

YITP workshop
Exploring Extreme Transients:
Frontiers in the Early Universe and Time-Domain Astronomy



遠方GRB視線を用いた宇宙初期の 化学進化探査

柏野大地

国立天文台 科学研究部 特任助教（国立天文台フェロー）

アウトライン

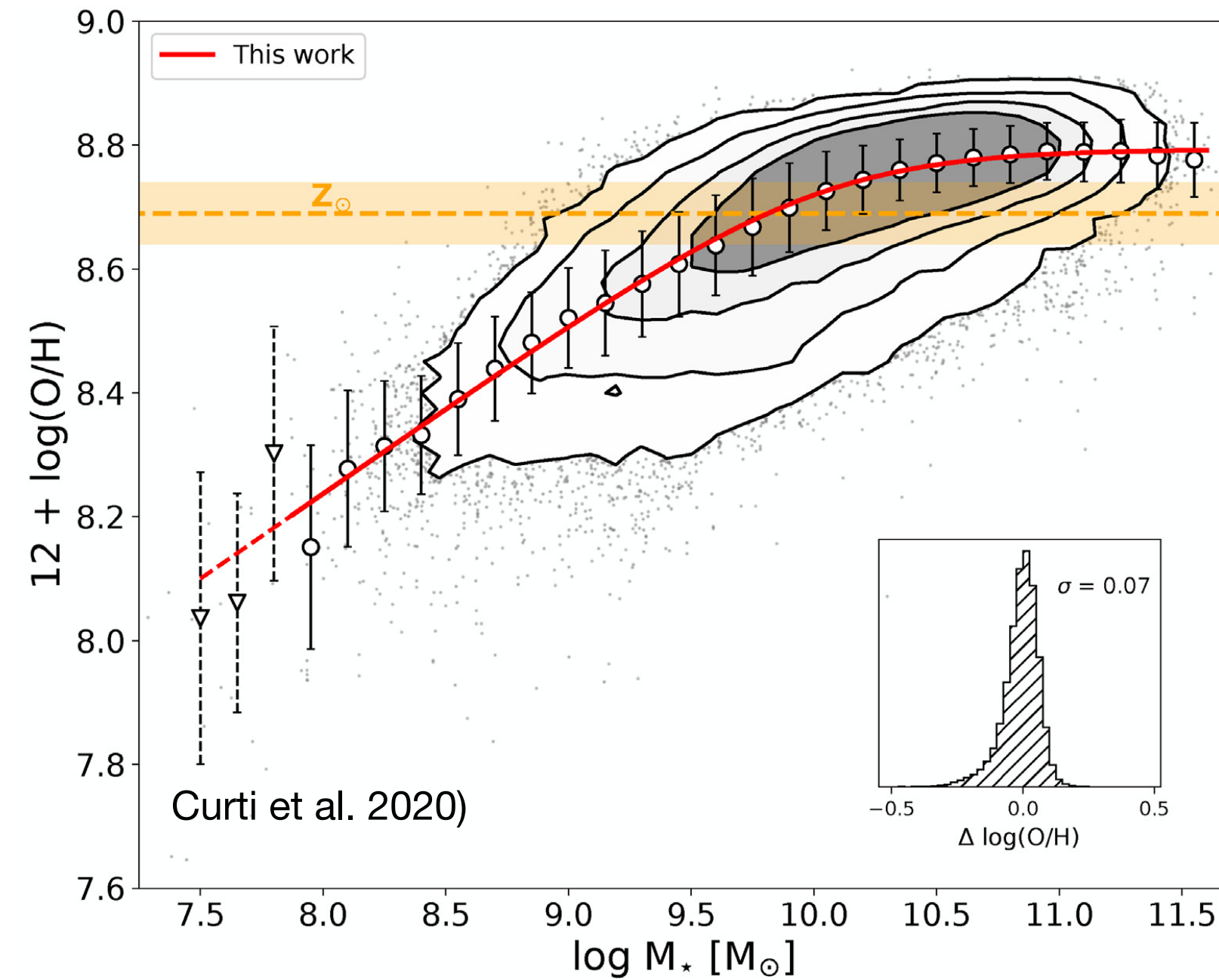
- ・ 宇宙の化学進化の観測的研究
 - ・ 銀河の星間物質中の金属 – 銀河からの放射光の観測
 - ・ 銀河周辺物質 (CGM) / 銀河間物質 (IGM) 中の金属 – 吸収線を用いた観測
- ・ 初期宇宙金属プローブとしてのガンマ線バースト（とその残光）
- ・ HiZ-GUNDAM時代に期待される成果

宇宙の化学進化

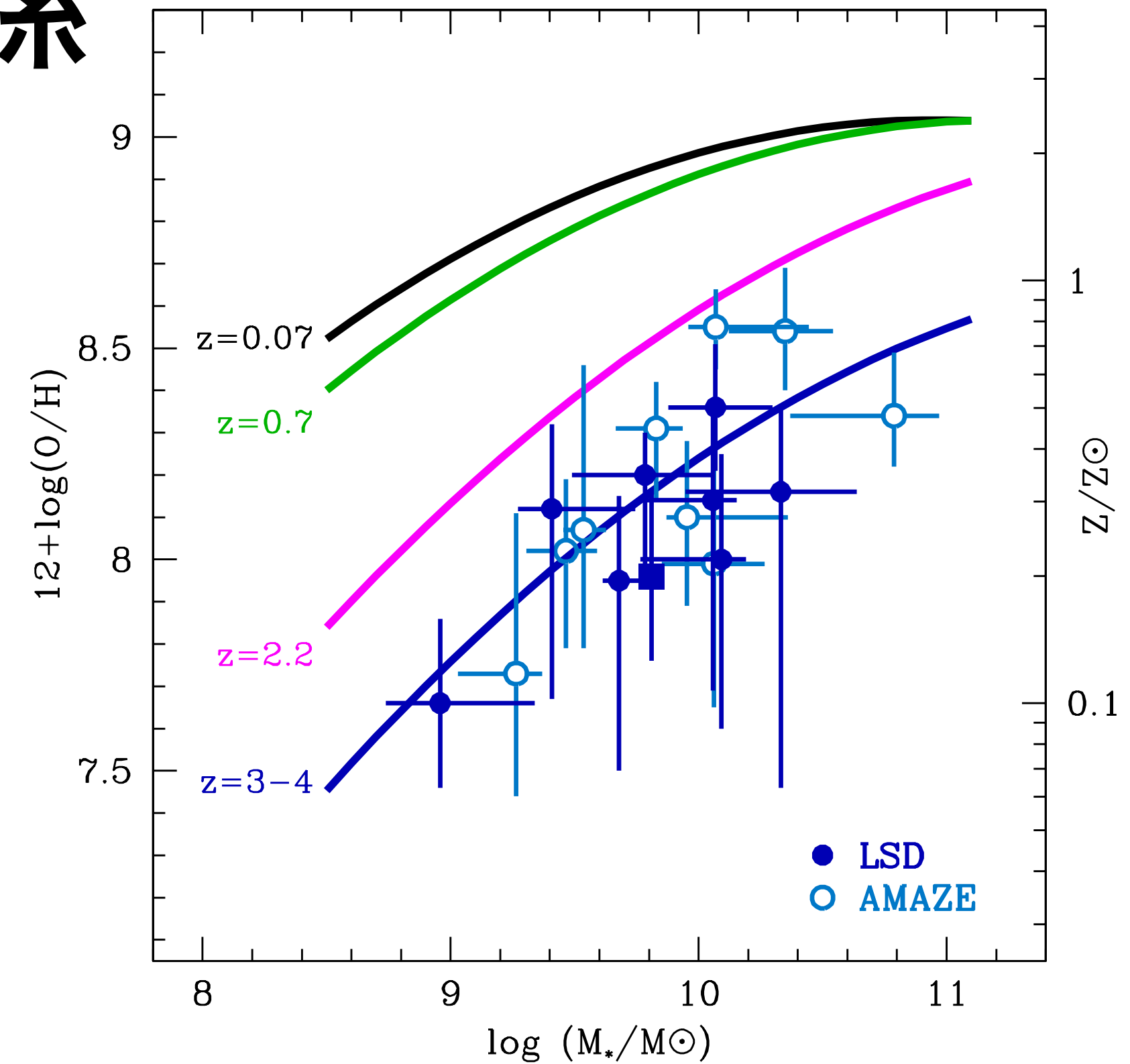
- ・ 銀河の金属量 (metallicity) は、酸素や鉄などの重元素と水素の相対存在量として測定される。
- ・ 金属量はその銀河の星形成やガスの流入・流出の歴史を反映する。
- ・ 金属量の進化は、単純なモデルでよく再現される銀河の性質の一つ。
- ・ 異なる重元素の組成は、星種族や超新星の物理を反映する。

銀河の星質量-金属量 (MZ) 関係

Curti+20



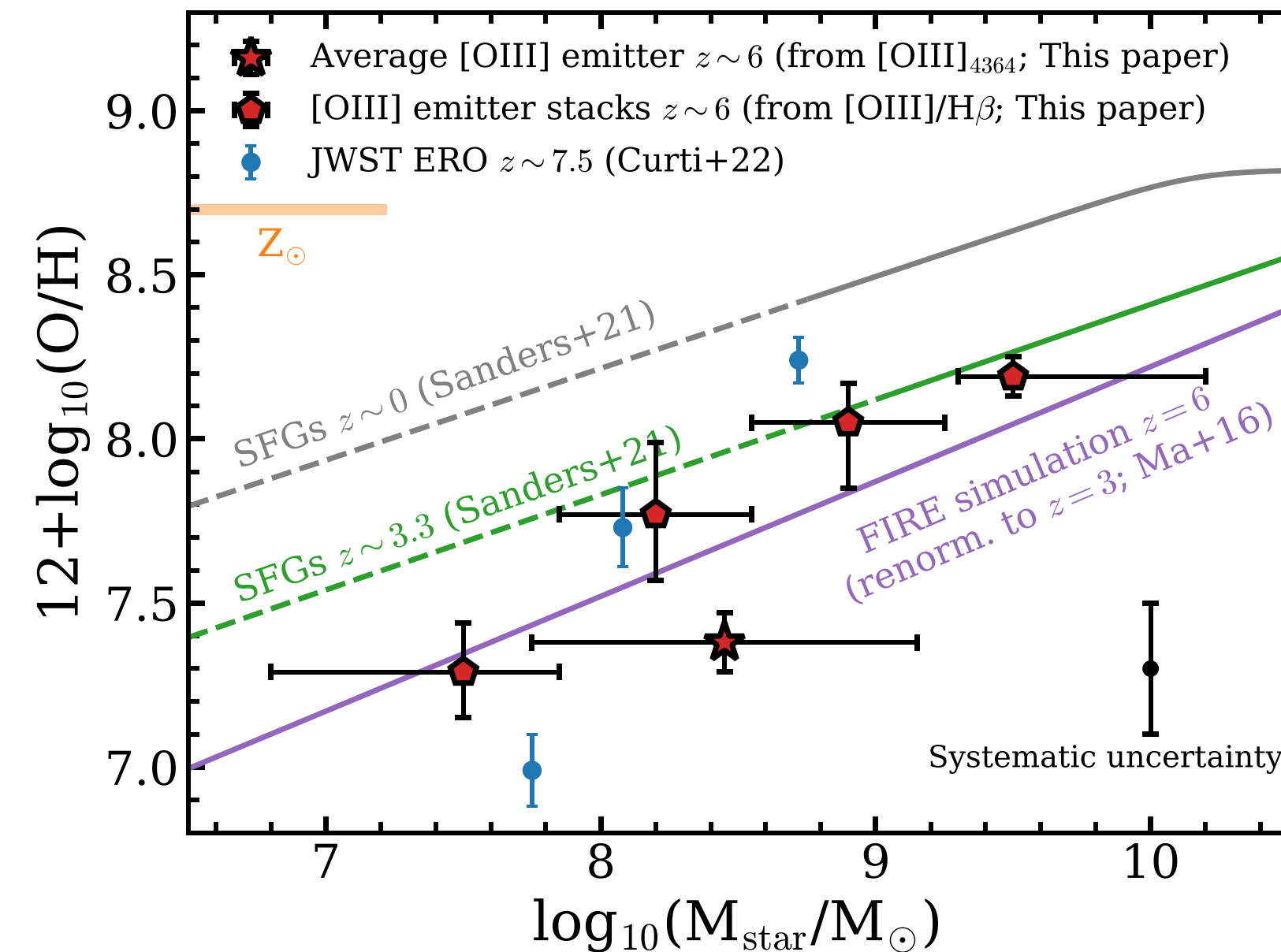
Mannucci & Creci 2010



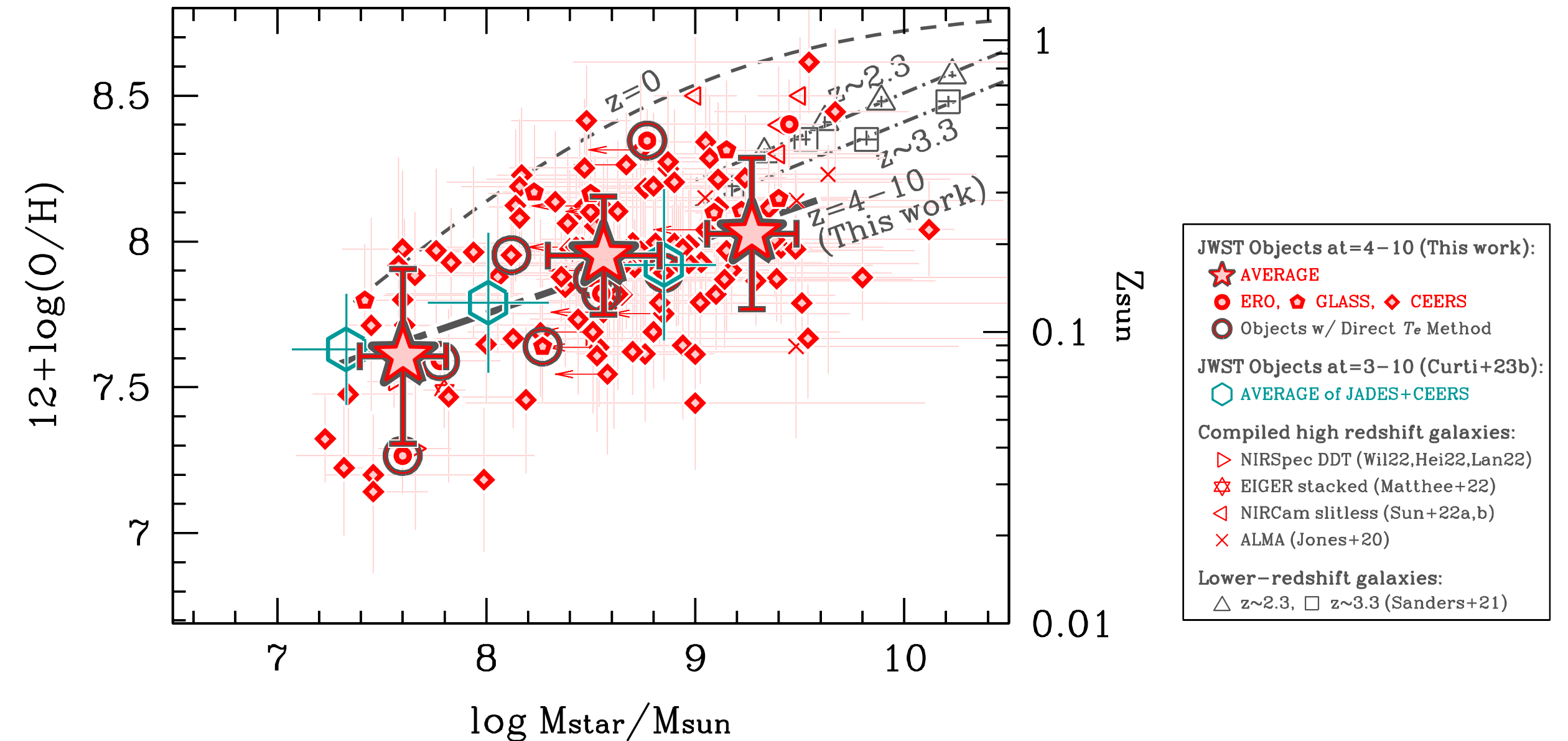
- 普通、銀河の金属量というとガス相のそれ、特に O/H を [OIII]5008Å、[OII]3727Å、水素再結合線などを組み合わせて測定する。
- MZR（質量-金属量関係）は銀河進化モデルを制約する上で重要な観測量。
- 観測からは、赤方偏移 $z \sim 3-4$ までタイトなMZRが確認されており、同一質量では赤方偏移とともに金属量が低下する。

JWSTによる遠方銀河種族の金属量測定

Matthee et al.+DK (2023): $z=5-7$



Nakajima et al. 2023: $z=4-10$



- JWSTにより、 $z \sim 10$ の銀河の金属量測定が可能になった
- 金属量は、 $z \sim 3$ よりさらに小さくなる。
- 星質量との相関も見られる。

