



遠方銀河の面分光研究

橋本 拓也

早稲田大学 (日本学術振興会PD)

発表 25 分

質疑応答 5 分

内容

- High- z (ここでは $z \sim 2 - 6$) の銀河研究で面分光がどのような成果をあげてきたか？ **VLT/MUSE** に焦点を当てて紹介。

- 複数の項目を手短に俯瞰
- 国内の面分光研究の発展に繋がれば幸い

Bacon et al. (2017) A&A, 608, 1

Inami et al. (2017) A&A, 608, 2

Leclercq et al. (2017) A&A, 608, 8

Wisotzki et al. (2018) Nature 562, 229

Hashimoto et al. (2017) A&A, 608, 10

Maseda et al. (2018) ApJ, 865, 1

- **ALMA** も実質的に面分光装置。ALMA 研究 ($z \sim 7$) も紹介。

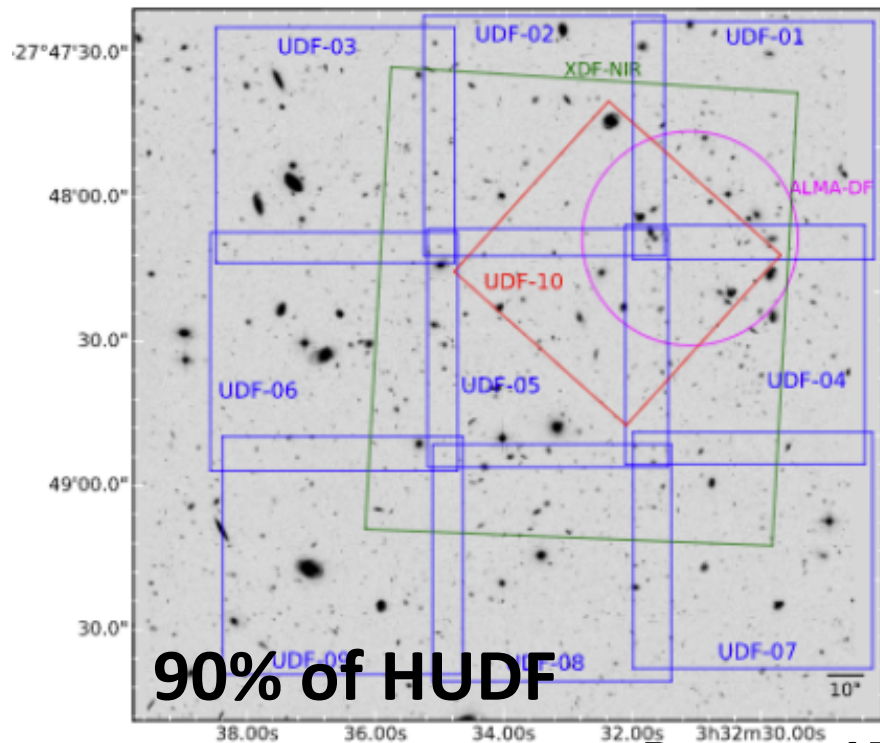
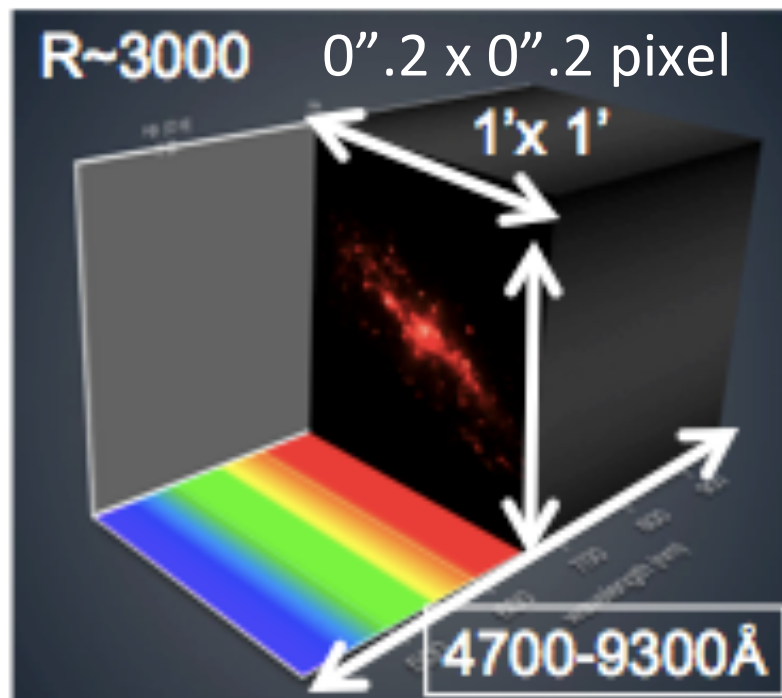
Smit et al. (2018) Nature, 553, 178

銀河の面分光で考えるべき軸

- 波長
 - どの輝線が どの redshift まで見れるか
- 感度
 - CGM 等の淡い放射を捉えられるか
 - 暗い天体や暗い輝線まで調べられるか
- 視野
 - 無バイアスサーベイ or ターゲット観測
- 各分解能
 - AO-assist の有無
 - 内部構造まで見れるか

MUSE Hubble Ultra Deep Field (PI:R. Bacon)

*MUSE の性能 → 2016年の面分光研究会 尾崎さんスライドを参照



90% of HUDF

Bacon+17

- **9 pointing (UDF-01,..., 09)** → 10 h, $3\sigma F_{\text{lim}} = 3.1\text{e-}19 \text{ erg/s/cm}^2/\text{\AA}$
- **1 pointing (UDF-10)** → 計 40 h, $3\sigma F_{\text{lim}} = 1.5\text{e-}19 \text{ erg/s/cm}^2/\text{\AA}$
- 0".65 resolution at 7000 Å
- 多波長データ HST (**XDF**), Chandra, XMM, Spitzer/IRAC, **ALMA**, VLA
(参考) HST ACS/WFC3 $5\sigma \text{ mag}_{\text{lim}} = 29.5 \text{ AB}$

MUSE Hubble Ultra Deep Field (PI:R. Bacon)

- 二種類の方法で切り出し

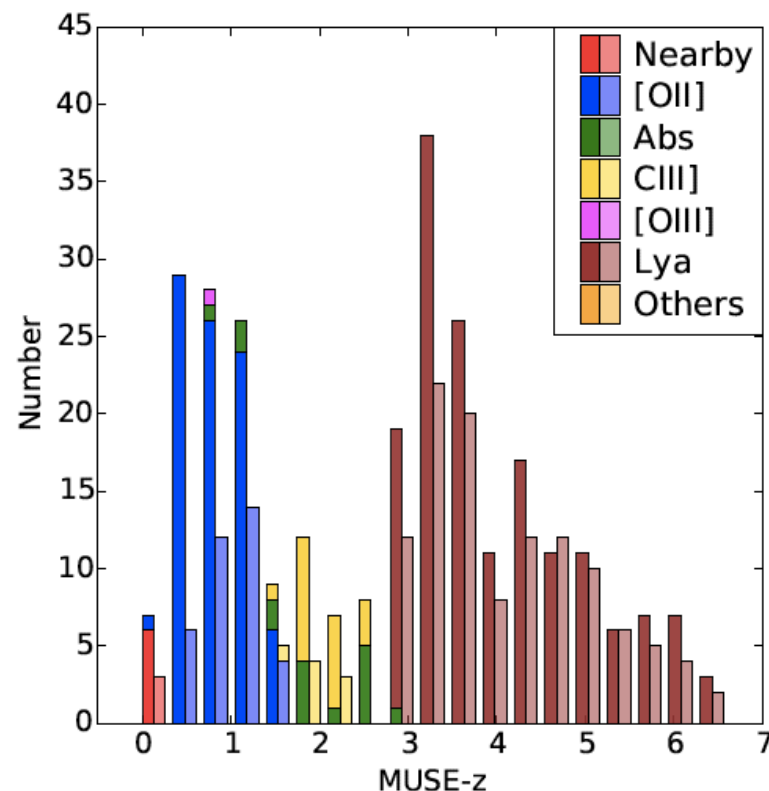
1. HST prior (Rafelski+15) 7904 天体

→ 1206 secure z_{spec} (692 Ly α emitters, 473 [OII] emitters)

2. 独自開発の blind detection algorithm “ORIGIN”(Mary+ in prep)

深い感度まで高い purity で選択することが目的

→ (132 HST 対応天体なし: 後述)

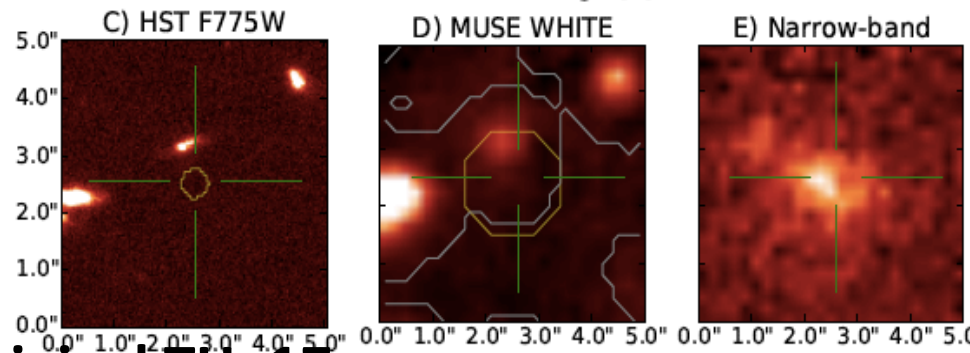
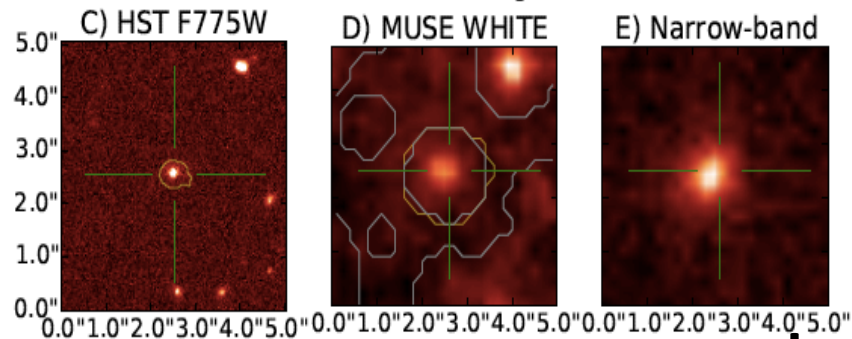
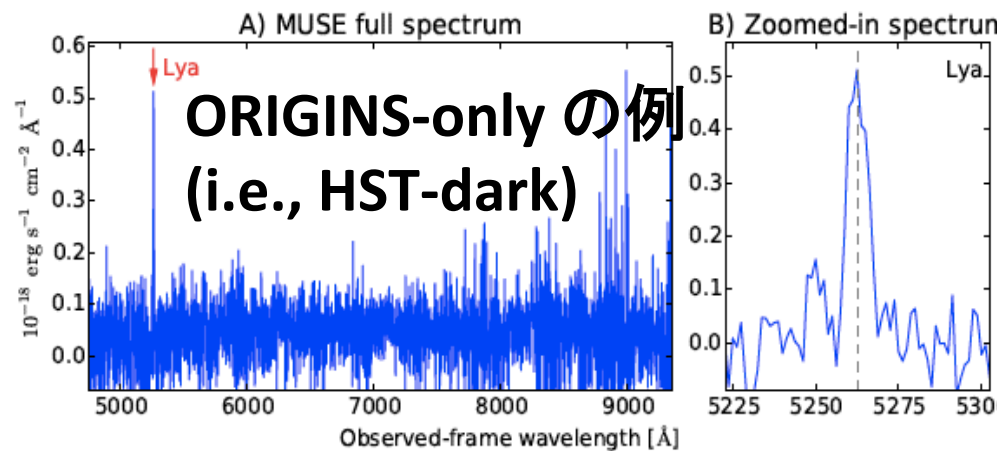
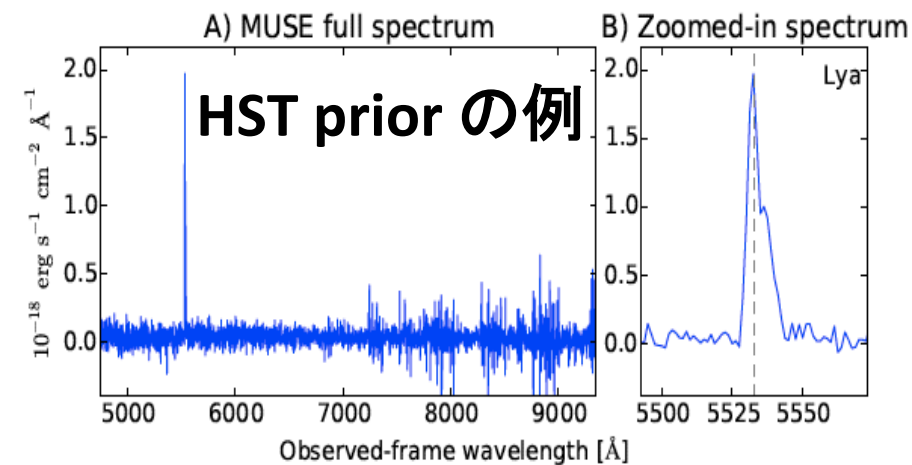


