

衝突分子雲におけるphotoionization フィードバックが星形成に与える影響

島和宏 (北海道大学)

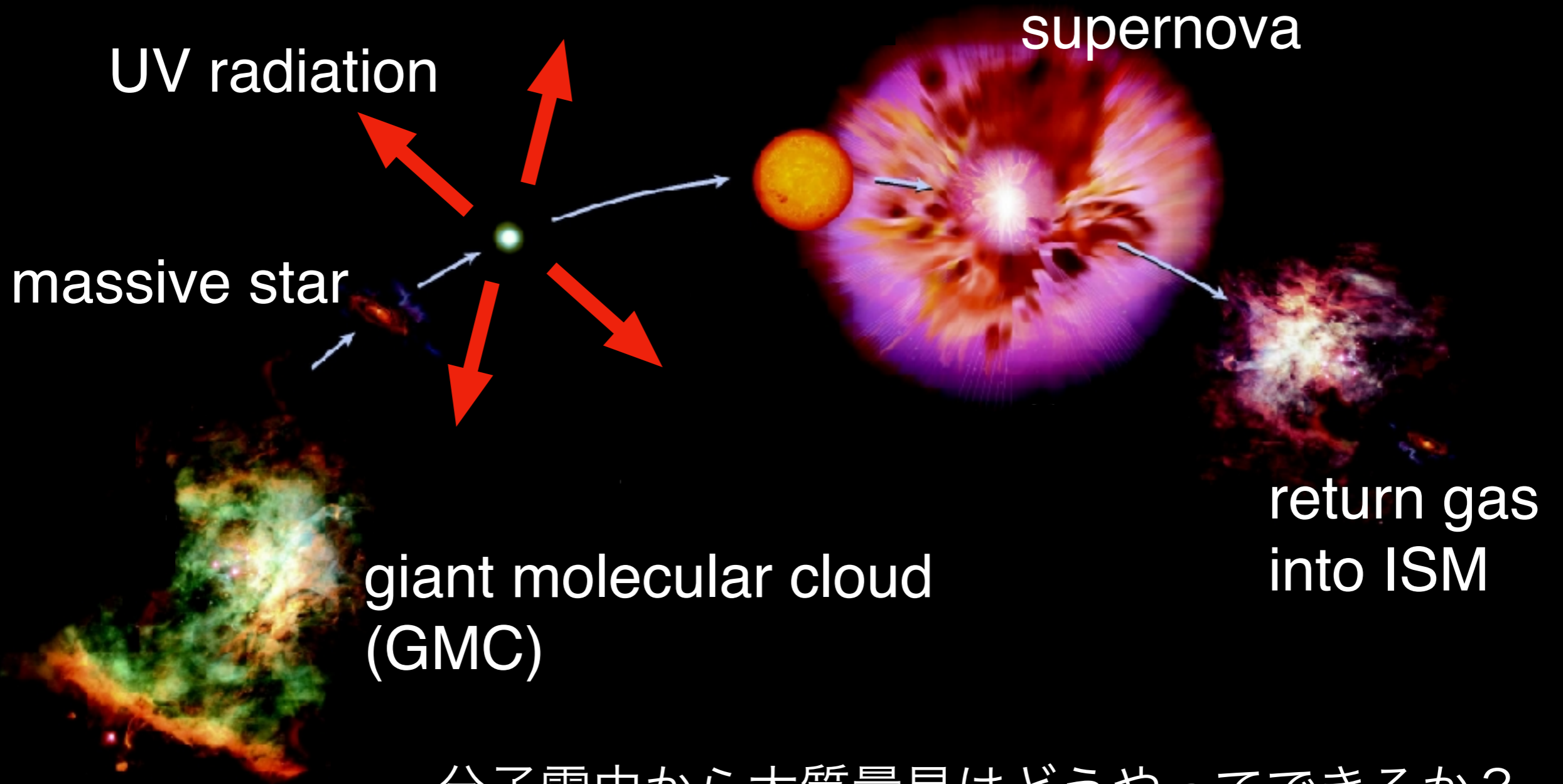
Elizabeth J. Tasker (ISAS/JAXA)

Christoph Federrath (ANU)

羽部朝男 (北海道大学)

INTRODUCTION

Massive star



giant molecular cloud
(GMC)

return gas
into ISM

分子雲中から大質量星はどうやってできるか？

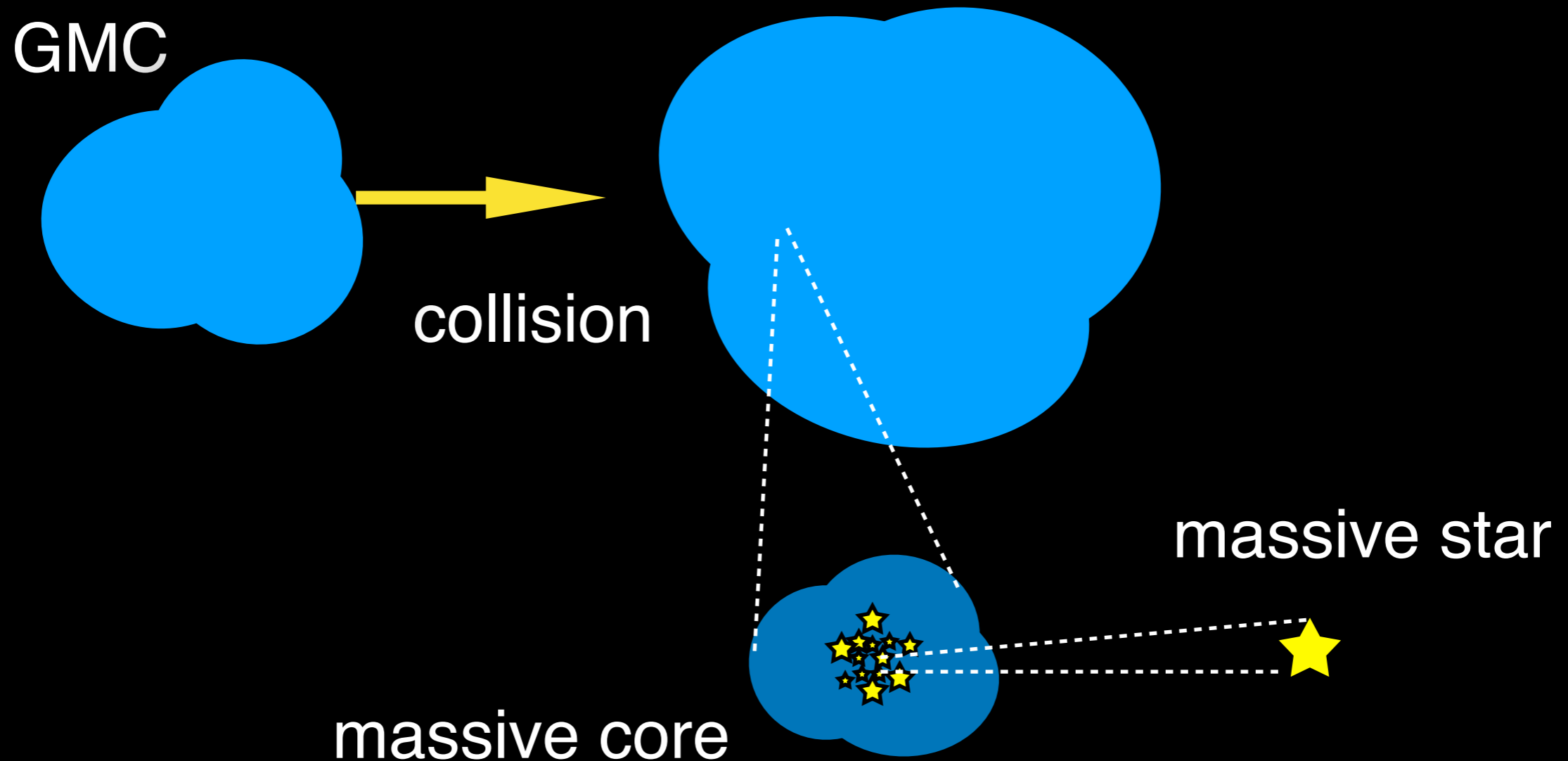
Coolingによってガスは小質量に分裂

-> ジーンズ質量を大きくする機構が必要



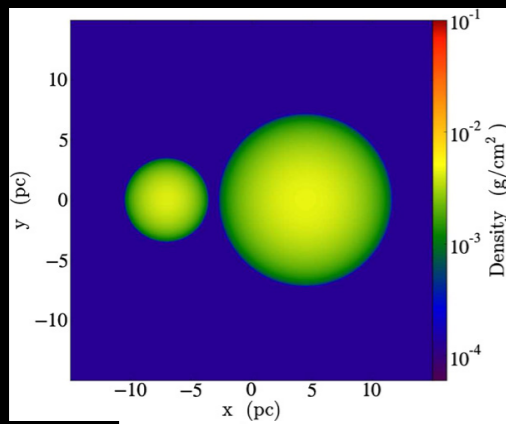
Cloud-Cloud Collision (CCC) シナリオ

(Habe+Ohta 1992, Klein+Woods 1998, Anathpindika 2010,
Inoue+Fukui 2013, Takahira+ 2014, Balfour+ 2015, Wu+ 2015,1016)