スロープの変化：フィードバック機構や成長段階を反映

- $z > 3$ で、特に低質量側でスロープが緩やかに：

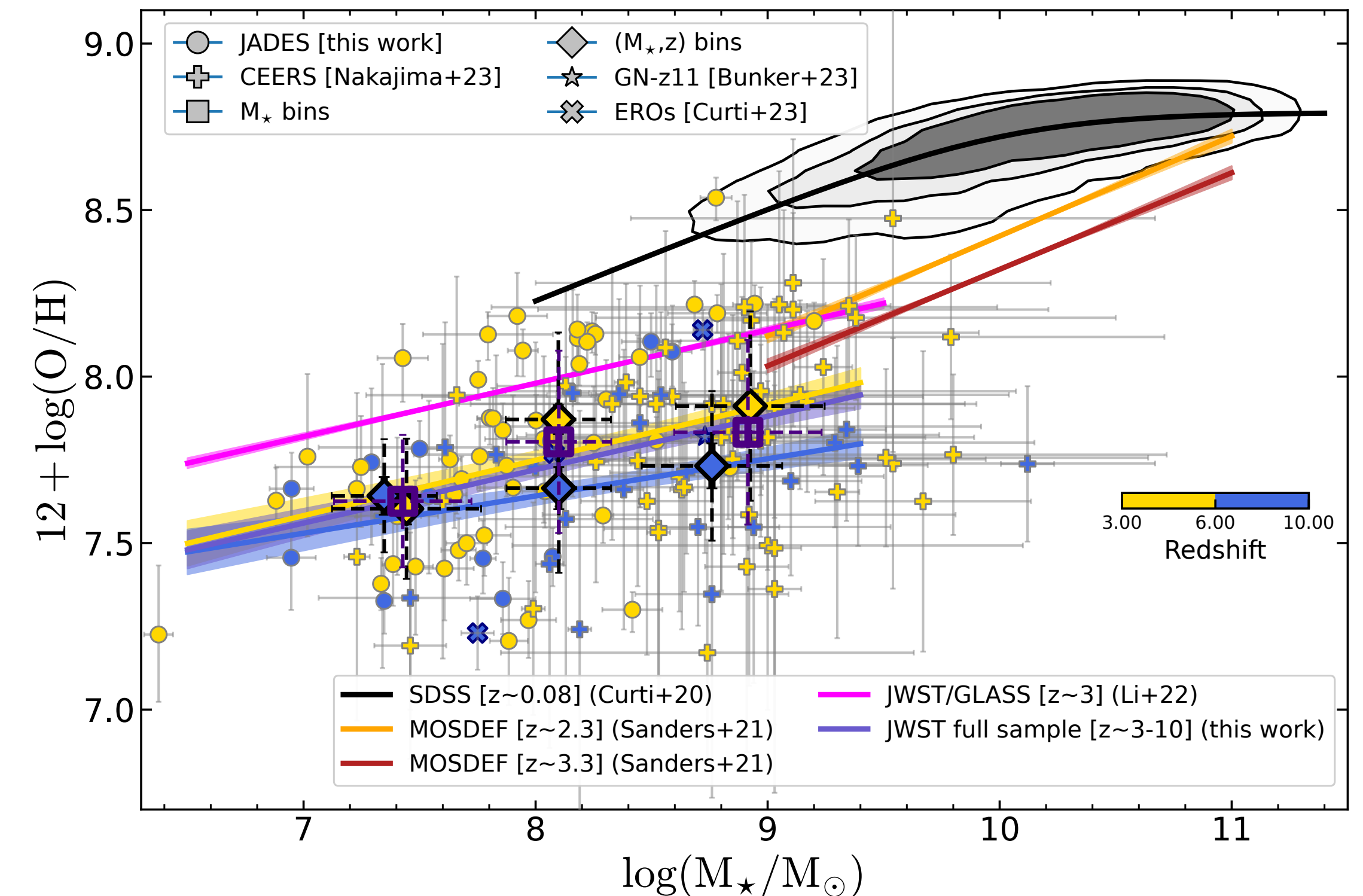
➡ フィードバック機構の変化を反映している
可能性："momentum-driven feedback" が支配的になり、アウトフロー効率の質量依存性が緩やかになるためか

- $z > 6$ では、さらにスロープが緩やかに：

➡ 星形成史におけるstochasticityが増加により相関が消失

金属量の測定から、銀河進化に対する多くの知見が得られる。

Curti et al. 2024 $z=3-6/6-10$

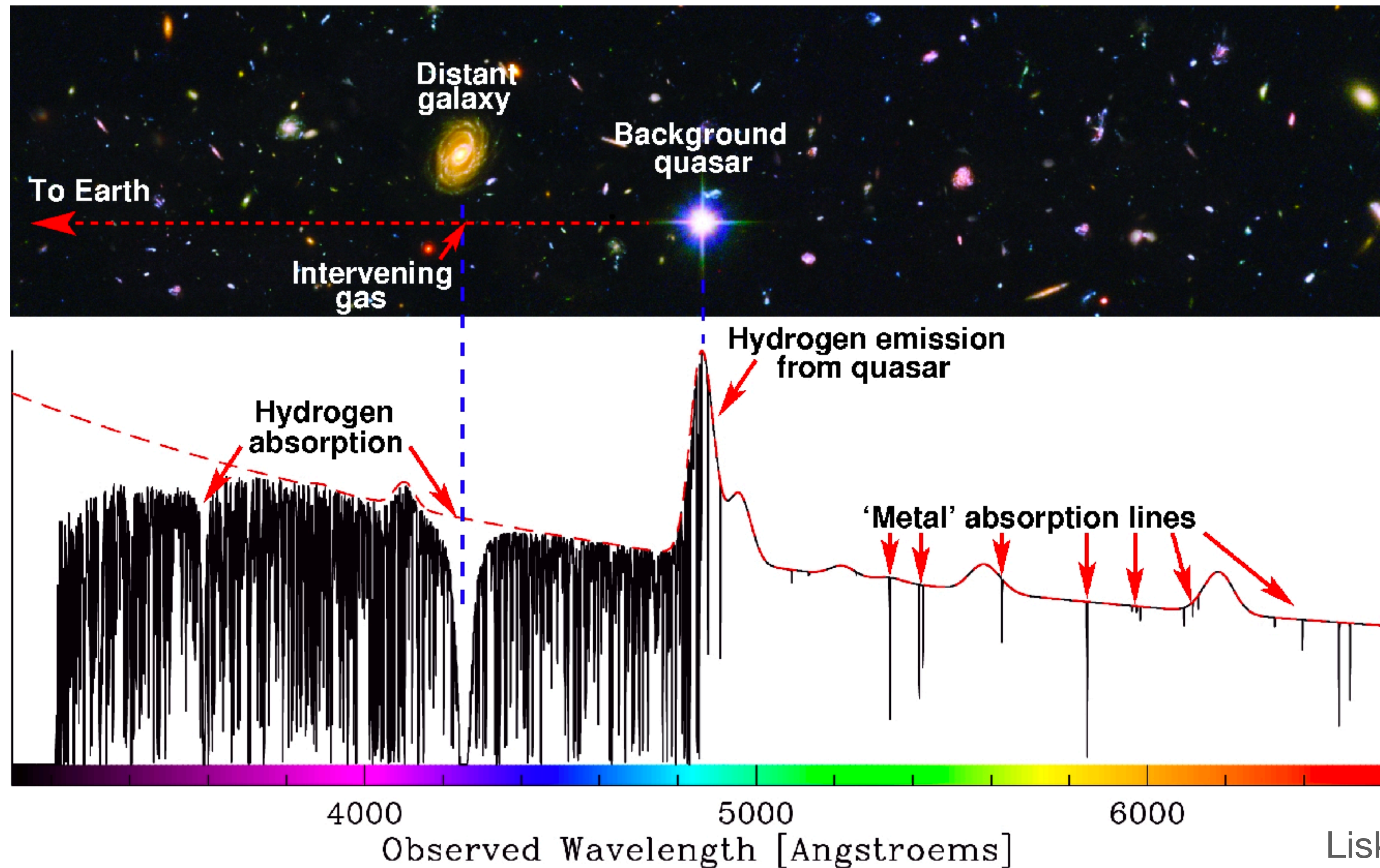


吸収線を用いたガスの探査



- ある銀河の星成分からの連続光成分に対して、その銀河自身のISM／銀河周辺物質（CGM）を吸収線で観測する手法＝Down-the-barrel
- 前景銀河のCGMや銀河間物質（特定の銀河に属さない物質）による吸収＝intervening absorbers
- CGMの運動状態、特に銀河からのガス流出の検出・解析に使われる。

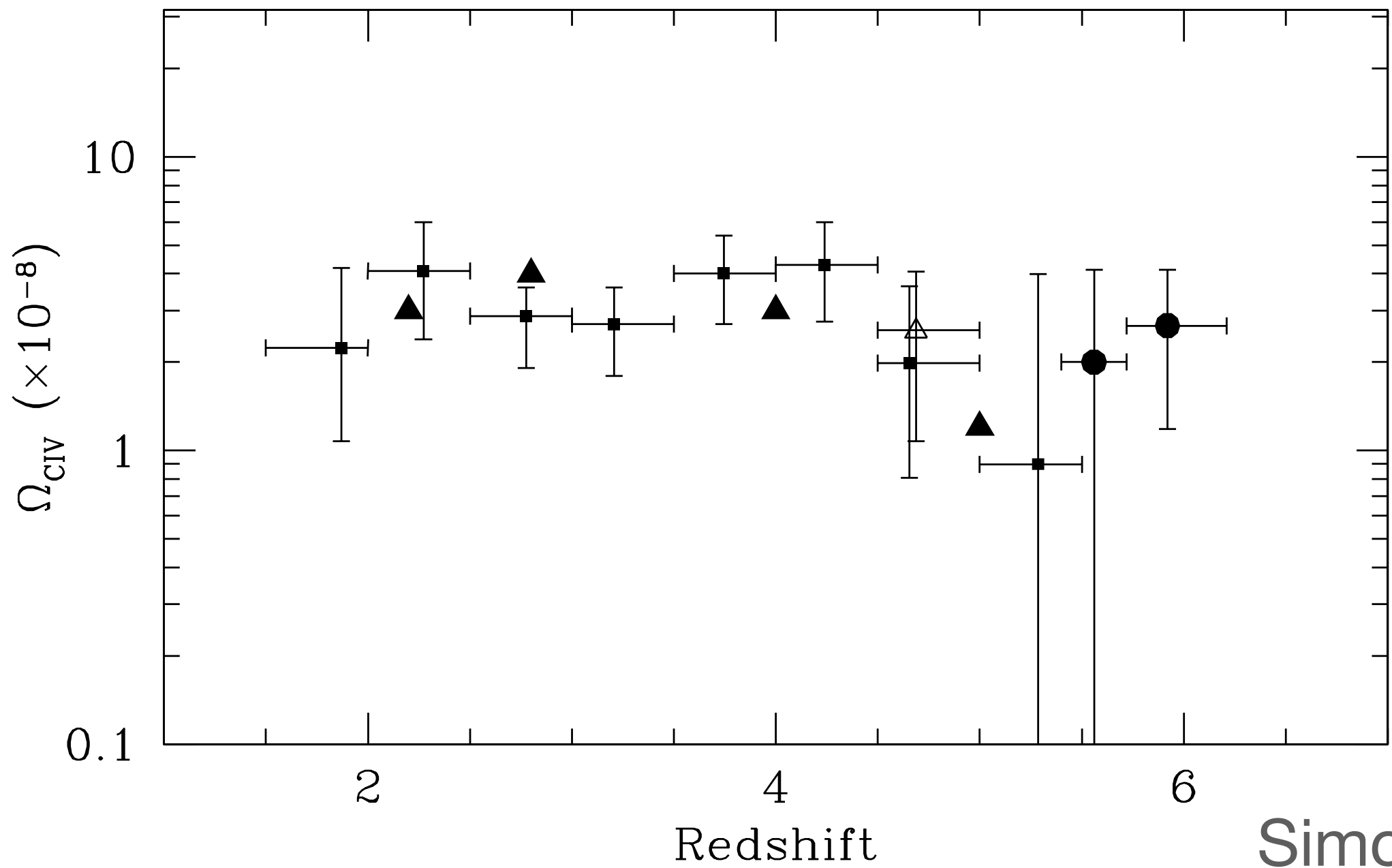
クエーサー視線に現れる吸収線



吸収線で探る金属イオン存在量

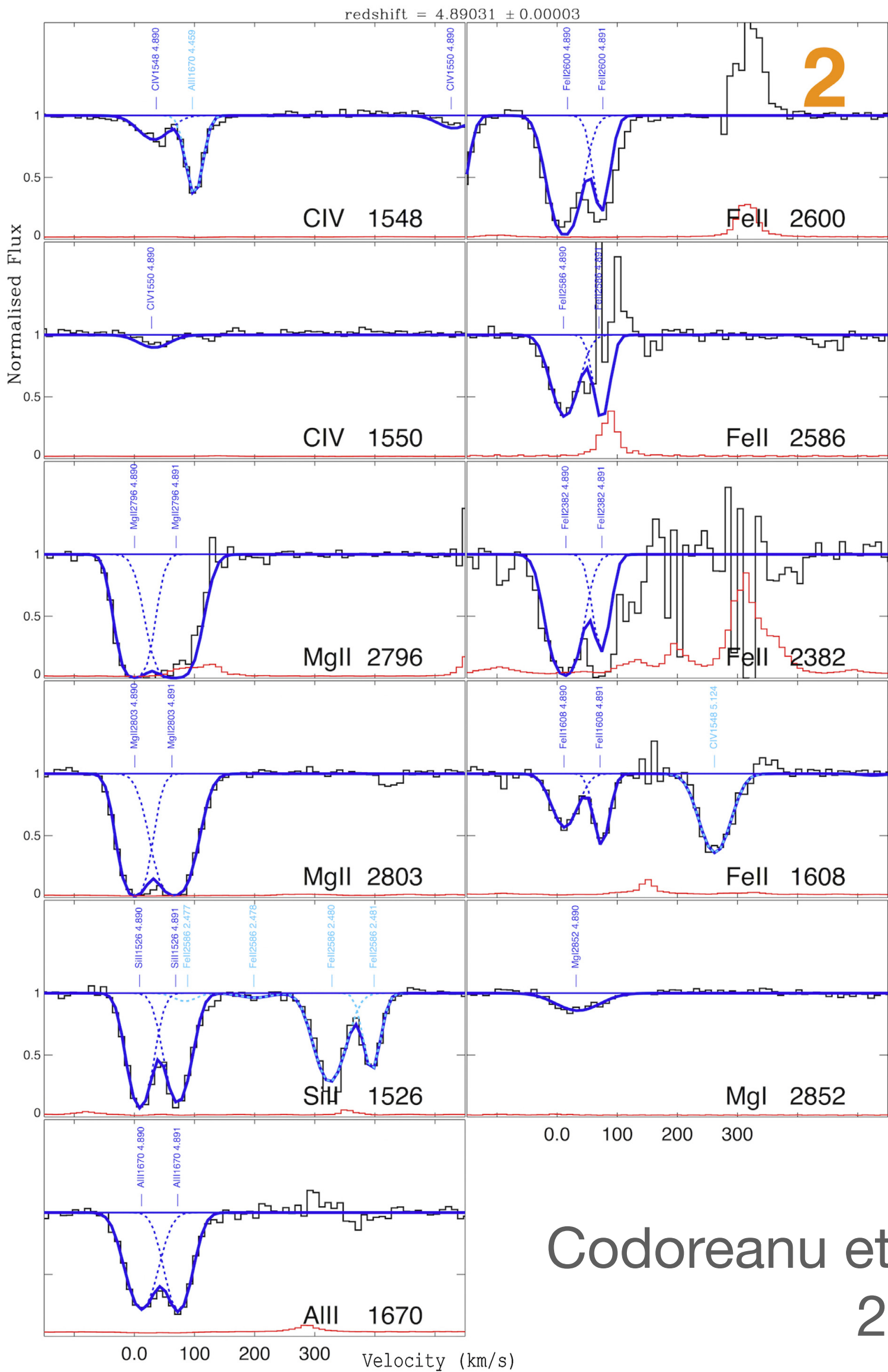
- 2000年代より、クエーサー視線を用いた遠方宇宙の銀河間空間に存在する金属の調査が行われてきた。
- Voigtプロファイルにより、柱密度が求められる。
- $z \sim 2-6$ で CIVの存在量はほぼ一定

$$\Omega_{\text{CIV}} = \frac{1}{\rho_c} m_{\text{CIV}} \frac{\sum N_{\text{CIV}}}{(c/H_0) \sum \Delta X},$$



