

原始銀河とAGNの共進化過程と 宇宙再電離への寄与

曾我 健太 (筑波)

共同研究者 梅村 雅之 (筑波)

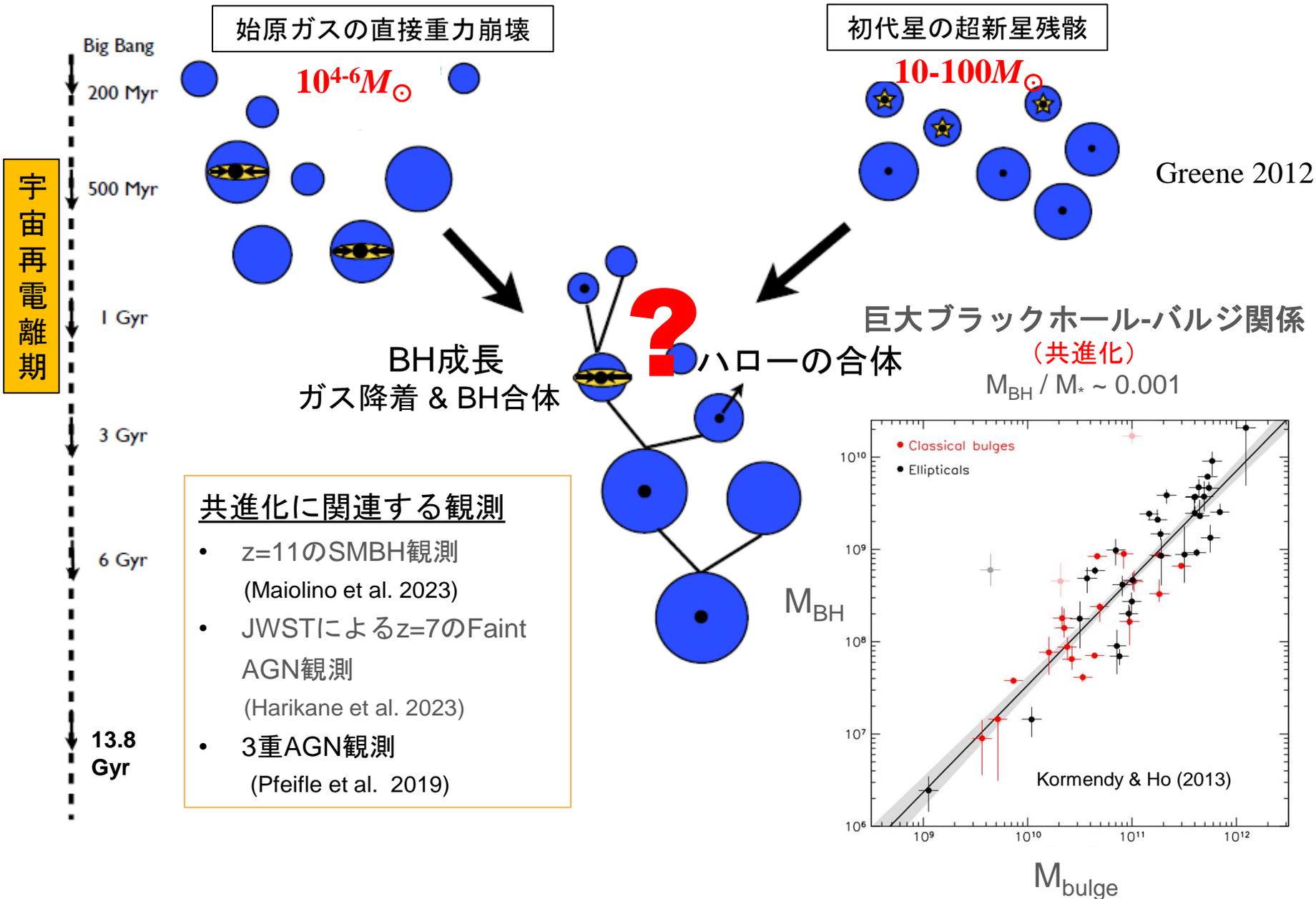
BH大研究会

～星質量から超巨大ブラックホールまで～

@御殿場高原 時之栖

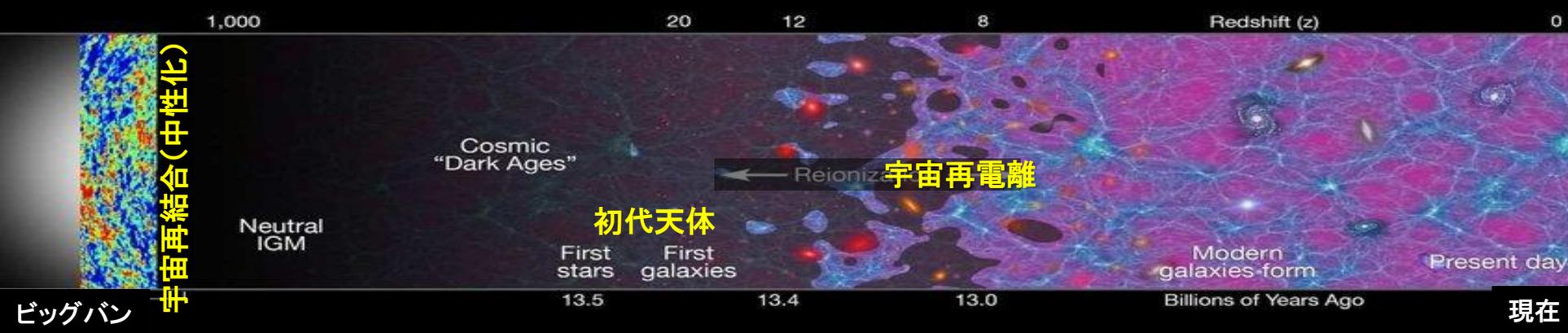
2024 02/28-03/02

巨大ブラックホールの階層的形成過程の課題



宇宙再電離と電離源

Robertson et al., (2010)