Inami, incl TH+17

MUSE Hubble Ultra Deep Field (PI:R. Bacon)

● 二種類の方法で切り出し

1. HST prior (Rafelski+15) 7904 天体
→ 1206 secure z_{spec} (692 Ly α emitters, 473 [OII] emitters)
2. 独自開発の blind detection algorithm “ORIGIN”(Mary+ in prep)
深い感度まで高い purity で選択することが目的



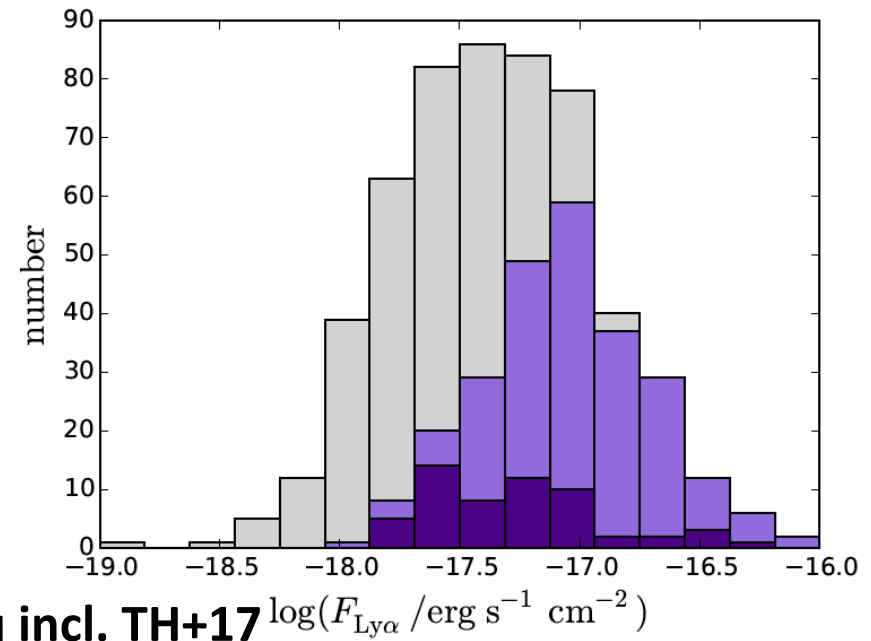
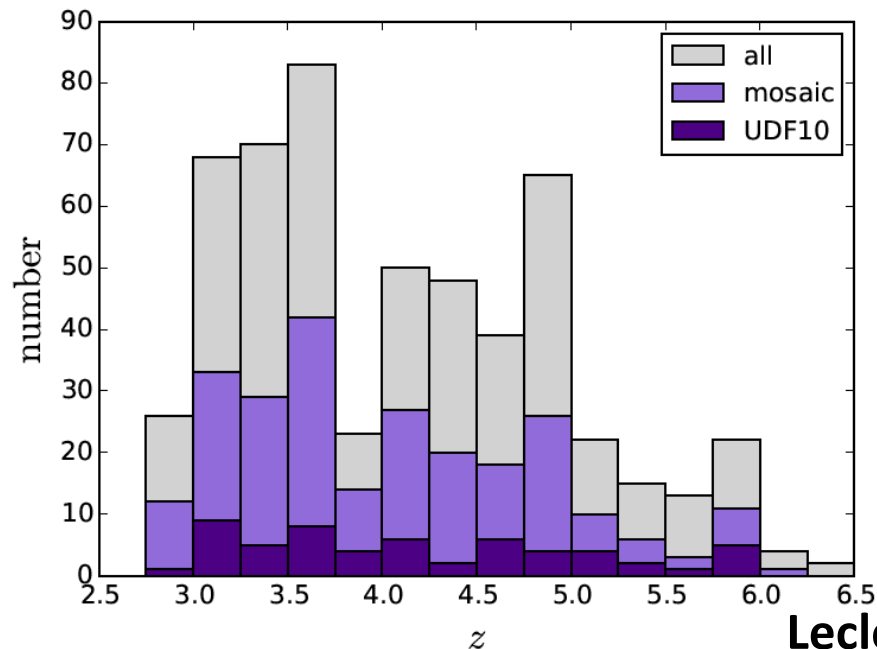
MUSE の場合

- 波長 4700 – 9300 Å
 - **Ly α 1216Å** **2.9 < z < 6.6**
 - HeII 1640Å 1.9 < z < 4.7
 - CIII] 1909Å 1.5 < z < 3.9
 - MgII 2800Å 0.7 < z < 2.3
 - [OII] 3727Å 0.3 < z < 1.5
 - H β 4861Å, [OIII] 4959Å/5007Å 0 < z < 0.9
 - H α 6563Å, [NII] 6583Å 0 < z < 0.4
- ここでは主に Ly α に焦点. 一部は Ly α + CIII] / HeII emitters
- 他の輝線の研究例は以下 (詳細は割愛)
例:
 - CIII] emitters → Maseda et al. 2017
 - HeII emitters → Nanayakkara et al. 2017
 - [OIII]/[OII] ratios → Paalvast et al. 2017

個別銀河の Ly α ハロー: CGMの研究

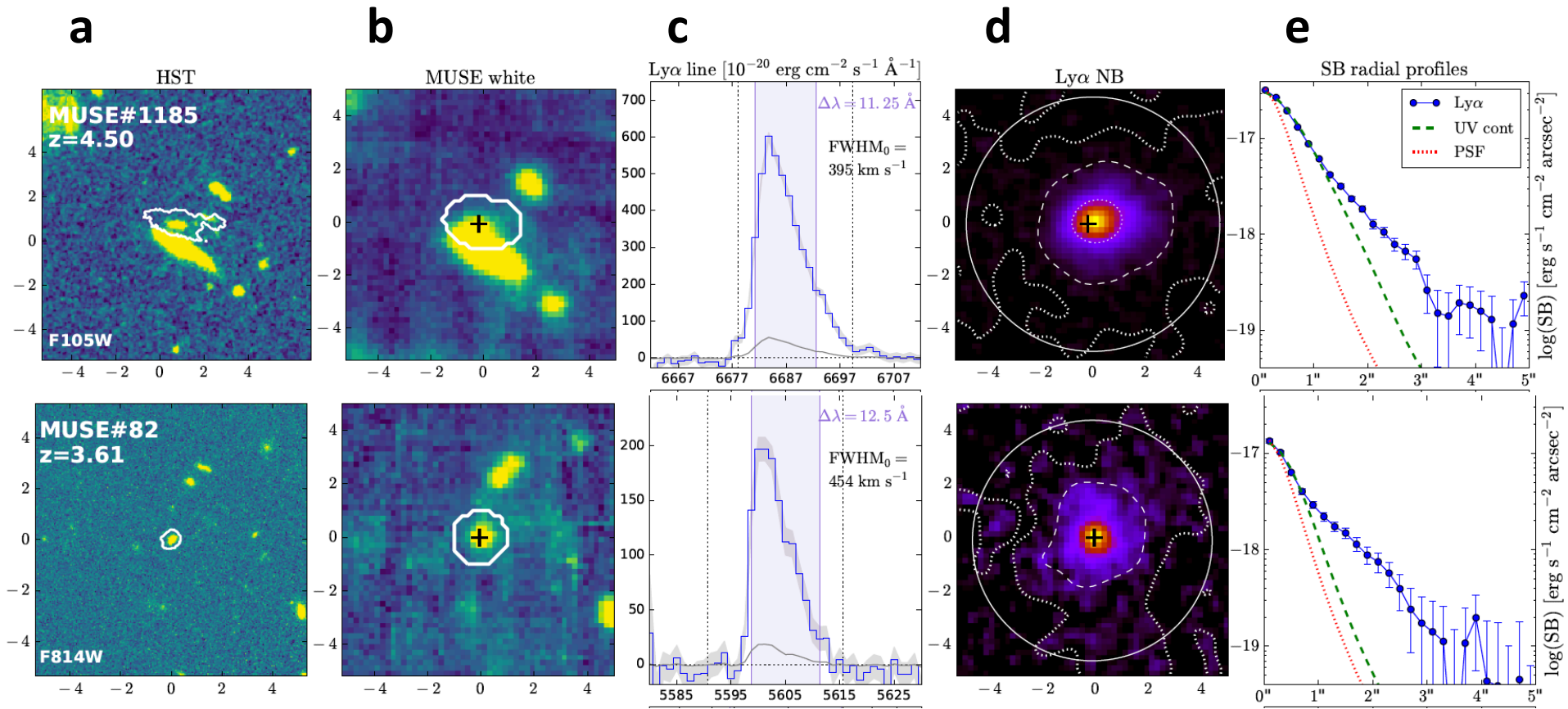
- [内容] $z \sim 3-6$ の個別の星形成銀河で Ly α ハローを検出
 - CGM 中の中性ガスをトレース
- [サンプル] Inami+17 LAEs から以下を除外
 - (i) possible interacting systems (50 kpc以内 & 1000 km/s 以内)
 - (ii) cube に lower- z interloper の入る天体
 - (iii) Ly α S/N < 6 の天体