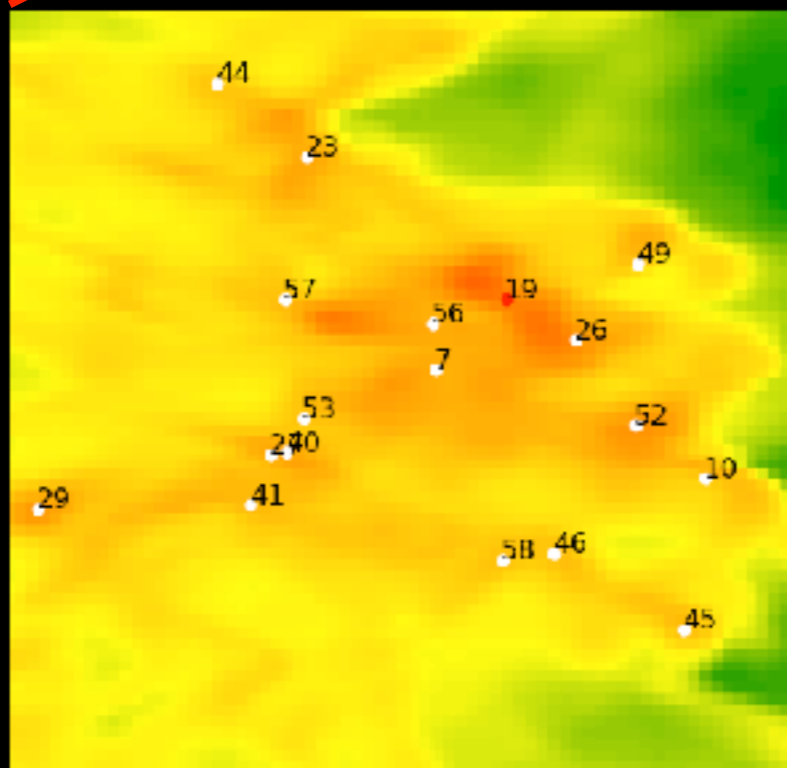
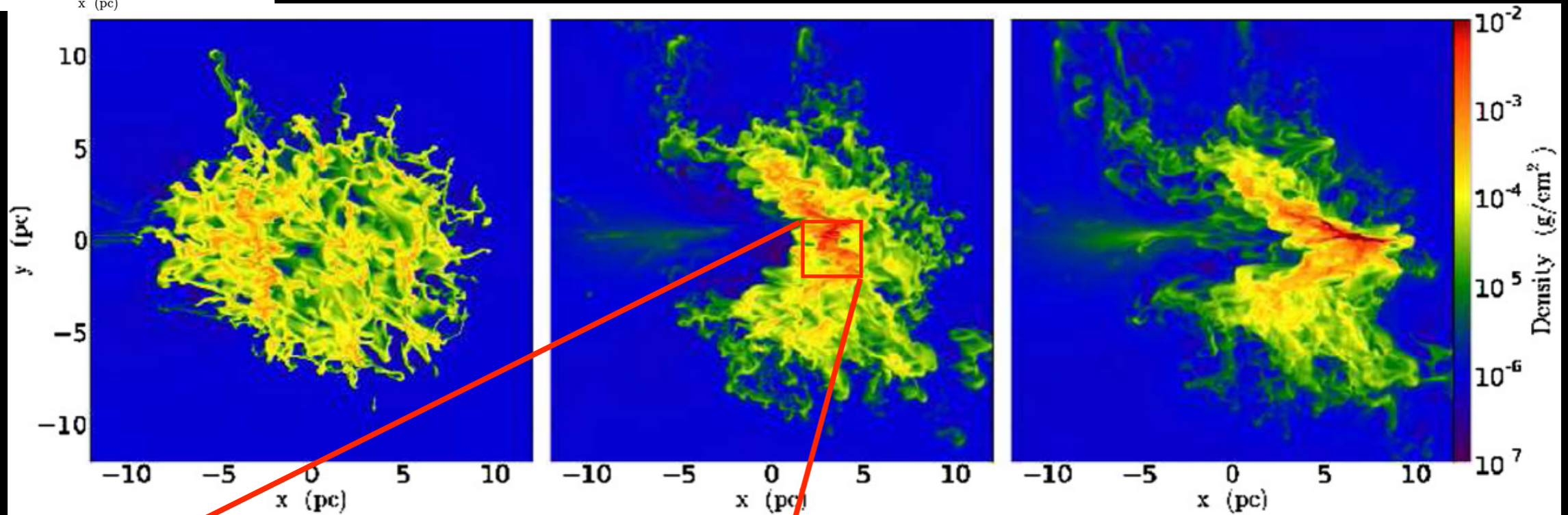


分子雲が超音速で衝突することによって衝撃波が発生
-> 衝撃波が作る乱流によって大質量のコア形成が期待される

過去のCCCシミュレーション



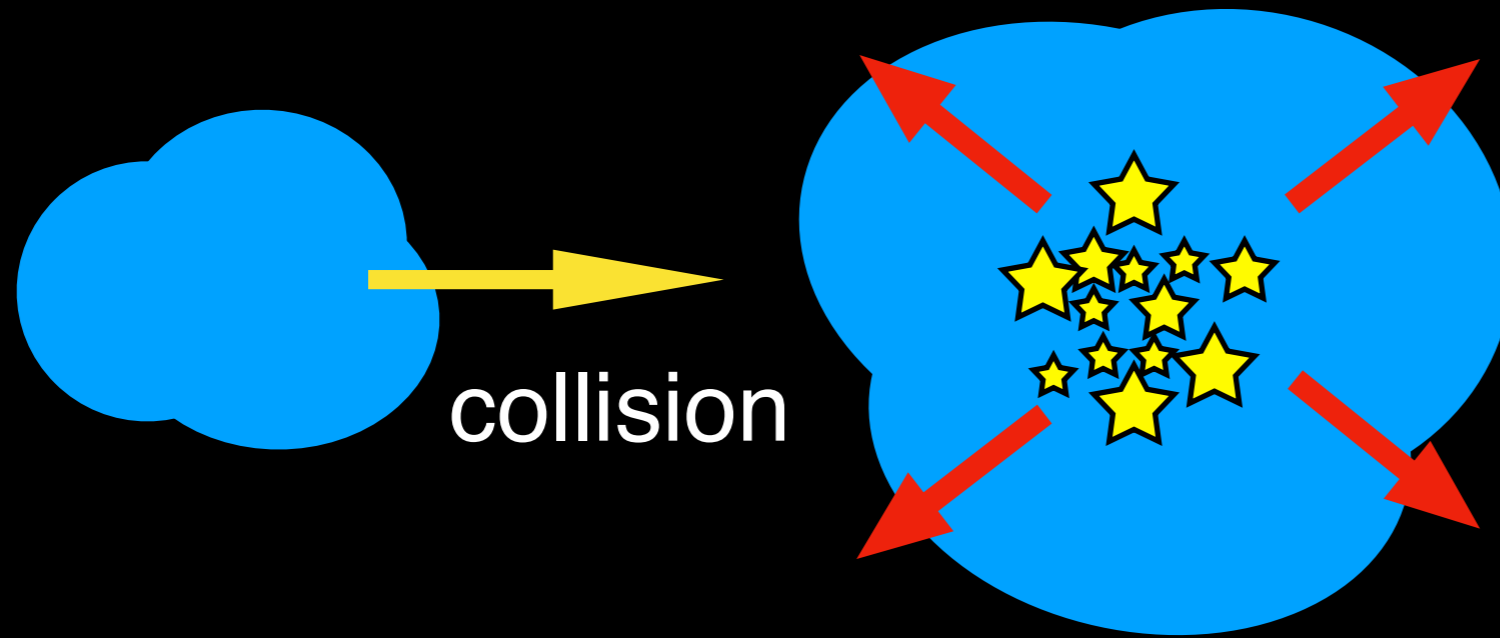
(Takahira+ 2014)



