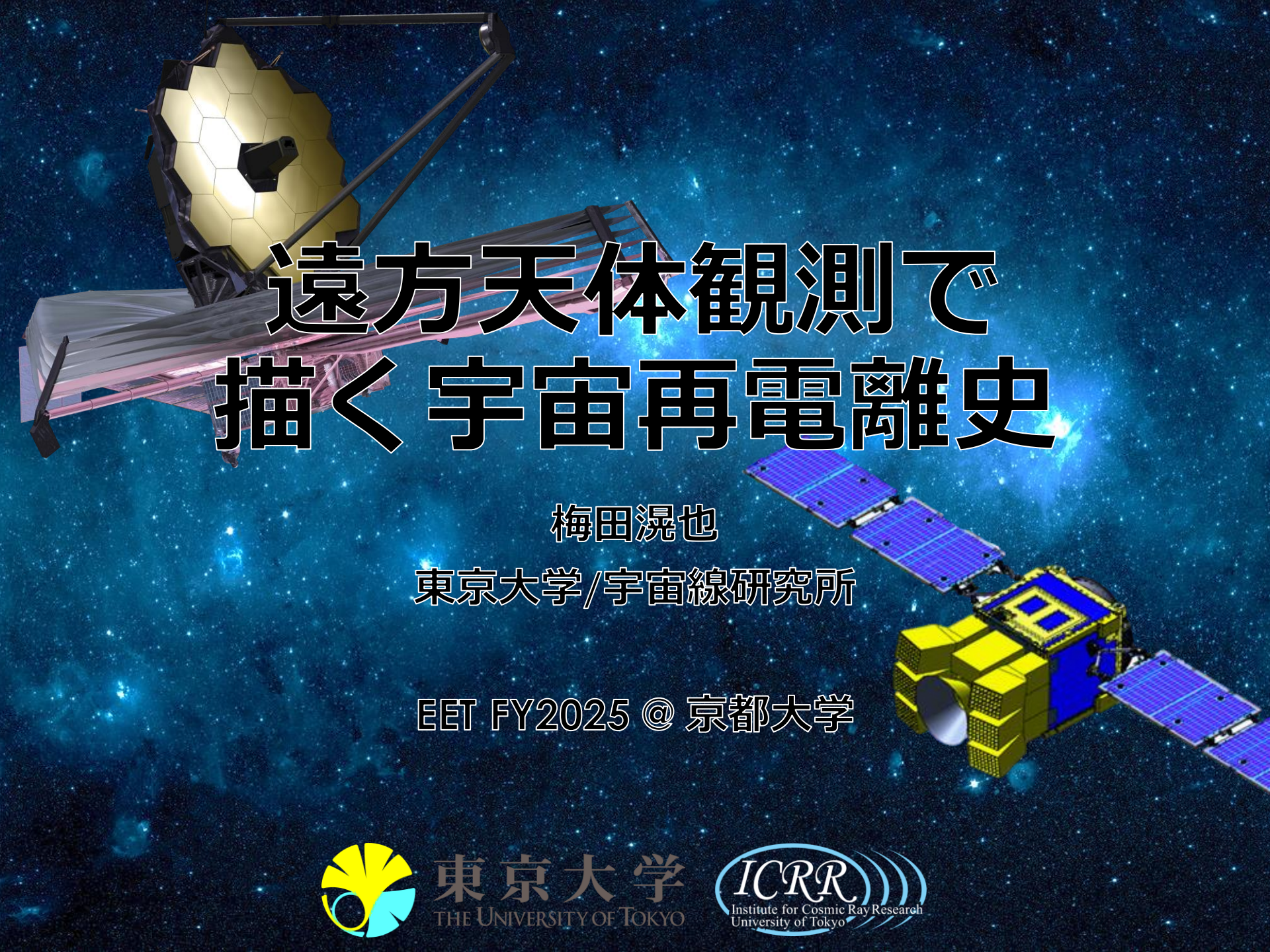




遠方天体観測で 描く宇宙再電離史

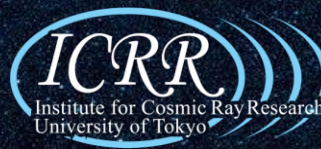
梅田滉也

東京大学/宇宙線研究所

EET FY2025 @ 京都大学



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

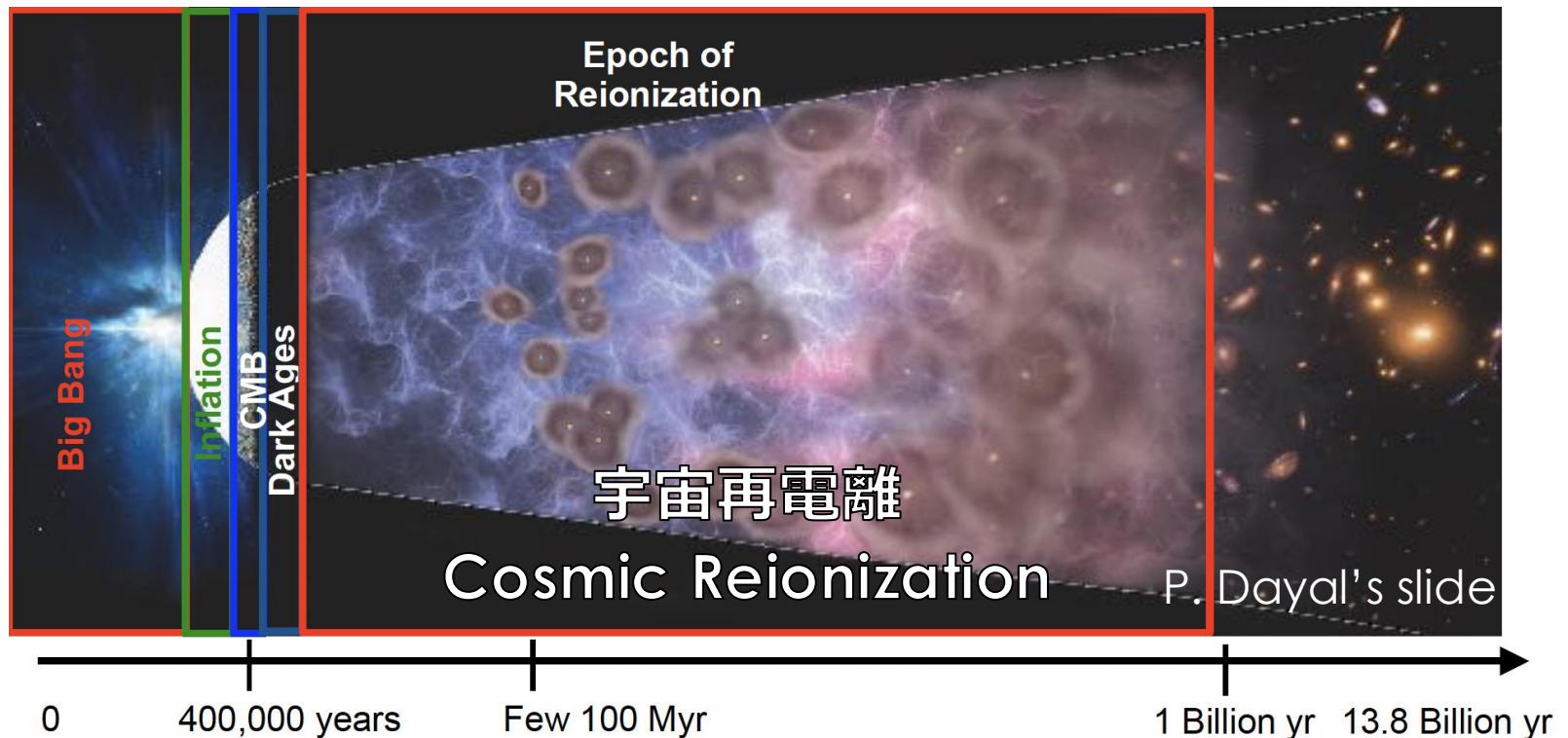


アウトライン

1. 宇宙再電離について
2. 宇宙再電離史の観測制限
3. JWSTの登場と宇宙再電離史
4. 宇宙再電離史とその他銀河観測の整合性
5. 宇宙再電離研究の今後
 - Roman, HiZ GUNDAM, 21cm線

宇宙再電離とは？

ビッグバン、再結合の後、中性銀河間H(+He)ガスが
銀河などの紫外光放射により電離
銀河形成により宇宙全体の"状態が変化"



宇宙再電離の課題

いつ始まり完了したのか？（1.再電離史）

何に引き起こされたのか？（2.電離源）

どう電離領域が拡大したのか？（3.電離構造）

宇宙再電離史

$$x_{\text{HI}} = n_{\text{HI}} / n_{\text{H}}$$

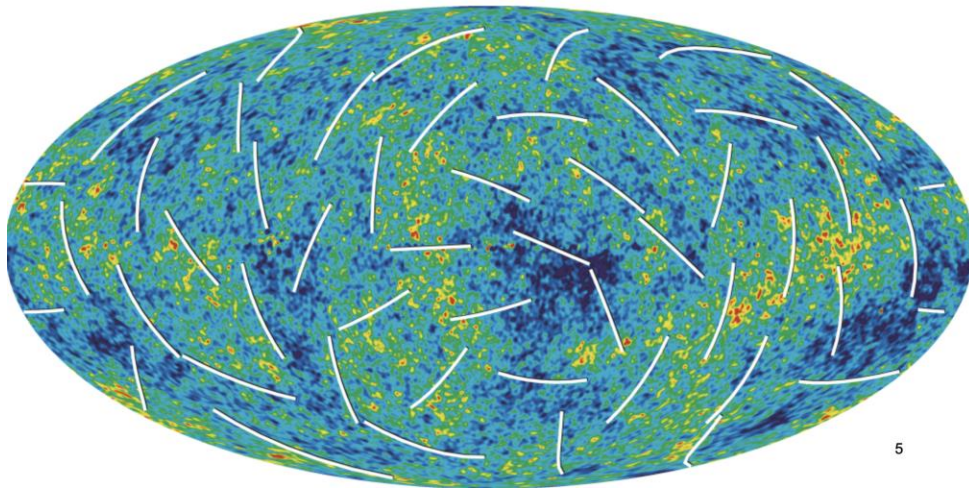
の時間(赤方偏移)変化を見る

CMBの電子散乱から見る 宇宙再電離

CMBと電子のトムソン散乱

→大スケールで温度揺らぎ生じる（偏光）

銀河間ガス電離が大体 $z \sim 10$ で起こった

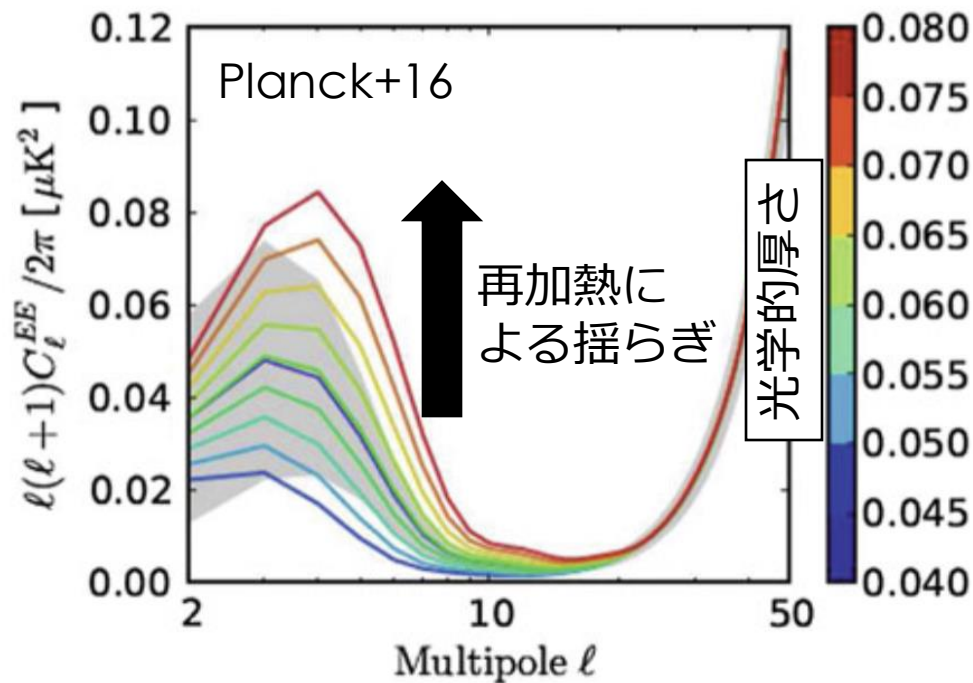


CMBの偏光から
トムソン散乱の光学的厚さ推定

$$\tau_e = \sigma_T \int_0^z n_e(z') \frac{dl(z')}{dz'} dz'$$

- * 電子の柱密度しかわからない
- * $x_{\text{HI}}(z)$ はわからない

*see also kSZ effect, patchy screening effect
*see also ACT & SPT's recent measurements



CMBの偏光から
トムソン散乱の光学的厚さ推定

$$\tau_e = \sigma_T \int_0^z n_e(z') \frac{dl(z')}{dz'} dz'$$

- * 電子の柱密度しかわからない
- * $x_{\text{HI}}(z)$ はわからない

*see also kSZ effect, patchy screening effect
*see also ACT & SPT's recent measurements

HIガスの吸収から見る 宇宙再電離

HI Ly α 線（共鳴線）の吸収から
HIガスの量を推定



特徴：

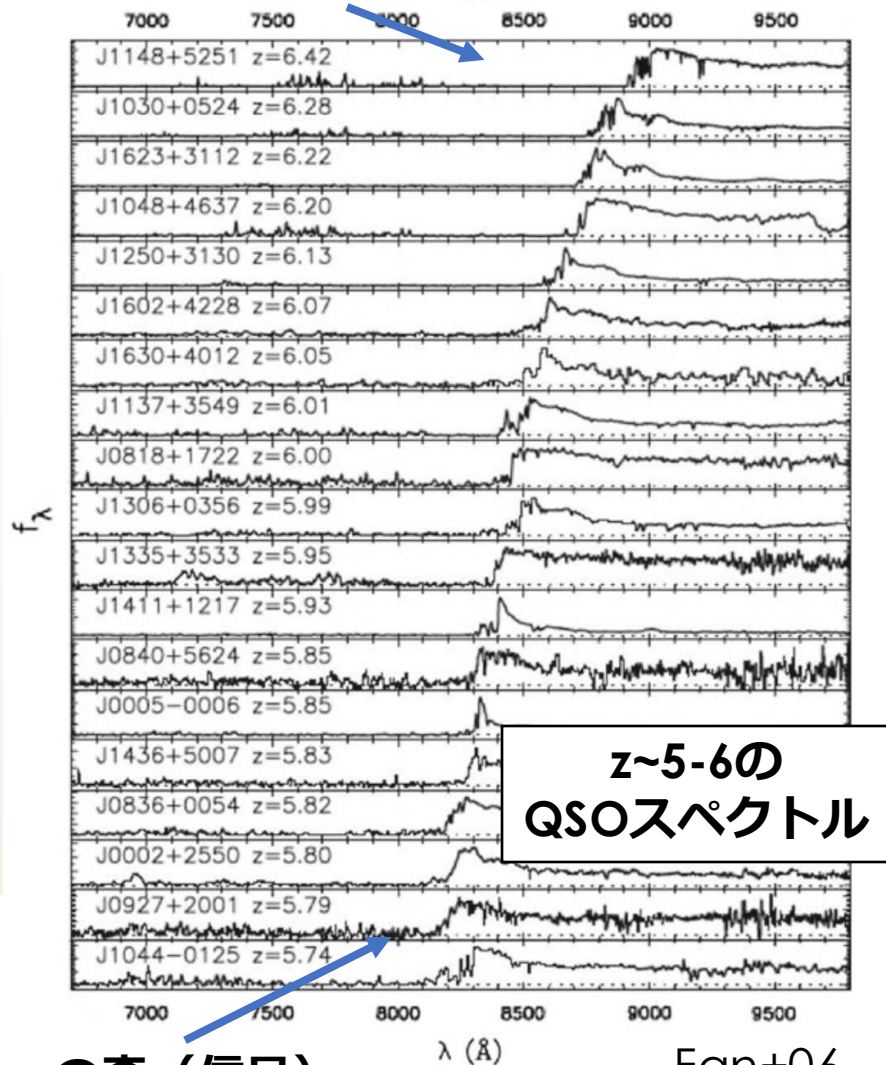
非常に明るい
散乱されやすい



HIガスの吸収から見る 宇宙再電離

信号消滅

λ (Å)

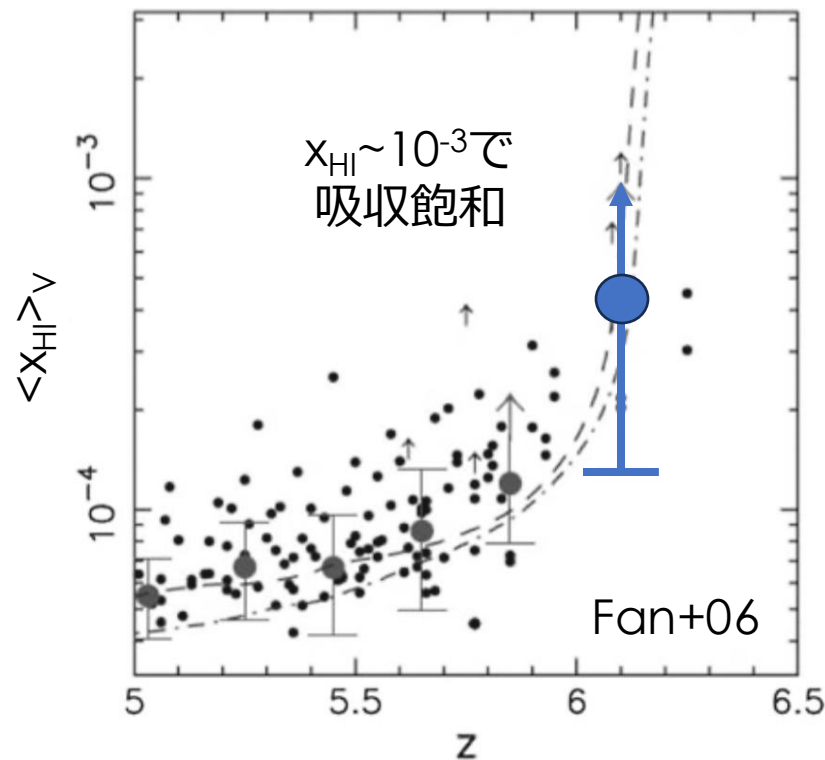


$z \sim 5-6$ の
QSOスペクトル

Ly α の森 (信号)

Fan+06

源) の吸収から $\tau_{\text{GP}}(z) = \frac{3\lambda_\alpha^3 \Lambda_\alpha n_0}{8\pi H(z)}$
量を推定 宇宙再電離は $z \sim 5-6$ に完了

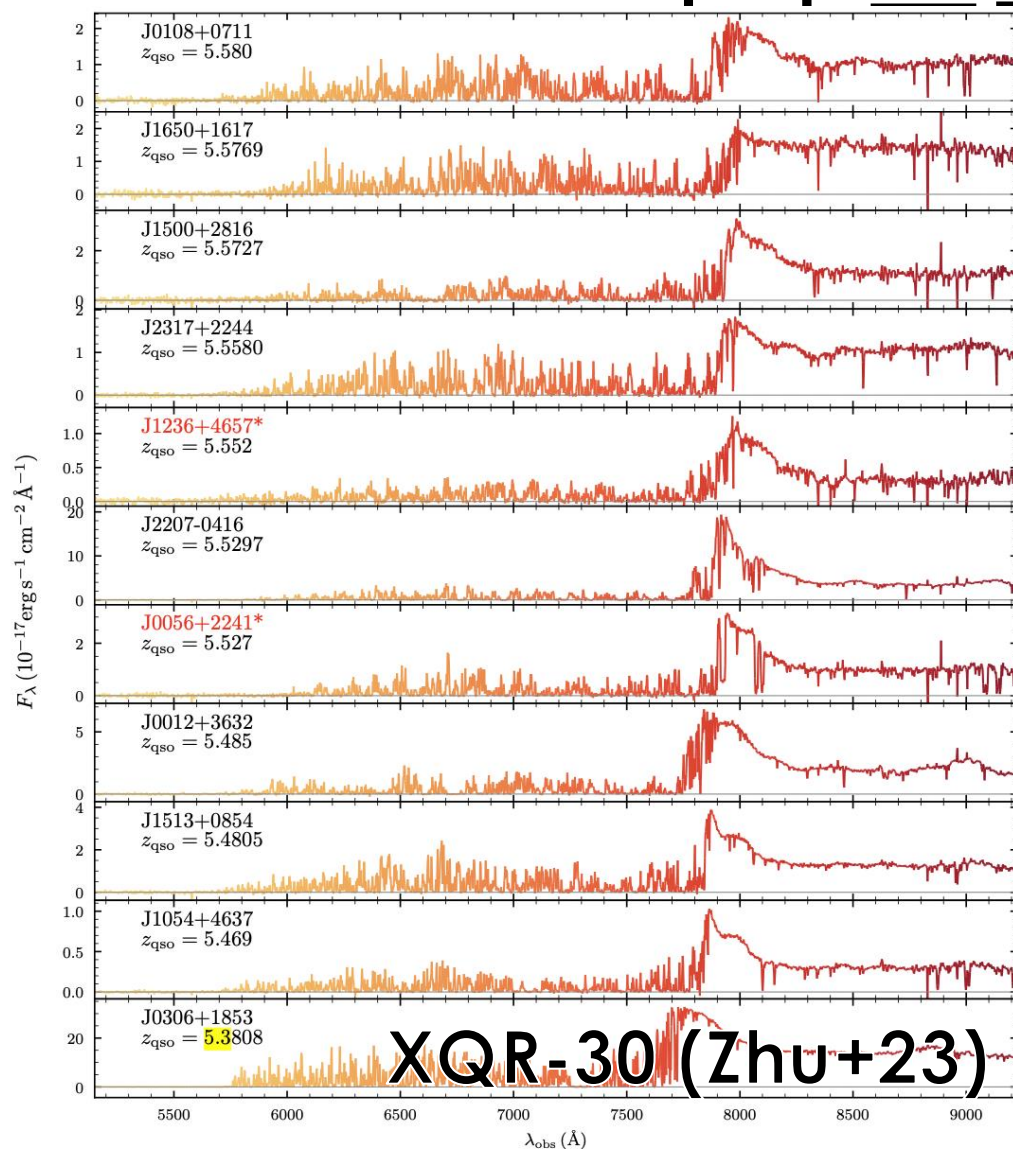


HIガスの吸収から見る

電離

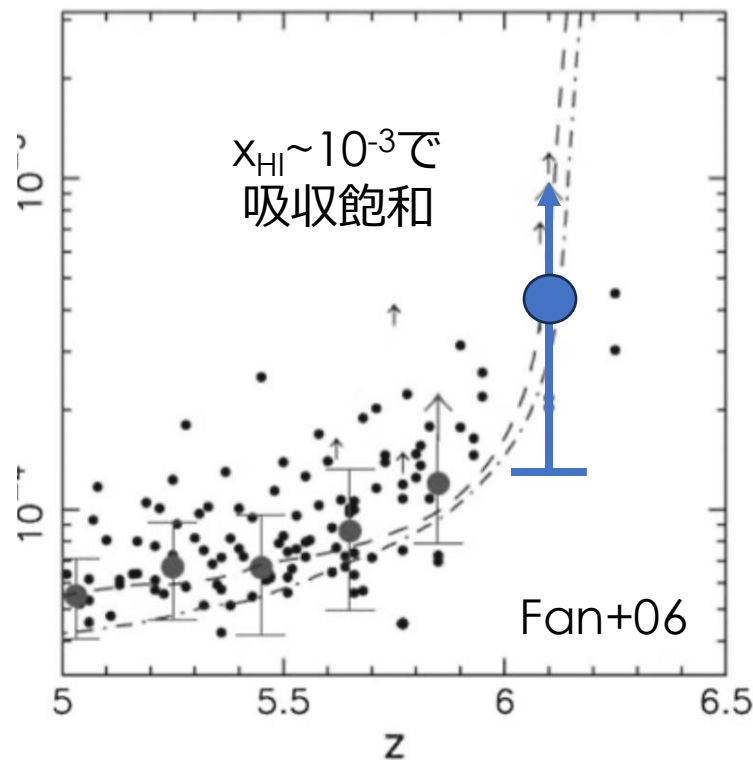
の吸収から $\tau_{\text{GP}}(z) = \frac{3\lambda_{\alpha}^3 \Lambda_{\alpha} n_0}{8\pi H(z)}$

