

直接温度法に基づくLy α 輝線銀河の 電離パラメータ増加の発見

小島 崇史 (東京大学)

大内 正己 (東京大学), 中島 王彦 (ESO)

澁谷 隆俊, 播金 優一, 小野 宜明 (東京大学)

Q. Ly α emitter (LAE) は高電離状態にあるか？

→ 信頼性の高い直接温度法 “初”の比較調査



A. $z \sim 2$ LAEの電離パラメータは系統的に増加

Introduction

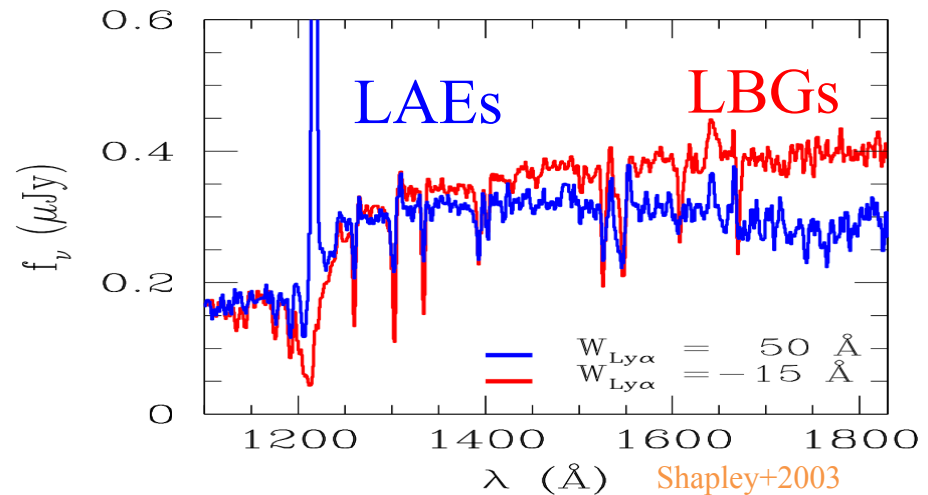
Introduction: $z \sim 2$ 銀河 と HII領域ガスの電離状態

→ Ly α emitter (LAE)

$$EW_0(Ly\alpha) > 20 \text{ \AA}$$

Lyman Break Galaxy (LBG)

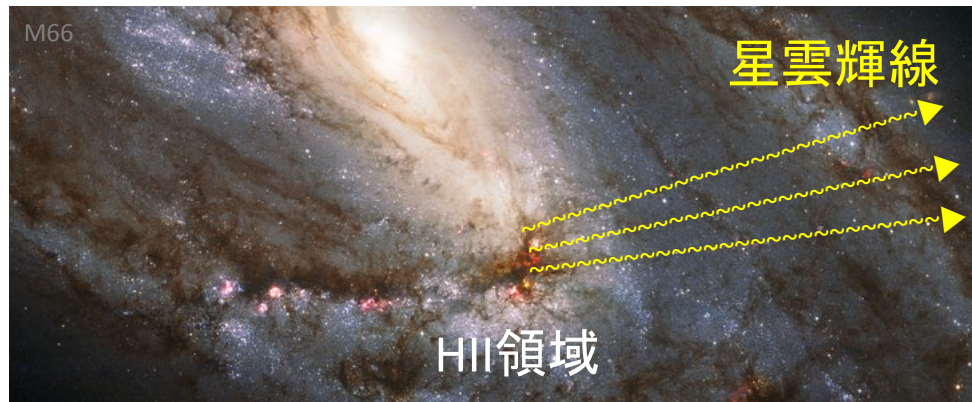
$$M_{UV} \lesssim -20$$



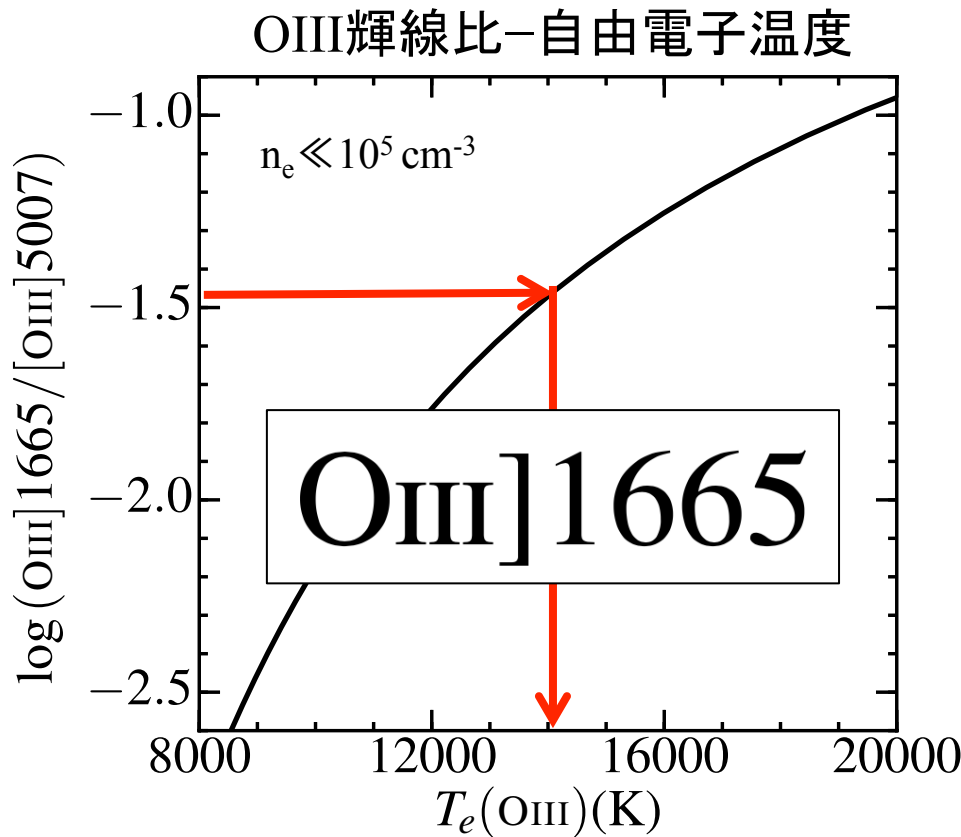
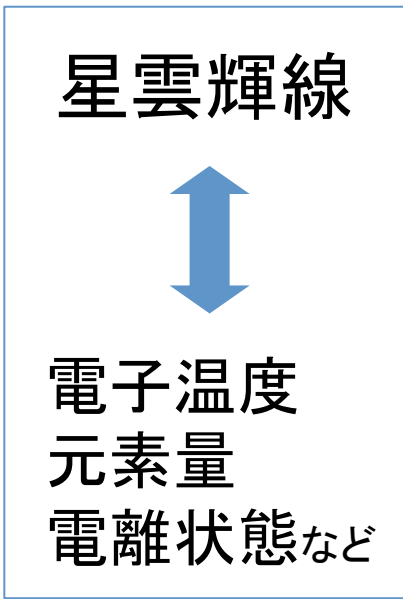
→ 電離状態を探る鍵 → 電離パラメータ (q_{ion}) & 金属量 (O/H)

$$q_{\text{ion}} \equiv \frac{\text{電離光子フラックス}}{\text{水素密度}}$$

↑
電離光子を
吸収/散乱



➤ 直接温度法 → 物理に基づく



$$\frac{O}{H} = \frac{[OII]3727}{H\beta} \times \boxed{F(T_e)} + \frac{[OIII](4959 + 5007)}{H\beta} \times \boxed{G(T_e)}$$