Simcoe 2006

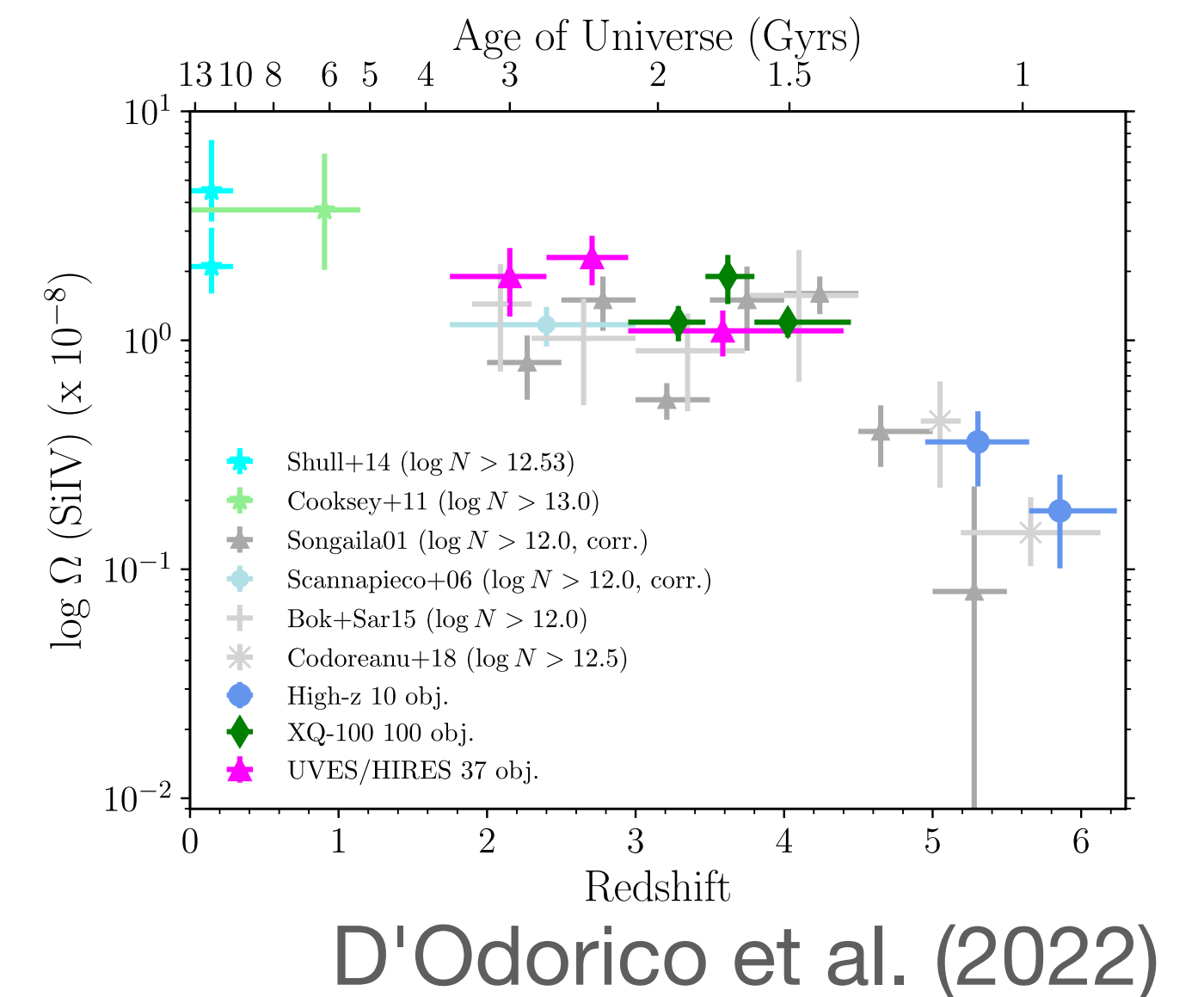
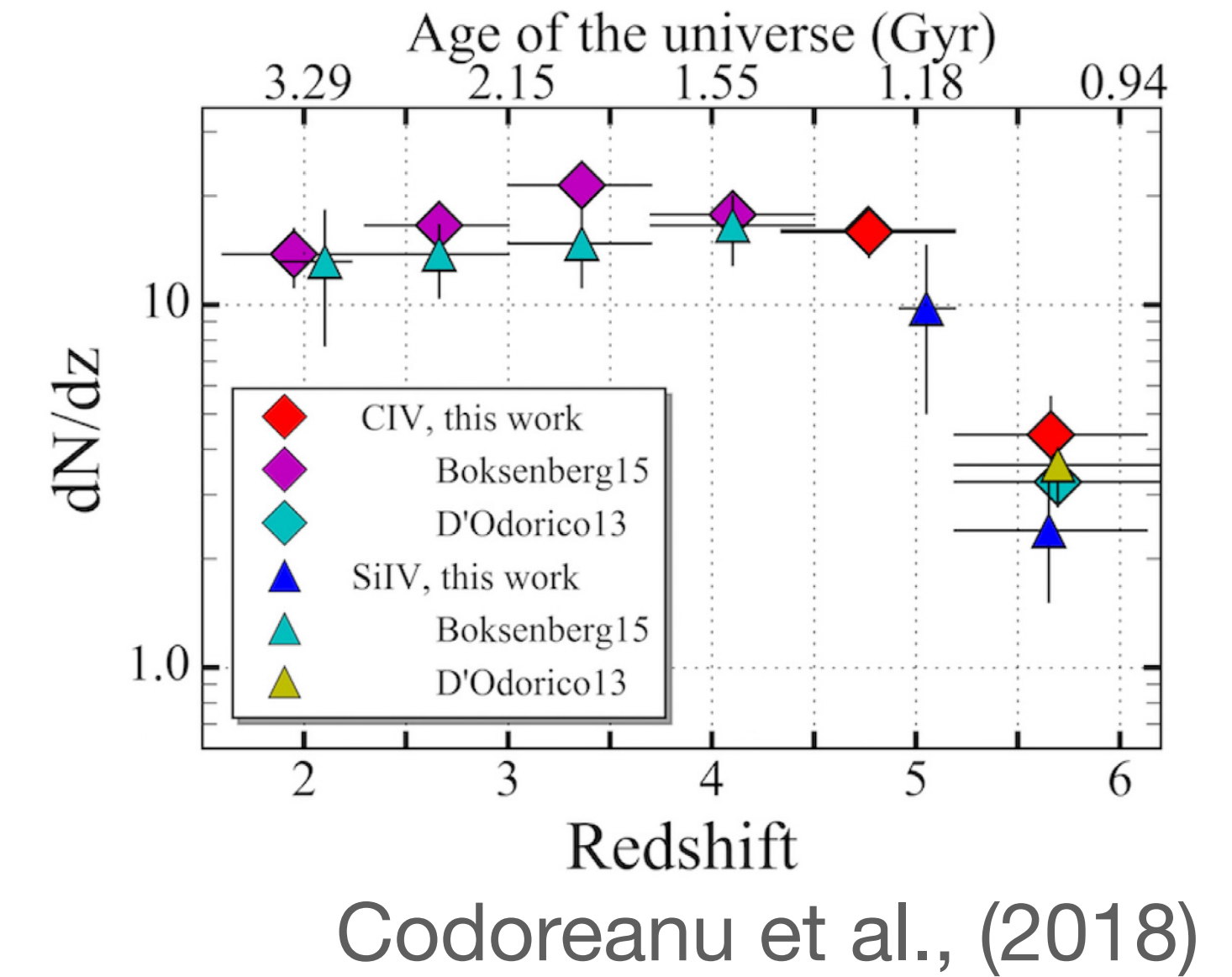
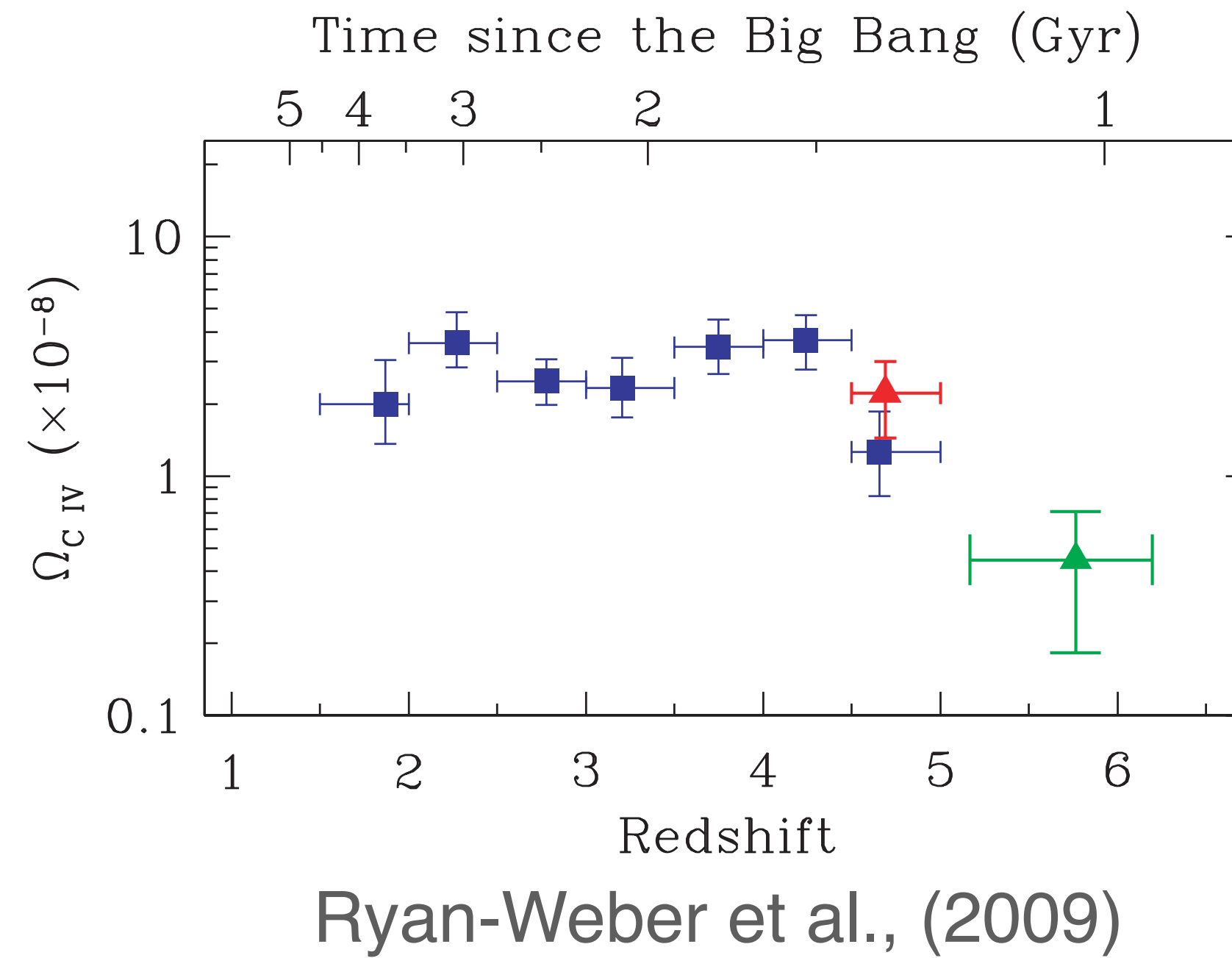
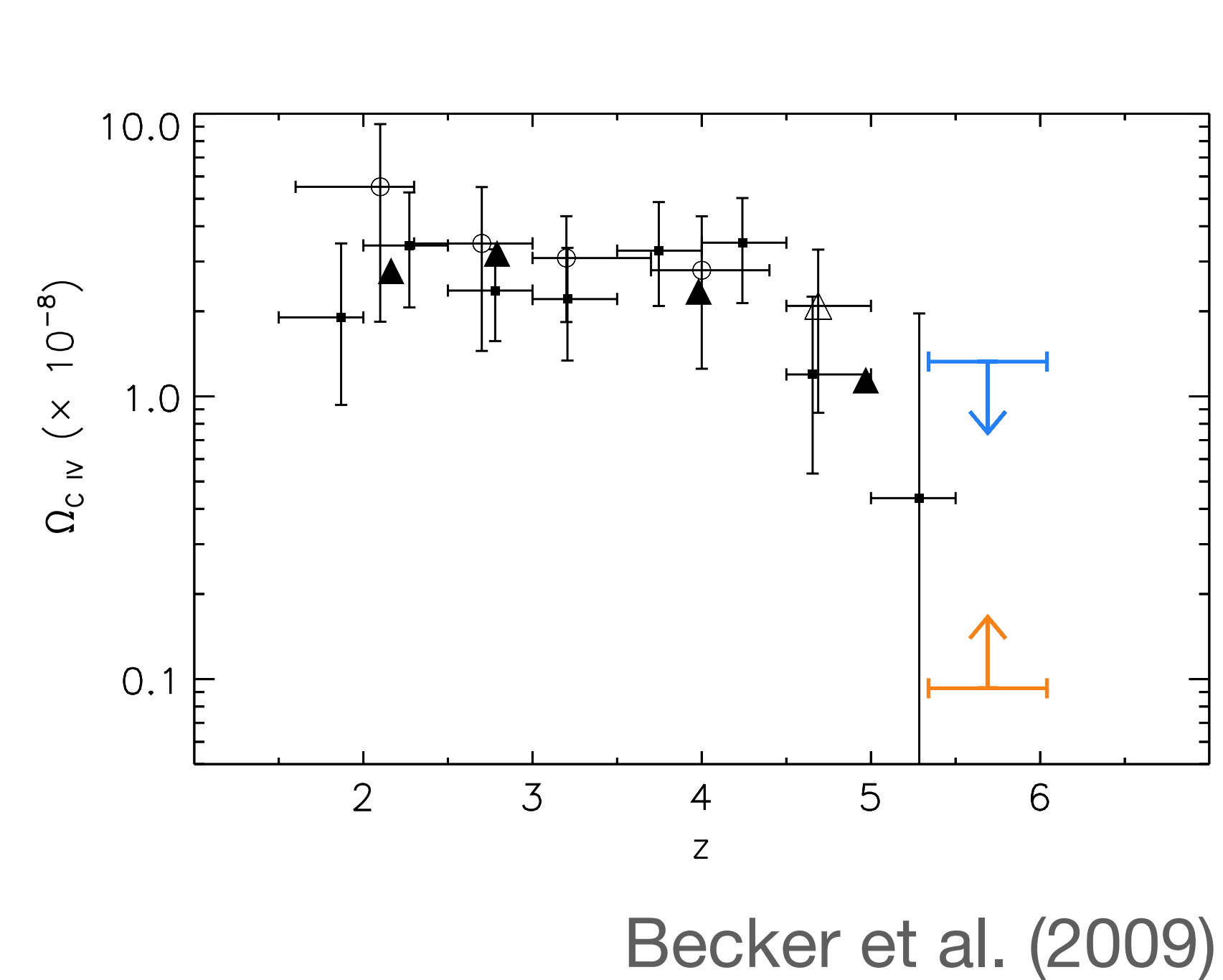
吸収線プロファイルフィットの例



Codoreanu et al., 2018

吸収線で探る金属イオン存在量

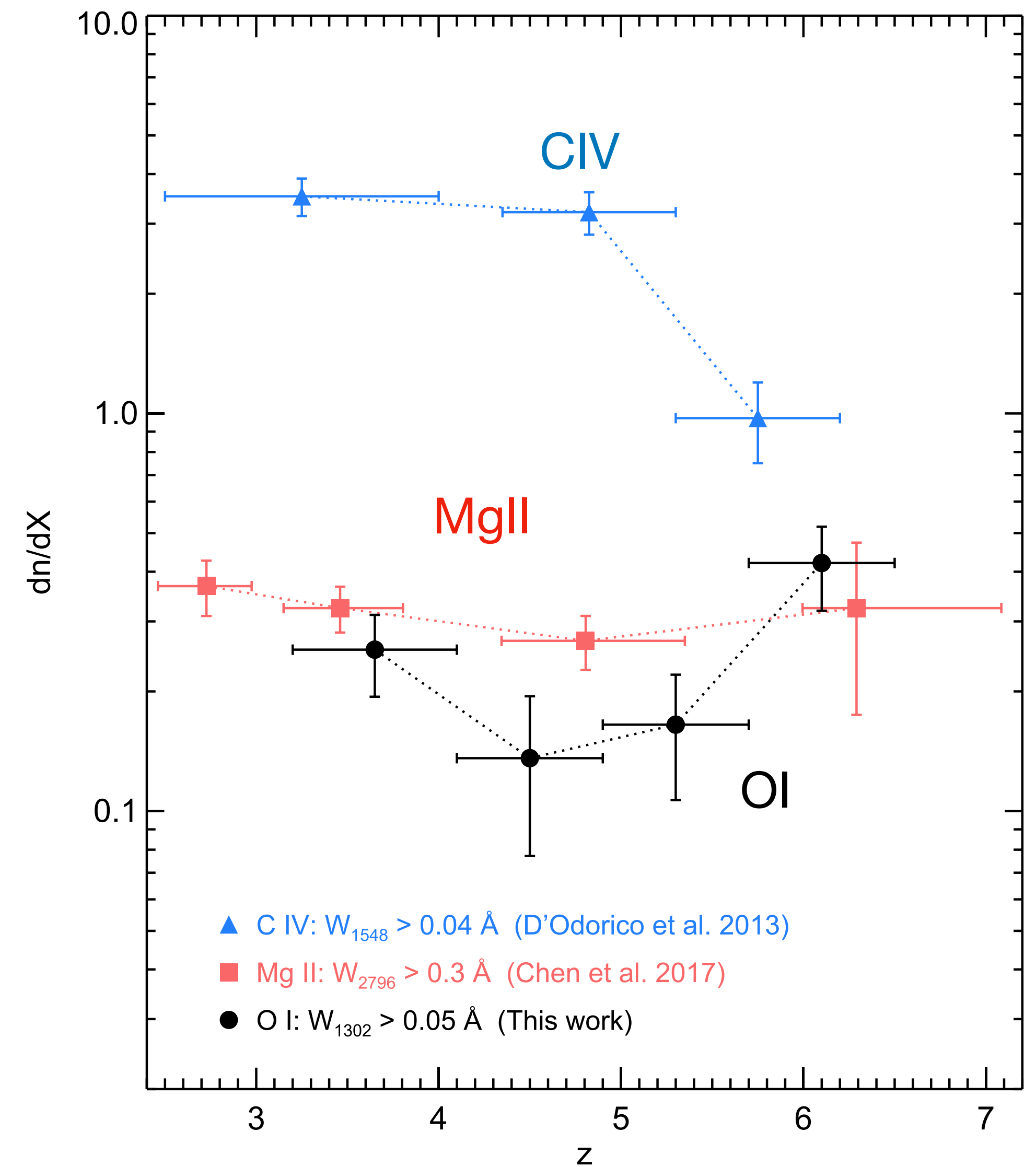
その後、 $z \sim 5-6$ でCIV、Si IVなどの高階電離イオンの減少が確認された。



