

初代星・初代銀河研究会2025 初代星から生命へ

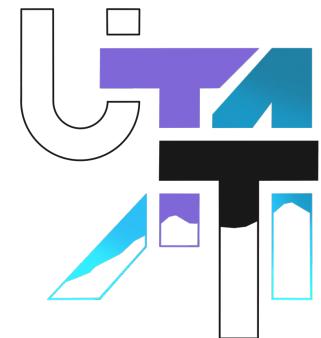
# 星団形成: 高赤方偏移銀河形成とアストロバイオロジー との接続を目指して

福島 肇

(Hajime FUKUSHIMA)



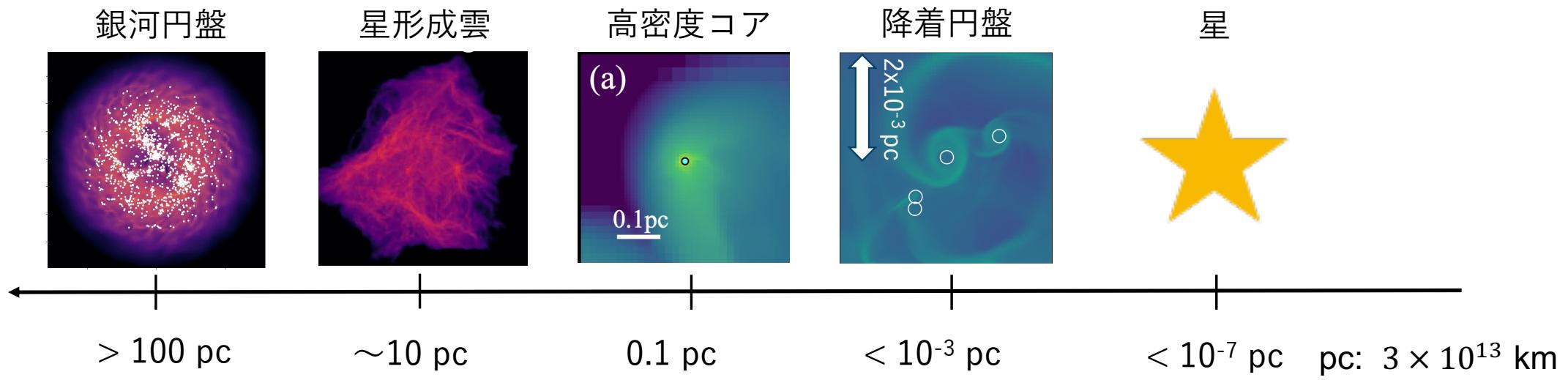
筑波大学  
計算科学研究中心  
Center for Computational Sciences



# 概要:

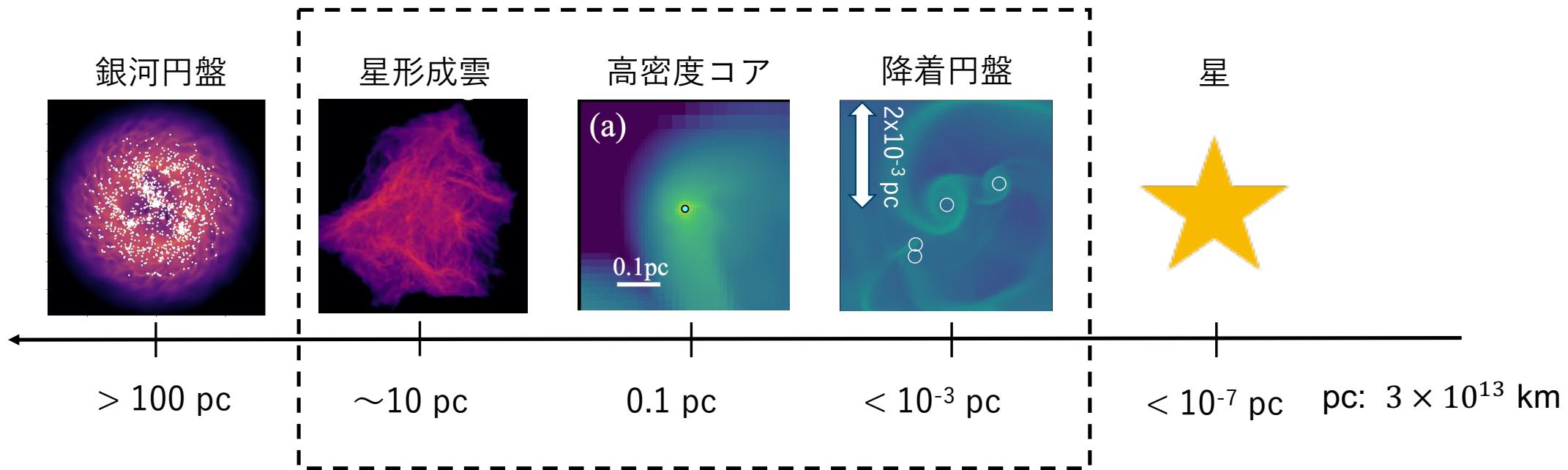
1. 星団形成: 主に雲破壊について
2. JWSTによる高赤方偏移銀河における星形成領域の発見
3. 星団と星・惑星形成の接続へむけて
4. 星団形成とアストロバイオロジーの接続へむけて
5. 次世代数値計算コードの開発

# 星・星団形成における物理スケール



星団スケールの研究では主にpc-au程度のスケールの現象を対象とする

# 星・星団形成における物理スケール



星団スケールの研究では主にpc-au程度のスケールの現象を対象とする

# 星団形成: 主に雲破壊について

# 星団形成のシナリオ



## 近傍銀河における星団形成の性質

- ・星形成効率 (ガスから星へと変換される割合): 10%以下
- ・星形成継続時間 1-5 Myr

(e.g., Fukui & Kawamura 2010, Kruijssen et al. 2019, Chevance et al. 2020)

超新星爆発より短い時間スケールで雲が晴れ上がっている

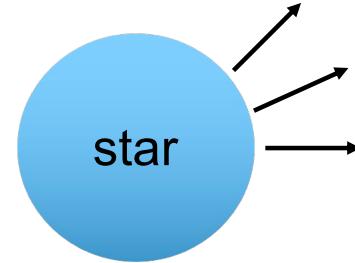
# 星からのフィードバック

輻射

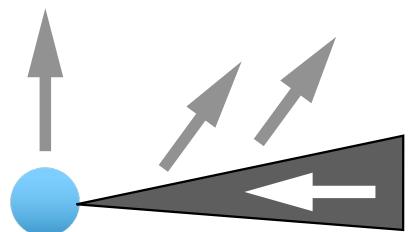


紫外線光

星風



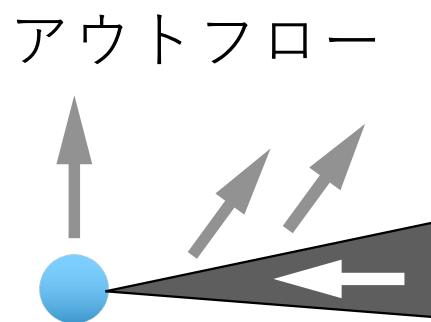
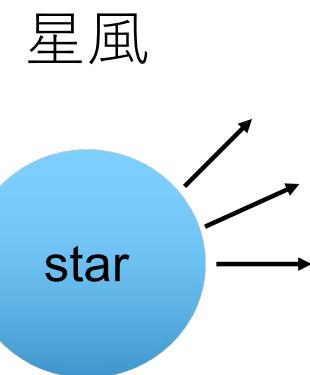
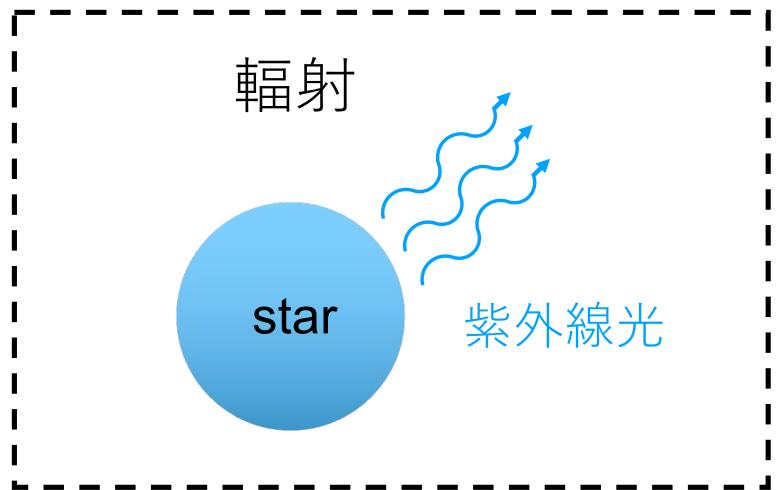
アウトフロー



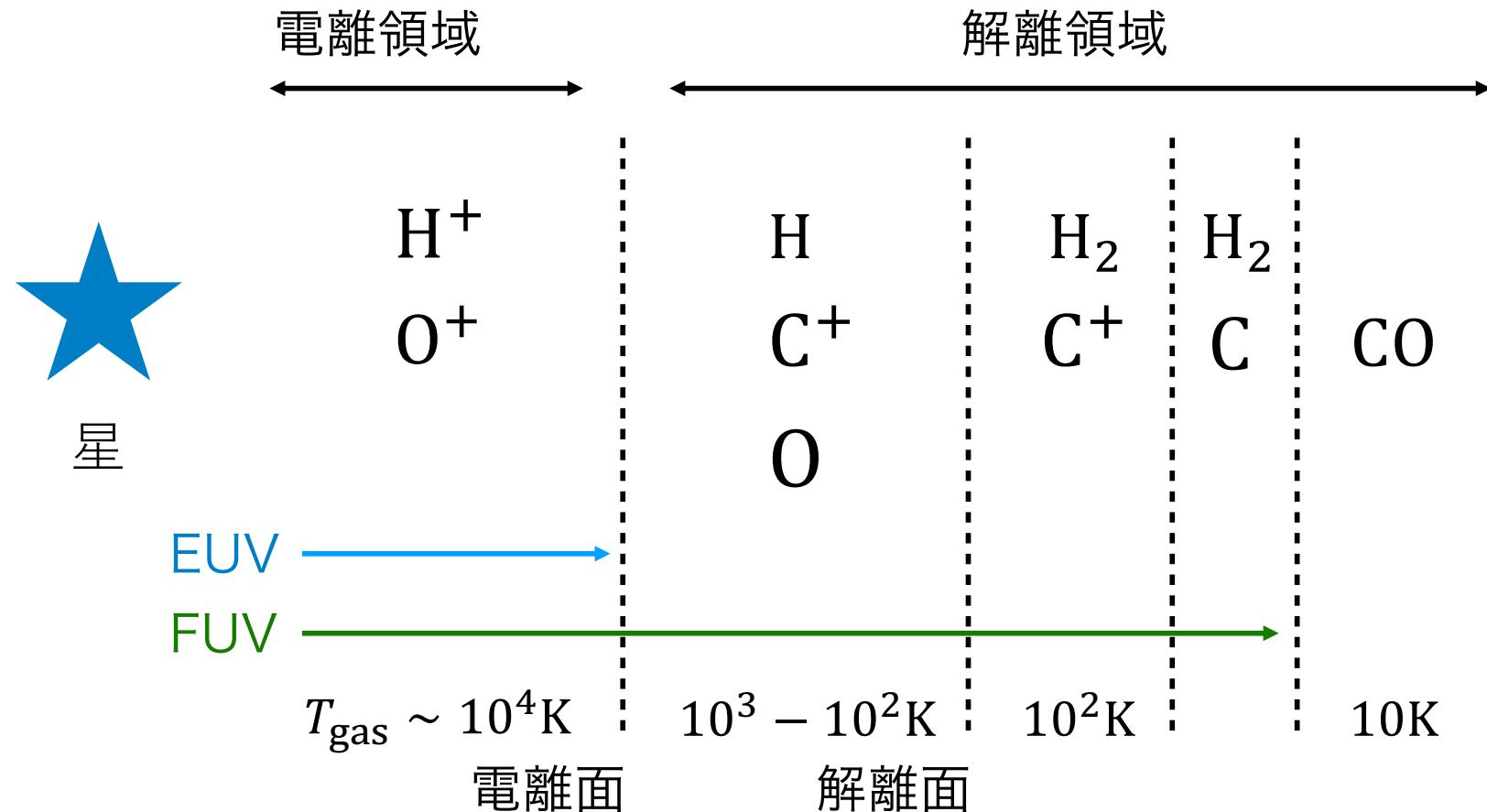
超新星爆発



## 星からのフィードバック



# 大質量星による輻射フィードバック

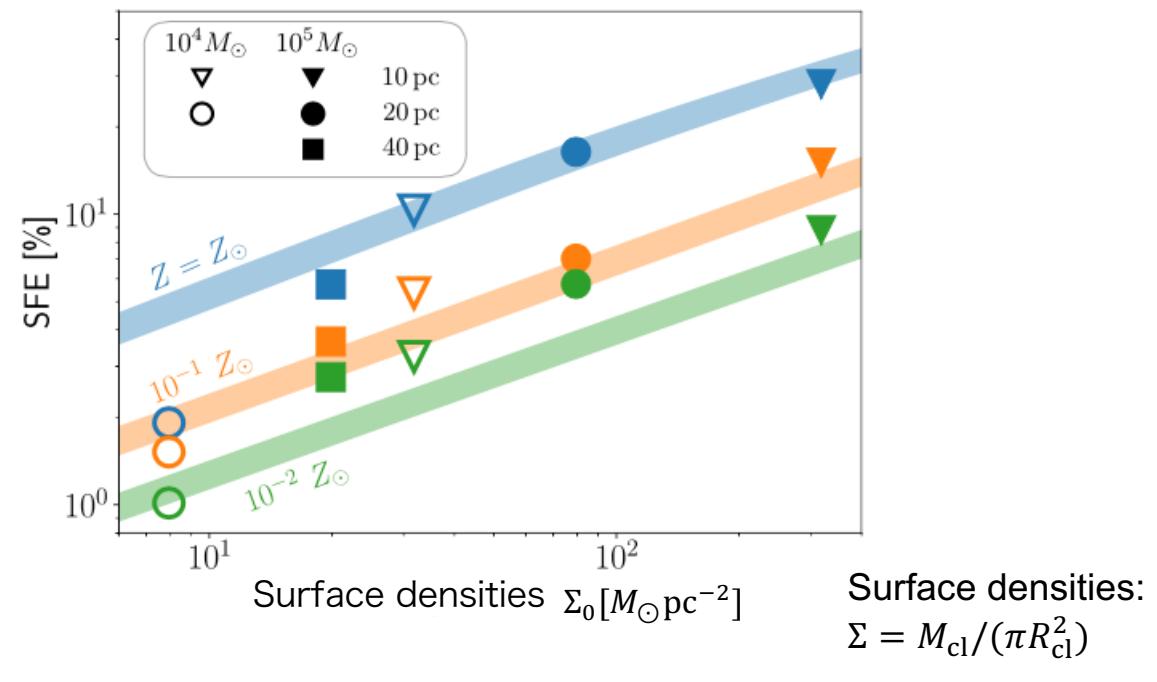
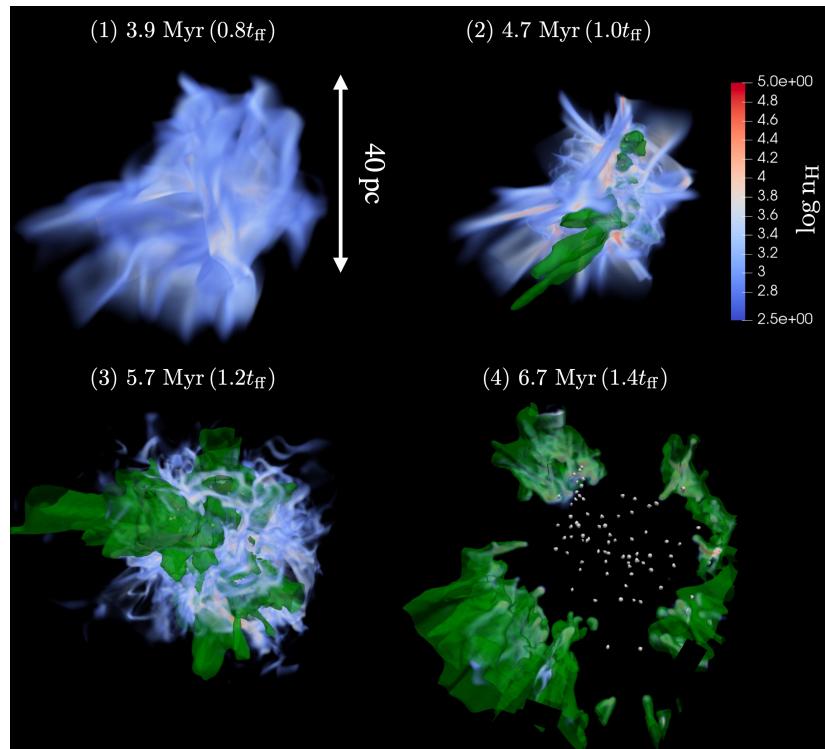


EUV (極紫外線):  $h\nu > 13.6 \text{eV}$ , FUV (遠紫外線):  $13.6 \text{eV} > h\nu > 6 \text{eV}$

# 電離フィードバック

電離フィードバックにより星形成効率が通常10%以下に抑えられることがわかっている。

(e.g., Dale et al. 2012, Geen et al. 2015, Kim et al. 2018, 2020, He et al. 2019, Fujii et al. 2021)