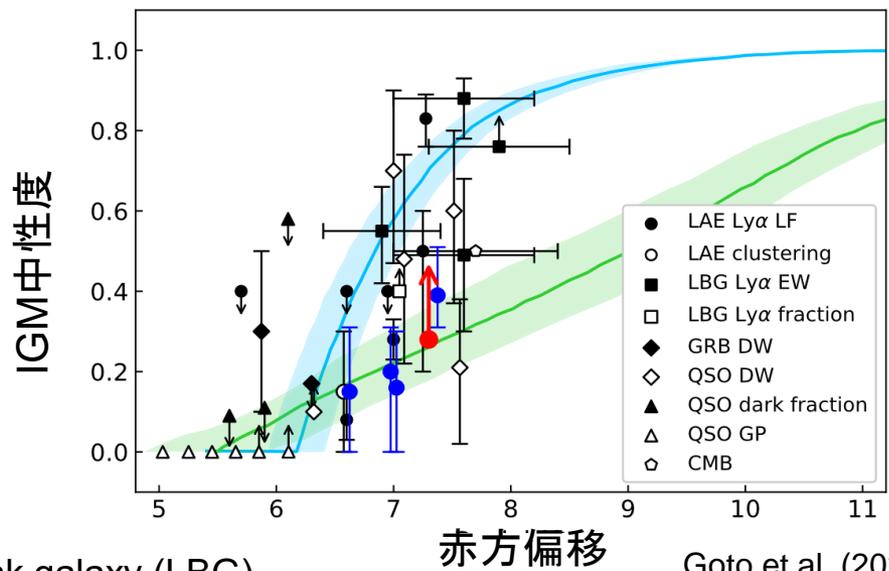
$$n_{\text{ion}} = f_{\text{esc}} \xi_{\text{ion}} \rho_{\text{UV}}$$

電離光子数

f_{esc} : 電離光子脱出確率

ξ_{ion} : 光子生成率
(星の金属量、年齢、binarity、IMF)

ρ_{UV} : 電離光子密度
(銀河の光度関数から算出)



主要な再電離源 : Lyman α Emitter (LAE), Lyman break galaxy (LBG)

再電離を引き起こすためには脱出確率 $f_{\text{esc}} \sim 0.2$ が必要 (Naidu et al. 2020)

Faint AGN の寄与:

$z=6$ で最大 $\sim 50\%$ ($f_{\text{esc}} = 0.5$ を仮定) : Harikane et al. (2023)

脱出確率とAGNの寄与はまだ確定していない。

銀河とAGNの共進化における電離過程 輻射流体力学の必要性

① 電離放射のスペクトルと透過性

電離光子に対する断面積の式

$$\sigma_\nu = a_{\nu_L} \left(\frac{\nu}{\nu_L} \right)^{-3}$$

AGNからの放射: べき乗型 (ハードスペクトル)

$$I_\nu = I_{\nu_L} \left(\frac{\nu}{\nu_L} \right)^{-\alpha}$$

星団からの放射: 黒体放射重ね合わせ (ソフトスペクトル)

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

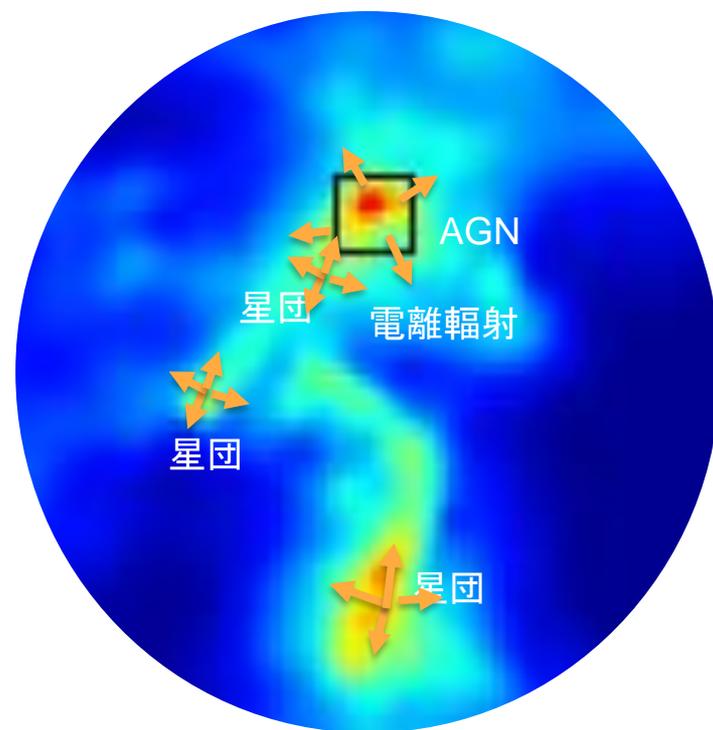
② 星形成のための冷却条件

電離放射からの遮蔽: $T < 10^4$ [K]

水素分子冷却: $T < 5000$ [K]

①と②を正確に扱うために、流体と輻射輸送計算を同時に解かなければいけない。

非一様ガスの電離と星形成



AGN放射は電離領域を拡げる可能性

本研究の目的

1. 星団とAGNからの放射に着目し、宇宙再電離期の星形成史と電離光子脱出確率を調べる。
2. 共進化過程にある銀河の観測可能性を検討する。

計算設定とモデル

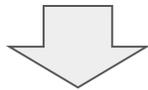
Zoom-in 輻射流体力学

- 非平衡化学反応 : e^- , p , H , H_2 , H^- , H_2^+
- 星とAGNからの電離光子輻射輸送 + LW光解離反応
 - 星団 : 種族合成モデル
 - AGN : べき乗型 + 降着率をパラメータ化($0.1 \leq \lambda \leq 1.0$)
($\lambda \leq 0.3$ がFaint AGN, $\lambda = 1.0$ が $z \sim 7$ のQSO)
- 星とBH形成
- 超新星フィードバック

計算分解能

| | |
|---------------------------------|-----------------------|
| $m_{\text{SPH}} [M_{\odot}]$ | 1.48×10^5 |
| $m_{\text{DM}} [M_{\odot}]$ | 7.95×10^5 |
| $M_{\text{baryon}} [M_{\odot}]$ | 8.58×10^9 |
| $M_{\text{DM}} [M_{\odot}]$ | 4.61×10^{10} |

計算開始時刻 : 赤方偏移 $z = 99$



計算終了時刻 : 赤方偏移 $z = 7$

星形成銀河



時刻

BH形成

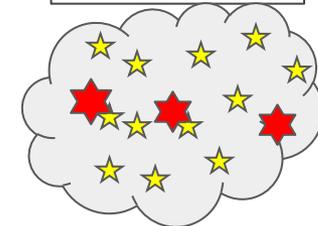
質量が $M_{\text{halo}} = 10^9 M_{\odot}$ を超えるダークマターハローに, $M_{\text{BH}} = 10^5 M_{\odot}$ のBHを与える。