と宇宙再電離は $z \sim 5-6$ に完了



Ly α の森 (信号)

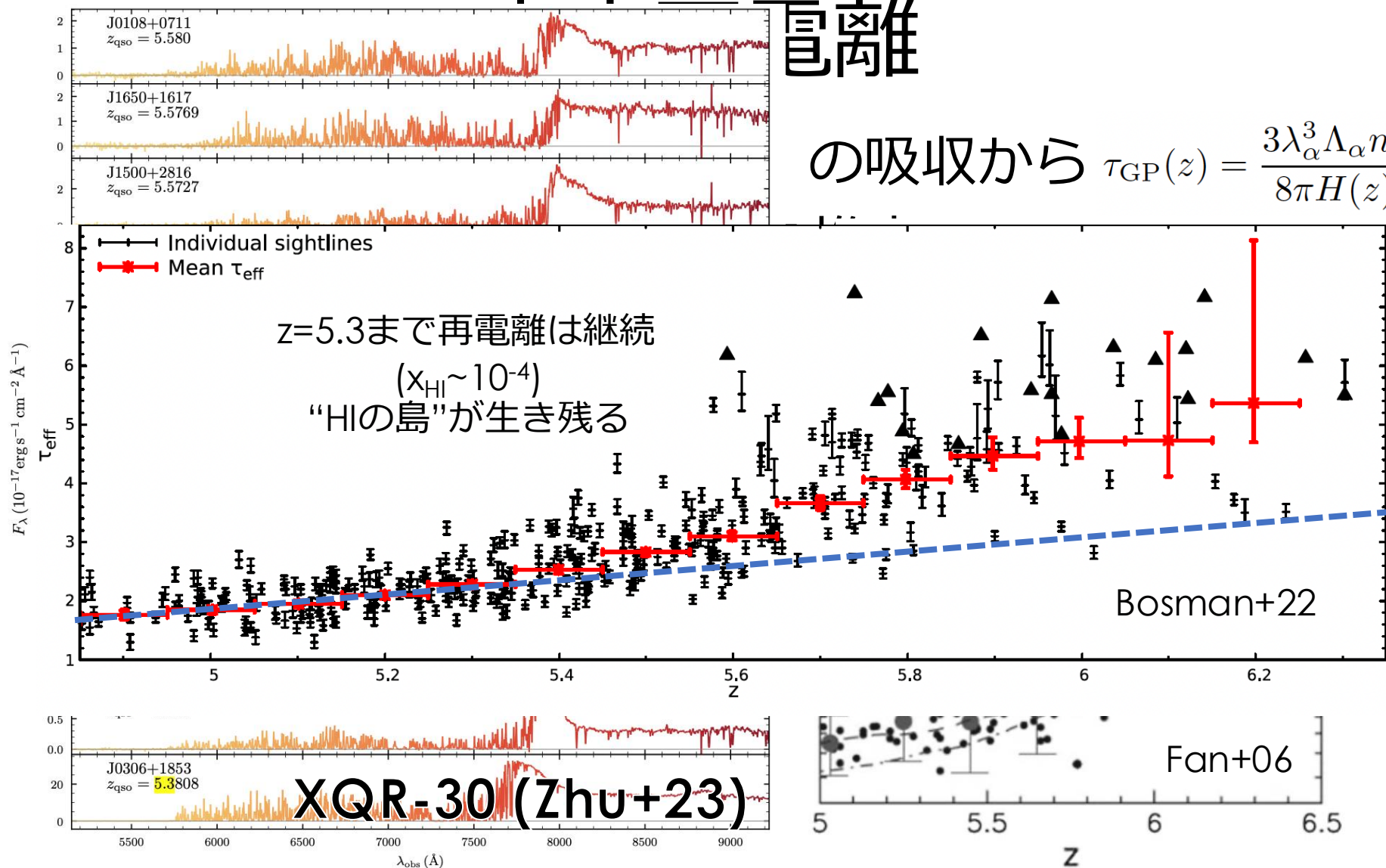
Fan+U6



HIガスの吸収から見る

電離

の吸収から $\tau_{\text{GP}}(z) = \frac{3\lambda_{\alpha}^3 \Lambda_{\alpha} n_0}{8\pi H(z)}$

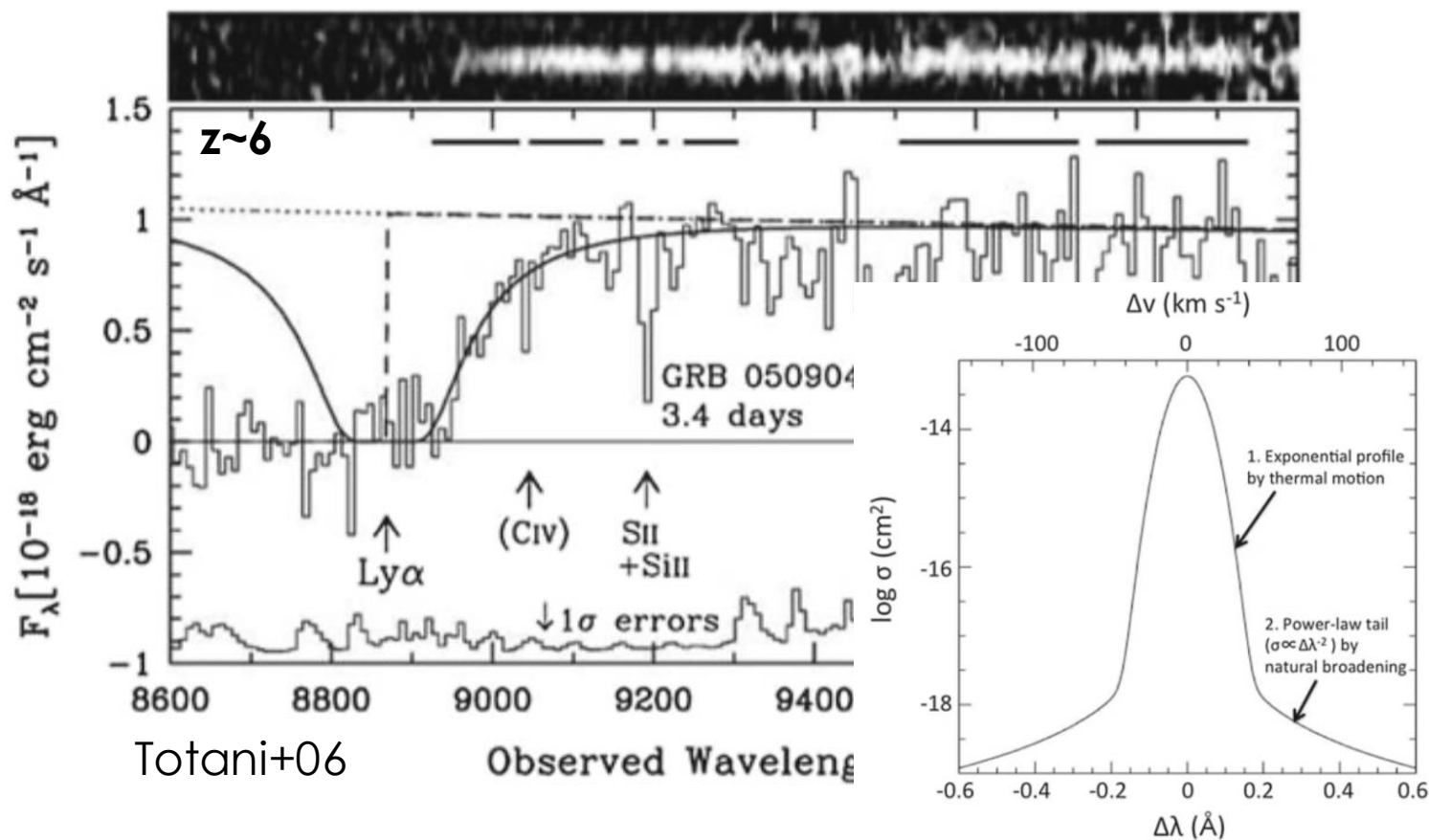


Ly α の森 (信号)

GRBのUV残光による 減衰翼吸収の検出

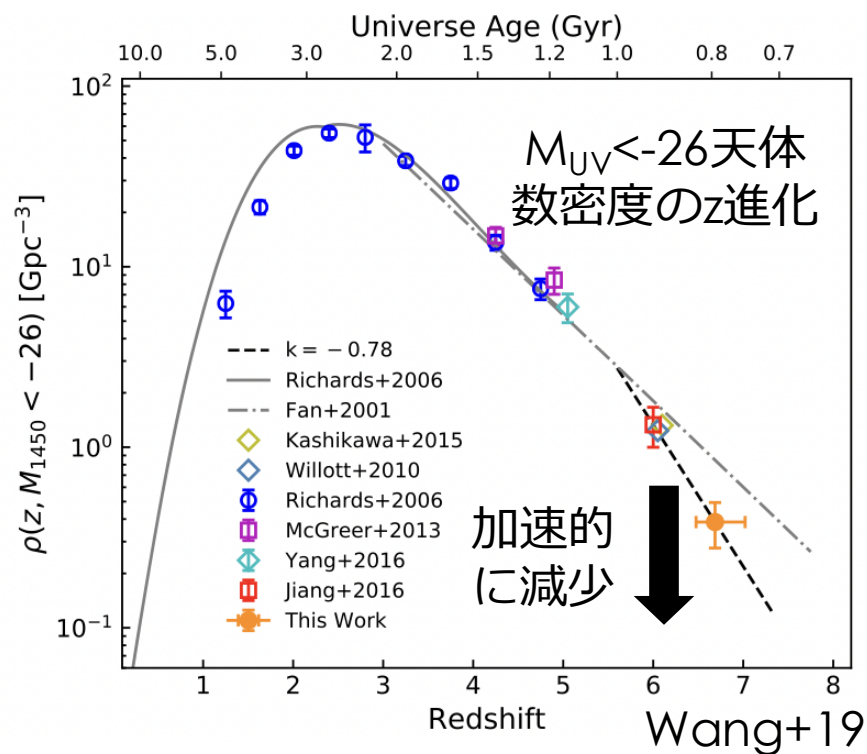
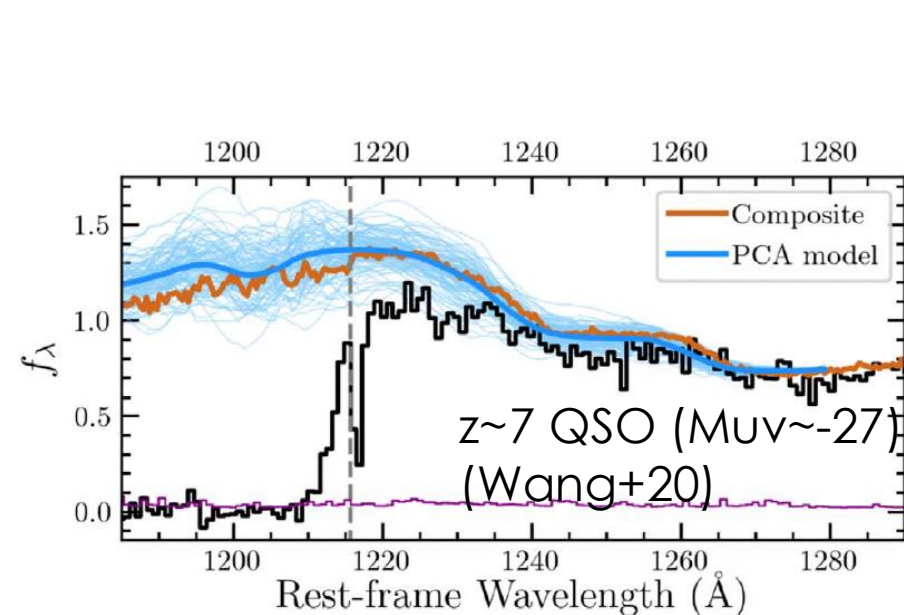
IGM HI量が高い→ Ly α 減衰翼吸収からxHI測定

*緩やかな吸収なので飽和しない



明るい背景光は少ない

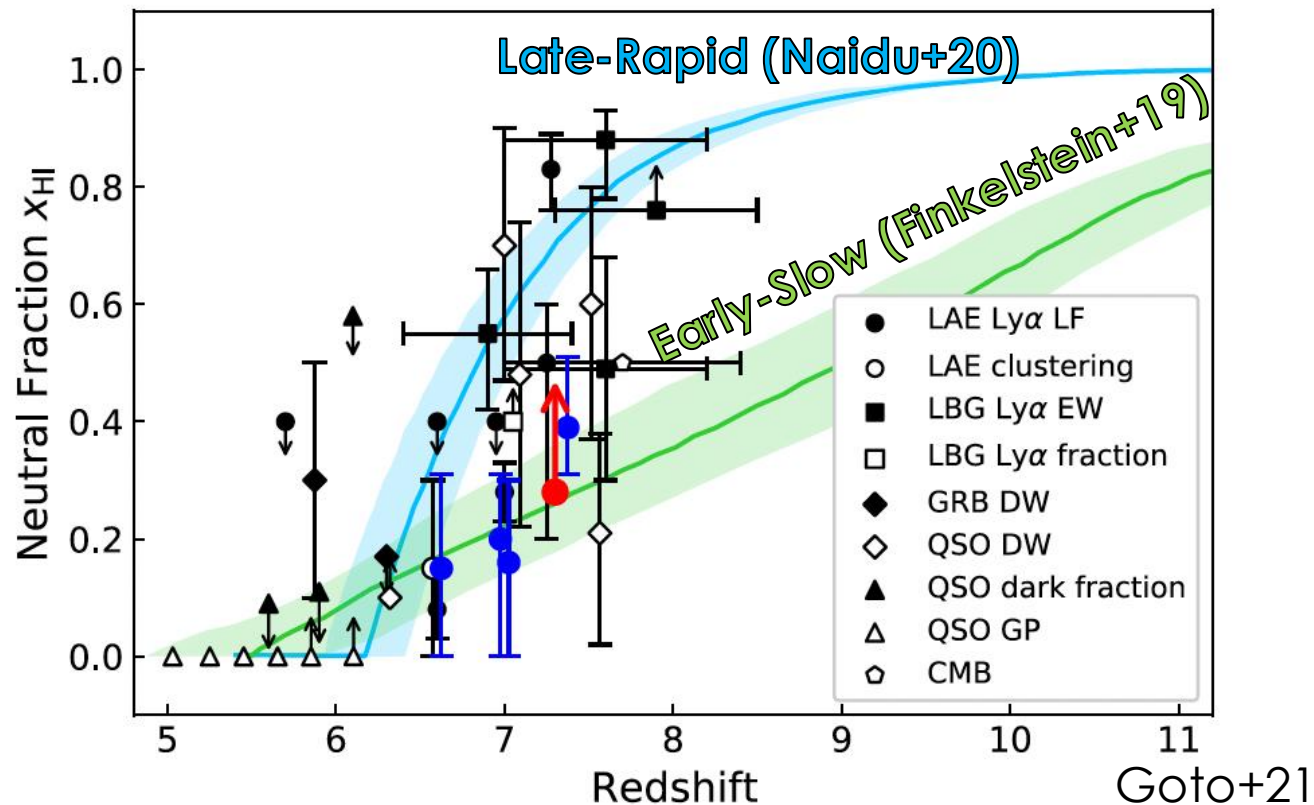
GRBやQSOを背景光→ $z \sim 7.5$ まで成果
その先は明るい光源が検出できない...



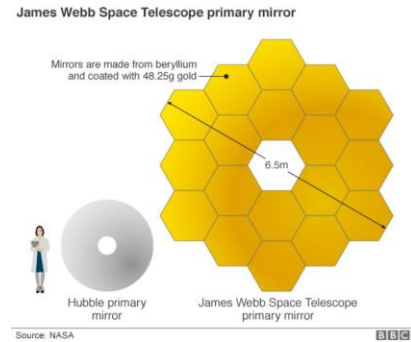
観測の壁

$x_{\text{HI}} = n_{\text{HI}}/n_{\text{H}}$: 中性水素割合

$z \sim 7$ で観測制限が止まっている@2021

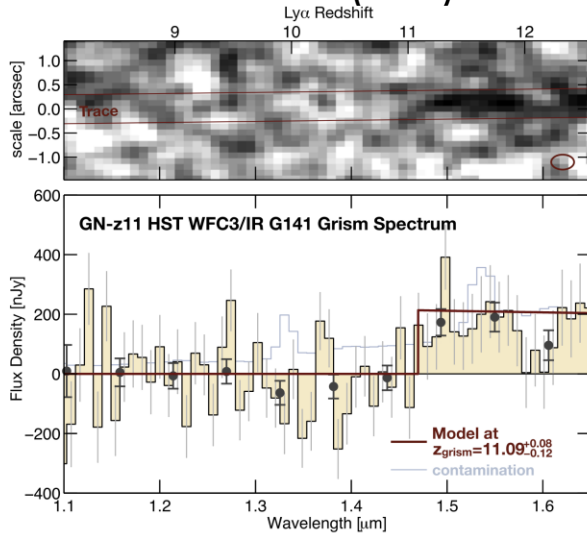


James Webb の登場



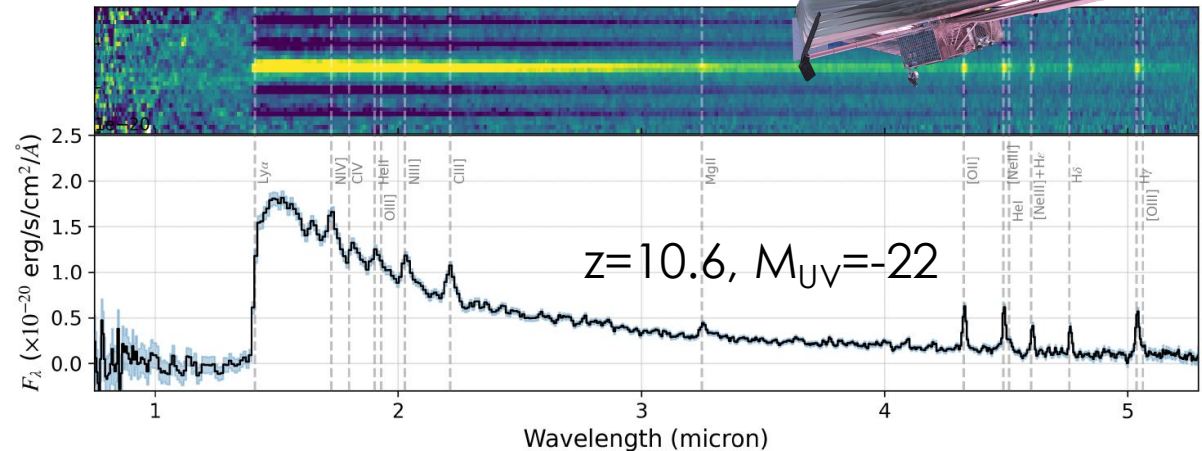
James Webb宇宙望遠鏡(JWST)のNIRSpec分光
→銀河($M_{UV} > -23$)のUV連続光も検出可能

GN-z11 (HST)



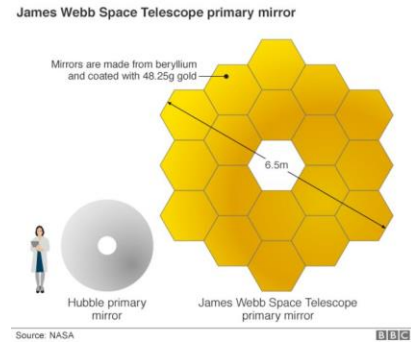
Oesch+18

GN-z11 (JWST)