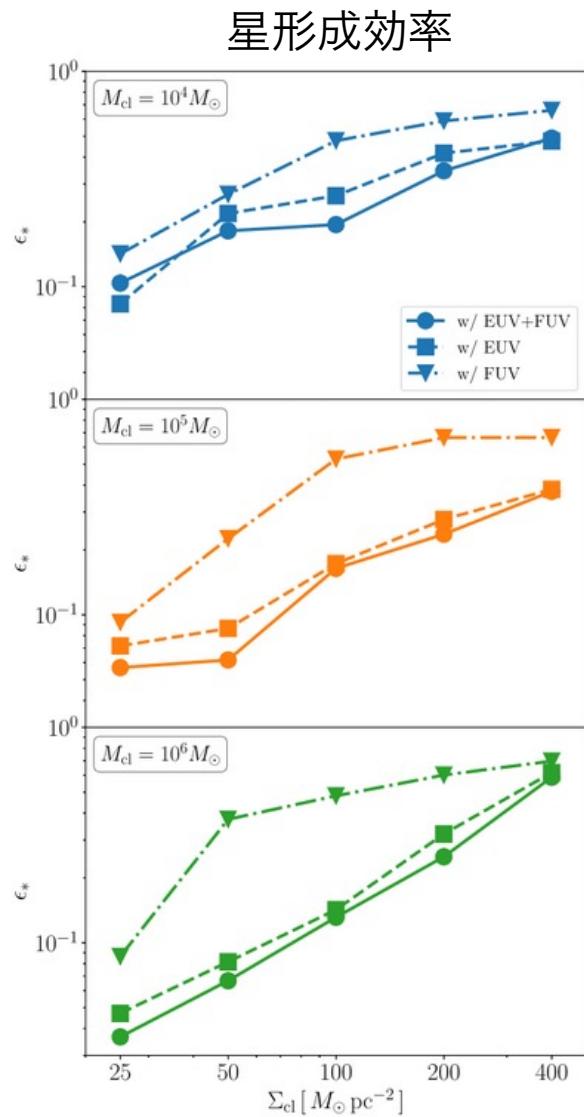


(HF et al. 2020)

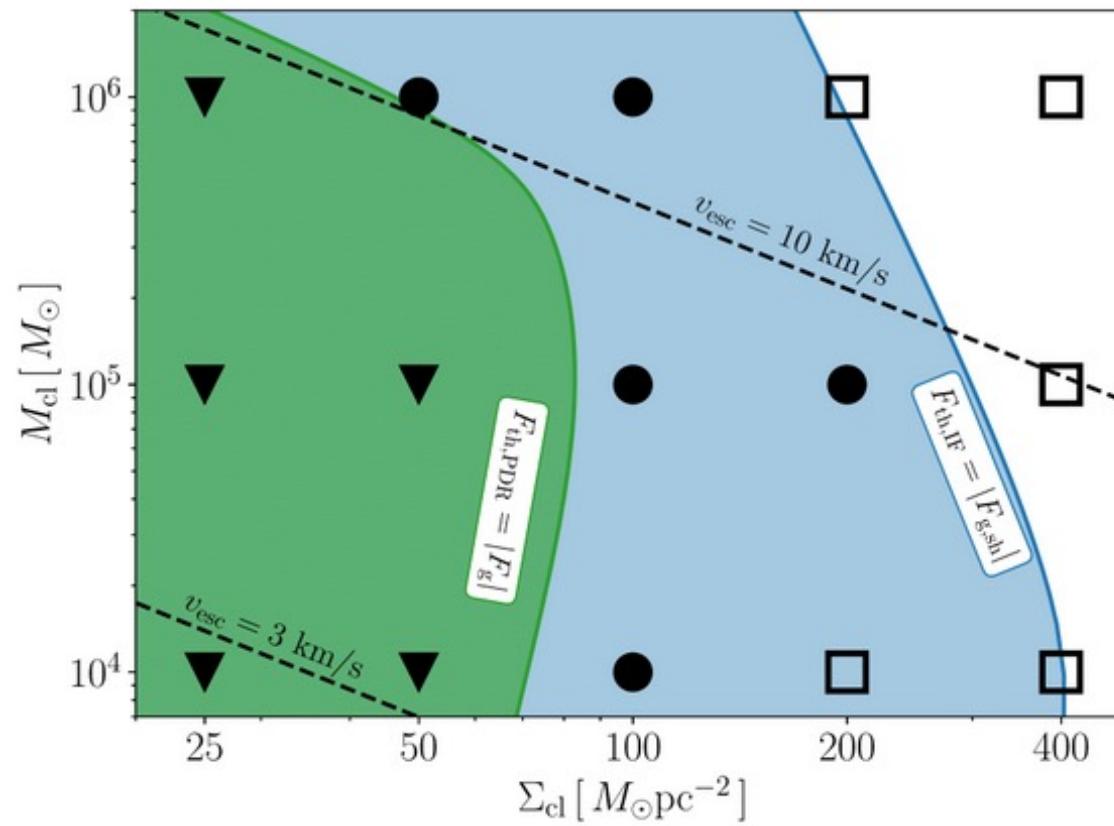
# FUV フィードバック

FUVフィードバックはより広範囲の星形成を抑制する可能性も

(e.g., Inutsuka+2015)



緑: FUV & EUV 有効

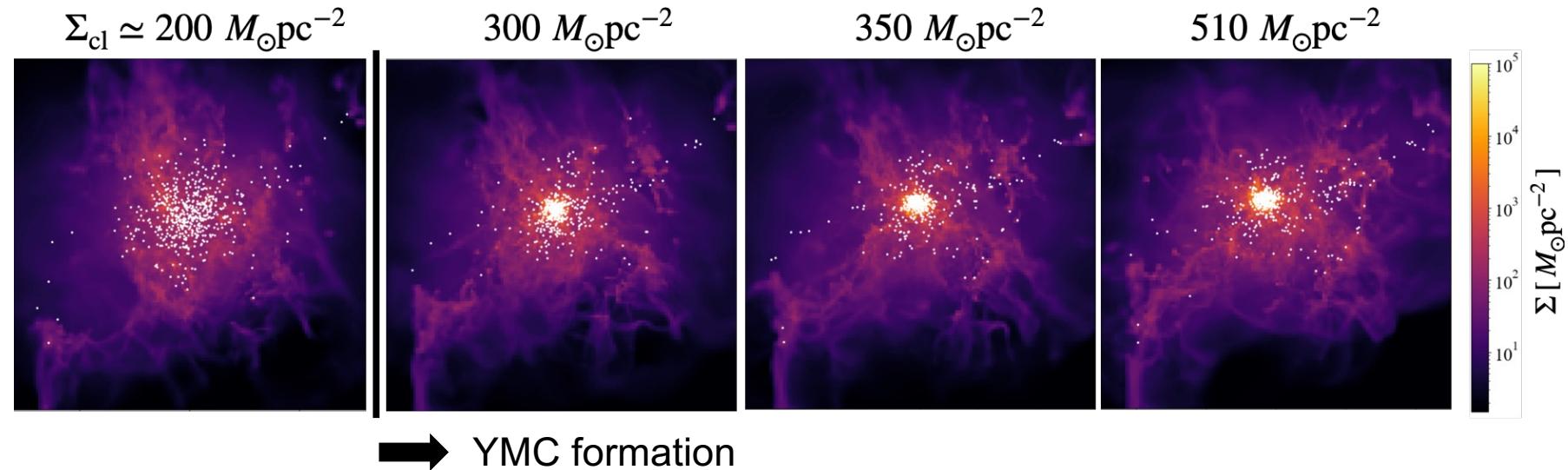


(HF et al. 2022)

# 電離フィードバックの無効化

雲質量:  $M_{\text{cl}} = 10^6 M_{\odot}$ , 太陽金属量における星団形成シミュレーション

(HF and Yajima 2021)

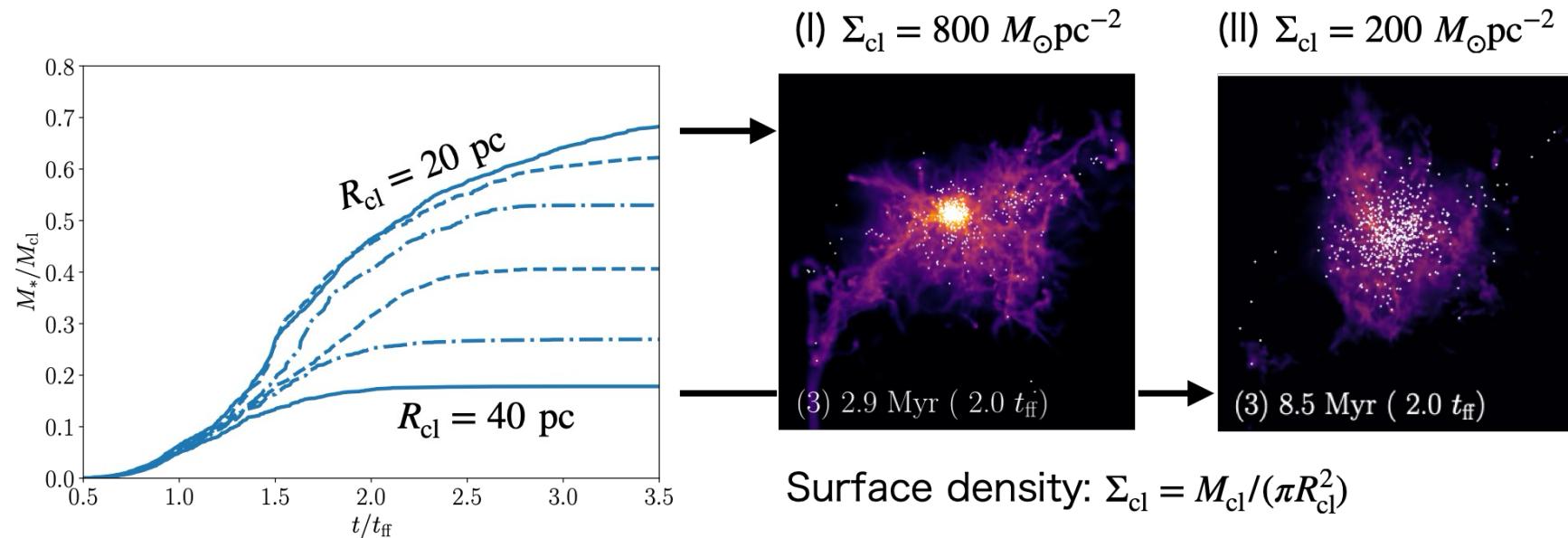


電離フィードバックが効く/効かないで誕生する星団の密度が大きく異なることを発見

# 高密度星団形成

(HF and Yajima 2021)

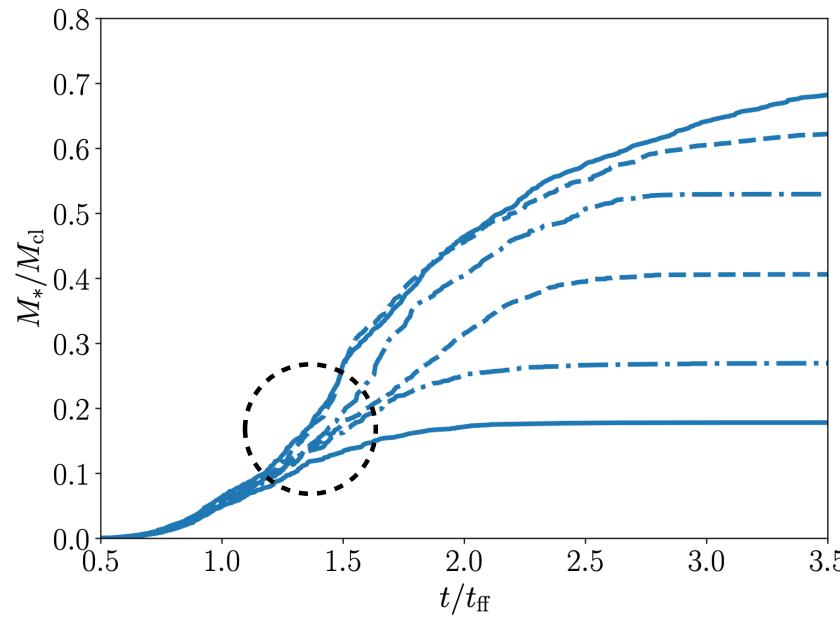
星質量の進化 ( $M_{\text{cl}} = 10^6 M_{\odot}$  and  $R_{\text{cl}} = 20, 25, 30, 32.5, 35, 40 \text{ pc}$ ).



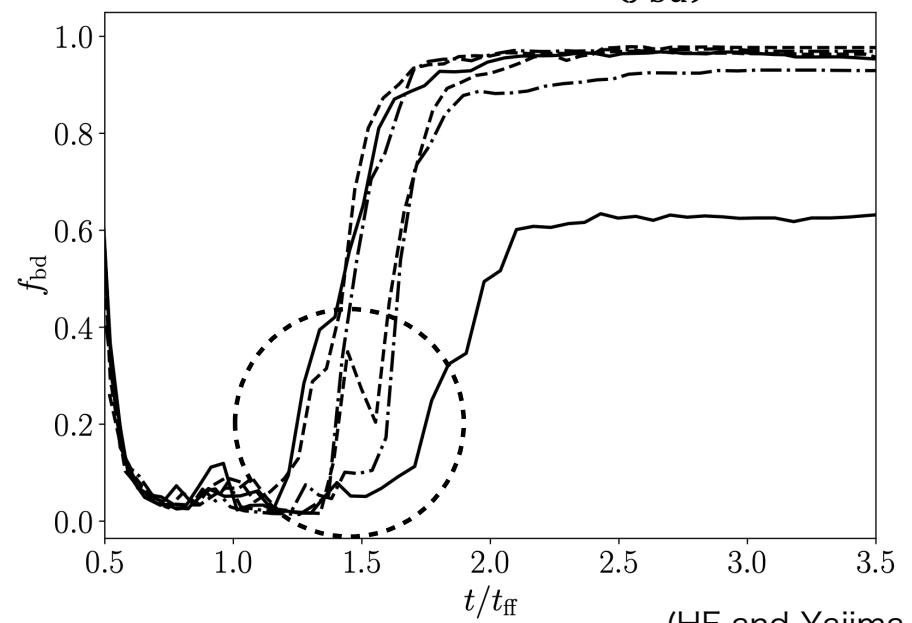
星形成効率が15%程度に達すると、高密度星団形成では星形成率が飛躍的に上昇する。

# 重力束縛度

星質量の時間進化



重力束縛度の進化 ( $f_{\text{bd}}$ )



(HF and Yajima 2021)

重力束縛度:

$$f_{\text{bd}} = (\text{重力的に束縛された星質量}) / (\text{総星質量})$$

重力束縛度は急激に上昇する。

重力的に束縛された星団となるために必要な星質量:  $M_*/M_{\text{cl}} \gtrsim 0.1 - 0.3$ .

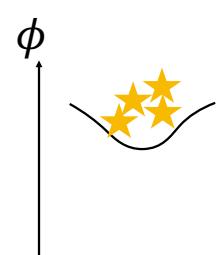
(Baumgardt & Kroupa 2007)

# 高密度星団形成のメカニズム

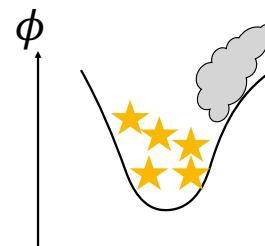
(a) 雲の進化



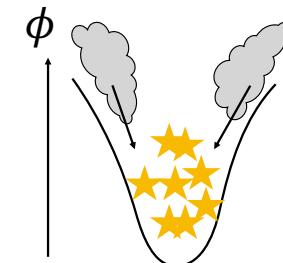
(b) 重力ポテンシャルの様子



(1) 星形成の開始



(2) 星々が互いに重力的に束縛し始める



(3) 熱圧で押し切れない場合、暴走的に星形成が進行する

高密度星団形成条件:

HII領域の膨張速度 ( $v_{\text{sh}}$ ) < 星団からの脱出速度( $v_{\text{esc}}$ )

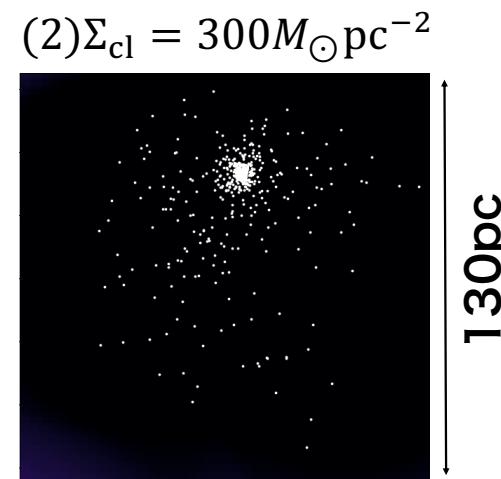
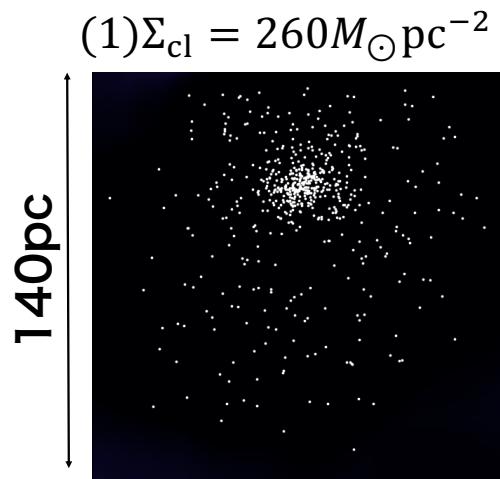
# 高密度星団形成の条件

HII領域の膨張速度 ( $v_{\text{sh}}$ ) < 星団からの脱出速度( $v_{\text{esc}}$ )

