

高赤方偏移銀河に対する AGNの影響

筑波大学 曽我健太

共同研究者
筑波大学 梅村雅之

天体形成研究会 2019/10/18 @ 筑波大学

目次

・イントロ

マゴリアン関係: BH-銀河共進化

high-z galaxy の観測: QSO, LAE, Nv輝線

共進化のシナリオ:なぜ AGNを考えるか?、複数 AGNの検討の必要性

小まとめ:今日話す内容と目標

・手法

研究手法: 1. 輻射流体 + 2. Ly_a RT

コードの説明: START & SEURAT

セットアップ

サブグリッドモデル: 1. 星形成 2. 超新星爆発のフィードバック 3. seed BH 4. 輻射源のモデル

計算モデル: 1. 星のみ 2. 星+AGN 3. 星+複数AGN

・結果

輻射流体の結果: 星形成、Ly_a RTに関する物理量のモデル毎の比較

Ly_a RTの結果: 表面輝度、脱出光子のスペクトル

・考察

・まとめと今後の展望

first step: z~7まで進めたい

second step: 重元素輝線の計算

third step: BH 合体

イントロ

・マゴリアン関係

銀河のバルジ質量と超巨大ブラックホールの質量の相関関係
→ 銀河とBH の共進化を示唆。

・なぜ、このような関係が成立するか？

=超大質量ブラックホール形成、銀河形成の解明

・いつから大質量ブラックホールが存在するか？

$z = 7.54$ のQSO の観測 (Bañados et al., 2018)。

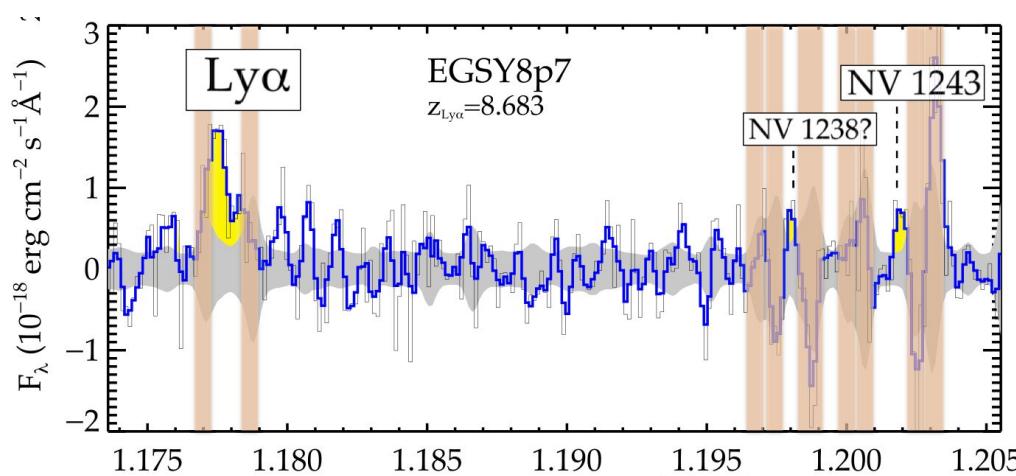
BH mass : $8 \times 10^8 M_\odot$

・ $z=7.5$ で既に大質量なBHはさらに昔はどこに存在していたか？

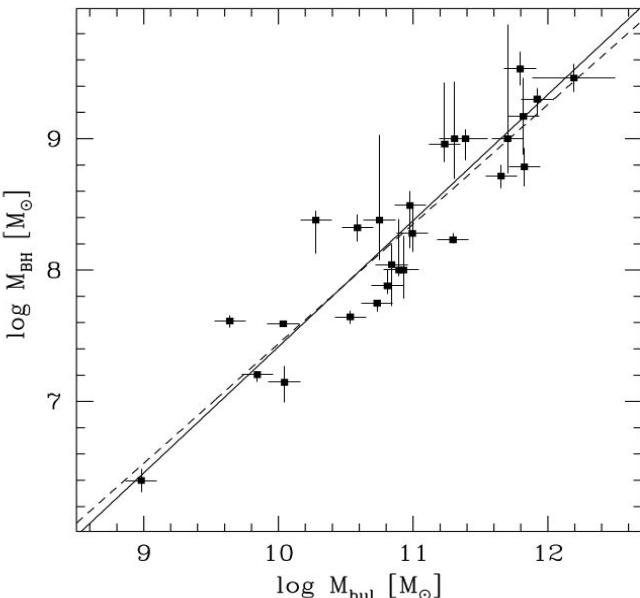
高赤方偏移銀河 ($z = 8.7$) でNv 1243 輝線の観測例(Mainali et al. 2018)。

Nv 輝線が生じるには非常に強い輻射場が必要で、星では説明しづらい。

→ 暗いAGN ?



Mainali et al. (2018)



Marconi & Hunt 2003

イントロ:AGNが高赤方偏移銀河に存在していたら?

共進化過程 主要な現象とその影響の関係

6億年
赤方偏移 $z \geq 9$



AGN の発生

今回の話

① 電離共進化

... 悪性

... 銀河の急速冷却

AGNによるガスの電離構造への影響の解明が共進化の第一段階の理解として重要。

16~34億年
 $2 \leq z \leq 4$

超巨大
ブラックホール

重元素汚染

超新星爆発・星風

銀河衝突
BH-BH合体

③ 力学共進化



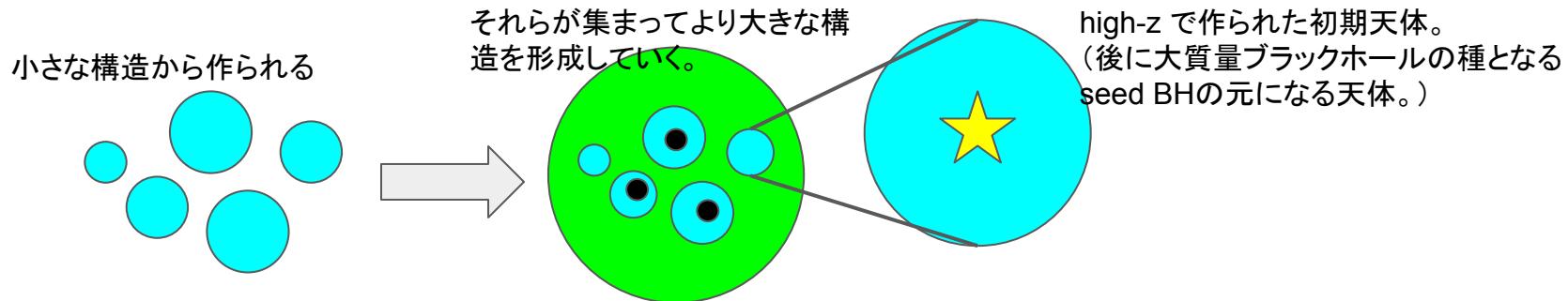
時間

マゴリアン関係の成立

イントロ: そもそも高赤方偏移銀河にAGNは1つ?

・階層的構造形成

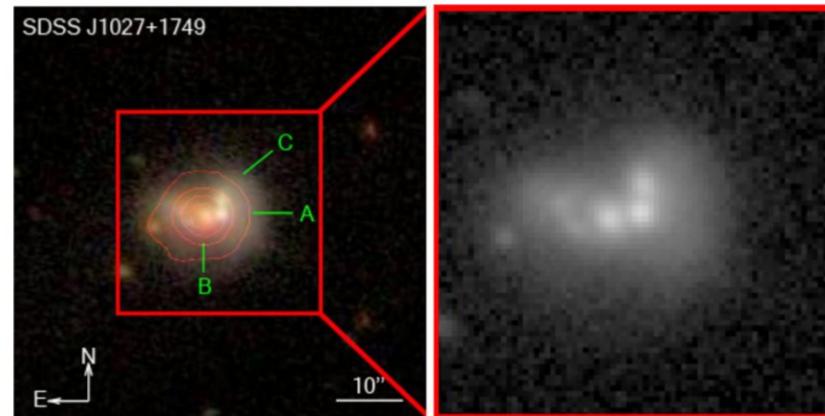
- ・ 小さな構造から順に作られる階層的構造形成で銀河は形成される。
- ・ 各 building block が大質量ブラックホールを持っているなら、銀河には複数の大質量ブラックホールが存在する可能性。



・多重AGNの観測例

SDSS J1027+1749 at $z = 0.066$ 。

kpc スケールに3つのAGNを持つ銀河。



Liu et al. (2011)

Figure 1. Left: SDSS *gri*-color composite image of SDSS J1027+1749, shown with a $1' \times 1'$ FOV. Contours indicate radio flux densities from the FIRST 1.4 GHz survey (Becker et al. 1995). The galaxy has three nuclei A, B, and C, and a strong tidal feature to the northeast of B. Nucleus B (C) has a projected separation of 3.0 (2.4) kpc from A. Right: SDSS *r*-band image of the central $30'' \times 30''$ region.

(A color version of this figure is available in the online journal.)