吸収線で探る金属イオン存在量

一方で、MgIIは一定、中性酸素 (OI) は高赤方偏移で増加する傾向が見られる。

金属元素の存在量の変化もあるかもしれないが、再電離期に向かうなかでの銀河間物質 (IGM) の電離状態を反映している可能性が高い。



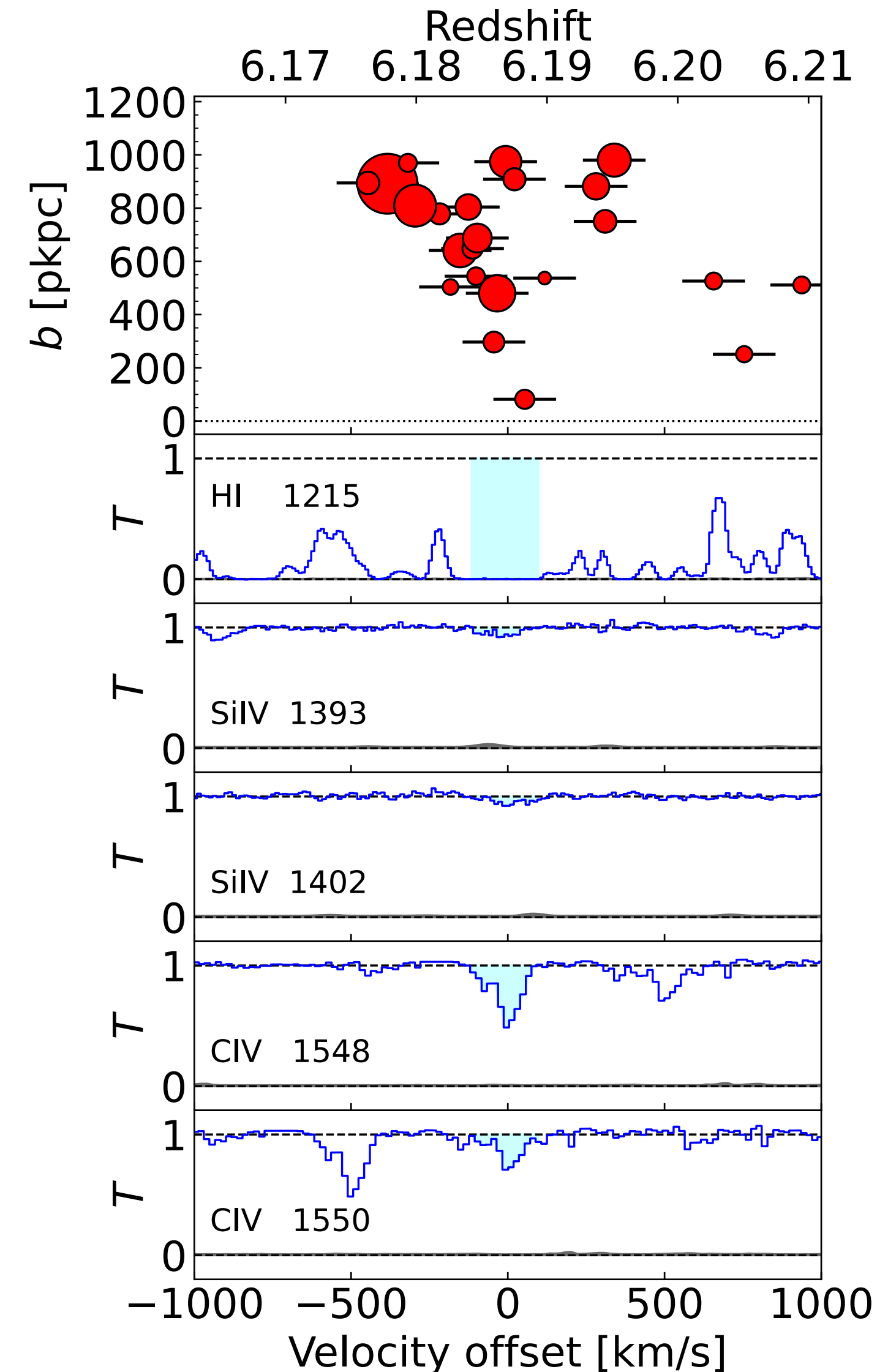
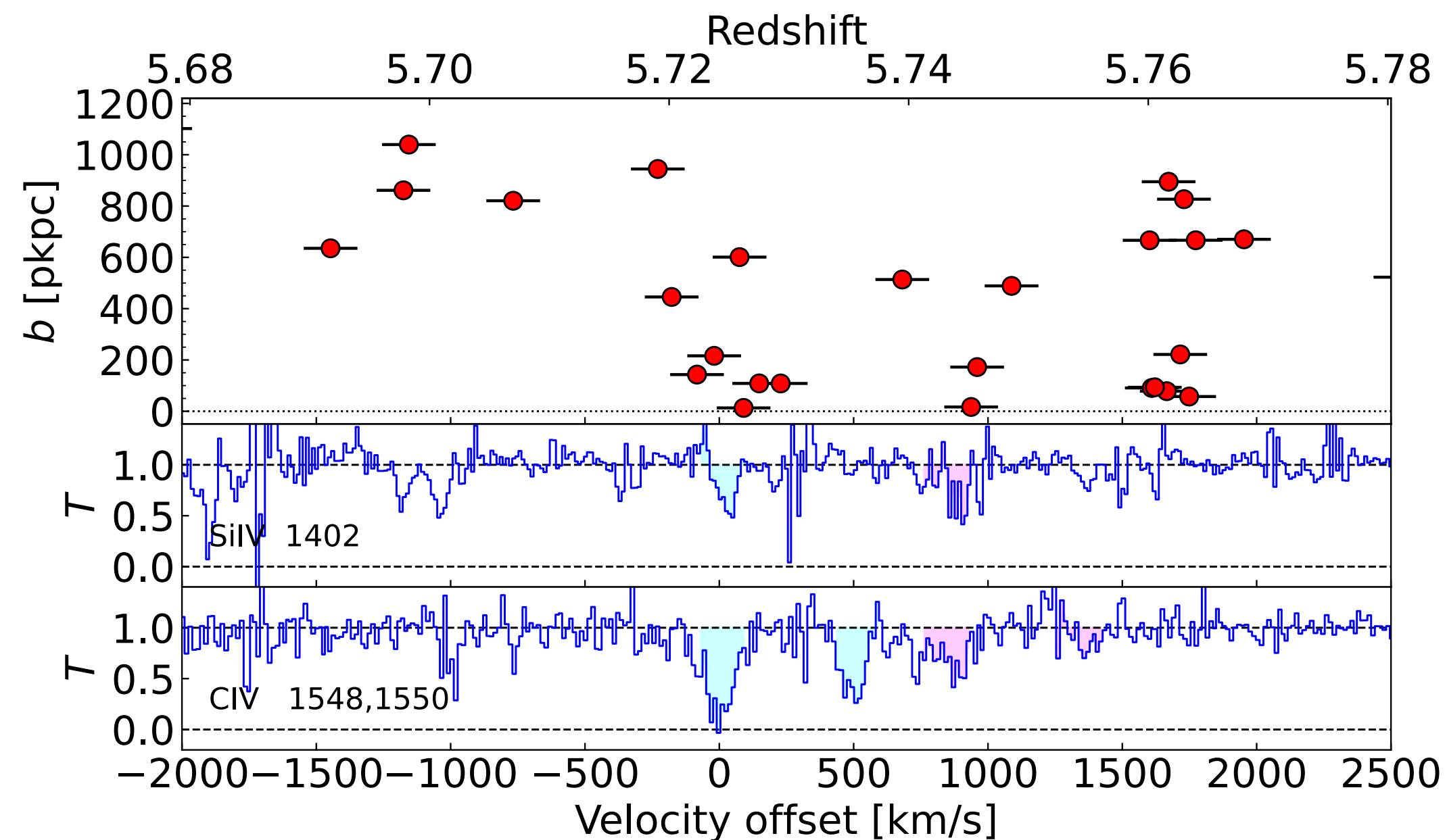
Becker et al. 2019

強いCIV吸収系周辺に銀河密度過剰

JWST EIGER：クエーサー視線に沿った銀河探査を実施
NIRCamグリズムで[OIII]輝線銀河を検出

➡ 既知のCIV+SiIV吸収線系付近で銀河集団を発見：

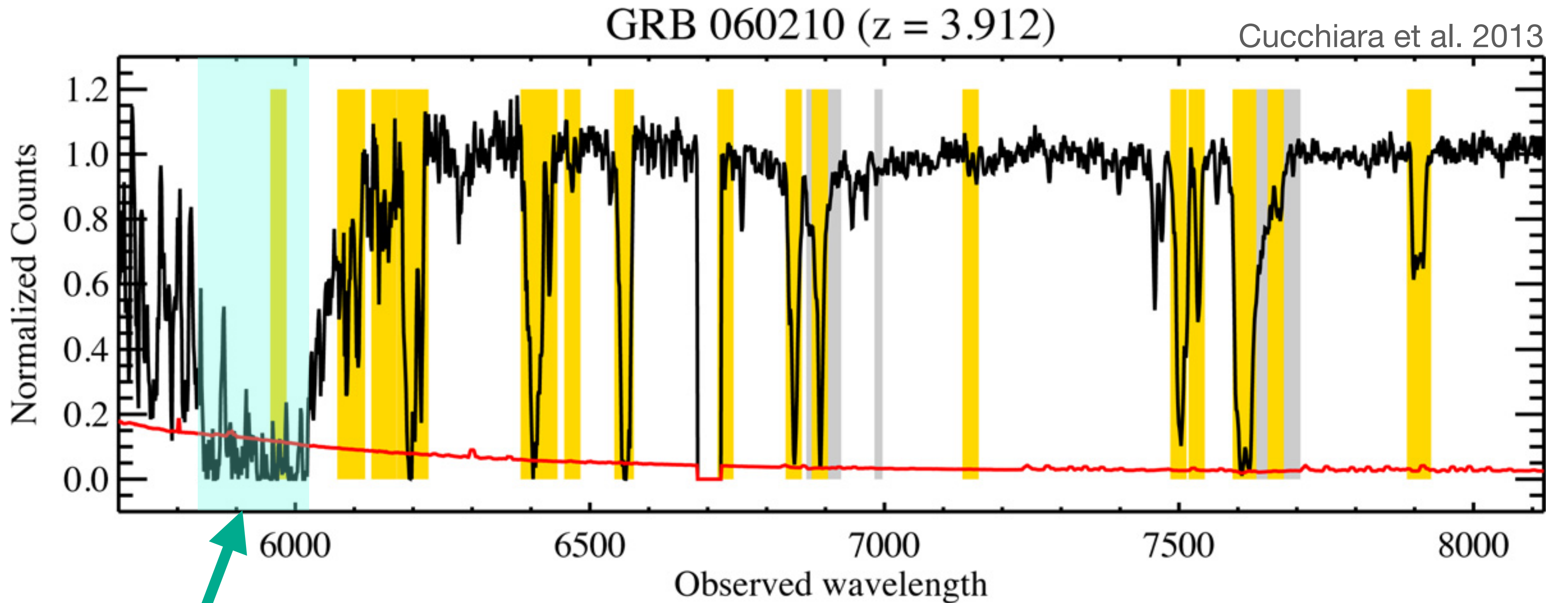
IGMの金属汚染とともに、銀河の存在によって電離状態も卓越していることを示唆 (DK+23, 25; see also Wu+23)



ガンマ線バーストと残光 (afterglow)

- ・ ガンマ線バースト：遠方宇宙で突然発生する非常に明るいガンマ線放射天体
 - ・ **Long-duration (≥ 2 sec): 大質量星（おそらく低金属量）の崩壊**
 - ・ Short-duration (≤ 2 sec): コンパクト（中性子星、BH）天体の合体
- ・ 残光（アフターグロー）
 - ・ GRBの直後にX線～電波の広い波長帯で観測される残光現象。
 - ・ 数時間～数週間にわたり光が放たれる。
 - ・ ジェットによる衝撃波で加速された電子によるシンクロトロン放射と考えられている。
 - ・ アフターグローの観測により、GRBの正確な位置やホスト銀河の同定が可能。
 - ・ スペクトル吸収線の解析からホスト銀河や介在吸収系の物理状態を調べるプローブとして利用できる。

ガンマ線バーストと残光 (afterglow)



ホスト銀河のISM中の金属イオンによる吸収線

Damped $\text{Ly}\alpha$ (DLA): ホスト銀河の中性水素による吸収

遠方宇宙プローブとしてのGRBと残光

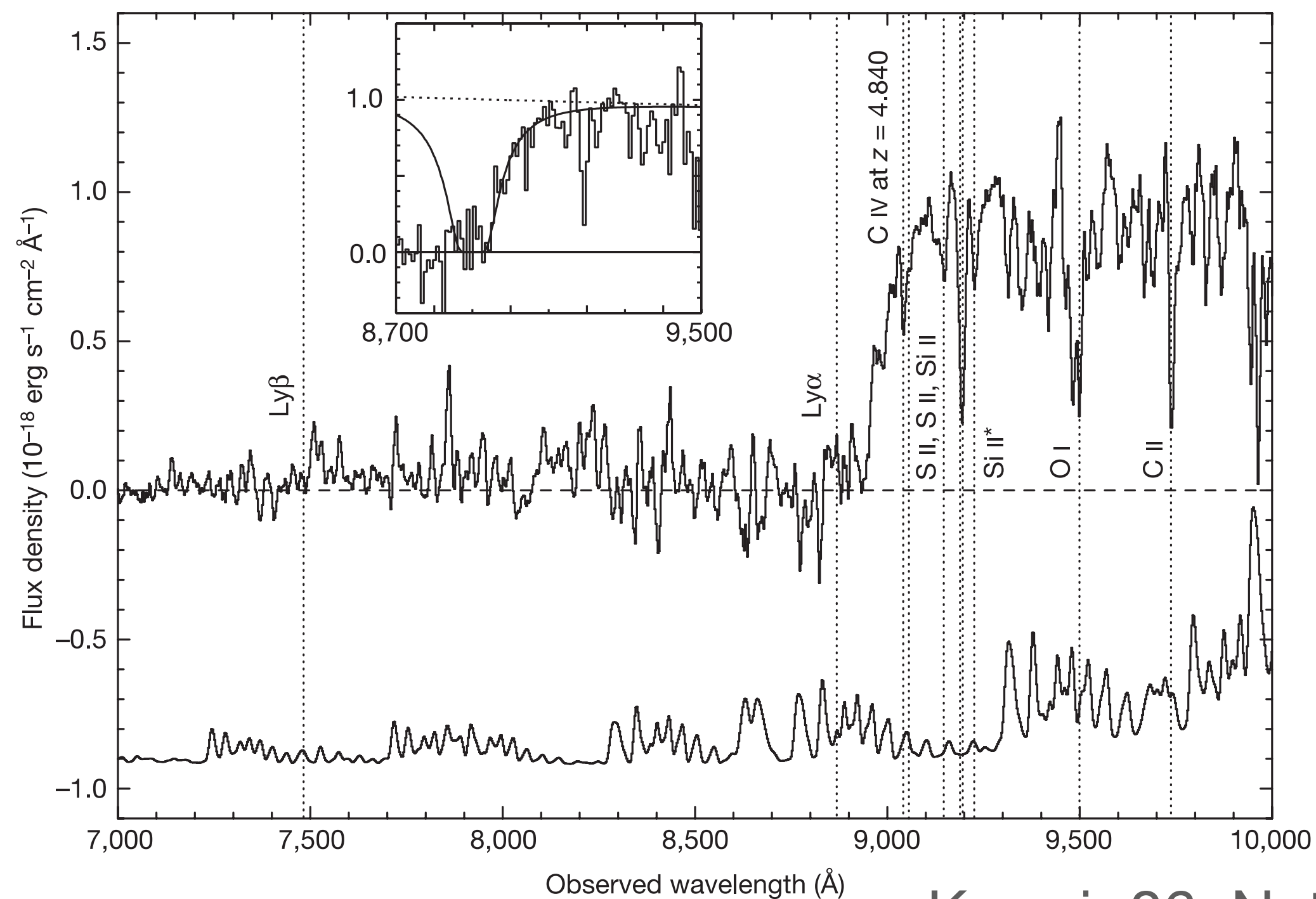
- ・ 超新星起源であれば、宇宙の星形成史をトレースする。
- ・ 大質量星があれば良いので、Pop III 形成期に遡って生じうる。
- ・ 極めて明るく、非常に遠方でも検出可能。
- ・ アフターグローに生じる吸収線は、ホスト銀河の明るさとは無関係：
無バイアスに、非常に低質量で暗い銀河のISMを調べることができる。
- ・ アフターグローは短期間で消失するため、ホスト銀河の詳細な調査が可能。
- ・ GRB発生現場周辺への影響が限定的。