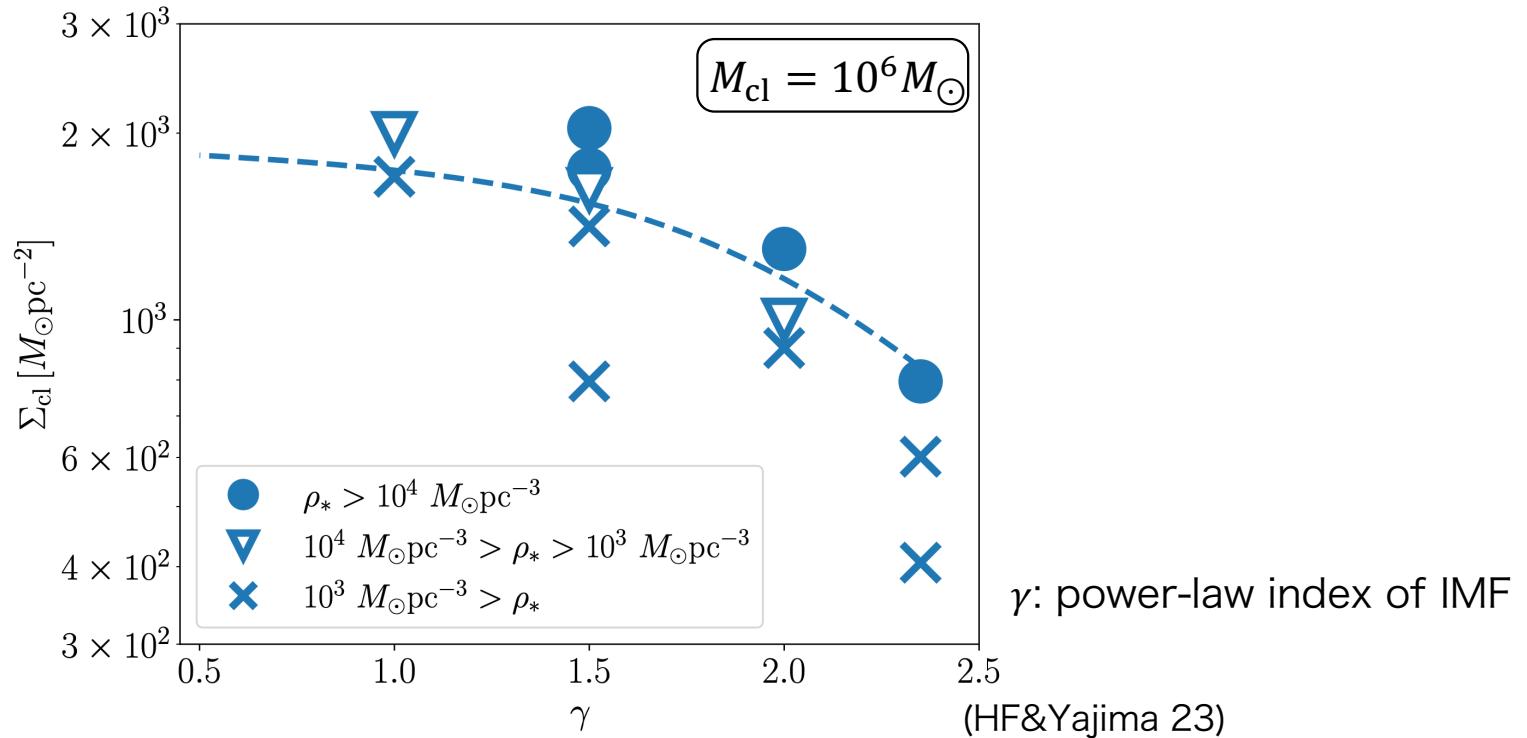
$$v_{\text{sh}} < v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM_{\text{core}}}{R_{\text{core}}}}$$

星団の重力速度の開始時の星形成率  $\epsilon_* \sim 0.1$  と重力束縛度  $f_{\text{bd}} \sim 0.1$   
質量:  $M_{\text{core}} \sim 0.1 \times 0.1 M_{\text{cl}}$  , 半径:  $R_{\text{core}} \sim 0.1 R_{\text{cl}}$

→  $\Sigma_{\text{cl}} > \Sigma_{\text{th}} \simeq 280 M_{\odot} \text{pc}^{-2} \left( \frac{\epsilon_{\text{ff}}}{0.1} \right)^{2/5} \left( \frac{M_{\text{cl}}}{10^6 M_{\odot}} \right)^{-1/5} \left( \frac{T_{\text{i}}}{8000 \text{K}} \right)^{28/25}$



## Conditions for compact star cluster formation with top-heavy IMFs: $Z = 1e-3Z_{\text{sun}}$



- Threshold surface density:

$$\Sigma_{\text{cl}} > \Sigma_{\text{thr}} = 670 M_{\odot} \text{pc}^{-2} \left( \frac{M_{\text{cl}}}{10^6 M_{\odot}} \right)^{-1/5} \left( \frac{s_*}{10^{47} M_{\odot}^{-1} s^{-1}} \right)^{2/5} \left( \frac{T_{\text{HII}}}{2.5 \times 10^4 \text{K}} \right)^{28/25}$$

$s_*$ : emissivity of ionizing photons per stellar mass,  $M_{\text{cl}}$ : cloud mass,  $T_{\text{HII}}$ : temperature of ionizing gas

# 星団の種類

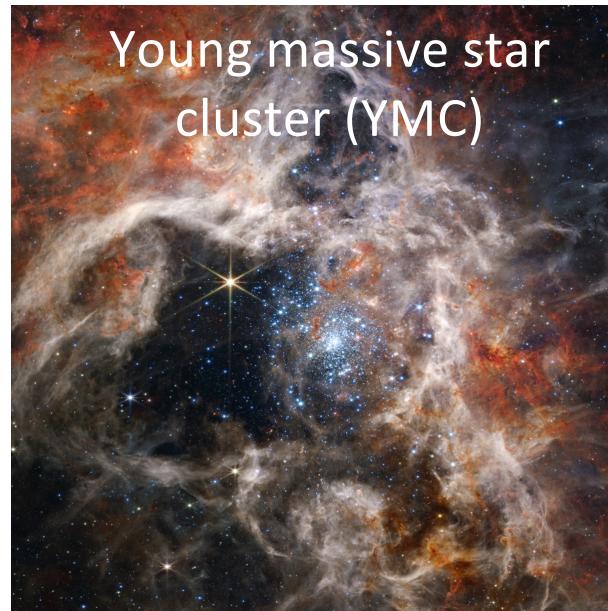
Open Clusters (OC)



若い ( $\lesssim 0.3$ Gyr)

低密度 ( $\lesssim 10^3 M_\odot \text{pc}^{-3}$ )

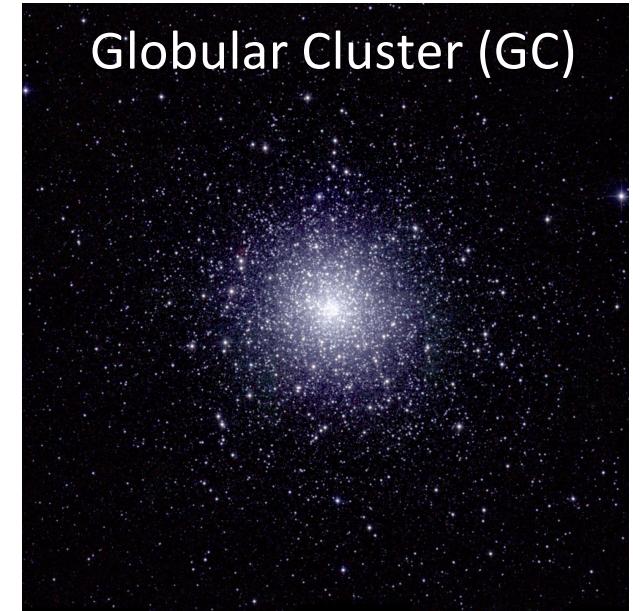
Young massive star cluster (YMC)



若い (a few 10Myr)

高密度 ( $\gtrsim 10^3 M_\odot \text{pc}^{-3}$ )

Globular Cluster (GC)

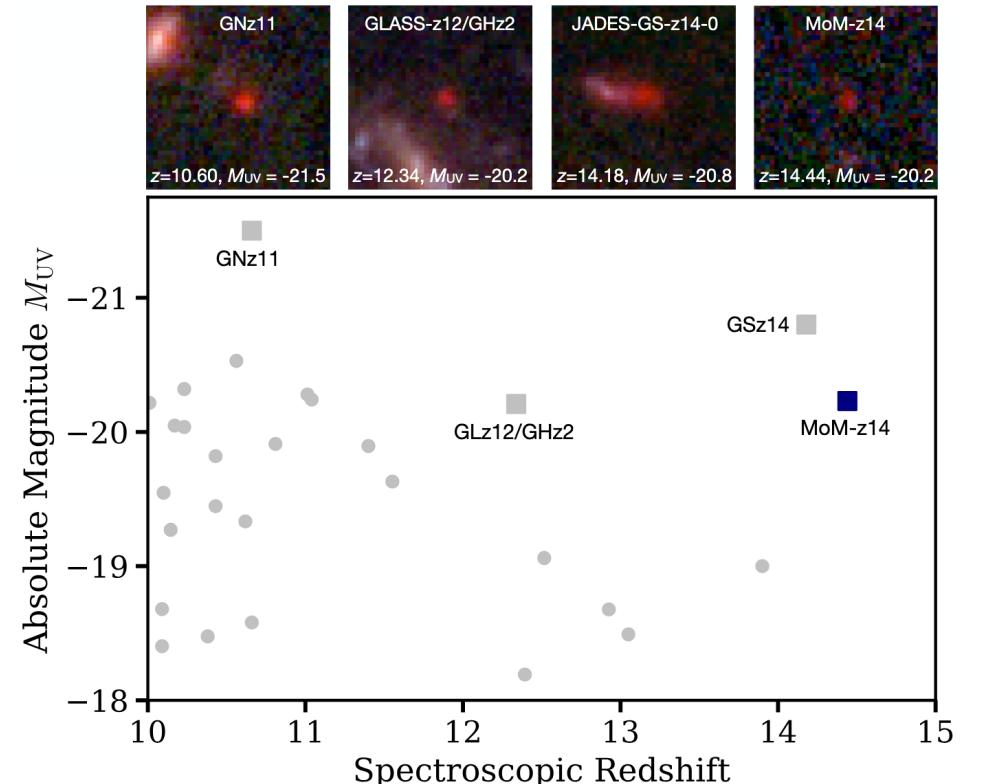
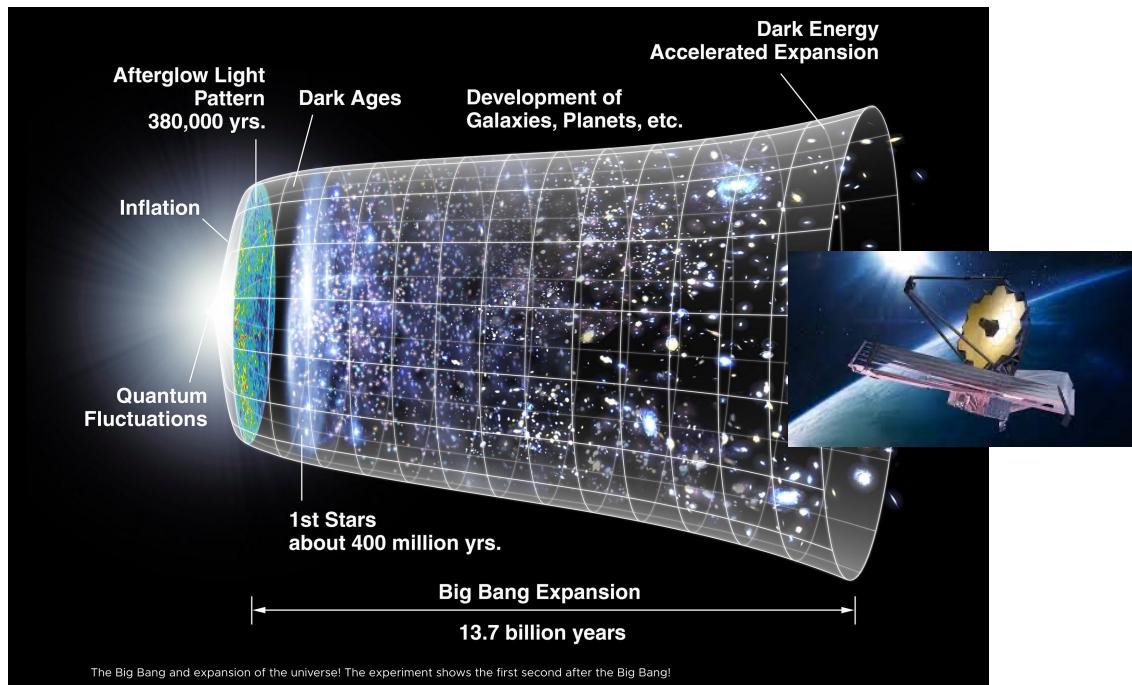


球状星団 ( $\gtrsim 10$ Gyr)

高密度 ( $\gtrsim 10^3 M_\odot \text{pc}^{-3}$ )

# JWSTによる高赤方偏移銀河における 星形成領域の発見

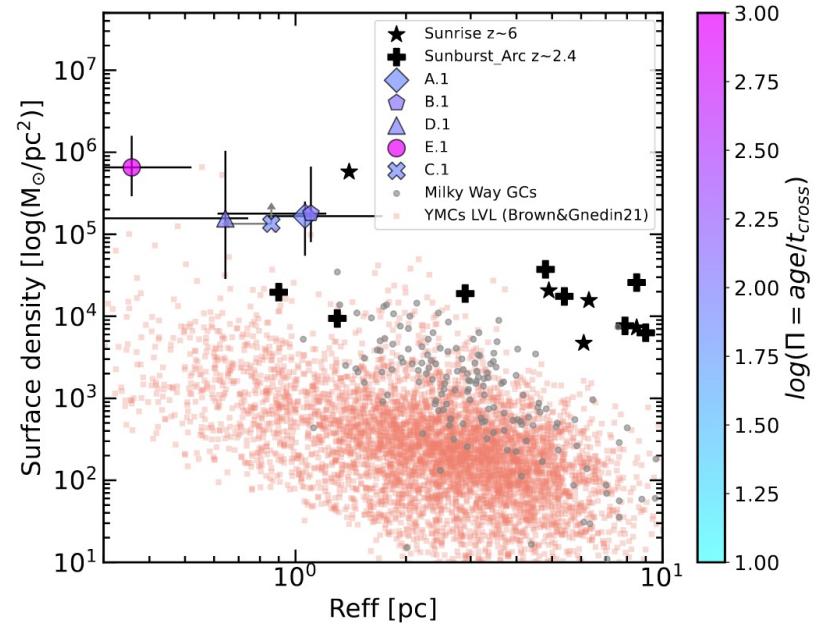
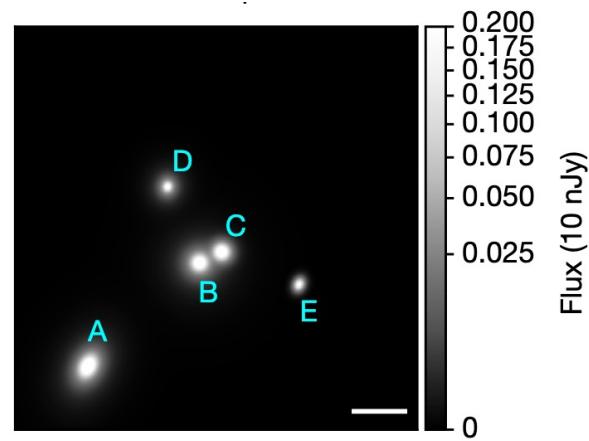
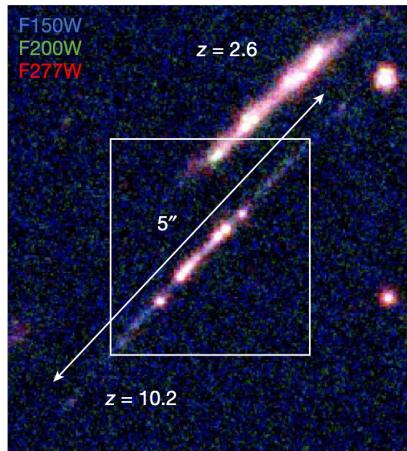
# JWST: 高赤方偏移銀河の発見



(Naidu+25)

赤方偏移 10 を超える銀河が多数発見される時代が到來した。

## コンパクト星形成領域の発見 ( $z \sim 10.2$ ):



- 球状星団に匹敵する高密度星形成領域が発見される (pc スケール)

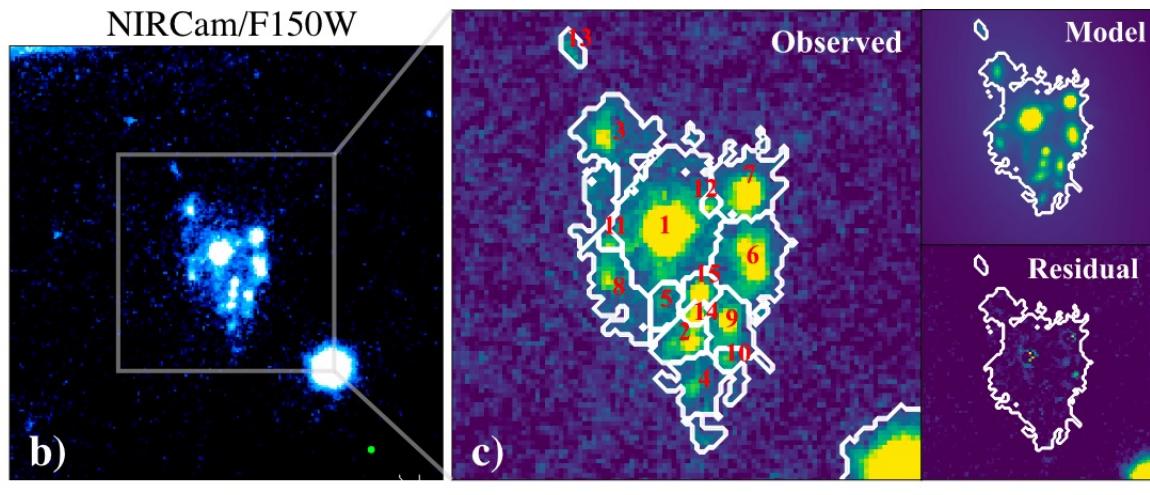
(Adamo+24)