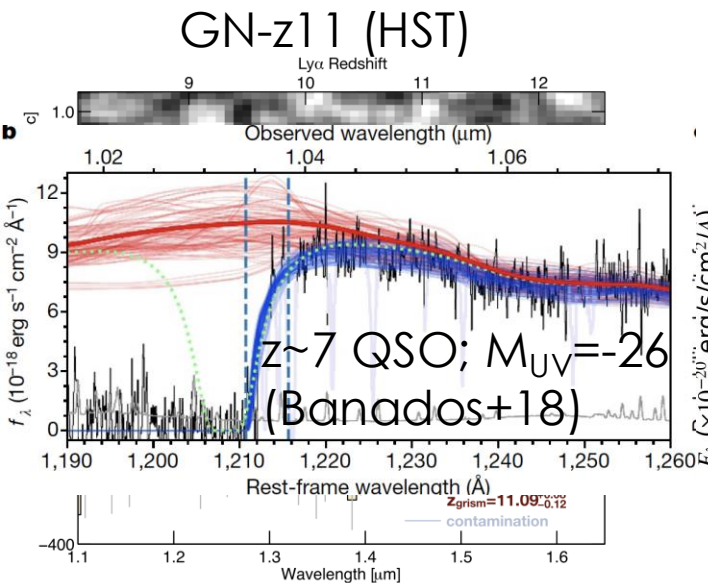


Bunker+23

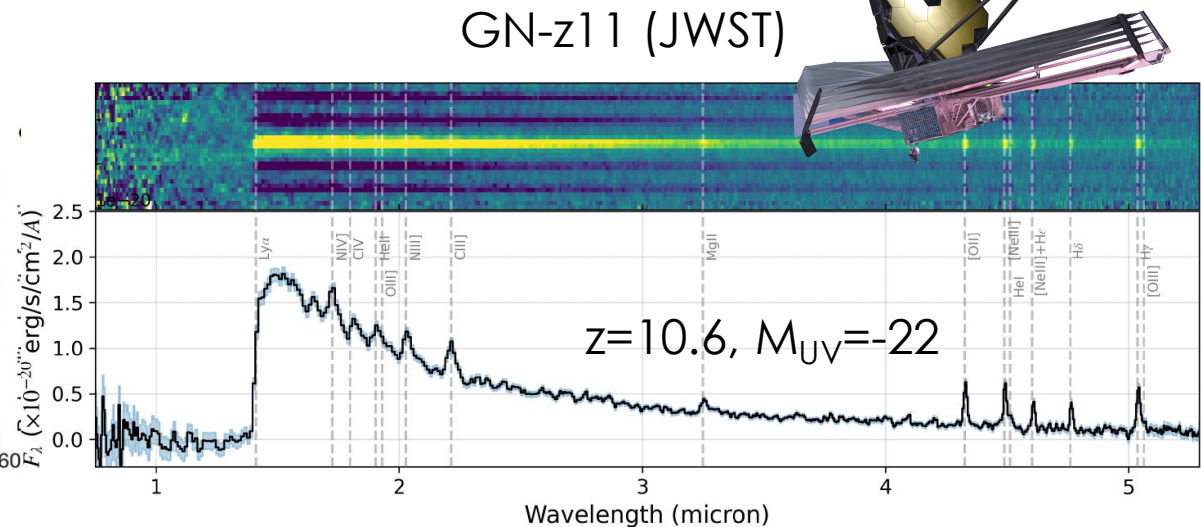
James Webb の登場



James Webb宇宙望遠鏡(JWST)のNIRSpec分光
→銀河($M_{UV} > -23$)のUV連続光も検出可能

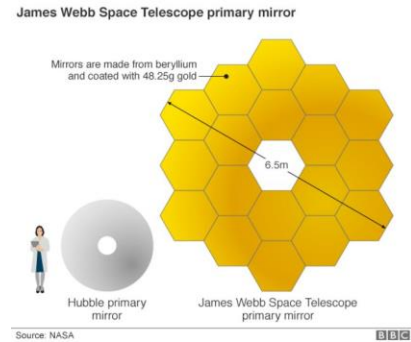


Oesch+18



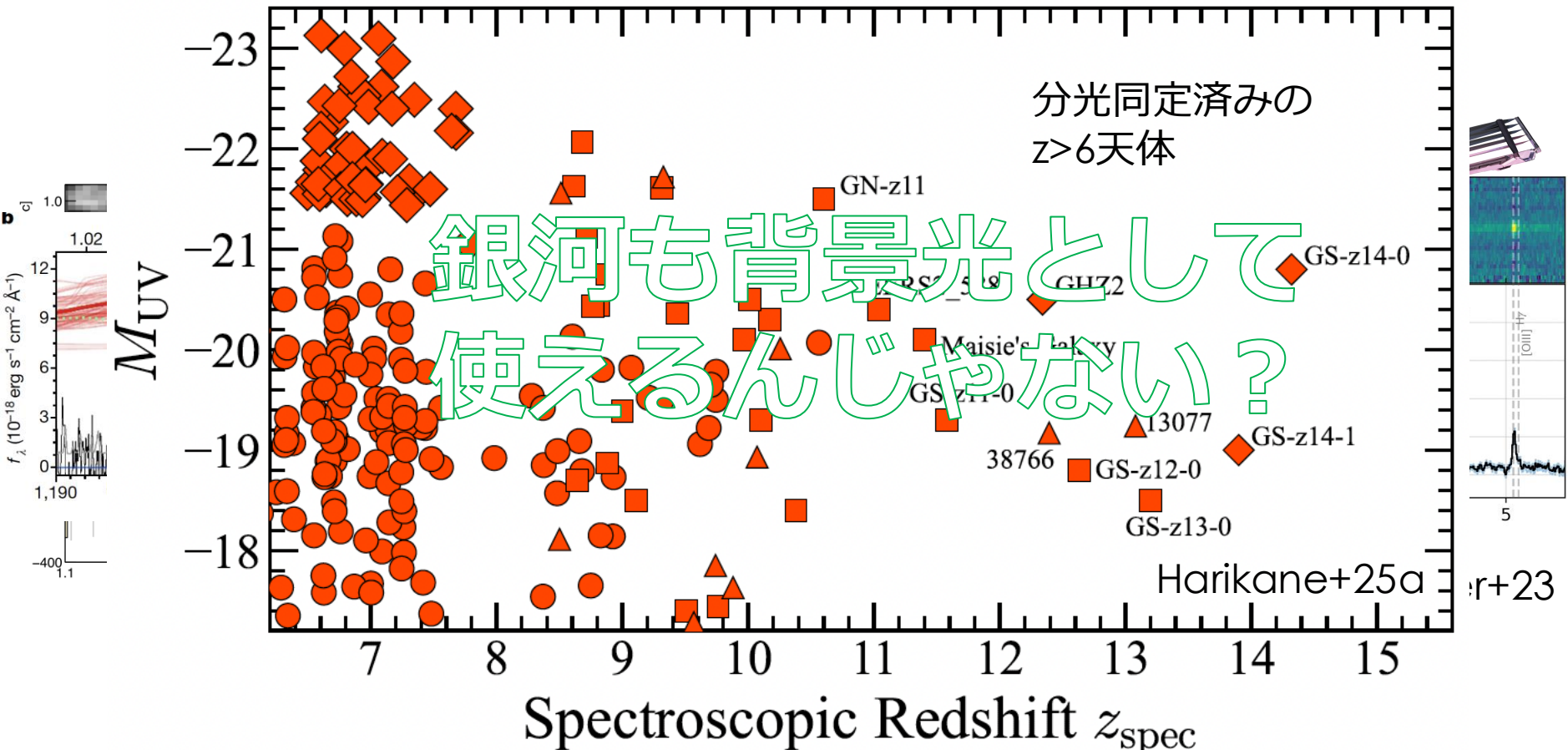
Bunker+23

James Webb の登場



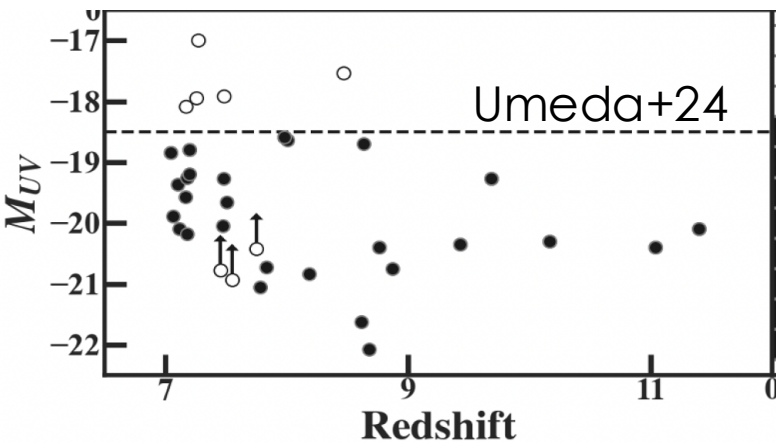
James Webb宇宙望遠鏡(JWST)のNIRSpec分光

銀河も背景光として観測可能な宇宙結晶と検出可能

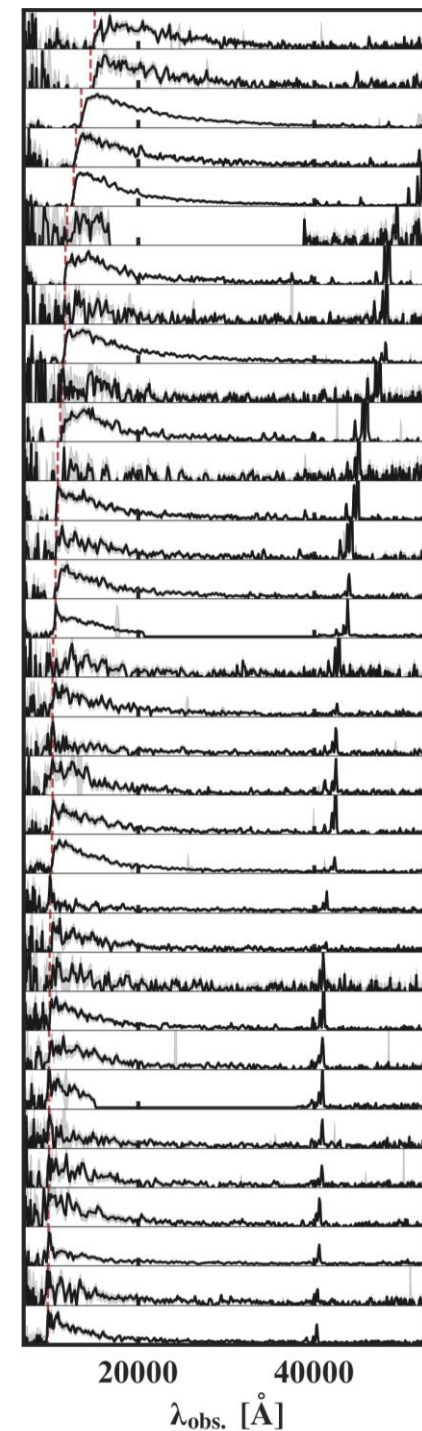


JWSTによる Ly α Damping Wing吸!

公開データから $z > 7$ で輝線同定済の
→ Ly α 減衰翼の赤方偏移進化 (Umeda
(Proof-of-Concept))

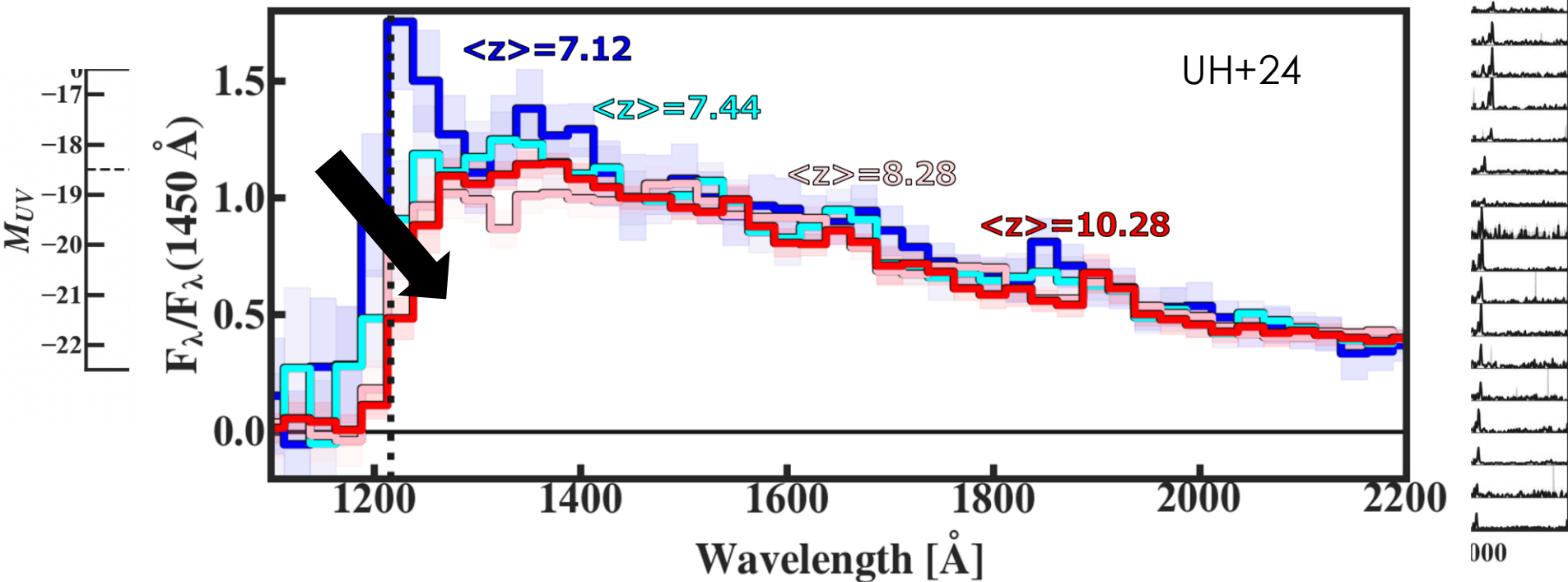


F_{λ} [a.u.]



JWSTによる Ly α Damping Wing吸!

公開データから $z > 7$ で輝線同定済の
→ Ly α 減衰翼の赤方偏移進化 (Ume
(Proof-of-Concept)

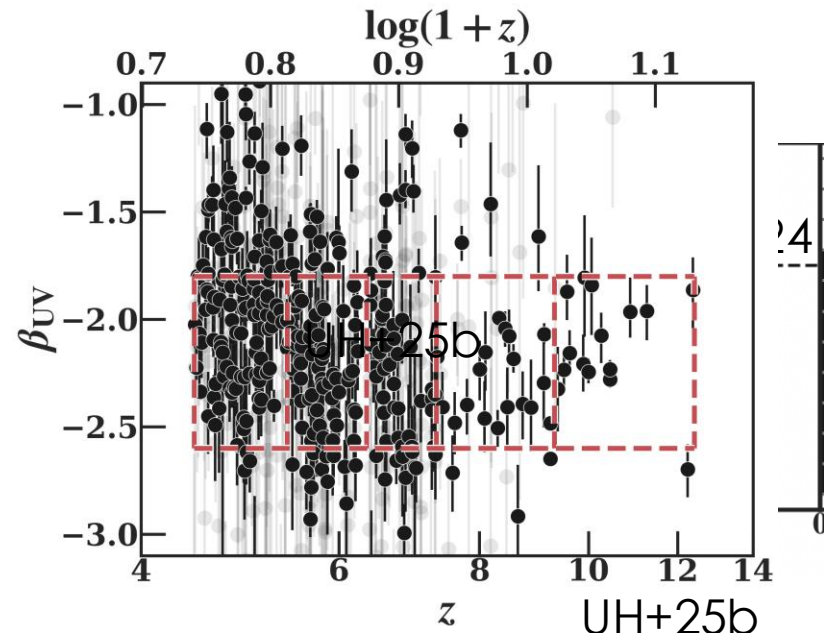
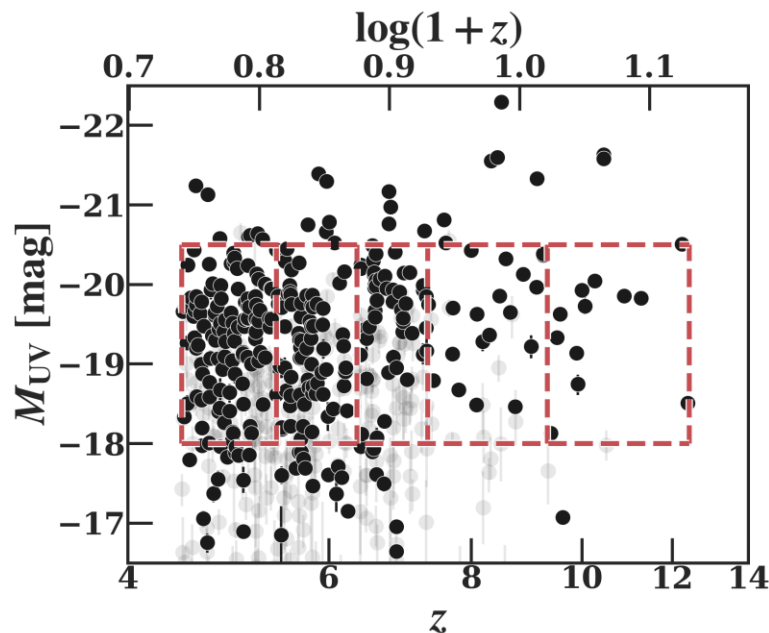


さらに大規模スペクトル での検証

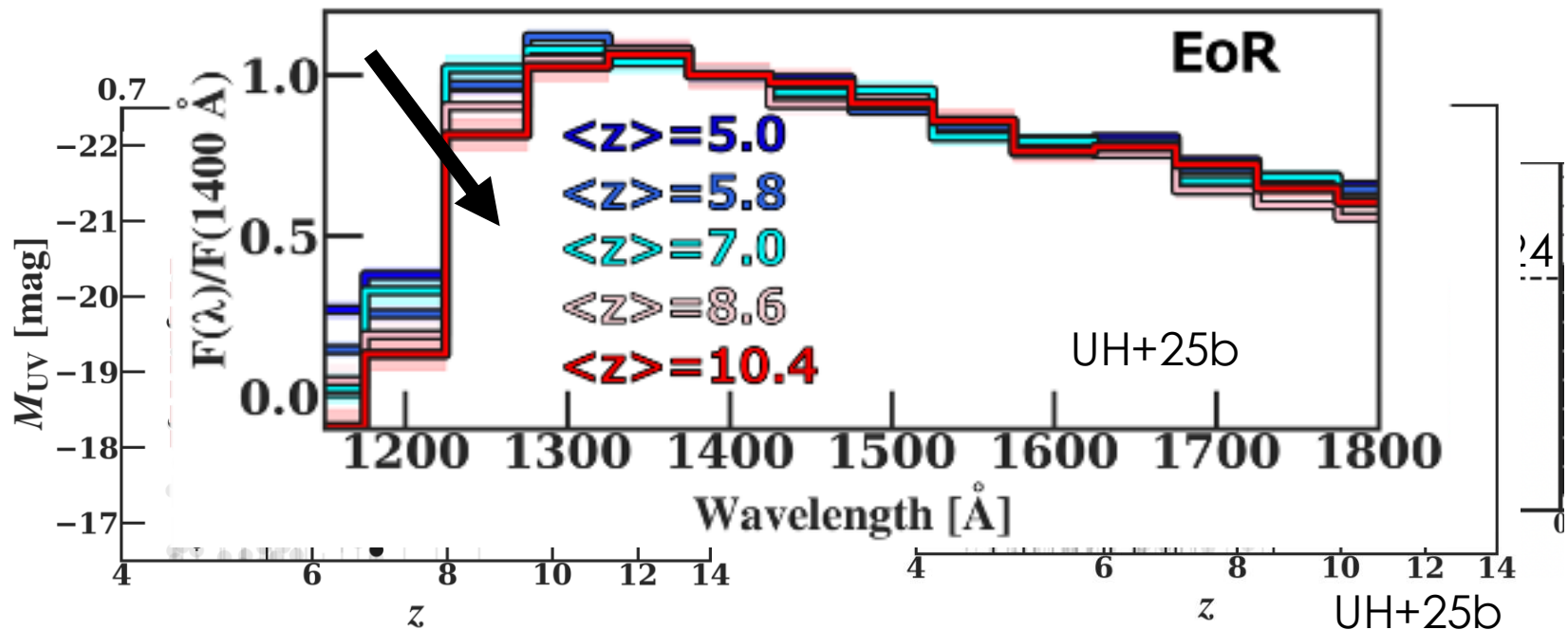
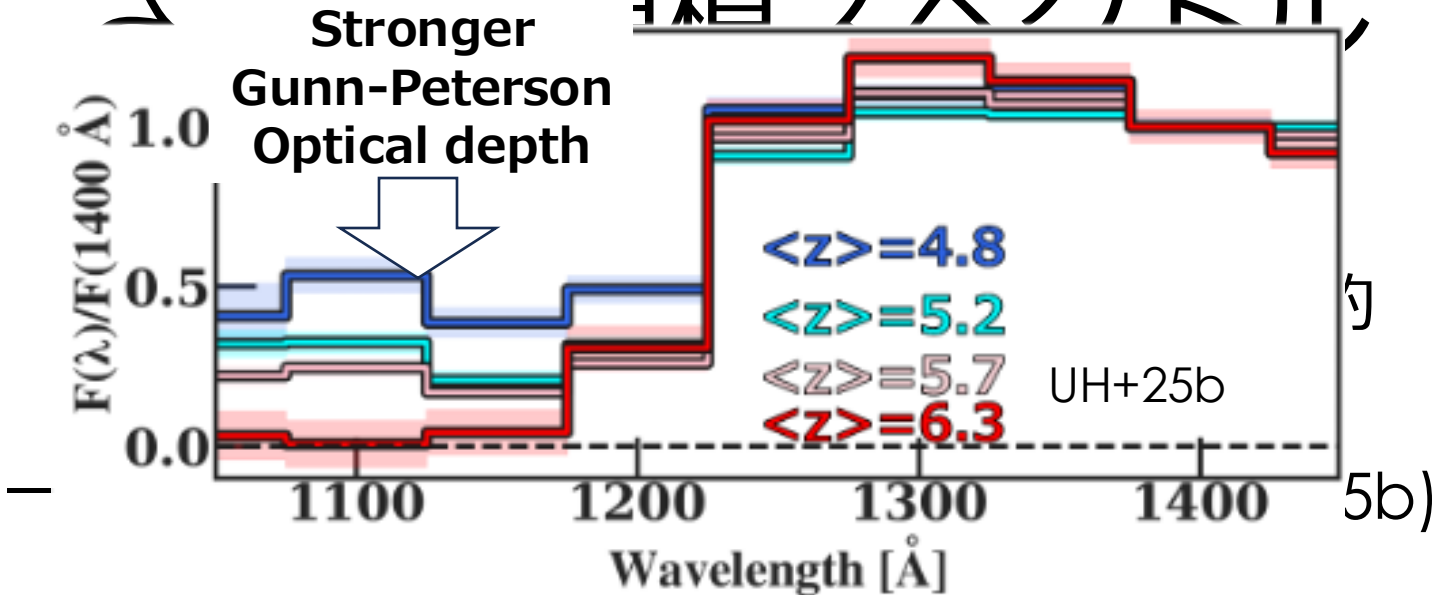
4.5< z <13の~600天体のNIRSpecデータを集約

→UV等級やUV光の波形などを揃えた

一様なサンプルでLy α 減衰翼の解析(Umeda+25b)



★ 宇宙の初期構造のスペクトル



銀河UV連続光を用いた xHI推定

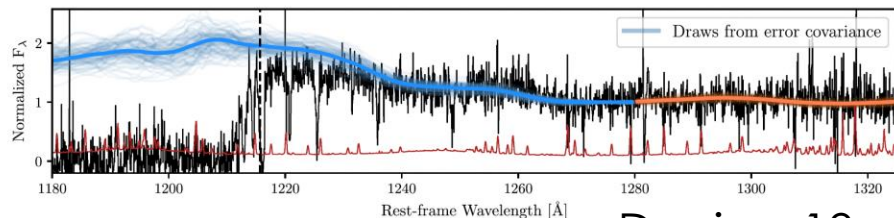
銀河はGRBなどと比べてスペクトルが複雑

→近傍銀河スペクトルをテンプレートとした推定 (UH+25b)

- 近傍の平均銀河スペクトルをテンプレート(host HI吸収等込み)
(e.g., VANDELSサーベイ; Cullen+19; QSOなどでも同じことしてる)
- 様々な視線方向のIGM吸収を考慮 (e.g., 21cmFAST; Mesinger+09)

