??



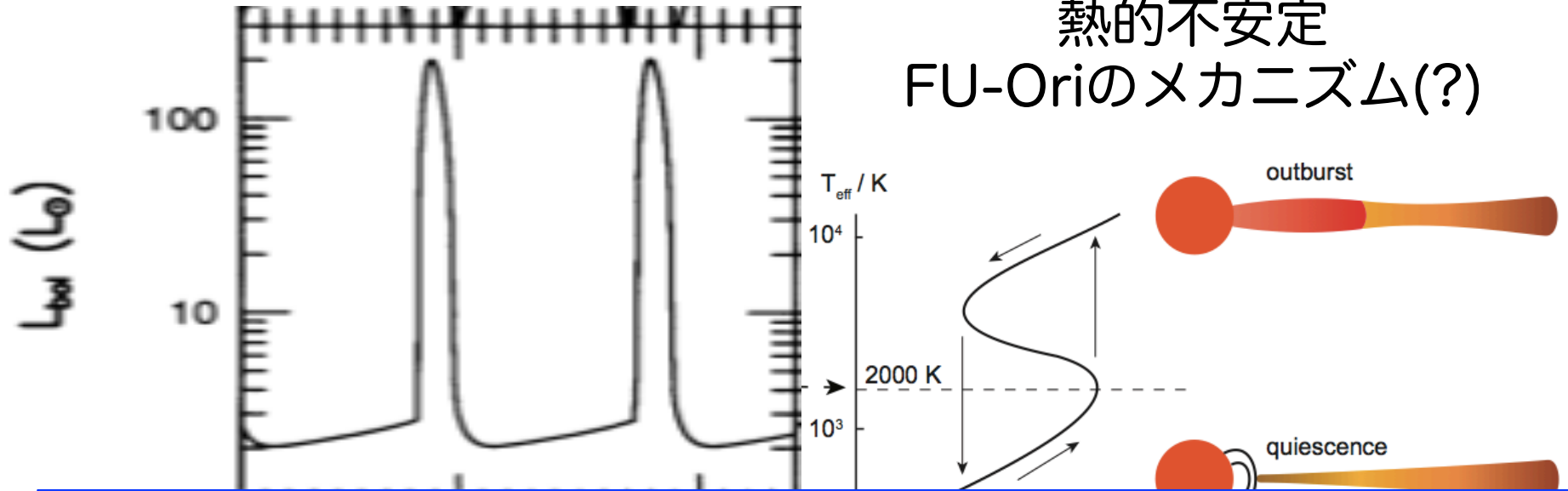
Flash-light effect : 円盤降着でダスト放射輻射圧は克服!

観測的には何か証拠は?

~1AUスケールの減少なので空間解像できない
時間変動ならあるいは...

降着率の周期変動???

Bell&Lin94



熱的不安定
FU-Oriのメカニズム(?)

メーザー100日変動の起源?? (杉山さんトーク)
変動のタイムスケールが全然合わない >> 1yr (;_;)
でも脈動なら♪ 稲吉くんトーク

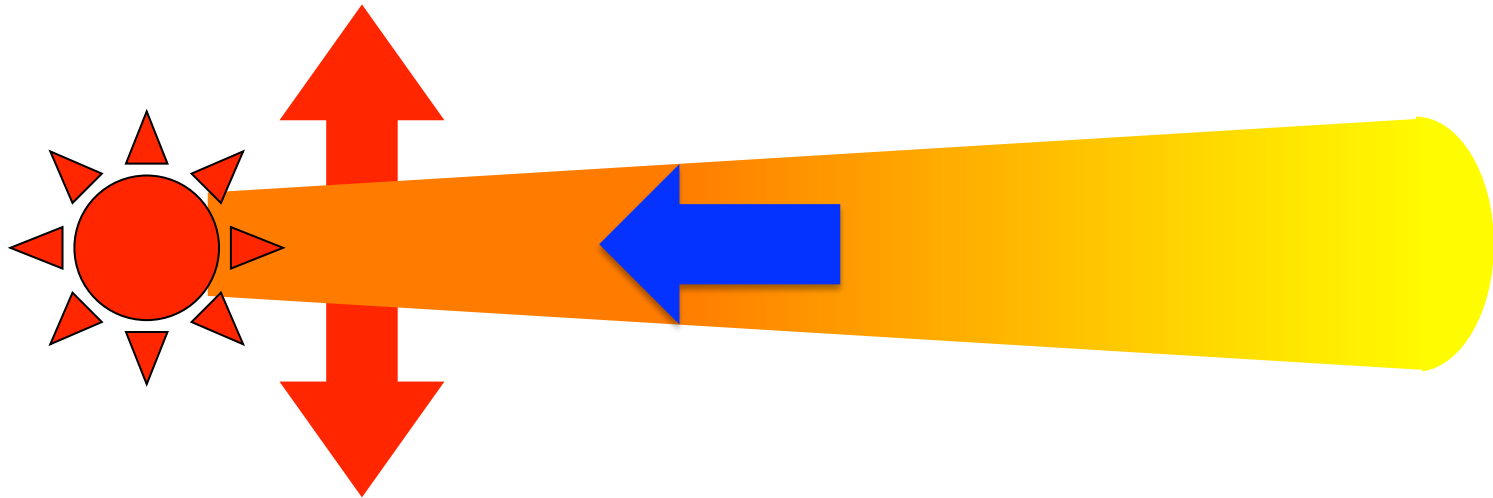
ただし!!!