- 星団内部に母銀河の30%以上の星がすでに含まれている

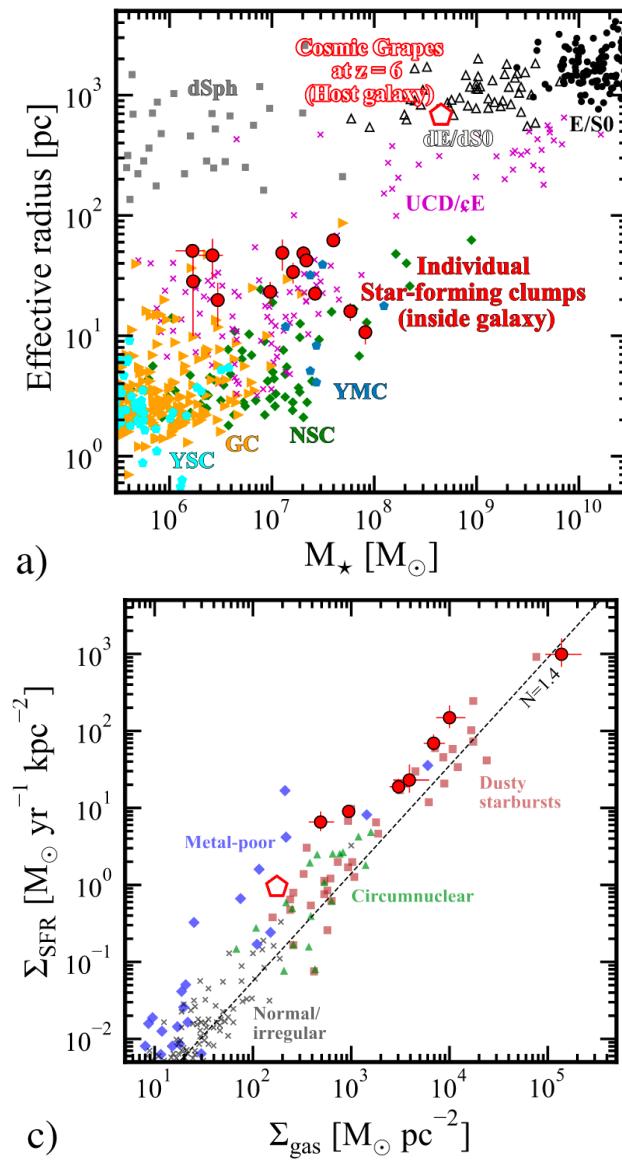
=> 高密度星団が高赤方偏移銀河進化の主な星形成に寄与

# クランプを複数持つ銀河の発見

The Cosmic Grape (z=6)

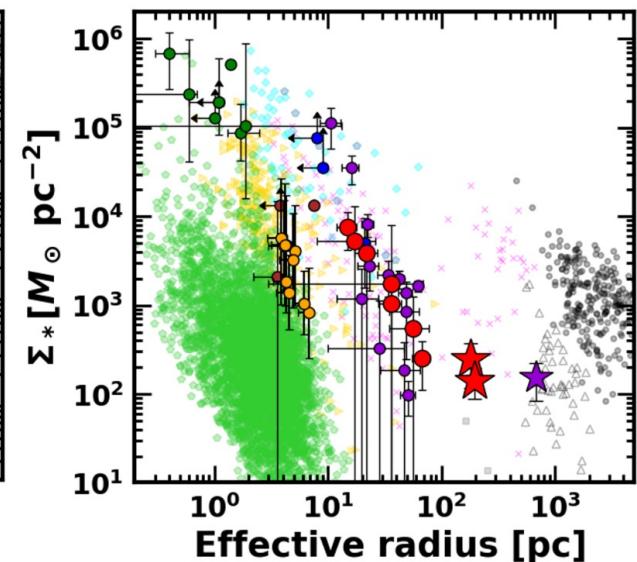
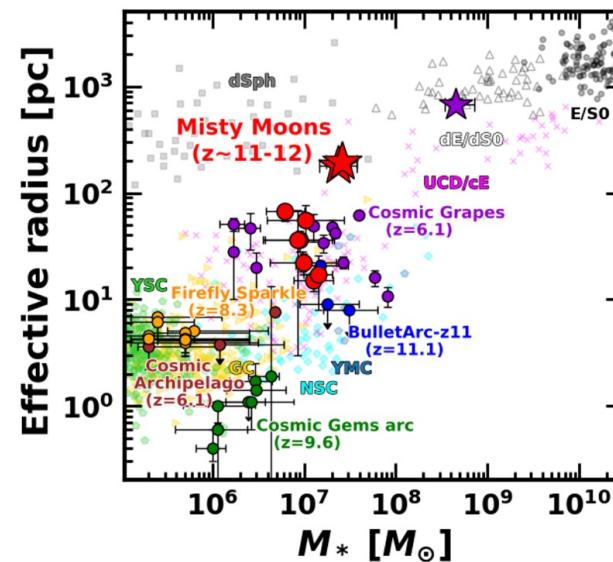
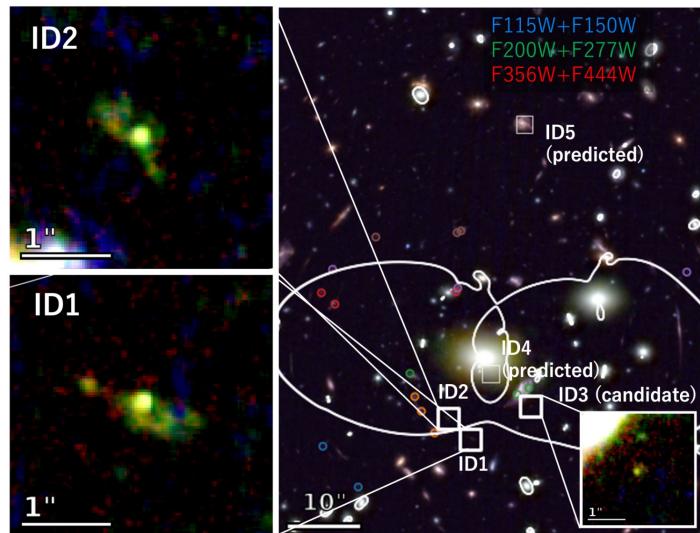


(Fujimoto+24)



# クランプを複数持つ銀河の発見

Misty Moons (z=11-12)

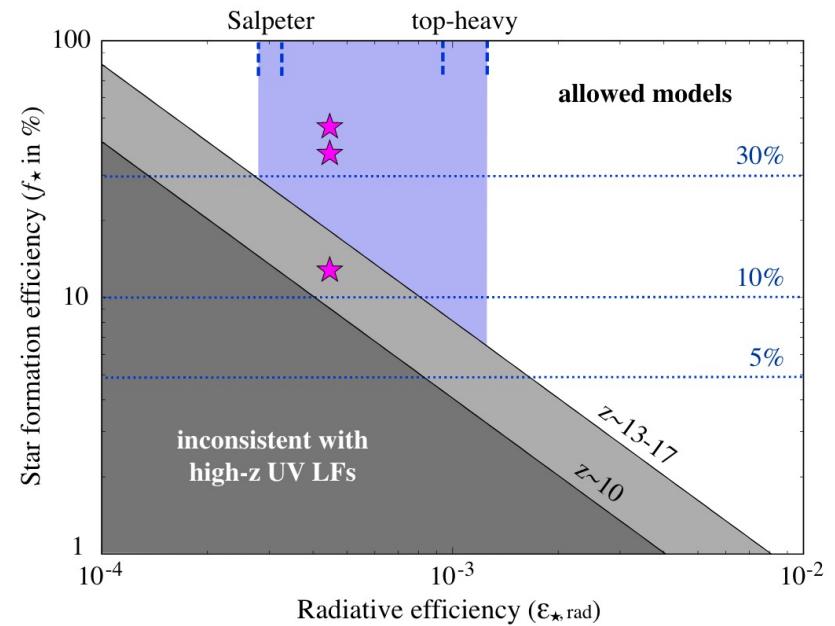
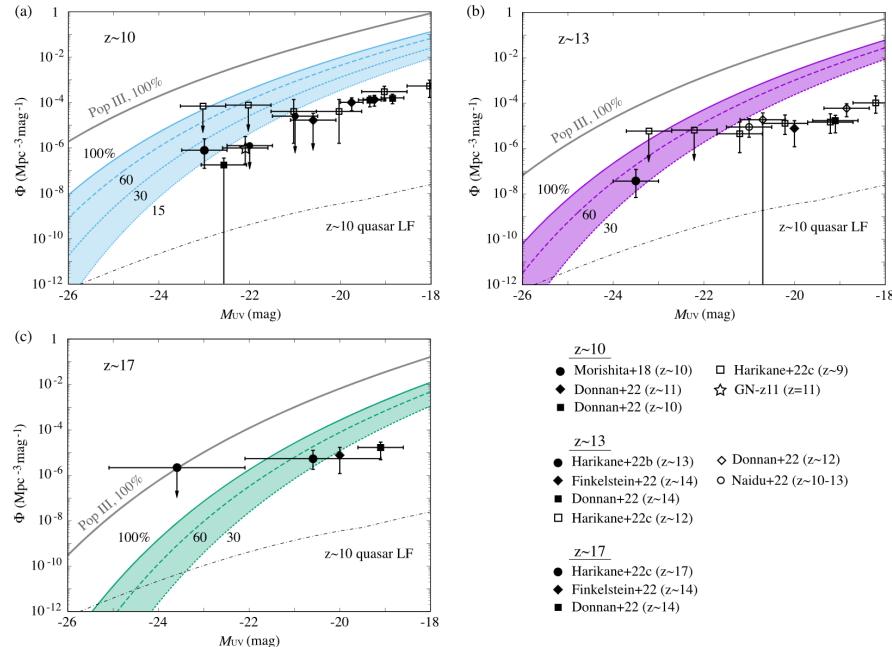


(Nakane+25)

高赤方偏移銀河におけるクランプ形成 => 石田さんの講演

# 高赤方偏移銀河における高星形成効率

## Luminosity functions & star formation efficiencies



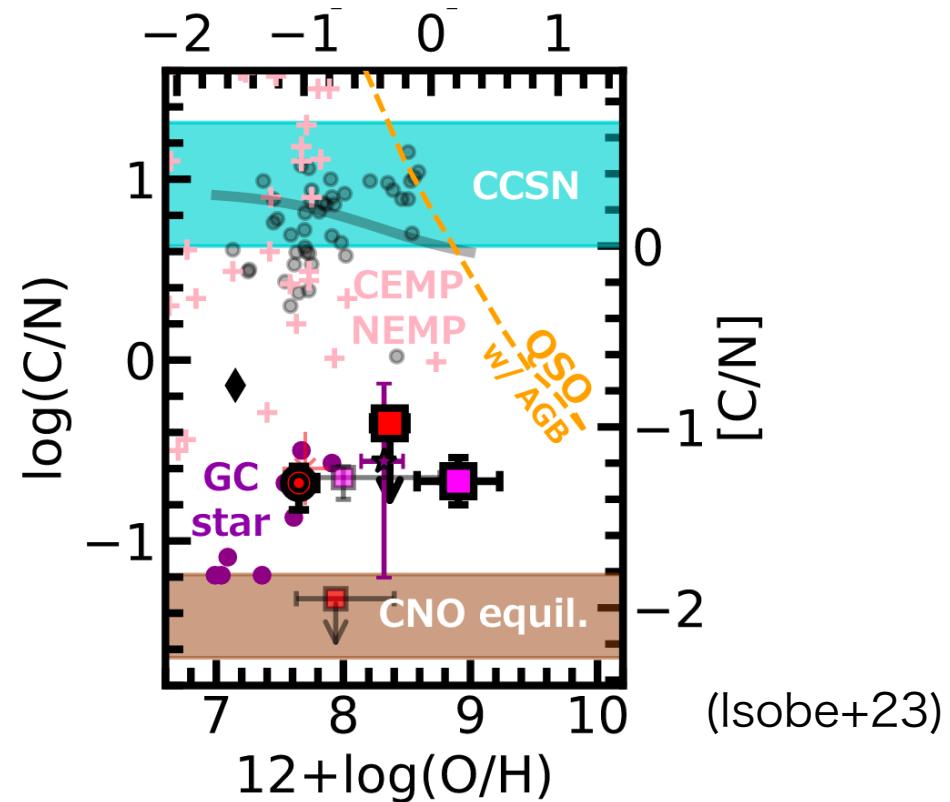
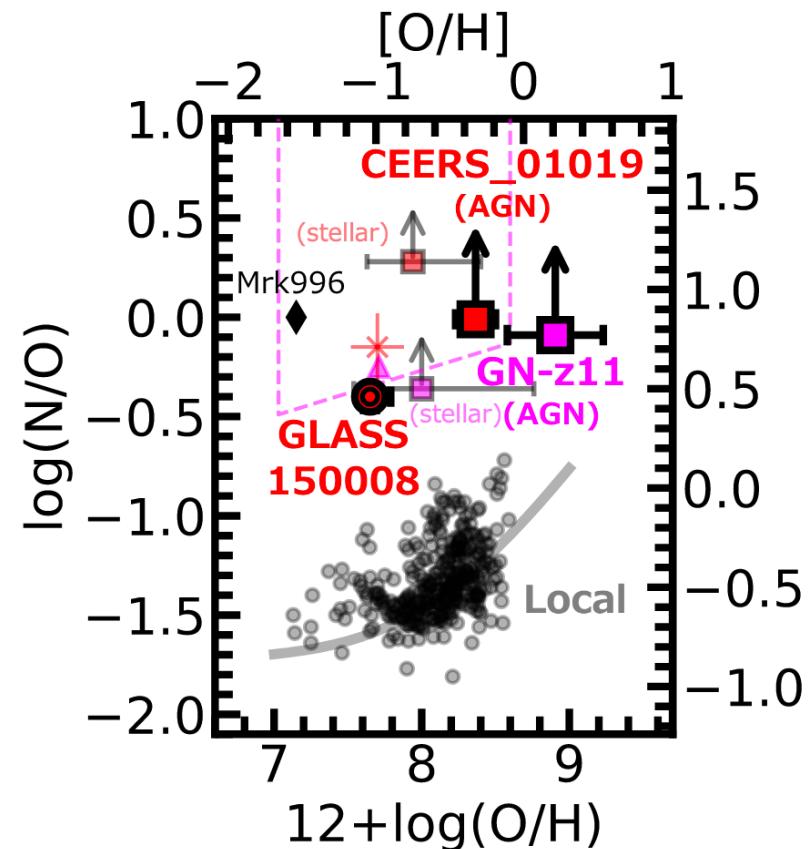
(Inayoshi+22, updated by Harikane+23)

The lower bound of radiative efficiency and star formation efficiencies are derived with the UV luminosity functions.

High-star formation efficiencies ( $>5\%$ ) or top-heavy IMF is realized (at  $z \gtrsim 12$ ).