単独AGN



一度BH形成をしたら
BH形成を行わない

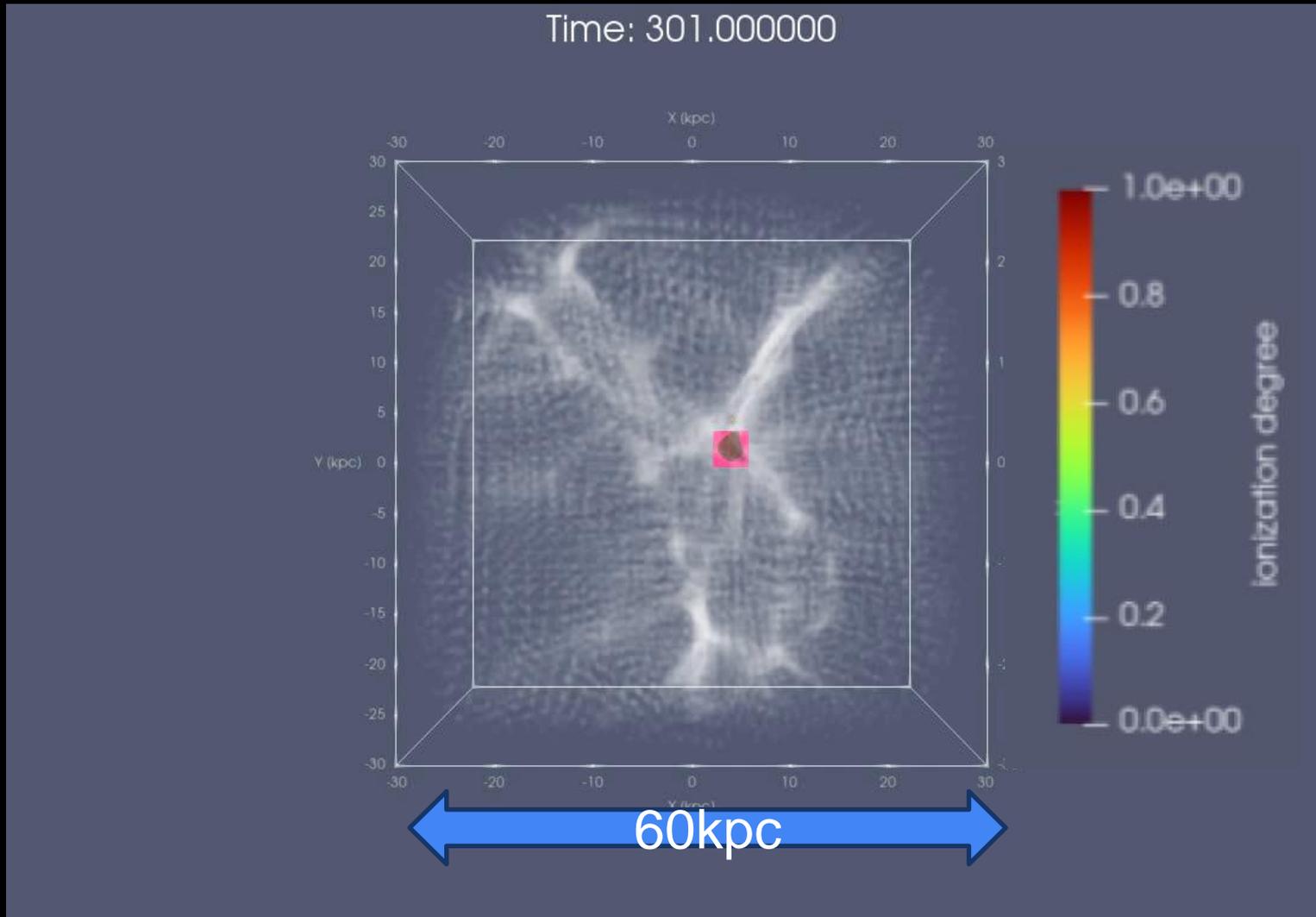
多重AGN



BH形成条件を満たしたら
何度でもBHを作る

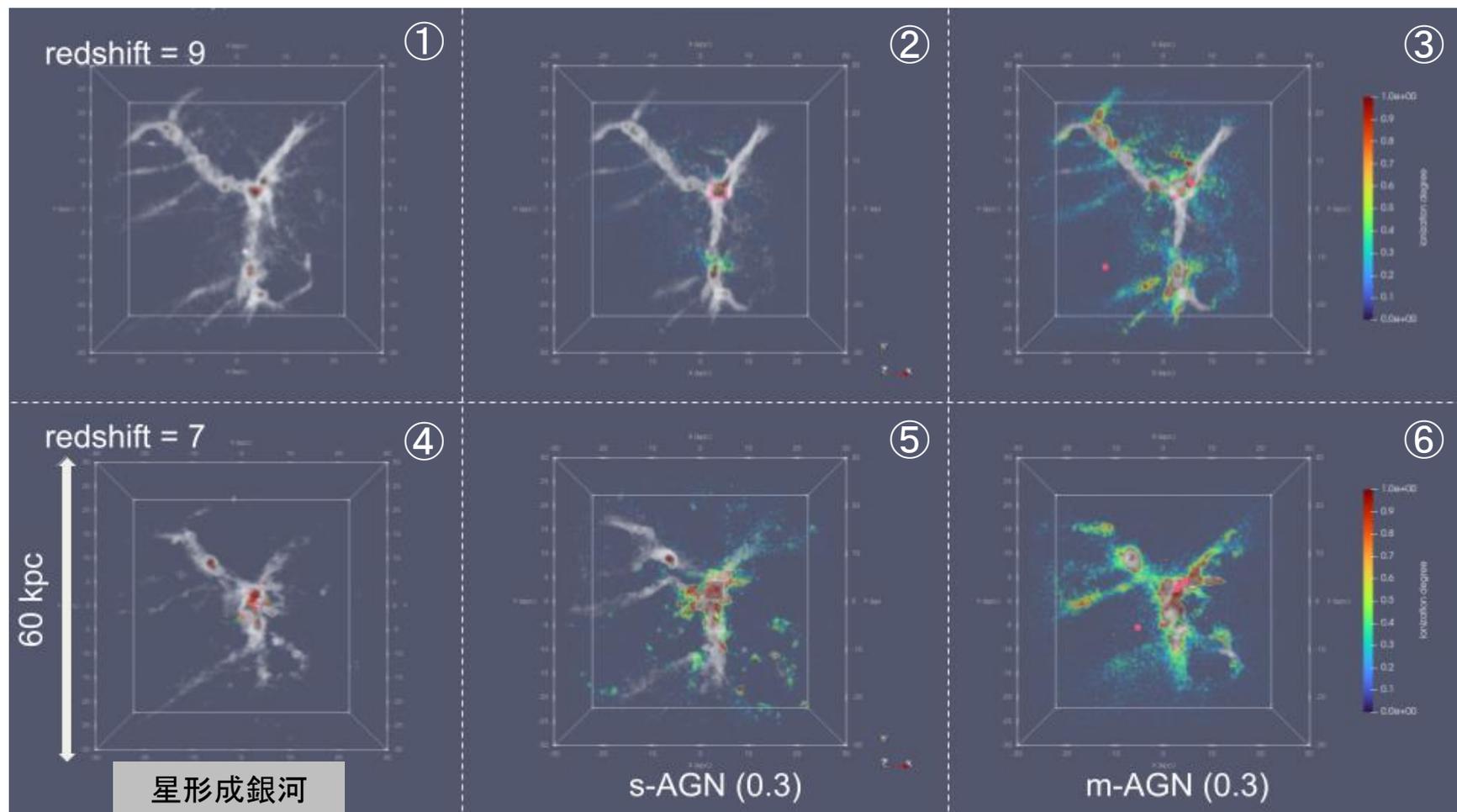
密度分布と電離分布の時間変化 (赤方偏移 $13 \leq z \leq 7$)