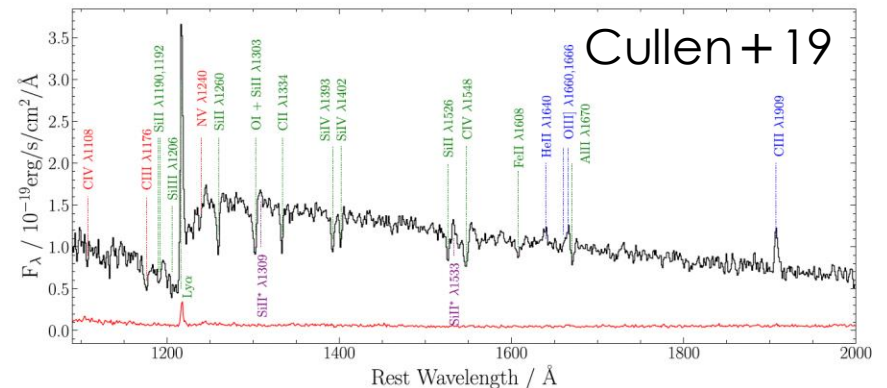
(see also individual fitting: UH+24, Mason+25; cf.,機械学習: Park+24)

EoR QSOのテンプレートフィット
(e.g., Banados+18, Davies+18, Wang+20)



Davies+18

$z \sim 3$ の平均銀河スペクトル



非一様なIGM吸収の処方

Observation

Best Fit

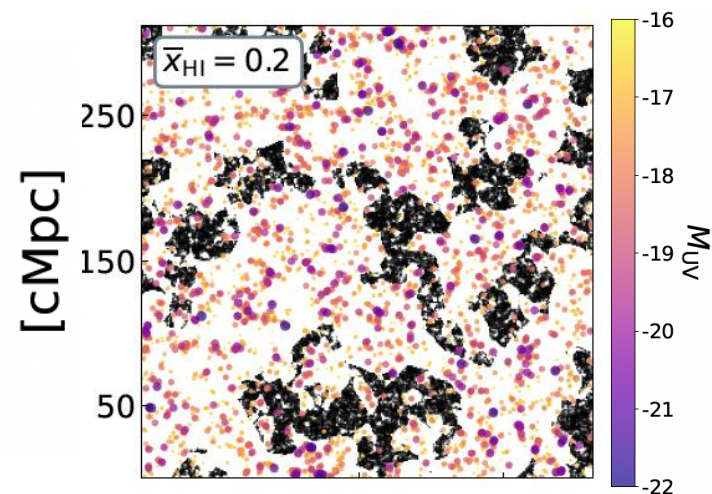
シミュレーションなどで生成された視線上の吸収を処方

(e.g., 21cmFAST, THESAN)

パラメータ推論: semi-numerical & sub-gridが良く使われてる

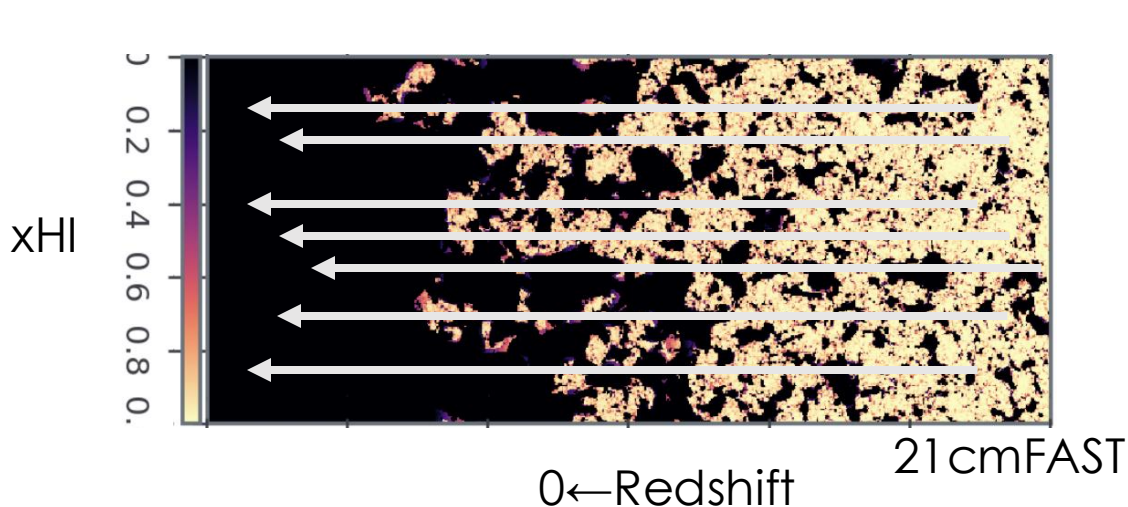
(e.g., Mason+18, Lu+24, Davies+18, Umeda+24, 25ab, Greig+21 ...)

銀河分布とIGM電離状態



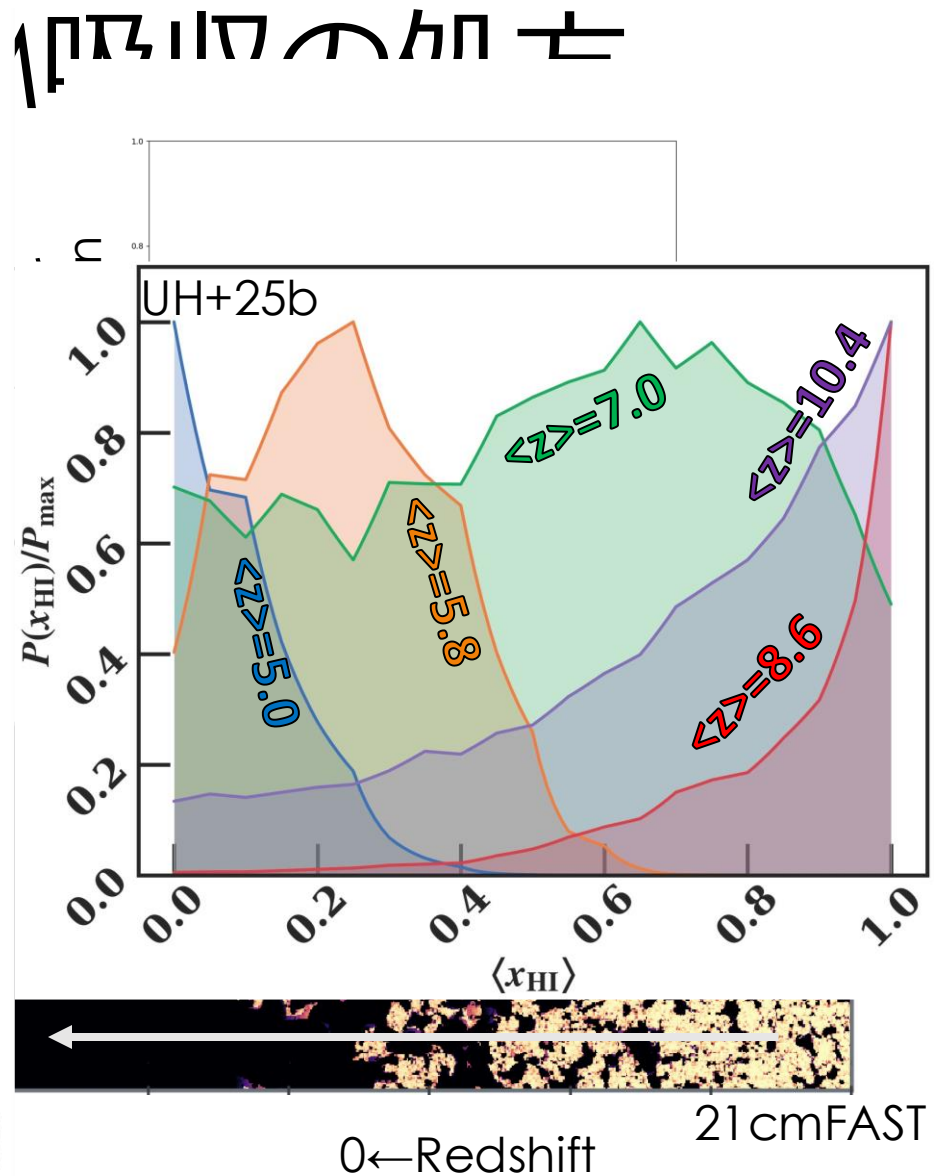
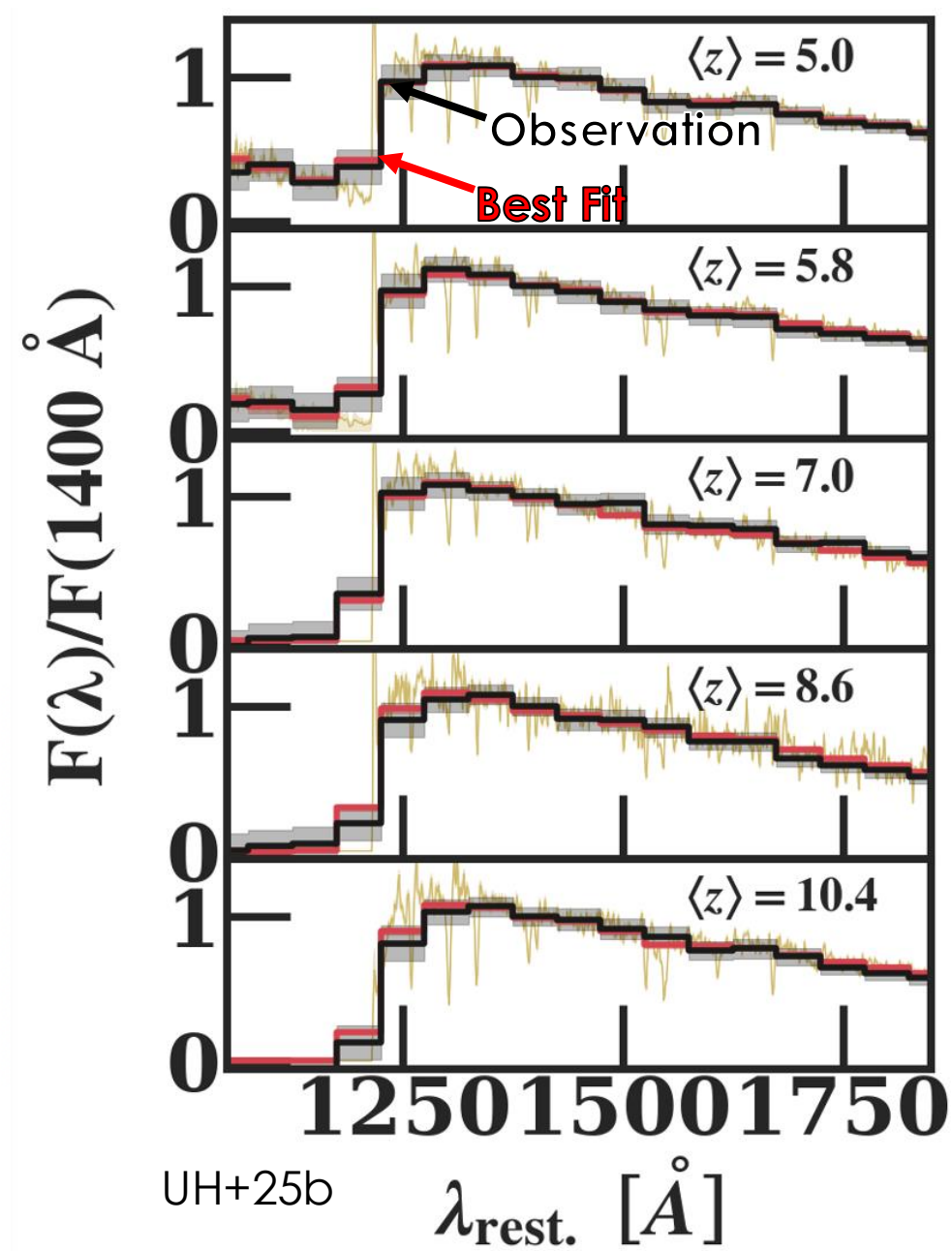
UH+25b

Lu+24



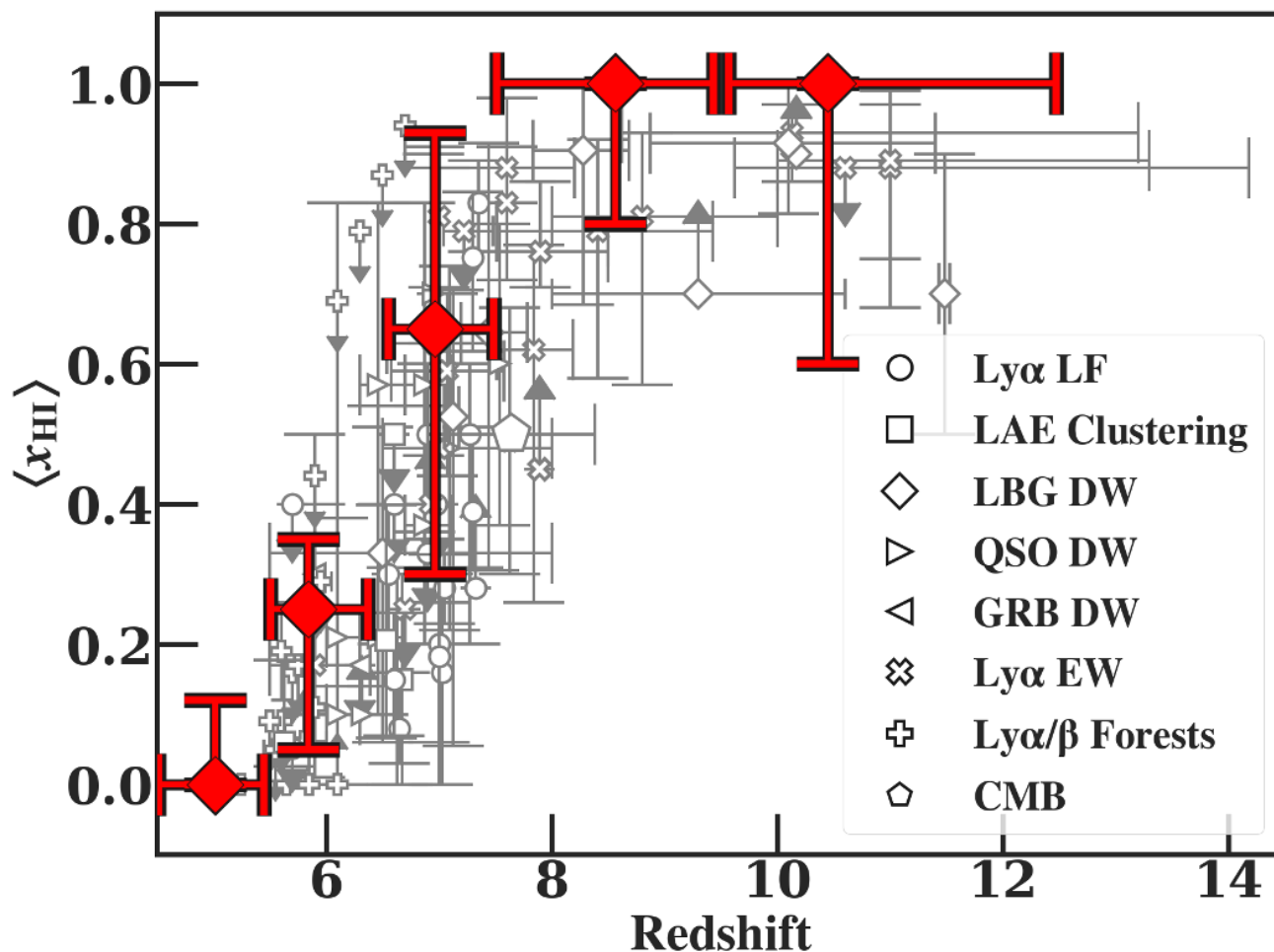
0 ← Redshift

21 cmFAST



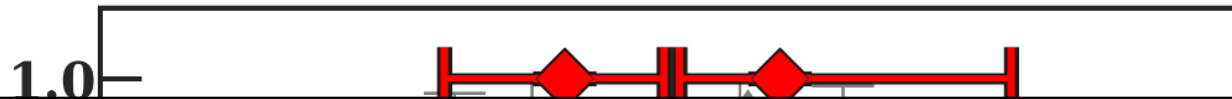
JWSTによる成果

(e.g., Curtis-Lake+23, Hsiao+24, Umeda+24,25, Jones+24, Nakane+24, Kageura+25, Napolitano+24, Bruton+23, Mason+25, Tang+23,24, Morishita+23, Lu+24, etc...)



JWSTによる成果

(e.g., Curtis-Lake+23, Hsiao+24, Umeda+24,25, Jones+24, Nakane+24, Kageura+25, Napolitano+24, Bruton+23, Mason+25, Tang+23,24, Morishita+23, Lu+24, etc...)



最遠方におけるxHI制限

一方、再電離中期では誤差大

→電離状態の非一様性が大きいから

(e.g., **Inhomogeneity**; Mesinger+08,
Ishimoto+22)

→広範囲、複数視線上の情報が必要

0 6 10 12 14
Redshift



広視野サーベイによる 空間的非一様性の考慮



すばる望遠鏡

Satoshi Kikuta

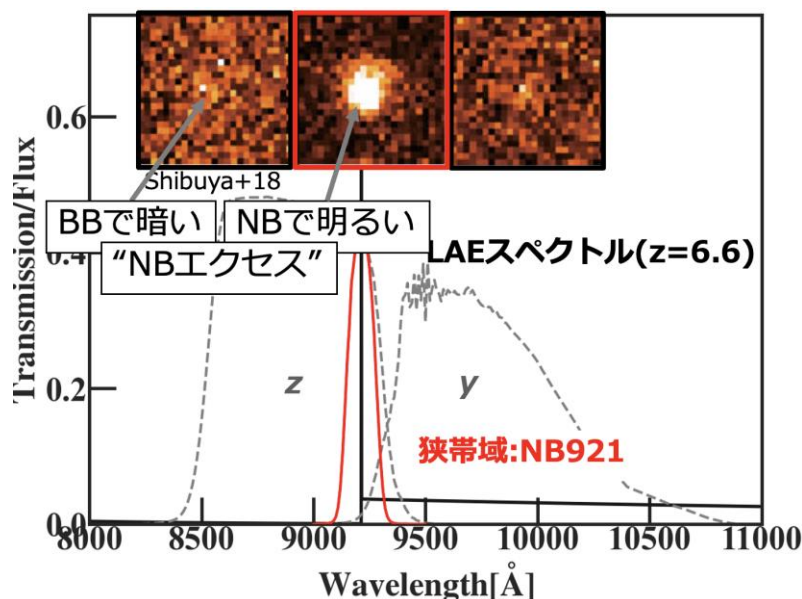
すばる望遠鏡/Hyper Suprime Cam (HSC; イメージング)

視野範囲: 1.75 平方度 ($\sim 0.1 \text{ Gpc}^2$)

HSC-Strategic Survey Program (SSP; Aihara+18) & Cosmic HydrOgen Reionization Unveiled with Subaru (Inoue+18) → **SILVERRUSH. (see S. Kikuta+23)**

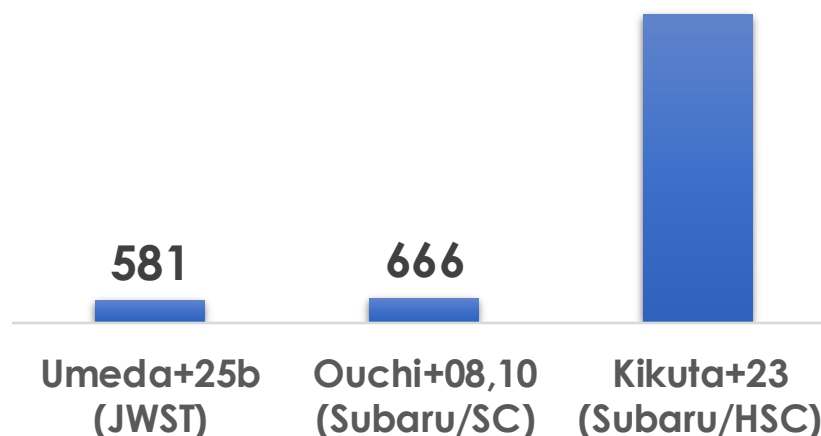
探査面積: $\sim 1 \text{ Gpc}^2$; 深さ: 26 mag,

赤方偏移: 2.2, 3.3, 4.9, 5.7, 6.6, 7.0, 7.3 (狭帯域フィルタ)



$z > 5$ 銀河サンプルサイズ

8182





広視野サーベイによる 空間的非一様性の考慮



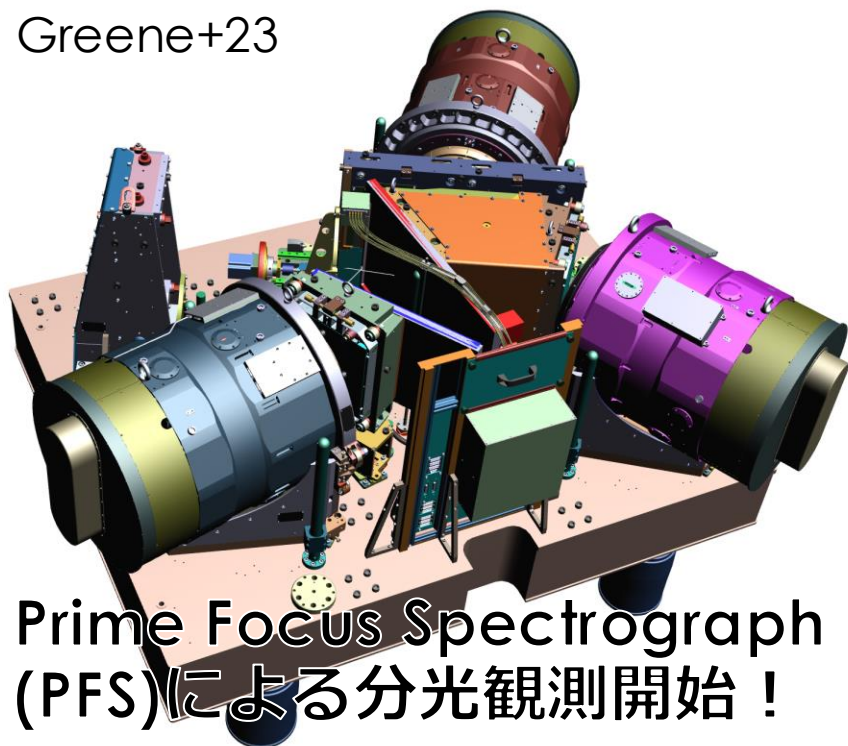
すばる望遠鏡

Satoshi Kikuta

すばる望遠鏡/Hyper Suprime Cam (HSC; イメージング)

視野範囲: 1.75 平方度 ($\sim 0.1 \text{ Gpc}^2$)

Greene+23



Prime Focus Spectrograph
(PFS)による分光観測開始！

8000 8500 9000 9500 10000 10500 11000
Wavelength[Å]