$$M_{J,eff} \propto \frac{(c_s^2 + \sigma_{turb}^2)^{3/2}}{\sqrt{\rho}}$$

有効ジョーンズ質量が大きくなり
大質量コアを実現

Motivation



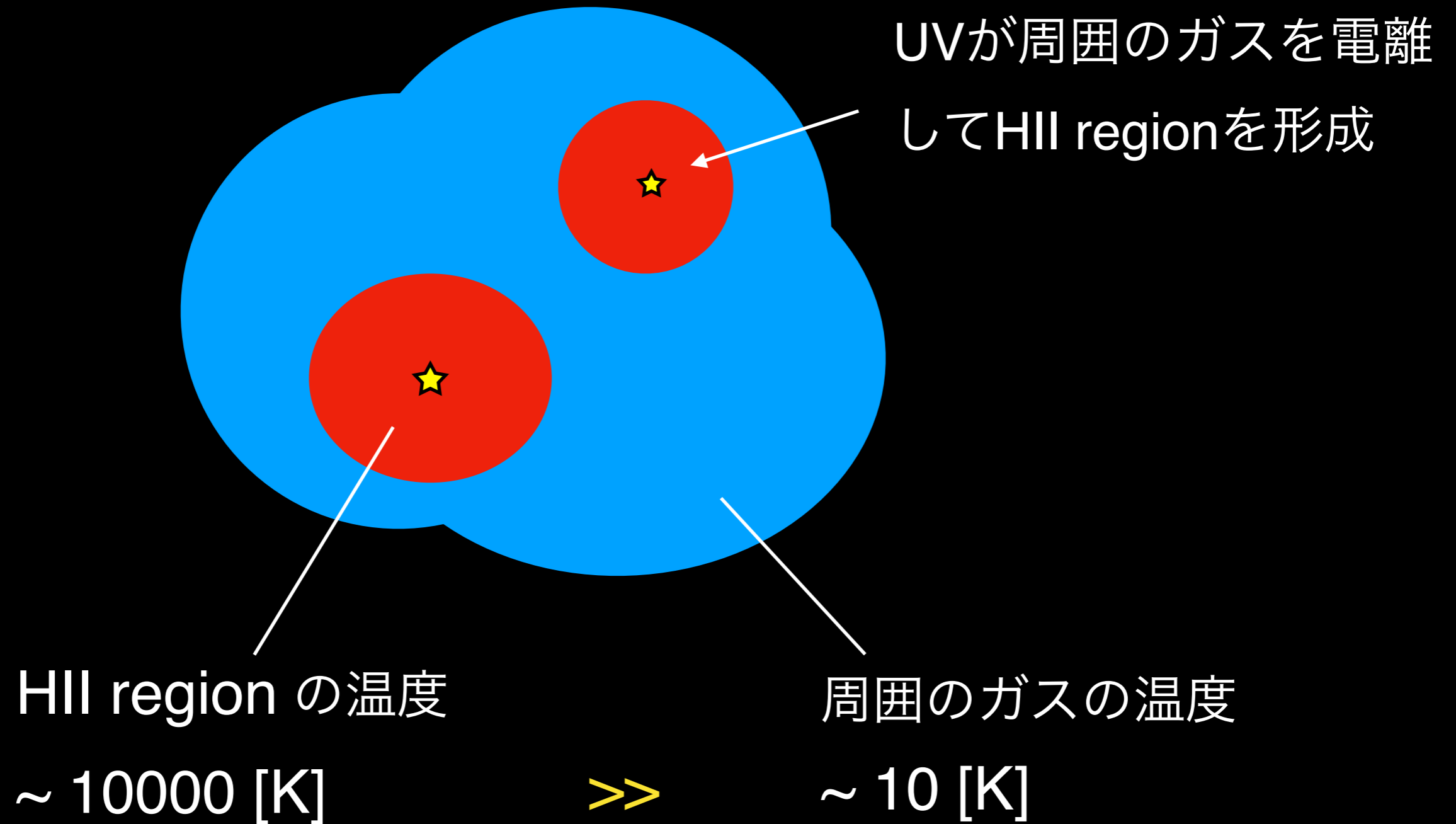
massive star formation

-> 大質量星が形成された後何が起きるか？

大質量星は輻射により周囲のガスを電離・加熱

-> フィードバックによって次世代の星形成が影響を受けるはず

Photoionisation フィードバック

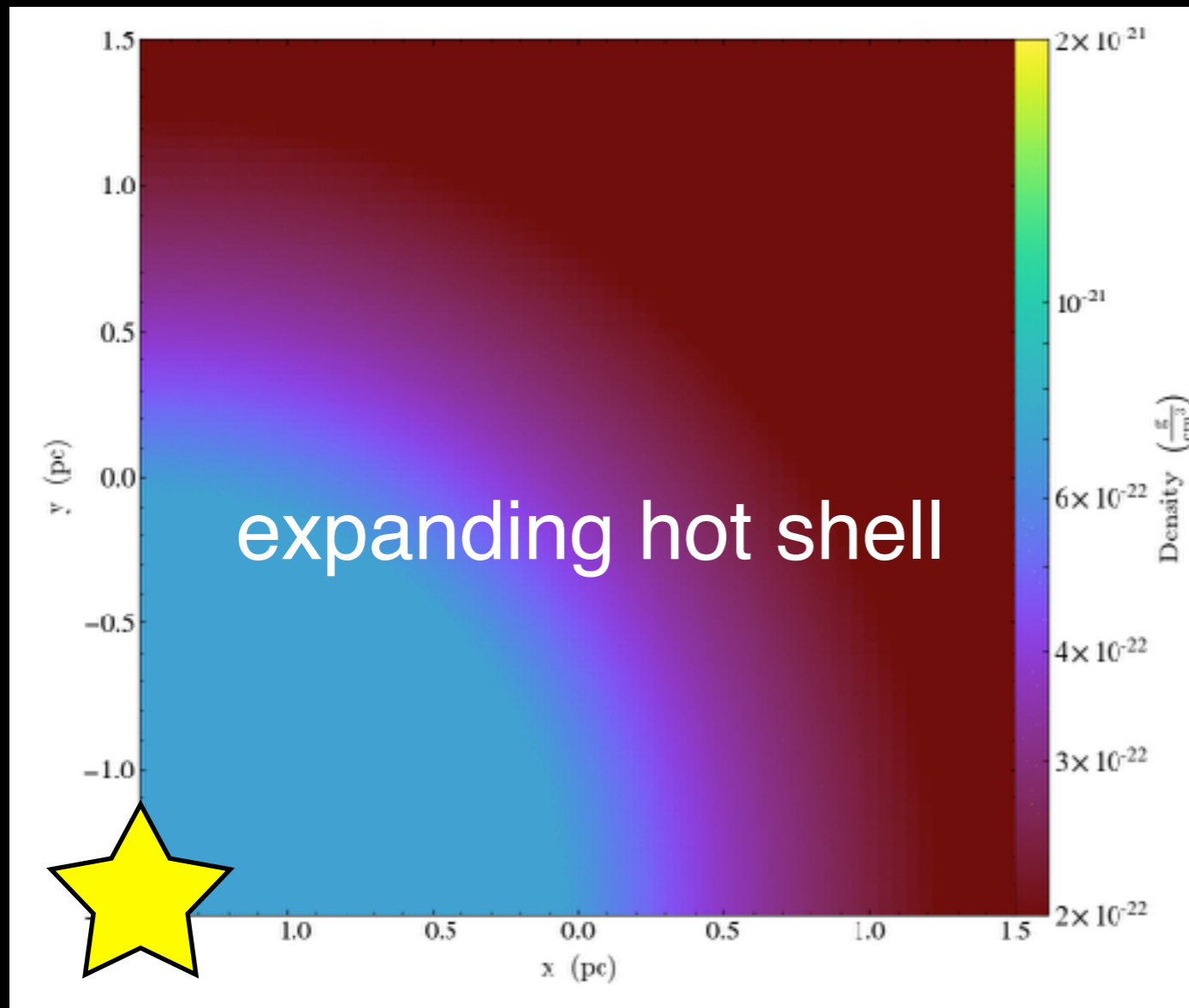


圧力勾配によってHII regionは分子雲の中で膨張する

Photoionisation フィードバック

(Ionization FrontとShock Front のテスト計算)

Density slice



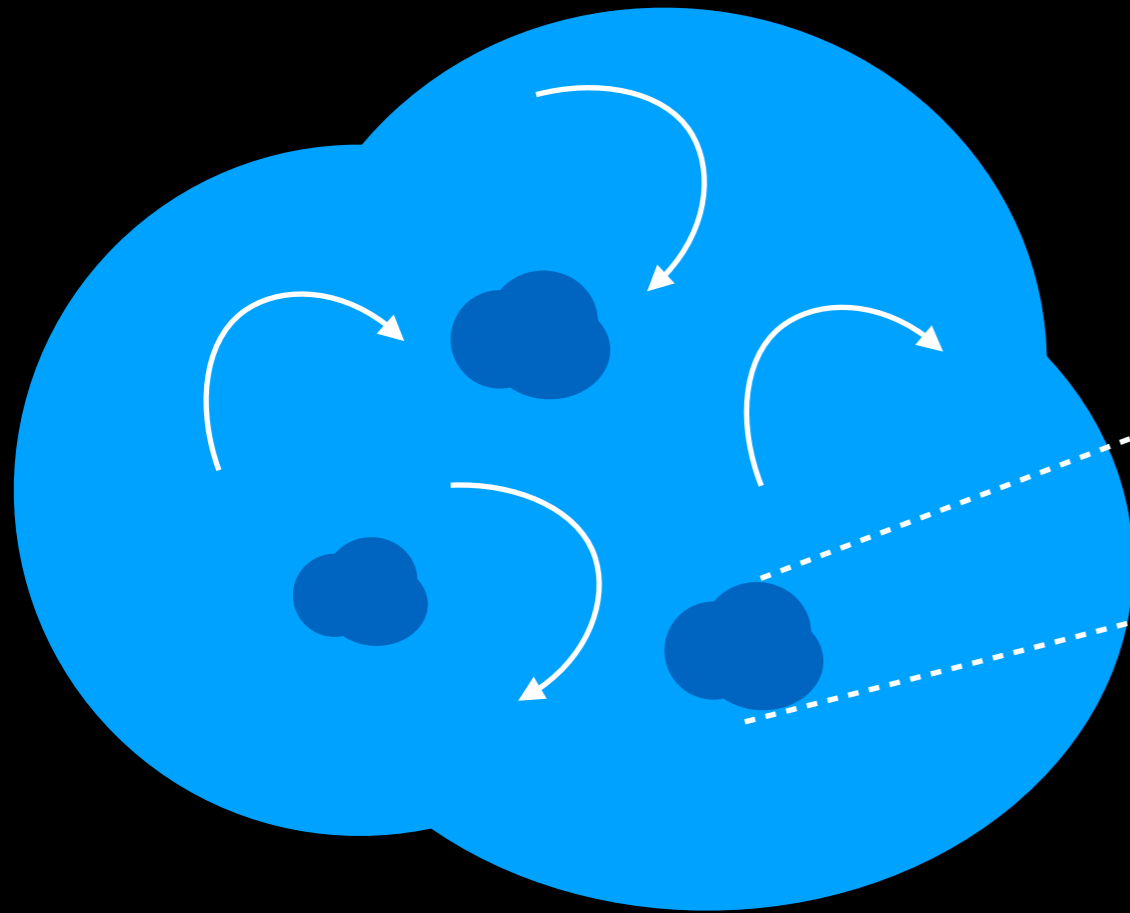
大質量星の周囲で星形成は
促進されるのか？
抑制されるのか？

massive star

NUMERICAL MODEL & METHODS

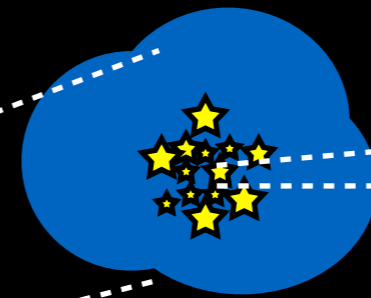
星形成 & フィードバックモデル

GMC



~ 100 pc
(10^{18} m)