グレー：ガス数密度 カラー：電離度 □：AGNの位置 (降着率0.3)
時間間隔 $\Delta t = 1\text{Myr}$



ガス分布と電離度分布

グレー：ガス数密度 カラー：電離度



星のみのモデルは電離されるのが銀河中心領域のみ (④)

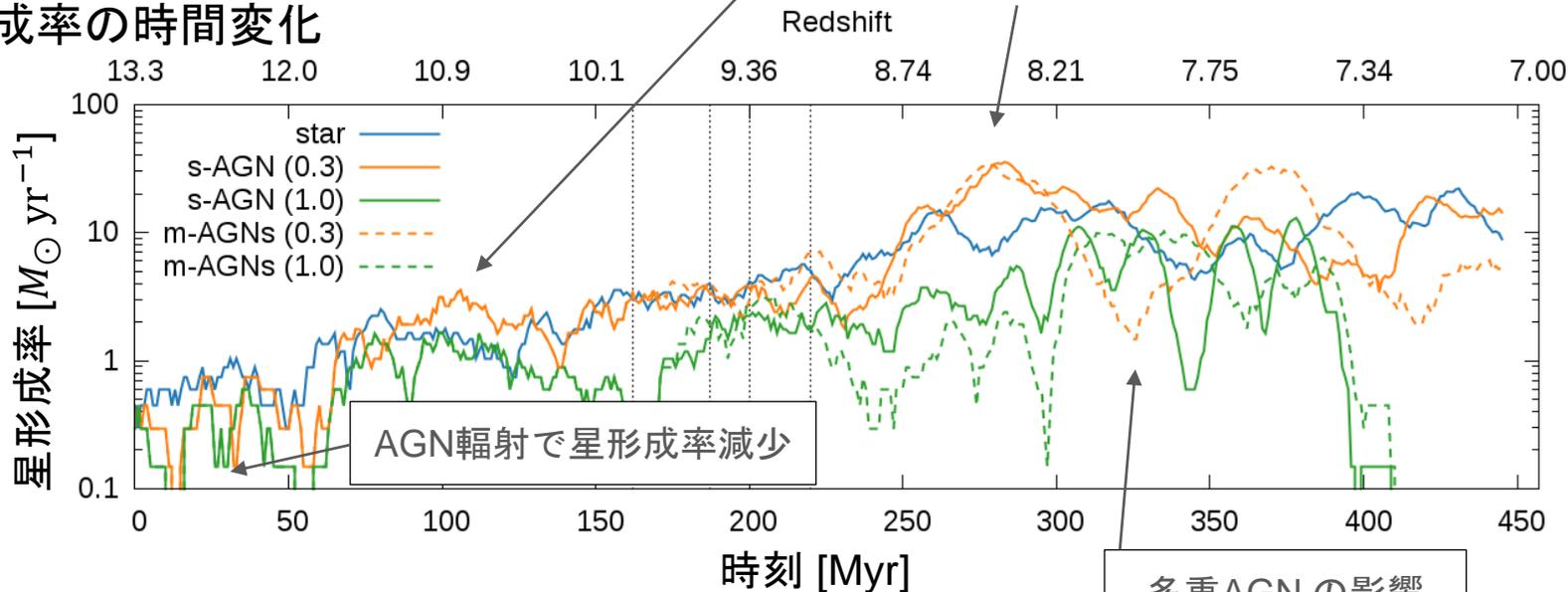
AGN有モデルは10kpcスケールまで電離 (⑤)

多重AGNの場合、 $z=9$ の時刻でもIGMまで電離領域が広がる (③)

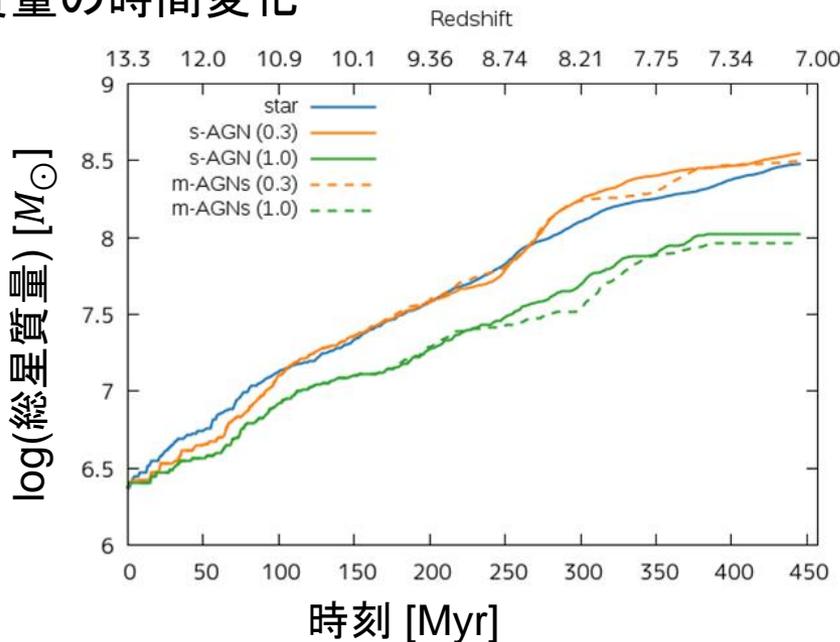
電離史に伴う星形成史とAGN寄与

星形成銀河とAGN銀河で星形成率が逆転

星形成率の時間変化



総星質量の時間変化



(外側のAGNが中心に落ち込んでくる時刻)