研究目的

- ・高赤方偏移銀河にAGNが存在した場合に、AGNがガスの電離構造にどうような影響を与えるかを、
 $\text{Ly}\alpha$ 輝線を用いて調べる。
- ・特に、放射源が (1) 星のみ、(2) 星 + AGN、(3) 星 + 複数AGN の3つのパターンで計算を行い、各モデルを比較する。

$\text{Ly}\alpha$ 輝線

水素の1s-2p準位間の遷移で放出される。

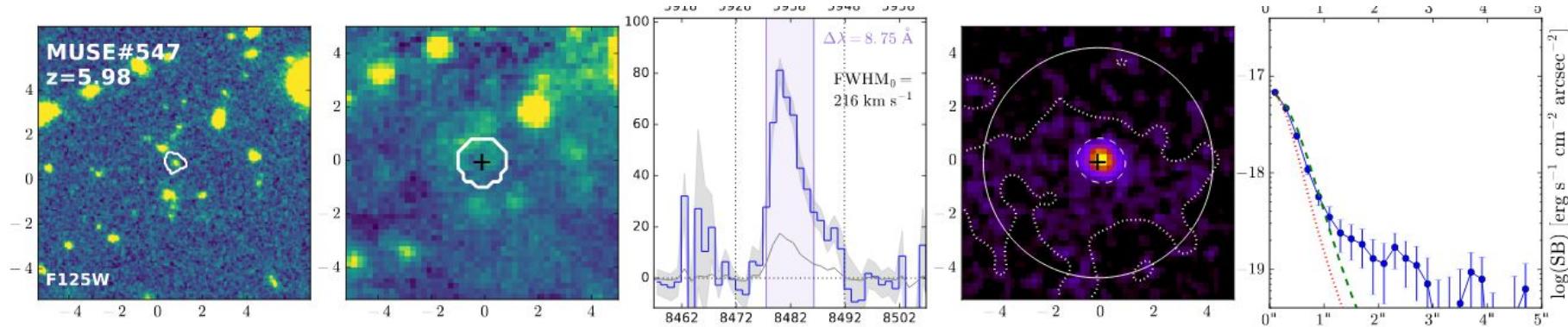
散乱断面積が非常に大きく銀河内で多重散乱されて系外に脱出するか、途中でダストに吸収される。

放射機構は電離ガスの再結合と衝突脱励起の2パターン。

高赤方偏移の観測で重要なプローブ。

LAEの観測例

$\text{Ly}\alpha$ 輻射輸送計算を行うと、 $\text{Ly}\alpha$ の表面輝度や脱出光子のスペクトルが求まるので、以下のような観測量と比較が可能。



Leclercq et al. (2017)

研究手法: 輻射流体シミュレーションとLy α 輻射輸送計算

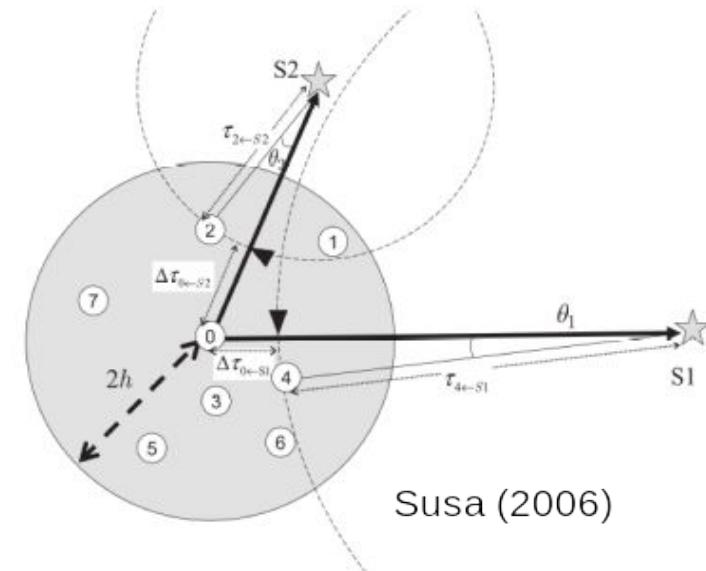
本研究は主に以下の2つの手順で計算を行う。

- (1) 高赤方偏移銀河の物理状態を決めるための、宇宙論的ズームイン輻射流体計算
- (2) (1)で求まった銀河のガスの密度や速度場などの情報を用いてポストプロセスとして Ly α 輻射輸送計算

(1) 宇宙論的ズームイン輻射流体力学

START code (Hasegawa & Umemura 2010)

- 非平衡化学反応
- 星形成と星からの輻射: e^- , H^+ , H , H^- , H_2 , H_2^+
- BH seeding と AGN による輻射
- EUV(13.6 eV) と LW (11.2-13.6 eV) 光子の輻射輸送
- 超新星爆発によるフィードバック



Susa (2006)

(2) Ly α 輻射輸送計算

SEURAT code (Abe et al. 2018)

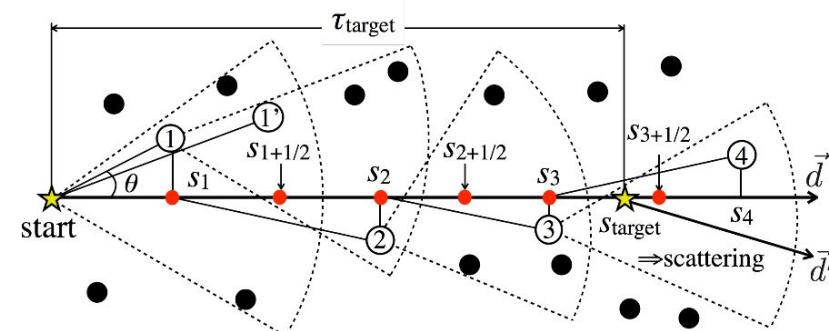
モンテカルロ法による計算コード。

光源から多数の光子 packet を飛ばして散乱過程を追う。

散乱されるまでの距離と方向を確率的に与える。

SPH粒子の情報をメッシュに貼り直すことなく計算が可能なため、mesh assign 時の情報の劣化を防げる。

- photon packet の数: $N = 5$ 万
- ダストなし(散乱のみ)で計算



星形成条件 (Abe et al. (2016) と同様)

以下の3つの条件を満たした SPH粒子を確率 ρ で single stellar particle (SSP) に変える。

$$(i) \nabla \cdot v < 0, \quad (ii) T \leq 5000 \text{ K}, \quad (iii) y_{\text{H}_2} > 5 \times 10^{-4}$$

$$p = \alpha_*^{-1} \left[1 - \exp \left(-c_* \frac{\Delta t}{t_{\text{ff}}} \right) \right] \quad \alpha_* = 0.5 \quad c_* = 1.0$$

BH seeding

質量が $1e9 \text{ Mo}$ のダークマターハローに質量が $1e5 \text{ Mo}$ の seed BH を加えた。

複数のAGNを考えるでは 2つ目の seed BH は $5e8 \text{ Mo}$ の加えた。

ハローファインダーは Rockstar (Behroozi et al. (2013))を使用。

星とAGNからの輻射について

(1) 星

種族合成モデル: Starburst99 (Leitherer et al. 1999)

IMF: **Kroupa**. $M = [0.1 - 100] \text{ Mo}$

星形成: instantaneous

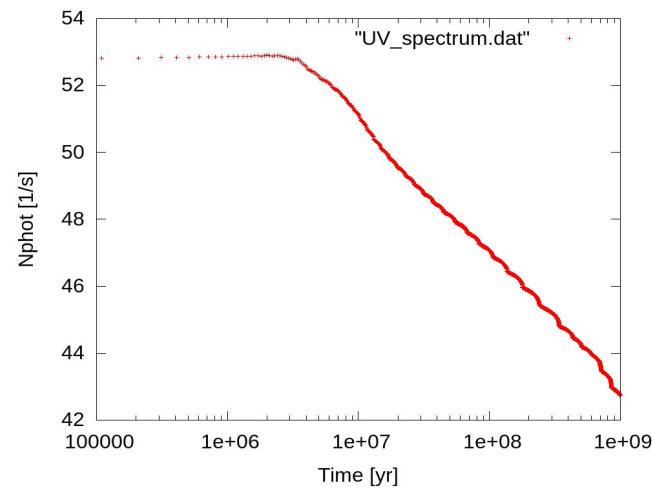
形成されてから 10Myr 後は輻射の影響を無視できるとした。

(2) AGN

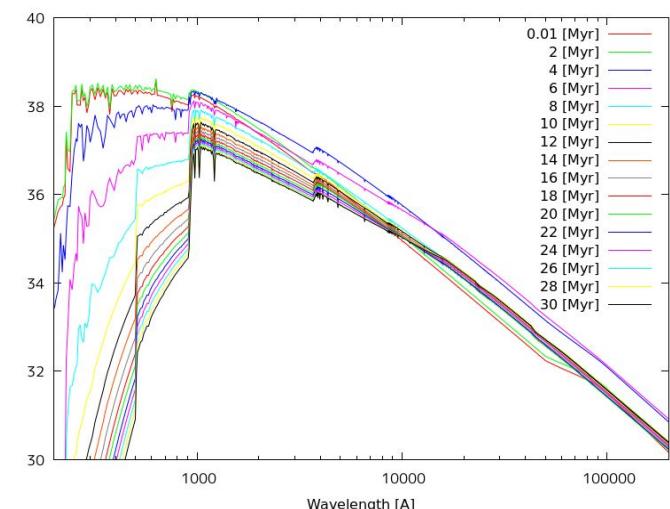
スペクトル: power law ($\alpha = -1.0$)

光度: エディントン光度を仮定。

$$L_{\text{AGN}} = \lambda L_{\text{Edd}} \propto M_{\text{BH}} \quad \lambda = 1.0$$



SSPから単位時間当たりに放射される電離光子の数



SED of single stellar particle (SSP)