クエーサーと比較

- ・ スペクトルが冪乗則的であり、内部構造を持つクエーサースペクトルよりも背景光として扱いやすい
- ・ 点火までにある程度時間が必要（本質的に赤方偏移に上限）
- ・ クエーサー自体が明るいためホスト銀河の調査が限定される
- ・ 期間が長いため、ホスト銀河や周辺IGMへの影響が甚大

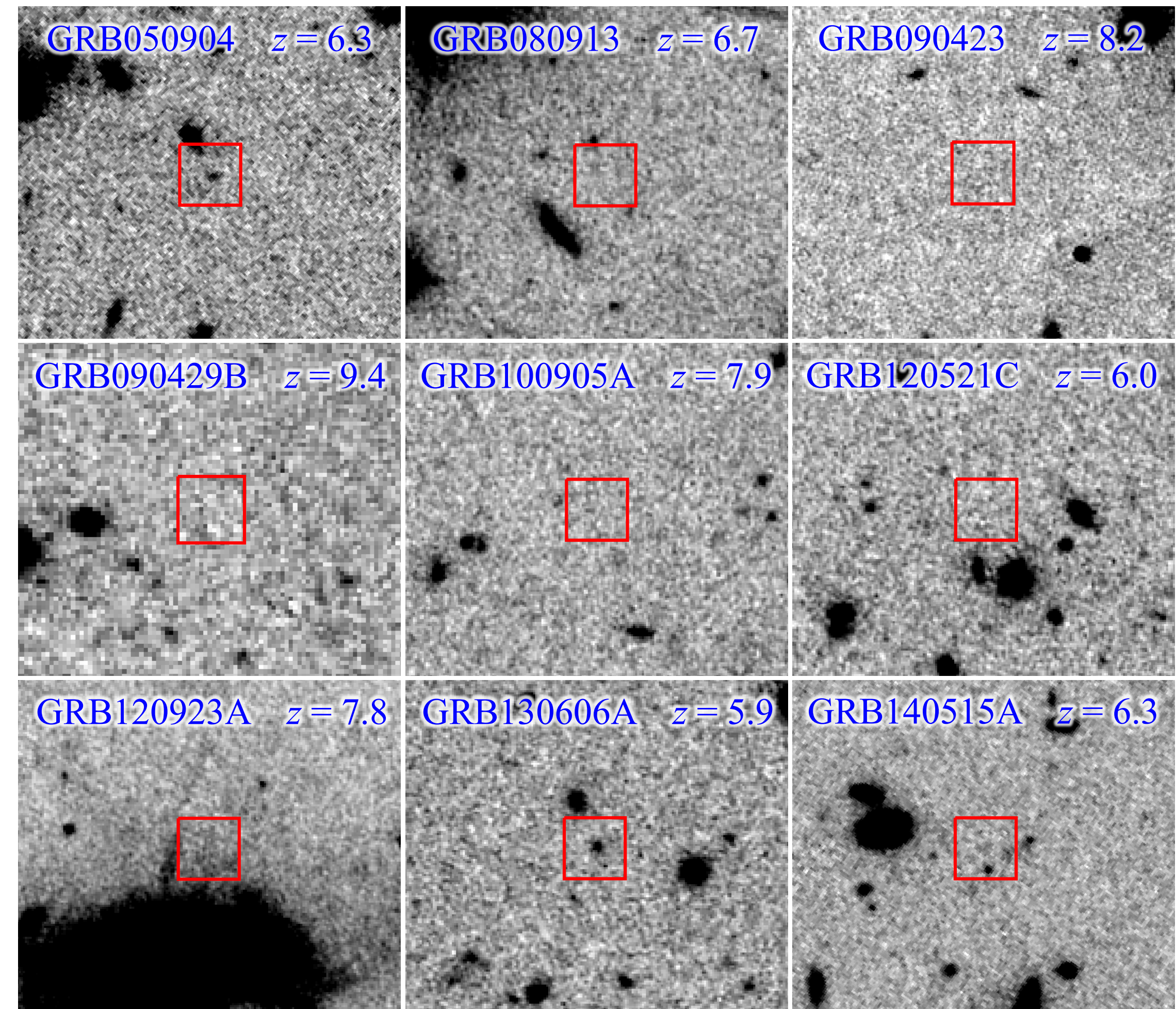
高赤方偏移 ($z \sim > 6$) GRBs

- 高赤方偏移 ($z \sim > 6$) のGRBは実際に複数検出されている。
- 初の $z > 6$ GRB: 050904 @ $z = 6.295$
(Cumming+05) Subaru/FOCASスペクトル



Kawai+06, Nature

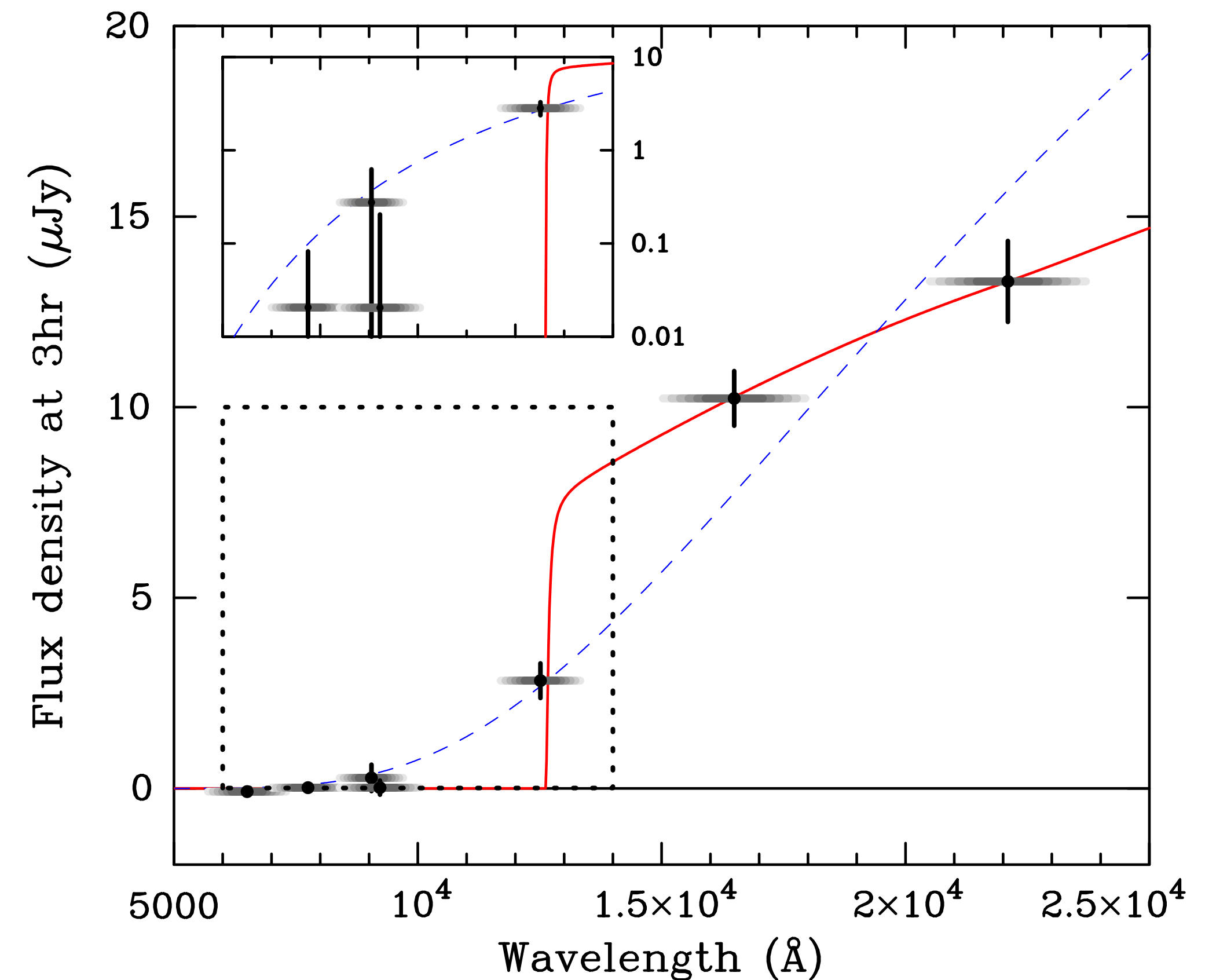
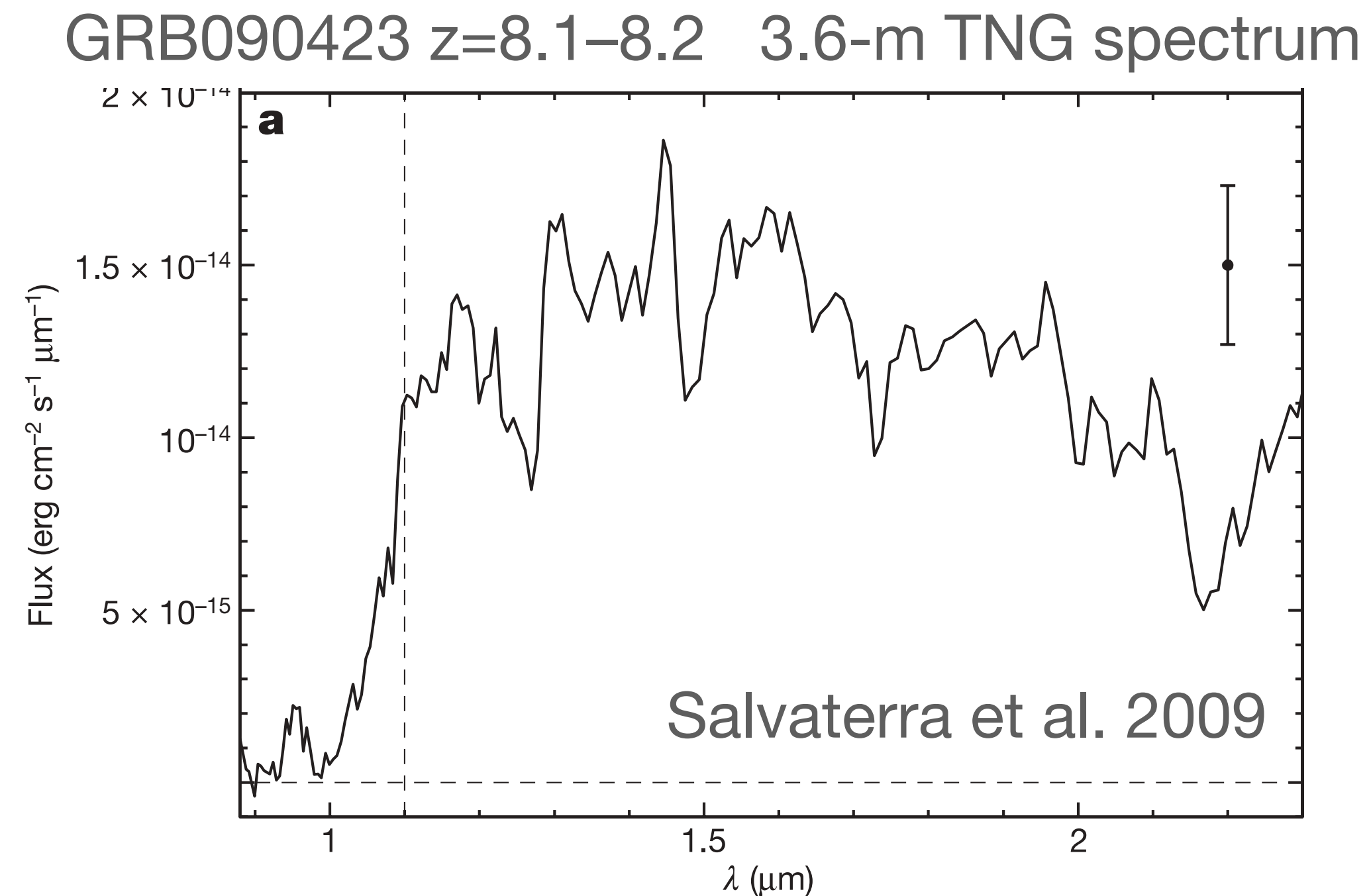
GRB位置のHST画像



Tanvir et al. 2021

高赤方偏移 ($z \sim > 6$) GRBs

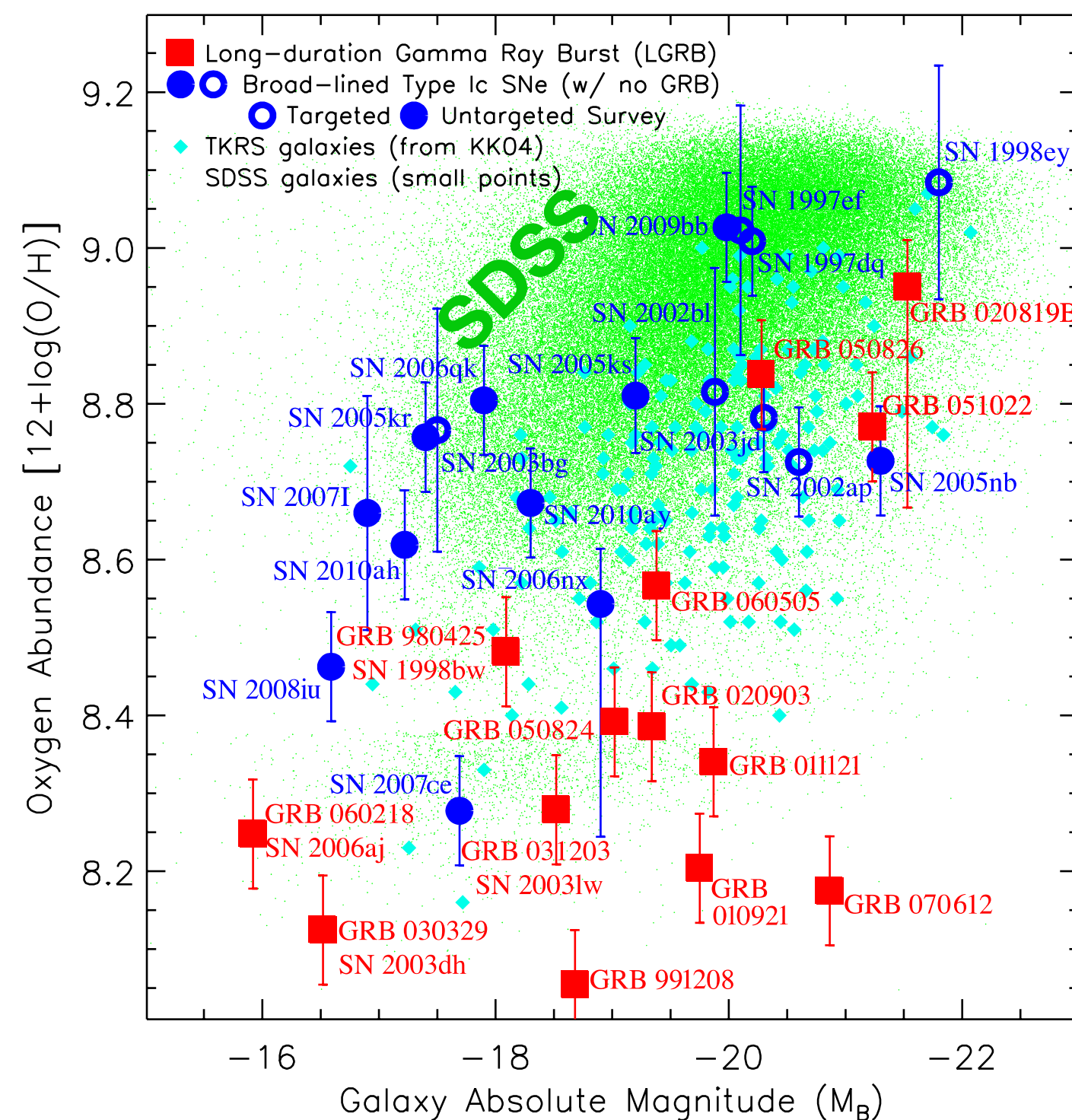
- ・ 分光同定された最遠方はGRB090423 @ $z=8.1-8.2$ (Tanvir+09)
- ・ 測光候補はGRB090429B @ $z_{\text{phot}} \sim 9.4$ (Cucchiara+11)