AGNの輻射フィードバックのみでは
総星質量に大きな影響を与えない。
(質量降着率 $\lambda = 1.0$ の場合を除く)

電離光子の脱出確率(f_{esc})

電離光子の脱出確率の定義：（銀河外に抜け出した電離光子数）÷（銀河内で放出される電離光子数）

$$f_{\text{esc}}(\nu, \vec{n}) = \frac{\sum_i^{N_s} \dot{N}_{\text{esc}}(\nu, \vec{n}, i)}{\sum_i^{N_s} \dot{N}_{\text{int}}(\nu, \vec{n}, i)}$$

N_s : 光源の数。

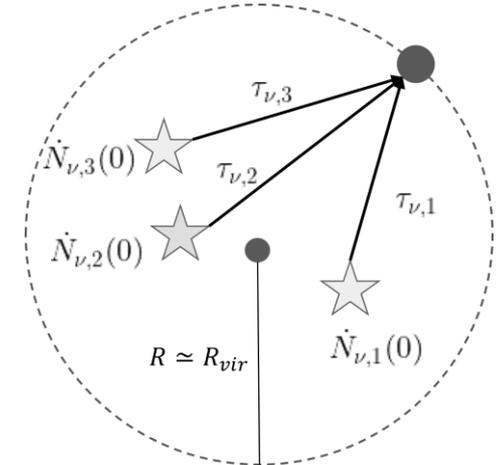
$\dot{N}_{\text{int}}(\nu, \vec{n}, i)$: 単位時間あたりに放出される個数。

$\dot{N}_{\text{esc}}(\nu, \vec{n}, i)$: 単位時間あたりに系から脱出する個数。

\dot{N}_{esc} と \dot{N}_{int} の関係 (Case-B近似)

$$\dot{N}_{\text{esc}}(\nu, \vec{n}, i) = \dot{N}_{\text{int}}(\nu, \vec{n}, i) \exp(-\tau(\nu, \vec{n}, i))$$

$\tau(\nu, \vec{n}, i)$: 光源*i*から方向 \vec{n} に向かう振動数が ν の電離光子に対する光学的厚み。



振動数および立体角平均

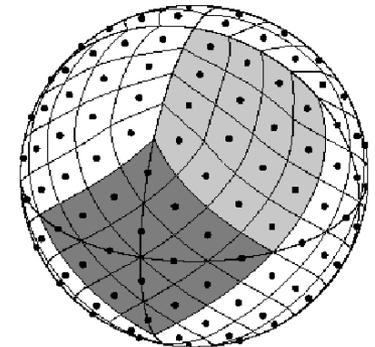
$$\langle f_{\text{esc}} \rangle = \frac{1}{4\pi(\nu_{\text{max}} - \nu_{\text{min}})} \int_{\nu_{\text{min}}}^{\nu_{\text{max}}} d\nu \int d\Omega f_{\text{esc}}(\nu, \vec{n})$$

$\nu_{\text{min}} = \nu_L$: ライマン端の振動数。

$\nu_{\text{max}} = 10\nu_L$

$d\Omega$: HEALPix を使って等方的に $N_{\text{angle}} = 192$ に方向について計算（右図）。

球面の等立体角点

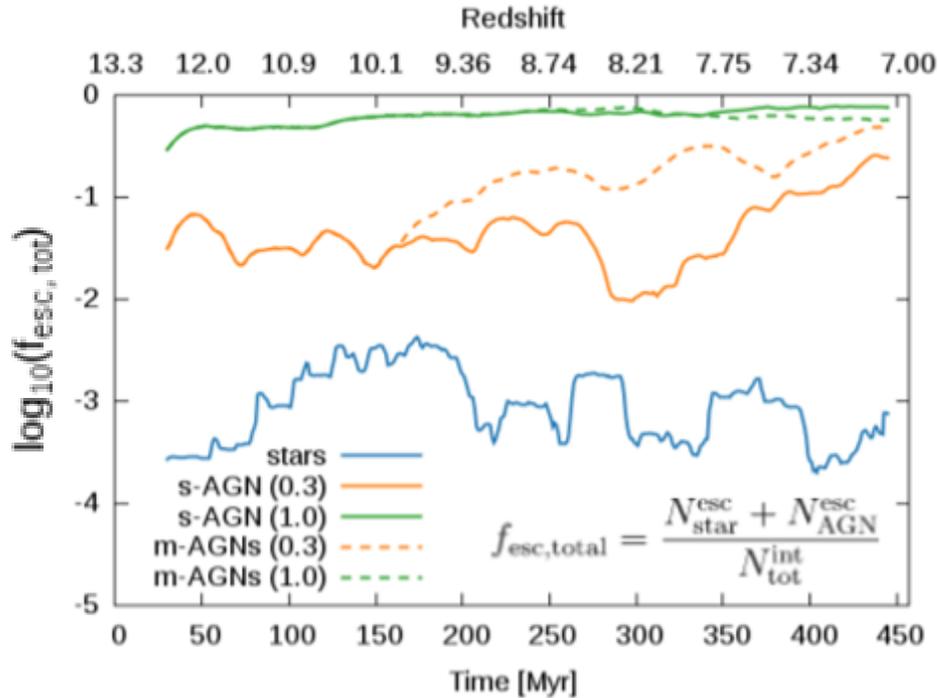


Górski et al. (2005)