電子温度項 電子温度項

量子力学

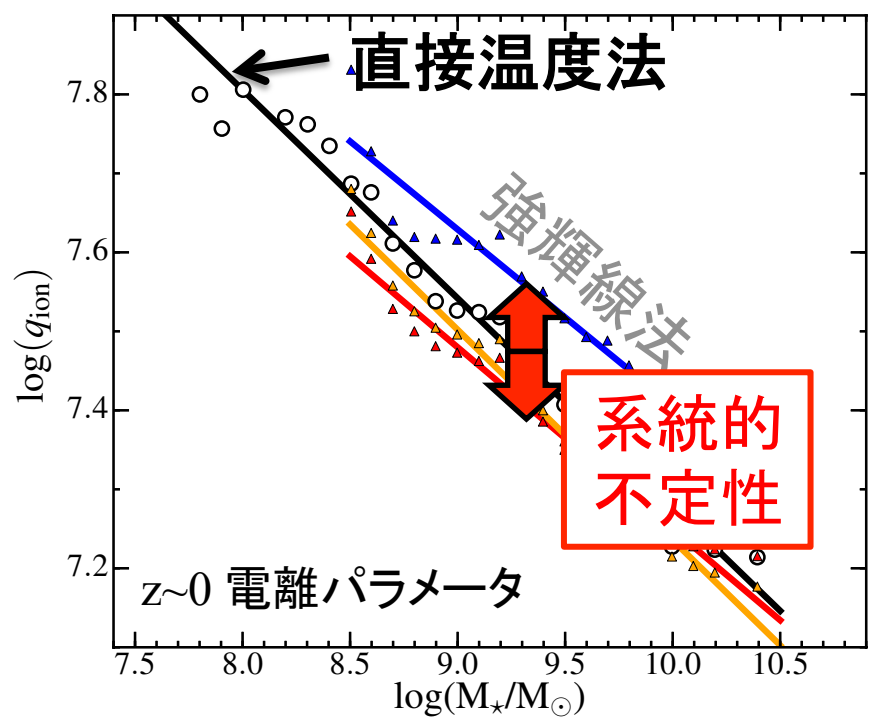
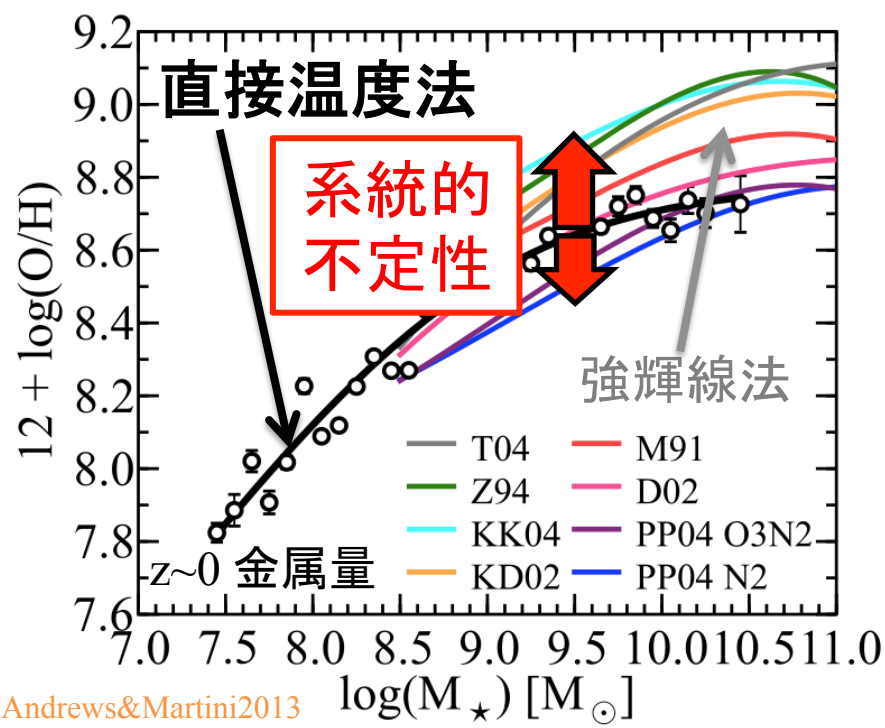
$$q_{ion} \leftarrow \frac{[OIII]5007}{[OII]3727}, T_e$$

$T_e \rightarrow$ 信頼の高い O/H , q_{ion} 決定が可能に

→ 強輝線法 → 代用的手法

校正：近傍のHII領域/モデル

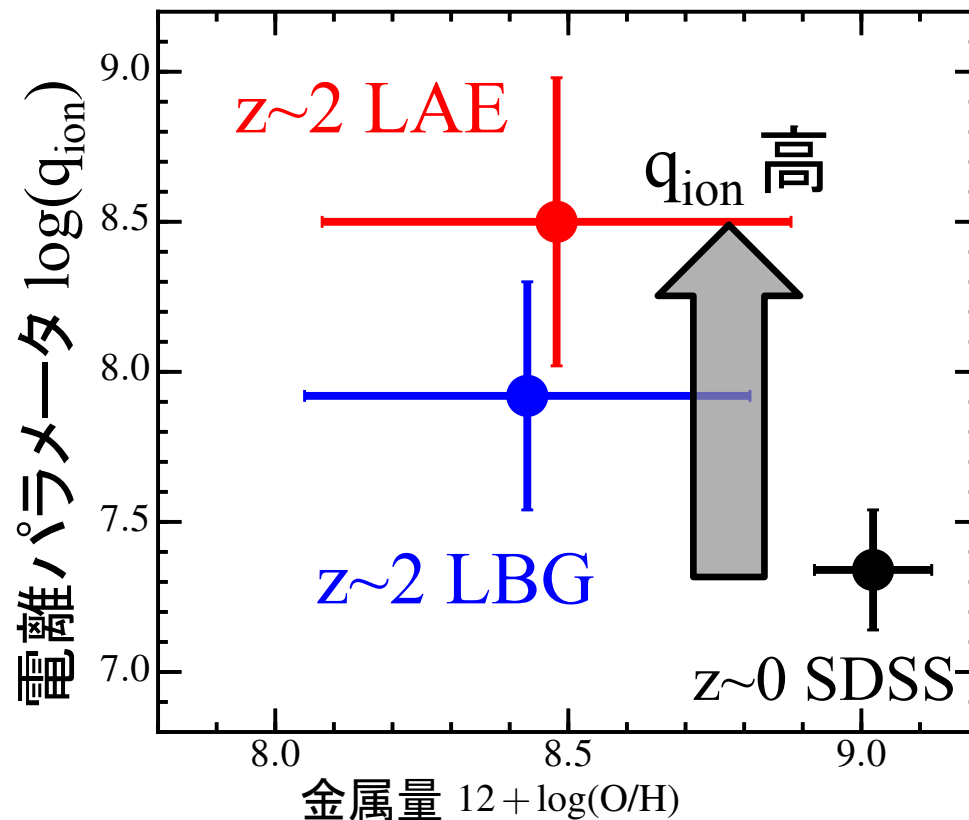
- 強輝線法の問題
- 1) $z \sim 0$ 銀河ですら系統的な不定性
 - 2) $z \sim 2$ でも成り立つ保証はない