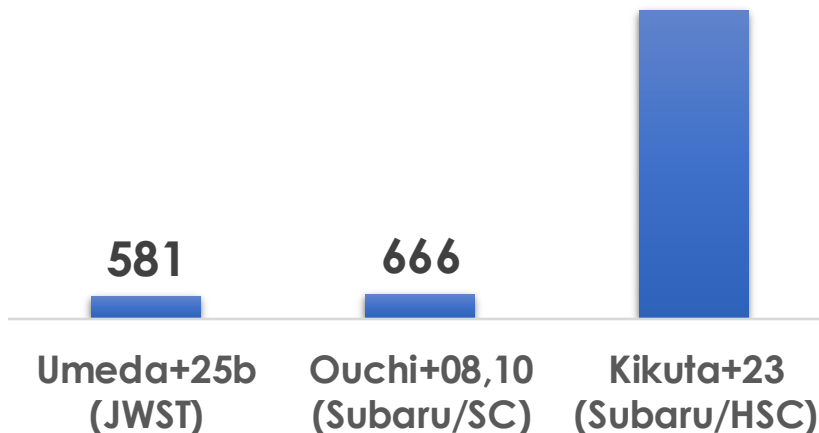
(Greene+18) & Cosmic Hydrogen Reionization
SILVERRUSH. (see S. Kikuta+23)



7.3 (狭帯域フィルタ)

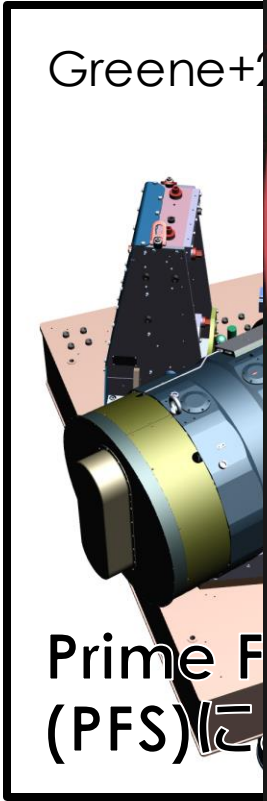
$z > 5$ 銀河サンプルサイズ

8182

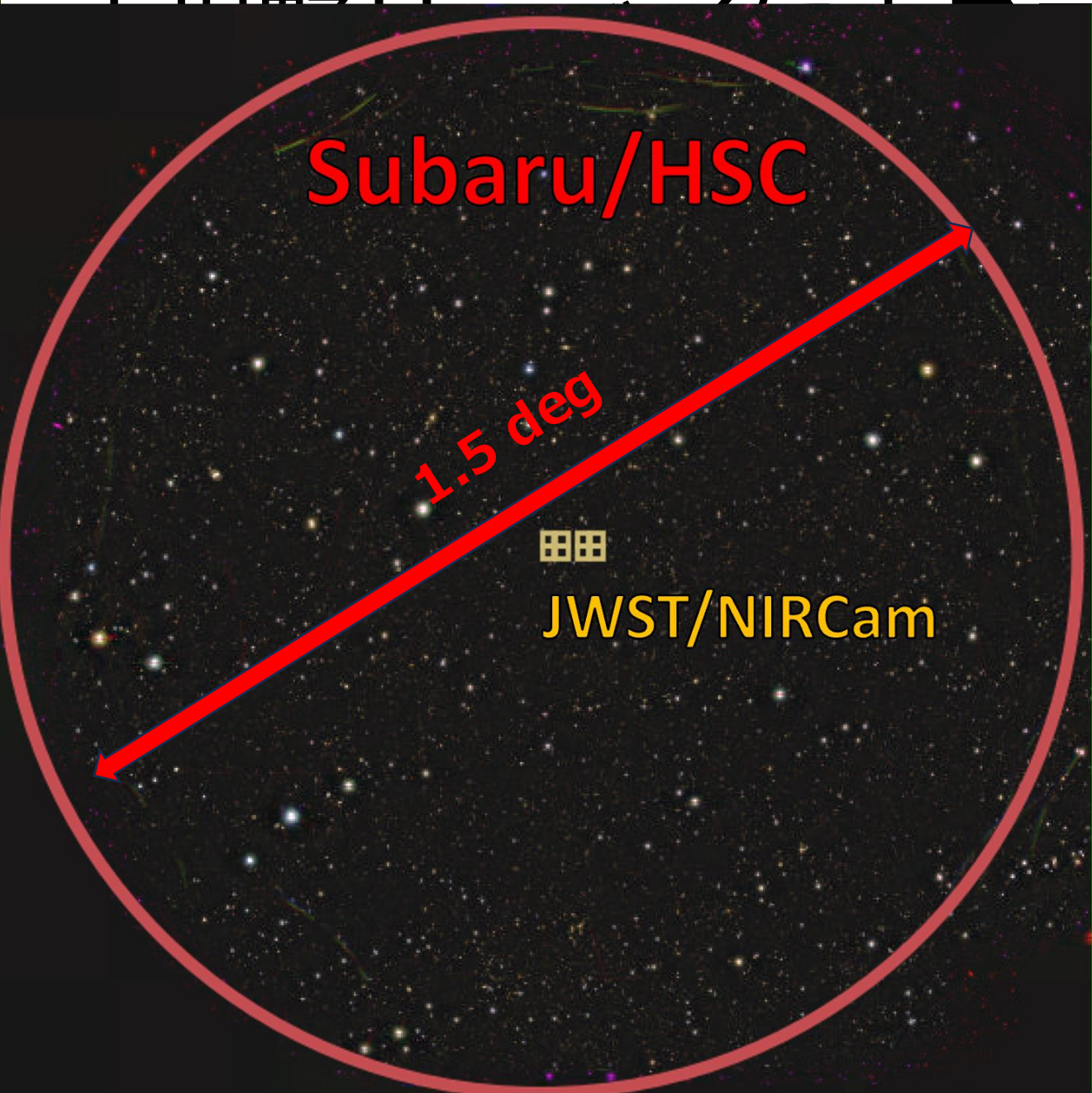




Satoshi Kikuta
すばる望遠鏡
視野範囲



8000



すばる望遠鏡

ation

VERRUSH
AEs for Visible Exploration and Reionization Research
Using Subaru HSC

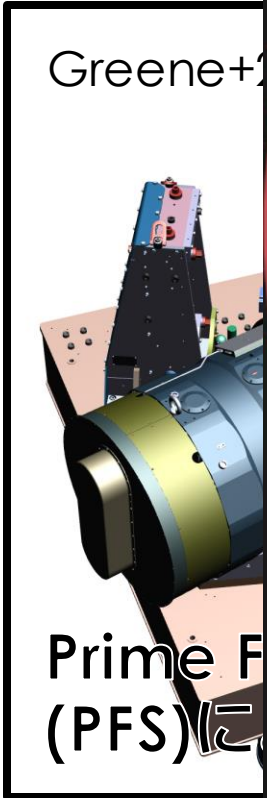
サイズ
8182



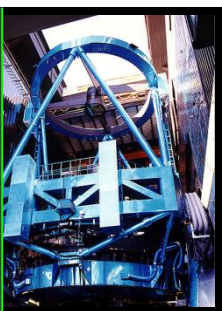
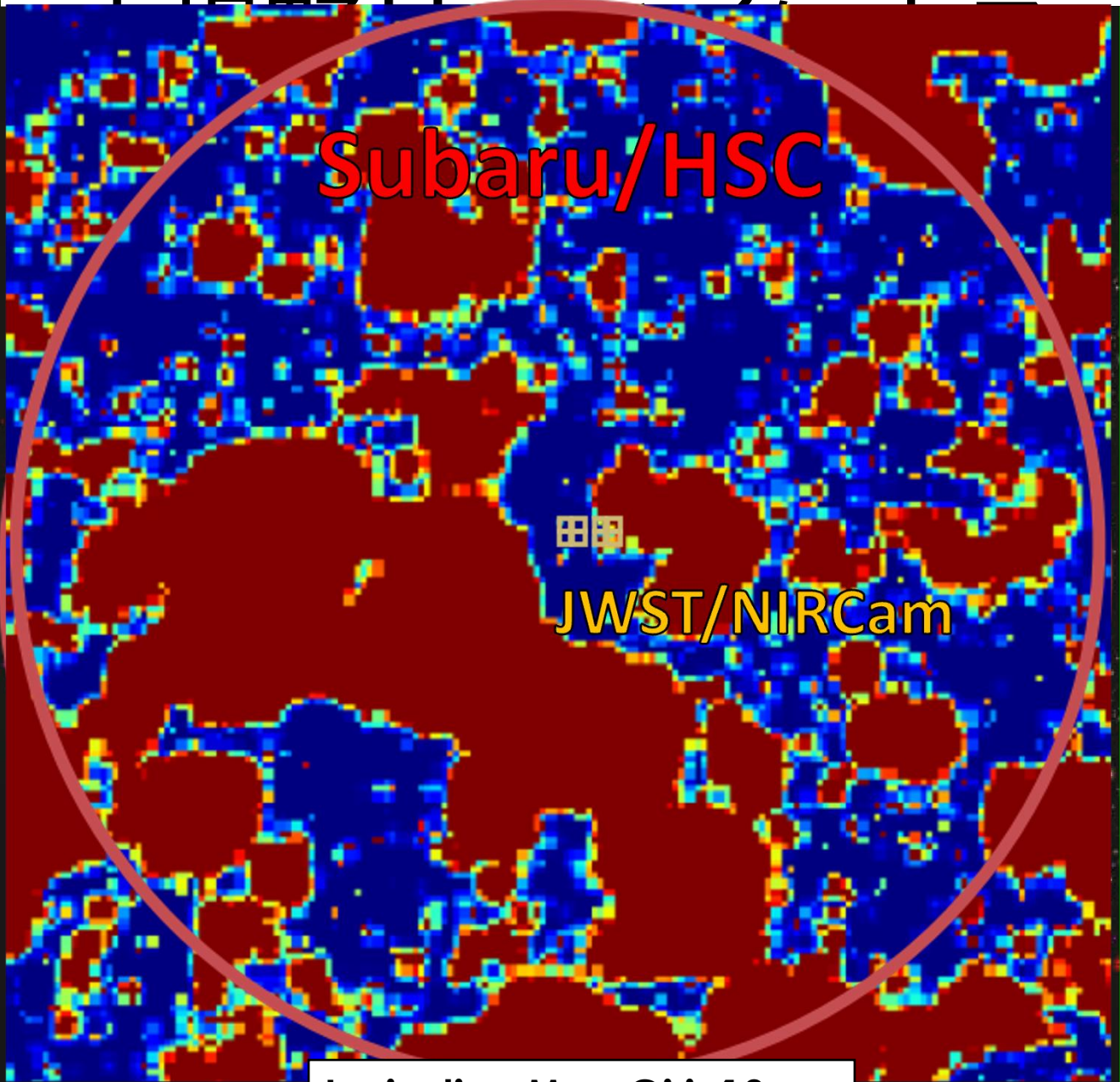
Kikuta+23
(Subaru/HSC)



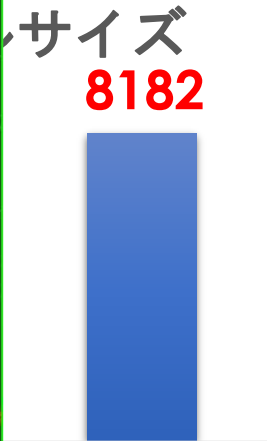
Satoshi Kikuta
すばる望遠鏡
視野範囲



8000

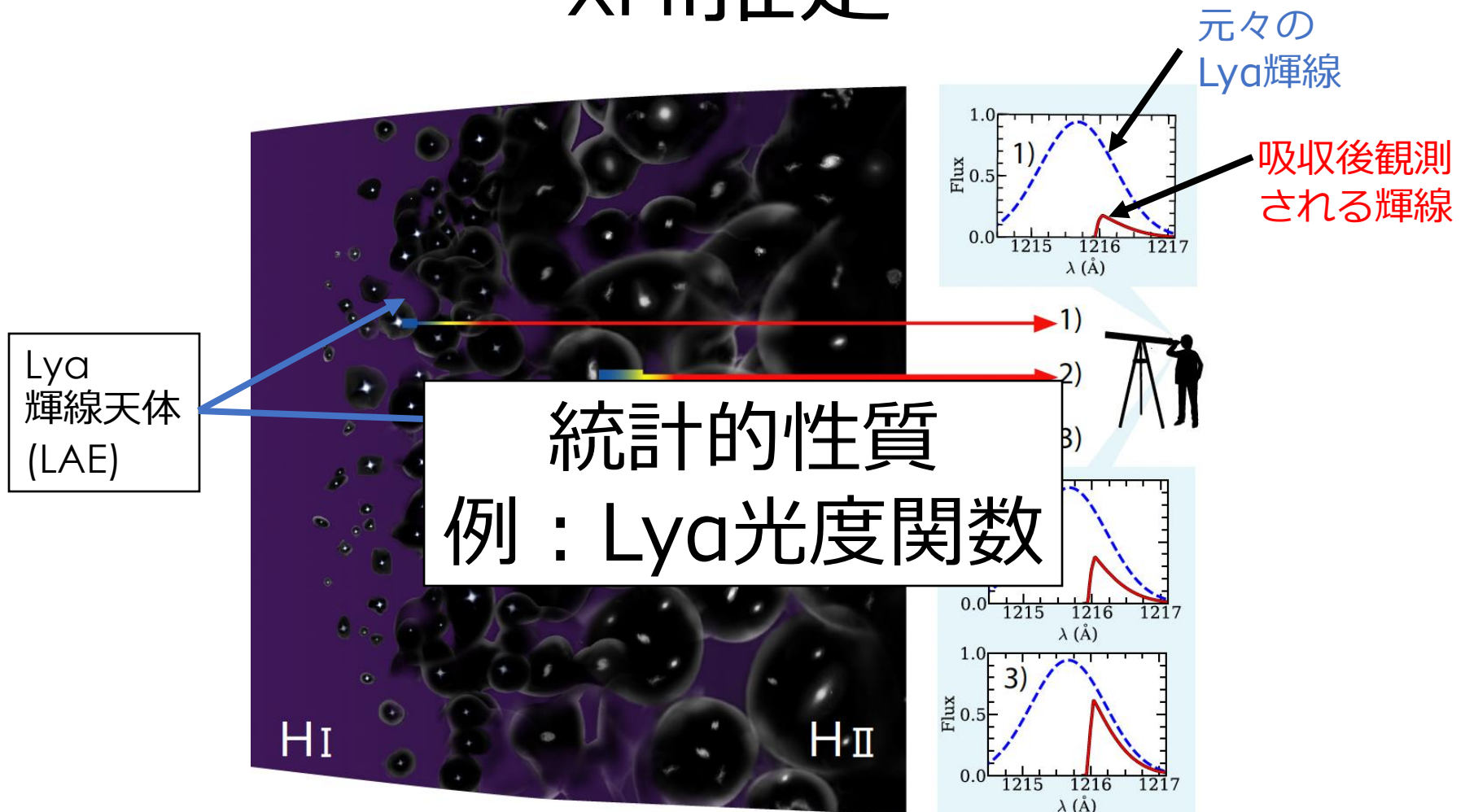


すばる望遠鏡
ation
VERRUSH
AEs for Visible Exploration and Reionization Research
Using Subaru HSC

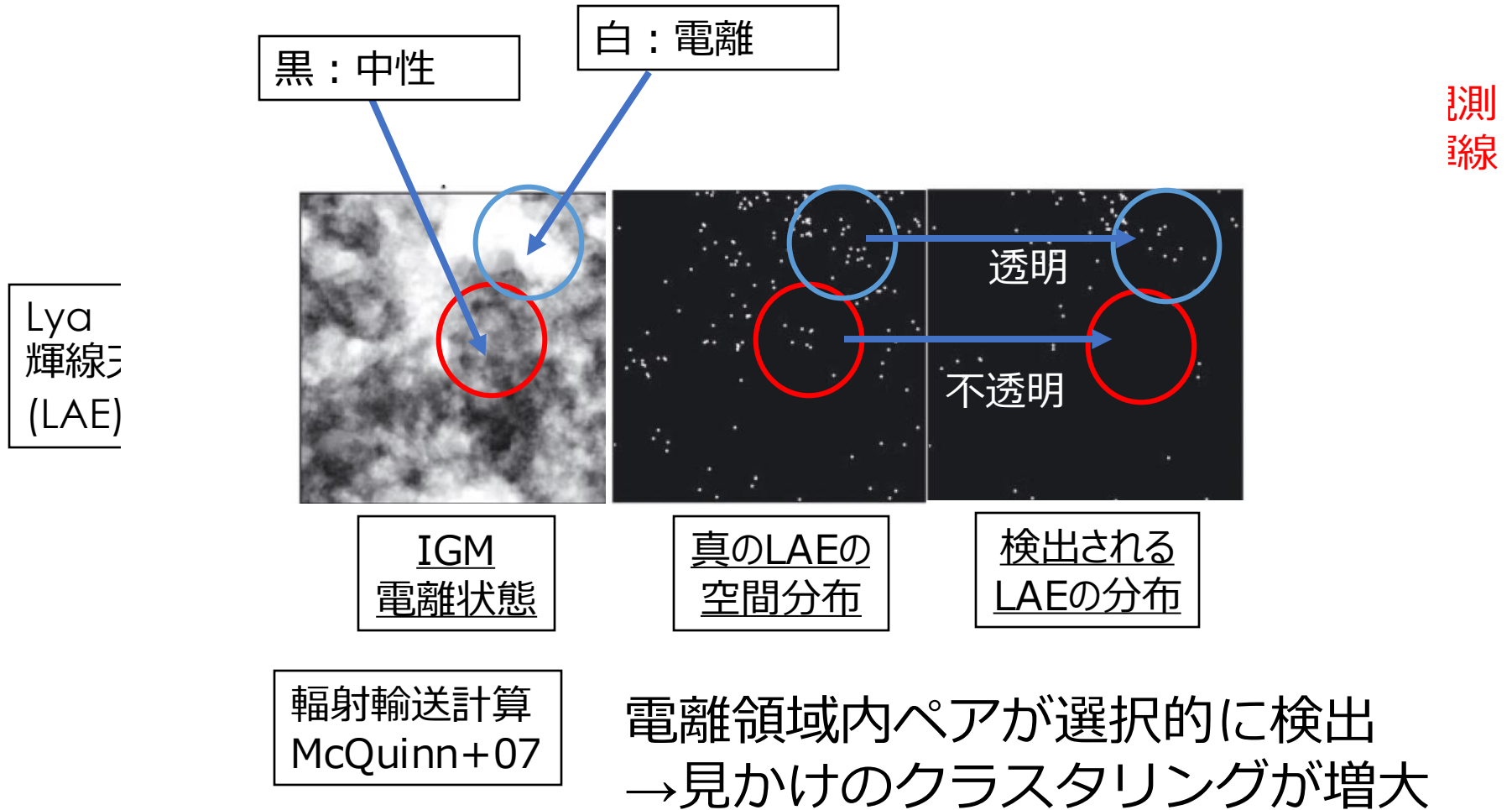


Kikuta+23
(Subaru/HSC)

非一様性を考慮した xHI推定

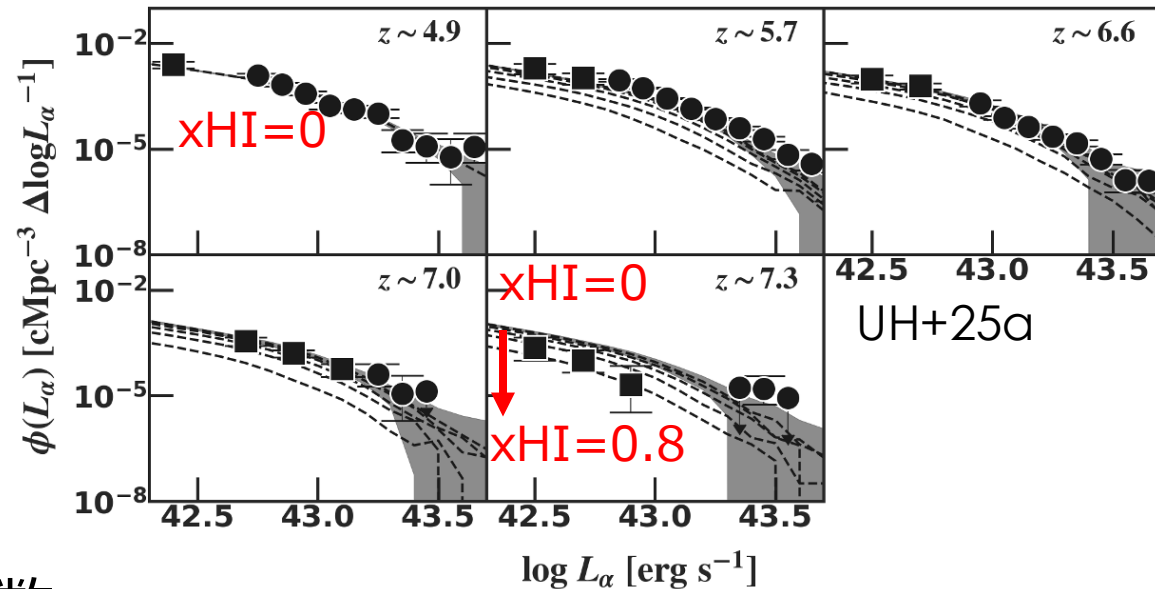


非一様性を考慮した 空間分布

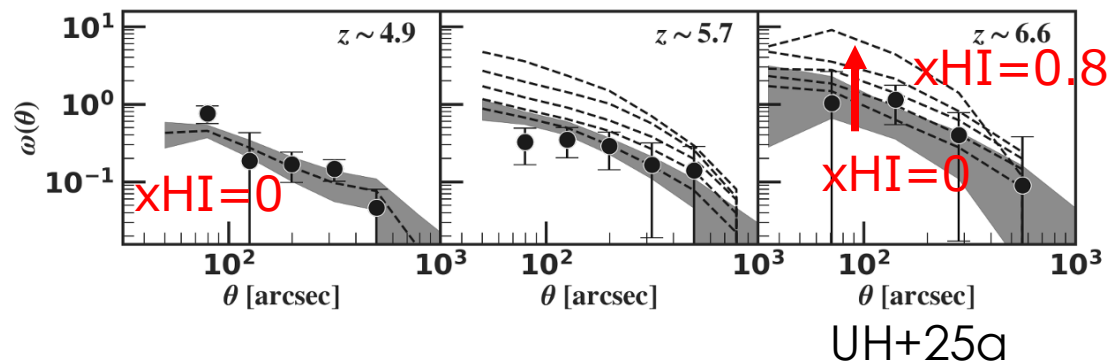


LAEの統計的性質 からxHI推定

Lya光度関数 (e.g., Ouchi+08,10,Konno+14,16,Taylor+21,Ning+21,22,Goto+21,Hu+10,...)