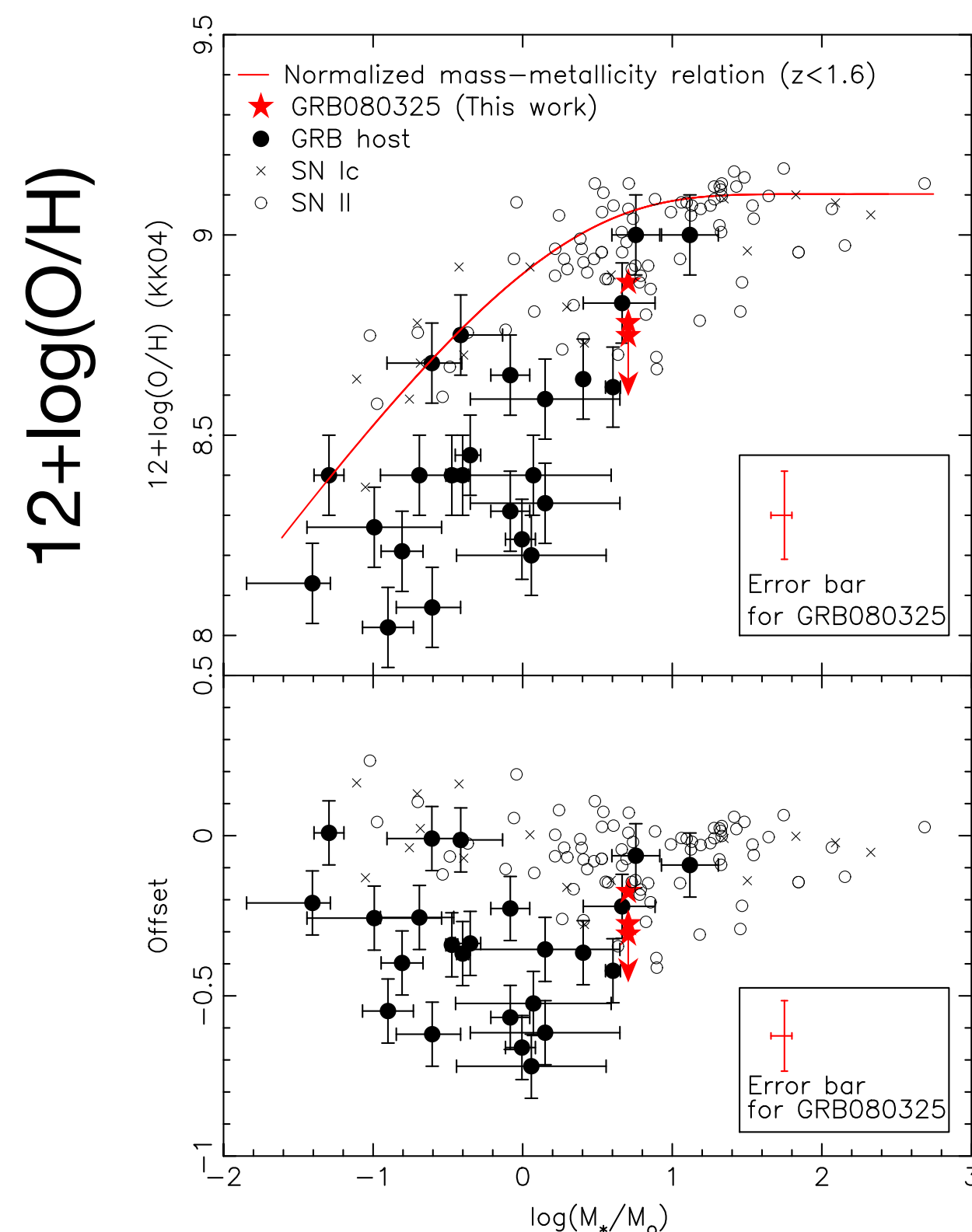
Long-GRBホスト銀河は低金属量寄り

- ・ アフターグロー消失後にホスト銀河を分光観測し、輝線から金属量を測定
- ・ 通常の銀河種族 (SDSS) やSNホスト銀河と比較すると、系統的に低質量

Graham & Fruchter 2013



Hashimoto et al. 2015

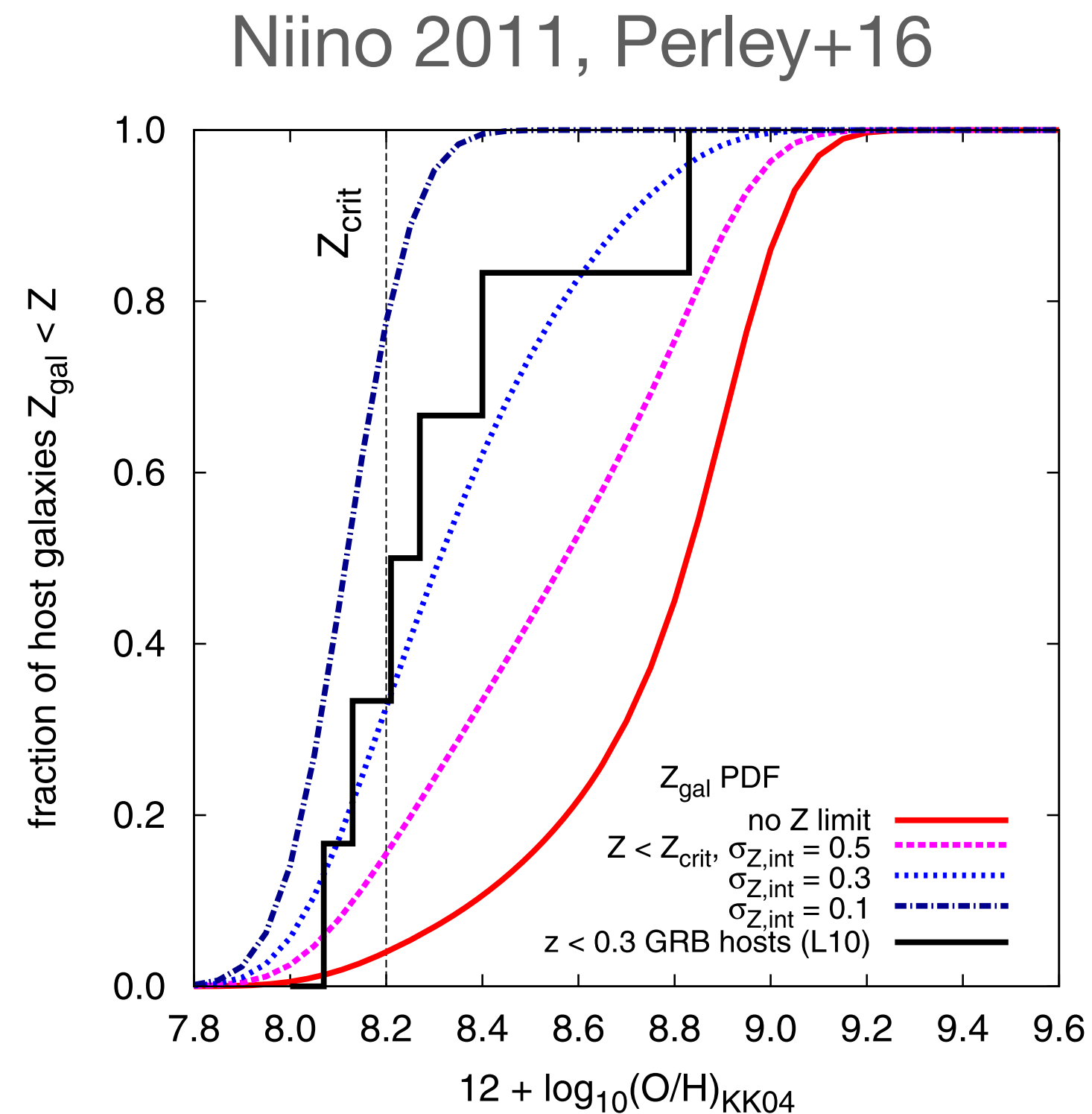


◀ 赤方偏移進化を規格化した質量-金属量関係:
GRBホストは系統的に低金属量側にオフセットしている

see also e.g., Vergani+17

Long-GRBホスト銀河は低金属量寄り

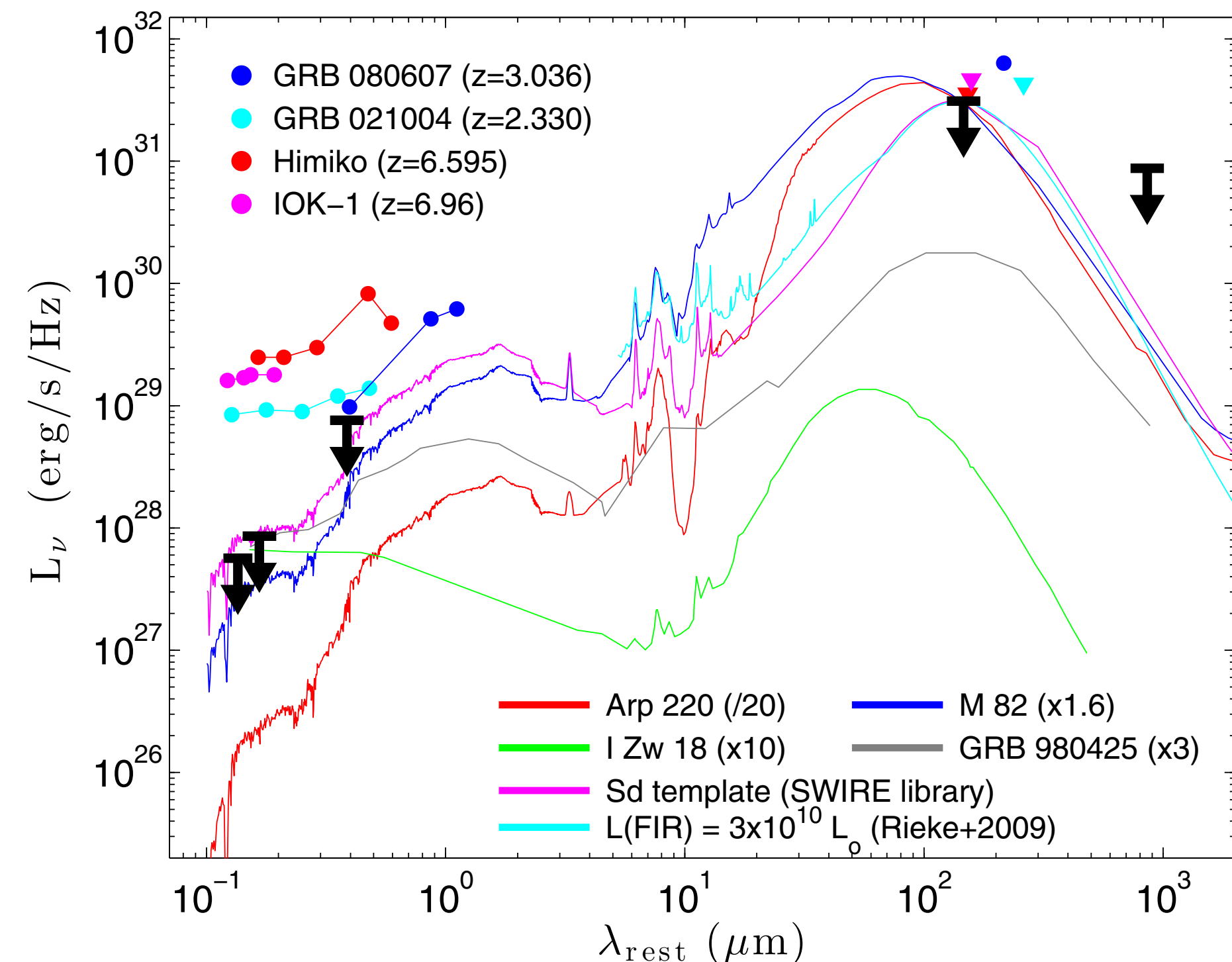
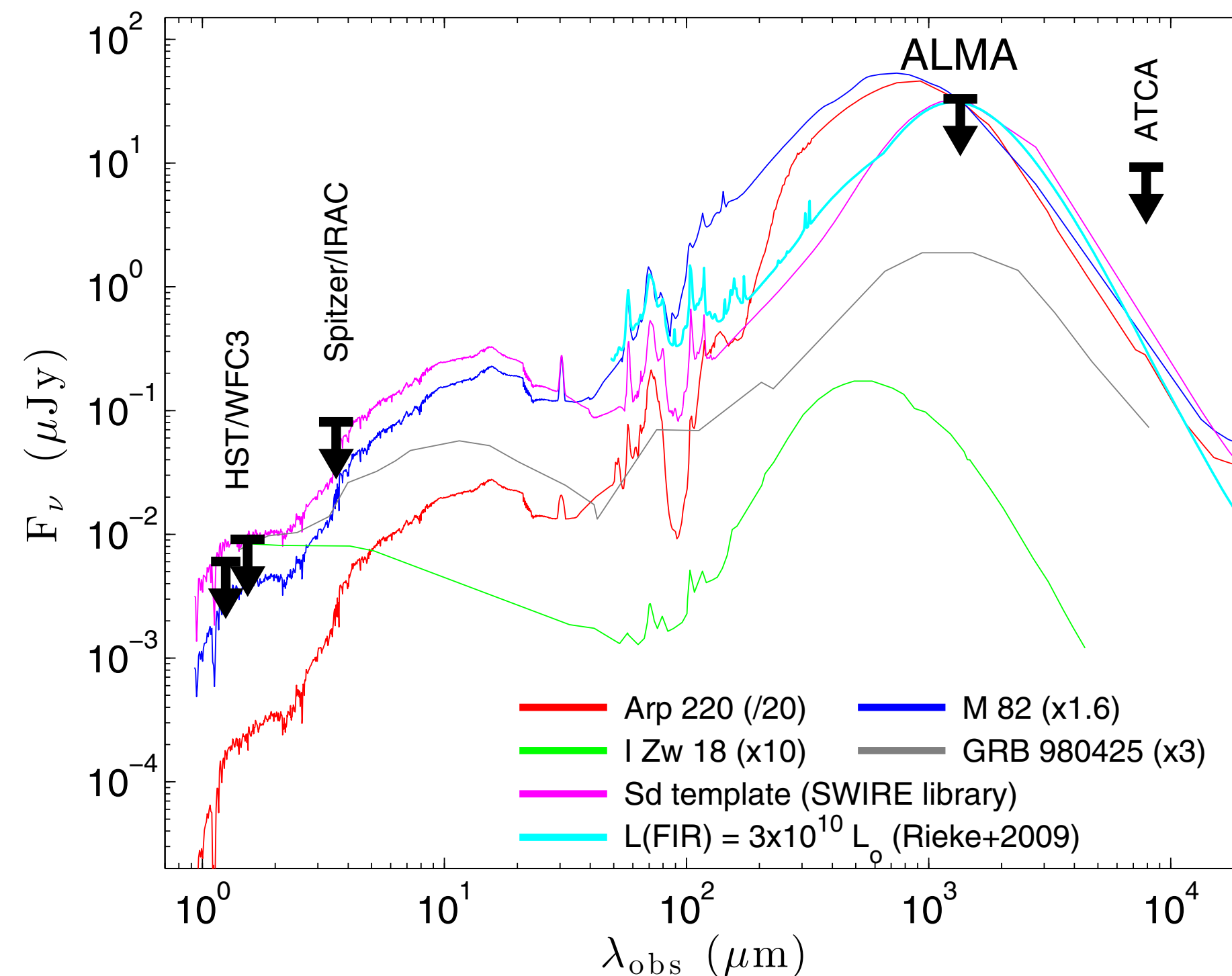
- GRBを引き起こす金属量上限を示唆（一部の高い金属量は非一様ISMで説明可能）
- 初期宇宙では、銀河の平均金属量が減少するため、この上限値は重要ではなくなると考えられる



- 金属量の上限値 $Z_{\text{crit}} = 0.3 Z_{\text{sun}}$
- 内部の金属量の分散: $\sigma = 0.3$ (~Milky Way)
を仮定すると、観測された分布をよく説明できる

GRB090423@z=8.2はALMAで未検出

- GRB090423のホスト銀河はアフターグロウ消失後、ALMA Band6 約3時間積分を含め未検出 ➡ SFR(UV) < 1 Msun/yr, SFR (IR) < 5 Msun/yr, Stellar mass < 5 x 10⁷ Msun
- 典型的なGRBホスト銀河は低質量で暗い銀河である可能性を示唆