➔ 252 LAEs with Muv ~ -22 to -15



個別銀河の Ly α ハロー: CGMの研究

● [結果1]

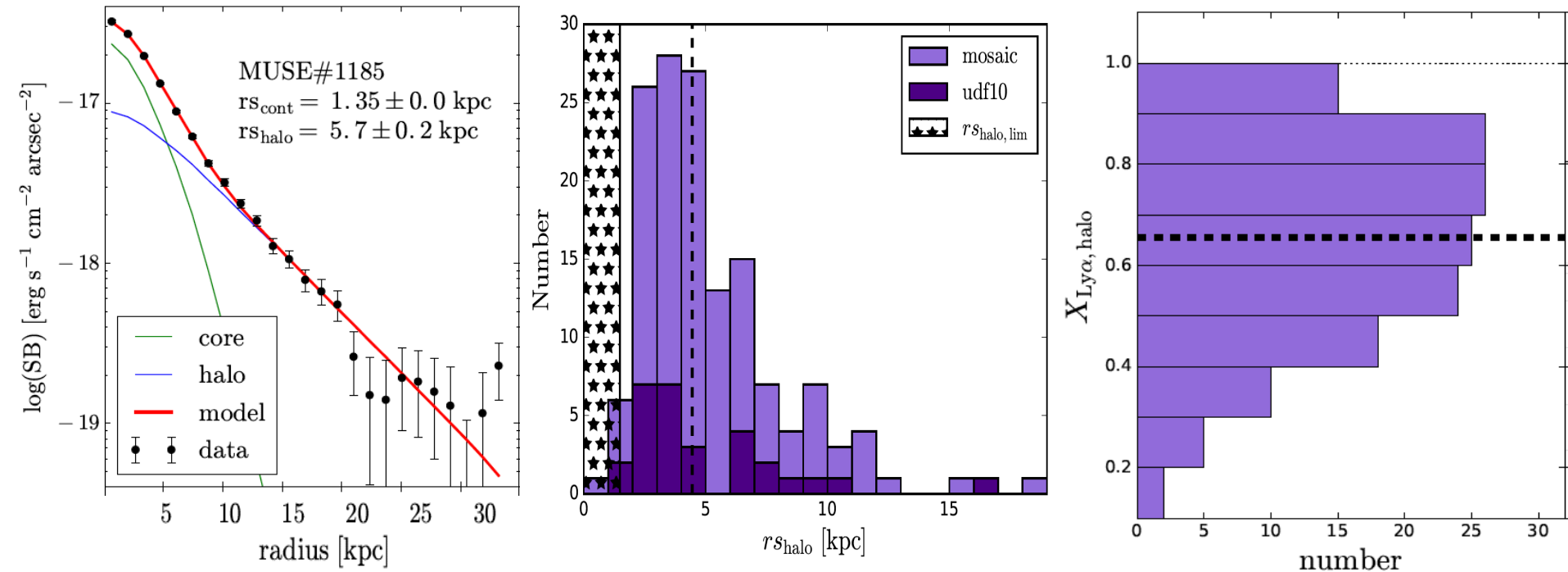


白コントラスト 白コントラスト 紫の領域 Leclercq incl. TH+17
HST segmentation map ← convolved with MUSE PSF パネルdに対応する波長範囲

➔ Ly α ハローは個別に見ても普遍的に星形成銀河の周囲に存在 - 145 天体 (cf., Wisotzki+15; 26 objects in MUSE HDFs)

個別銀河の Ly α ハロー: CGMの研究

- [結果2 Ly α ハローの定量評価; スケール長の頻度分布]

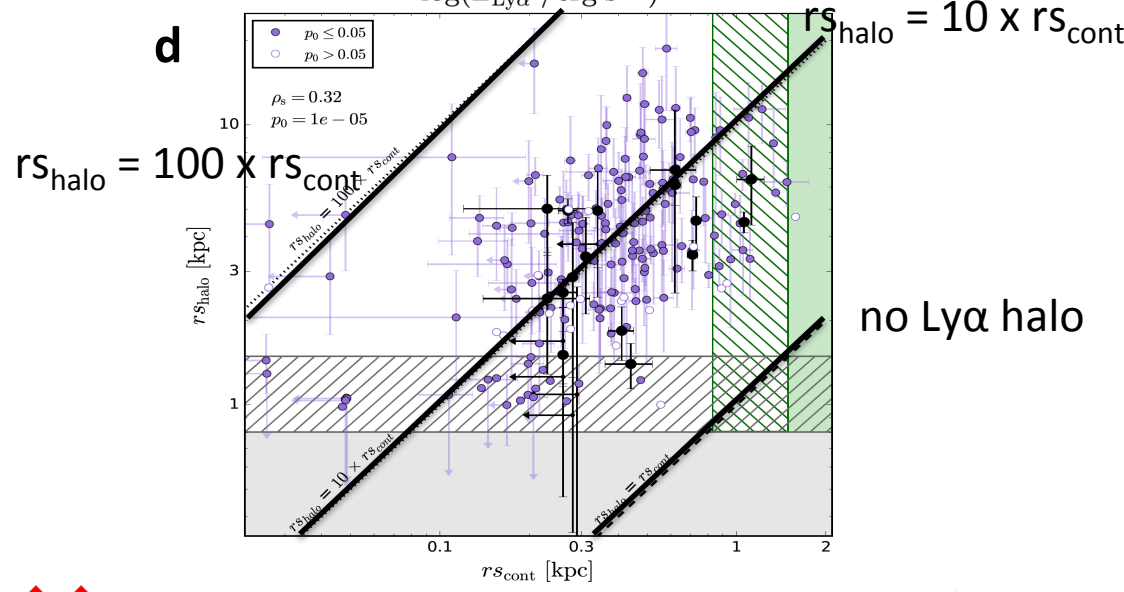
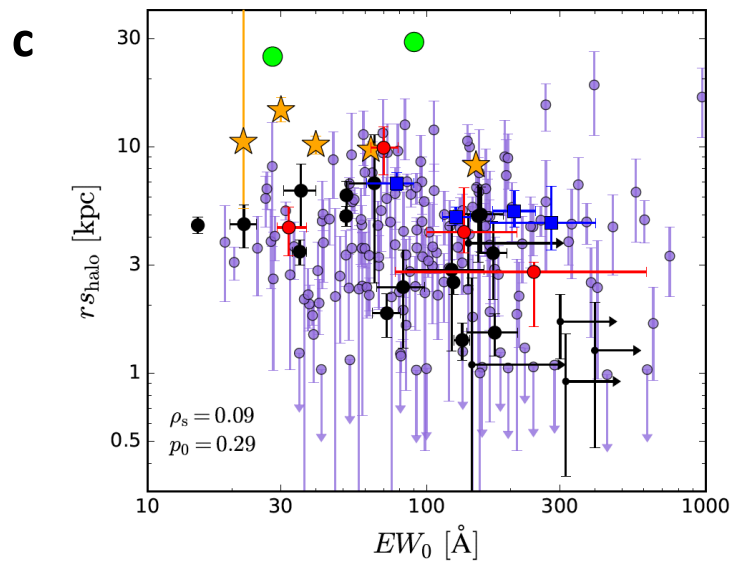
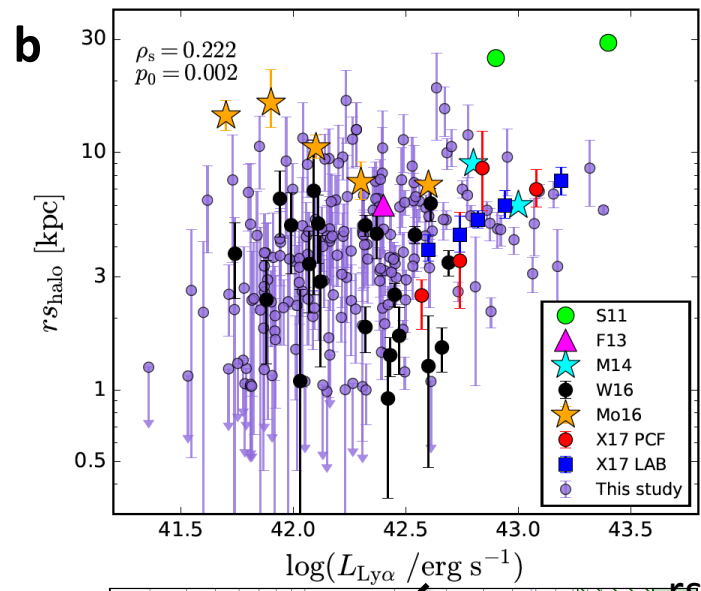
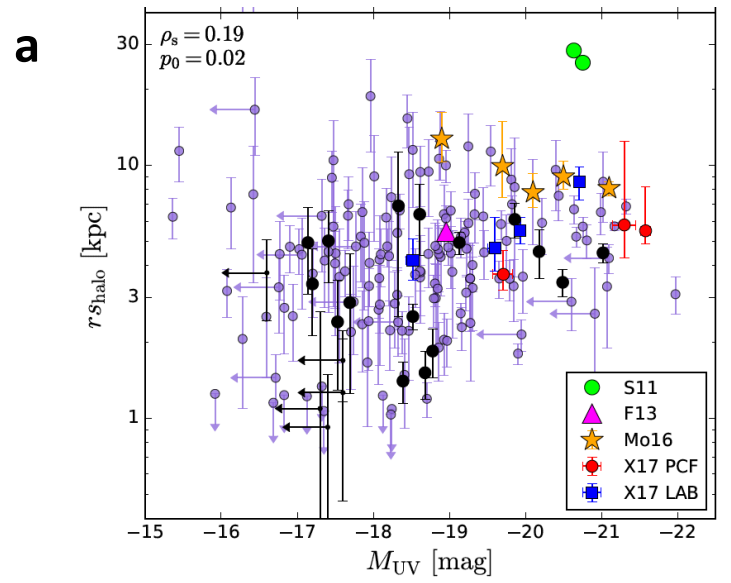


Leclercq incl. TH+17

→ スケール長 $\langle r_{\text{Shalo}} \rangle \sim 4.5 \text{ kpc}$ (a few to $> 15 \text{ kpc}$)