(Harikane+23, Harikane+24)

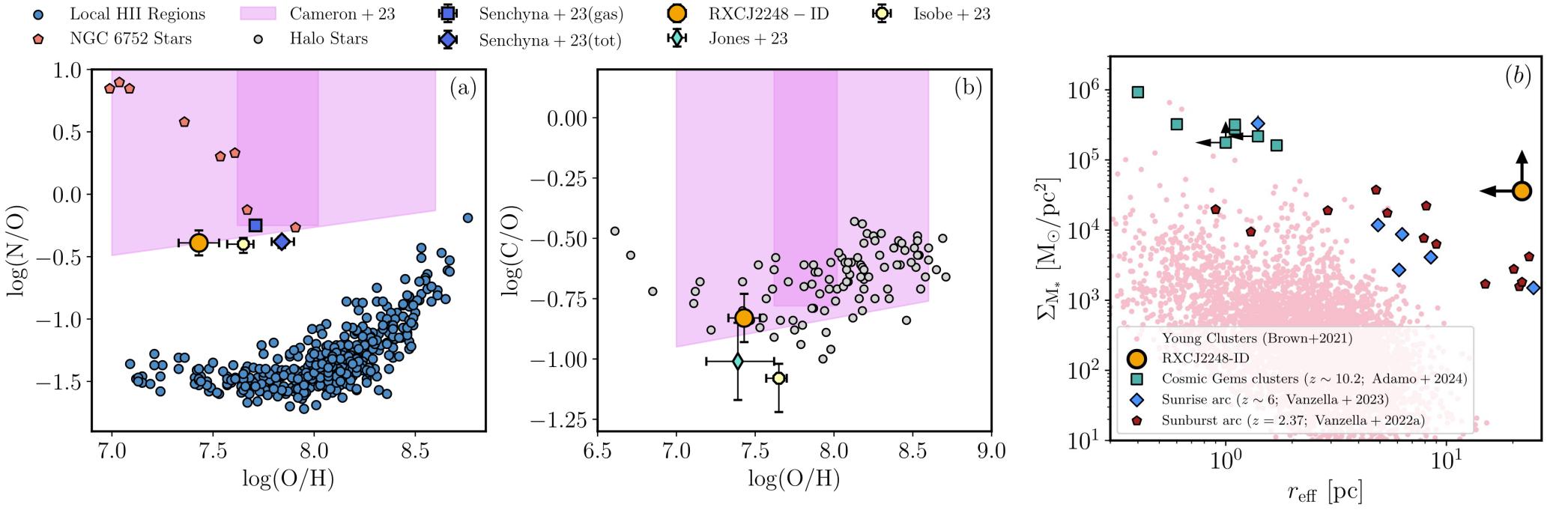
# 窒素過剰銀河の発見



(e.g., Bunker+23, Cameron+23, Senchyna+23)

(Isobe+23)

# 球状星団形成との関連



発見された銀河の[N/O]は球状星団のものと類似

(e.g., GN-z11, Cameron+23, Senchyna+23)

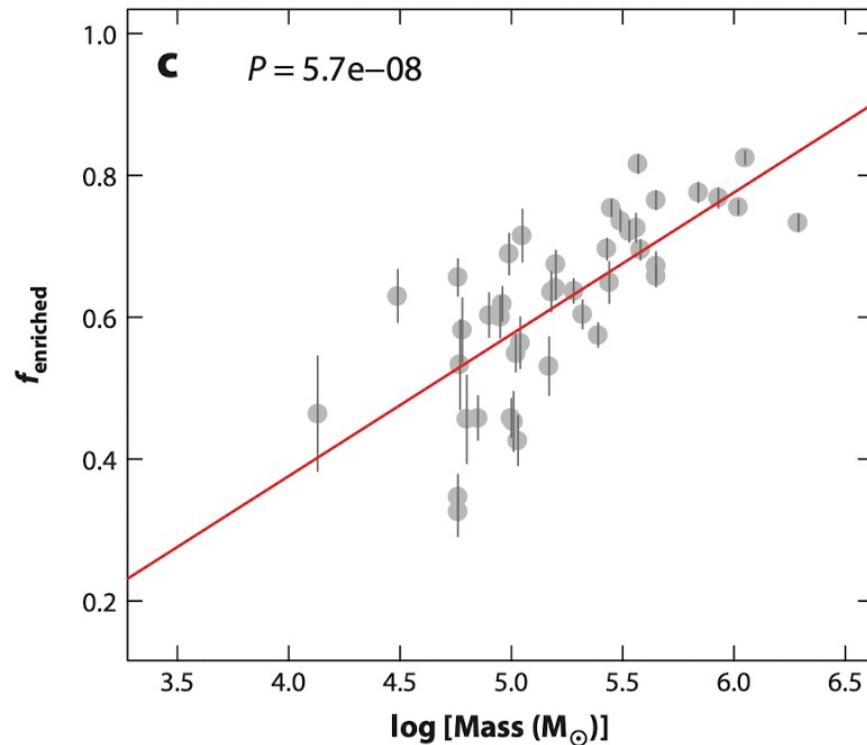
pc スケールでの窒素過剰領域も発見されている (< 20 pc)

(e.g., Adamo+24, Topping+24)

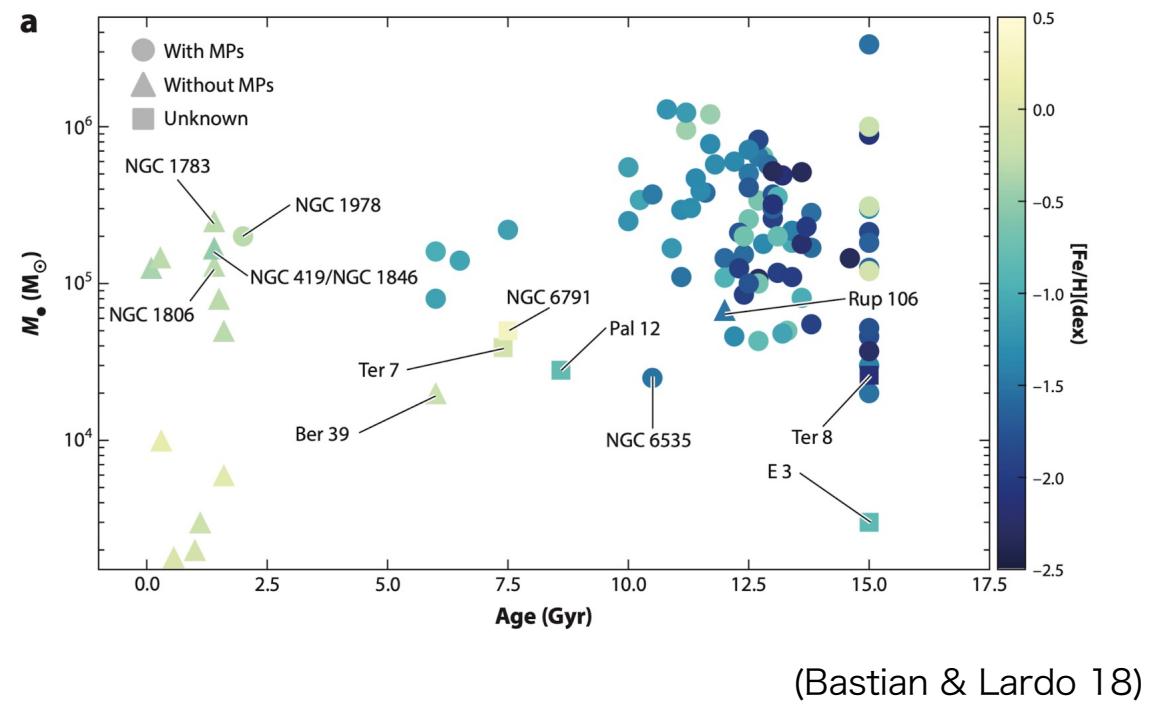
(Topping+24)

# 球状星団の第二世代星

## 第二世代星の質量比



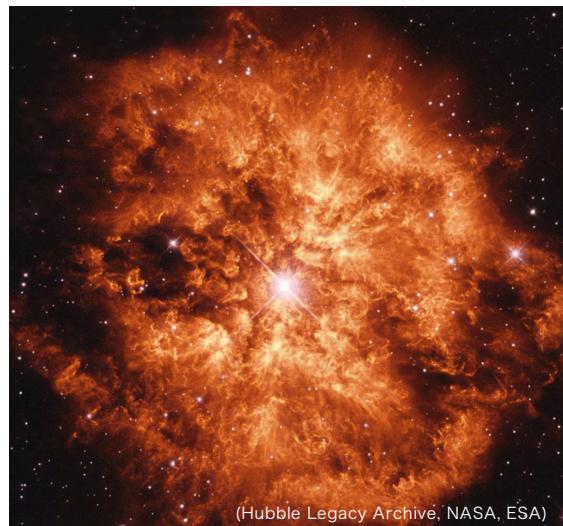
## 年齢と第二世代星を保持するかの関係



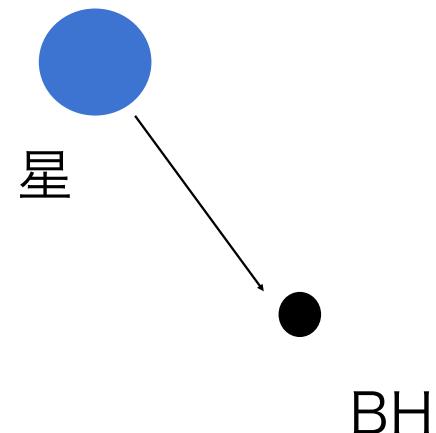
# 窒素の供給源の候補

(Watanabe+23)

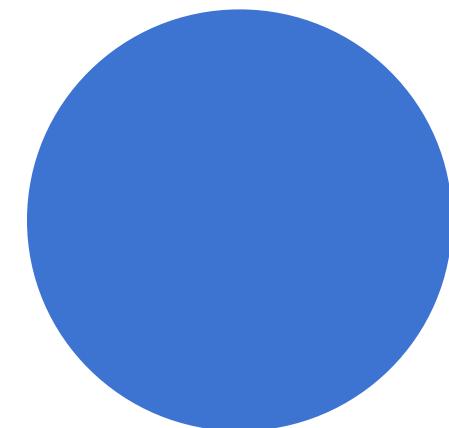
① Wolf-Rayet star



② Tidal disruption event



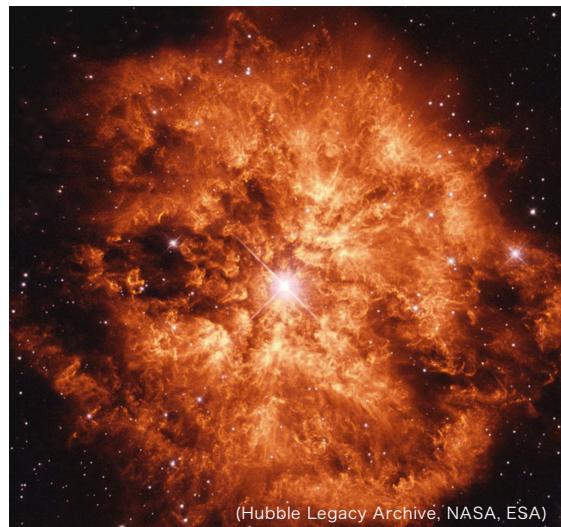
③ Supermassive star



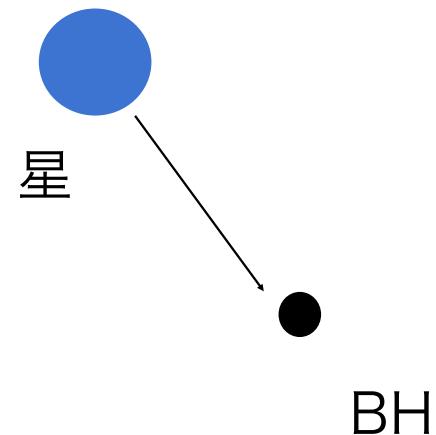
# 窒素の供給源の候補

(Watanabe+23)

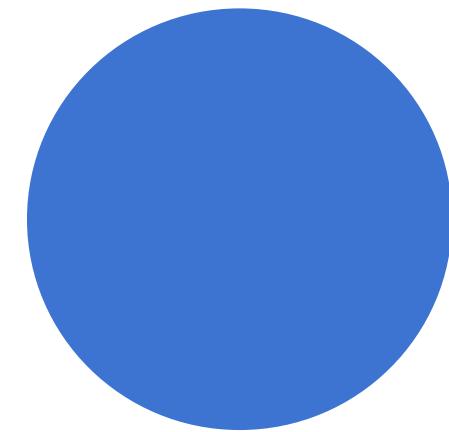
① Wolf-Rayet star



② Tidal disruption event



③ Supermassive star

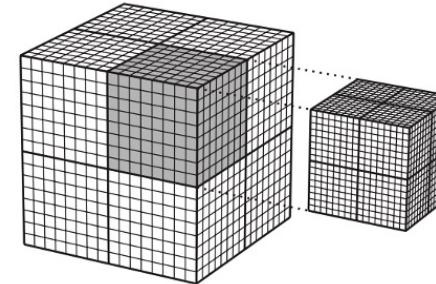


# Models: (+= Stellar wind + SNe)

## Self-gravitational AMR (M)HD + Sink particles



(Matsumoto 2007, 2015)



## Non-Equilibrium chemistry

H, H<sub>2</sub>, H<sup>+</sup>, H<sup>-</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup>, e, CII, OI, OII, OIII, CO

## Heating & Cooling

Photoionization & photodissociation heating

Line cooling (CII, CO, OI, OII, OIII), dust cooling

Chemical heating & cooling

(Sugimura et al. 2020, CO network: Nelson & Langer 1997)

## Stellar evolution

Metal yield from SNe & stellar wind (He, N, C, O)

Stellar wind & SNe feedback

Direct collapse ( $> 25M_{\odot}$ ) (Limongi & Chieffi 2018)

## Mini star particles

## Radiation transfer with moment method (M1-closure, reduced speed of light)

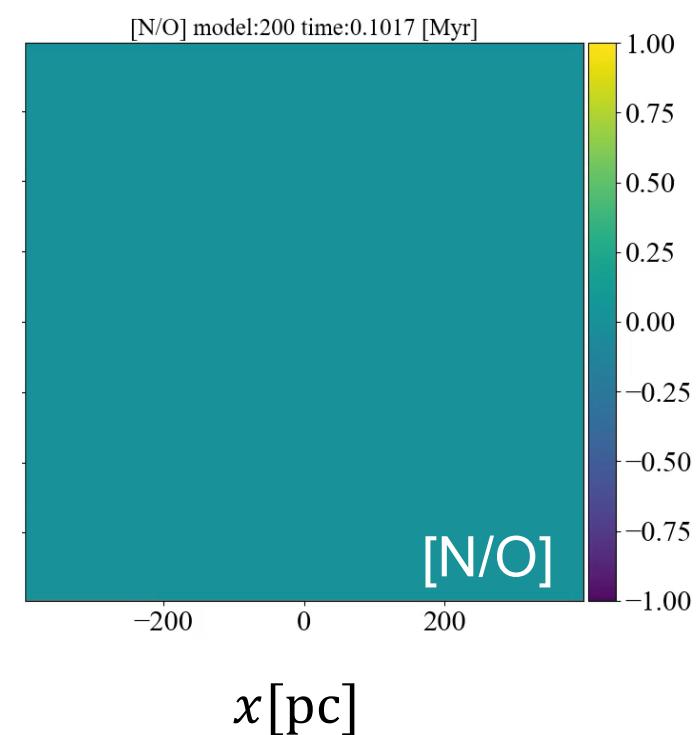
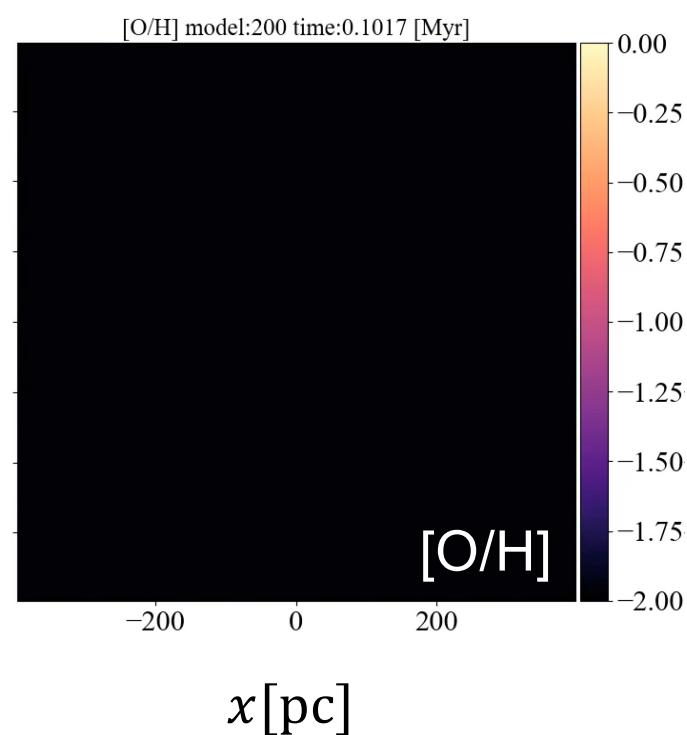
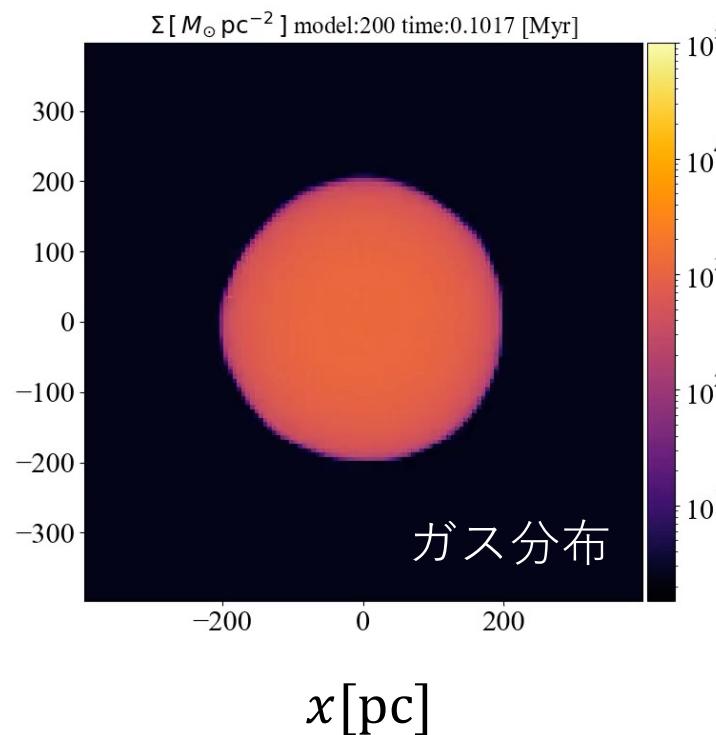
EUV photons

FUV photons (H<sub>2</sub>, CO photodissociation)