dense core



~ 0.1 pc
(10^{15} m)

stars



$\sim 10^9$ m

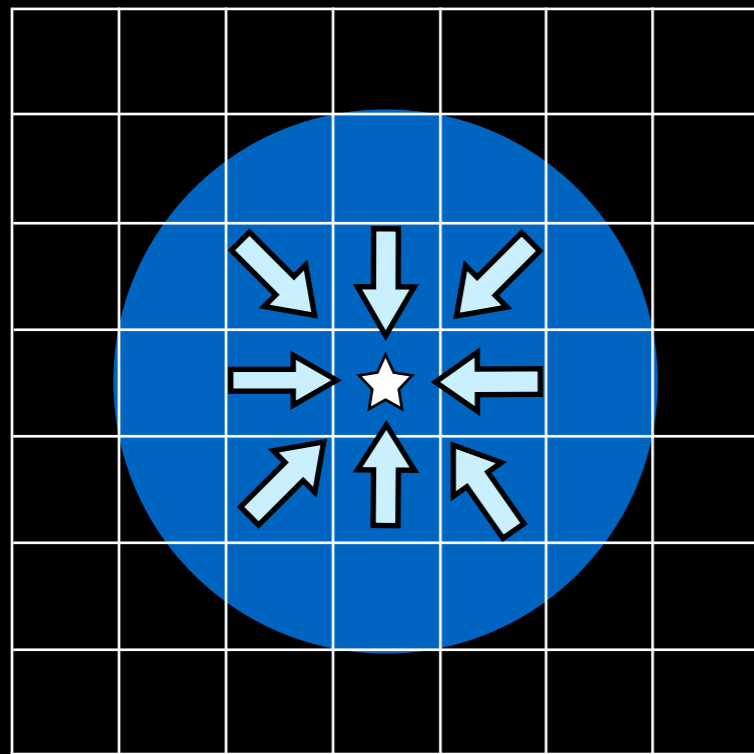
分解できない
-> sink を使用

feedback



rayを飛ばして輻射輸送を計算

Sink particle



$$r = 0.07 \text{ pc}$$

$$r = \frac{1}{2} \lambda_J$$

$$\lambda_J = 5 \Delta x$$

$$\rho_{crit} = \frac{\pi c_s^2}{G \lambda_J^2}$$

sink formation conditions

(Federrath et al. 2010)

+ the finest level of refinement

+ over density $\rho_{gas} > \rho_{crit}$

+ converging flow

+ gravitational potential minimum

$$\phi_{center} \leq \phi(i, j, k)$$

+ Jeans instability check

$$|E_{grav}| > 2 E_{th}$$

+ bound state check

$$E_{grav} + E_{th} + E_{kin} < 0$$

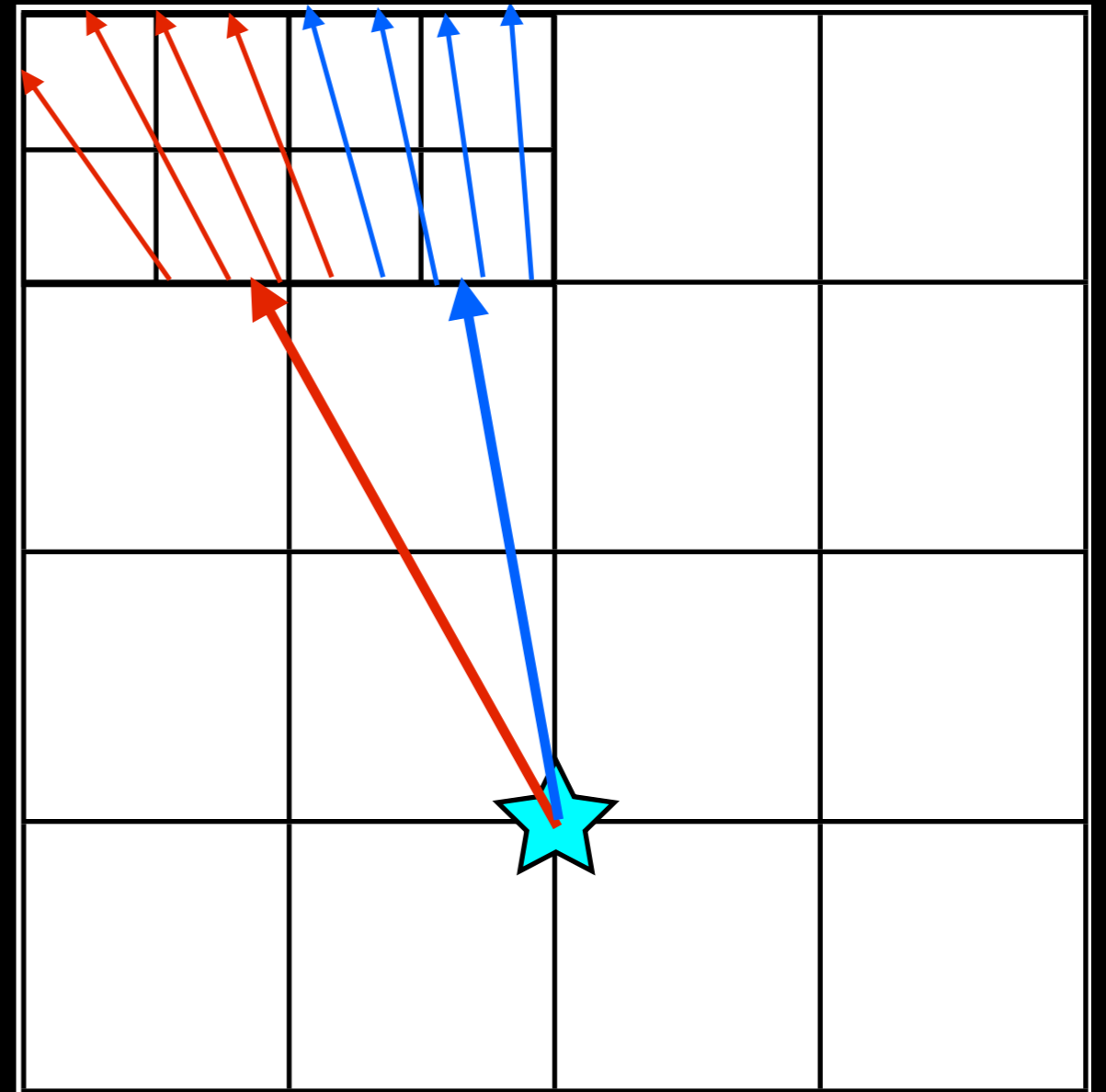
Adaptive ray tracing

(Wise & Abel 2011)

48本のrayを等方的に飛ばして
輻射輸送方程式を解く

立体角が大きくなるにつれて
格子を通るrayの数が減ってしまう
-> 自動的にrayを分割

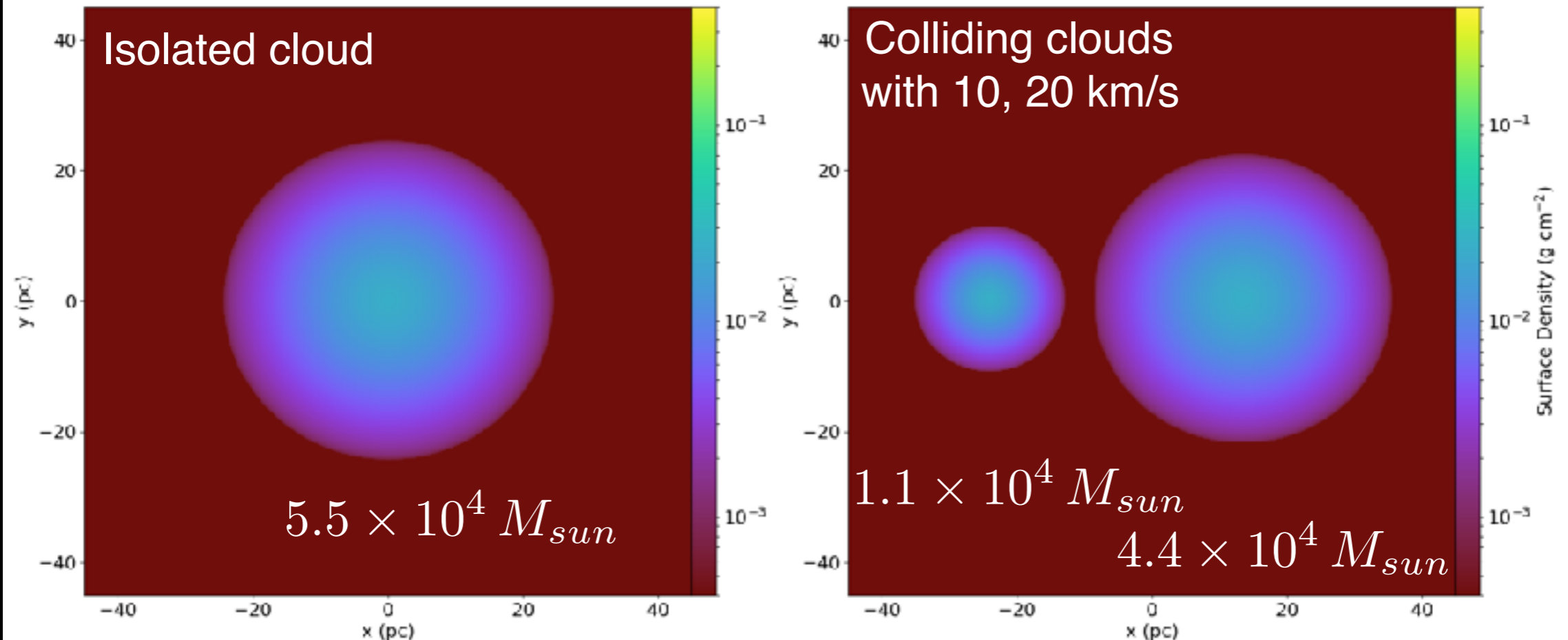
各格子で吸収されるUVの量から
電離度と加熱率を計算



(Enzo Workshop)