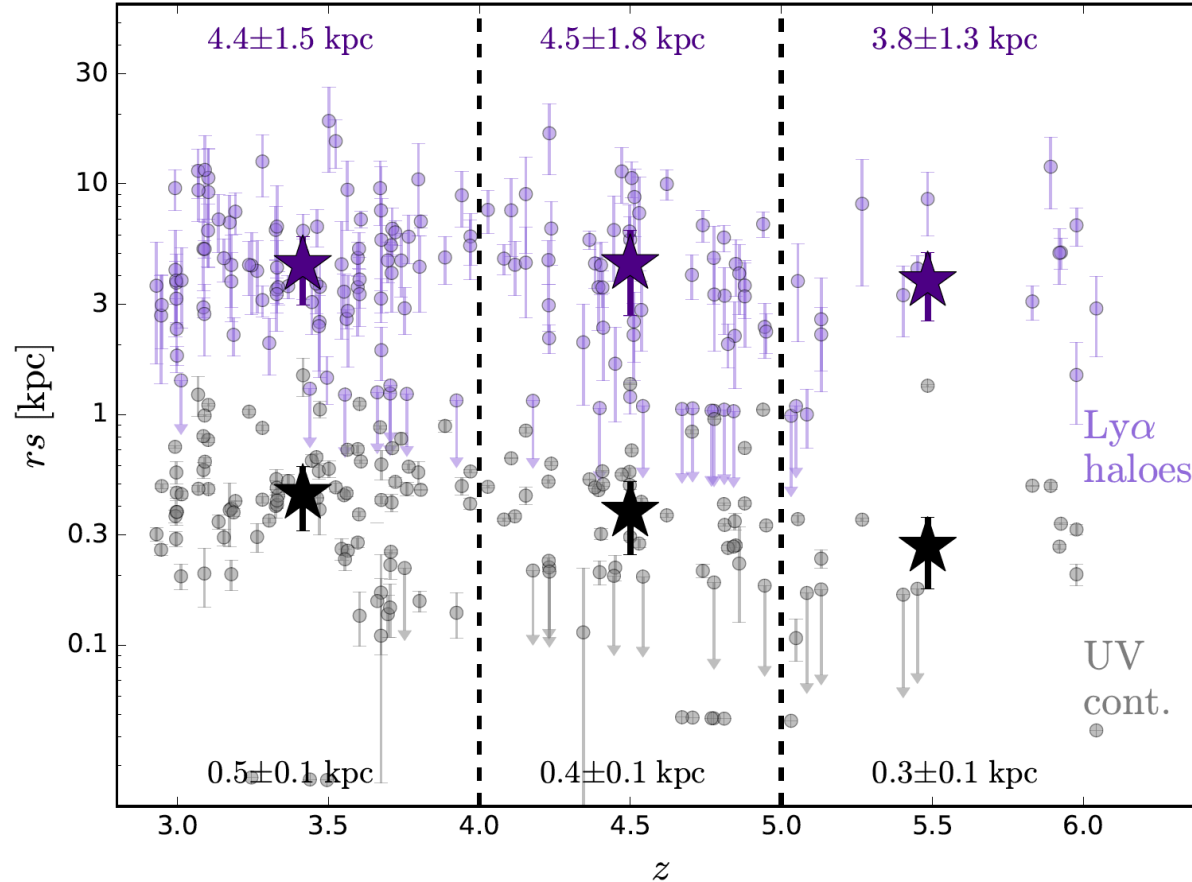
→ $X_{\text{Ly}\alpha, \text{halo}} = F_{\text{Ly}\alpha, \text{halo}} / (F_{\text{Ly}\alpha, \text{halo}} + F_{\text{Ly}\alpha, \text{cont}}) \sim 65\%$

● [結果3 Ly α ハロー スケール長と物理量の相関]



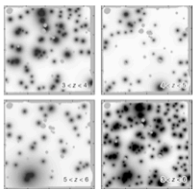
➔ rs_{halo} との相関 ▲ M_{UV} (a), ✗ $L_{\text{Ly}\alpha}$ (b), EW_0 (c), ✓ rs_{cont} (d: 分散大)
 ➔ スリット分光の場合, total Ly α を再現するのは困難 (IFU の重要性)

個別銀河の Ly α ハロー: CGMの研究

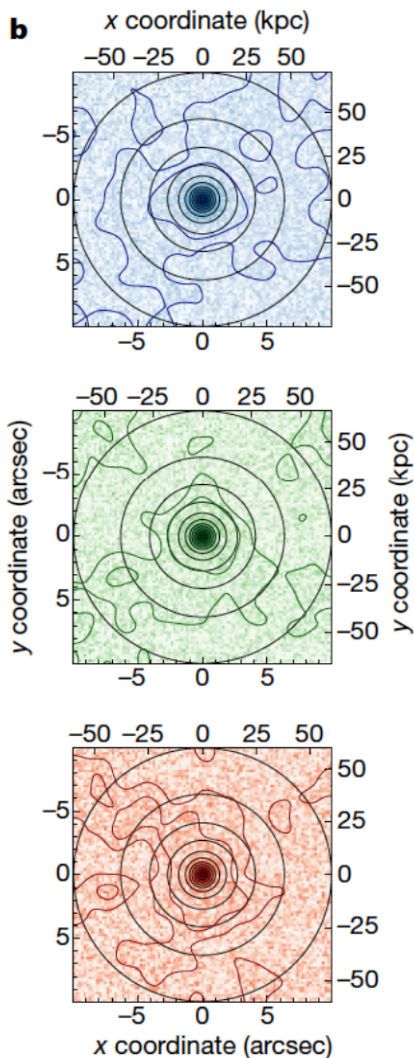


- $3 < z < 6$ で $r_{s, \text{halo}}$ に大きな進化はない ($z > 5$ サンプルは少ない)
- Ly α ハローの起源 (CGM中の散乱, fluorescence, satellite etc..) 不明
- 結局のところ強みは何か? → 面分光 + 感度 (+ 視野)
(最新の動向) Ly α ハローの空間分解した性質 (Claeyssens+19)

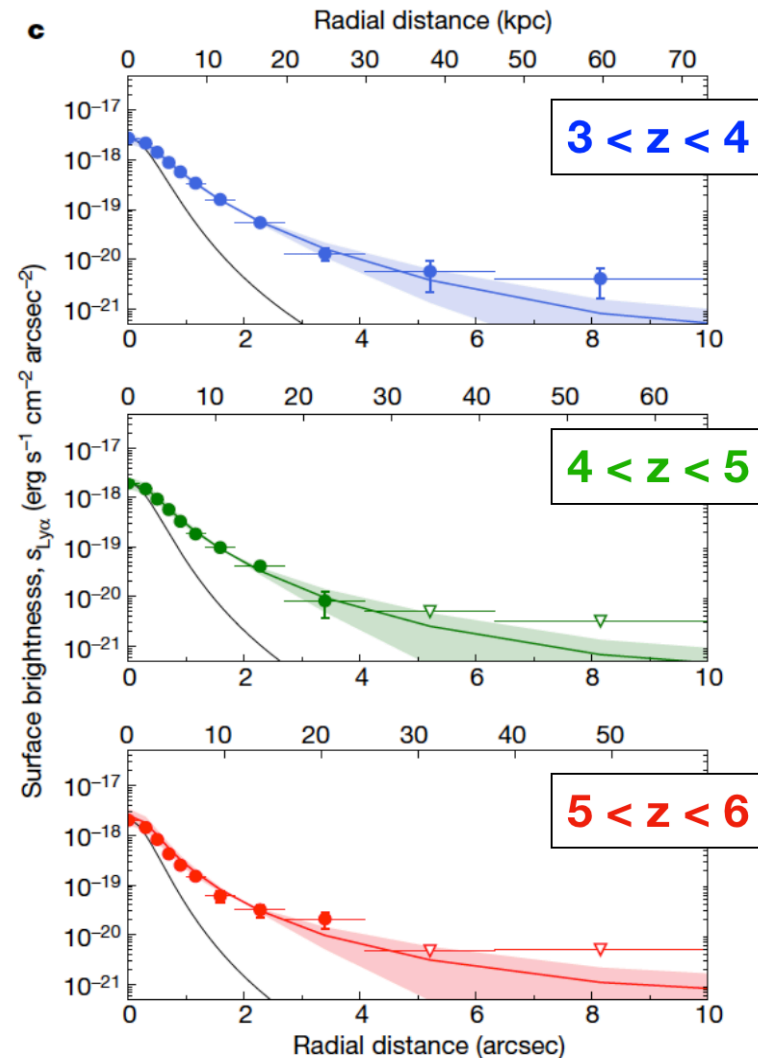
Ly α sky coverage (Wisotzki+18 Nature)



Median-stacked Ly α images



Radial profiles



260 LAEs

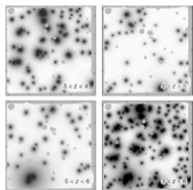


SB limit

$\sim 4 \times 10^{-21} \text{ erg/s/cm}^2/\text{arcsec}^2$

slides:

©F. Leclercq

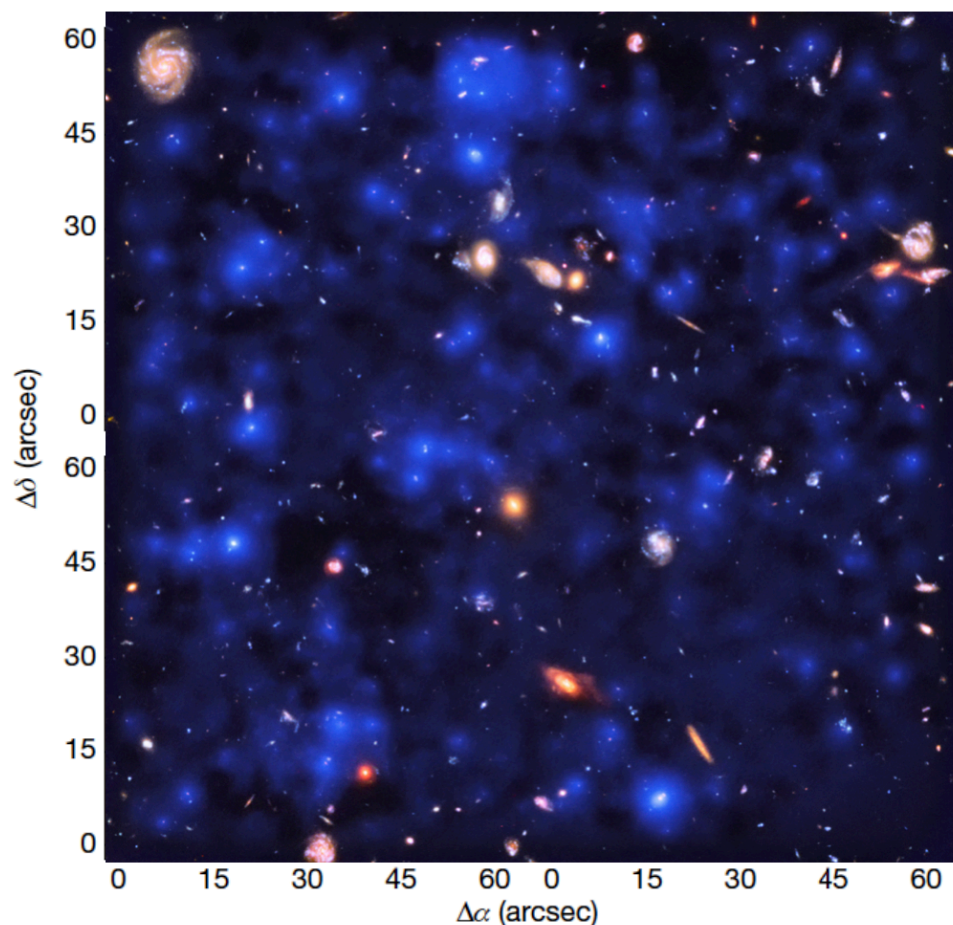


Sky coverage of $\text{Ly}\alpha$ low SB emission

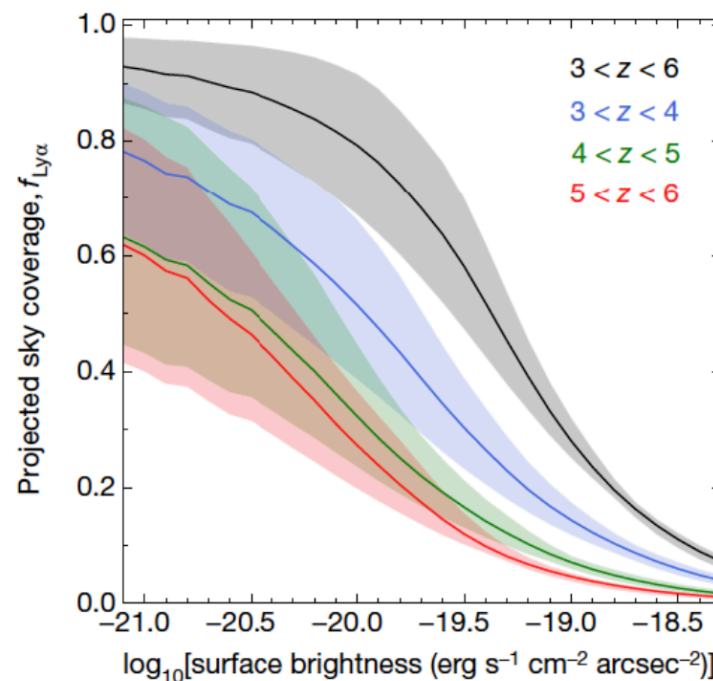
slides:

©F. Leclercq

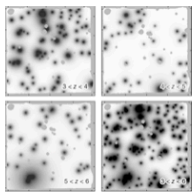
Noise free $\text{Ly}\alpha$ model images



$\text{Ly}\alpha$ sky coverage fraction vs. SB



The detected circumgalactic $\text{Ly}\alpha$ emission at $z > 3$ already covers close to 100% of the sky.



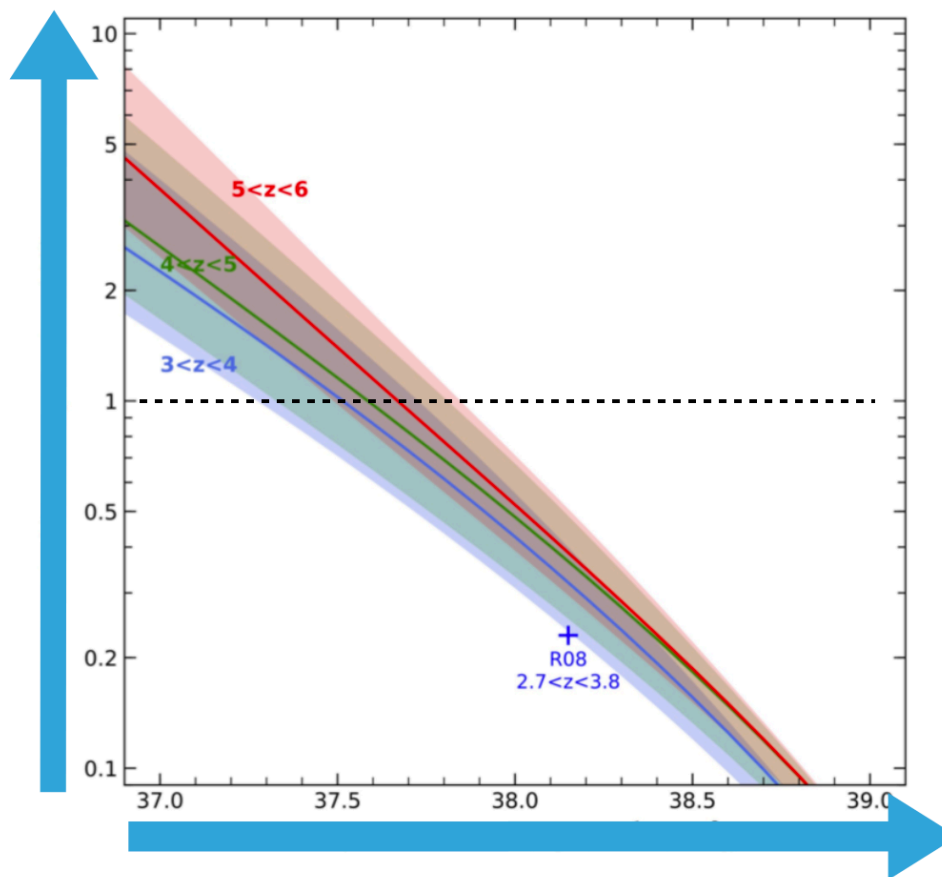
Sky coverage of $\text{Ly}\alpha$ low SB emission

slides:

©F. Leclercq

cumulative
Incident rate

mean number of
LAEs penetrated
by any arbitrary
line of sight

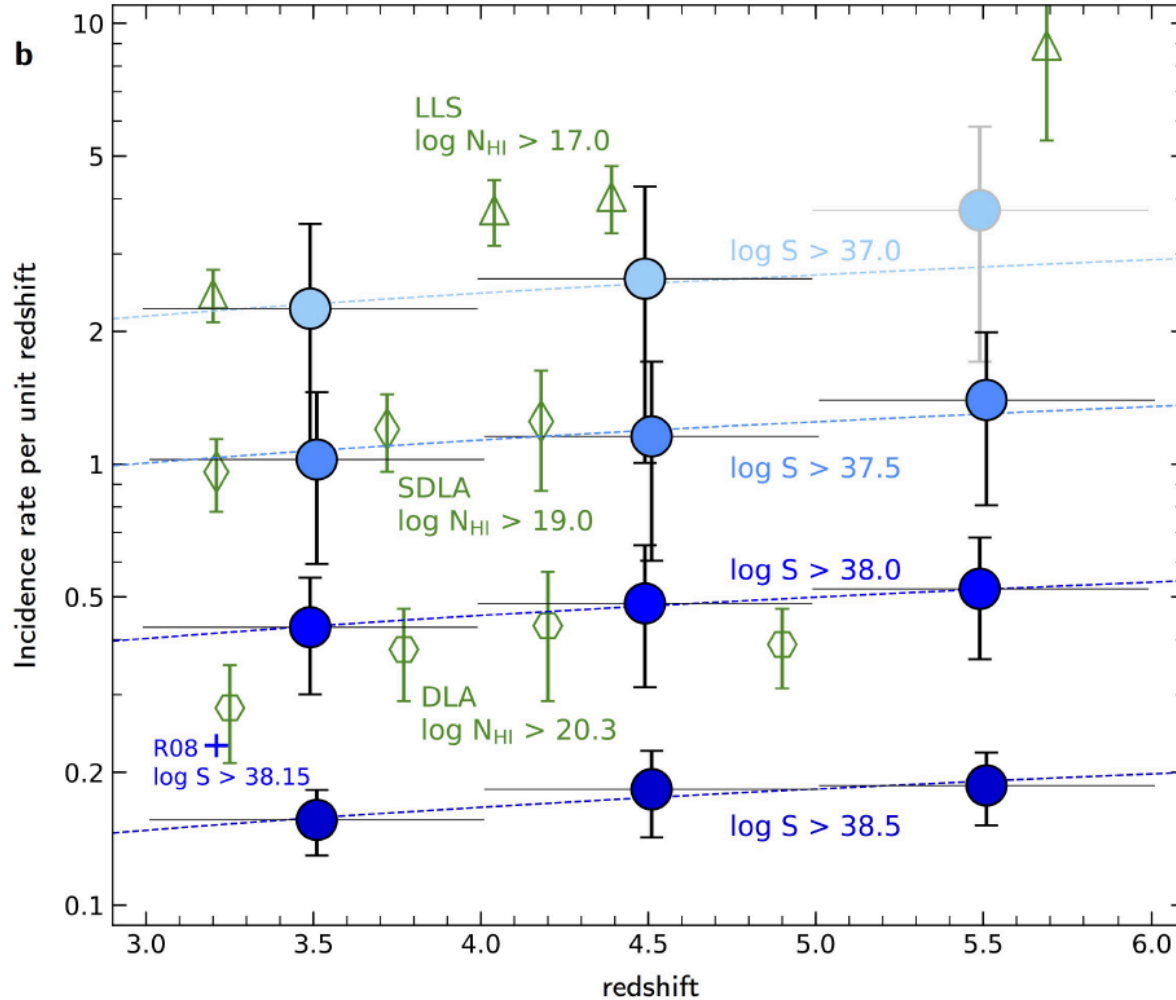
Incidence rates of $\text{Ly}\alpha$ emission dn/dz 

Similar to the incident rate
of high column density
absorbers detected in
QSO sight lines ...

(次ページの図)

... suggesting that **most of**
CGM atomic H at high z is now
also detected in emission.

$\log_{10}$ **Surface luminosity** [erg/s/kpc²]



- 吸収線系の dn/dz と $\text{Ly}\alpha$ 輝線でトレースしているCGMの dn/dz 比較
 $\log S > 38.0$ とDLA ($\log N_{\text{HI}} > 20.3$)は z 進化も絶対値も似ている
 示唆: DLAと $\log S > 38.0$ (~個別天体の $\text{Ly}\alpha$ ハロー外縁部)の関連
- 結局のところ強みは何か? → 面分光 + 感度 + 視野

Ly α EW₀ の研究 (Hashimoto+17b)

Ly α EW (輝線フラックス/連続光フラックス密度)