Dust thermal emission

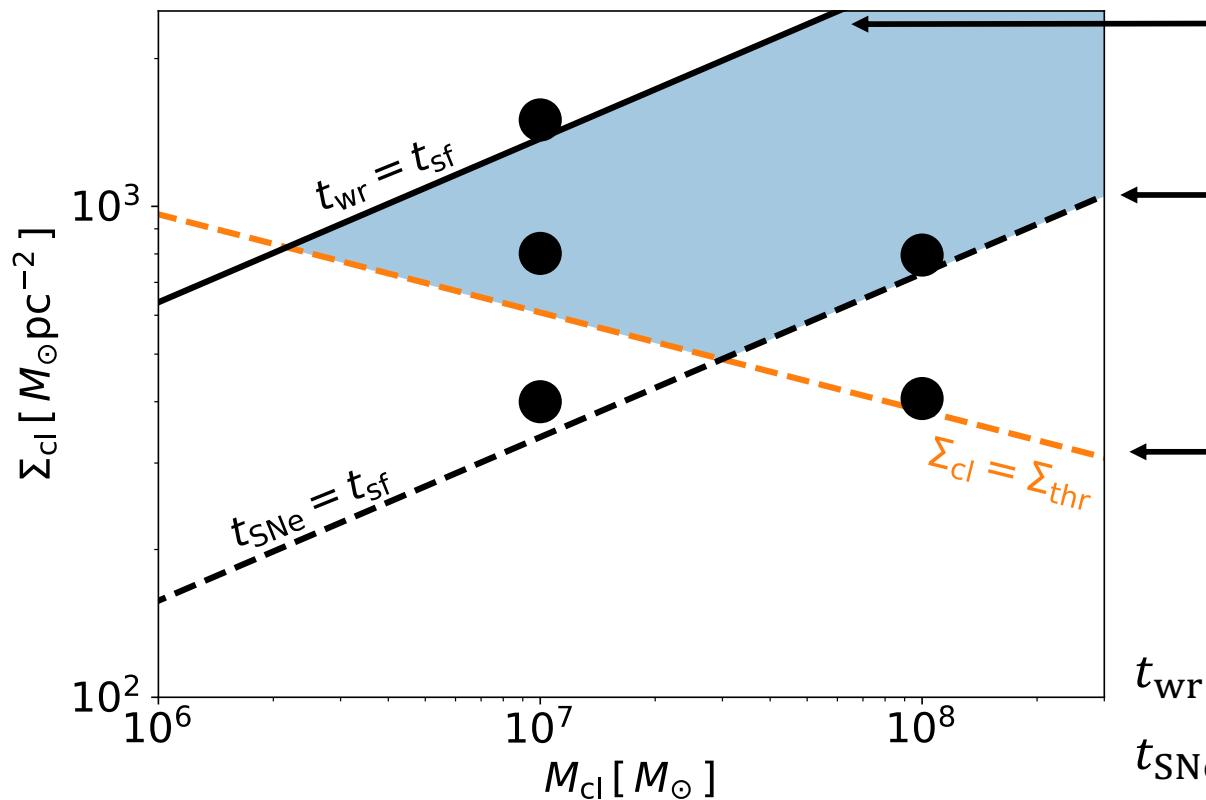
(Rosdahl+13, HF&Yajima 21)

雲質量:  $10^8 M_\odot$ , 半径: 200pc, 金属量:  $10^{-2} Z_\odot$



# 窒素過剰星団の形成条件

窒素過剰な星団が誕生する雲の条件



黒点: シミュレーションしたパラメータ

② Wolf-Rayet 星への進化

③ SNeの発生

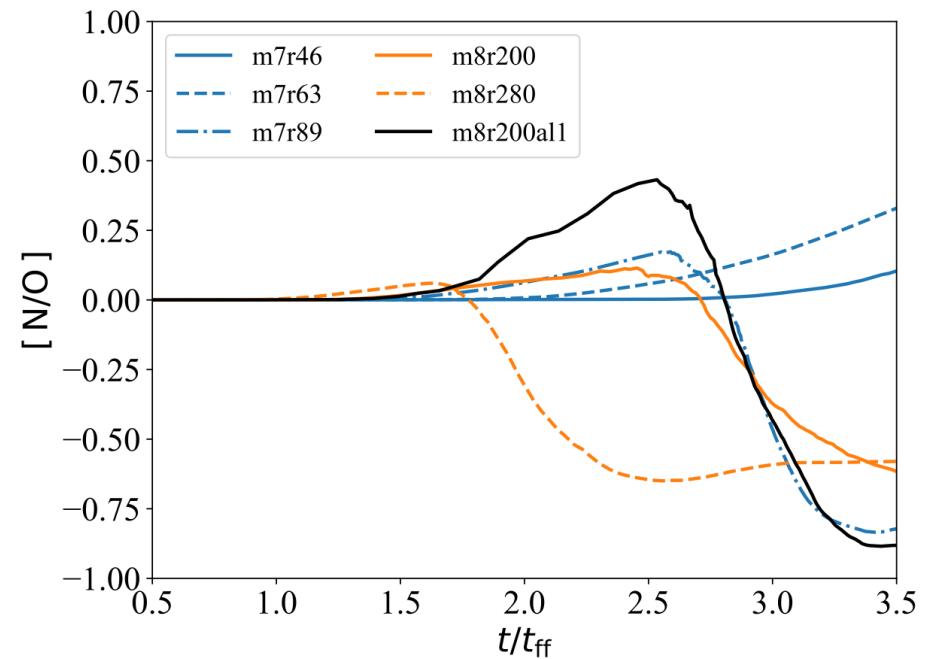
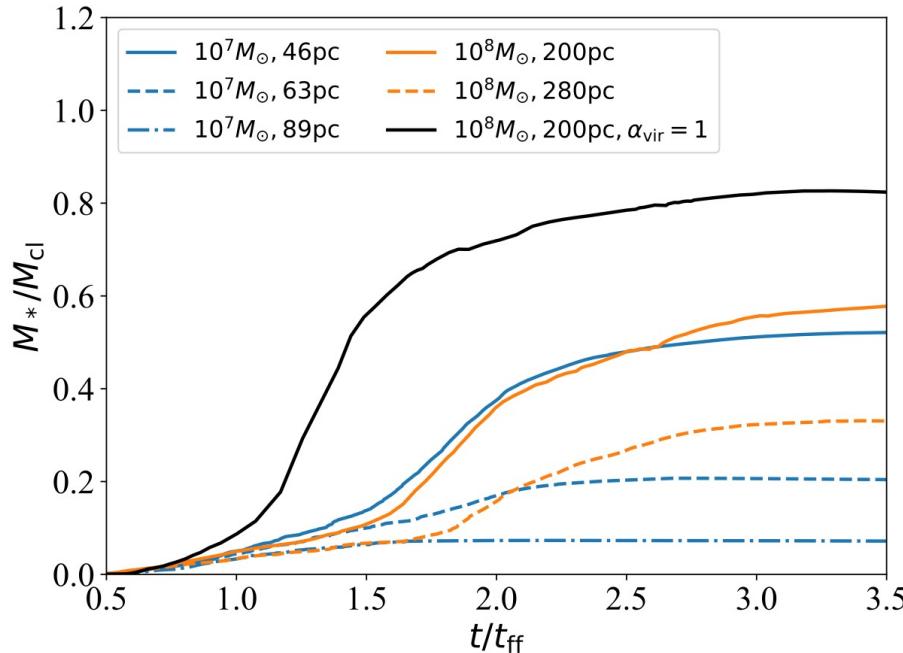
① 高密度星団形成

$t_{\text{wr}}$ : timescale of WR stars ( $\sim 3 \text{Myr}$ )

$t_{\text{SNe}}$ : timescale of SNe ( $\sim 10 \text{Myr}$ )

$t_{\text{ff}}$ : free-fall times of clouds

# 結果:



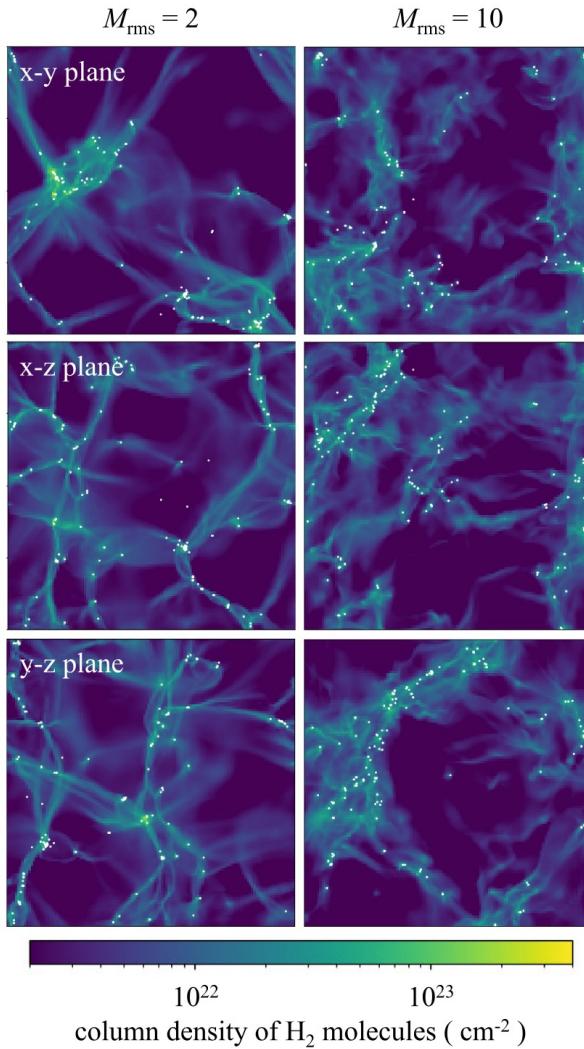
星風により窒素過剰なガスを生成することは可能である。

発見されたほど全体では窒素過剰になっていない。

=>他のシナリオの導入 or 窒素過剰な領域を選択的に観測している可能性などの検証が必要

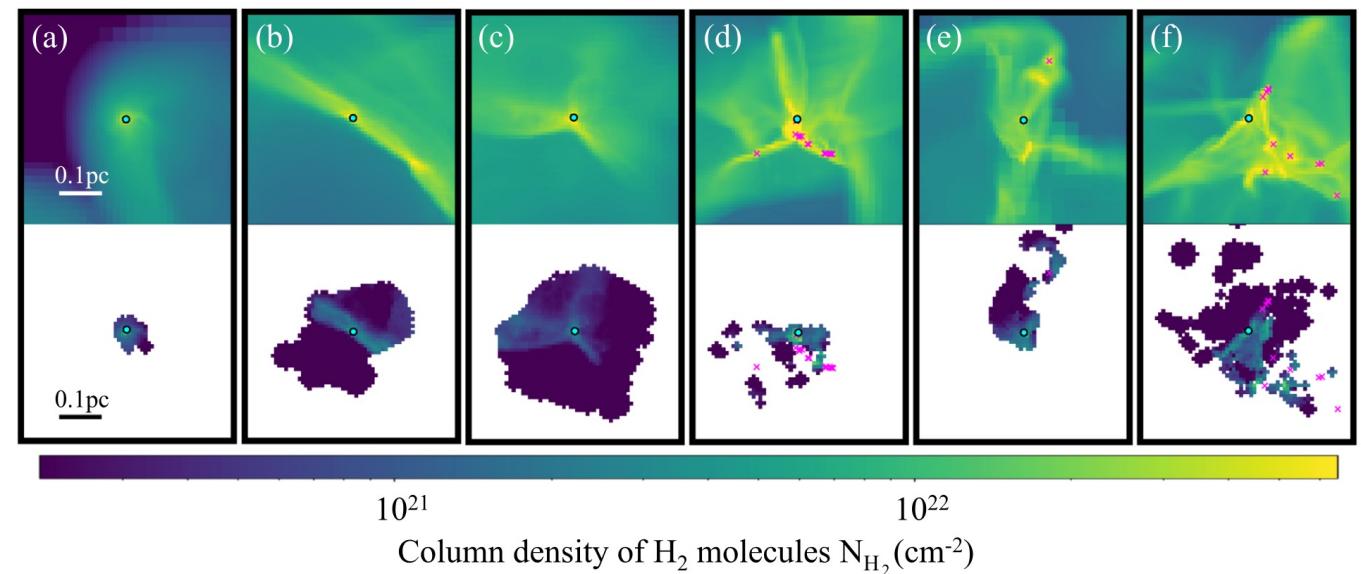
星団と星・惑星形成の接続へむけて

# 星形成コア形成



(Nozaki, HF, Tokuda, Machida, 2025)

トレーサーで真のコアを探す:

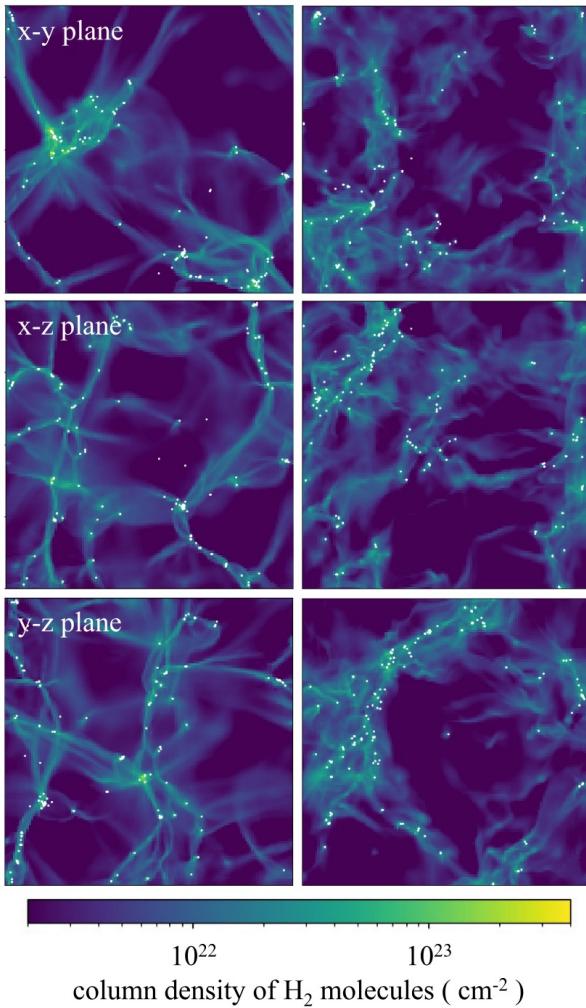


## 星形成コア形成

$$M_{\mathrm{rms}} = 2$$

$$M_{\mathrm{rms}} = 10$$

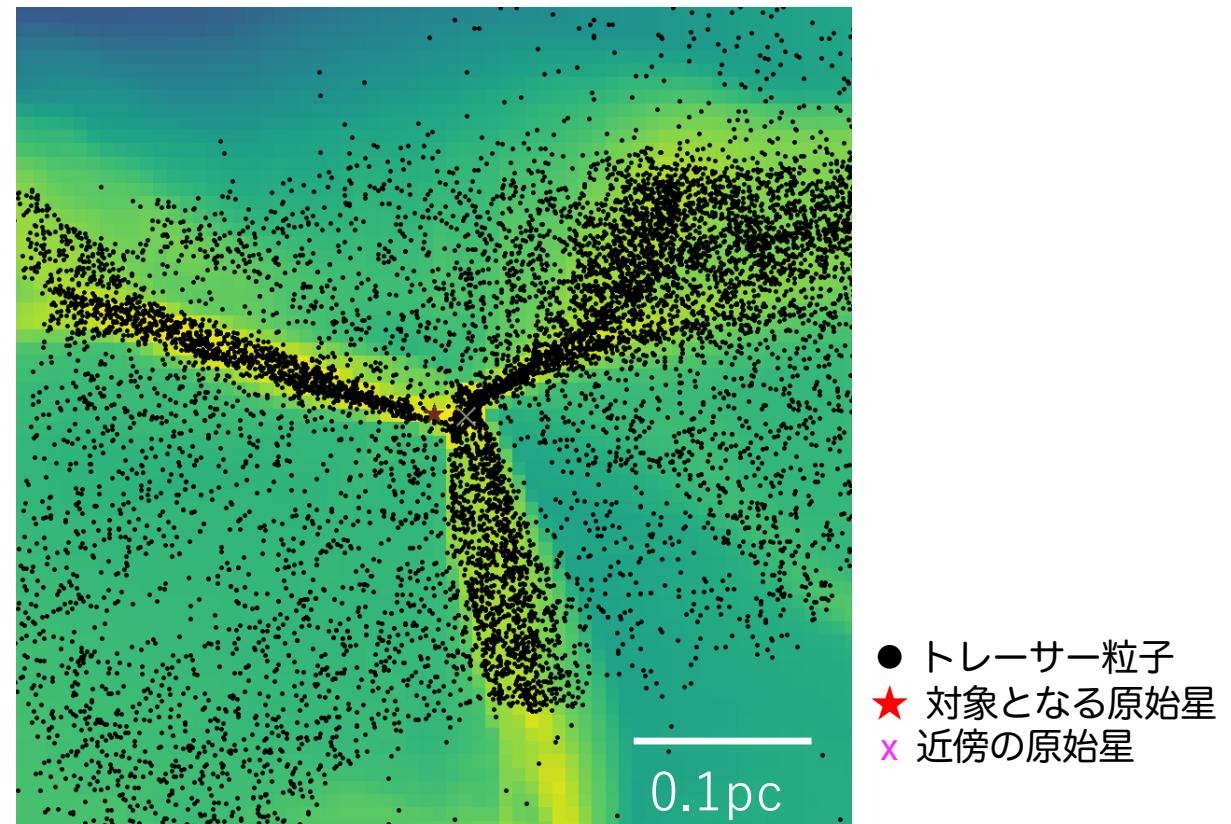
### x-y plane



(Nozaki, HF, Tokuda, Machida, 2025)

