

Ly α 輝線銀河中の AGN の形成過程について

天体形成研究会2017/10/13

筑波大学

宇宙理論研究室 B4

曾我健太

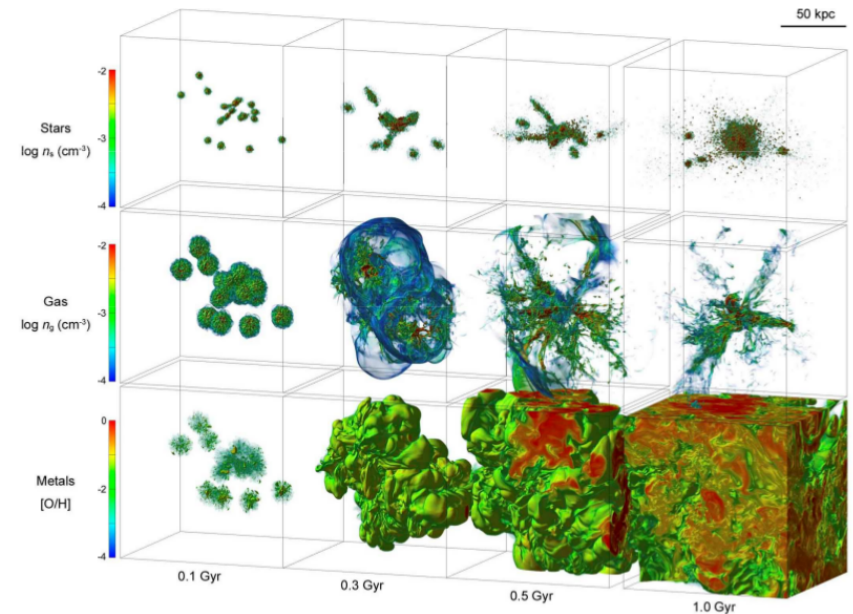


Motivation

- どうやって銀河と巨大ブラックホールが現在の形まで進化してきたのか？

- 現在の銀河の種と思われる $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河 (LAEs) を調べたらよさそう。

Umemura and Mori 2006



AGN とは

- Active Galactic Nuclei = 活動銀河中心核
- 銀河の中心部の狭い領域から、銀河全体を凌駕するほどのエネルギーを放出するような、強い活動性を示す部分。
- 基本的にこの活動性は、中心に存在する巨大ブラックホールに由来すると考えられている。



Ly α 輝線銀河と Ly α 光子

- Ly α 光子

- 水素の基底状態1sと励起状態2p間の遷移によって、吸収・放出される光子。散乱断面積が非常に大きく(中心振動数付近で $\sim 10^{14}\text{cm}^2$)、銀河内で多重散乱を起こしながら銀河外に脱出するか、途中でダストに吸収される。
- Einstein の A 係数が大きく、吸収してもすぐに再放射される。(散乱とみなせる。)

$$A_{2p \rightarrow 1s} = 6.26 \times 10^8 [\text{s}^{-1}]$$

- 波長は 121.6 [nm] (紫外光)
- 放射されるメカニズムは以下の2つ。
 - 大質量星などからの紫外線が水素ガスを電離させ、再結合で放出される。
 - 高エネルギーの電子との衝突で 2p に励起し、その後 1s に脱励起する際に放出される。

- Ly α 輝線銀河, Lyman-alpha Emitter (LAE)

Ly α 光子を放出する高赤方偏移銀河。原始銀河であると考えられている。



参考にした論文

Giant Lyman-alpha Nebulae in the Illustris Simulation

Max Gronke, Simeon Bird 2016 ApJ, 835, 207

- Illustris simulation
“(Vogelsberger et al. 2014; Nelson et al. 2015) has features a fully realized and well-tested model for galaxy formation, tuned to produce a realistic galaxy population at $z \sim 0$. This model includes **efficient supernova feedback**, **metal cooling** and, importantly for studying the gas around quasars, a recipe for **AGN feedback**.”