-銀河の星種族 (e.g., Schaerer 03; Raiter+10) などに依存

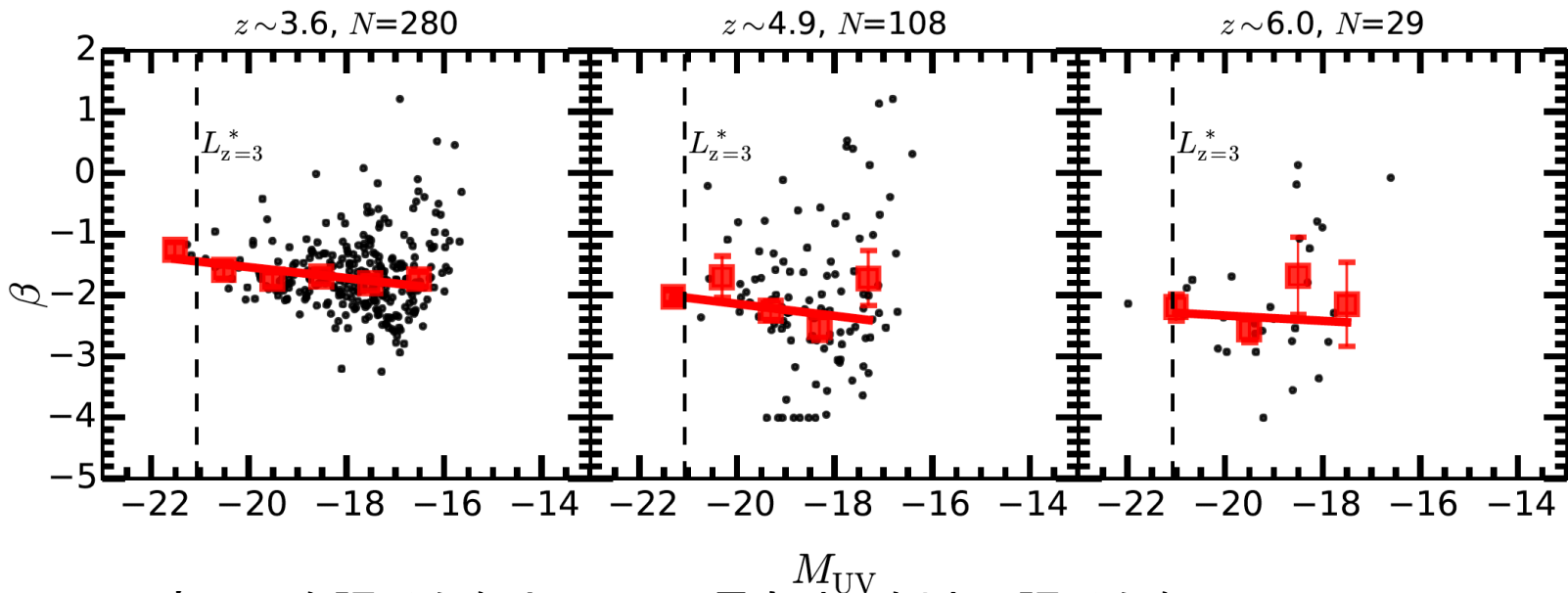
Hashimoto+17b のポイント:

+ UV 連続光の解析には HST データを駆使

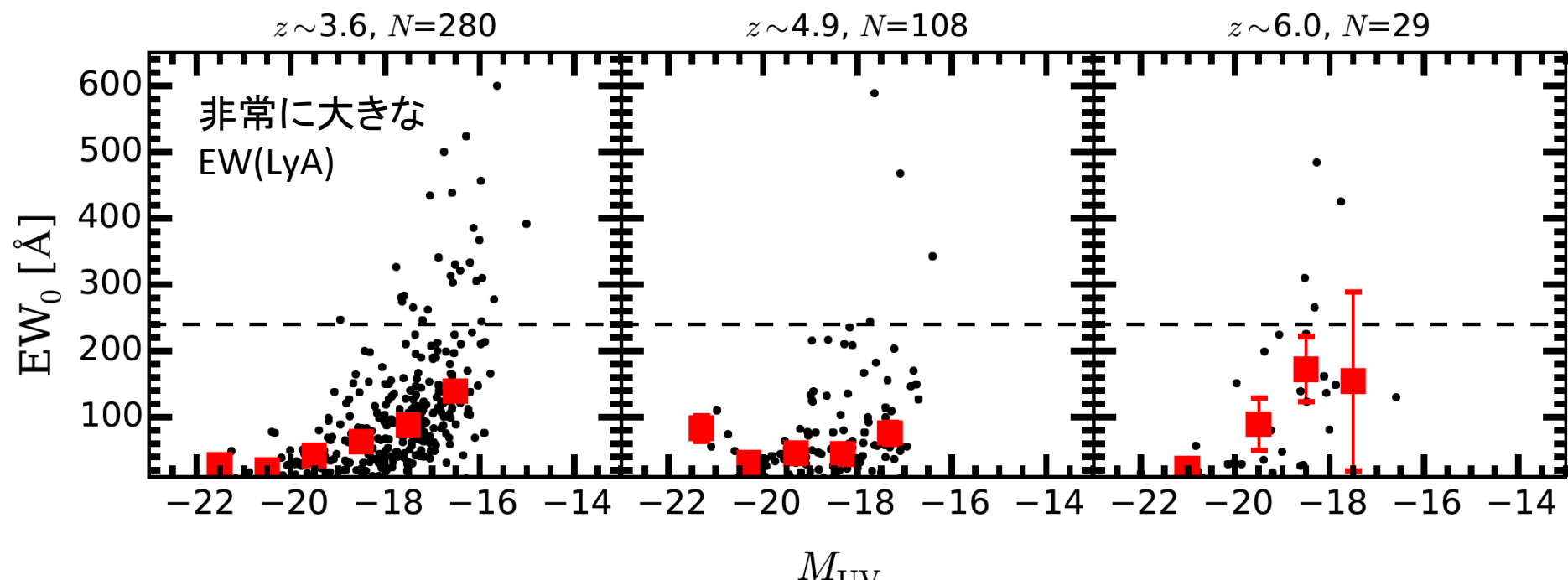
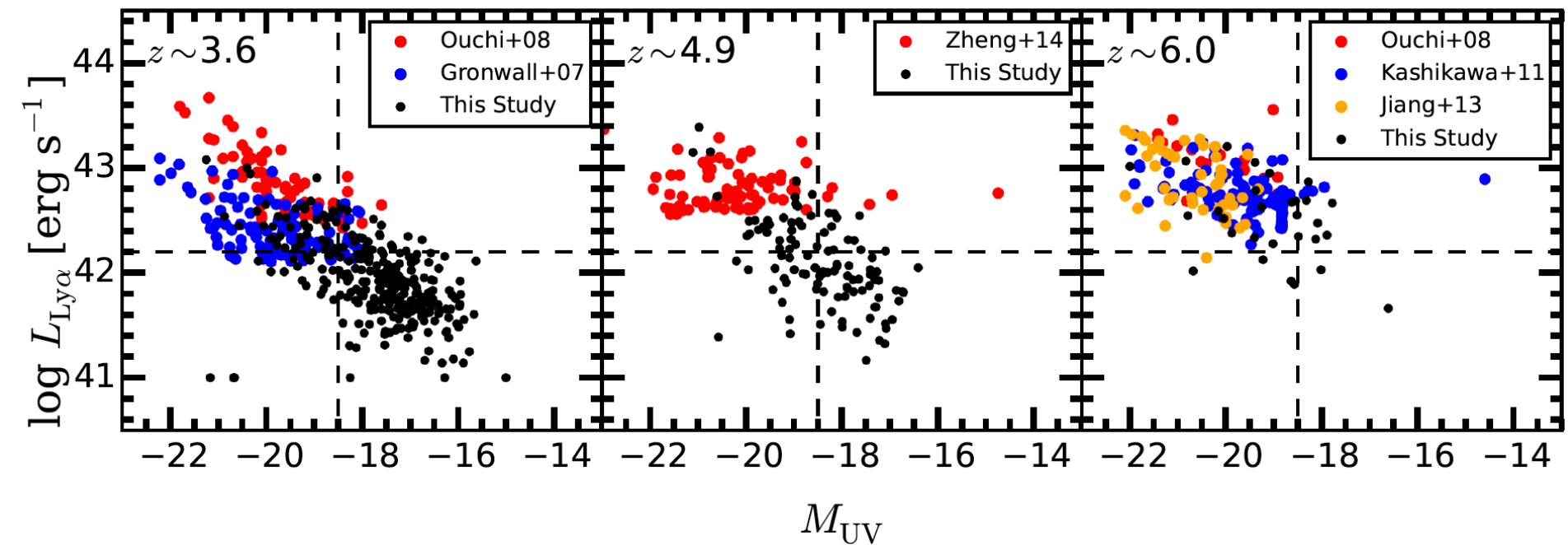
+ UV continuum slope (β) の効果、**広がった Ly α 成分**を考慮した丁寧な解析