→ 強輝線法では $z=0$ と $z=2$ を正確に比較できない

Introduction: $z \sim 0-2$ 電離状態の進化？

Nakajima & Ouchi 2014



→ 強輝線法

本当に q_{ion} 増加？

定量的説明は？

電離パラメータと
金属量の関係は？

→ $z \sim 2$ でも直接温度法による測定が必要

$[\text{OIII}]1665$

Observation & Sample

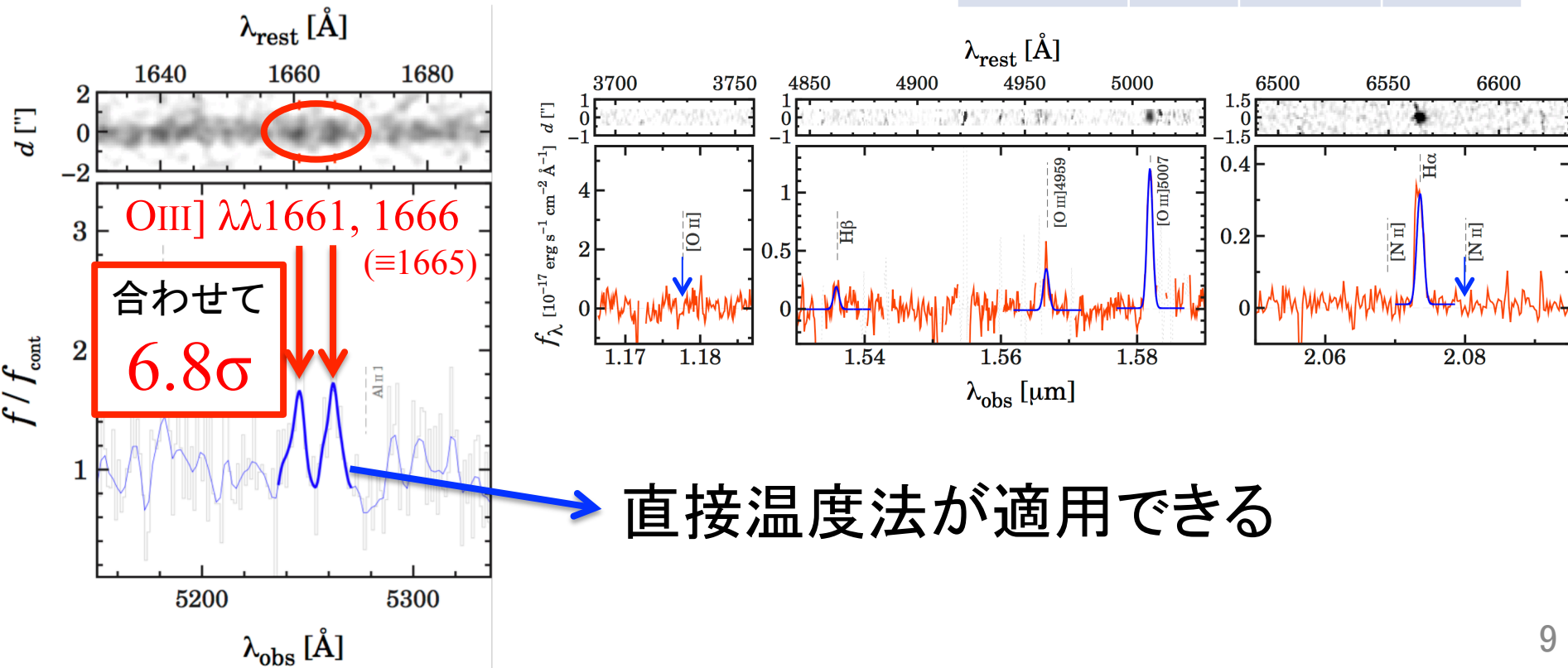
Observation: COSMOS-12805

→ 可視/近赤外分光観測: COSMOS-12805 (z=2.16 LAE)

- $\log(M_*/M_{\text{sun}}) = 9.44$
- $\text{SFR} = 34.7 M_{\text{sun}}/\text{yr}$
- $\text{EW}_0(\text{Ly}\alpha) = 33.7 \pm 6.0 \text{\AA}$

Nakajima+12, 13, Shibuya+14b

Instrument	Band	Date	Exp. time
Keck /LRIS	B	2012 Mar. 19-21	24000s
Subaru /FMOS	J _{long} & H _{short}	2012 Dec. 22-24	7200s & 23760s
Keck /MOSFIRE	K	2016 Jan. 4-5	7560s



Sample: z~2 LAE & LBG

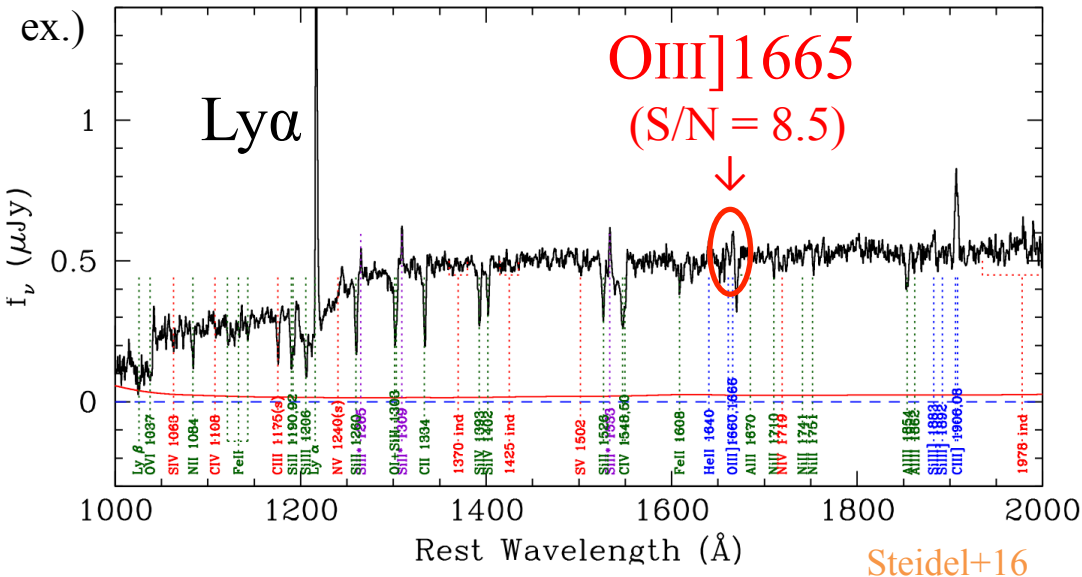
✈ z~2 星形成銀河サンプル (OIII]1665 & Lyα)