超新星爆発によるフィードバック : Hasegawa & Semelin (2013) と同様

各タイムステップで、SSP内で爆発する星の数から放出されるエネルギーを計算し、そのエネルギーを周囲の5つの粒子に熱エネルギーとして与えた。星 1つの爆発につき、放出されるエネルギーは $E = 1\text{e}51 \text{ erg}$ とした。

表: 計算の分解能。質量の単位は太陽質量。

初期条件の作り方

MUSIC コード (Hahn & Abel 2011)を使って作成。

ボックスサイズ: 5 cMpc/h

初期の赤方偏移: 99

粒子数: 2^{21}

ズームインの仕方

$z = 8.3$ で $M = 5\text{e}9 M_\odot$ のハローを特定し、そのハローから半径 $R = 0.2 [\text{cMpc}/h]$ の領域をズームインした。

SPH粒子質量	1.4e5
ダークマター粒子質量	6.9e5
全バリオン質量	6.8e9
全ダークマター質量	3.2e10
ソフトニングパラメータ	44 [pc]

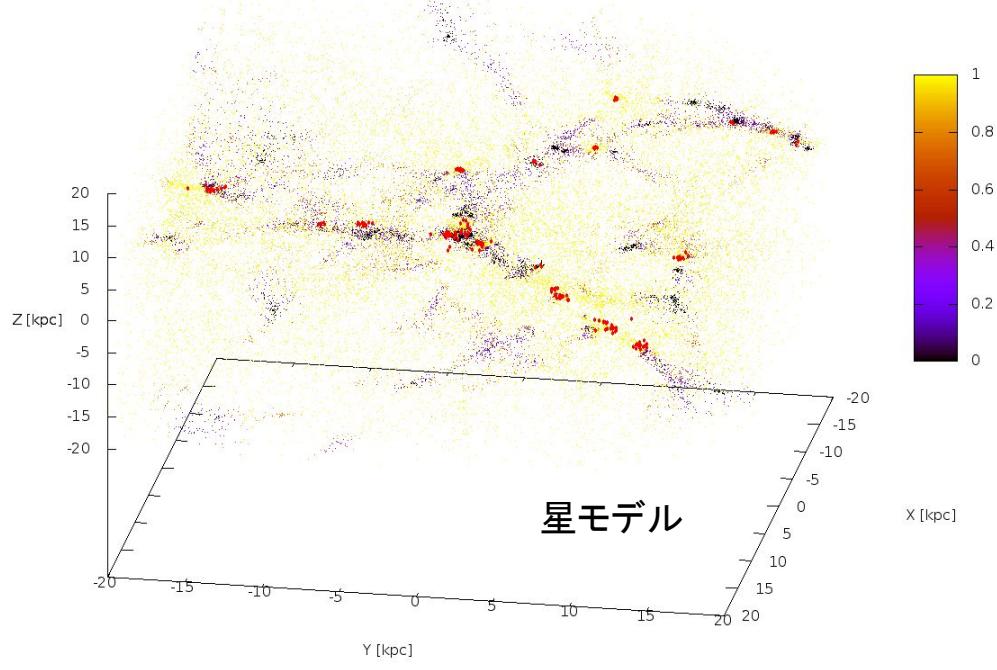
計算モデル

輻射流体計算を行う際には、輻射源が以下の 3パターンのモデルで計算を行った。

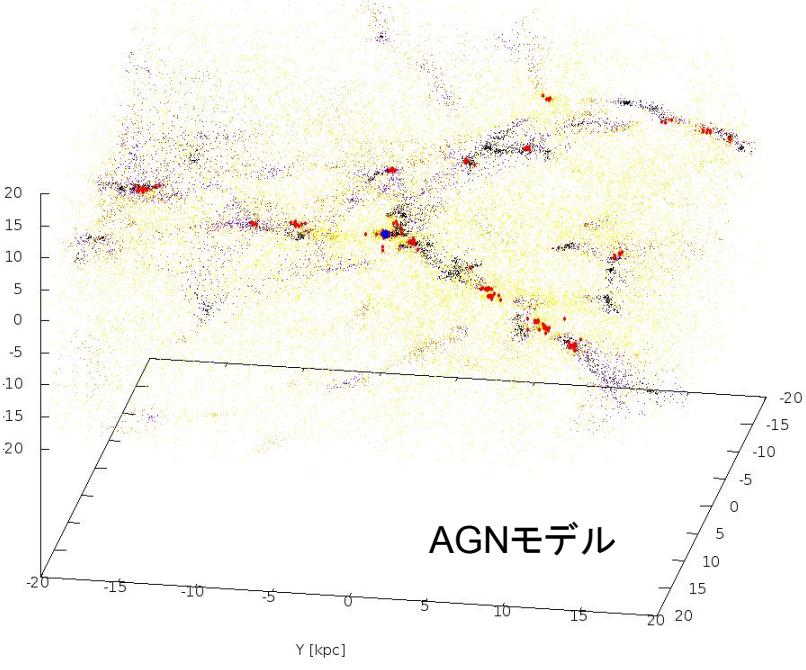
- (1) 星のみ : 星モデル
- (2) 星 + AGN : AGN モデル
- (3) 星 + 2つの AGN : two AGNs モデル