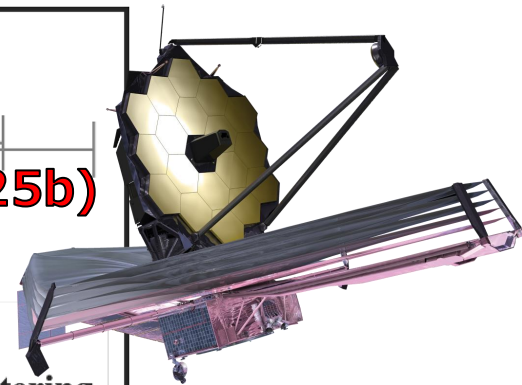
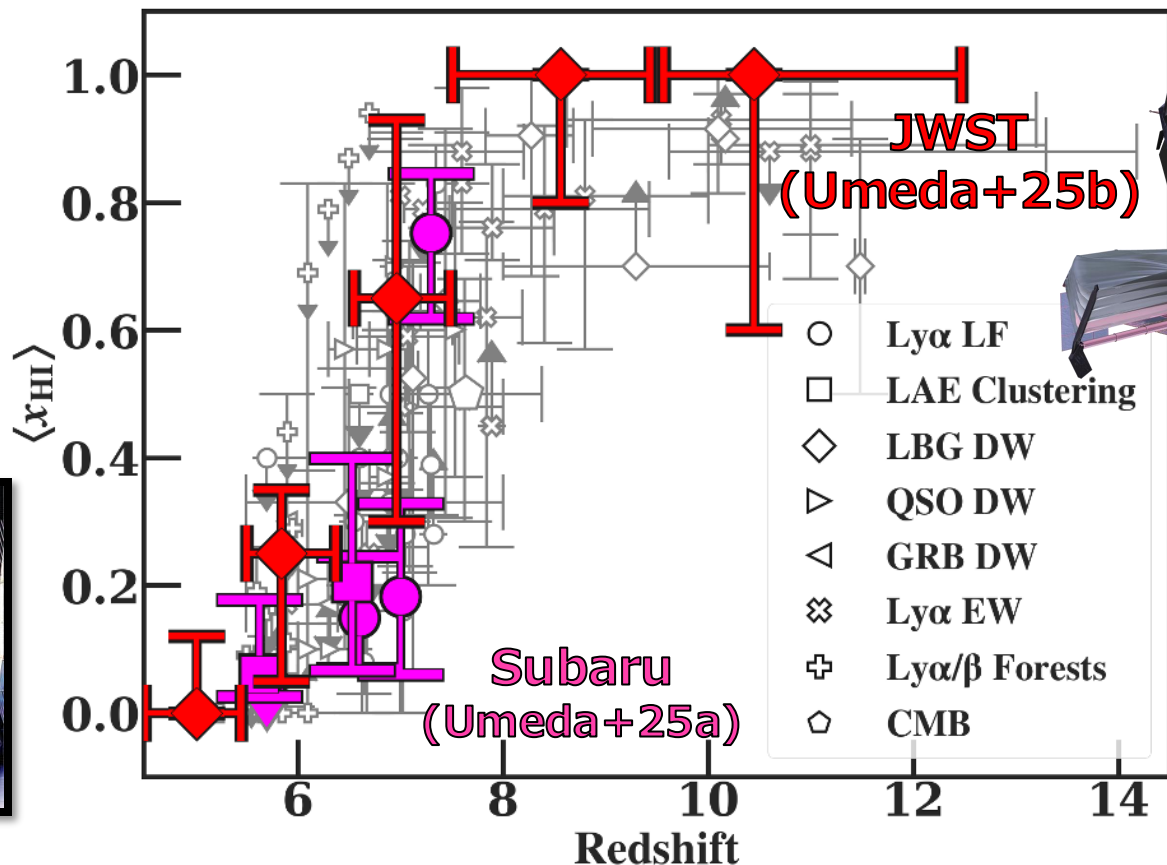


2点相関関数 (e.g., McQuinn+07,Sobacchi&Mesinger+15,Ouchi+10,18,Umeda+25)



相補的観測により描かれる 再電離史の概観

深宇宙探査(JWST) & 広視野探査(Subaru)を組み合わせ
宇宙再電離史の概観を得る



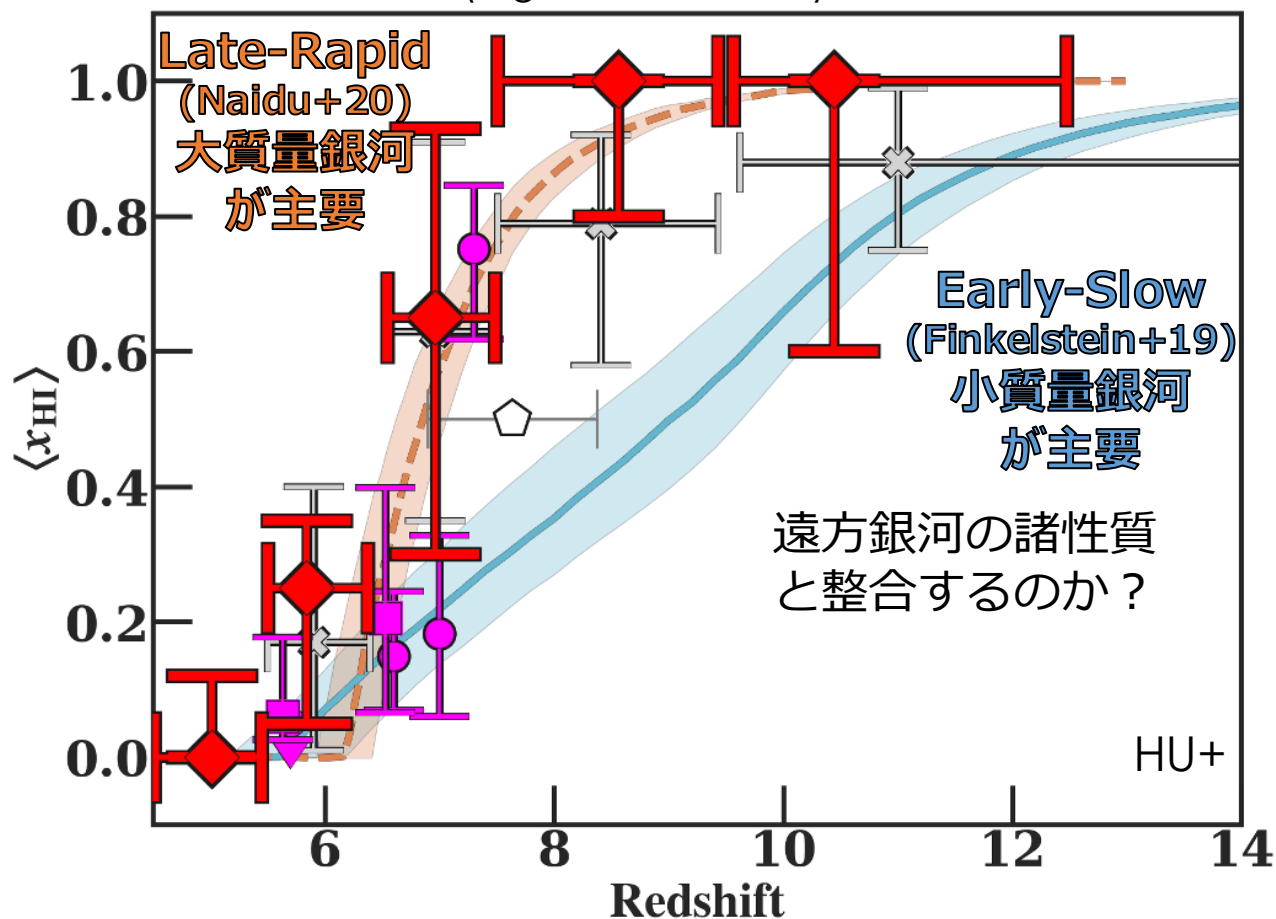
HU+25b

遅く、急速な再電離史？

$z \sim 7$ で急速に再電離が進行？

数の多い小質量銀河による再電離の描像と合わない？

(e.g., Robertson+13)



宇宙再電離を決定づける 物理量

宇宙再電離史は電離光子の数で(概ね)決まる

$$\overset{\text{再電離史}}{\frac{d\langle x_{\text{HI}} \rangle}{dt}} = \overset{\text{再結合}}{\frac{1 - x_{\text{HI}}}{t_{\text{rec}}}} - \overset{\text{電離}}{\frac{\dot{n}_{\text{ion}}}{\langle n_{\text{H}} \rangle}}$$

One-zone model
cf. Madau+99

t_{rec} : 再結合のタイムスケール

$$\dot{n}_{\text{ion}} = \rho_{\text{UV}} \times \xi_{\text{ion}} \times f_{\text{esc}}$$

ρ_{UV} : UV光度密度(光度関数)~電離源の個数

ξ_{ion} : 電離光子生成効率

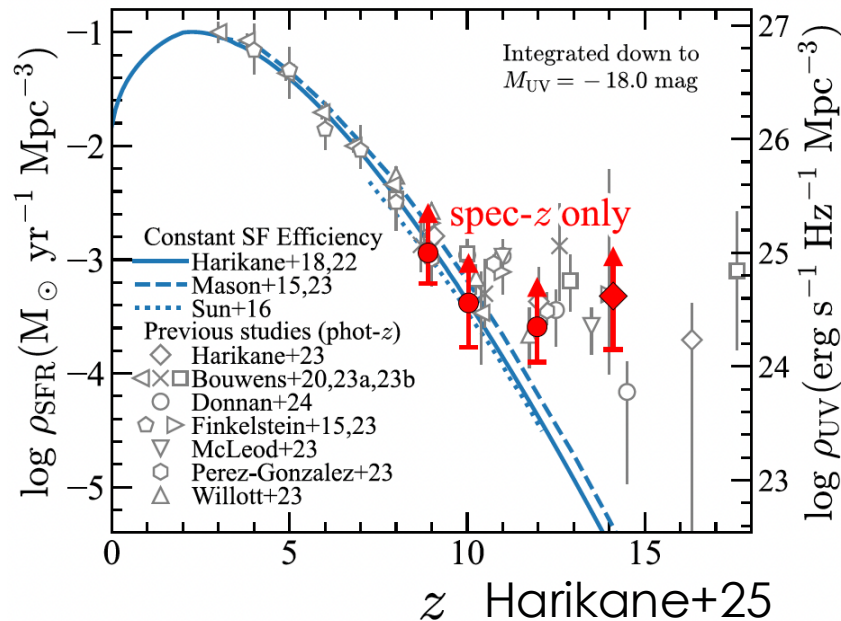
f_{esc} : 電離光子脱出率 (IGMスケールへの)

電離光子の生成量

ρ_{UV} : UV光度関数

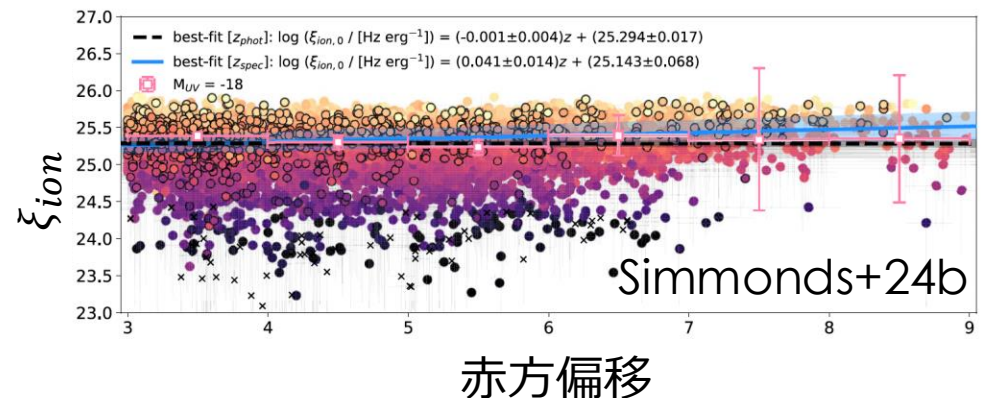
(e.g., Harikane+23,25, Donnan+24,
Bouwens+23,etc...)

明るい銀河は増えるが、
再電離が早く始まりそう



ξ_{ion} : HI再結合線の強さから推定

(e.g., Simmonds+24a,b, Papovich+25,
etc...)



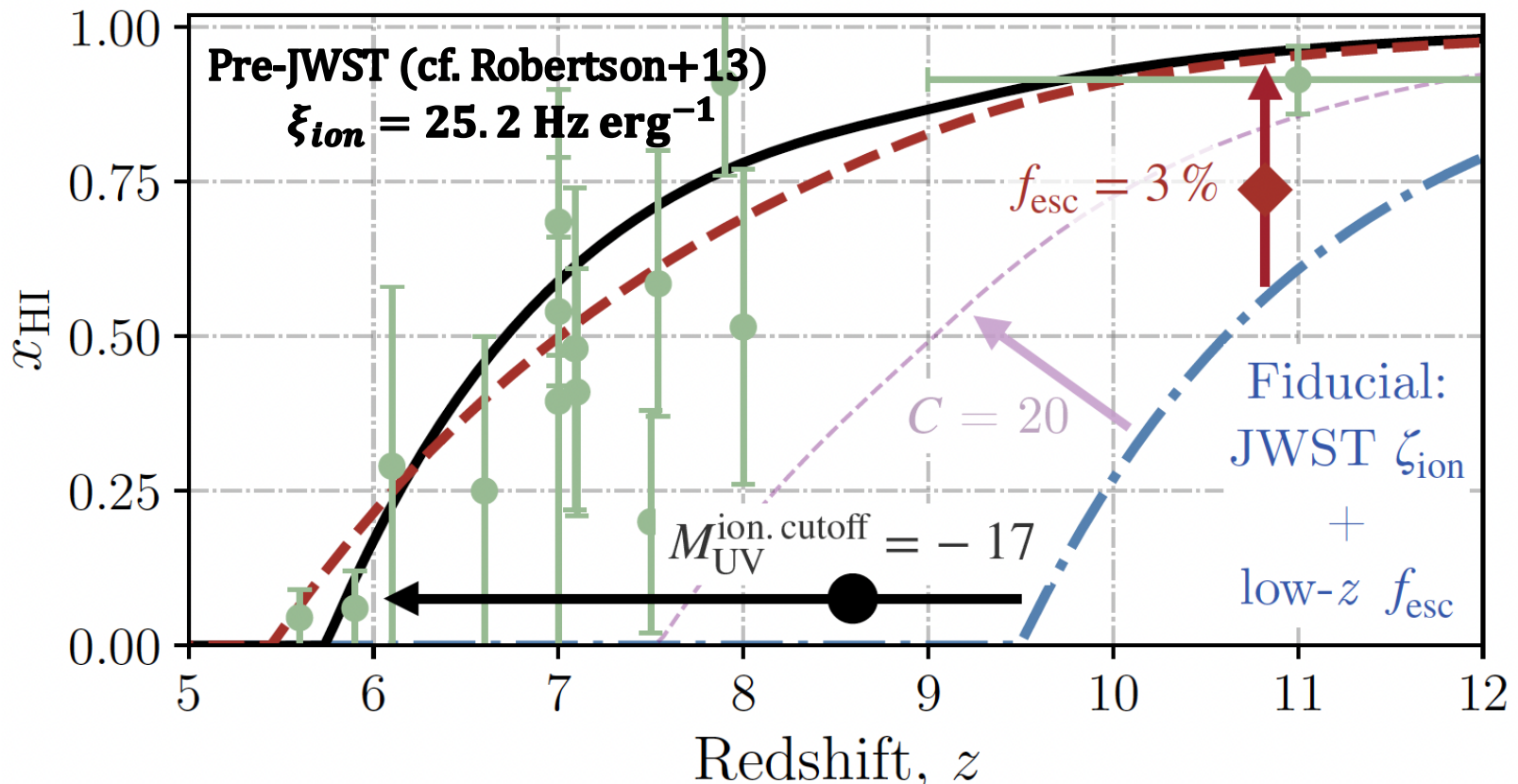
→ ξ_{ion} : 進化はない
(小質量銀河による
再電離と無矛盾)

～念の為～ 電離光子過多問題？

$$\xi_{ion} = 25.8 \text{ Hz erg}^{-1} @ z > 6? \text{ (Simmonds+24a)}$$

Planckの T_e より大きくなる？

→ 強輝線銀河に偏ったサンプルで求めた値だった

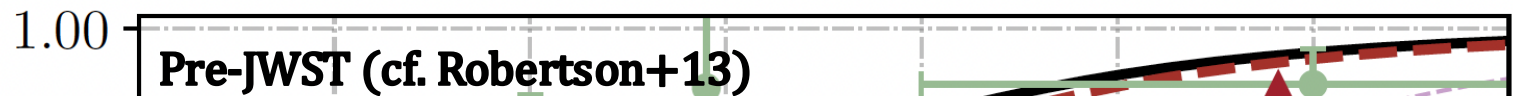


～念の為～ 電離光子過多問題？

$$\xi_{ion} = 25.8 \text{ Hz erg}^{-1} @ z > 6? \text{ (Simmonds+24a)}$$

Planckの T_e より大きくなる？

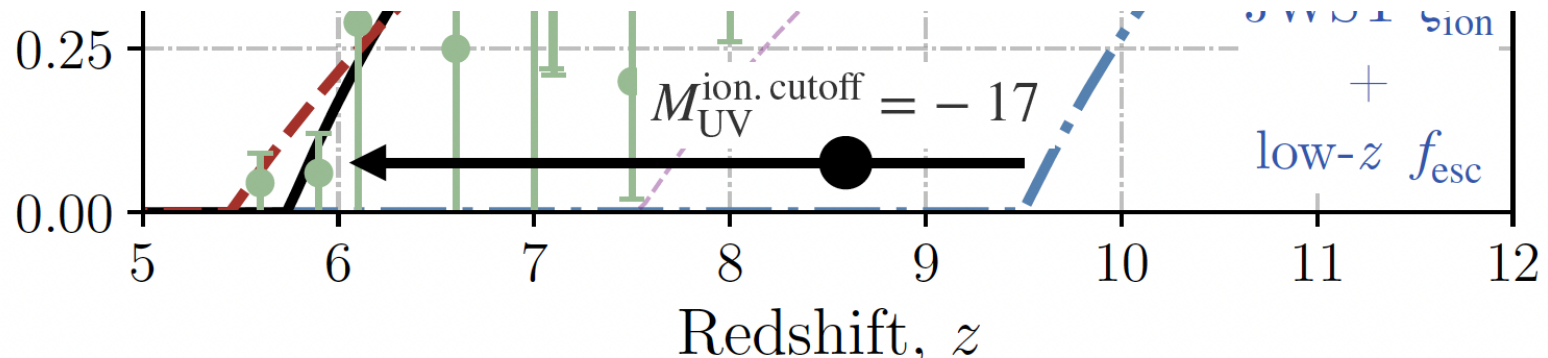
→ 強輝線銀河に偏ったサンプルで求めた値だった



Ionising properties of galaxies in JADES for a stellar mass complete sample: resolving the cosmic ionising photon budget crisis at the Epoch of Reionisation

$$\rightarrow \xi_{ion} = 25.3 \text{ Hz erg}^{-1}$$

C. Simmonds, S. Tacchella, K. Hainline, B.D. Johnson, D. Puskás, B. Robertson, W.M. Baker, R. Bhatawdekar, K. Boyett, A.J. Bunker, P.A. Cargile, S. Carniani, J. Chevallard, M. Curti, E. Curtis-Lake, Z. Ji, G.C. Jones, N. Kumari, I. Laseter, R. Maiolino, M.V. Maseda, P. Rinaldi, A. Stoffers, H. Übler, N.C. Villanueva, C.C. Williams, C. Willot, J. Witstok, Y. Zhu



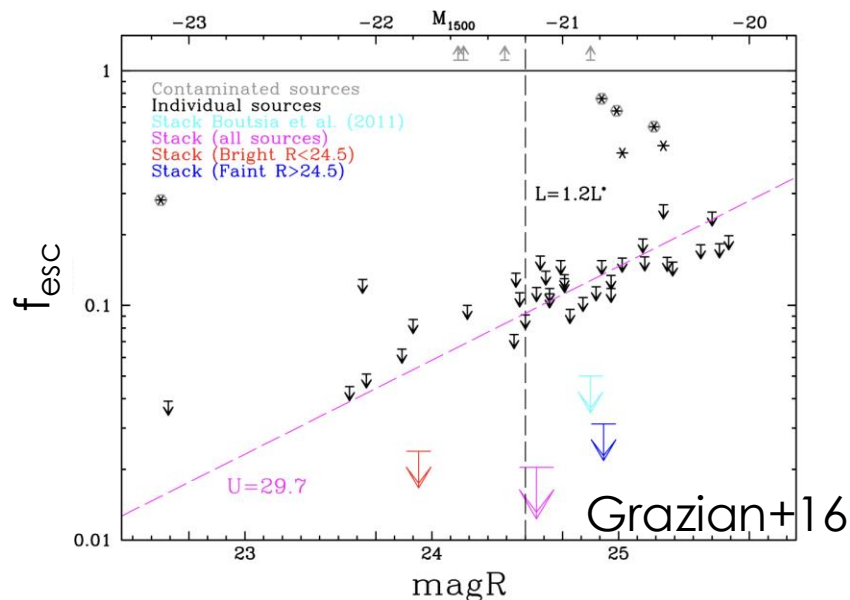
電離光子脱出率？

電離光子脱出率 f_{esc} ：Lyman連続光の測定：不可能@EoR
(ある意味再電離研究の最難関?)

*ただし、星雲連続光の強度(→UV傾き β)などから推測可

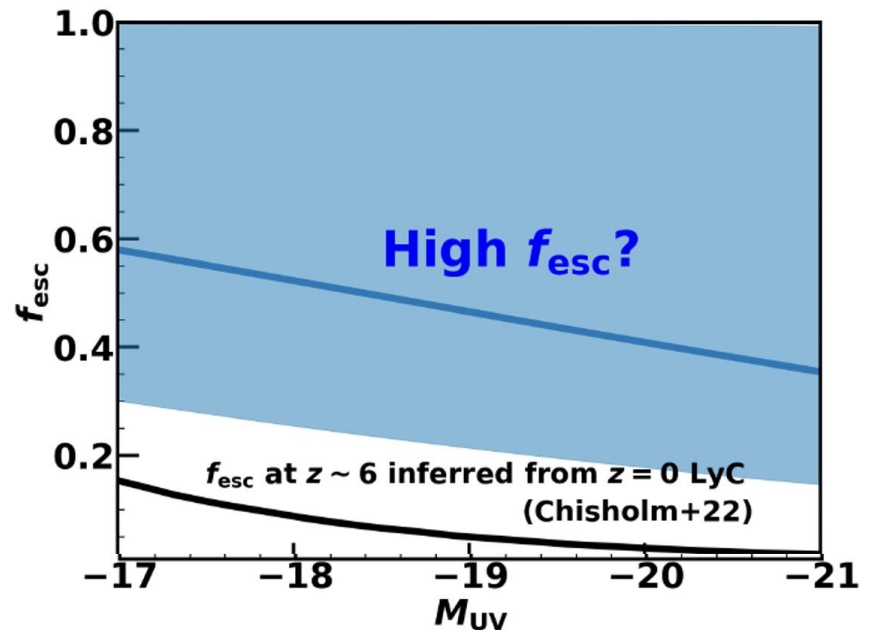
(c.f., Saxena+25, Jaskot+24, Yanagisawa+25, Papovich+25, Giovanazzo+25, Shimizu+25)

近傍銀河では $f_{esc} \ll 0.1$



See also Chisholm+22, etc..