- i) 5 LAEs (COSMOS-12805 + 文献) → $EW_0(\text{Ly}\alpha) = 30\text{-}160\text{\AA}$
- ii) 30 LBGs (compositeスペクトル) → $EW_0(\text{Ly}\alpha) \sim 4\text{\AA}$ ~10 倍

i) Shibuya+14b; Steidel+14; Stark+14a; Erb+16; ii) Steidel+16

典型値

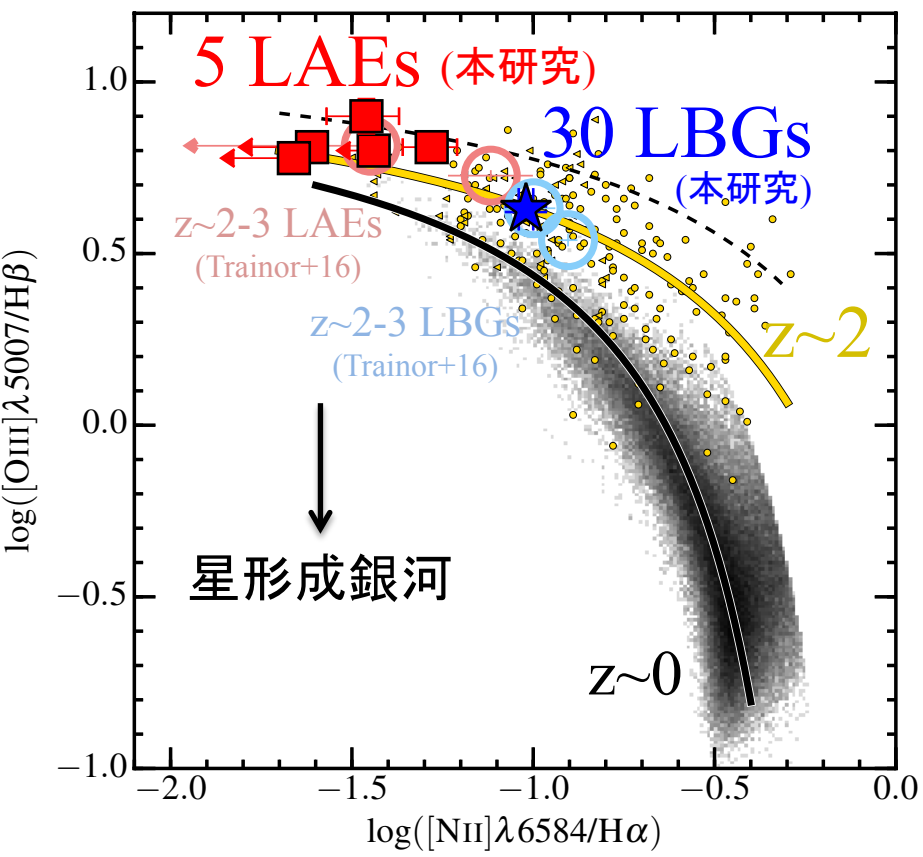
$z = 1.7\text{-}2.4$
 $M_* = 10^8\text{-}10^{10} M_{\text{sun}}$
 $\text{SFR} = 20\text{-}60 M_{\text{sun}}/\text{yr}$



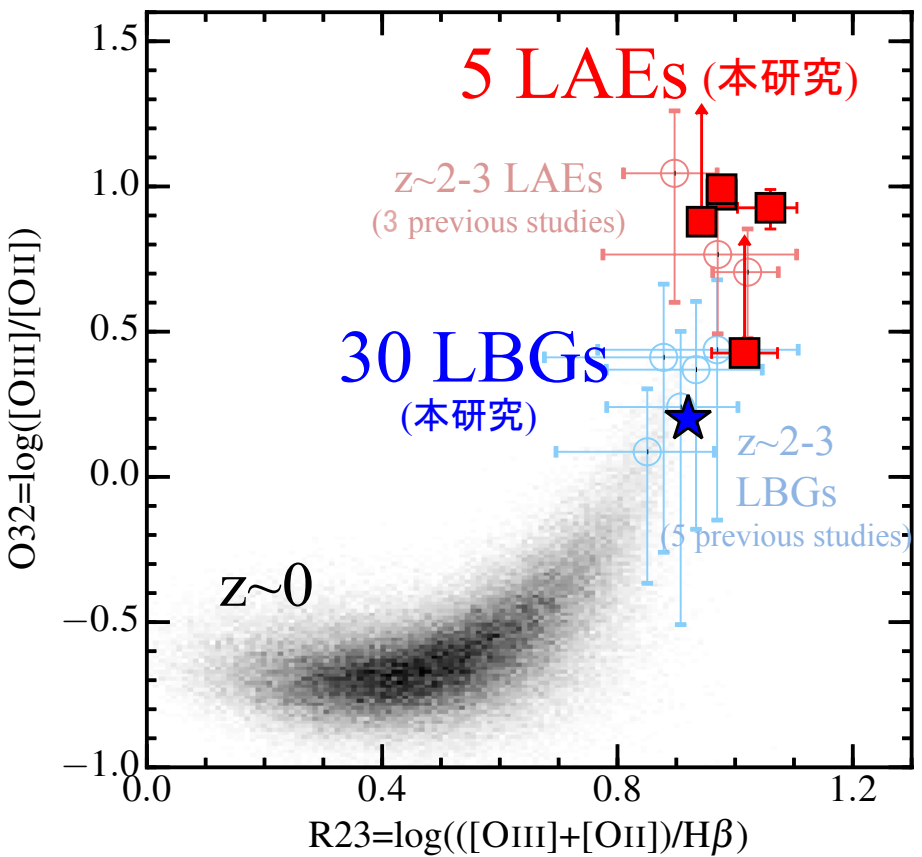
✈ ダスト減光補正 ($H\alpha/H\beta$) → $E(B-V)_{\text{neb}} = 0.0\text{-}0.2$

Sample: 輝線比ダイアグラム (バイアスチェック)

[NII] BPT ダイアグラム



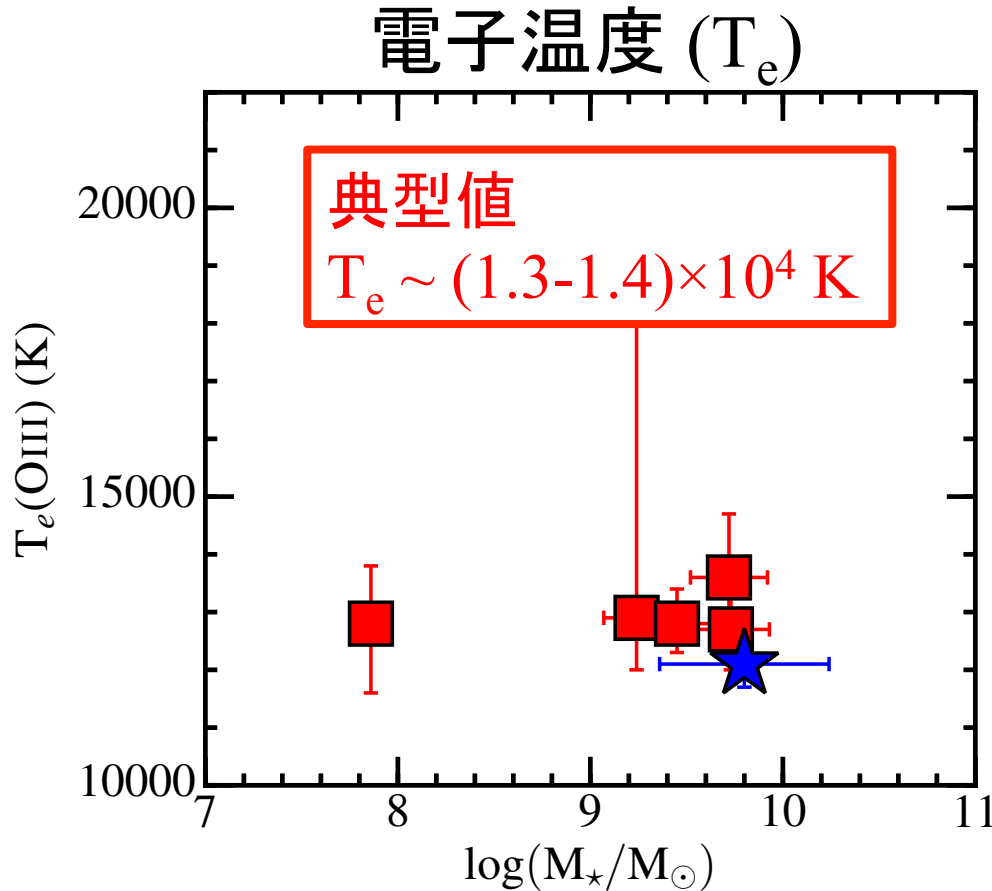
R23-O32 ダイアグラム



→ 選ばれたLAE/LBGは、典型的なLAE/LBG

Results

Results: T_e , O/H, q_{ion} 測定結果 (直接温度法)