上記のようなセットアップで、赤方偏移 $z = 99$ から $z = 12.0$ まで計算行った。

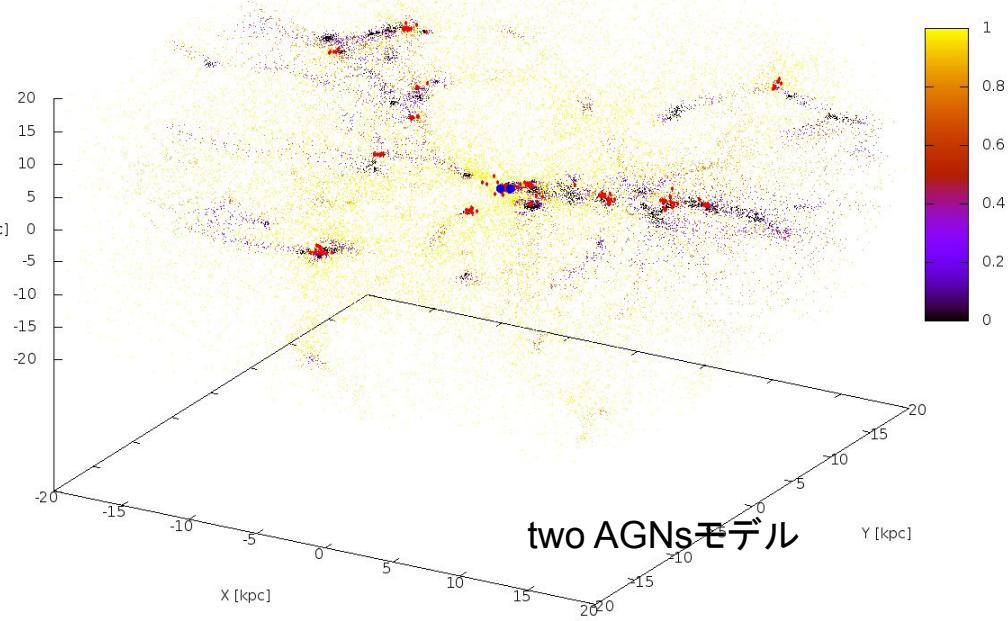
結果



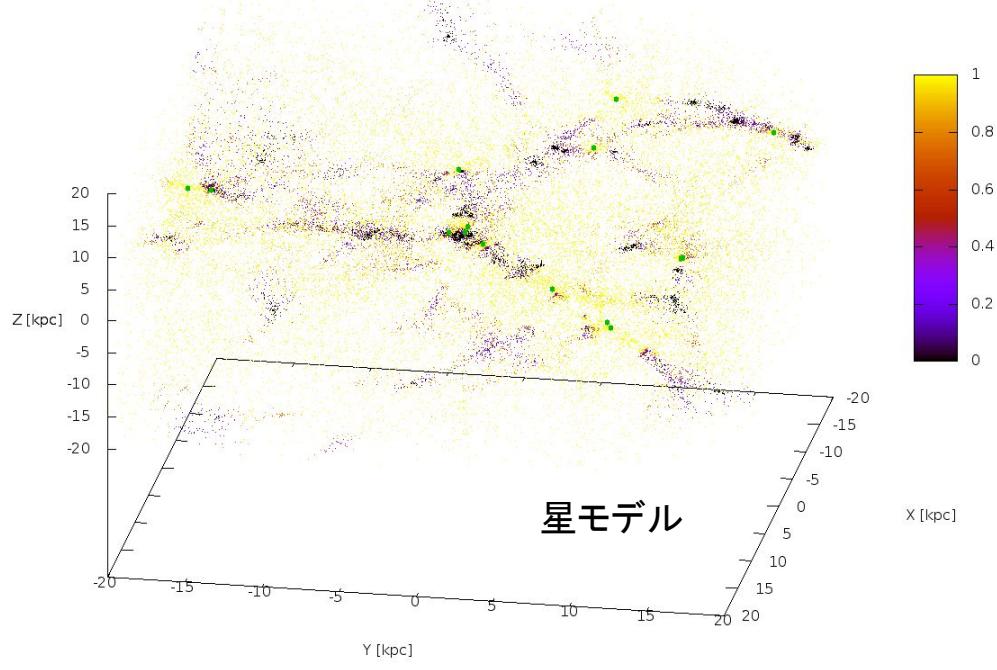
星モデル



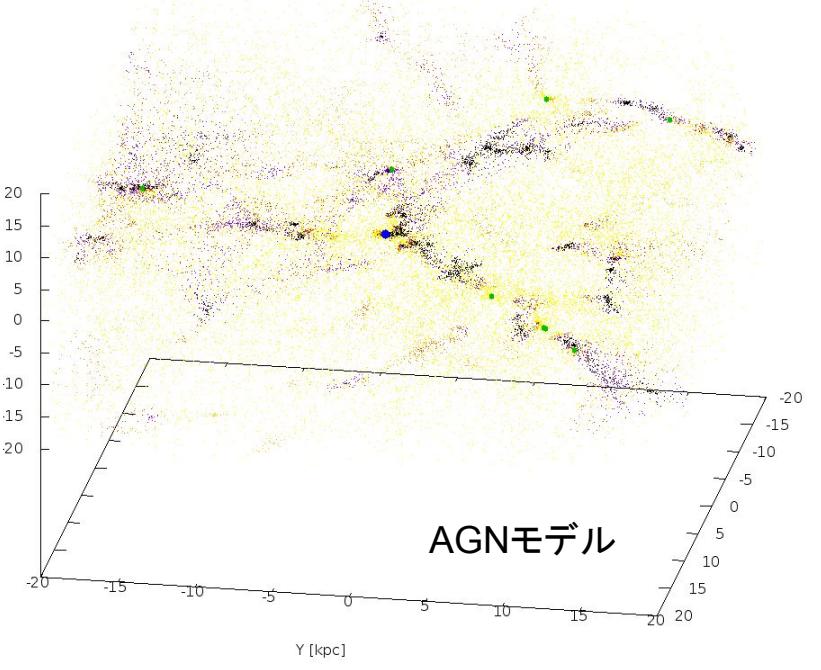
AGNモデル



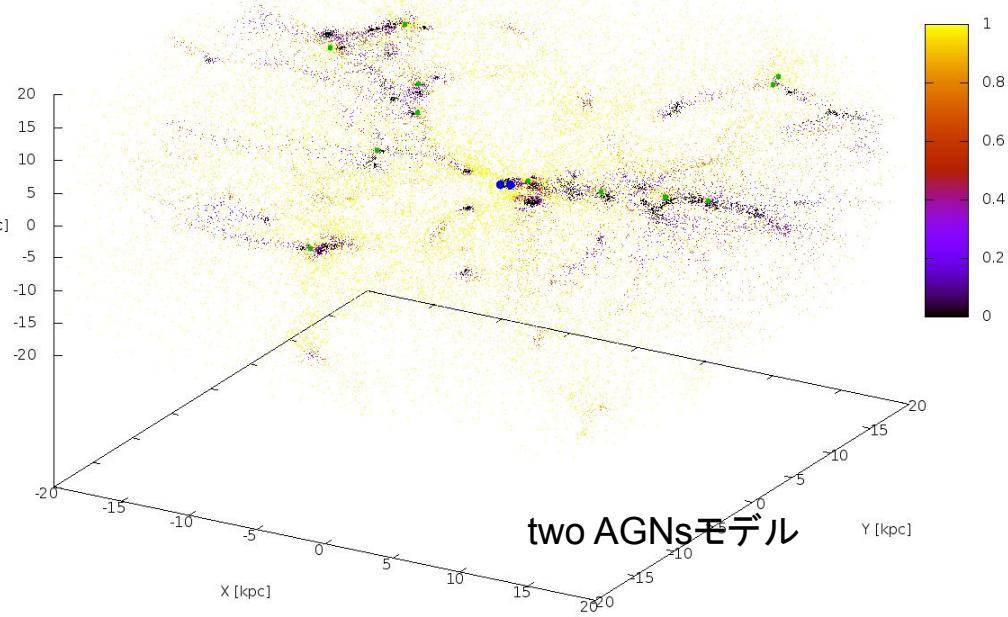
two AGNsモデル



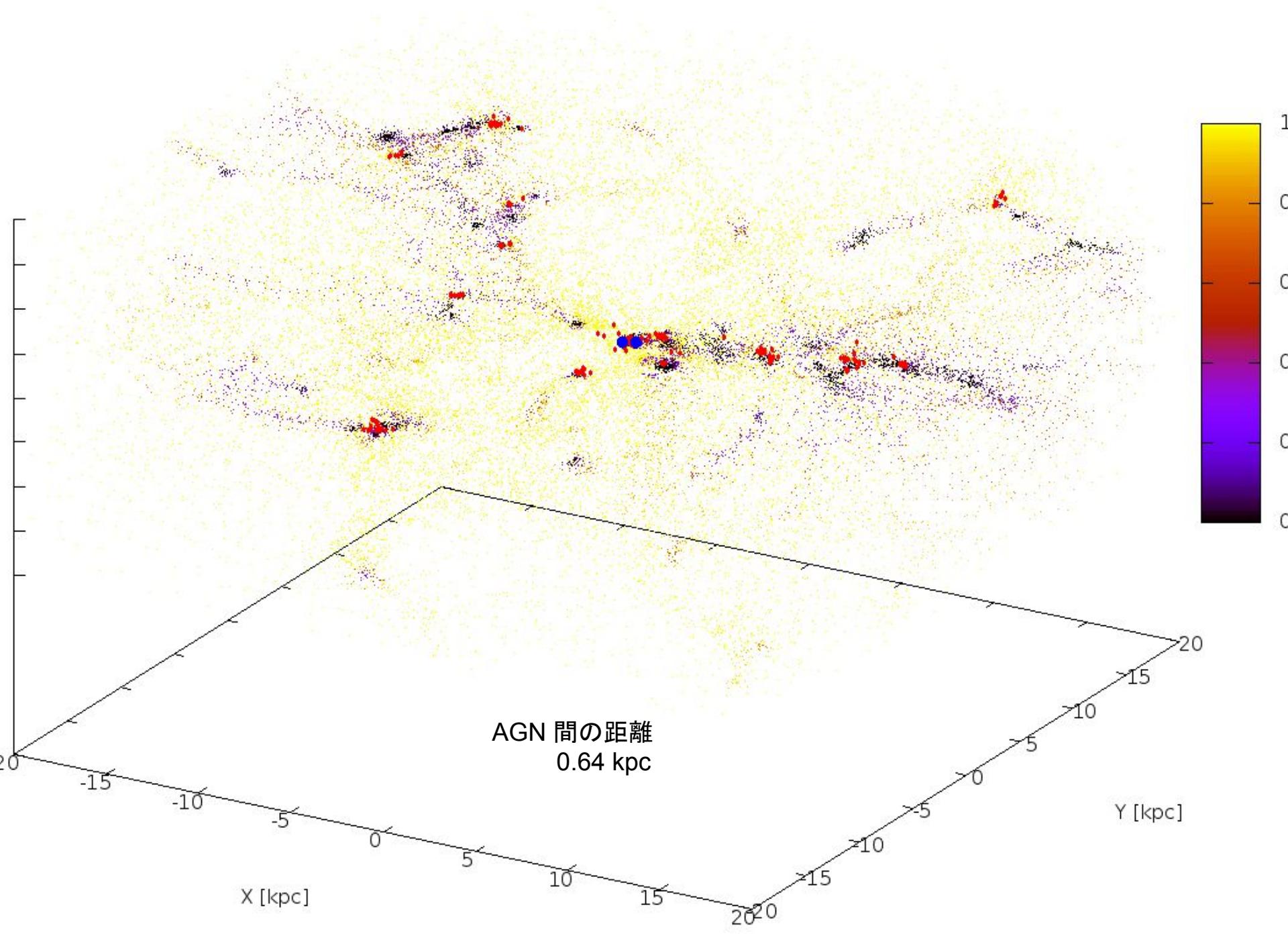
星モデル



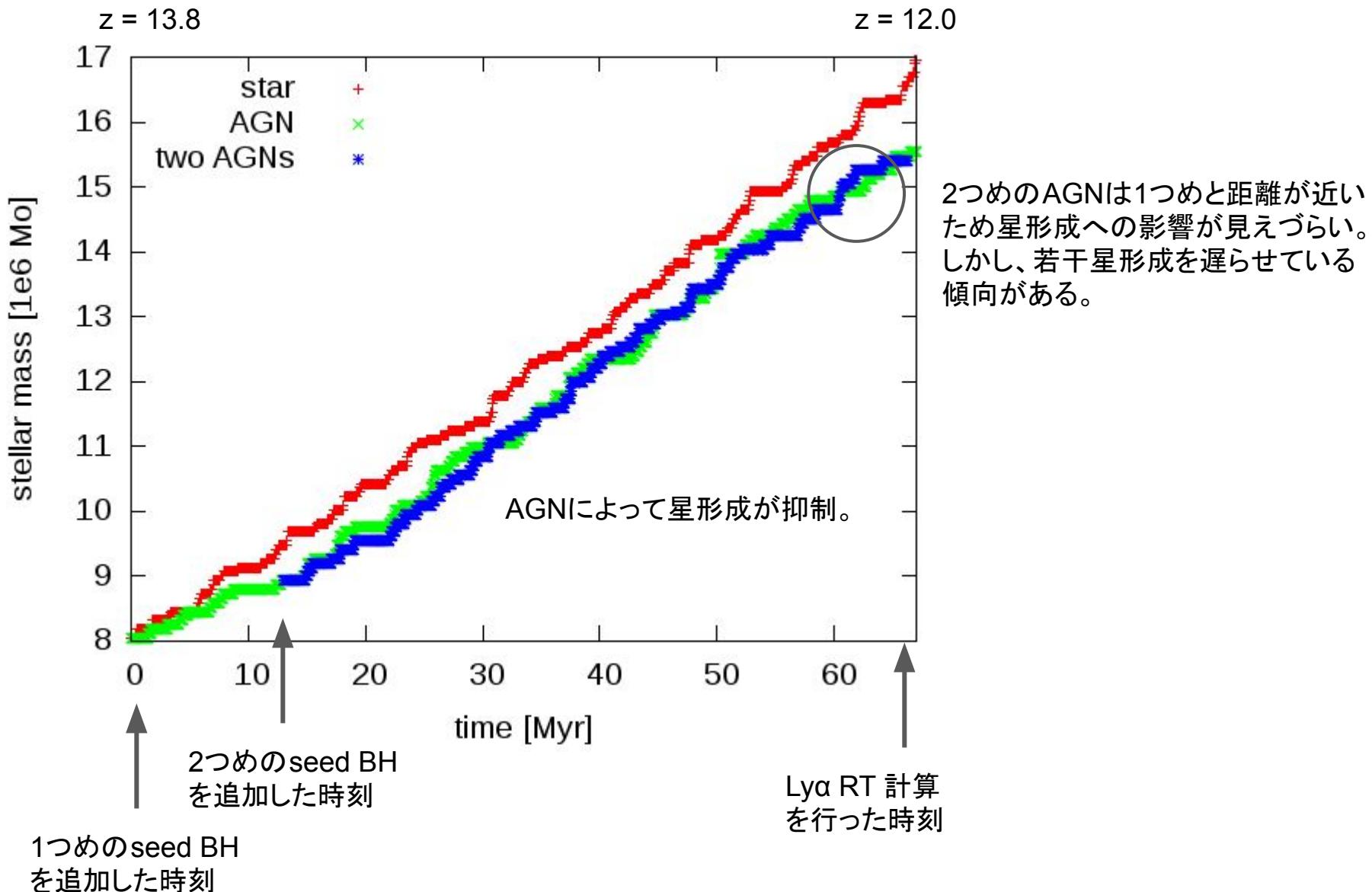
AGNモデル