Introduction

- ・ ”巨大な” (extent>300kpc) Ly α 星団が見つかったが、そのエネルギー源と、電離源から離れた場所での Ly α 輝線の放出が分かっていない。

Cantalupo et al 2014 はシミュレーションでこの天体の広がりと光度が再現するためには追加の clumping が必要との結論。

They calculate the required clumping factor $C = \langle n_e^2 \rangle / \langle n_e \rangle^2$

$$20 < C < 1000$$

→ そこで、Illustiris シミュレーションのデータを用いてこれを再検討。

- ・ 電離のモデルとして、星と AGN からの電離の2パターンを検討。
- ・ 表面輝度 (SB)、Ly α スペクトルを計算し観測値と比較。



Methods (1) 流体シミュレーション

- Illustris シミュレーション

- ・ ガス冷却、光電離、BH フィードバック、星形成や AGN のフィードバックが含まれる。
- ・ 分子冷却は入っていない。

- ハロー

- ・ $M \sim 10^{12.5} M_{\odot}, z \sim 2$ 初期のneutral fraction $\sim 30\%$
- ・ 中心に BH 存在。mass inflow rate: $dm/dt \sim 1.23 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$

- 温度 T

$$T = \frac{2u\mu}{3k_B} \quad \mu : \text{ガスの平均分子量} \quad u : \text{内部エネルギー} \quad k_B : \text{ボルツマン定数}$$

- ダストの数密度

$$n_d = \left(n_{H_I} + f_{\text{ion}} n_{H_{II}} \frac{Z}{Z_{\odot}} \right)$$

n_{H_I} : 中性水素の数密度 $n_{H_{II}}$: 電離水素の数密度

f_{ion} : ガスに対するダストの割合 (ここでは 0.01)

Z : metallicity



Methods (2) 電離モデル

(1) AGN

- ・ 中心 BH から半径 r_{ion} 以下の球状の領域内のすべてのセルを電離。

(2) 星による電離

- ・ 以下の式によって star-forming cell を電離。

$$\Delta X_{H_I} = \frac{Q_{\text{ion}} m_{\text{ion}}}{n_{H_I}^2 \alpha_B(T) V_{\text{cell}}} \quad Q_{\text{ion}} = 2 \times 10^{53} \frac{\text{SFR}}{1 M_{\odot} \text{yr}}$$

- ・ $\alpha_B(T)$: case-B 再結合係数 V_{cell} : セルの体積

Ly α 光度の計算式

$$L_{\alpha,i} = \sum_{\text{cell}} n_{H_{II}} n_e N_{\alpha}(T) \alpha_B(T) V_{\text{cell}}$$

Model	Parameter	Description	Fiducial value
AGN	r_{ion}	Radius of ionized region around AGN	20 kpc
Stars	m_{ion}	Cell volume ionized in units of Strömgren spheres (Eq. (3))	1

n_e : 電子数密度 $N_{\alpha}(T)$: case-B の再結合で Ly α 光子の平均の数



Methods (3) 輻射輸送計算

- Ly α の輻射輸送計算にはモンテカルロ法を使用。

コード: *tlac* (Gronke and Dijkstra 2014)

- 2×10^6 Photon packages
- Voigt profile

- 脱出確率

$$w = \frac{N}{2} \exp(-\tau_{\text{obs}}(\nu))$$

• τ_{obs} : \mathbf{k} 方向に対する光学的厚み

- 表面輝度

$$SB_j = \frac{L_{\alpha,i} S_j}{D_L^2(z) \Omega_{\text{pix},j} N_{\text{phot}}} \quad S_j = \sum_j w$$

$\Omega_{\text{pix},j}$: ピクセル j の立体角 $D_L(z)$: 光度距離



Results: Ly α 光度

- 破線:すべてのグリッドが電離したときの Ly α 光度
- 星マーク:モデルの基準値
- どちらのモデルも適度な電離によって最大の Ly α 光度を得ることが可能。
- シミュレーションの値
($L_{\alpha,i,\max} \sim 2 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$) と
観測値 $2 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$
(quasar からの直接の放射は除く)
が近い。