>> 1yrで降着率が桁で変動する可能性はアリ!!!

まとめ

輻射圧問題の再考察

大質量星形成も円盤降着！！



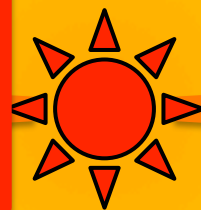
Dust-free円盤は光学的に厚く、
Flash-light effectを生むのに非常に都合がいい構造をしてる

内側円盤は熱的不安定により降着率の時間変動を生みうる！
でも、メーザー100日変動とは別物

発表の流れ

1. 輻射圧問題
2. 内側の円盤構造
3. 変動との関係？

4. その他のフィードバック
 - 光電離
 - 分裂の抑制



他に問題はないのか？

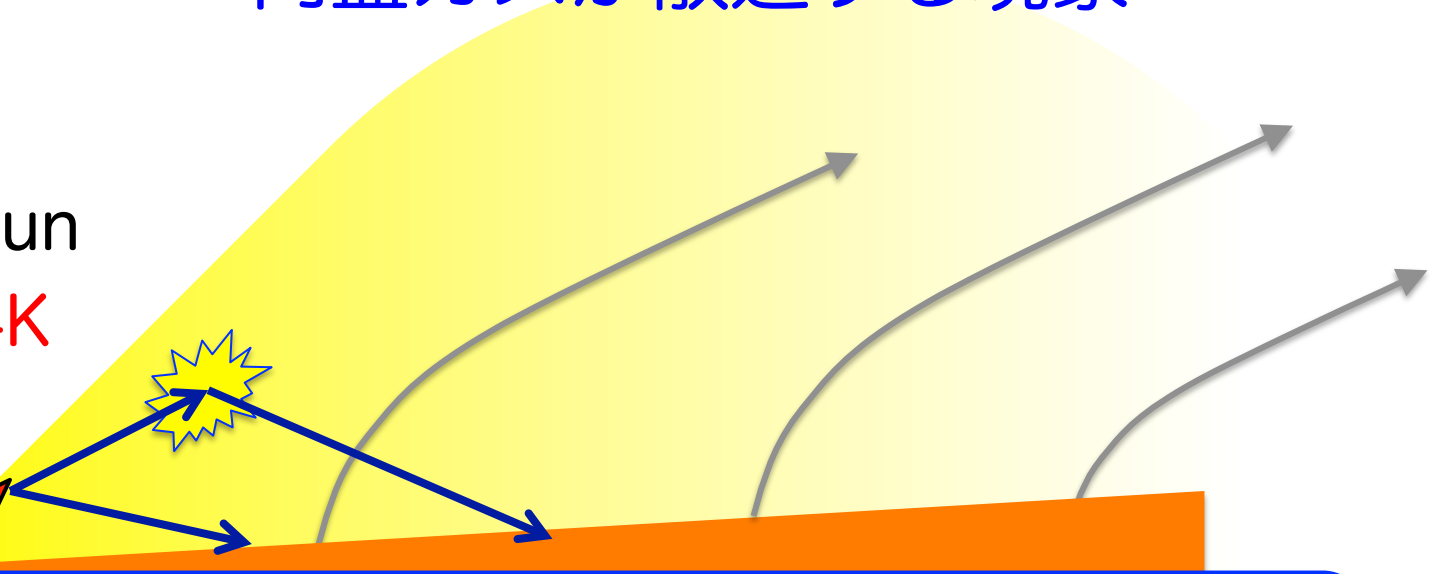
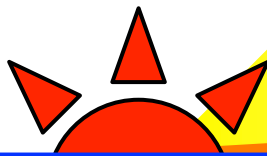
光蒸発