two AGNsモデル

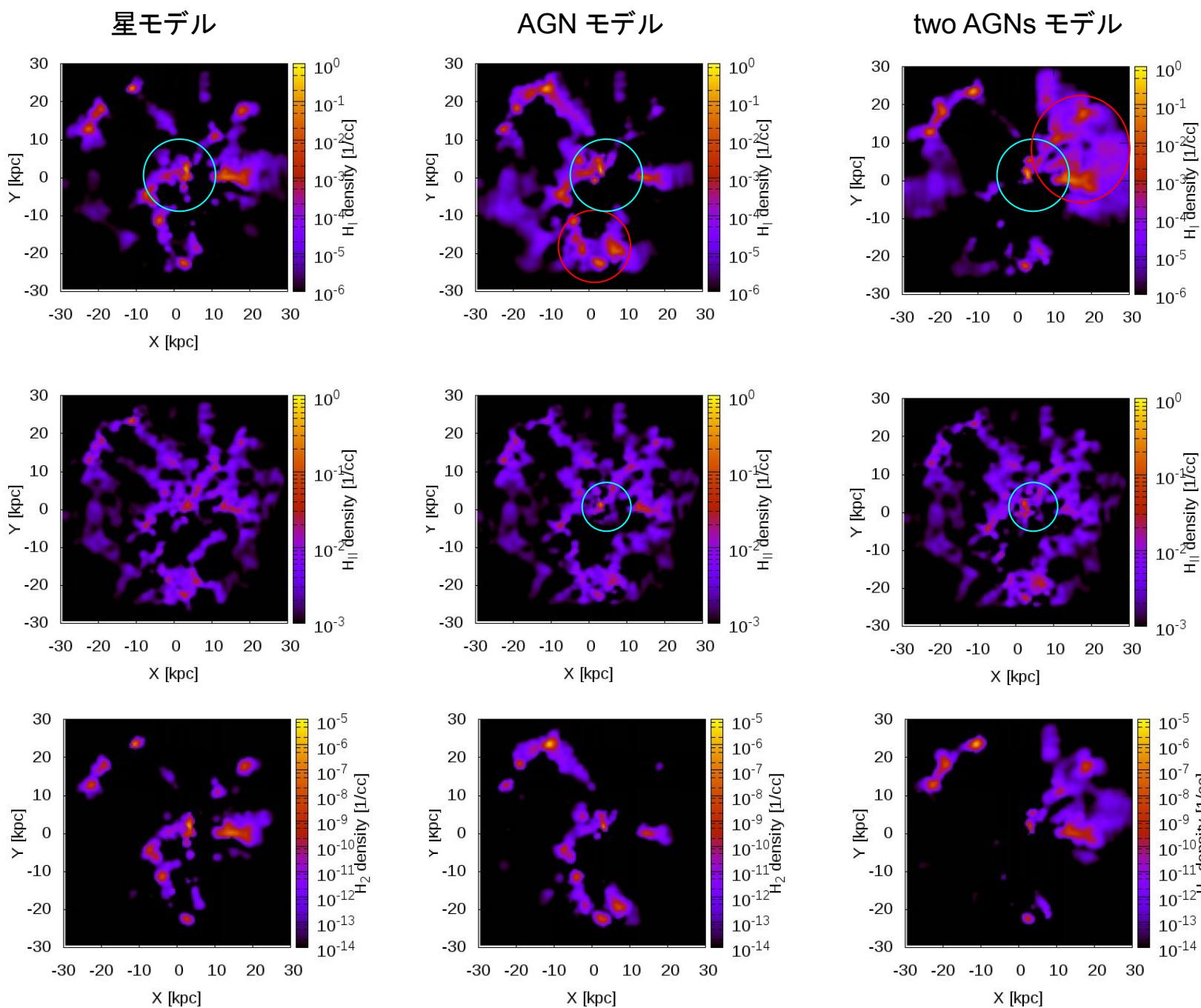


星形成史



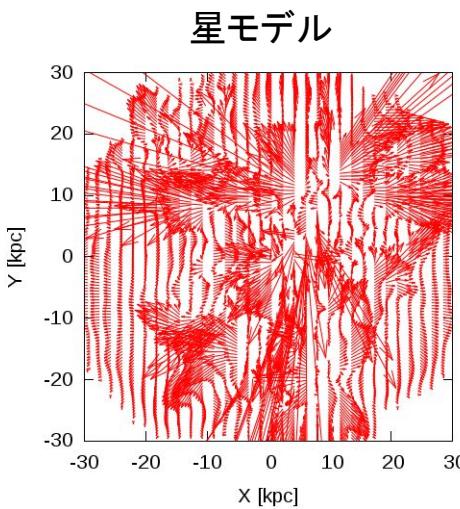
$Z = 12.0$

n_{HI}
中性水素
の数密度

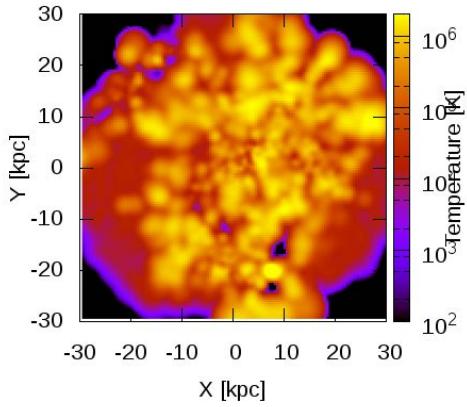


$Z = 12.0$

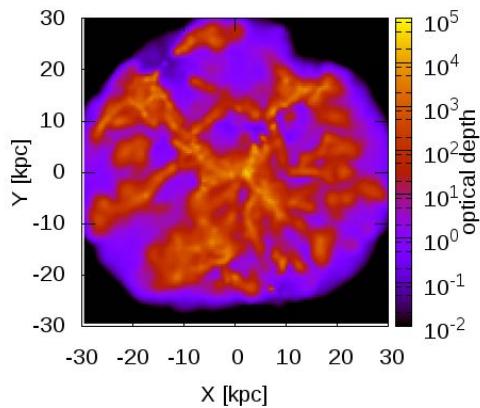
速度場



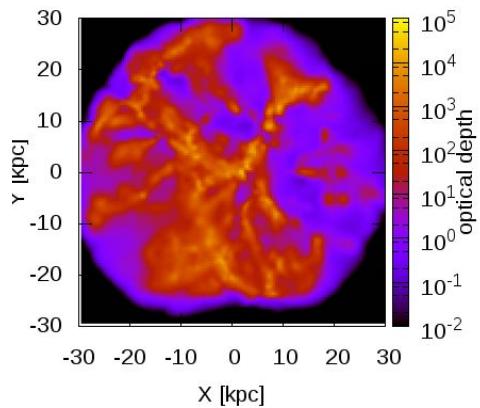
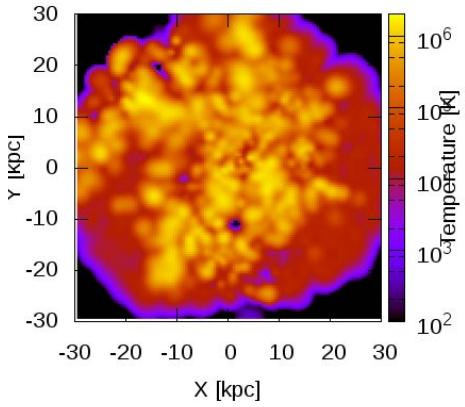
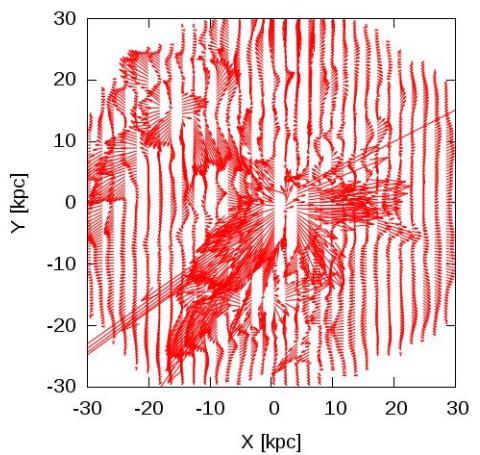
温度