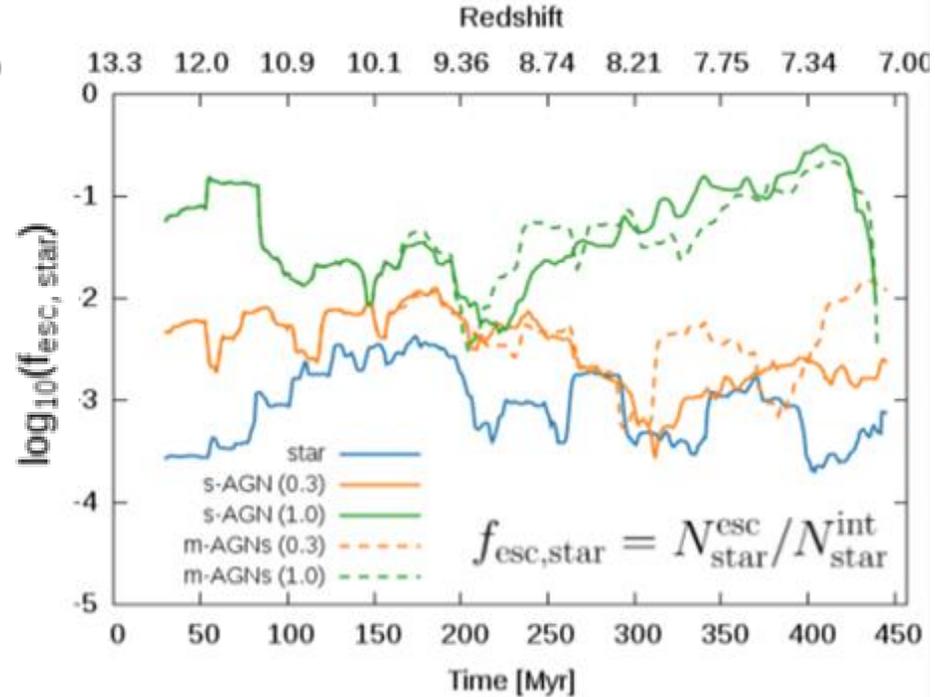
電離光子脱出確率

30Myr 毎の時間平均値

全電離光子の脱出確率 (星+AGN)



星からの電離光子脱出確率



全脱出確率 ($z = 7$)

星形成銀河 : $f_{esc} \sim 10^{-3}$. 先行研究に比べて約2桁小さい。

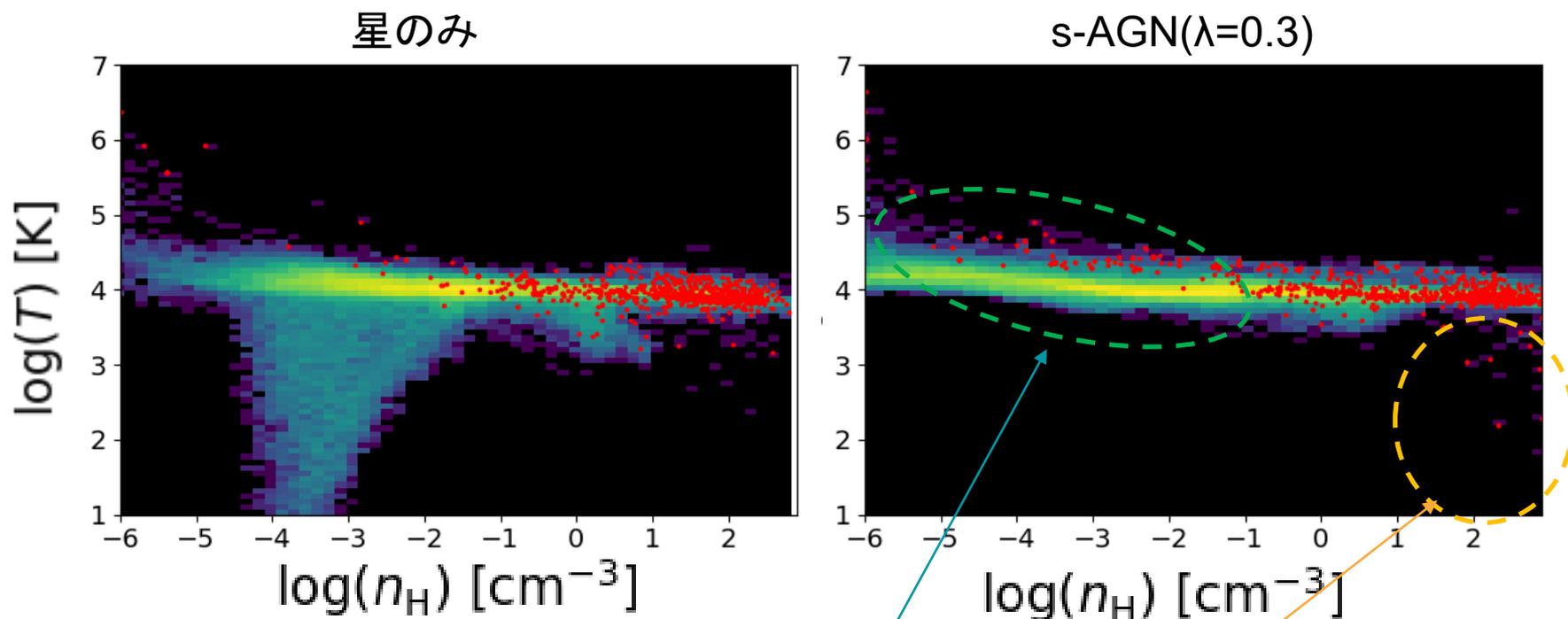
単独AGN($\lambda = 0.3$) : $f_{esc} = 0.24$, 多重AGN($\lambda = 0.3$) : $f_{esc} = 0.48$

星からの脱出確率 (時間平均 $10 \leq z \leq 7$)

s-AGN(0.3) : 星からの電離光子脱出割合を約3倍高める。

m-AGN(0.3) : 星からの電離光子脱出割合を約5倍高める。

ガスの水素数密度と温度の関係(赤方偏移 $z = 8.0$)



カラー： n_H - T 平面上のSPH粒子の数

赤点：星団粒子の最近傍SPH粒子の値

AGNの電離輻射による影響

- $-4 \leq \log\left(\frac{n_H}{1\text{cm}^{-3}}\right) \leq 0$ かつ $\log\left(\frac{T}{\text{K}}\right) \leq 4$ のガスが消失。
- 新しく星ができる場所はより高密度・低温な場所。
- すでに形成された星の周囲は低密度化

AGNの電離輻射加熱で事前にガスを温めると超新星爆発のフィードバックが効きやすくなる可能性。

連続光でのAGNの検出可能性

連続光のSEDの計算方法

光源*i*の静止系における $F_{\nu}^{\text{rest}}(i)$ と観測者系の $F_{\nu}^{\text{obs}}(i)$ の関係

$$F_{\nu}^{\text{obs}}(i) = (1+z)F_{\nu}^{\text{rest}}(i)$$

減光を受けた光源*i*のスペクトル

$$\tilde{F}_{\nu}^{\text{obs}}(i) = F_{\nu}^{\text{obs}}(i)\exp(-\langle\tau_{\nu}(i)\rangle)\exp(-\tau_{\text{IGM}})$$