星からの輻射加熱によって
円盤ガスが散逸する現象

100Msun

$L \sim 10^6 L_{\text{sun}}$

$T \sim 5 \times 10^4 \text{K}$



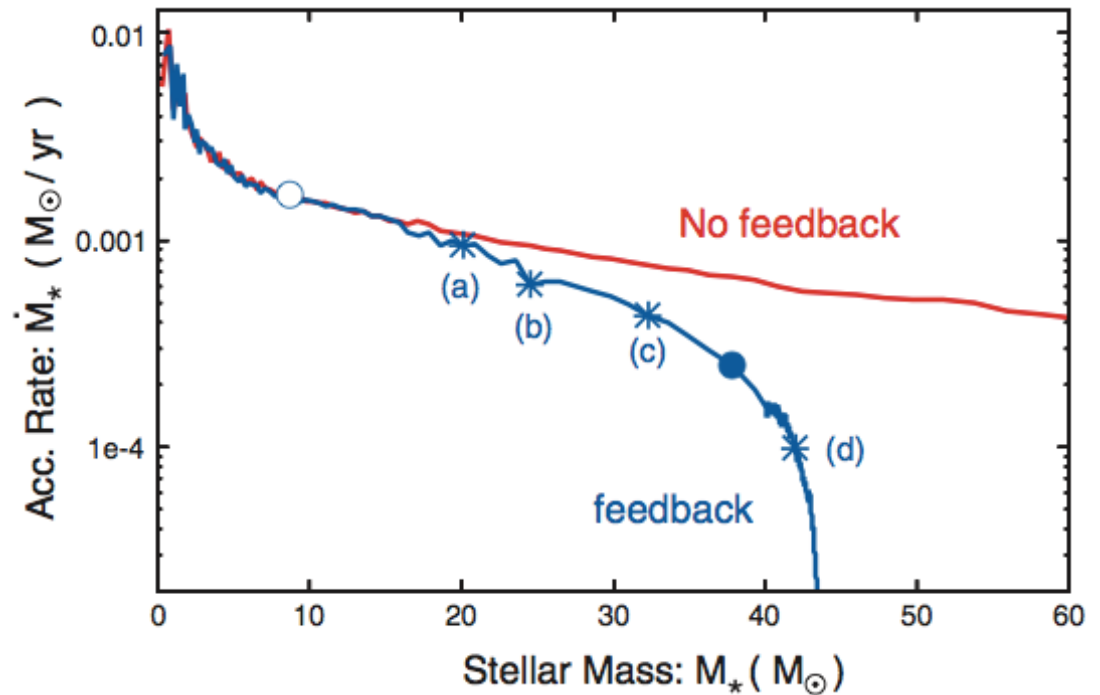
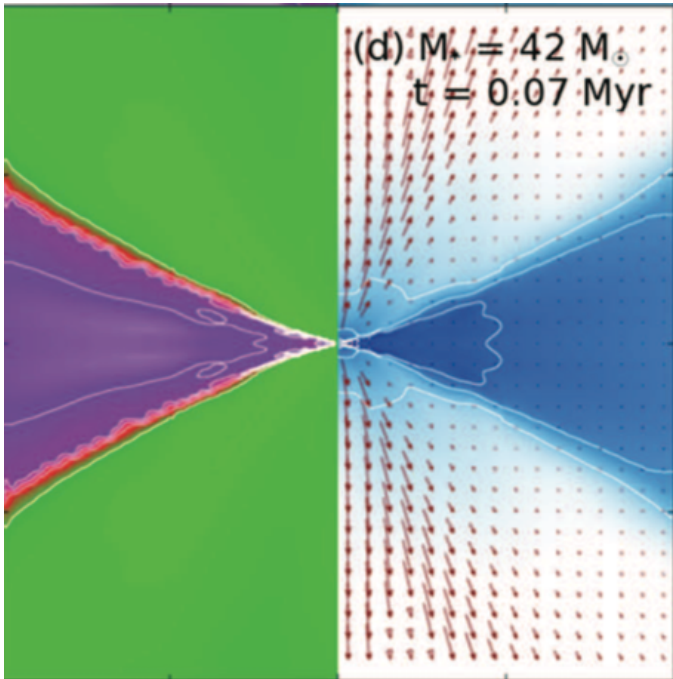
原始惑星系円盤の散逸や
初代星の最終質量などに関わる重要なプロセス