直接温度法

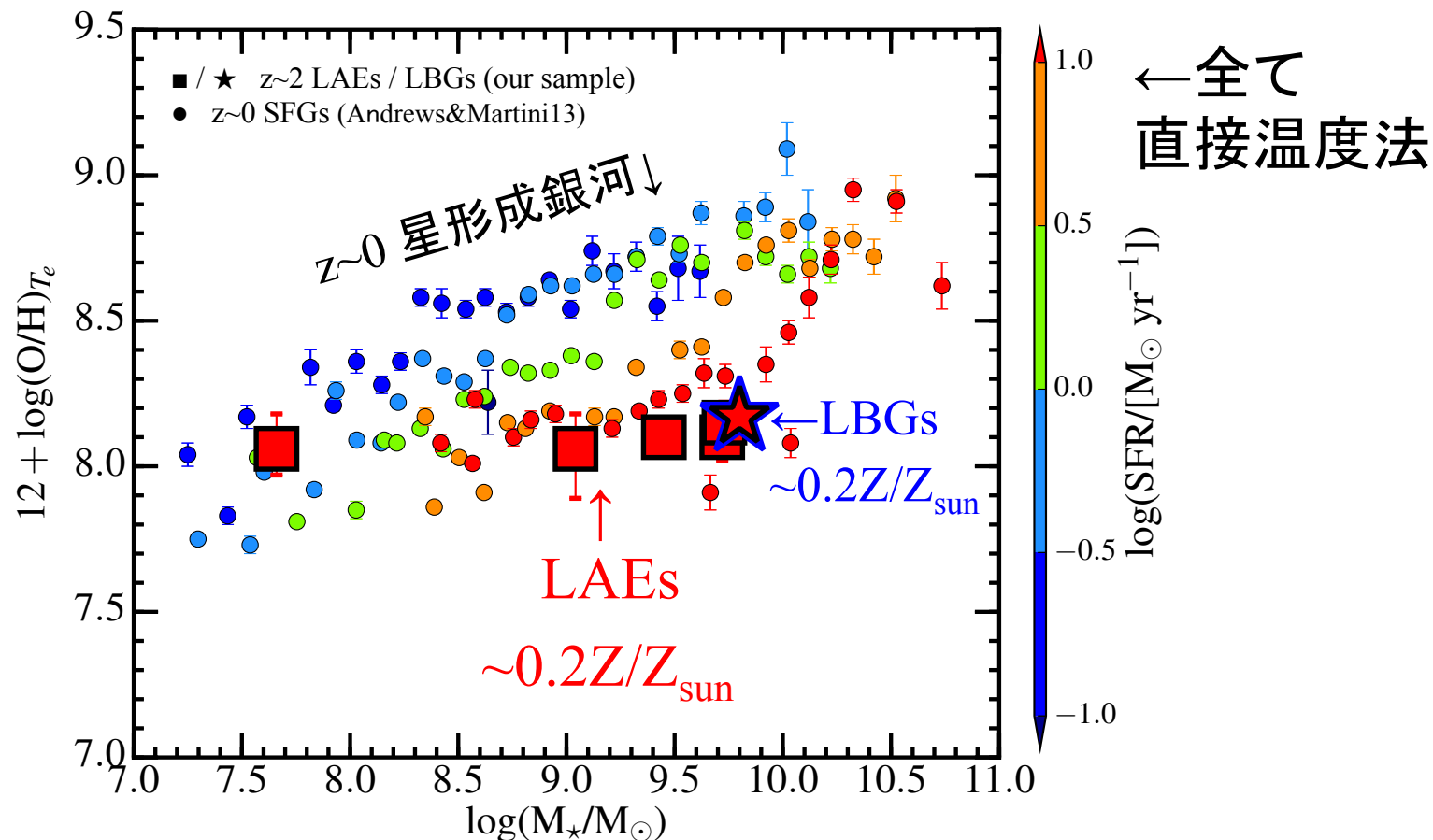
$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) \rightarrow 8.06 - 8.17$$

$$\log(q_{\text{ion}}/\text{cm s}^{-1}) \rightarrow 7.70 - 8.24$$

→ 直接温度法により信頼性の高い測定値を得た

Results: 金属量-星質量 ($O/H-M_*$) 関係

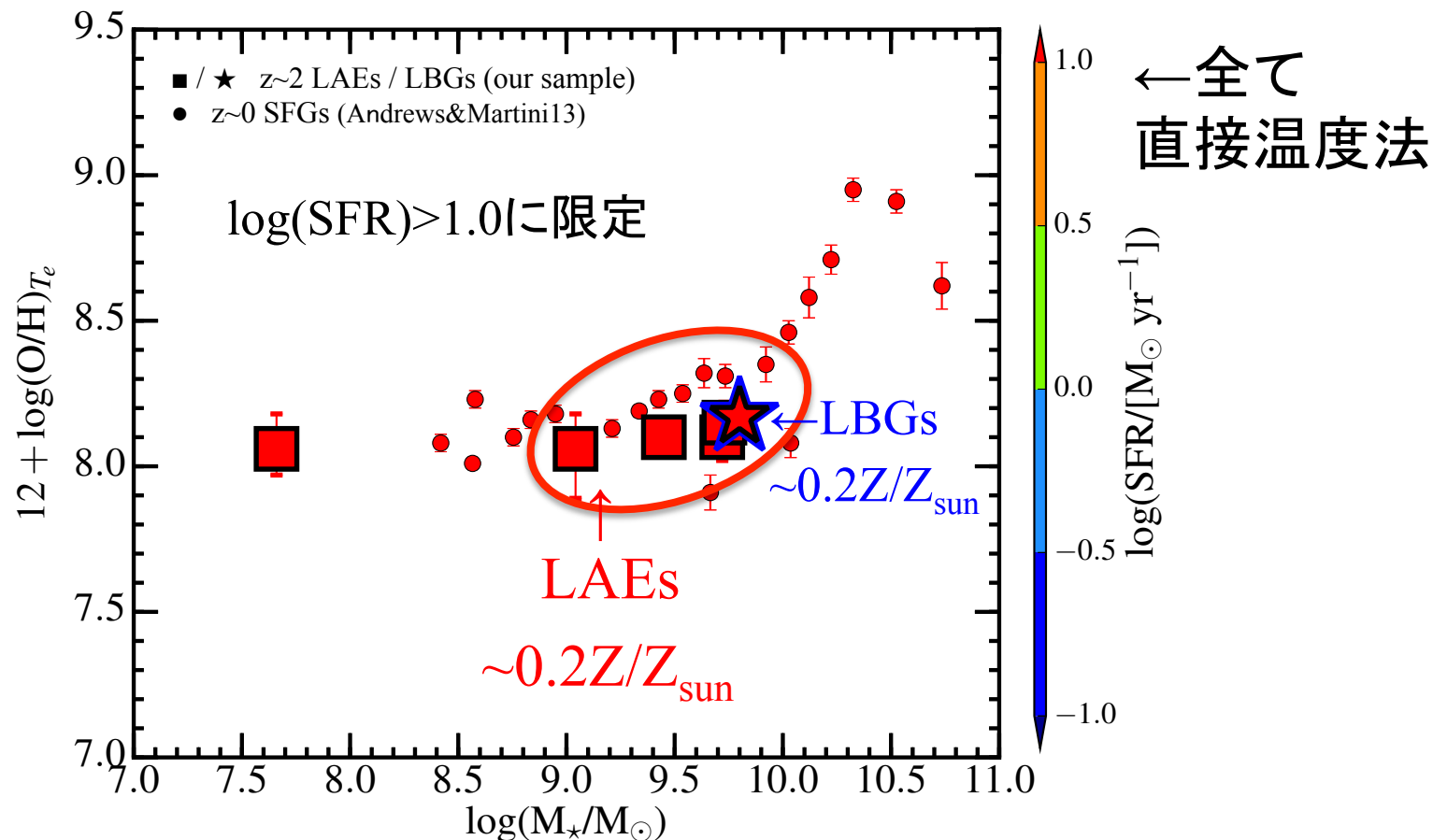
金属量-星質量関係 (SFRで色分け)