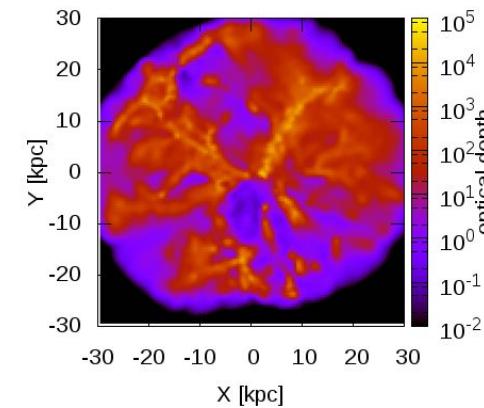
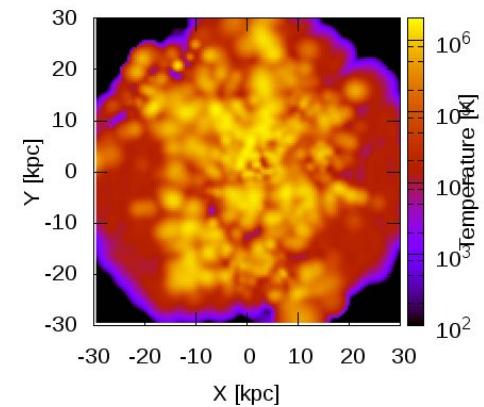
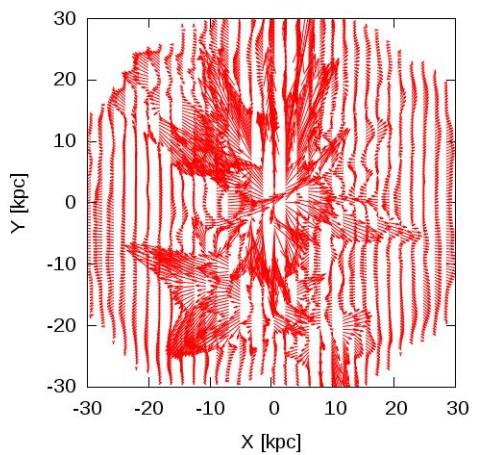
光学的厚み



AGN モデル



two AGNs モデル



$Z = 12.0$

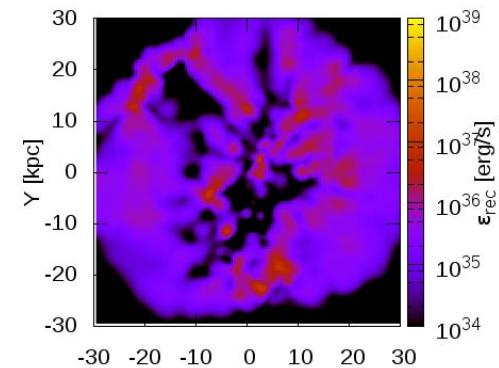
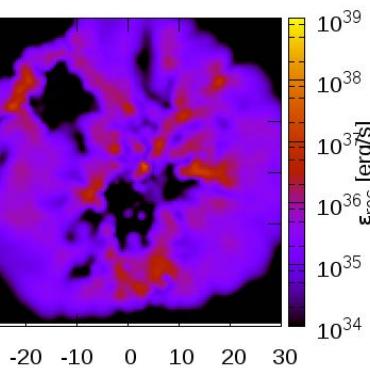
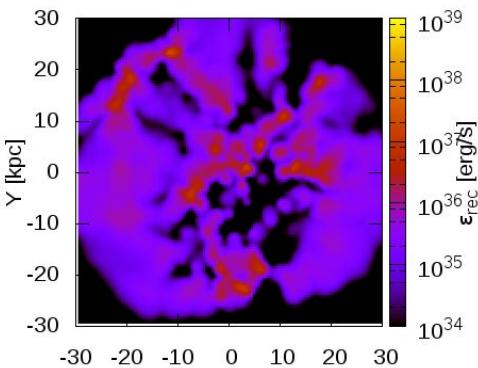
星モデル

AGN モデル

two AGNs モデル

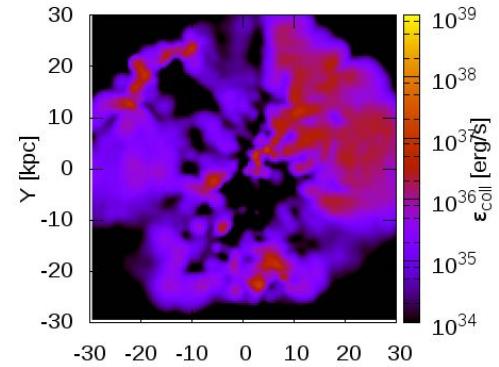
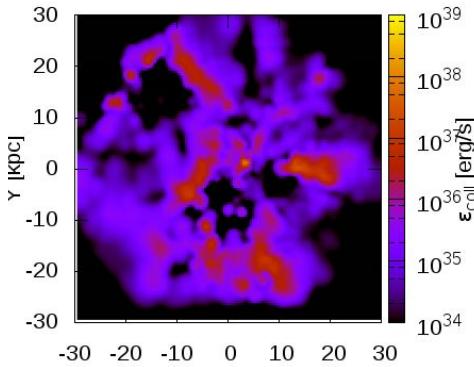
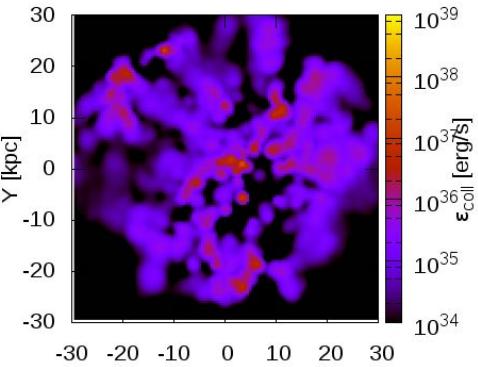
ϵ_{rec}

$$f_{\alpha \alpha B} h \nu_{\text{Ly}\alpha} n_e n_{\text{H}_\text{II}} \frac{m}{\rho}$$



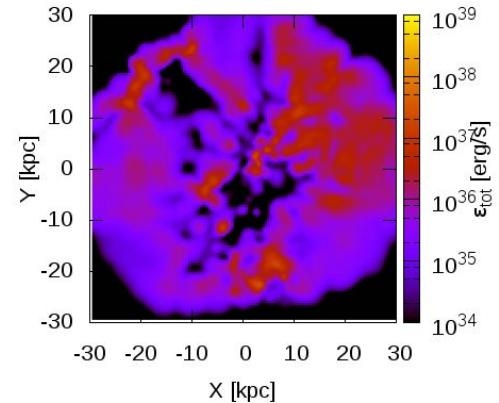
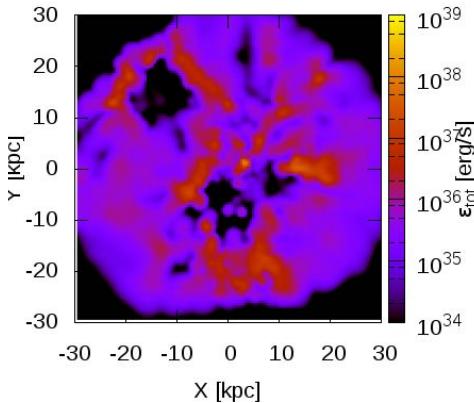
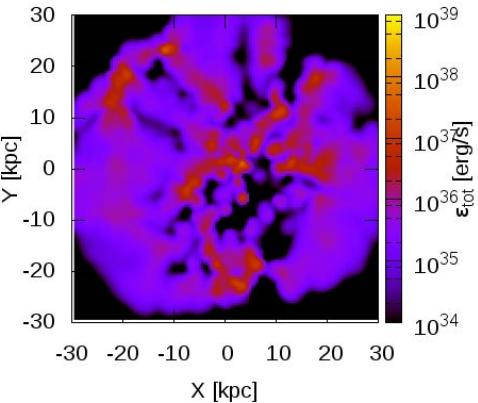
ϵ_{coll}