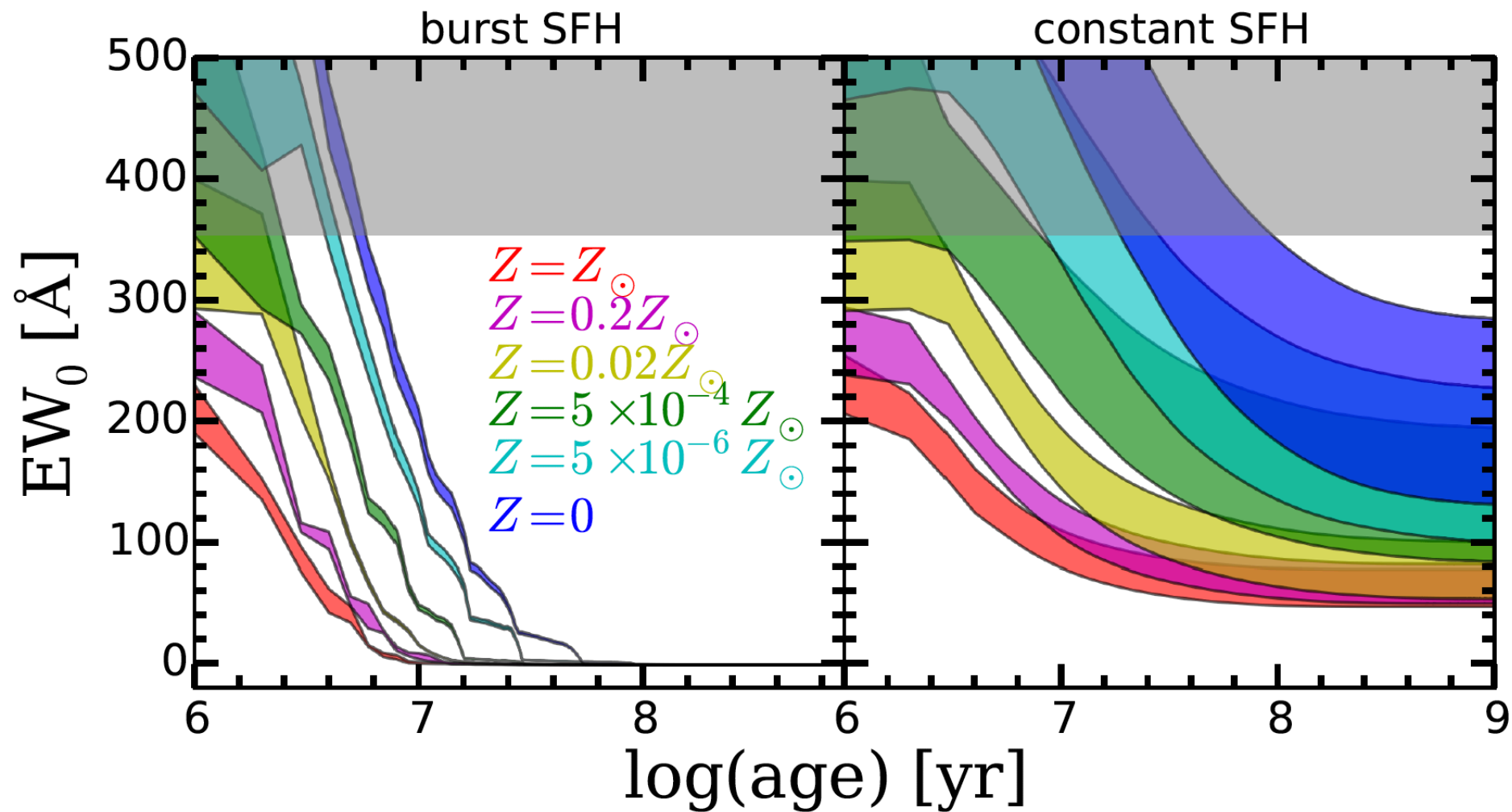
深い多波長データの有用性

面分光の有用性



LAEs 研究で β を調べた例としては、最も暗い側まで調べた例



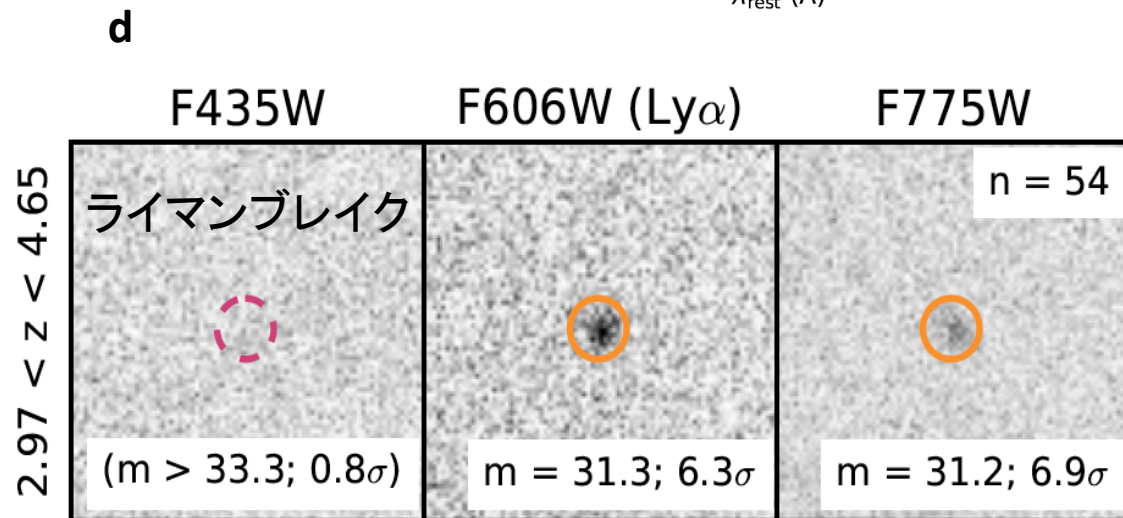
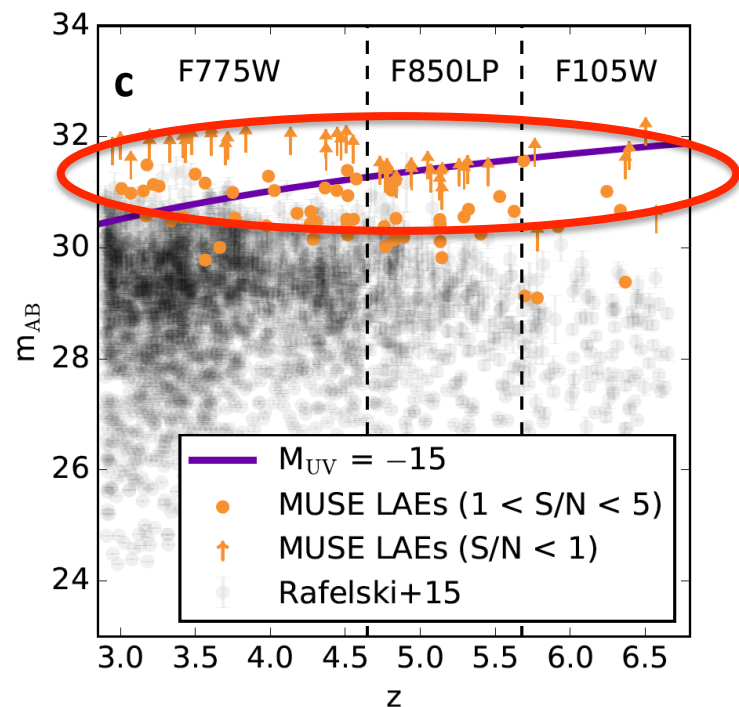
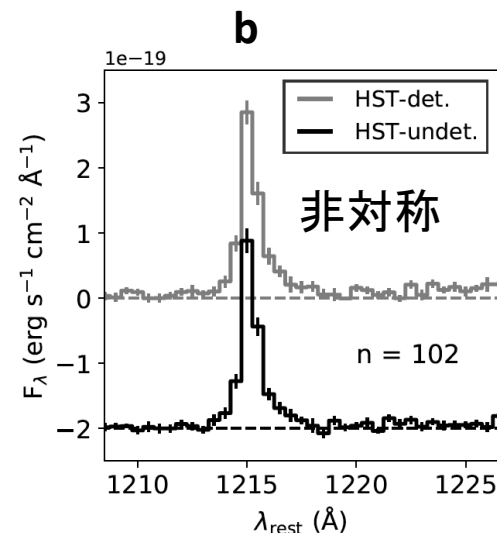
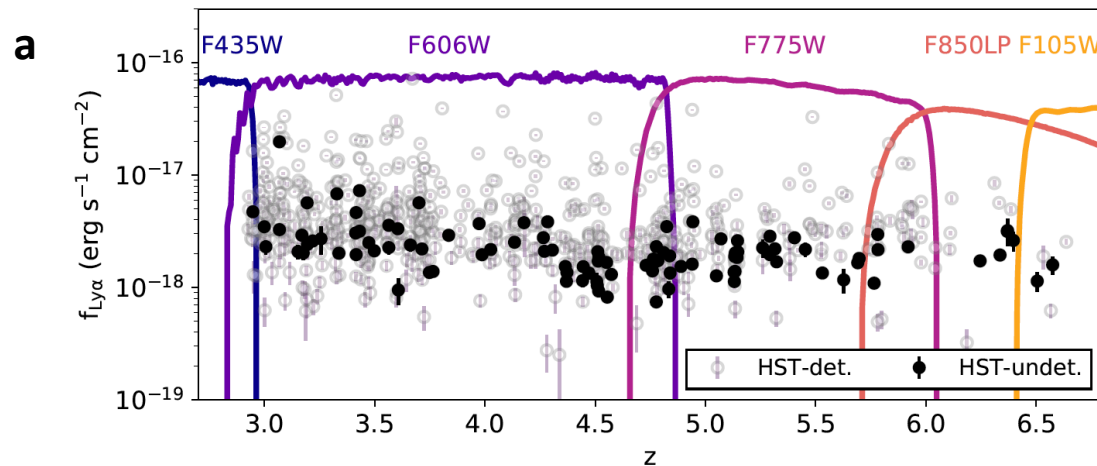


- 非常に強い Ly α を放射する天体は若くて low-Z ($Z < 0.02 Z_{\text{sun}}$) で無難に説明できる (* 他の可能性を棄却した訳ではない)
- 結局のところ強みは何か? → 無バイアスサーベイの走り (視野) + 感度 + 面分光 (広がった Ly α 成分を捕捉)

HST-dark ($m \sim 31$; $M_{UV} \sim -15$) LAEs

Maseda incl. TH+18

- HST-未検出 ($S/N < 5$) だが $Ly\alpha$ 検出した 102 天体

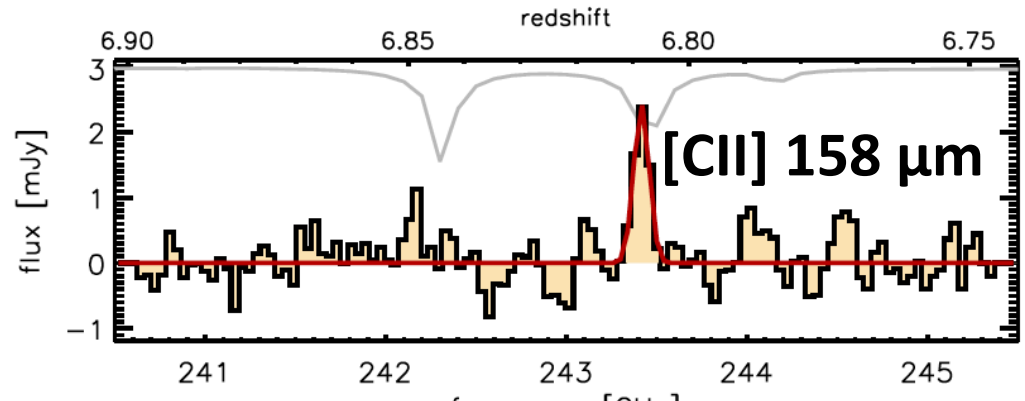
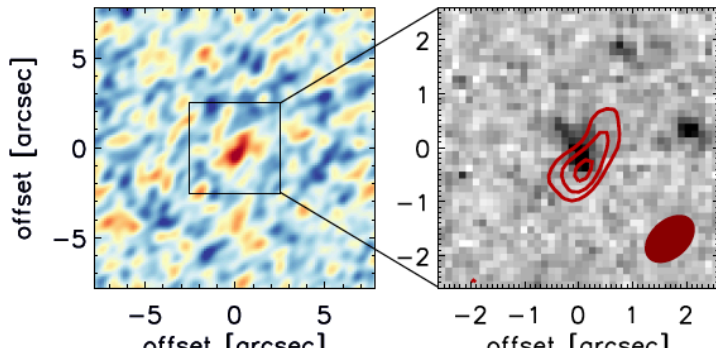
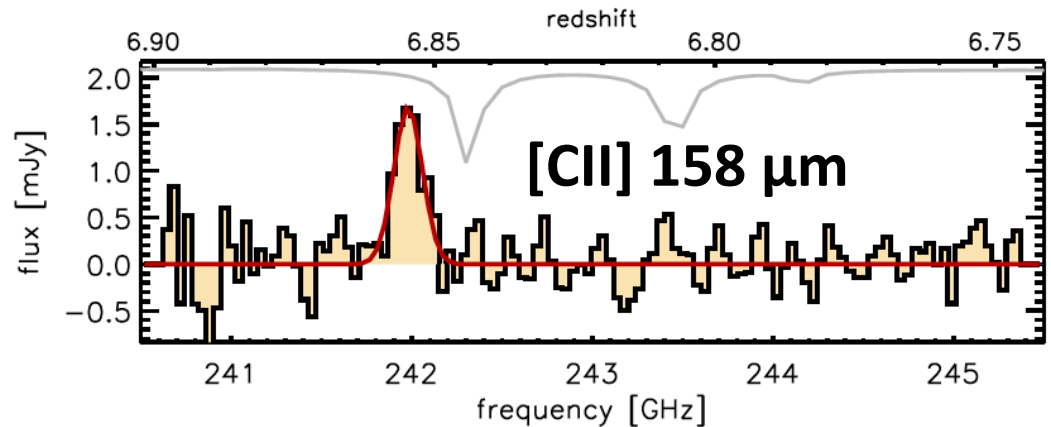
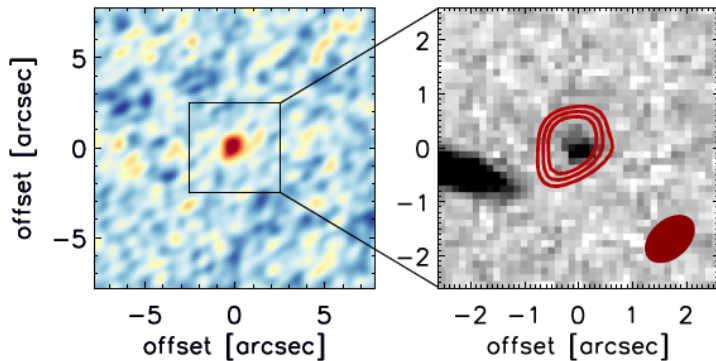