→ **LAE**: $\sim 0.2 Z/Z_{\text{sun}}$ **LBG**と同程度

Results: 金属量-星質量 ($O/H-M_*$) 関係

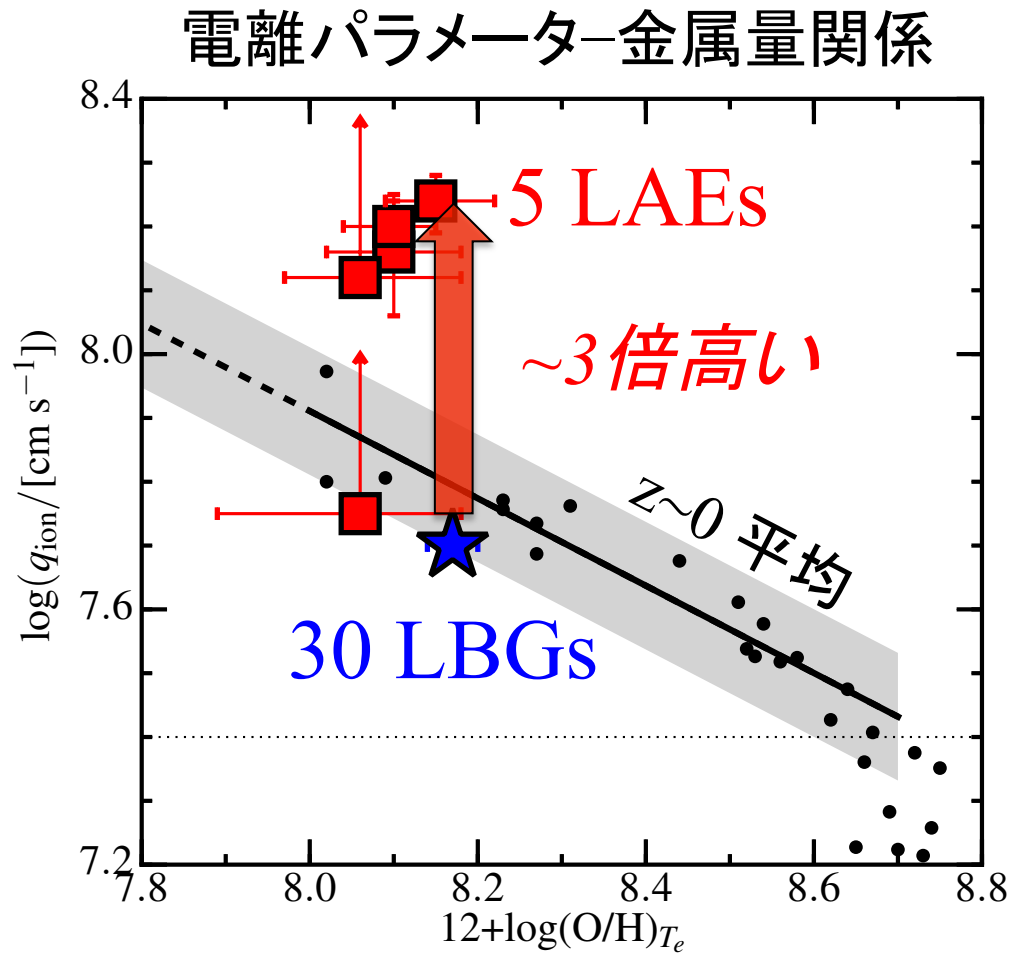
金属量-星質量関係 (SFRで色分け)



→ **LAE**: $\sim 0.2 Z/Z_{\text{sun}}$ **LBG**と同程度

→ $z \sim 0$ の M_* - O/H -SFR 関係に従っている

Results: 電離パラメータ-金属量 ($q_{\text{ion}}-\text{O}/\text{H}$) 関係



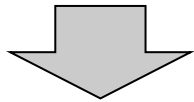
→ LAEs : LBGs/ $z \sim 0$ SFGsよりも電離パラメータが高い
(fixed O/H)

Discussion

Discussion: q_{ion} 増加は 金属量の減少で説明できるか？

Nakajima&Ouchi2014

→ **LAEs** & **LBGs** : 大多数の $z \sim 0$ 星形成銀河よりも q_{ion} が高い



より詳細な描像を得ることに成功

Kojima, Ouchi, Nakajima+2017 (本研究)

→ **LBG** の電離パラメータ:

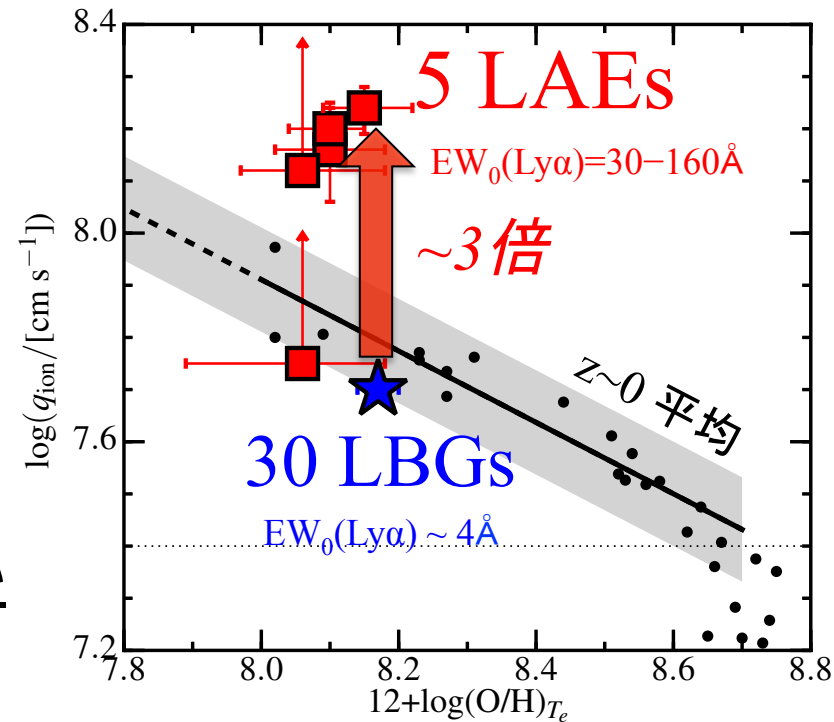
→ 金属量が低いことで説明可

→ **LAE** の電離パラメータ:

→ 金属量が低いことで説明しきれない



LAE と **LBG** の電離状態に本質的な違いがある



Discussion: LAEの q_{ion} 増加—物理的起源は何か?