初期条件

Surface density



1. 同質量の単独分子雲と比較して衝突の影響を確認
2. UVあり・なしを比較してフィードバックの影響を確認

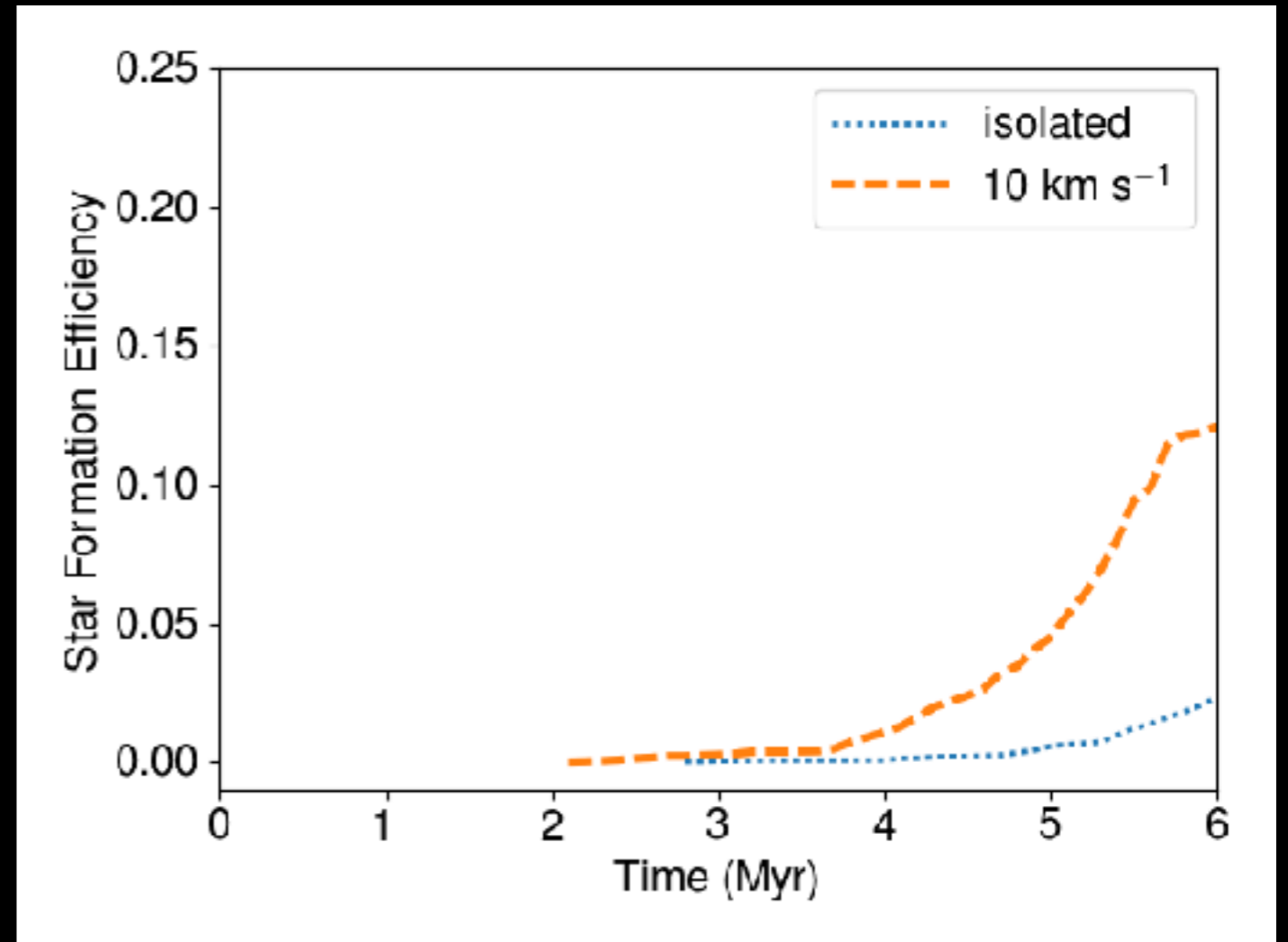
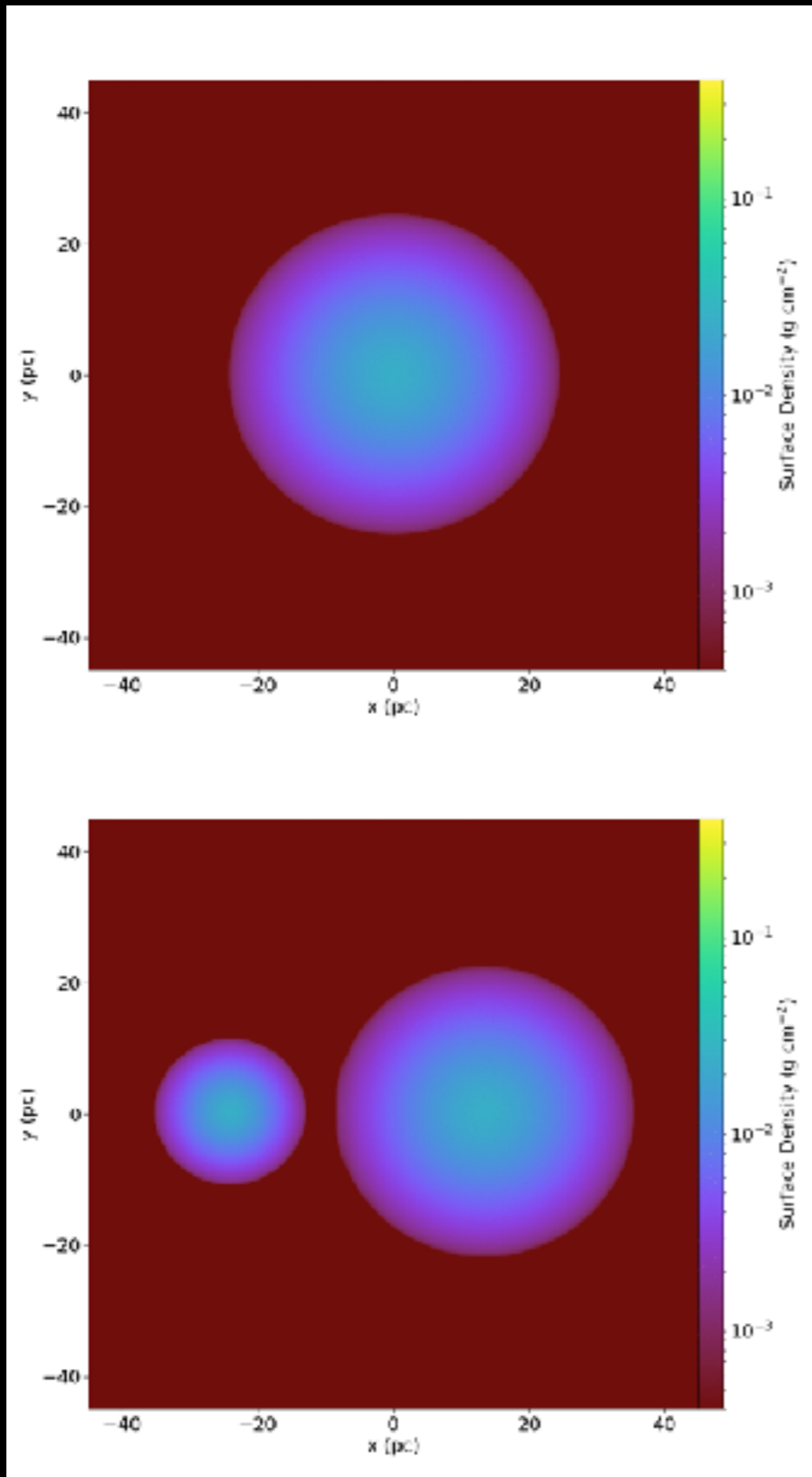
RESULTS