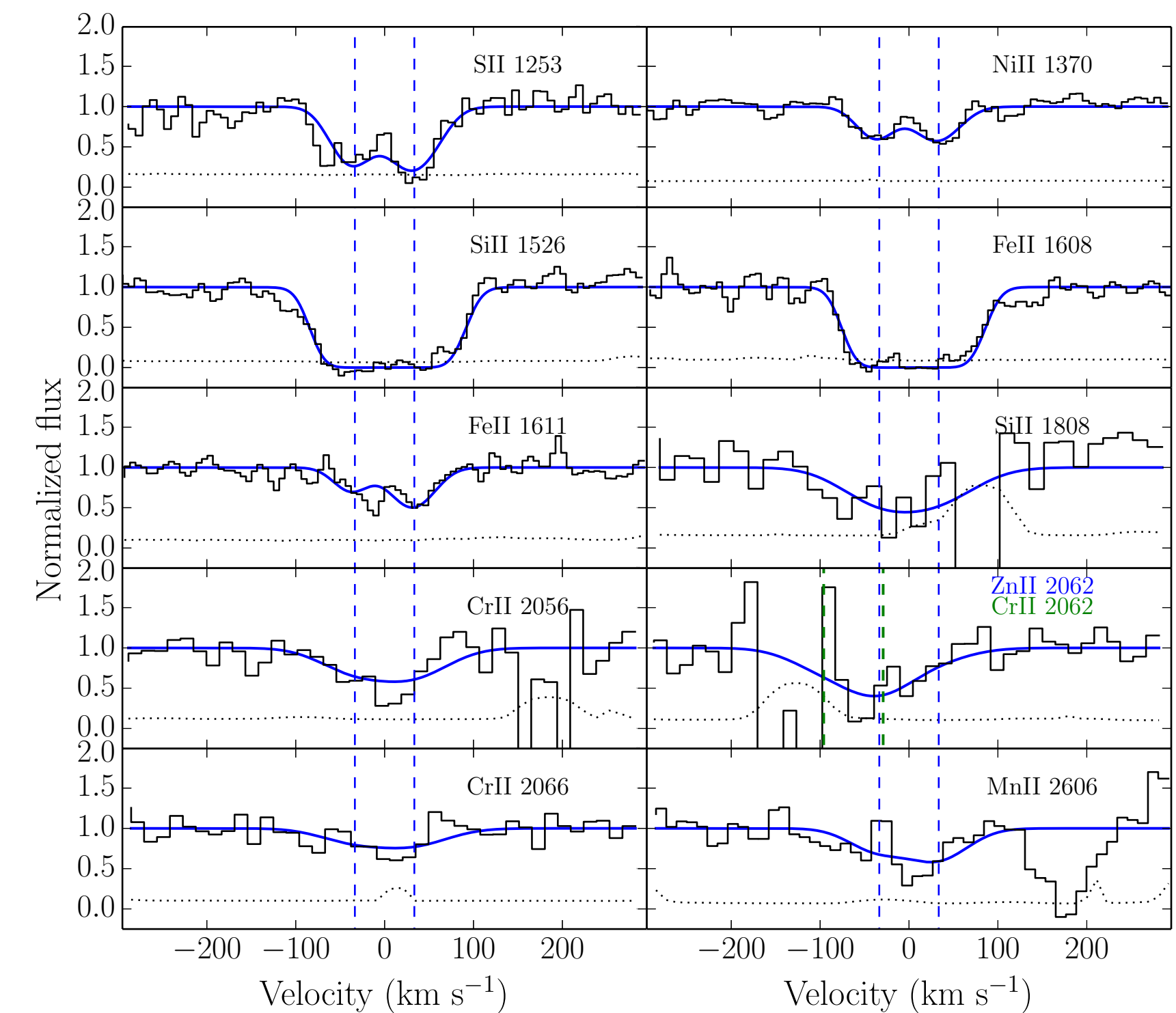
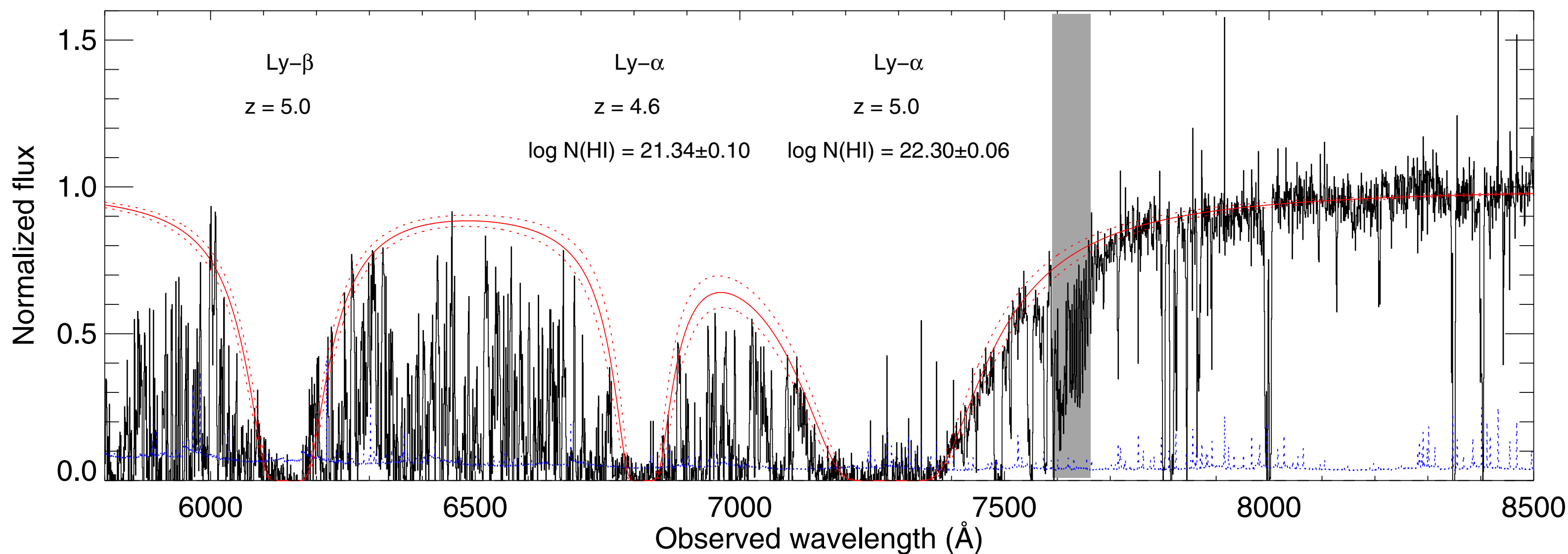


Berger+2014

GRBホスト銀河の吸収線解析

- ・ホスト銀河のISMはアフターグロースペクトル中にDLA+金属吸収線として観測される
- ・それぞれの吸収プロファイルフィットから各元素・イオンの柱密度を決定する

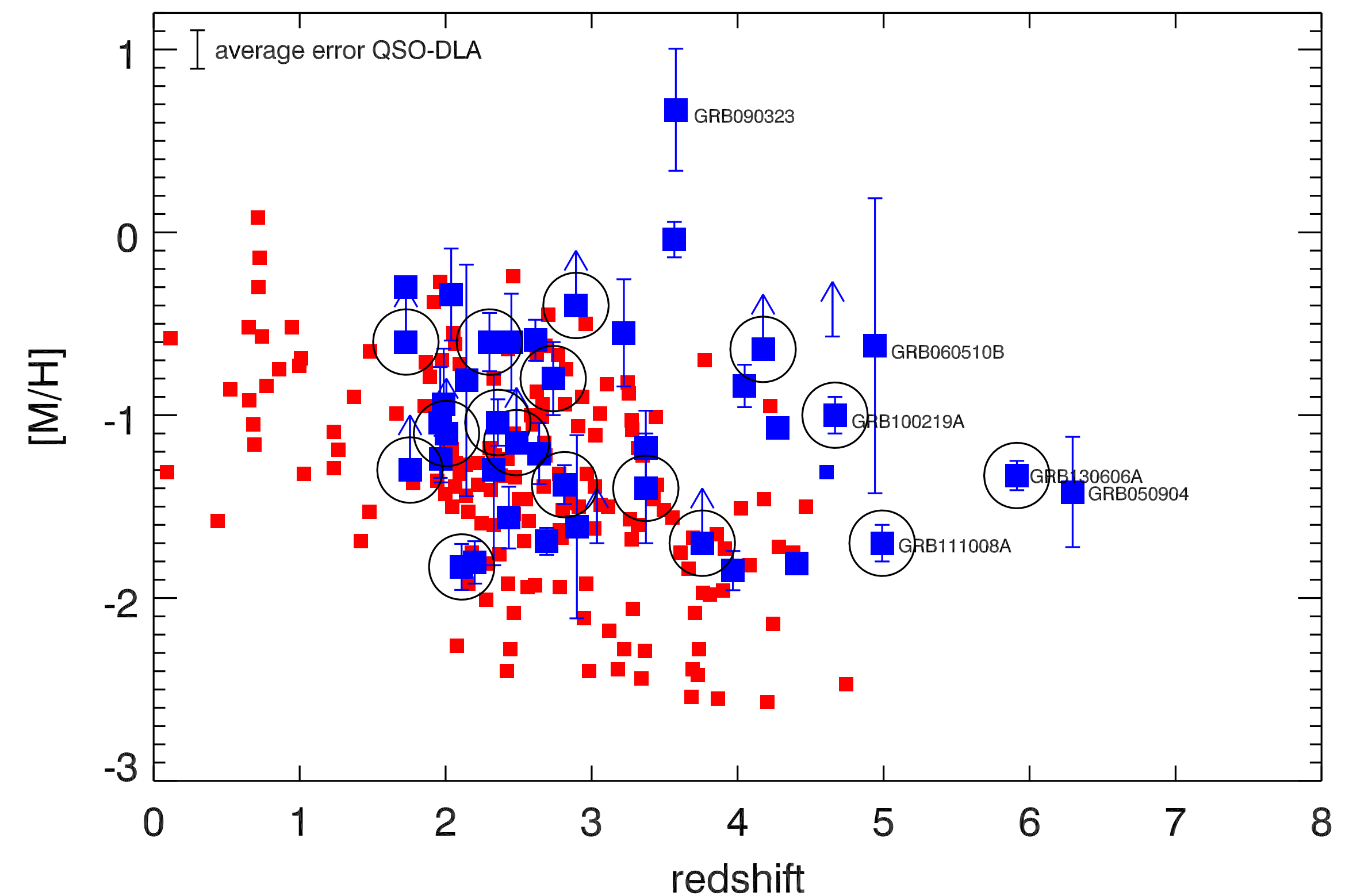
GRB 111008A $z=5.0$



Sparre et al. 2014

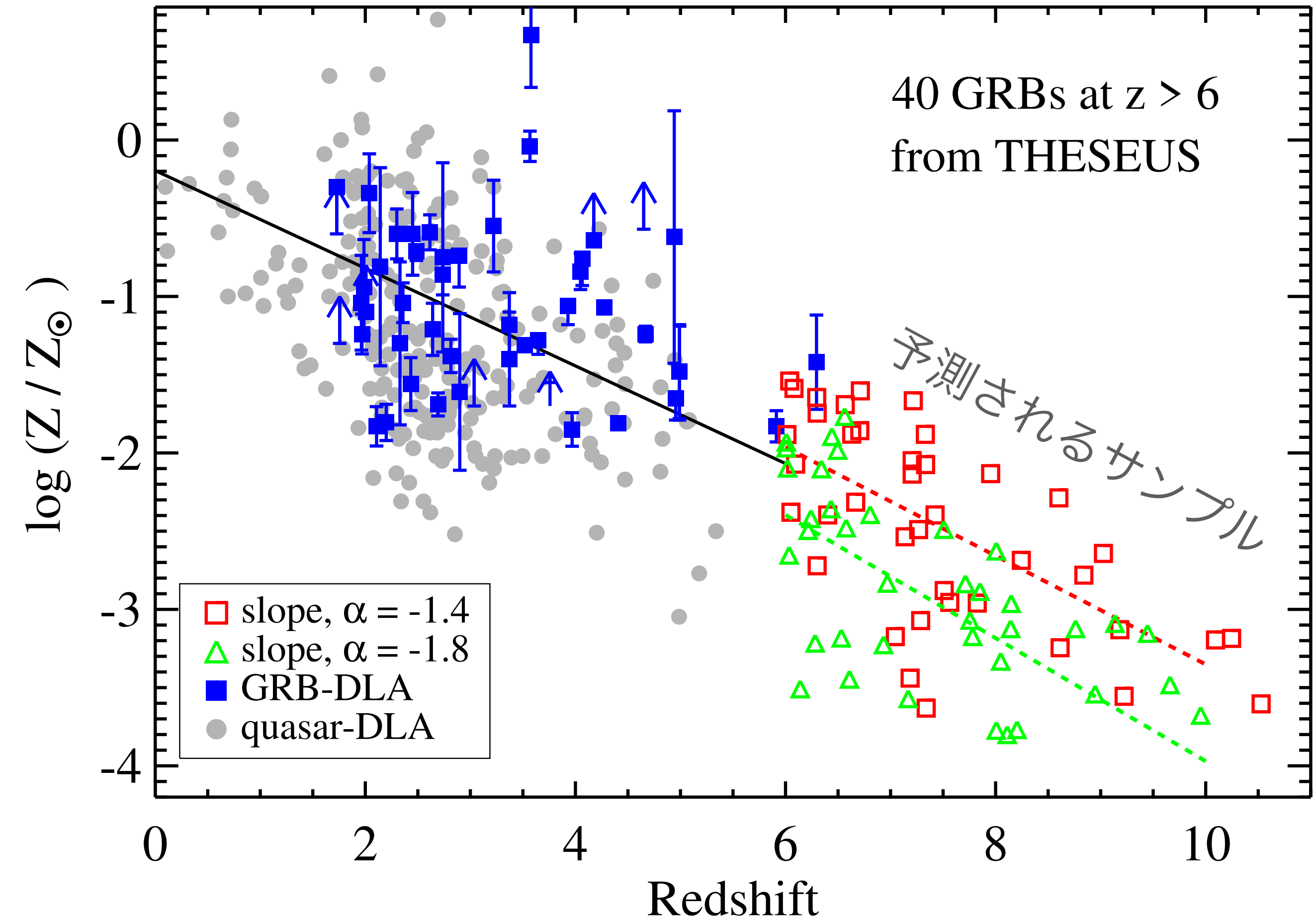
GRBホスト銀河の吸収線解析

- 現在のサンプルに限れば、GRB-host DLAは $z \sim 6$ まで遡っても、それなりに金属を含む (とはいえ、 < 0.1 solar)
- $z < \sim 5$ では、QSO視線上の介在DLAと比較すると系統的にmetal-richである可能性
 - ➡ GRB-DLAが銀河の内側の星形成領域を見ているのに対し、QSO視線の介在DLAは、前景銀河の周辺部を見ていると考ええると自然



Perley et al. 2016

GRBホスト銀河の吸収線解析



Tanvir+21

GRBで探るPop IIIの兆候

超高エネルギーGRB

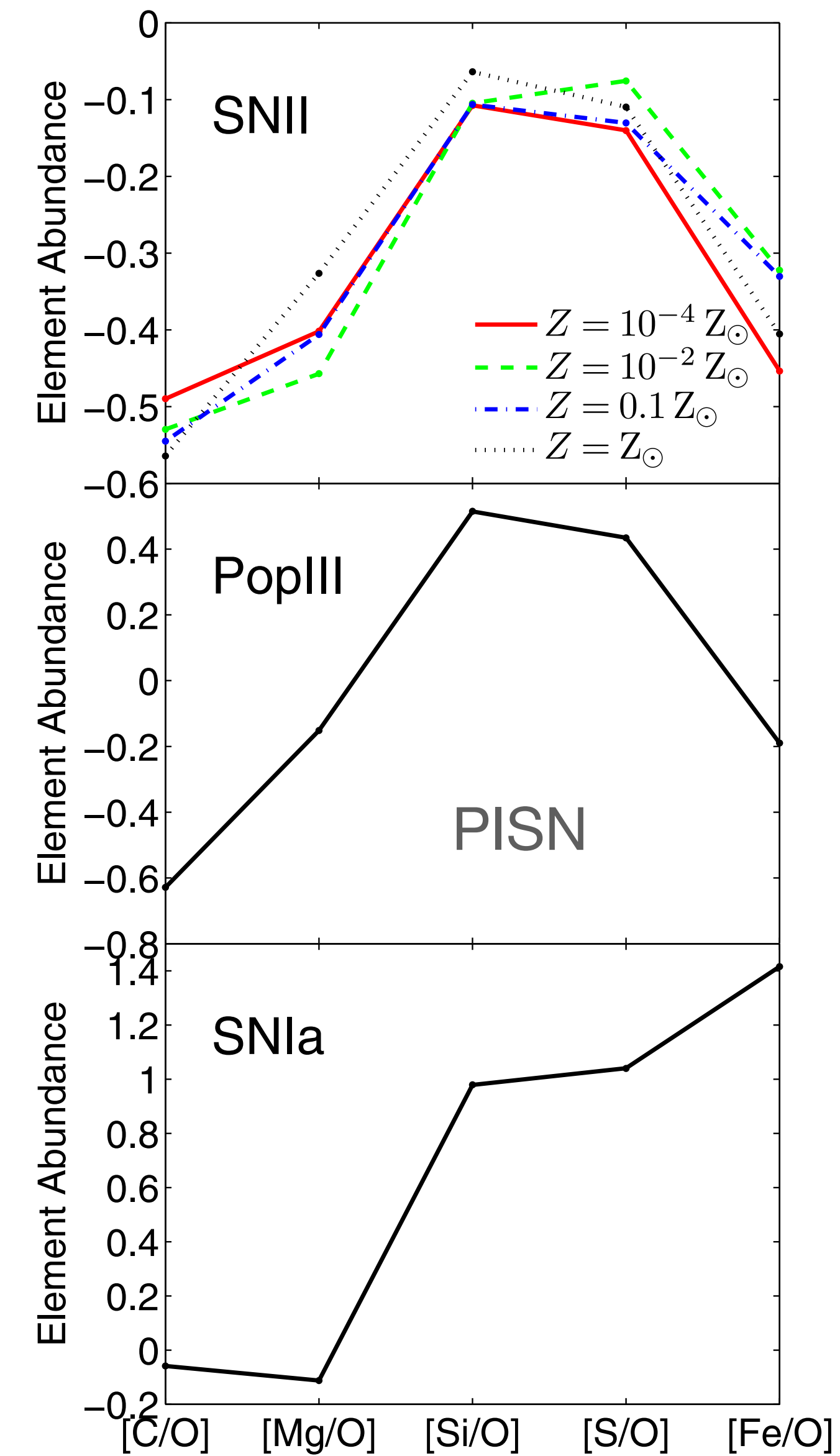
- Pop III星は非常に大質量 (数100Msun) と予想され、GRBも、Pop I/II星よりも数桁明るい可能性がある ($E \sim 10^{56} - 10^{57}$ erg; e.g., Mészáros+10)