→ LAEの系統的な q_{ion} 増加の物理的起源は何か?

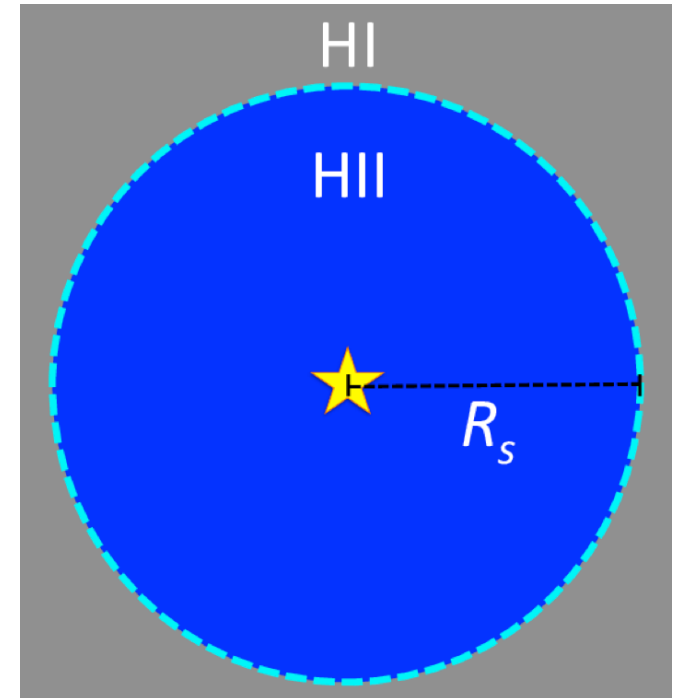
$$q_{\text{ion}} \propto n_e^{1/3} Q_0^{1/3}$$

1) 電子密度 n_e が高い?

2) 電離光子生成率 Q_0 が高い?

↑
HII 領域あたり

Strömgren球モデル

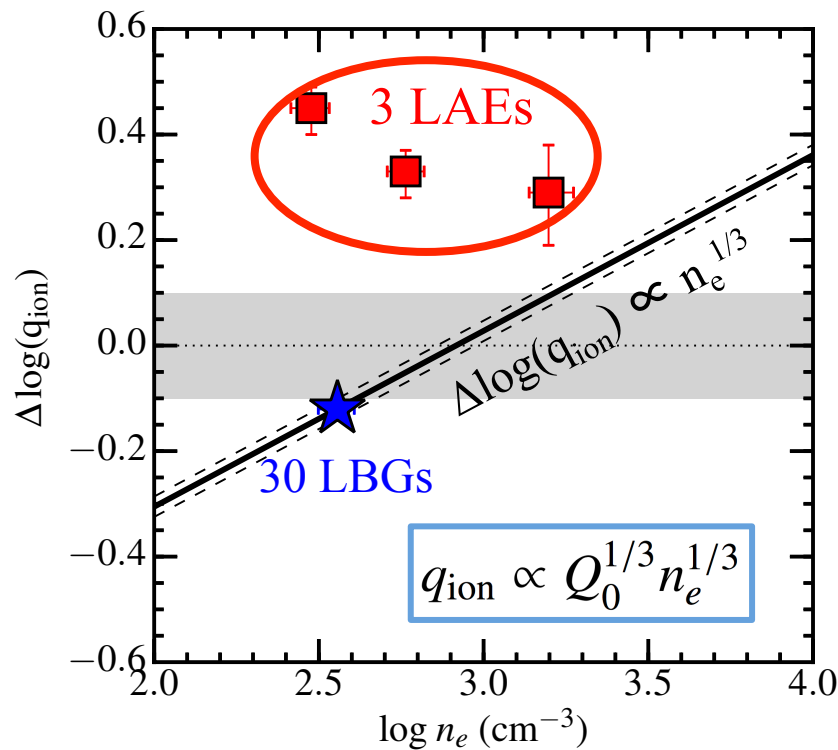


Discussion: LAEの q_{ion} 増加—物理的起源は何か?

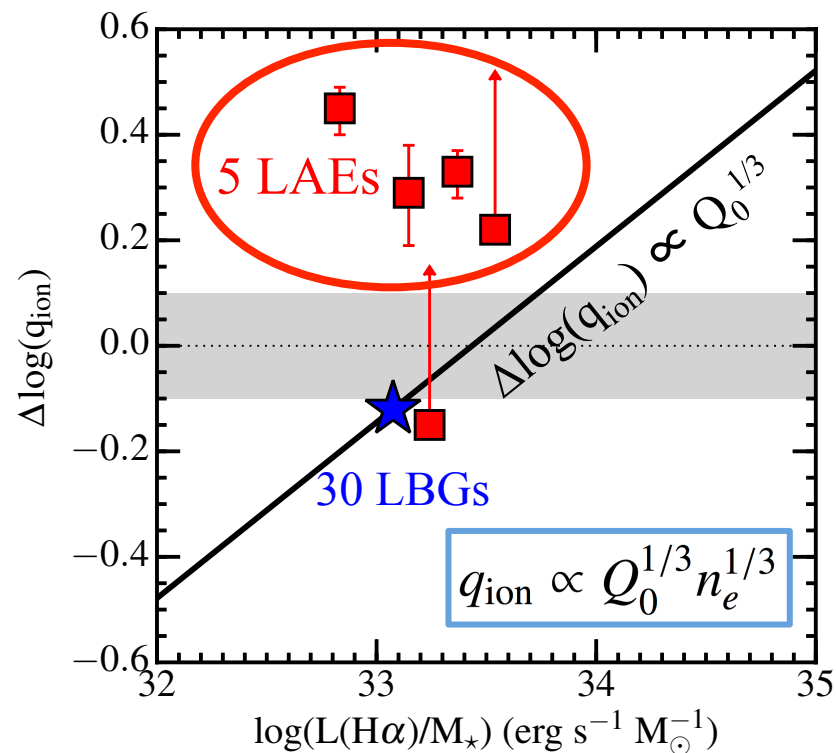
→ q_{ion} の増加 ← n_e , Q_0 の増加で説明可能?

$$Q_0 = \frac{Q_{0,\text{galaxy}}}{\text{HII 領域の数}} \propto \frac{L(\text{H}\alpha)}{M_*}$$