UV なし

Surface Density

$$\text{SFE} = M_{\text{sink}} / M_{\text{gas}}$$

time v.s. SFE

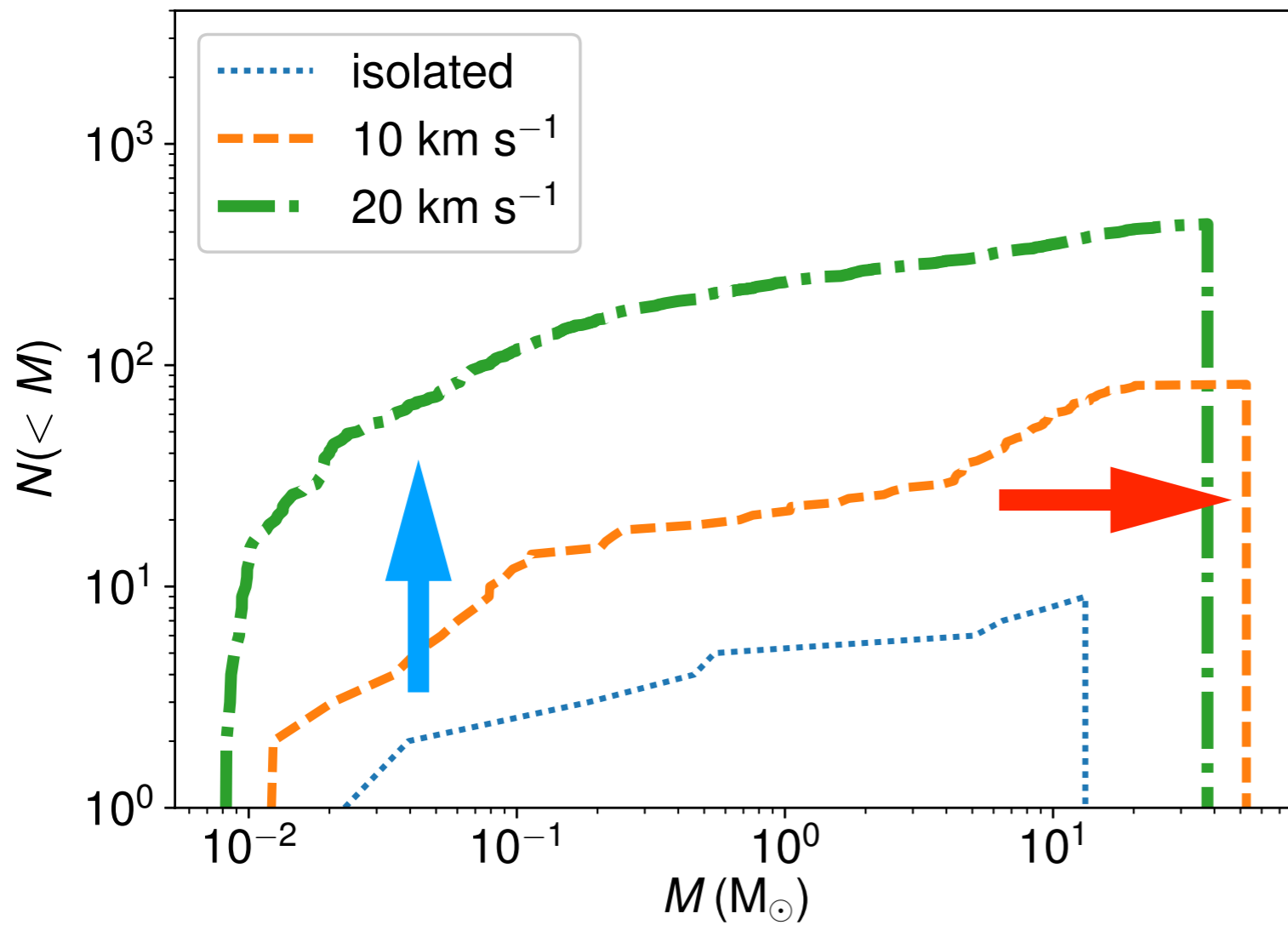


青: 単独分子雲, SFE ~ 2%

橙: 10 km/sで衝突, SFE ~ 12%

衝突の影響

“cumulative” mass function



$$M_{J,eff} \propto \frac{(c_s^2 + \sigma_{turb}^2)^{3/2}}{\sqrt{\rho}}$$

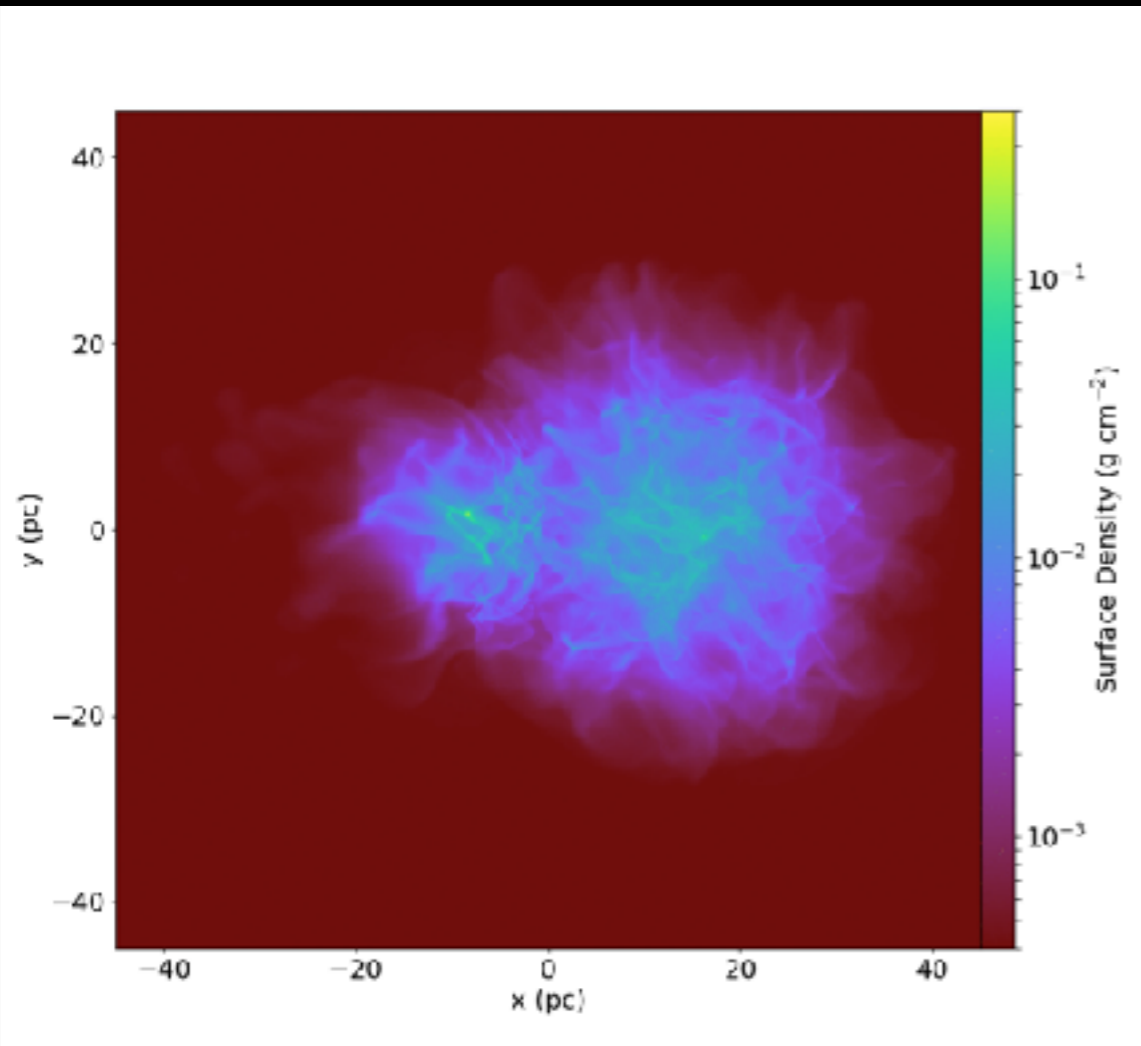
衝撃波による圧縮で
ジーンズ質量が小さくなる
-> より小さいsinkが出来る

$$M_{J,eff} \propto \frac{(c_s^2 + \sigma_{turb}^2)^{3/2}}{\sqrt{\rho}}$$

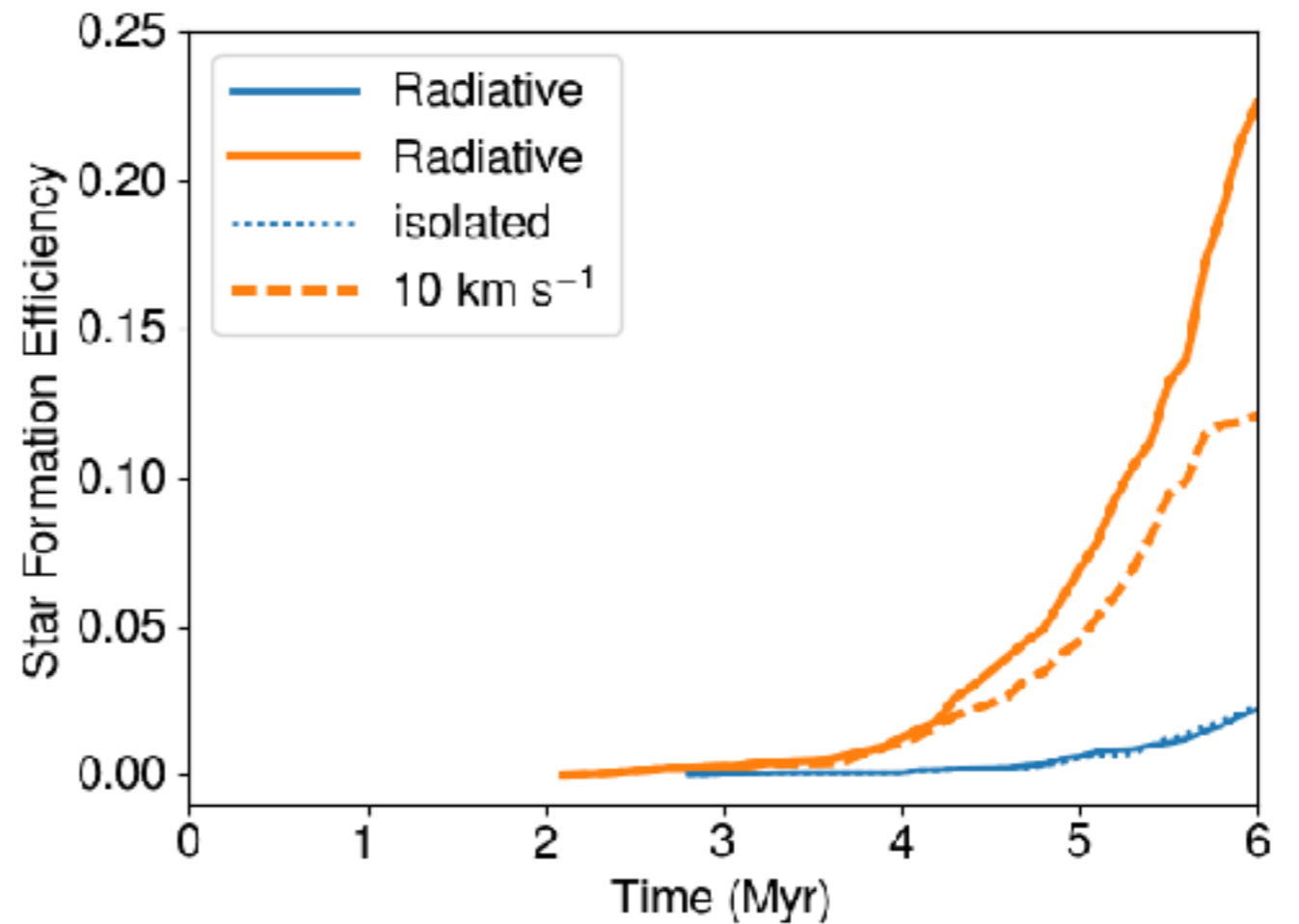
衝撃波が作る乱流で
ジーンズ質量が大きくなる