$\langle\tau_{\nu}(i)\rangle$: 銀河内での吸収

τ_{IGM} : IGMによる吸収

全ての光源について足し合わせる。

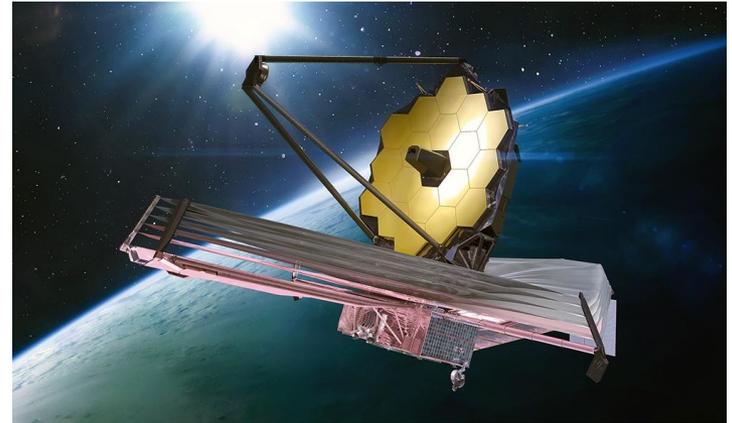
$$F_{\nu}^{\text{obs}} = \sum_i^{N_s} \tilde{F}_{\nu}^{\text{obs}}(i)$$

AB等級への変換

$$m_{\text{AB}} = -2.5\log(F_{\nu}^{\text{obs}}) - 48.6$$

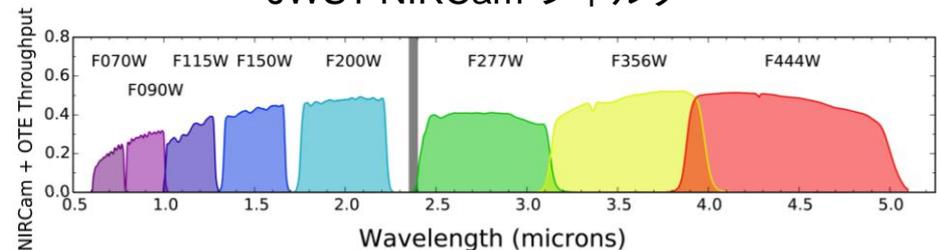
AGNのべき乗型スペクトル

QSO composite スペクトル : Vanden Berk et al. (2001)



<https://www.ariananews.af/james-webb-space-telescope-images-reveal-the-wonders-of-the-universe/>

JWST NIRCam フィルター



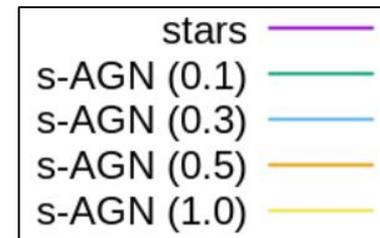
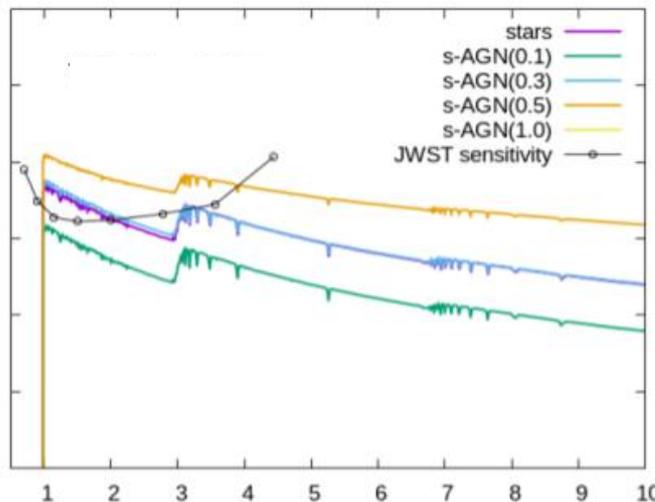
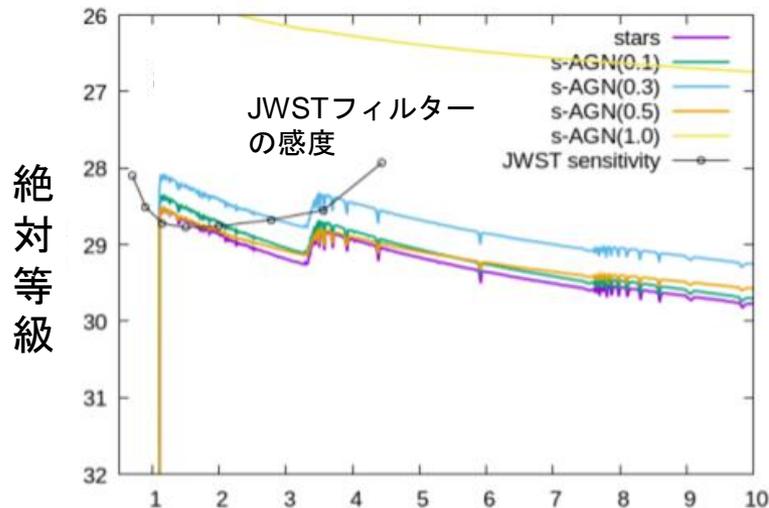
感度を比べるフィルター

F070W, F090W, F115W, F150W, F200W, F277W, F356W, F444W

JWSTによる観測可能性：連続光SED

$8.3 \leq z \leq 8.0$

$7.2 \leq z \leq 7.0$

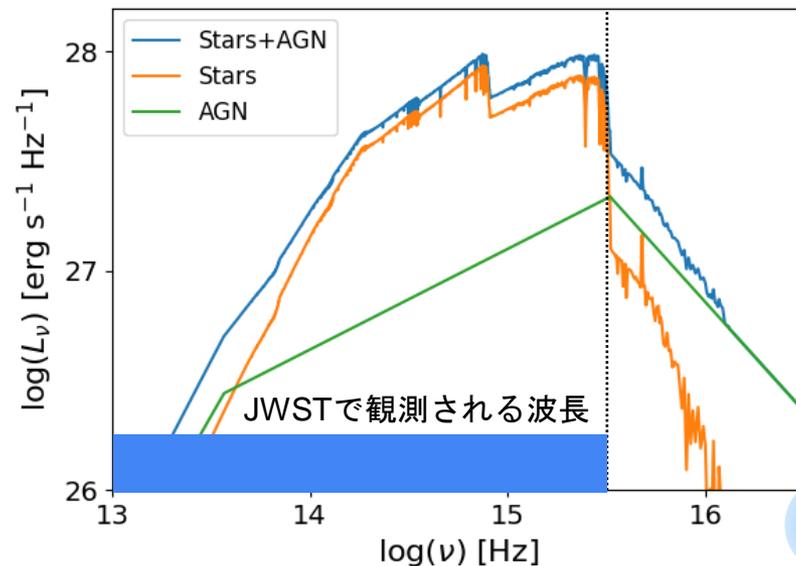


観測波長 [μm]