$$C_{\text{Ly}\alpha} n_e n_{\text{H}_\text{I}} \frac{m}{\rho}$$



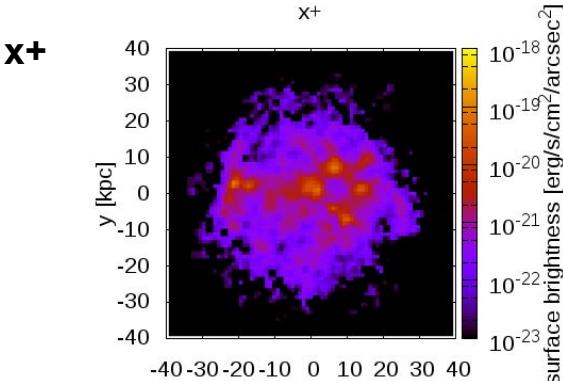
ϵ_{tot}

$$\epsilon_{\text{tot}} = \epsilon_{\text{rec}} + \epsilon_{\text{coll}}$$

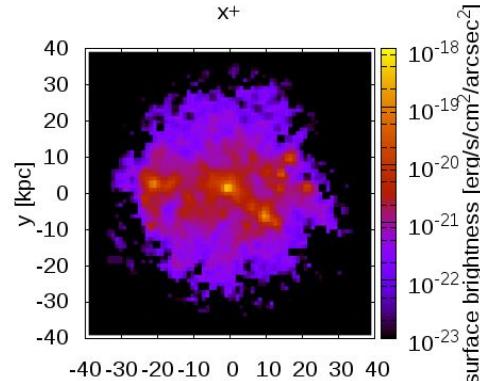


$z = 12.0$ Ly α 表面輝度分布

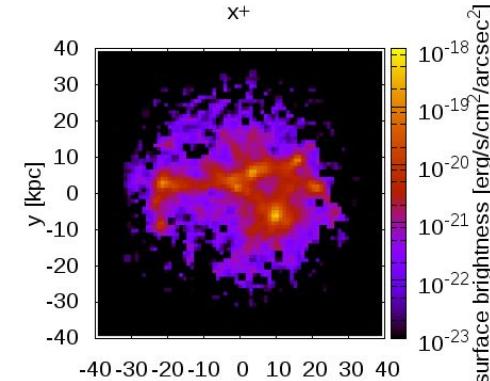
星モデル



AGN モデル

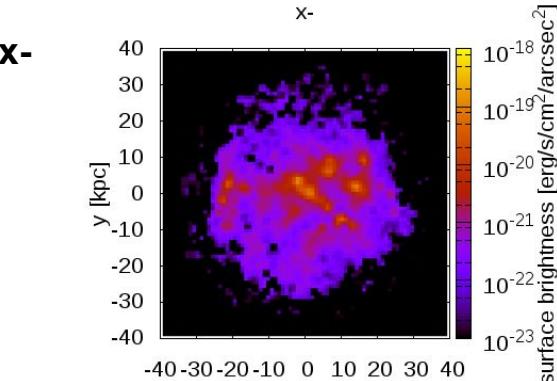


two AGNs モデル

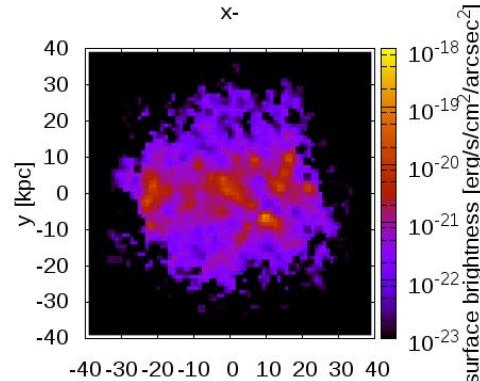


$z = 12.0$ Ly α 表面輝度分布

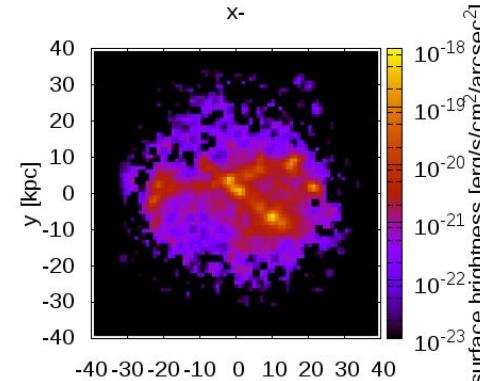
星モデル



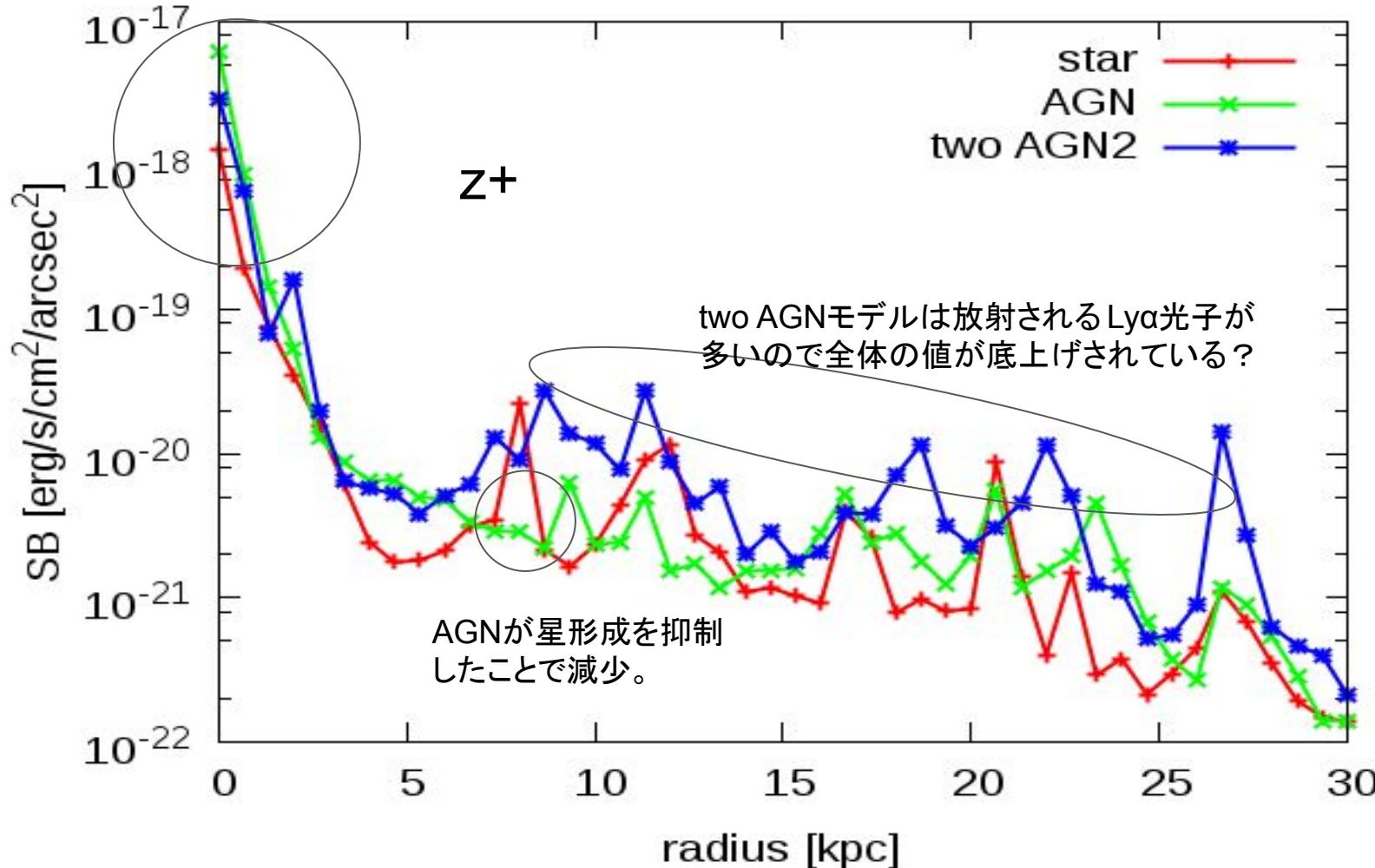
AGN モデル



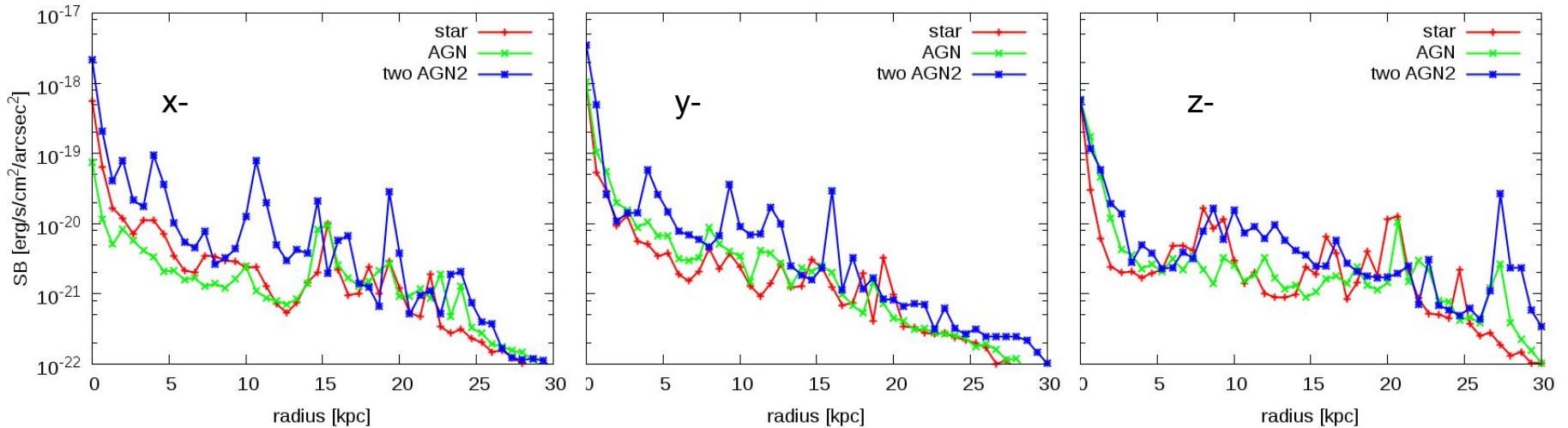
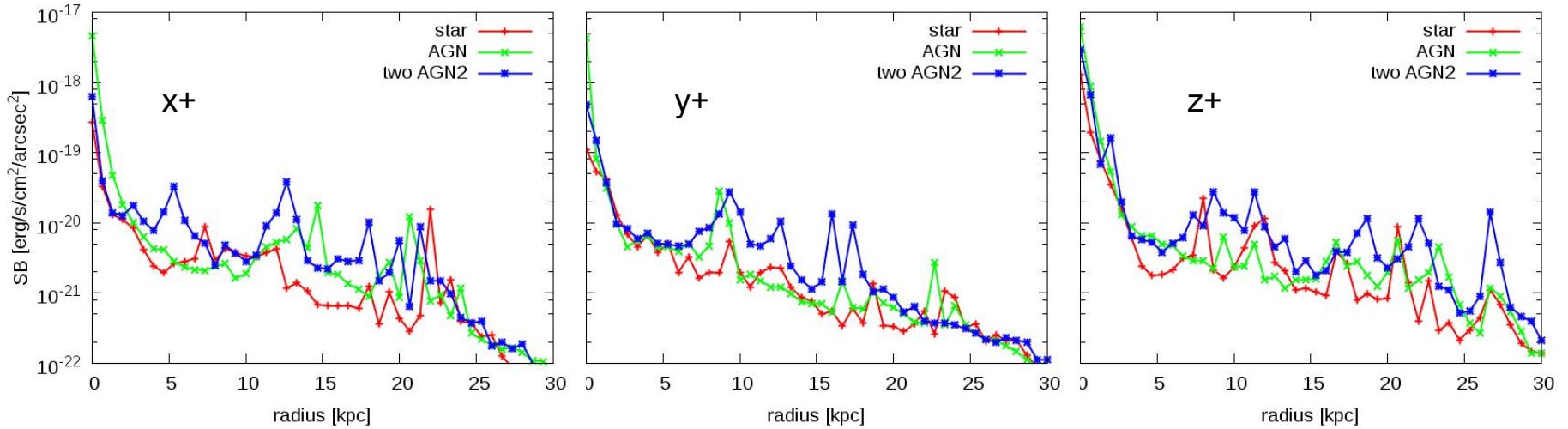
two AGNs モデル



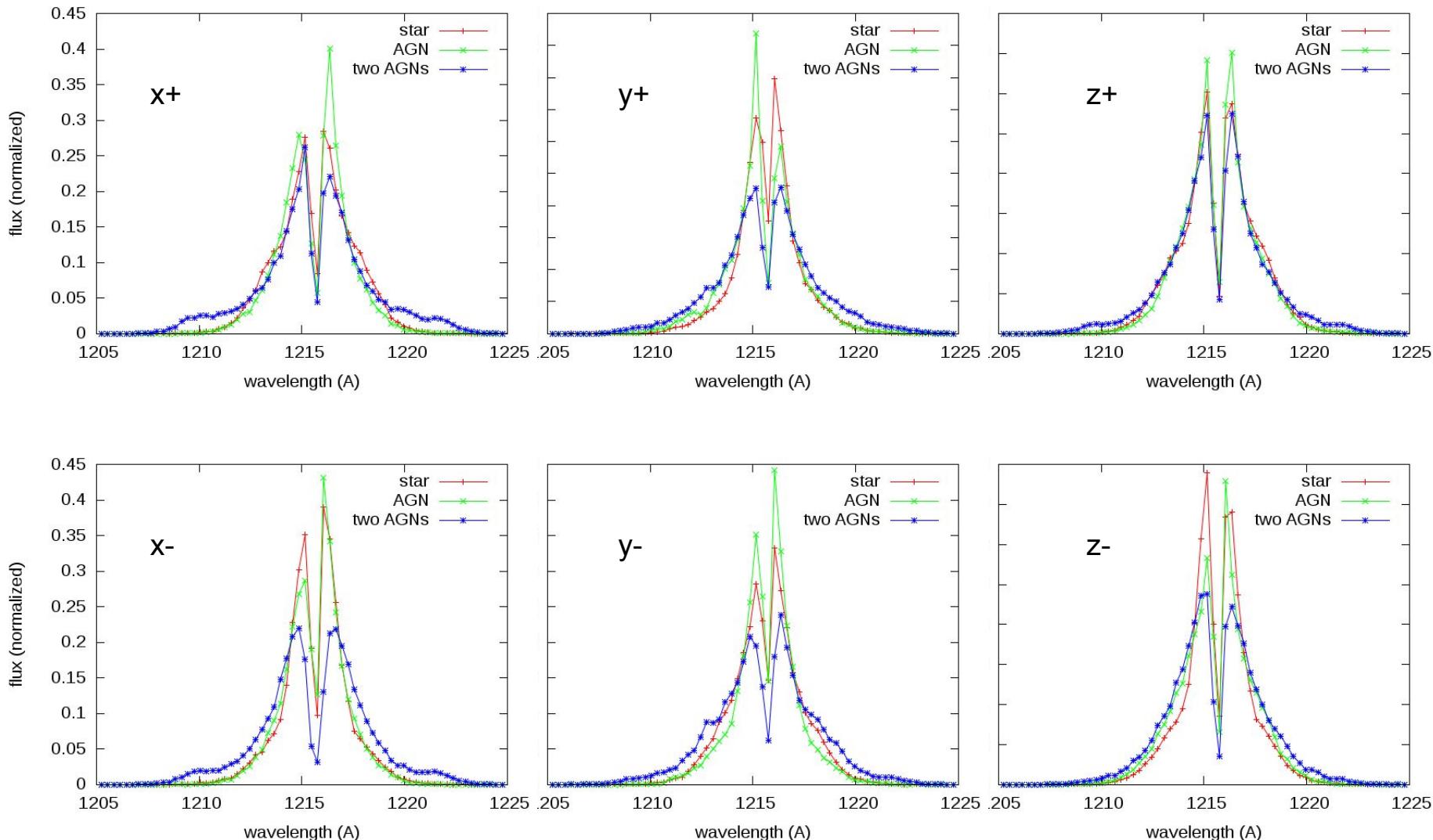
AGNによって電離されたガスに
よって表面輝度が増加。



model	erec [erg/s]	ecoll [erg/s]	etot [erg/s]	
star	2.70e42	6.95e41	3.40e42	1.0
AGN	3.27e42	2.20e42	5.48e42	1.6
two AGNs	6.07e42	3.10e42	9.16e42	2.7



脱出光子のスペクトル



スペクトルの拡がり

AGN モデル < 星モデル < two AGNs モデル

ピークの非対称性

two AGNs モデル < AGN モデル , 星モデル

考察

AGNはガスの電離に対して主に以下の2つの影響がある。

- 輻射によって周囲のガスを電離する効果
- 星形成を阻害することで、結果的にガスの電離を抑制する効果