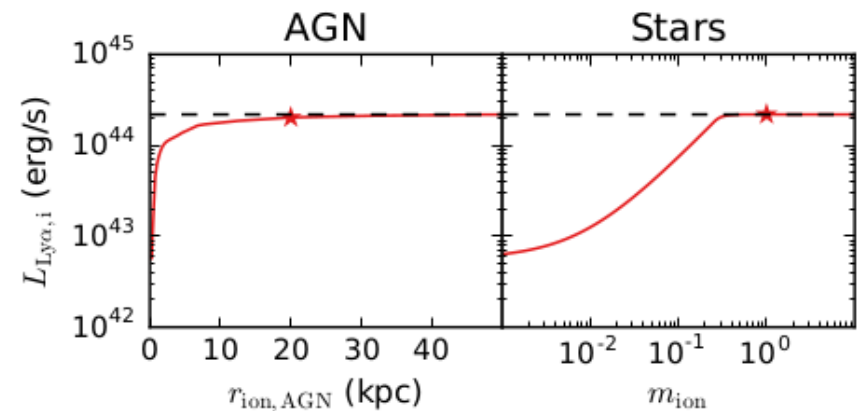


FIG. 1.— Intrinsic Ly α luminosities for the two models. The black-dashed line denotes the intrinsic luminosity reached if the entire grid is fully ionised and the red star symbols illustrate the choice of our fiducial models. From the two leftmost panels, it is clear that in each model reaching the maximal possible luminosity with the gas as given by the hydrodynamical simulation output is possible with either moderate ionization activity from either the star forming regions or the black hole.

Results: 表面輝度 (SB)

4

輻射輸送有り

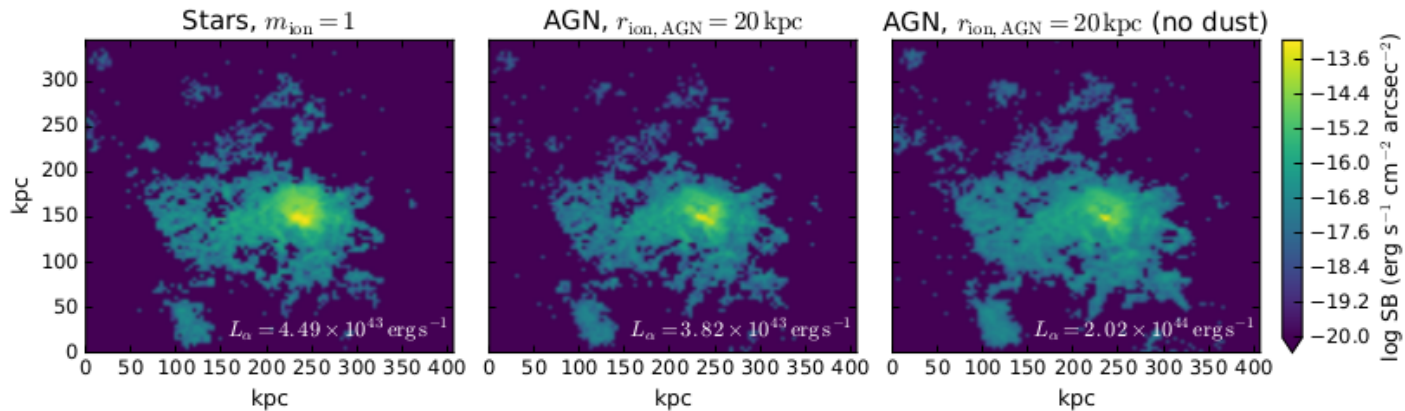


FIG. 2.— Surface brightness maps for the fiducial models (from left to right panel): star-driven ionization, AGN-driven ionization, and AGN-driven ionization without dust (see §2.2).