$z \sim 7$ での加速的な電離史再現
→観測より高い f_{esc} 必要 (**Tension?**)



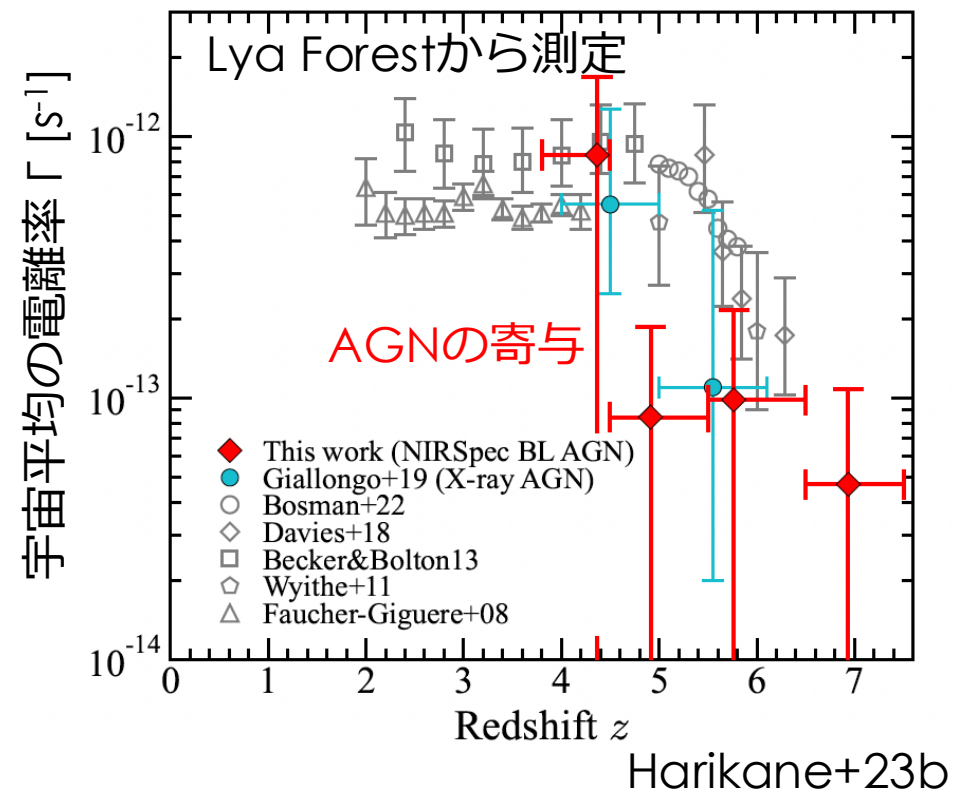
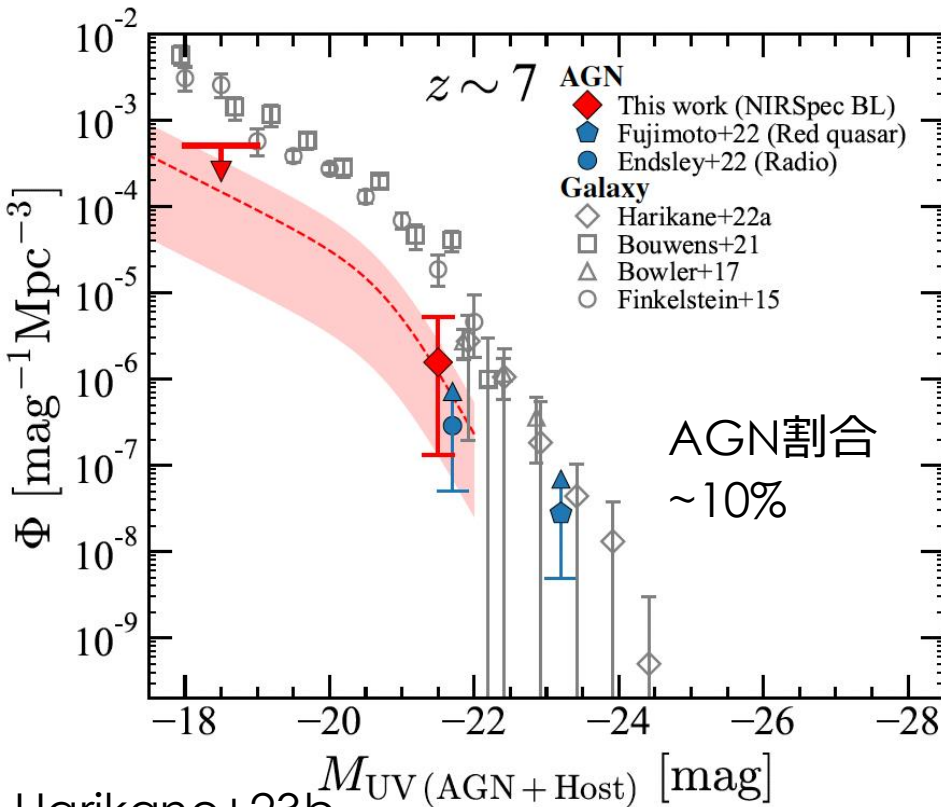
AGNの寄与

QSO-leadな再電離は個数密度が少なすぎるので棄却(e.g., Jiang+22)

でも暗いAGNが多数検出 (e.g., Harikane+23b, Maiolino+24, etc..)

→ $f_{\text{esc}} \sim 100\%$ でも主要な電離光子源とは考えづらい

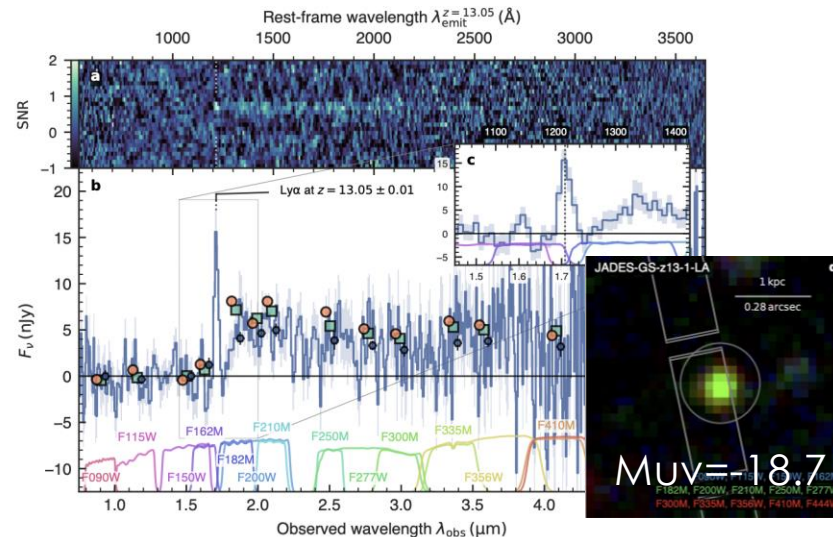
(see also Asthana+24, Madau+24)



最遠方における 巨大な電離泡の存在示唆

$z=13$ で非常に強いLy α Emission検出 (Witstok+25)
→電離泡が早くから形成 (Late & Rapidとはtensionか?)

Ly α 等価幅 $>40 \text{ \AA}$



See also Qing+25

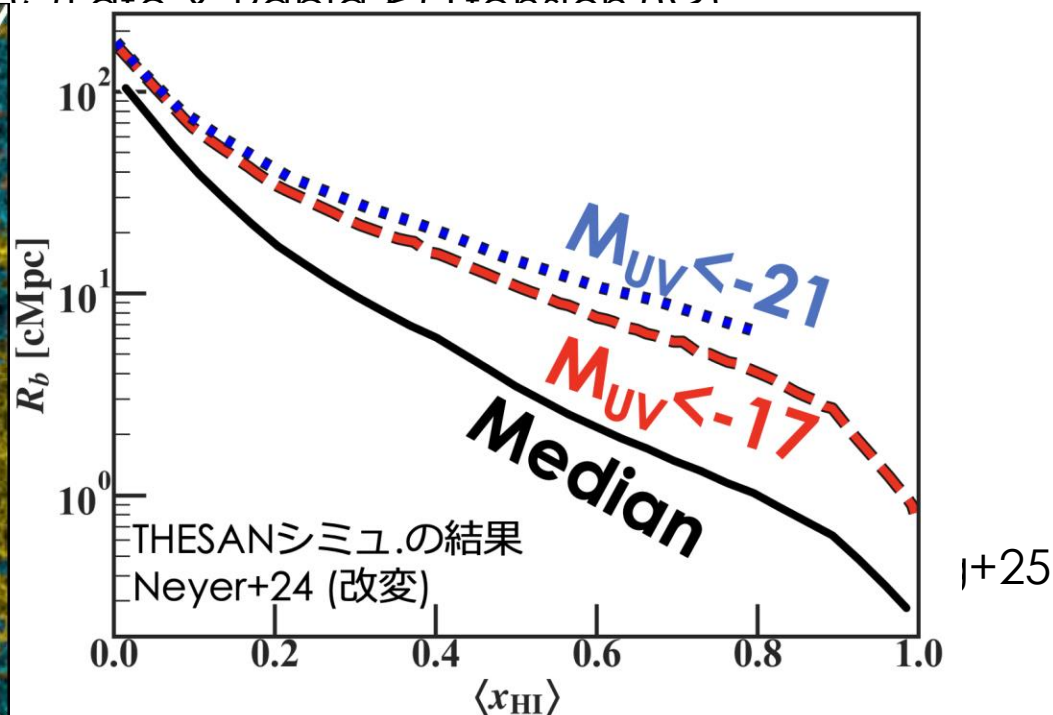
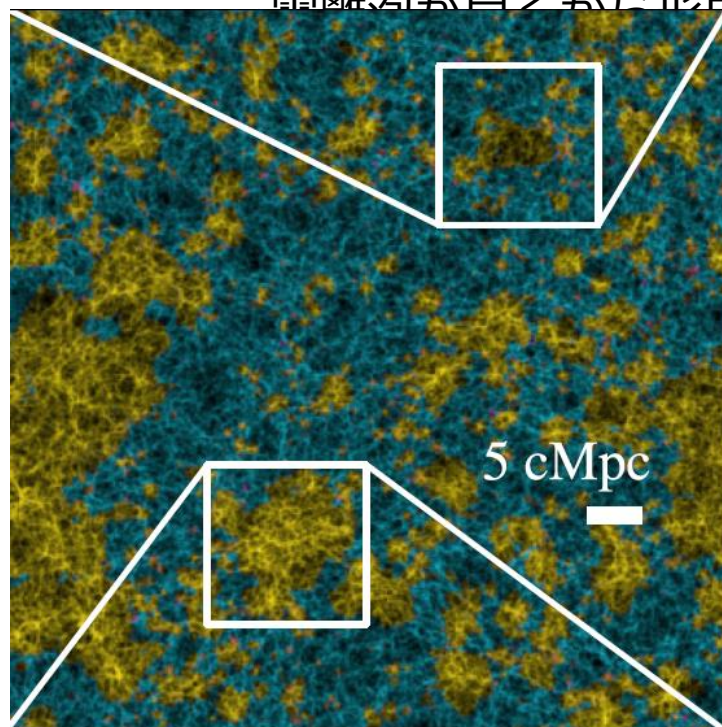
単純な観測値だけでは複雑性は考慮できない



今後：xHI(z)測定 of 精緻化&複合的に見る必要あり？
(銀河の性質依存、環境依存、など)

最遠方における 巨大な電離泡の存在示唆

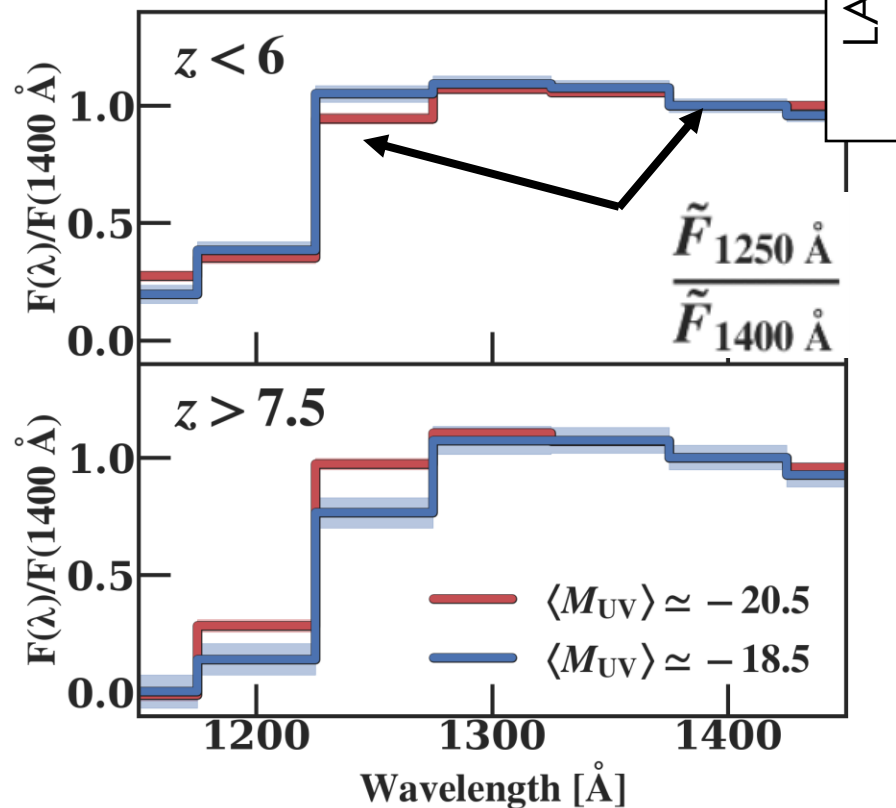
$z=13$ で非常に強いLy α Emission検出 (Witstok+25)
電離泡が早くから形成 (Fletcher & David 2014, 2015, 2016)



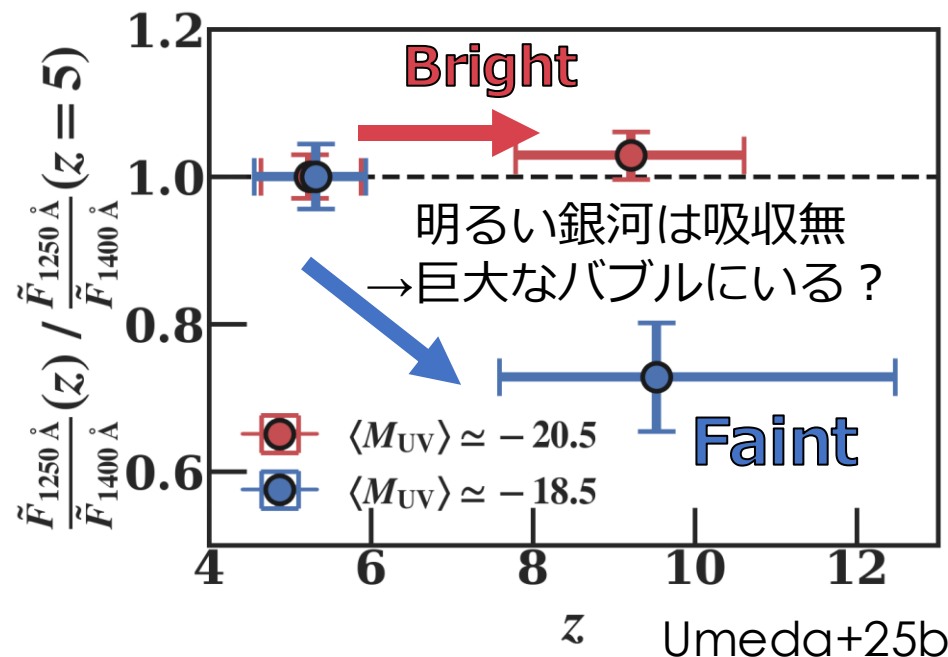
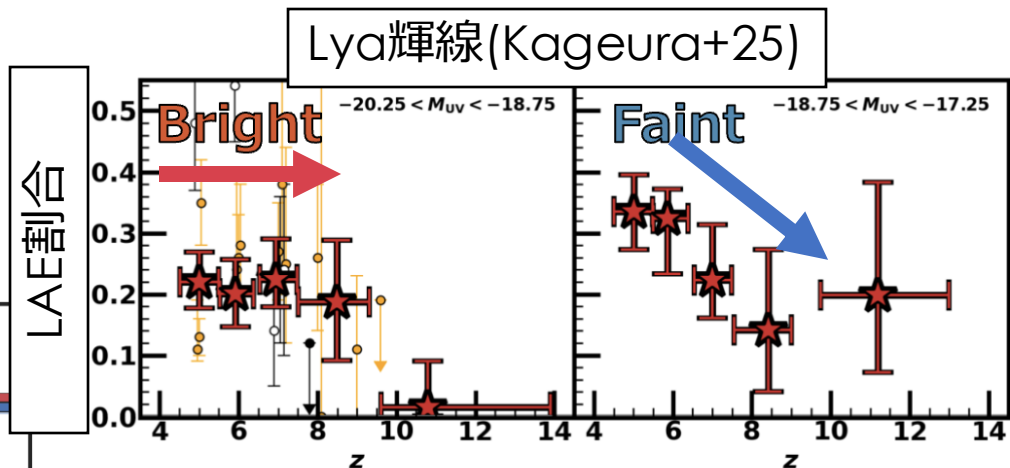
今後： $x_{HI}(z)$ 測定 of 精緻化&複合的に見る必要あり？
(銀河の性質依存、環境依存、など)

電離源と電離構造を直接見る

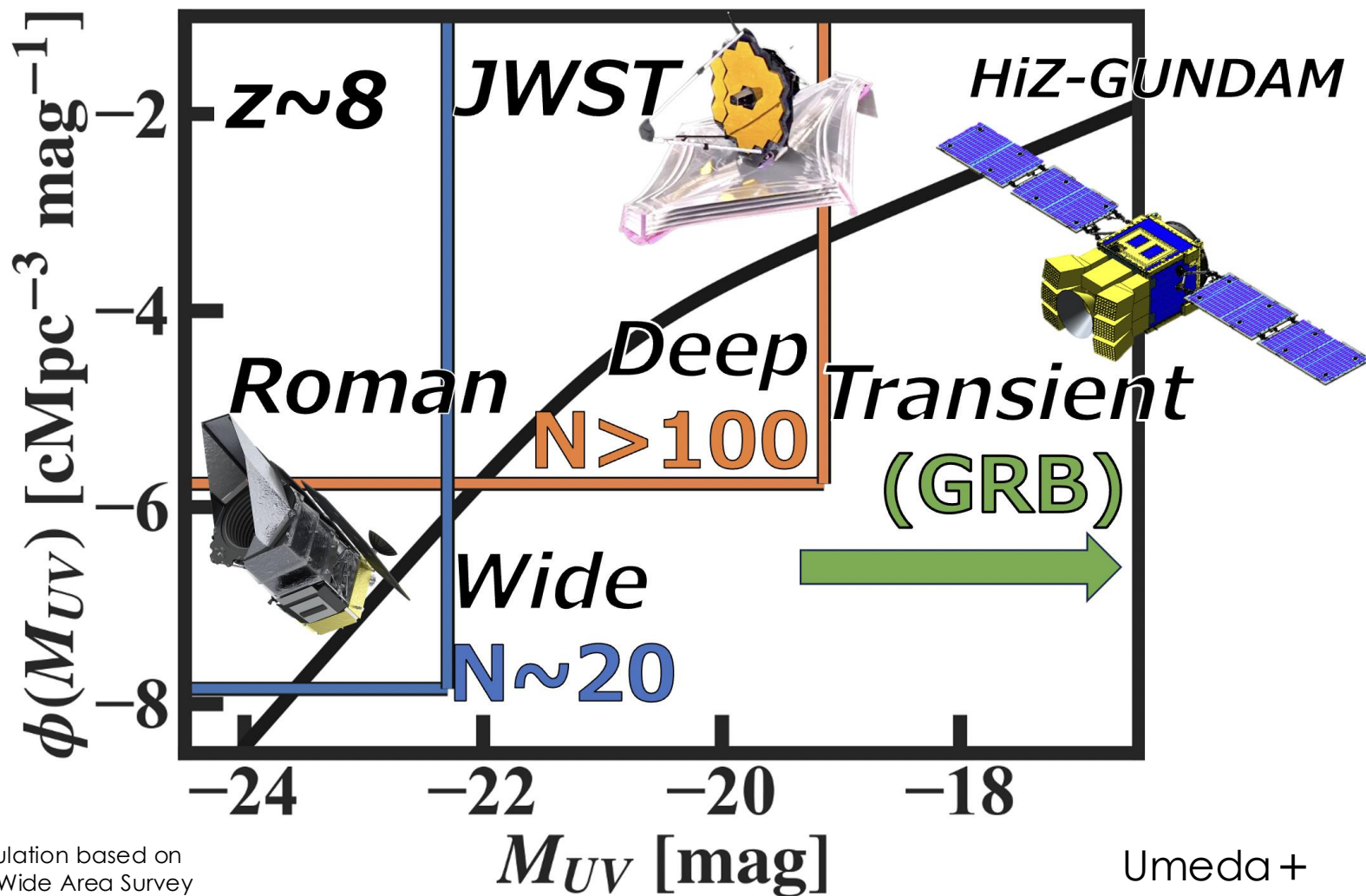
銀河近傍の電離状態
→電離源の性質と物理的に関連



Umeda+25b



Roman & JWST & GRB を用いた制限



*Roman: calculation based on
High-Latitude Wide Area Survey

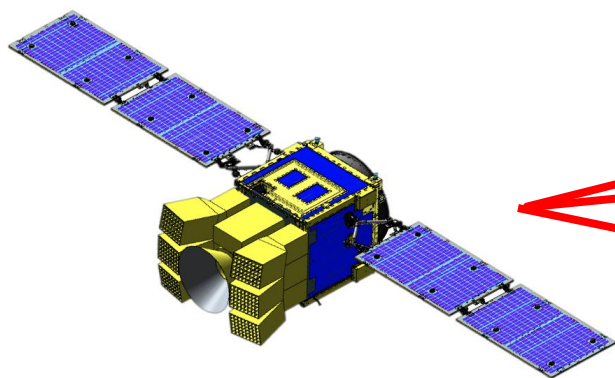
Umeda +

HiZ GUNDAM

GRB検出後、赤外線(e.g., NINJA)で追分光 (米徳さん+のトーク)
→明るい残光($f_{UV} \sim 1e-17 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$)を検出