-> より大きいsinkが出来る

UV あり

Surface Density



time v.s. SFE



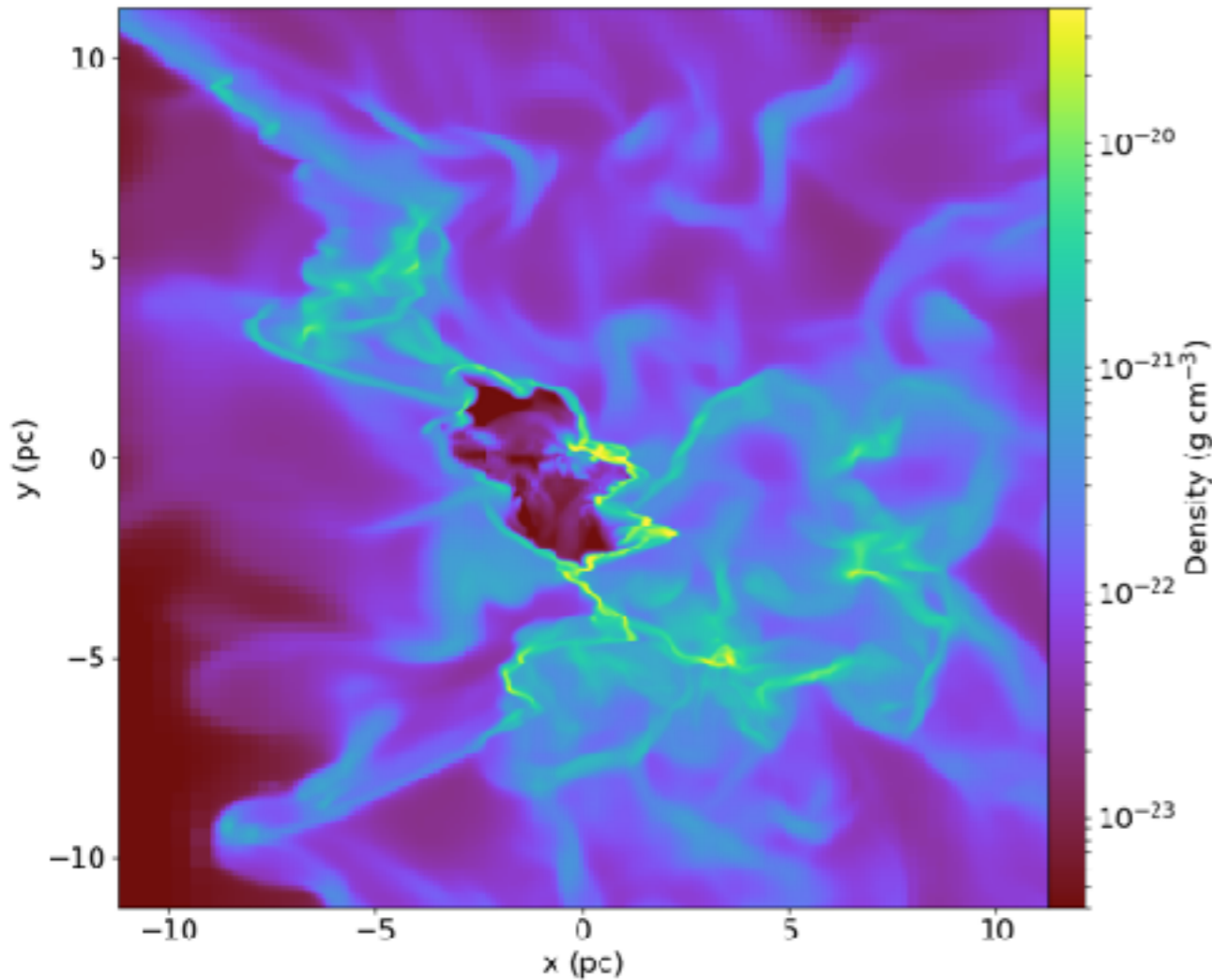
10 km/s collision + radiation

->フィードバックによって
星形成が促進されている

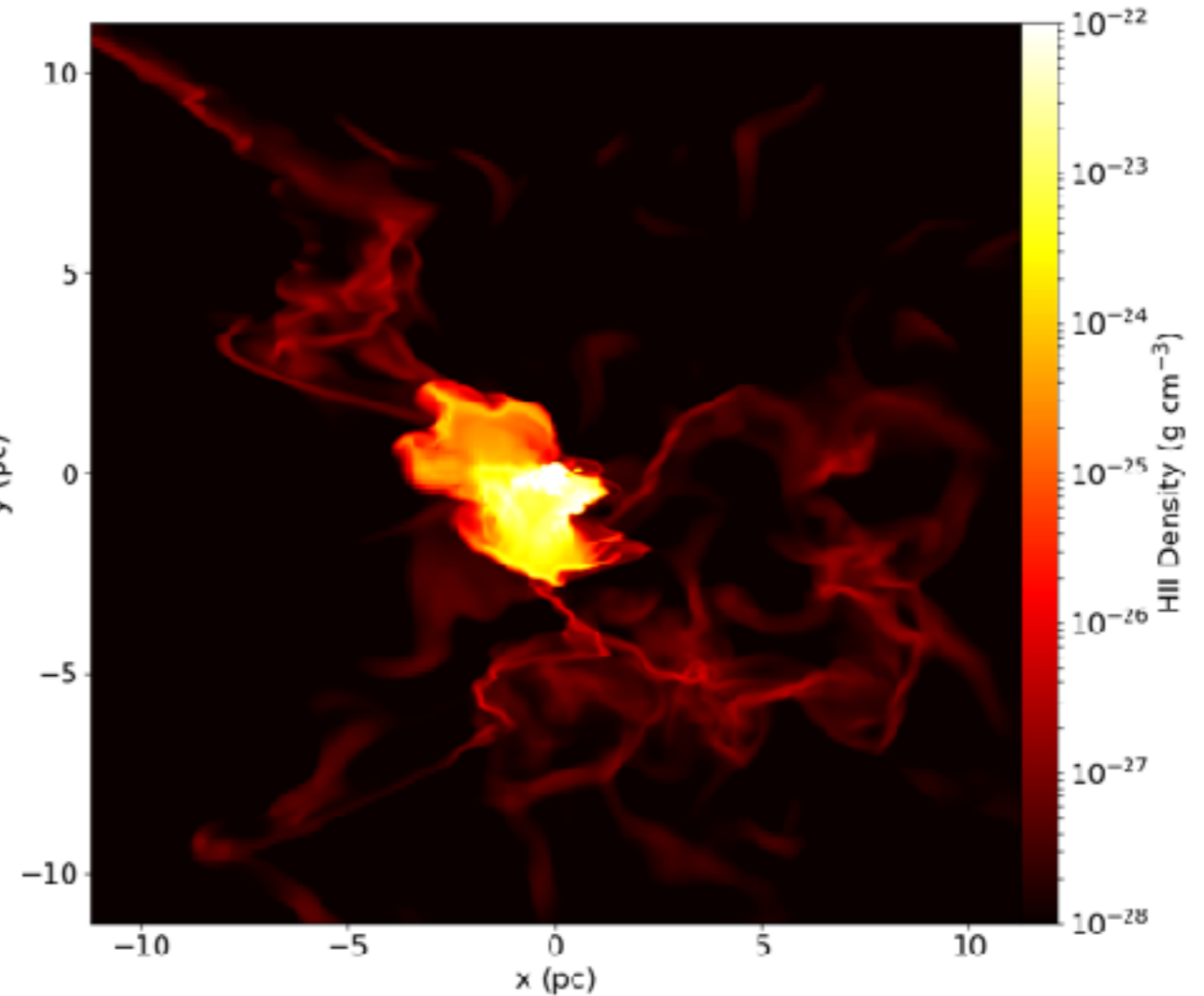
DISCUSSION

なぜ星形成が促進されたか？

Density slice



HII Density slice



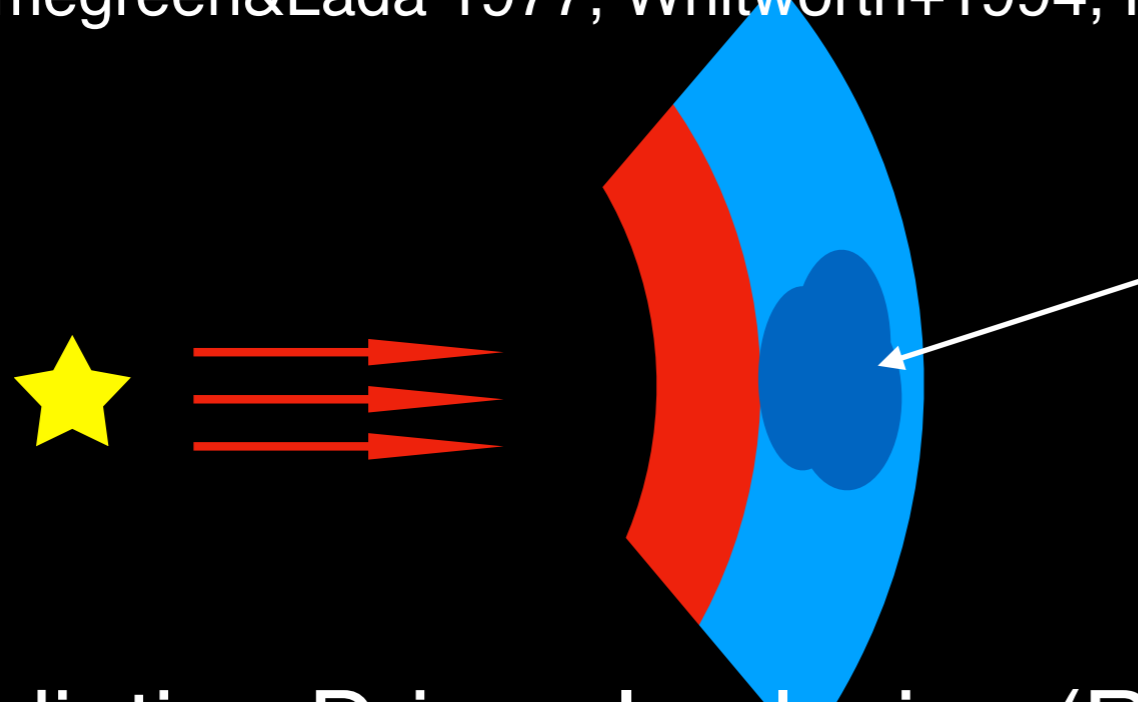
衝突による衝撃波中でHII regionが膨張

-> collision shock + HII region shock

なぜ星形成が促進されたか？

Collect and Collapse (C&C) process

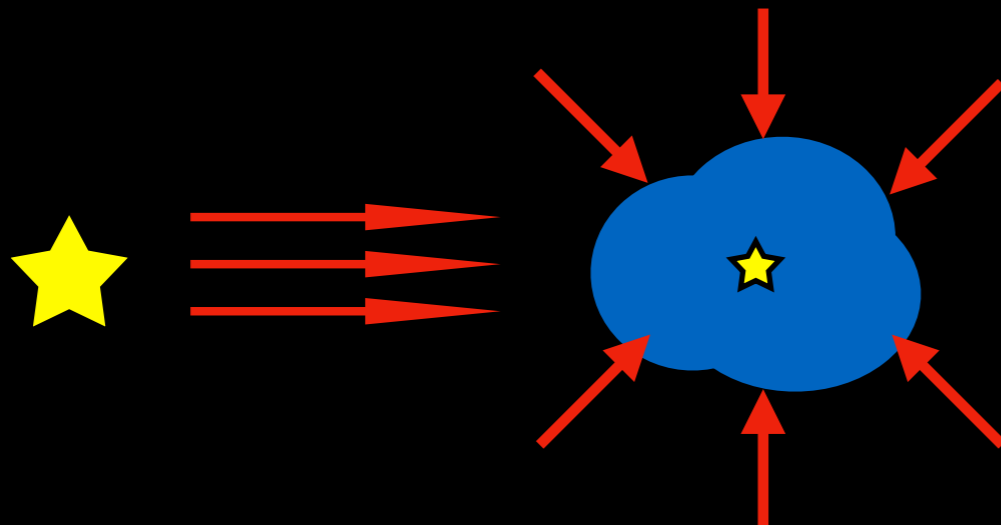
(Elmegreen&Lada 1977, Whitworth+1994, Hosokawa&Inutsuka 2006, Dale+2007)