Hollenbach+94モデルのupdate

KT, Nakamoto, and Omukai (2013), submitted

(参考) 初代星形成の場合

Hosokawa et al. (2011), Science

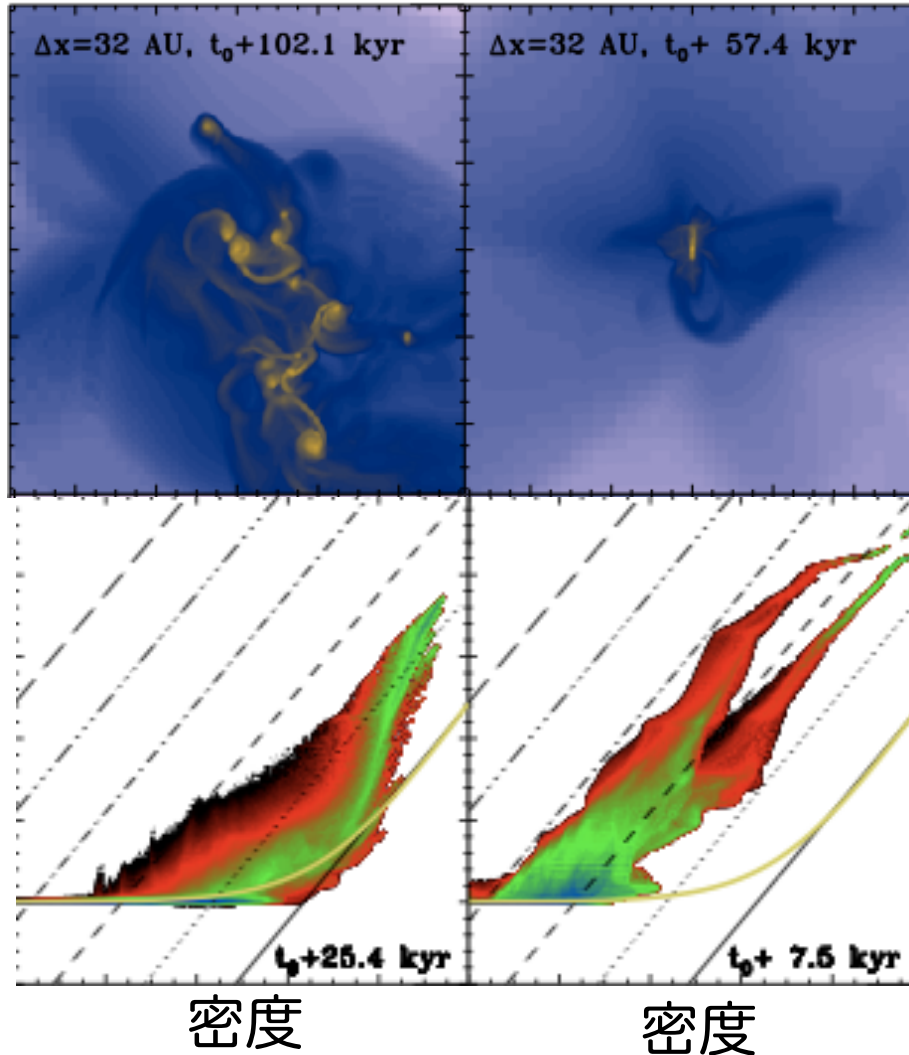


現代の大質量星形成でも、
類似のメカニズムが働く可能性はアリ！
星の構造が重要(細川さんトーク)