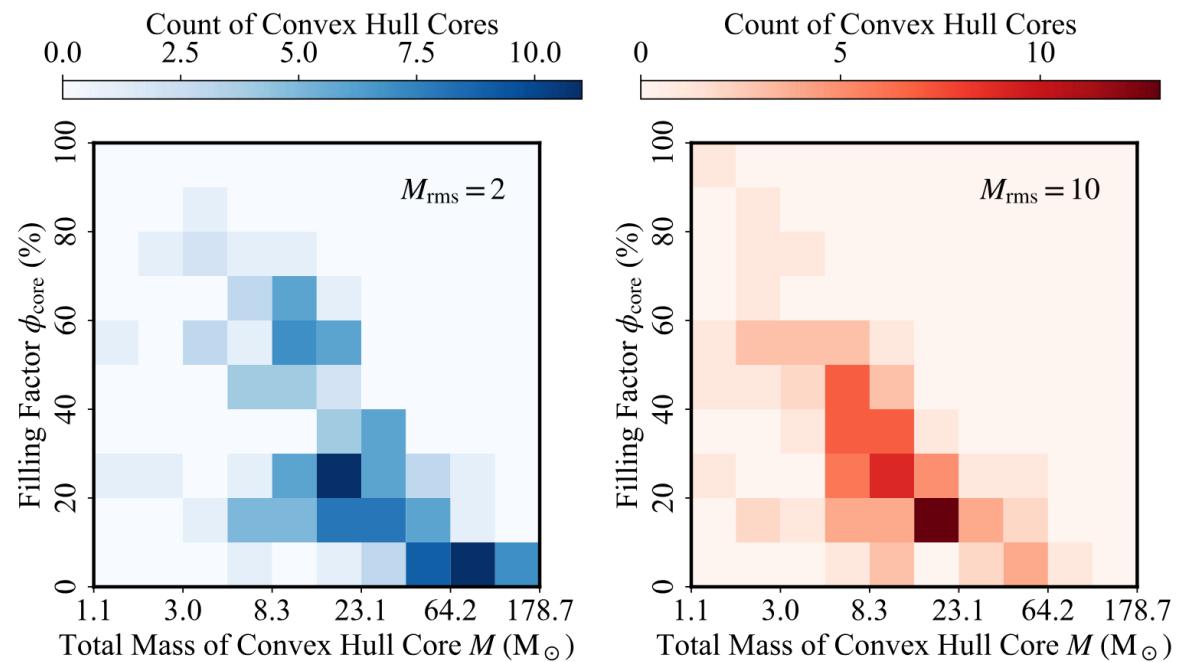
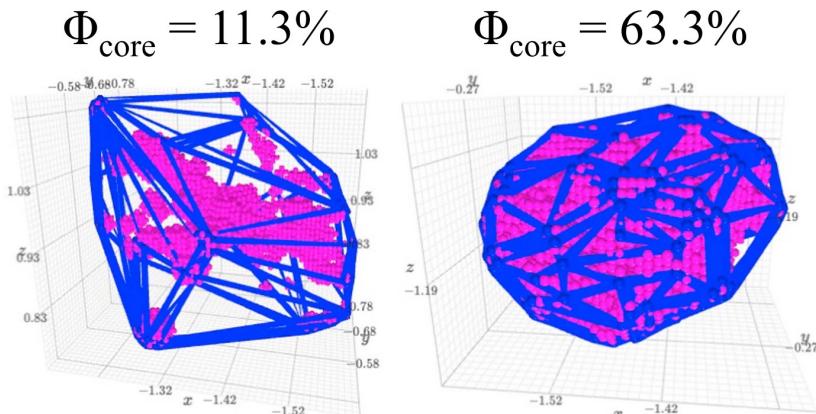
## トレーサーで真のコアを探す:

星形成後30万年以内に原始星に落下したトレーサー粒子の移流の様子



# 星形成コア形成

トレーサーを用いたFilling factor の導出:

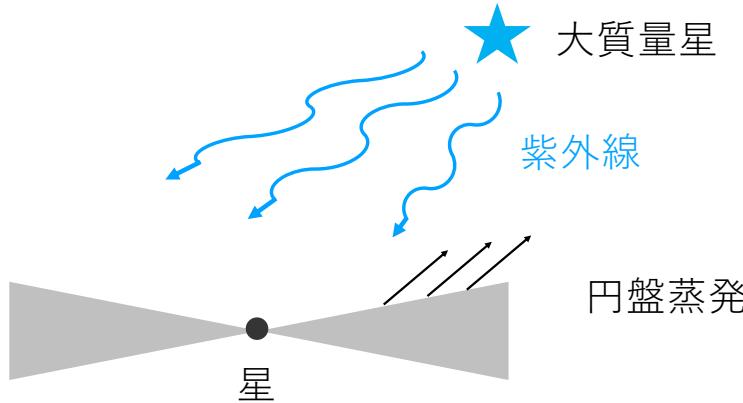


低質量星にもfilling factorにバラツキがある、 単一星の降着にも多様性がある。

磁場の効果については調査中。

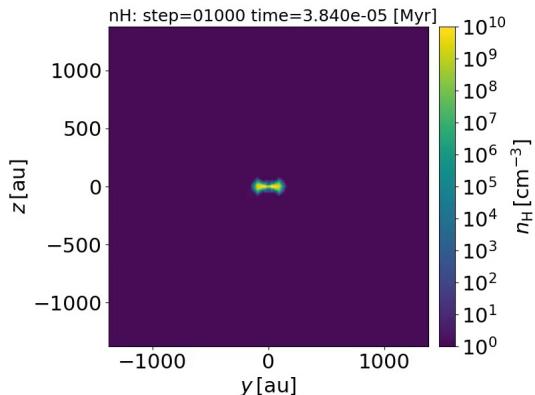
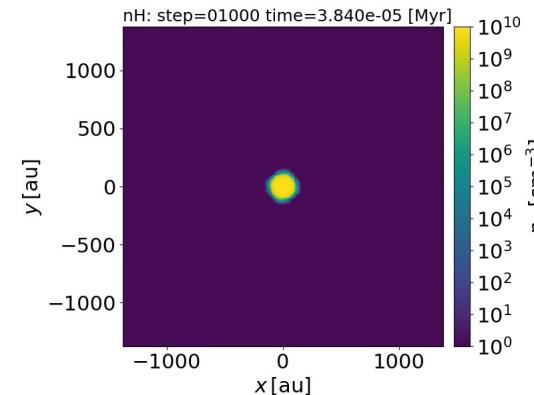
# 外部輻射による原始惑星系円盤の光蒸発

(Matsumoto & HF in prep)

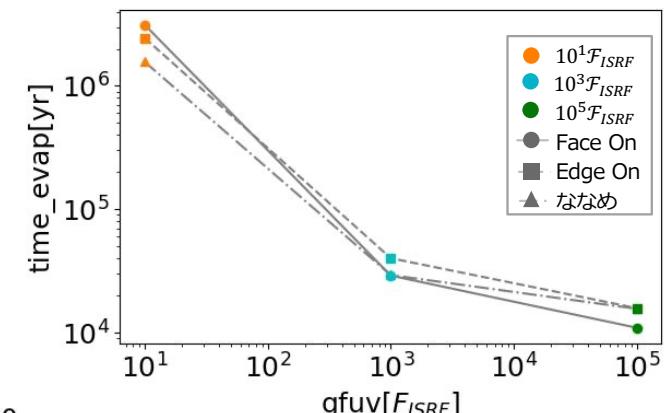
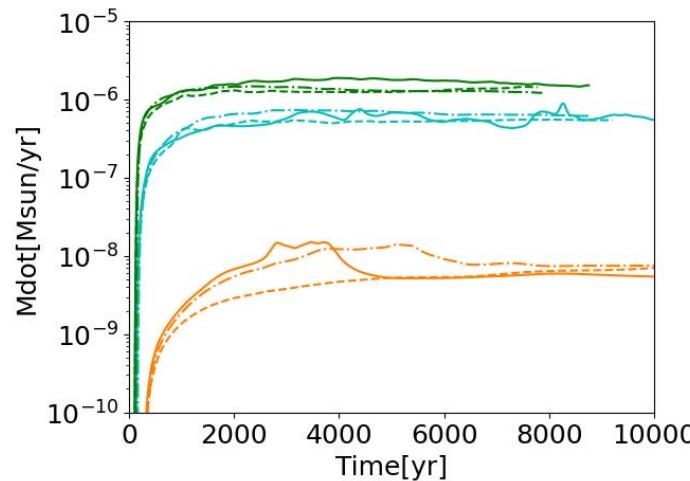


(e.g., Winter & Haworth 2022)

今後は、紫外線強度の時間依存性を  
星団形成シミュレーションから導出  
する



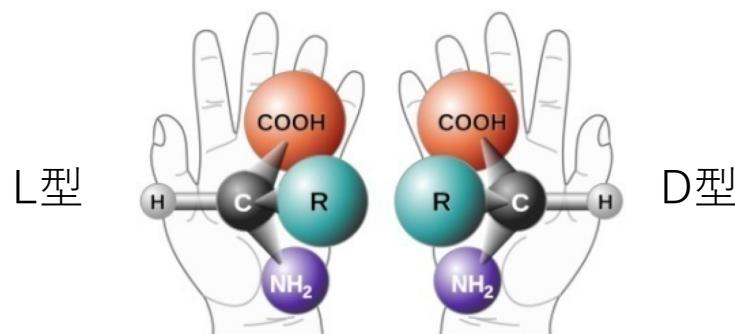
円盤が蒸発する時間の紫外線強度依存性



# 星団形成とアストロバイオロジー の接続へむけて

# 円偏光波による鏡像異性体過剰生成

$\alpha$ -アミノ酸



実験室系

L型      D型  
50%      50%

化学合成するとラセミ体となる

生体内アミノ酸

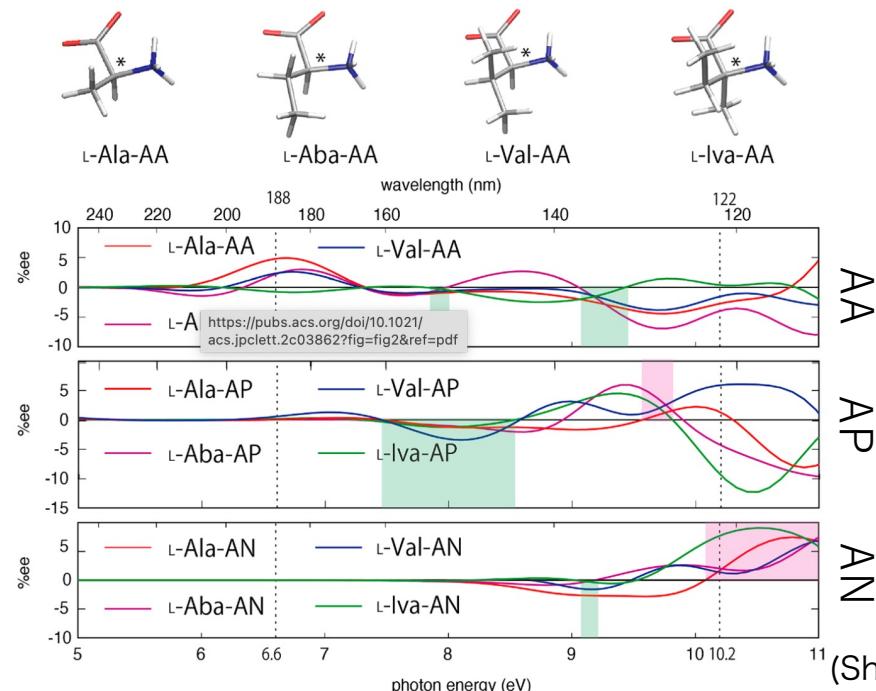
L型      D型  
L型      >99%



生物はL型アミノ酸を使用

隕石中にグリシン、アラニン、グルタミン酸といったアミノ酸が発見される。発見されたアミノ酸にL型鏡像体過剰(数%)。 (Engel & Macko 1997, Pizzarello & Cronin 2000)

円偏光二色性

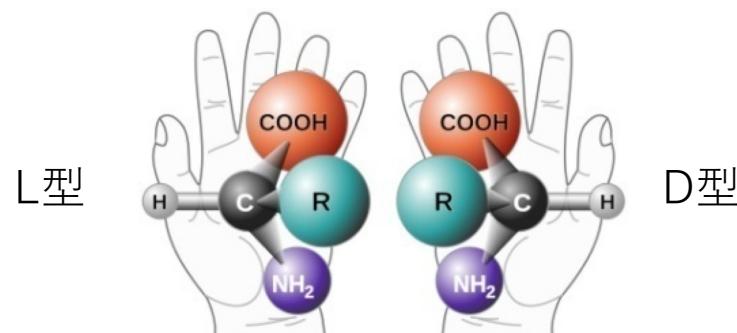


(紫外線)円偏光波は選択的に吸収される

=> 星形成領域中にどれくらい存在するか調べる

# 円偏光波による鏡像異性体過剰生成

$\alpha$ -アミノ酸



実験室系

L型 50% D型 50%

化学合成するとラセミ体となる

生体内アミノ酸

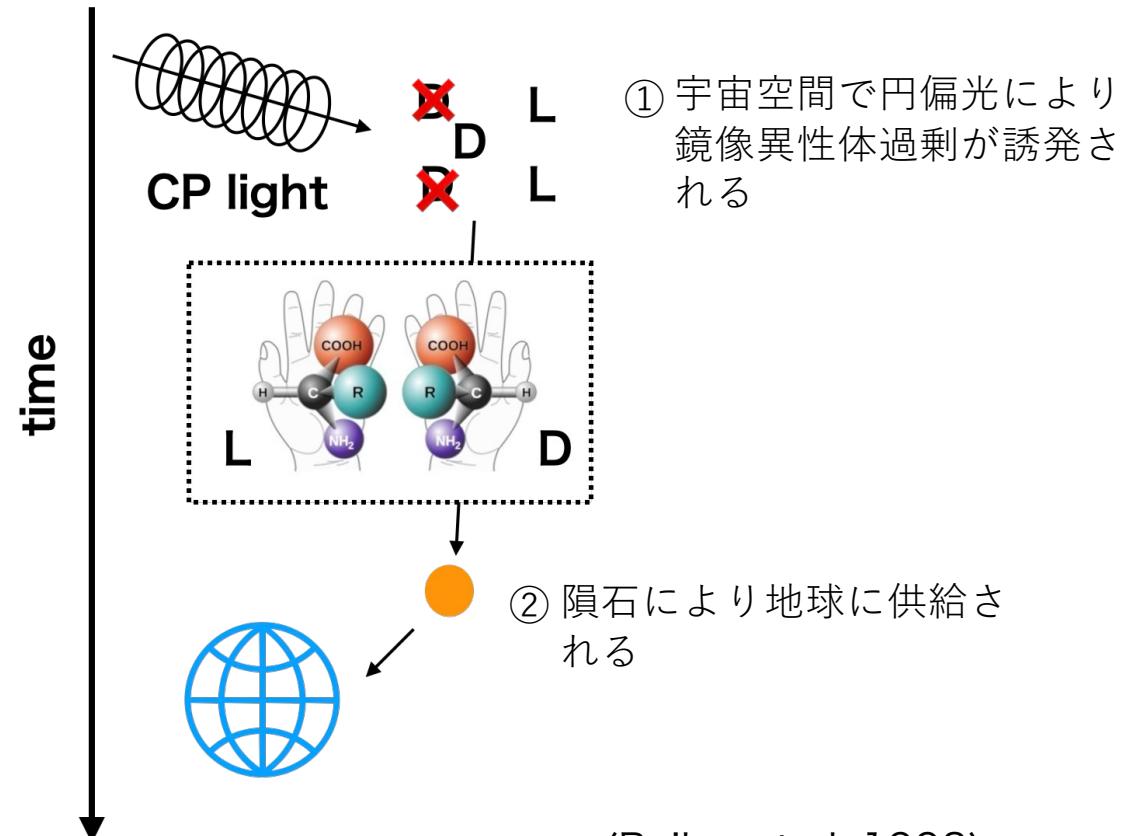
L型 D型

>99%



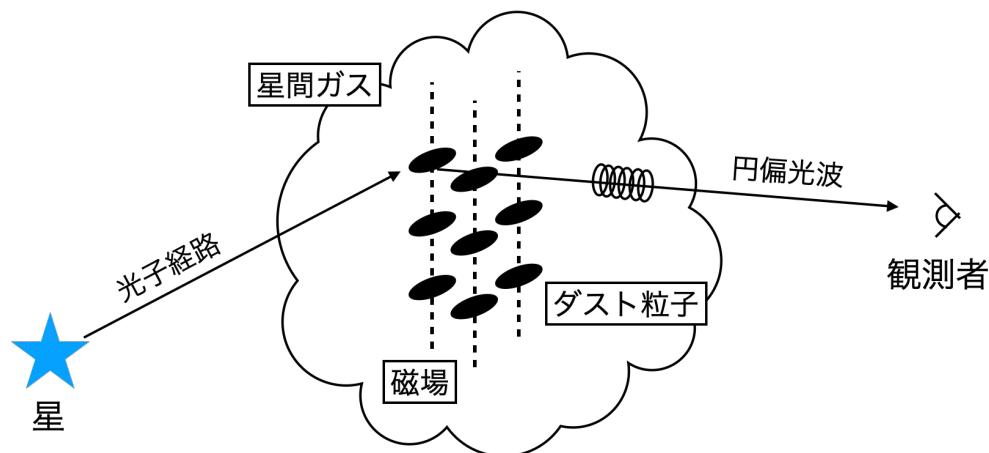
生物はL型アミノ酸を使用

隕石中にグリシン、アラニン、グルタミン酸といったアミノ酸が発見される。発見されたアミノ酸にL型鏡像体過剰(数%)。 (Engel & Macko 1997, Pizzarello & Cronin 2000)

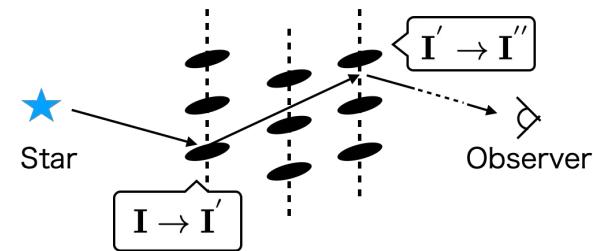


# ダスト光散乱による円偏光波生成

ダスト光散乱による円偏光波生成:



モンテカルロ輻射輸送計算:



- 各光子についてストークスパラメータ  $\mathbf{I} = (I, Q, U, V)$  の変化を計算する
- 一回の散乱におけるストークスパラメータの変化

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}_s = \frac{1}{k^2 r^2} \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}_i$$