輻射輸送無し

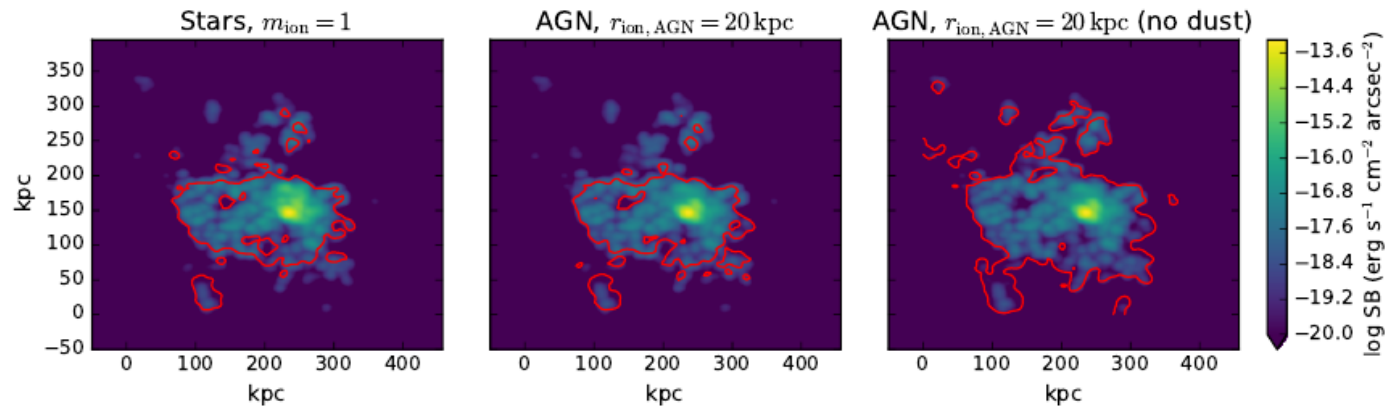


FIG. 10.— Intrinsic surface brightness maps for the fiducial models (see §2.2). The red lines denotes the $SB = 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ arcsec}^{-2}$ contours from of the full radiative transfer simulation (see §3.2 and Fig. 2).

Results: 表面輝度 (SB)

- SB は ”星” > ”AGN”
ハローから離れたところで”星”はより明るい。
- ビリアル半径より内側では、ダストと輻射輸送の効果は SB を下げ、外側では、輻射輸送効果は SB を上げている。
散乱効果は $\text{Ly}\alpha$ ハローの有効サイズを増加させる
- 再分配光子は比較的大きな値であるダストの光学的厚みの影響を受けるため、SB は下がる。

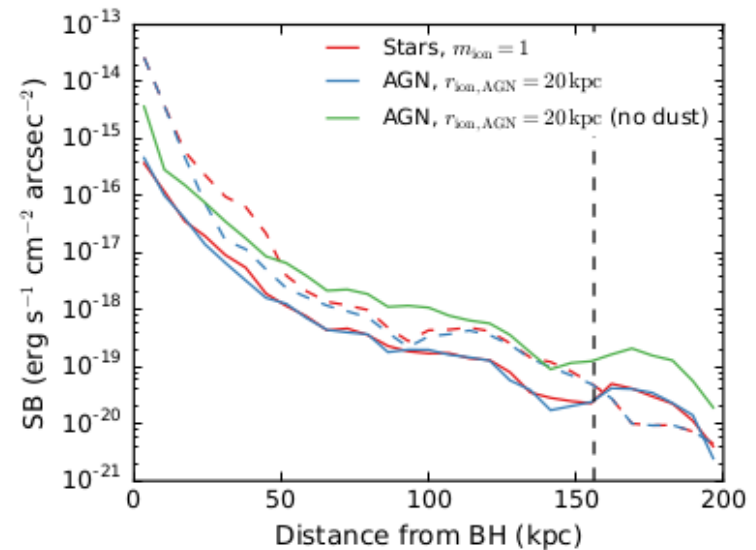


FIG. 3.— Radially binned surface brightness profile as a function of distance from the black hole for the fiducial models as ‘seen’ by an observer directed in the same way as in Fig. 2. The dashed and solid lines show the (intrinsic) surface brightness profile before and after the radiative transfer calculations, respectively. The vertical line denotes the virial radius of this halo (R_{200c}).