分裂を回避できるのか？

輻射のみ

輻射+磁場



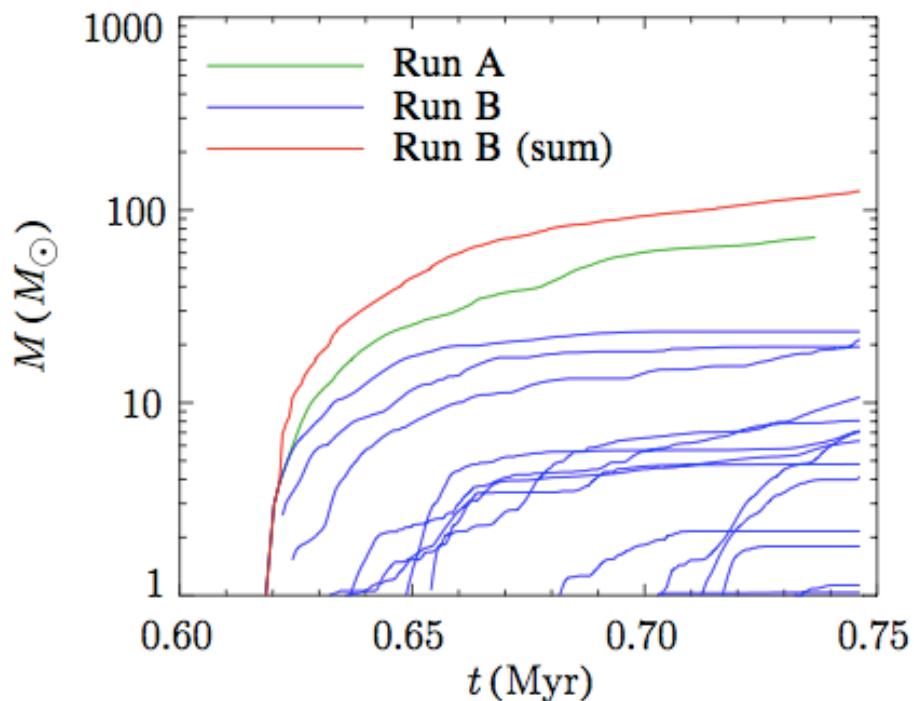
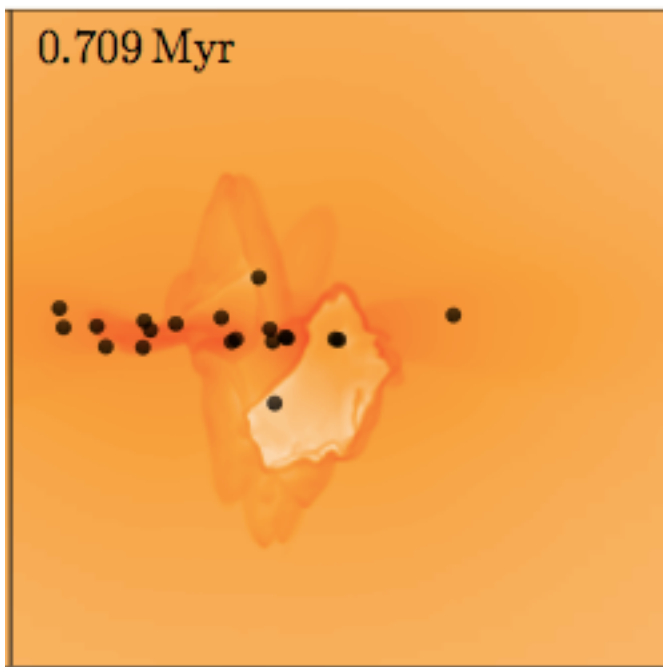
降着エネルギーの解放
→ 降着流を加熱
→ 分裂を抑制

Krumholz+07等

特に磁場ありの場合、
角運動量が抜かれるため
大きな質量降着率
→ より分裂を抑制！！
Commercos+11(左図)

もし分裂したら？

Peters+10: 輻射+電離光



“Fragmentation-induced starvation”

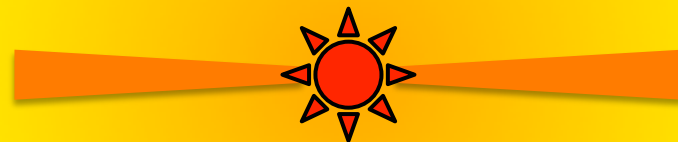
「分裂による飢餓状態」 → 少数の星団が形成！

ただし、
大質量星形成と星団形成の関連はまだ良く分かっていない…

改めて、
まとめ

大質量星形成における 輻射フィードバック

大質量星形成も円盤降着！！



- 輻射圧問題 → 円盤降着で解決！
- 光電離問題 → 今後の課題, HII領域との関係
- 分裂問題 → 恐らく回避 (磁場が必要?), 星団形成との関係

理論課題いっぱい: 磁場, 光電離, アウトフロー, 星団
観測との比較はどうするか？

終