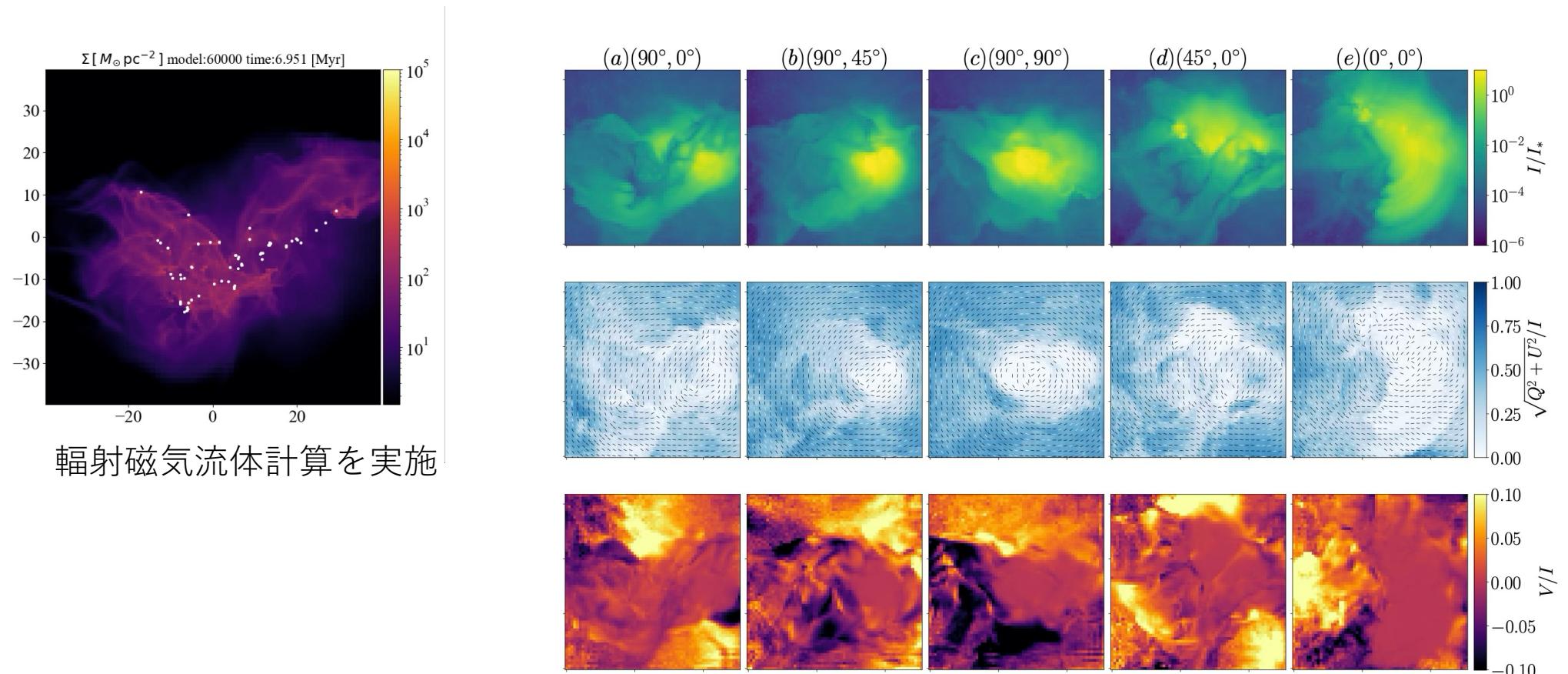
$k$ : 波数  
 $r$ : the distance from the scattering point

Muller matrix

- ダストによる吸収も含む

(HF, Yajima, Umemura, 2020, 2023)

# 星団中におけるLy $\alpha$ 円偏光波



輻射磁気流体計算を実施

(a)-(e)は観測者の角度ごとの違い,  $I^*$ は規格化定数

(HF+ in prep)

10%程度の円偏光波が生成されることを確認

# 次世代数値計算コードの開発

# 最近のHPC分野の動向

## Top 500 (November 2025)

Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
1	El Capitan - HPE Cray EX255a, AMD 4th Gen EPYC 24C 1.80Hz, AMD Instinct MI300A, Slingshot-11, TOSS, HPE DOE/NSA/LLNL United States	11,340,000	1,809.00	2,821.10	29,685
	GPU搭載				
2	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 20Hz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE Cray OS, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	9,066,176	1,353.00	2,055.72	24,607
	GPU搭載				
3	Aurora - HPE Cray EX - Intel Exascale Compute Blade, Xeon CPU Max 9470 52C 2.4GHz, Intel Data Center GPU Max, Slingshot-11, Intel DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	9,264,128	1,012.00	1,980.01	38,698
	GPU搭載				
4	JUPITER Booster - BullSequana XH3000, GH Superchip 72C 3GHz, NVIDIA GH200 Superchip, Quad-Rail NVIDIA InfiniBand NDR200, RedHat Enterprise Linux, EVIDEN EuroHPC/FZJ Germany	4,801,344	1,000.00	1,226.28	15,794
	GPU搭載				
5	Eagle - Microsoft NDv5, Xeon Platinum 8480C 48C 2GHz, NVIDIA H100, NVIDIA Infiniband NDR, Microsoft Azure United States	2,073,600	561.20	846.84	
	GPU搭載				
6	HPC6 - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, RHEL 8.9, HPE Eni S.p.A. Italy	3,143,520	477.90	606.97	8,461
	GPU搭載				
7	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442.01	537.21	29,899
	GPU搭載				
8	Alps - HPE Cray EX254n, NVIDIA Grace 72C 3.1GHz, NVIDIA GH200 Superchip, Slingshot-11, HPE Cray OS, HPE Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	2,121,600	434.90	574.84	7,124
	GPU搭載				
9	LUMI - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 20Hz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE EuroHPC/CSC Finland	2,752,704	379.70	531.51	7,107
	GPU搭載				
10	Leonardo - BullSequana XH2000, Xeon Platinum 8358 32C 2.6GHz, NVIDIA A100 SXM4 64 GB, Quad-rail NVIDIA HDR100 Infiniband, EVIDEN EuroHPC/CINECA Italy	1,824,768	241.20	306.31	7,494
	GPU搭載				

GPU (Graphics Processing Units)搭載のものが大部分



利点: 多数のコアを搭載した並列計算機

例) NVIDIA A100: 6912 cores

NVIDIA H100(PCIE): 14592 cores (三木さんのスライドより)

演算性能: 26Tflops(H100 PCIe, FP64)

参考)HPE Cray XD2000



(cfcaのサイトより)

# SFUMATO GPU

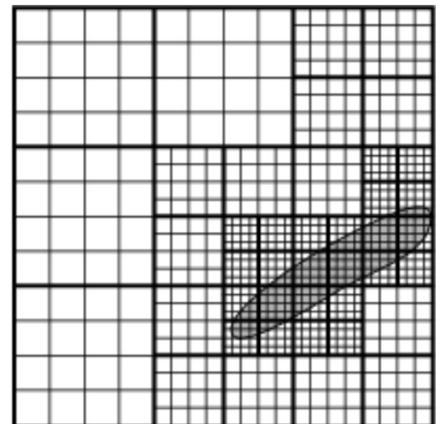


(Matsumoto 2007)

Programing language: Fortran90 (with MPI)

Device: CPU

AMR cell structure



(HF & Matsumoto submitted to PASJ)

Programing language: CUDA / HIP (with MPI)

Device: CPU + GPU

Modules:

AMR cells

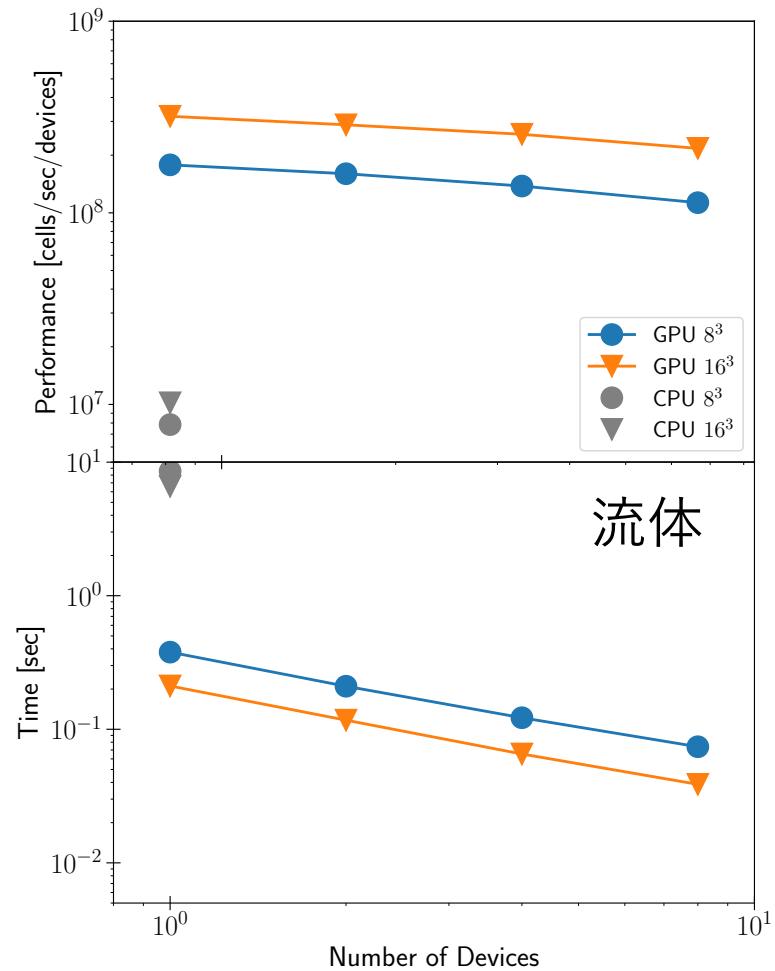
Hydrodynamics

Self-gravity

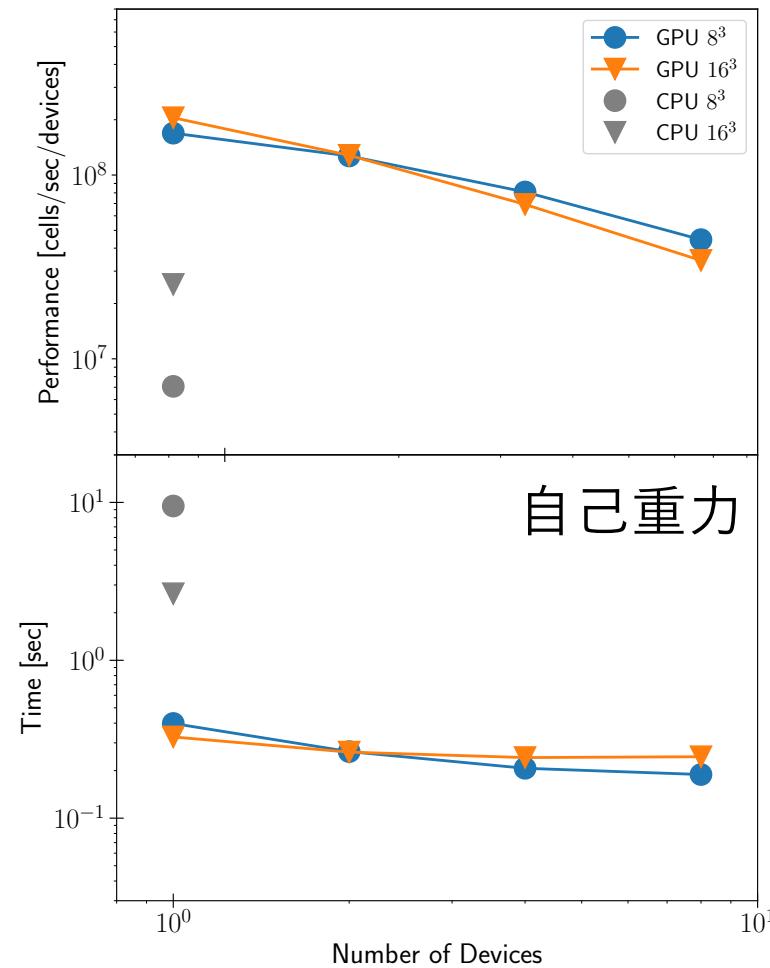
Star particles

Heating/Cooing processes

計算速度 Nested grid  $256^3 \times 4$  段



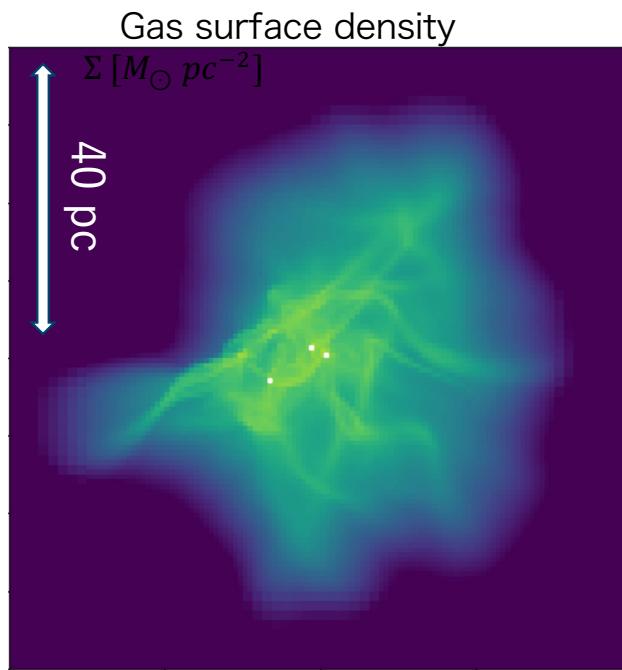
GPU: NVIDIA GH200  
CPU: Intel Xeon Platinum 8468 (48コア)



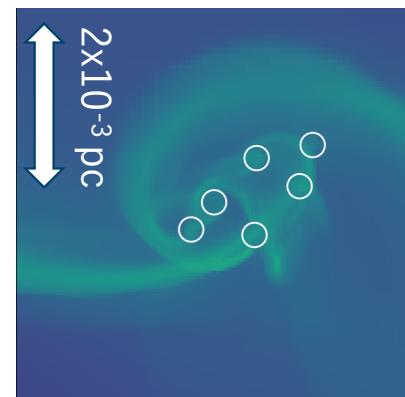
# 大質量星団形成

雲質量:  $10^5$  Msun

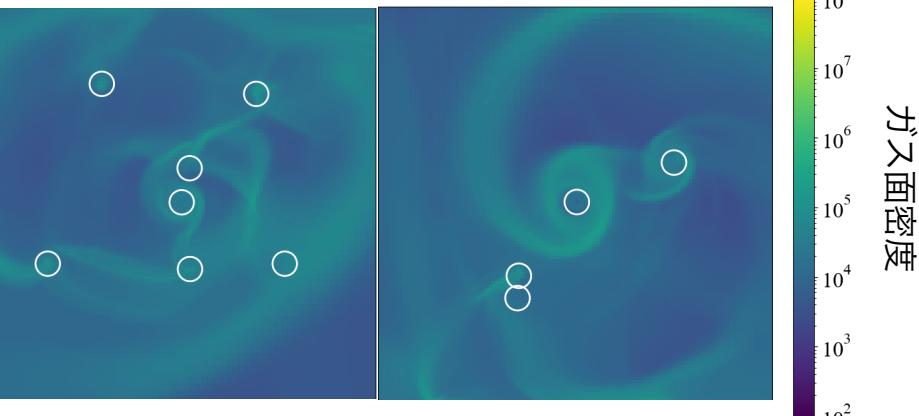
金属量:  $10^{-2}$  Zsun



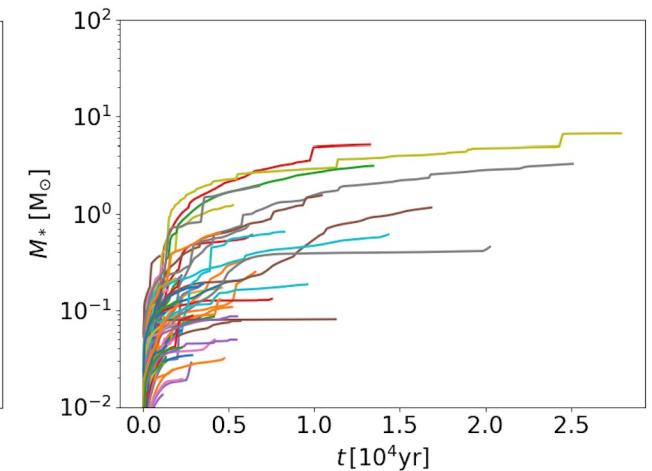
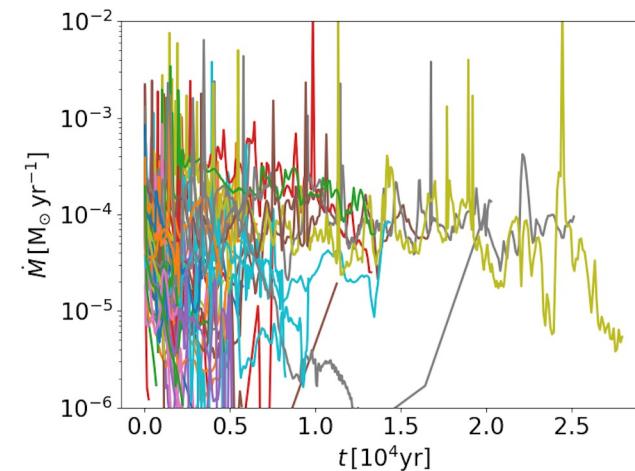
## 降着円盤



## 円: シンク位置



## 質量降着率



# まとめ

星団形成:

電離フィードバックが星団形成時の星形成効率・星密度を制御  
JWSTにより高密度星団形成現場の発見が相次いでいる。

原始惑星系円盤への影響:

pcスケールの物理が外部要因として、進化に多大な影響をする可能性がある。

アストロバイオロジーとの接続へむけて:

星団形成領域の中で生命居住可能な環境の特定がファーストステップとなりそう。  
宇宙空間中での有機物形成などとも含めた研究も実施したい(計画中)。

GPU計算コード:

既存コードの10倍以上の高速計算が可能となりつつある。  
星団形成中の降着円盤の進化を直接計算可能となると見込んでいる。