光源ごと光度

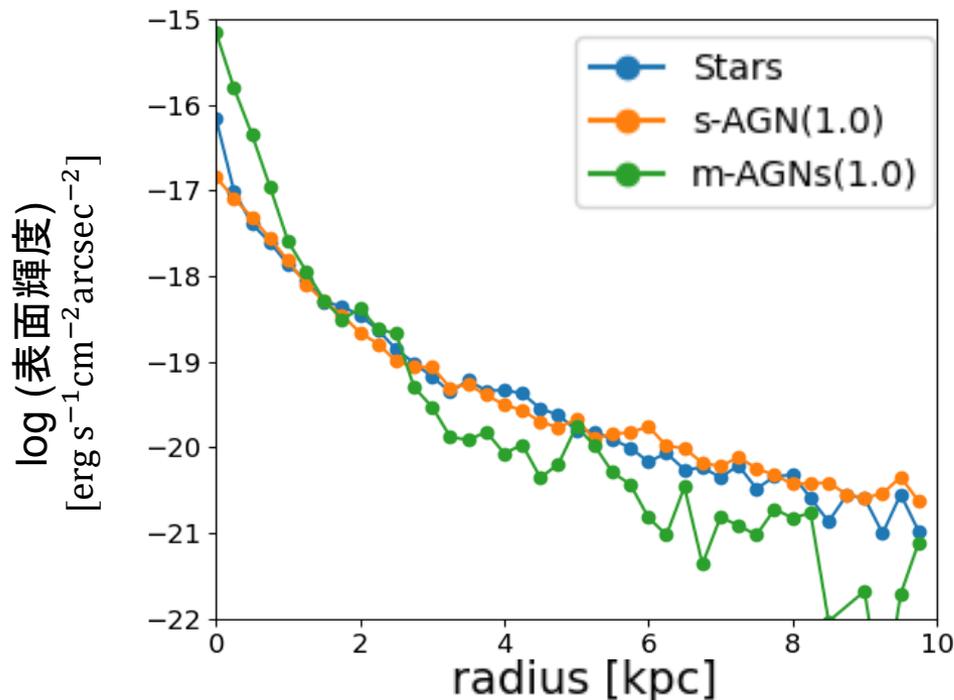
緑 : AGN 橙 : 星 青 : 合計

- 全ての銀河で $8 \leq z \leq 7$ までには JWST の感度を上回る。
- 極端に明るい AGN を除き、SED に最も影響を与えるのは直近の星形成率。
- AGN は紫外領域では星に比べて明るいですが、SED への影響は星のほうが大きい。

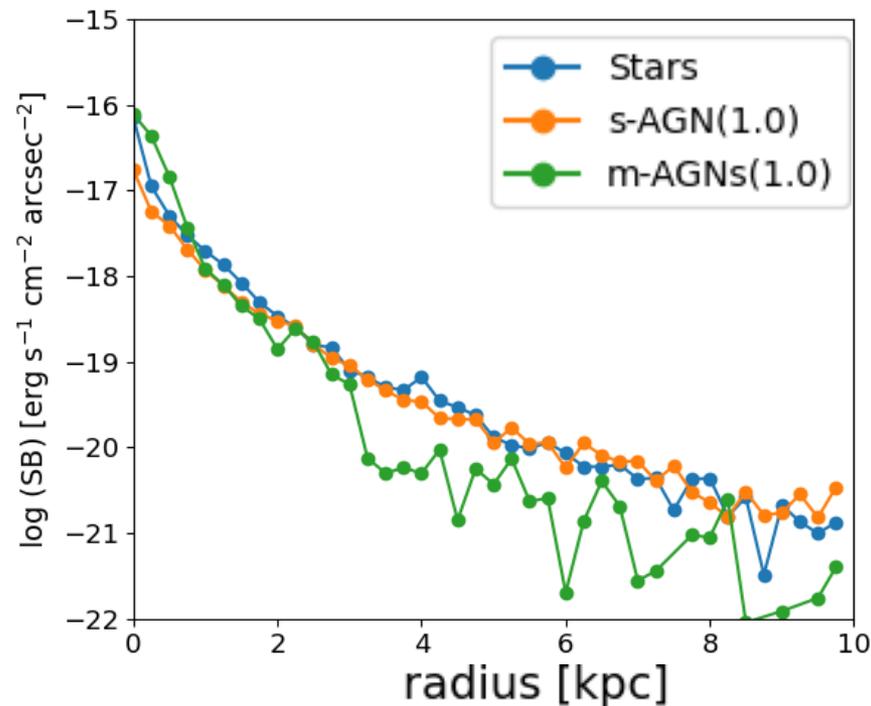


Ly α 表面輝度分布

視線方向 : x+



視線方向 : x-



- 多重AGNは常に外側で暗い傾向。
 - 視線方向x+からの観測では多重AGNが他の銀河に比べて中心領域($0 \leq R \leq 2$ kpc)で約10倍明るい。
- 中心で明るく、外側で暗い表面輝度分布は多重AGNの可能性。
ただし、時間変動、観測方向に依存する。

Summary

本計算

- 星とAGNからの輻射場による電離と遮蔽を統合的に解くために、輻射輸送と流体計算を同時に実行した。

共進化

- AGNの輻射のみでは赤方偏移 $z \approx 7$ における総星質量に大きな影響を与えない。

宇宙再電離への寄与

- 星形成銀河の f_{esc} は先行研究に比べて約2桁小さい $f_{\text{esc}} \sim 10^{-3}$ を示した。これは、電離と遮蔽を統合的に解くと、高密度領域でのみ星形成が起こるためである。
- AGN電離輻射の透過性によって f_{esc} を増加させる。
- 再電離期（赤方偏移 $z = 7$ ）においては、質量降着率 $\lambda = 0.3$ の場合
単独AGN ; $f_{\text{esc}} = 0.24$, 多重AGN ; $f_{\text{esc}} = 0.48$

観測可能性

- 連続光SEDからはAGNの有無の区別は難しいが、 $\text{Ly}\alpha$ 表面輝度を使うと多重AGNとその他を区別できる場合があることを示した。