1) $\Delta\log(q_{\text{ion}})$ vs. n_e



2) $\Delta\log(q_{\text{ion}})$ vs. $Q_0 \propto L(\text{H}\alpha)/M_*$



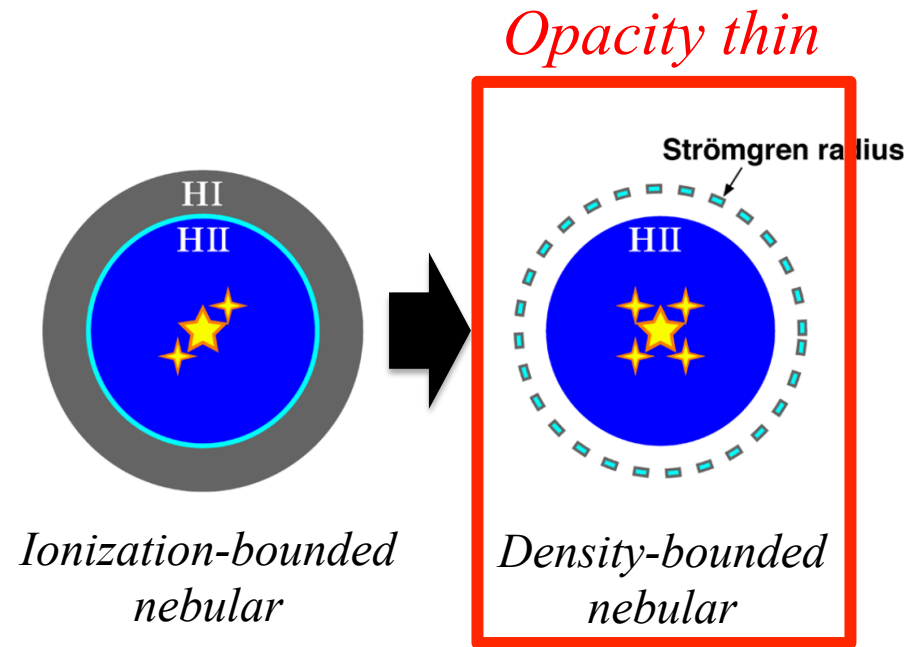
n_e , $Q_0 \rightarrow$ 単独では q_{ion} の増加を説明できない

Discussion: LAEの q_{ion} 増加—物理的起源は何か?

→ 他の可能性は？

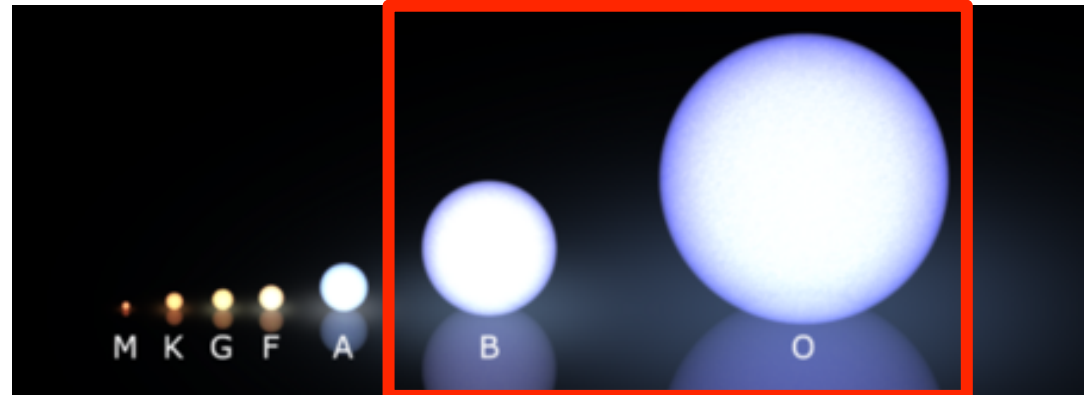
3) ガスの構造変化？

Nakajima&Ouchi2014



4) スペクトルの硬化？

ex. Nakajima+2016



http://d.hatena.ne.jp/active_galactic/20091220/1261266361

→ さらなる調査が必要

Discussion: LAEの q_{ion} 増加による影響

✈ 輝線比診断への系統的不定性

低電離イオン輝線 → 弱

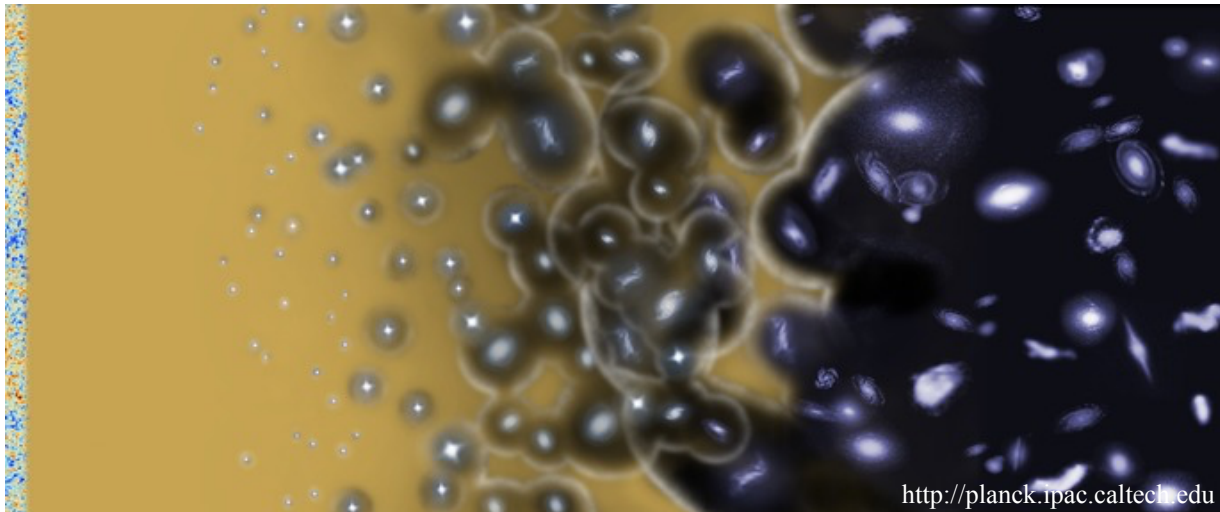
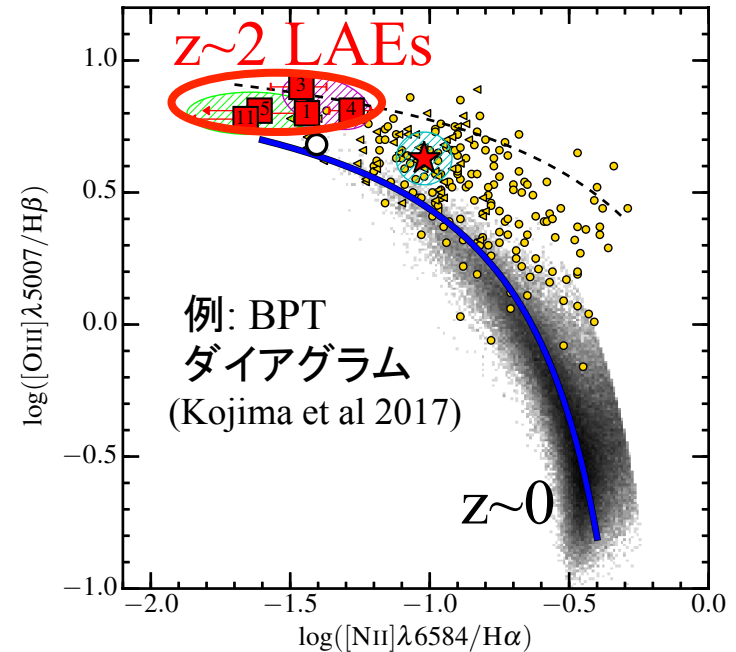
([NII], [OII], [SII]など)

高電離イオン輝線 → 強

([OIII], [NeIII]など)

✈ 宇宙再電離への寄与の可能性？

Nakajima+2013



Q. LAEは高電離状態にあるか？

→ 信頼性の高い直接温度法 “初”の比較

$z \sim 2$ LAE $\Leftrightarrow z \sim 2$ LBG & $z \sim 0$ SFG



A. $z \sim 2$ LAEの電離パラメータは系統的に増加