もともと生まれるはずの
なかった星が形成される

Radiation Driven Implosion (RDI) process

(Sandford+1982, Lefloch&Lazareff 1994, Miao+2006, Waworth&Harries 2012)

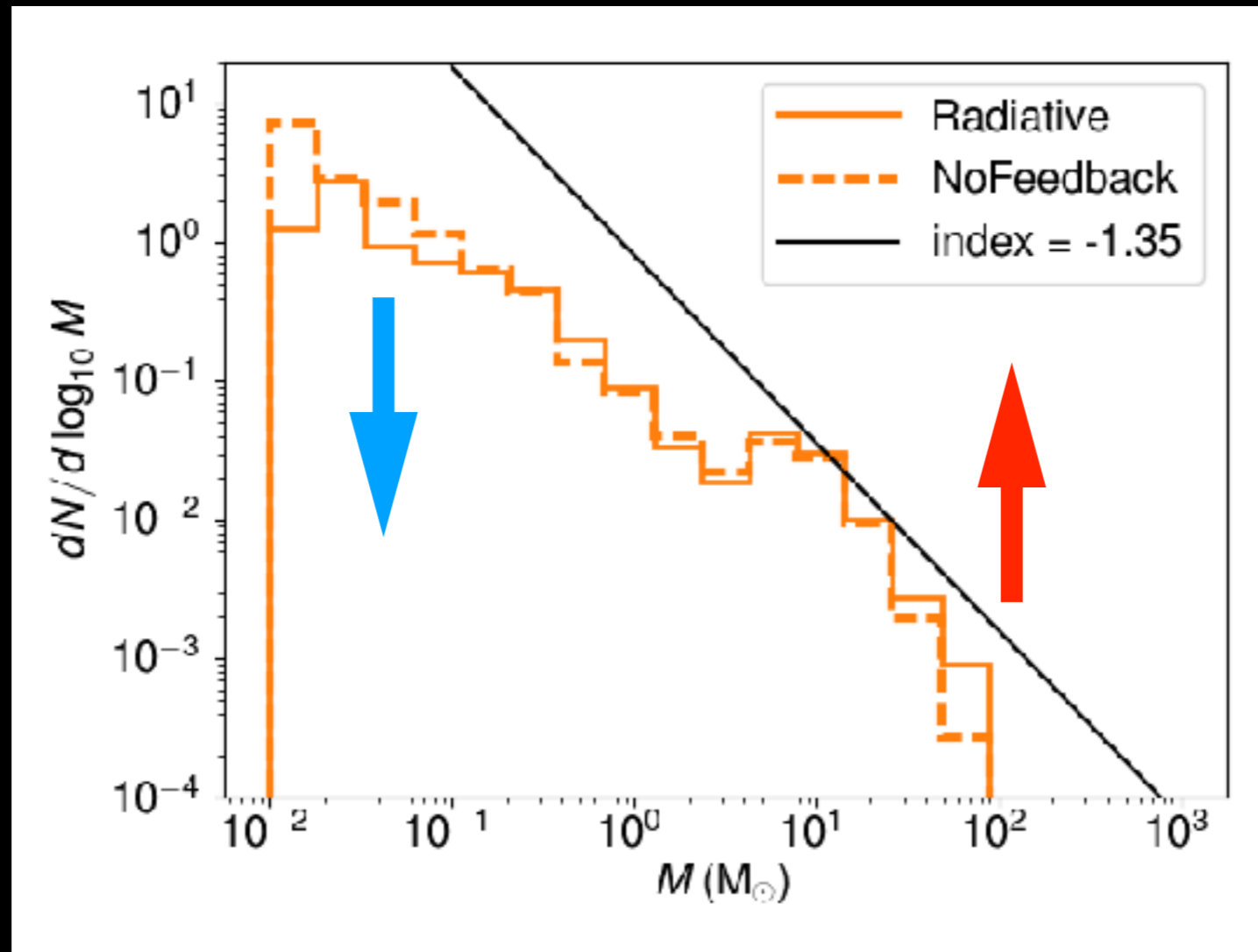


すでに存在するコアを圧縮して
星形成を加速

-> どちらが起きたか？

なぜ星形成が促進されたか？

mass function



小質量側は数が減って、大質量側の数が増えている

-> accretion gasの増加

~~C&C~~

v.s.

RDI

CONCLUSIONS

星形成とPhotoionizationによるフィードバック
を考慮した分子雲衝突の3次元シミュレーションを行った。

理想的な正面衝突の場合に、衝突による衝撃波で
約10倍早く星が形成される。
フィードバックが星形成をさらに約1.5倍加速。

- > 大質量星団の形成に有利
- > top-heavyなmass functionを示唆