表面輝度の動径方向プロファイル

- 中心付近 ($R < 3 \text{ kpc}$) ではAGNを含むモデルが星モデルに比べて明るくなる傾向。これは、中心付近のガスがAGNによってより電離されることで、Ly α 光子の放射率が増加することや光学的厚みが減少してあまり散乱されずに系から抜けてくることが理由であると考えられる。外側の表面輝度は大質量星の分布に強く依存する。

脱出光子のスペクトル

- ピークの非対称性は two AGNs モデルが他モデルのより小さい。これは星モデルや AGNモデルの方が中心付近(～Ly α 光子がたくさん放射される場所)で two AGNs モデルよりも星が多く作られるため、超新星爆発によって速度場が乱されるため。
- AGNモデルのほうが星モデルよりも中心波長 ($\lambda = 1261 \text{ \AA}$) 付近で光子が脱出してる。AGNによって中心付近で光学的厚みが下がったため。

これらの特徴は見る方向、計算する時刻(～大質量星の分布)にも依存する。

また、ダスト吸収を入れると、星のみと AGN入りでさらに差がつく可能性も。

まとめと今後の展望

- AGNからのUV輻射を含む RHDシミュレーション + Ly α RT によってAGNの電離に対する影響を調べた。
- AGNはガスの電離に対して主に以下の2つの影響がある。
 - 輻射によって周囲のガスを電離する効果
 - 星形成を阻害することで、結果的にガスの電離を抑制する効果
- 上記の効果によって、Ly α の表面輝度は中心付近 ($R \sim 2\text{kpc}$) で増加した。
- 外側に関しては大質量星が生き残っているどうかに強く依存する。
- AGNが2つのモデルは放射される Ly α 光子の量が他のモデルに比べて多いため、表面輝度全体を底上げしている。
- $z \sim 7$ まで計算を進めて観測との比較を行いモデルを検討する。
- ダストを入れた Ly α 輻射輸送計算
- 光電離シミュレーションを行って、重元素輝線の調査(化学進化)
- 中心ブラックホールの質量が軽い場合の計算

pop III 起源 : $m \sim 100 \text{ Mo}$

direct collapse : $m \sim 1\text{e}4 - 1\text{e}5 \text{ Mo}$