Results : Ly α スペクトル

- ・ “AGN” モデルは鋭いピークを示す一方で、星モデルは広がった”丸い”ピークを示す。
- ・ しかし、分解能が Ly α 輻射輸送を追えるほど十分でないため、スペクトルの形はモデルのパラメータに強く依存。

例えば、電離したセルに対する中性の割合の最小値 $X_{\text{HI,min.}}$ はスペクトルに強く影響し、これを “AGN” のほうで増やすと、広がった、2つのピークを持ったスペクトルが代わりに得られる。

- ・ また、観測方向もスペクトルに影響を与える。(方向によって光学的厚みに差があるため。)
- ・ これらのことより、流体力学的シミュレーションを使って、得られる Ly α スペクトルを予想、また、観測値と比較することは難しい。

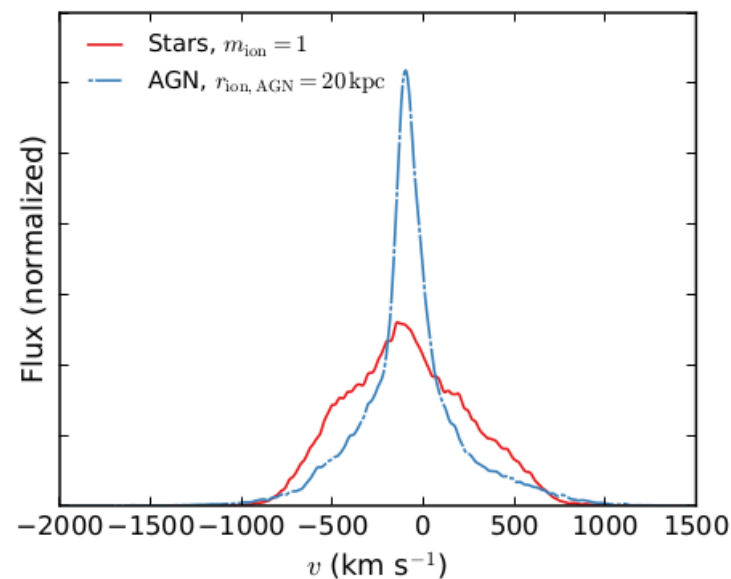


FIG. 4.— Ly α spectra taken from both our models in the direction used in Fig. 3. Note that the shapes of the spectra depend strongly on our fiducial model parameters (see §3.3).

Summary

- シミュレーションから以下の3点が明らかになった。
 - (1) ハローは観測データに近い $\text{Ly}\alpha$ 光度とサイズを示した。
 - (2) 追加の clumping は giant LAE の性質を説明するのには不要。
 - (3) 特定の方向は光学的に薄いために、 $\text{Ly}\alpha$ 光子はあまり散乱されず、1つのピークを持つスペクトルが得られた。
- しかし、スペクトルはシミュレーションの sub-resolution の性質（例えば、星間物質）に非常に敏感なため、スペクトルが電離源の情報を持っているかは不明。
- Cantalupo et al とは異なる結果となったのは
 - (1) 彼らの流体シミュレーションは超新星のフィードバックは考慮していたが、AGN は考慮していなかったから。

このスケールでは AGN のフィードバックはハローに対するガス分布に強く影響を及ぼしている。
 - (2) サイズに関しては SB の cutoff につよく依存するから。）



今後の課題

Gronke らの論文から AGN が重要な役割を果たしていそうなことがわかった。

- ・ どの程度寄与する? ← Gronke らは非常に単純なモデルだったが ...
- ・ 1つ?それとも複数?
 - ← 既に4つの AGN を持つ巨大星団は見つかっている。

(Hennawi et al 2015)