HiZ-GUNDAM

(高赤方偏移GRBを発見)



世界の大型望遠鏡で追観測



すばる



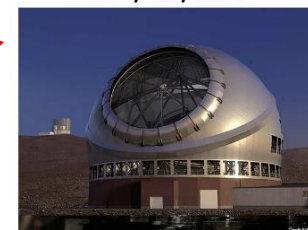
(NAOJ)

ジェイムズ・ウェッブ



(NASA)

TMT/ELT/GMT



(NAOJ)

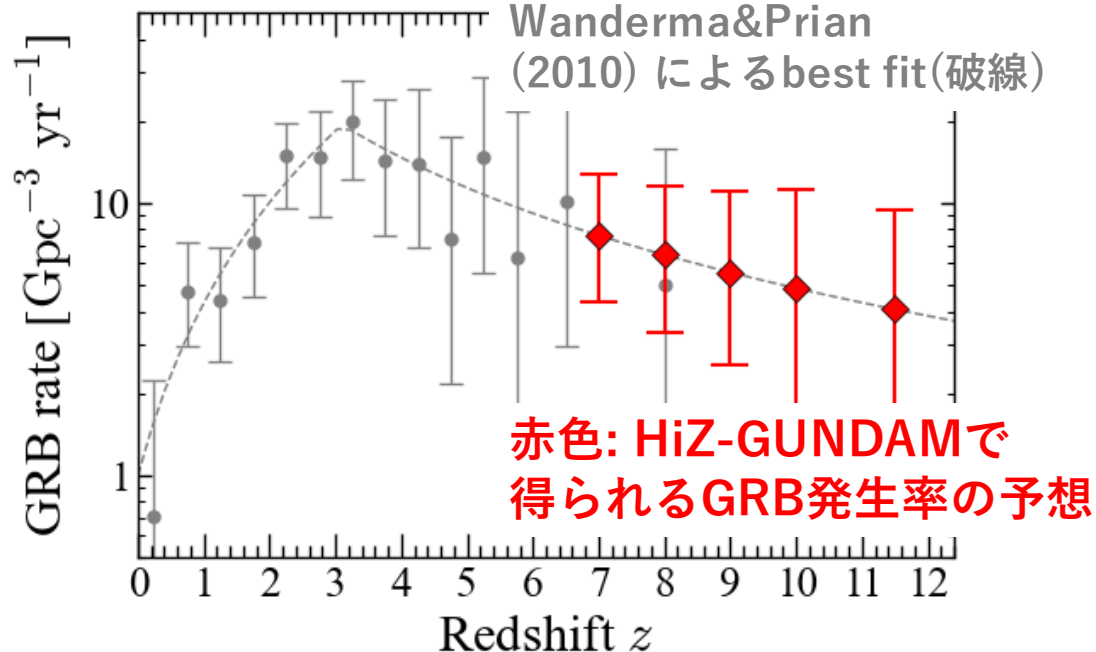


NINJA (観測波長: 0.8-2.5 μm)

暗い&遠方 パラメータスペースへの挑戦

遠方低光度銀河の連続光の直接観測は難
→増光現象(e.g., GRB残光)を利用

各赤方偏移の GRB発生率



GRB検出個数
 $10^{-18} \text{ erg/cm}^2/\text{s}$

	Event #/yr/str
$z > 5$	22
$z > 7$	6
$z > 9$	2
$z > 12$	0.3

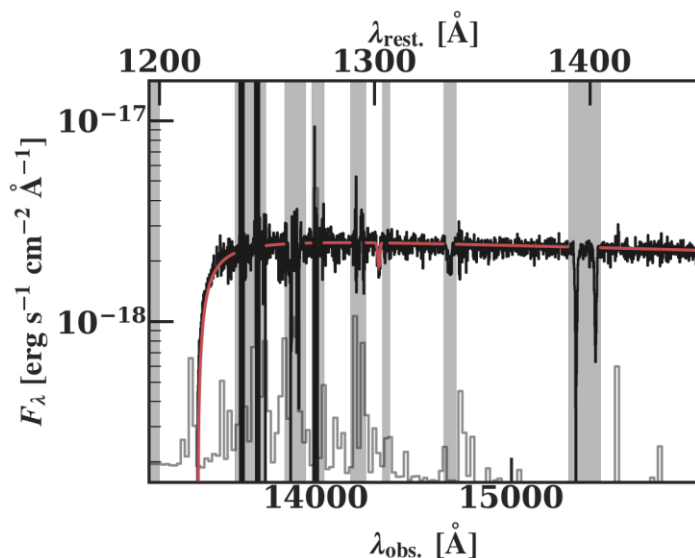
*今度さんポスター引用

1ヶ月に一発ペースで
 $z > 6$ GRB検出(米徳さんTalk)

HiZ GUNDAM 観測成果 (予想)

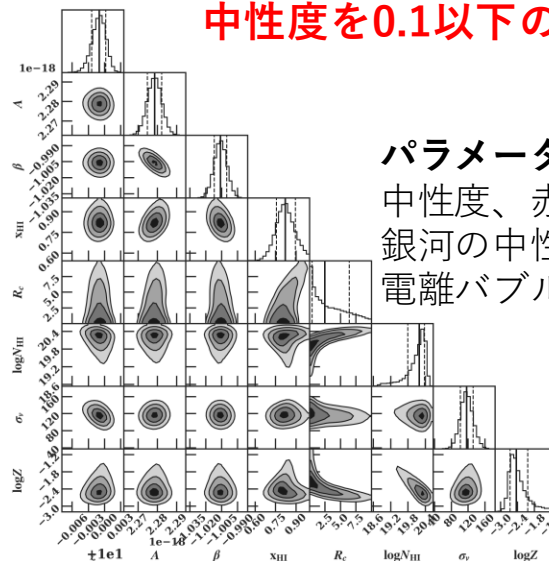
小質量銀河周辺の電離環境を調べる上で、
非常にプロミッシング！

z=10 GRBをすばる望遠鏡NINJAで
2時間観測した際の予想
($R \sim 3300$)



感度データはすばる/NINJAチーム提供

明るく単純なスペクトル形状のおかげで
多くのパラメータと中性度の縮退を解き、
中性度を0.1以下の精度で決定可能



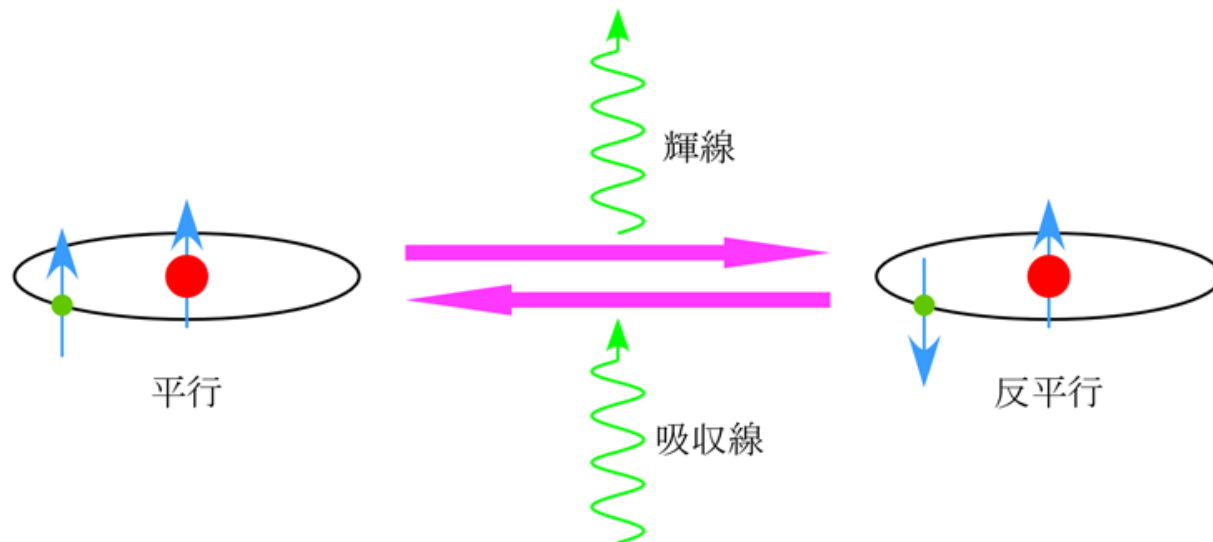
パラメータ:

中性度、赤方偏移、
銀河の中性ガス、金属量、
電離バブルサイズ、...

×10以上！

中性水素ガスの直接観測

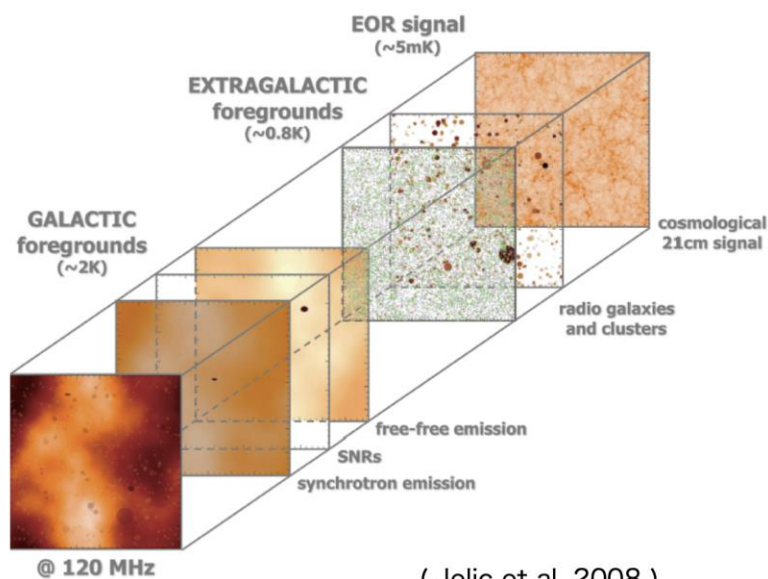
HI 21cm線：超微細構造線 (スピン反転)
微弱な電波だが、IGMスケールのHI分布
を信号をトレースするのに適している



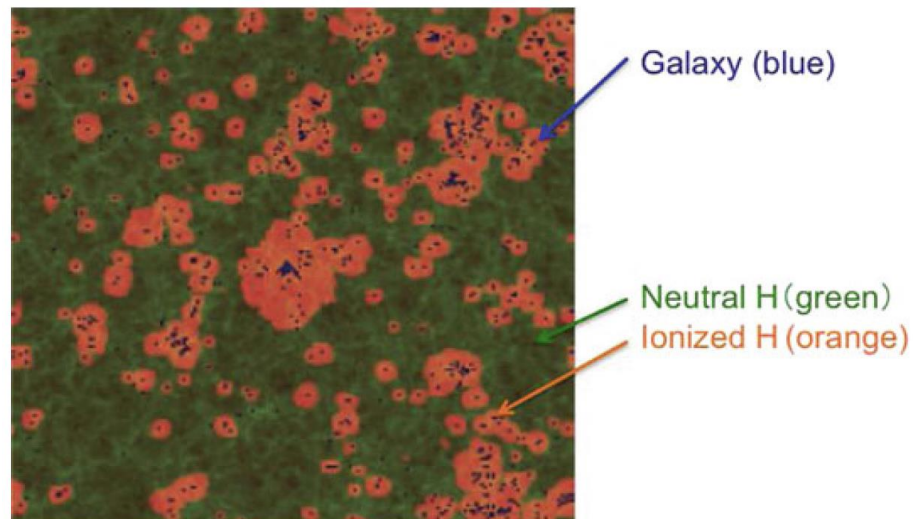
21cm線信号検出に向けて

- 21 cm線:前景放射が非常に強い (e.g., Synchrotron放射)
- EoR銀河と相互相関をとり、EoR信号を抽出
(e.g., Sobacchi+16, Kubota+18; Trott+21)
 - “無相関”な前景放射を除去

電離源(銀河)分布とHI分布は関連



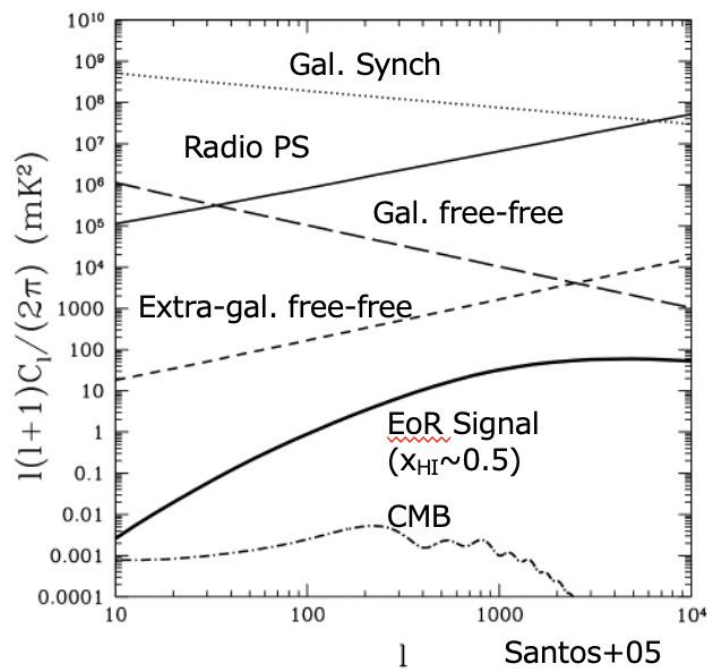
(Jelic et al. 2008)



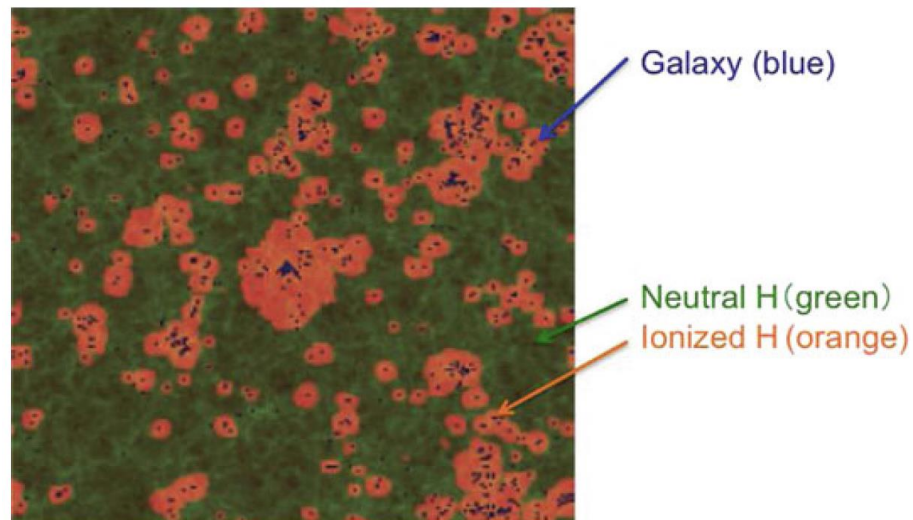
Iliev+06

21cm線信号検出に向けて

- 21 cm線:前景放射が非常に強い (e.g., Synchrotron放射)
- EoR銀河と相互相関をとり、EoR信号を抽出
(e.g., Sobacchi+16, Kubota+18; Trott+21)
 - “無相関”な前景放射を除去



電離源(銀河)分布とHI分布は関連

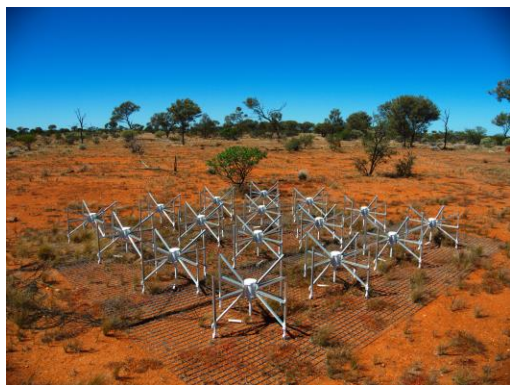


Iliev+06

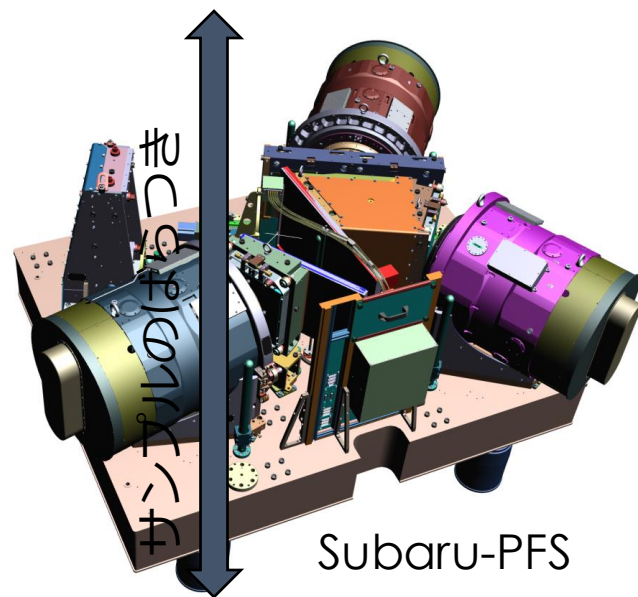
銀河-21cm線の空間相互相関

電波干渉計で
広視野21cm線観測

Murchison Widefield Array (MWA) Square Kilometers Array (SKA)



可視・近赤外多天体分光観測で
EoR銀河の3次元マッピング

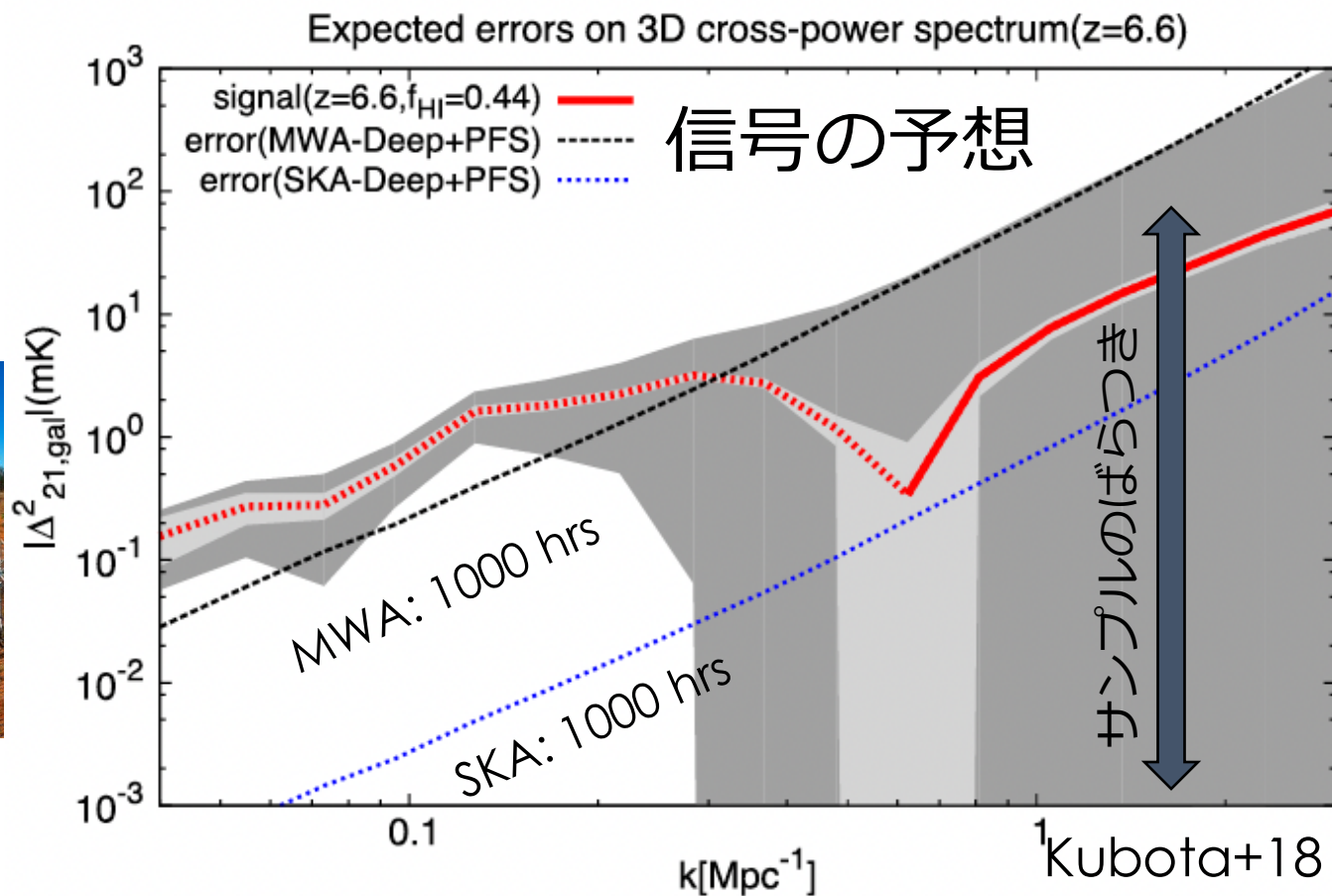


MWA+PFS: 大スケールで検出可能か？

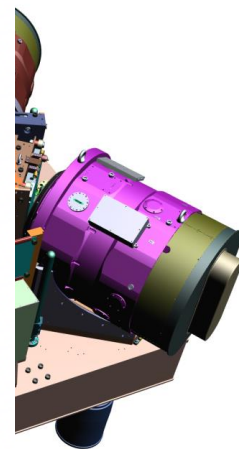
SKA+PFS: ターンオーバースケールの検出(i.e., the Bubble Radius)

銀河-21cm線の空間相互相関

Murchison



光観測で
ピンギ



aru-PFS

MWA+PFS: 大スケールで検出可能か？

SKA+PFS: ターンオーバースケールの検出(i.e., the Bubble Radius)

宇宙再電離研究の 現在地

いつ始まり完了したのか？（1.再電離史）

→ $x_{\text{HI}}(z)$ の概観を得た

何に引き起こされたのか？（2.電離源）

→ 観測 f_{esc} と再電離史が整合せず？

+ 初期における巨大泡形成とLateシナリオ整合性？

* まだ観測成果はカオス; コンセンサスはない

どう電離領域が拡大したのか？（3.電離構造）

→ 銀河周辺のIGM状態を詳細に調べる

星質量/明るさ別、などを切り口に

→ HI 21 cm-LAE 相互相関で複眼的に見る

まとめ

1. 様々なプローブを用い、宇宙再電離史研究
 - CMB, GRB, QSO, Ly α
2. 特にJWSTによる最遠方銀河観測、またすばるによる広範囲サーベイによる宇宙再電離史の概観が得られた
3. 銀河固有の性質などと結び付けながら、宇宙再電離の包括的に理解したい
4. 次世代望遠鏡を駆使し、宇宙再電離研究は続く
 - JWST, Roman, HiZ-GUNDAM, PFS, SKA