詳細な性質 (EW etc) は今後の論文で。
強み: 感度、深い多波長データ、視野

ALMA studies

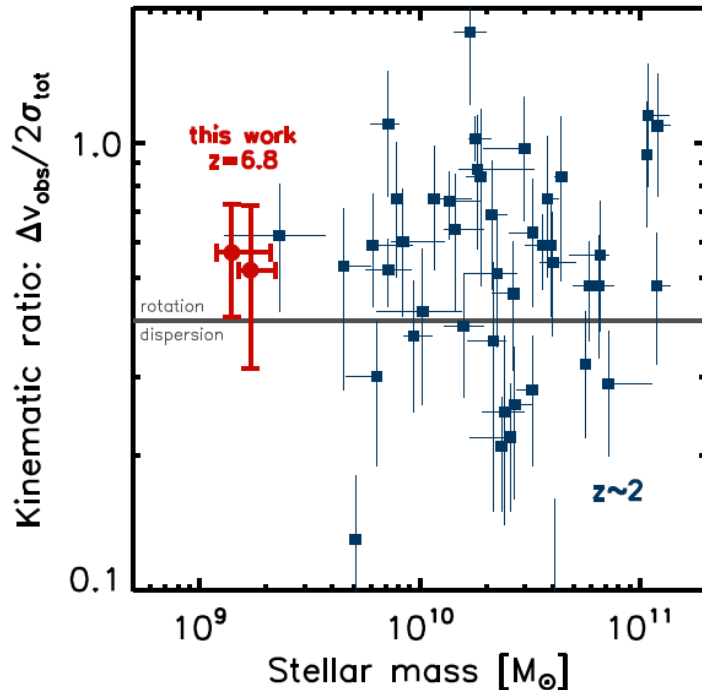
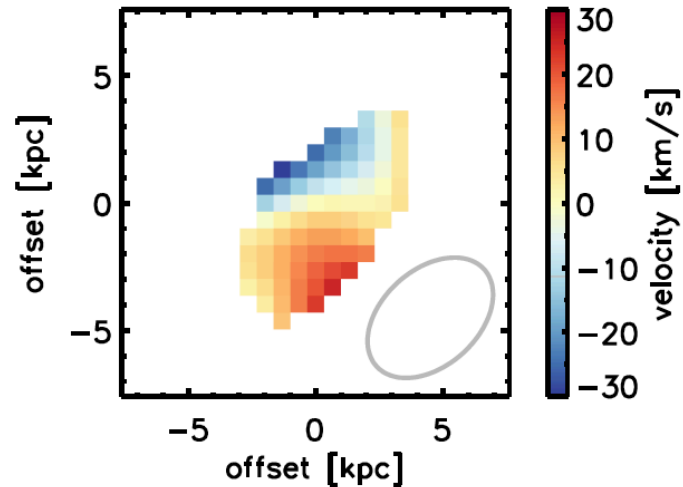
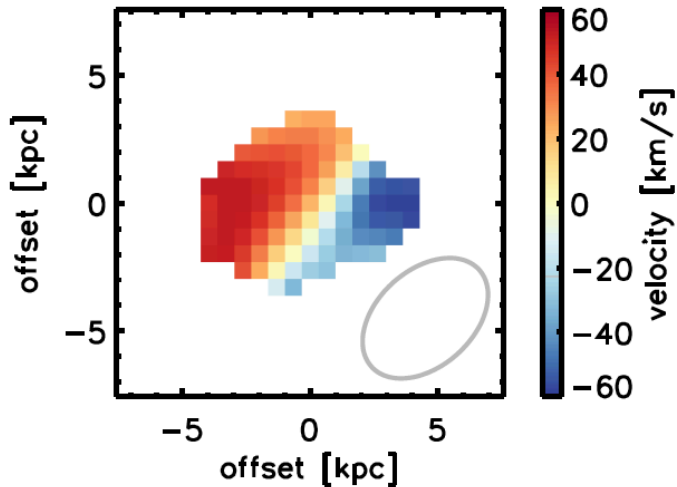
Smit+18 Nature

- $z > 7$ の Ly α 面分光は難しい。
 - morpho-kinematics @ $z > 7$
 - ALMA [CII] 158 μm , [OIII] 88 μm
- Smit+18 Nature 2 LBGs w. [CII] @ $z = 6.8$



ALMA studies

Smit+18 Nature



- $z = 6.8$ で既に銀河ディスクの回転(?)
- ALMA 追観測により、
dynamical modeling 中 (Smit+ in prep.)
綺麗な rotation curve

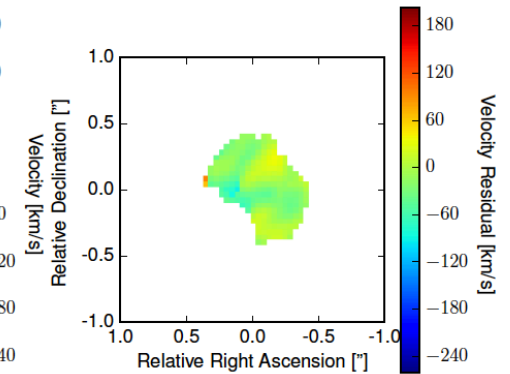
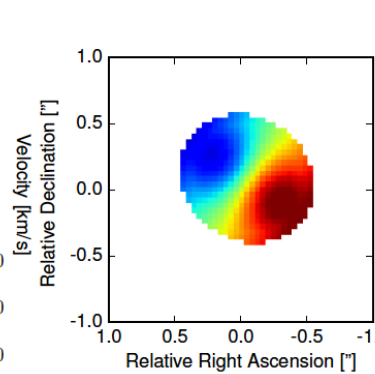
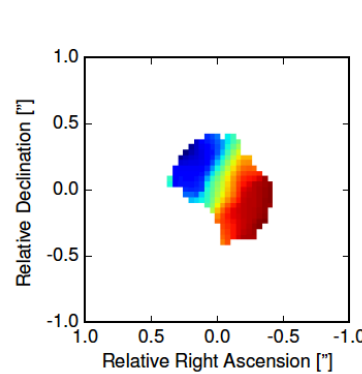
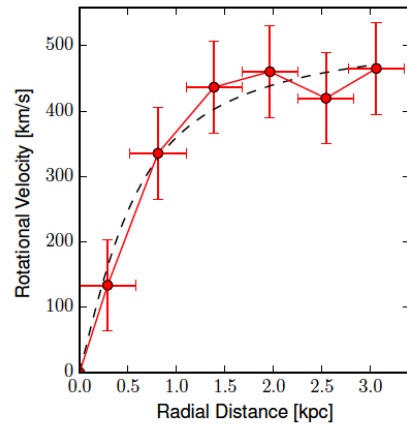
cf., $z = 2$ Forster-Schreiber+09 (SINS survey)

ALMA studies

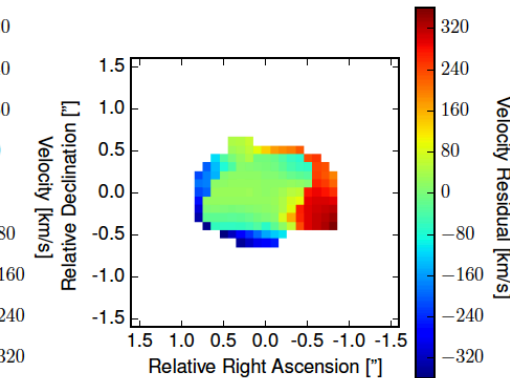
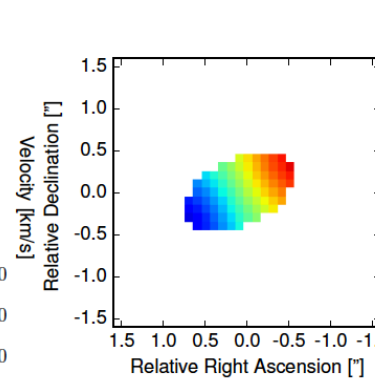
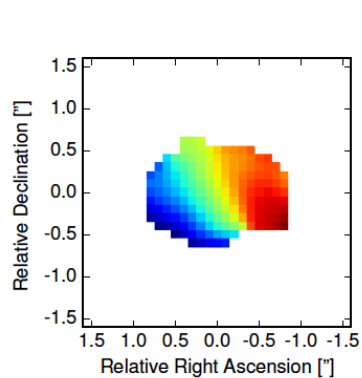
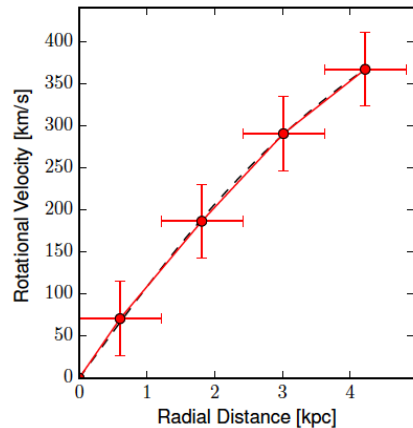
Jones+17b

(参考) $z = 5-6$ で極めて明るい LBG や QSO host 銀河の dynamical modeling 例もある

J1319+0950



HZ10



まとめ

- High- z (ここでは $z \sim 2 - 6$) の銀河研究で面分光がどのような成果をあげてきたか？ **VLT/MUSE** に焦点を当てて紹介。

- 複数の項目を手短に俯瞰
- 国内の面分光研究の発展に繋がれば幸い

Bacon et al. (2017) A&A, 608, 1

Inami et al. (2017) A&A, 608, 2

Leclercq et al. (2017) A&A, 608, 8

Wisotzki et al. (2018) Nature 562, 229

Hashimoto et al. (2017) A&A, 608, 10

Maseda et al. (2018) ApJ, 865, 1

- **ALMA** も実質的に面分光装置。ALMA 研究 ($z \sim 7$) も紹介。

Smit et al. (2018) Nature, 553, 178