長時間にわたるガンマ線放射

- 外層の質量損失が少ないため、大きな半径のまま重力崩壊をする
と予想される。結果として、ジェットが外挿を貫通するまでに時間がかかり放射が長時間持続する可能性がある (Yoon+15)。

アフターグロースペクトル：

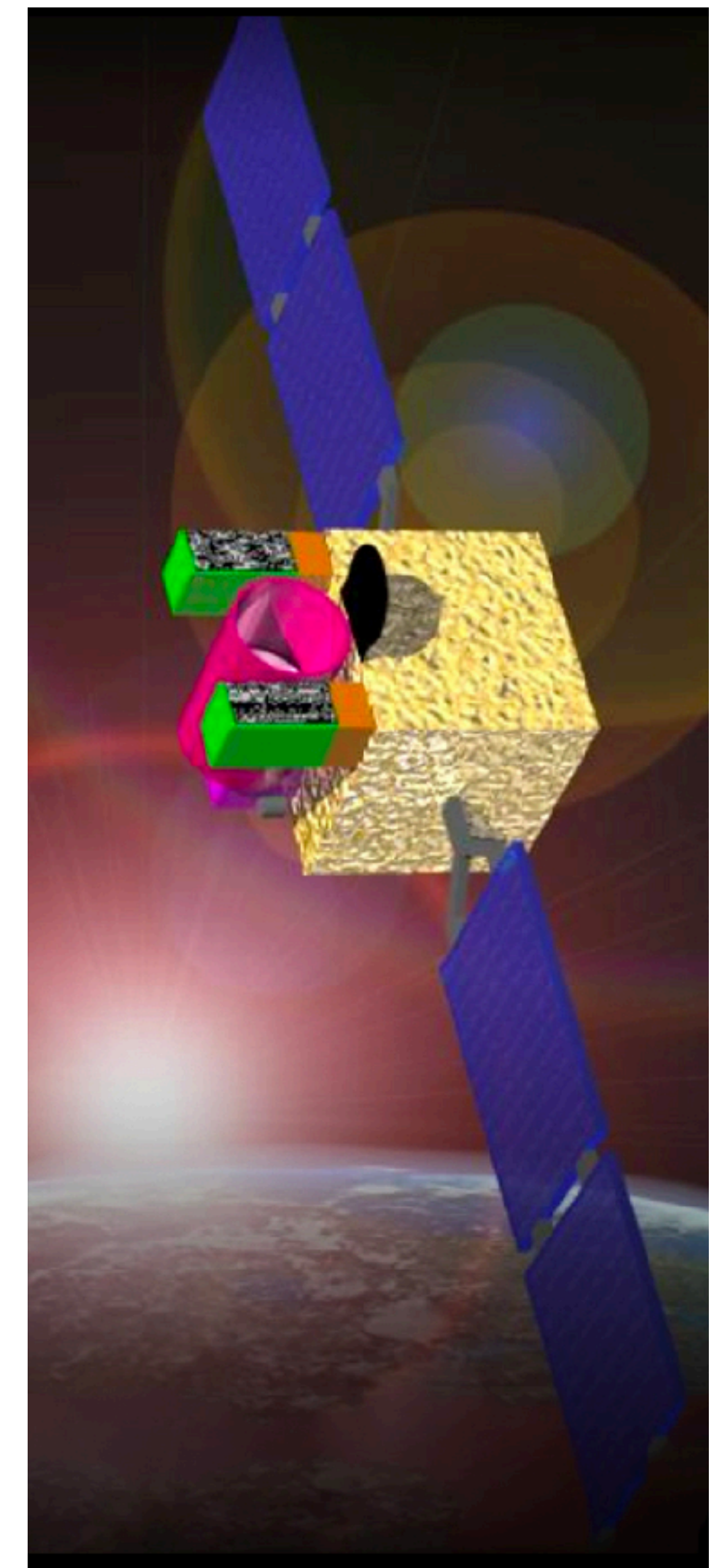
- Pop III星由来のGRBであれば、視線上のISMが $Z \ll 10^{-3} Z_{\odot}$ を示すと期待される。
- Pop I/II由来のアフターグロースペクトルにPop III的な元素合成の兆候が見られる可能性。



Ma et al. 2015

HiZ-GUNDAM

- ・ 高赤方偏移 ($z \sim > 7$) のGRBを探索することを目的とした衛星ミッション
- ・ GRBを利用して初期宇宙の宇宙再電離や重元素合成、銀河形成・進化の改名を目指す
- ・ 2030年ごろの打ち上げを予定
- ・ 広視野X線モニターでX線突発天体を検出し、自動的に可視光・近赤外線望遠鏡によりアフターグローを追観測
- ・ GRB ($z > 6$) 検出期待値は $\sim 26/\text{yr}$ 、アフターグロー検出は $\sim 13/\text{yr}$



ISAS/JAXA

詳しくは米徳さんの発表、HiZ GUNDAMチームのポスターなど

HiZ-GUNDAM 観測の流れ

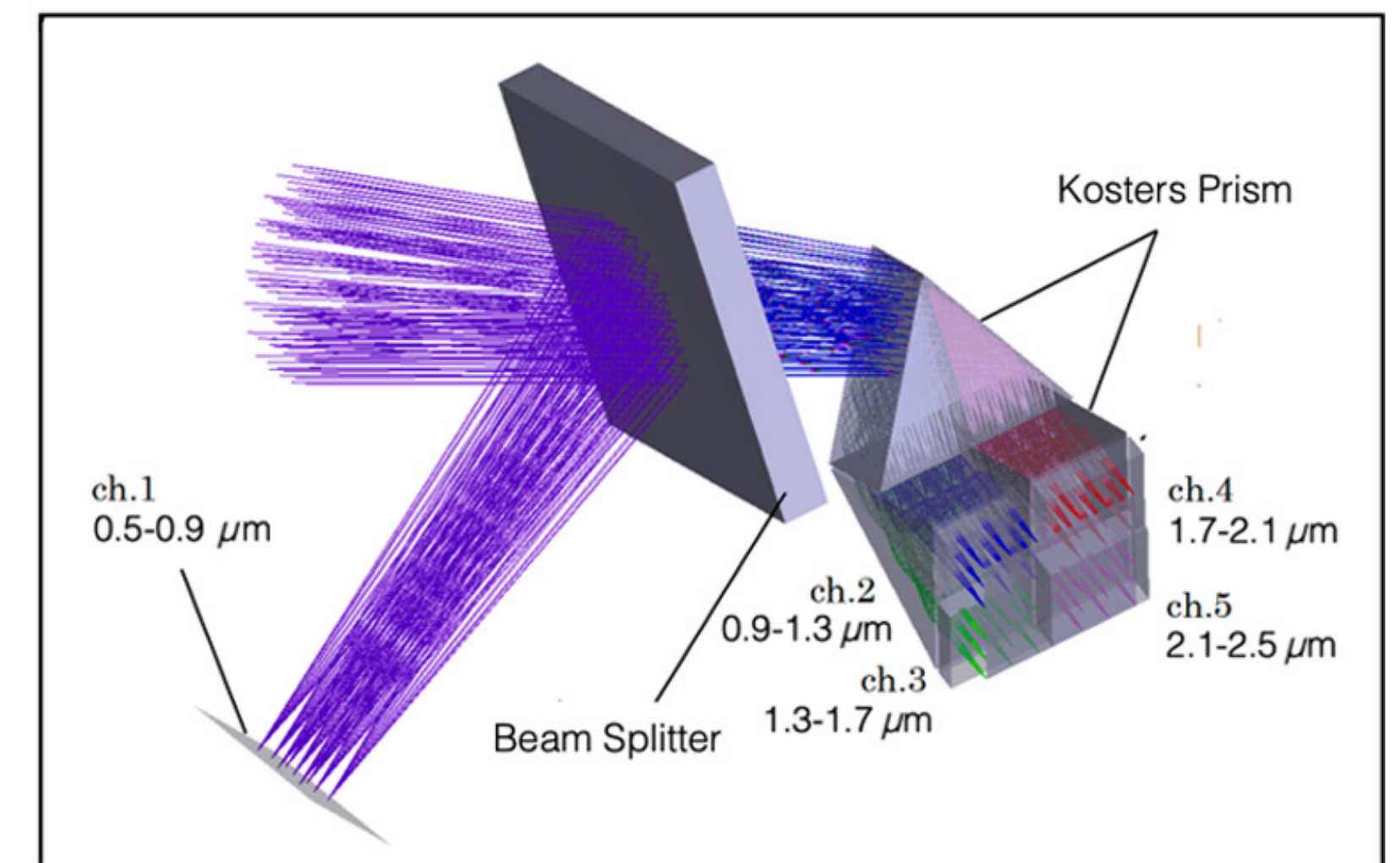
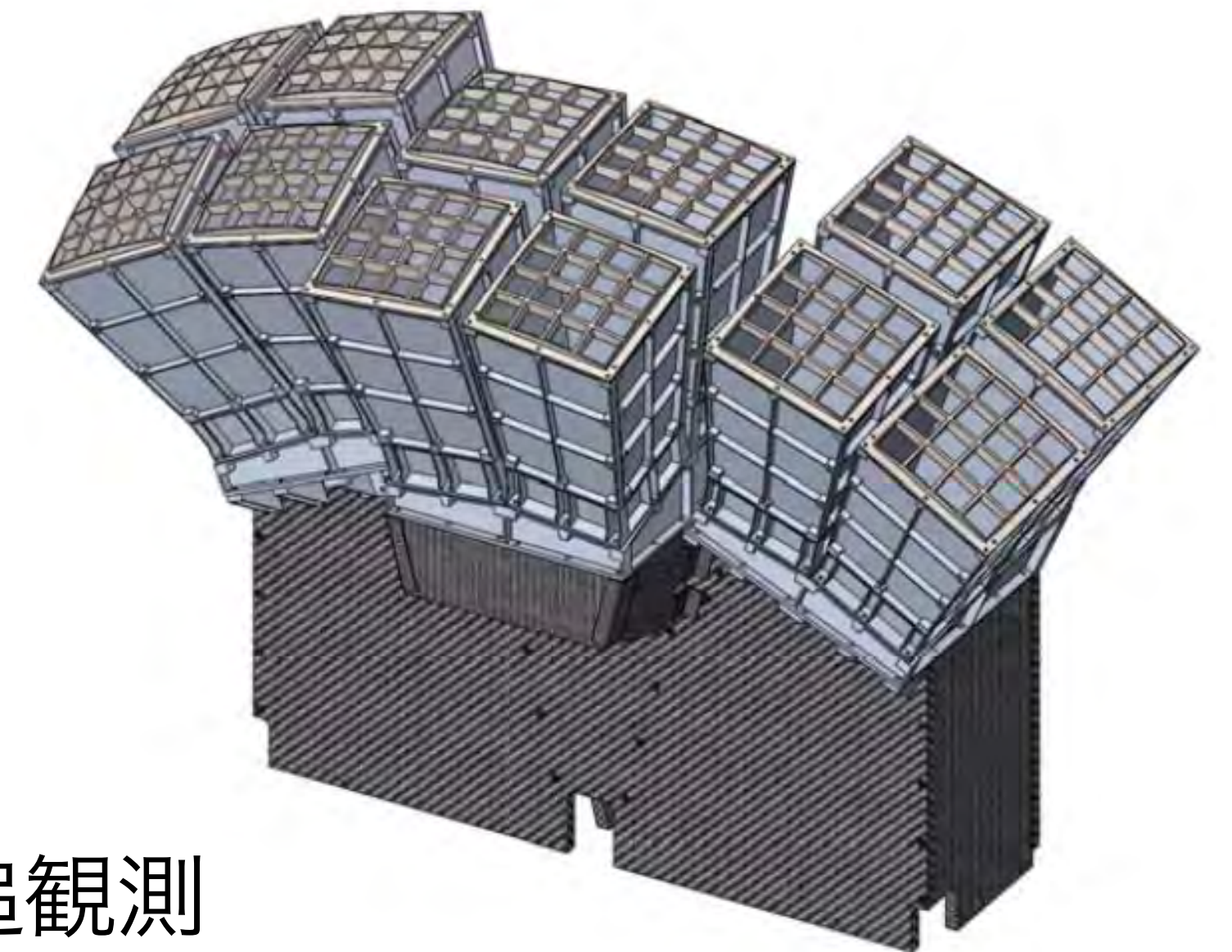
- ① 広視野X線モニター (EAGLE) でX線突発天体を検出
視野 約0.5 str (1640 deg²)

↓ 300秒以内に、自律的に姿勢変更

- ② 可視・近赤外望遠鏡 (MONSTER) でGRBアフターグローを追観測
10分積分限界等級 21mag

↓ 1時間以内に位置 (精度~2秒)、明るさ、赤方偏移を
アラート

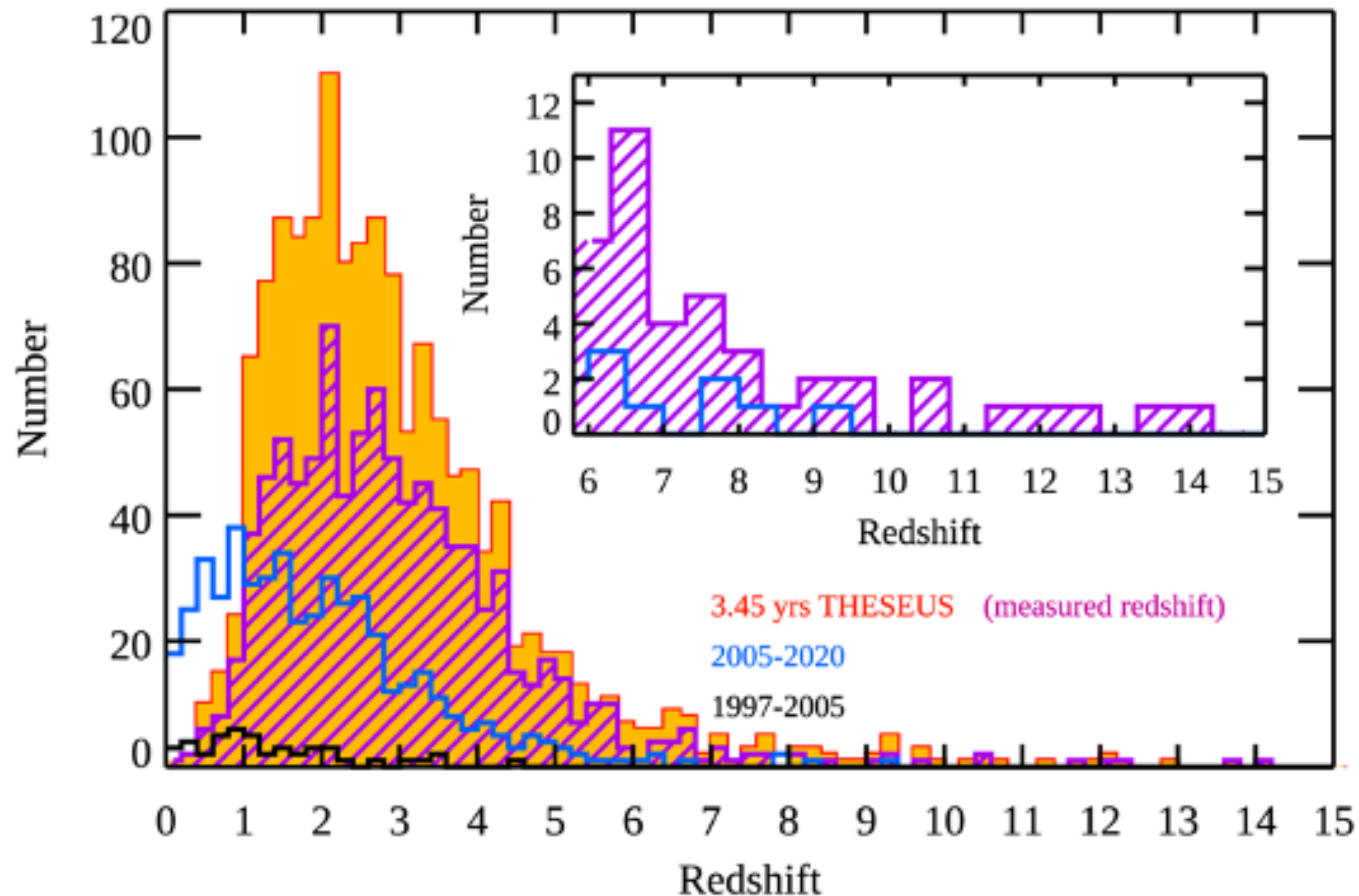
- ③ 地上の大型望遠鏡で詳細な分光観測



Tsumura+25, SPIE

次世代探査機によるGRB探査

ESA主導のTHESEUSによる検出数予測（HiZ GUNDAMとコンパラ）



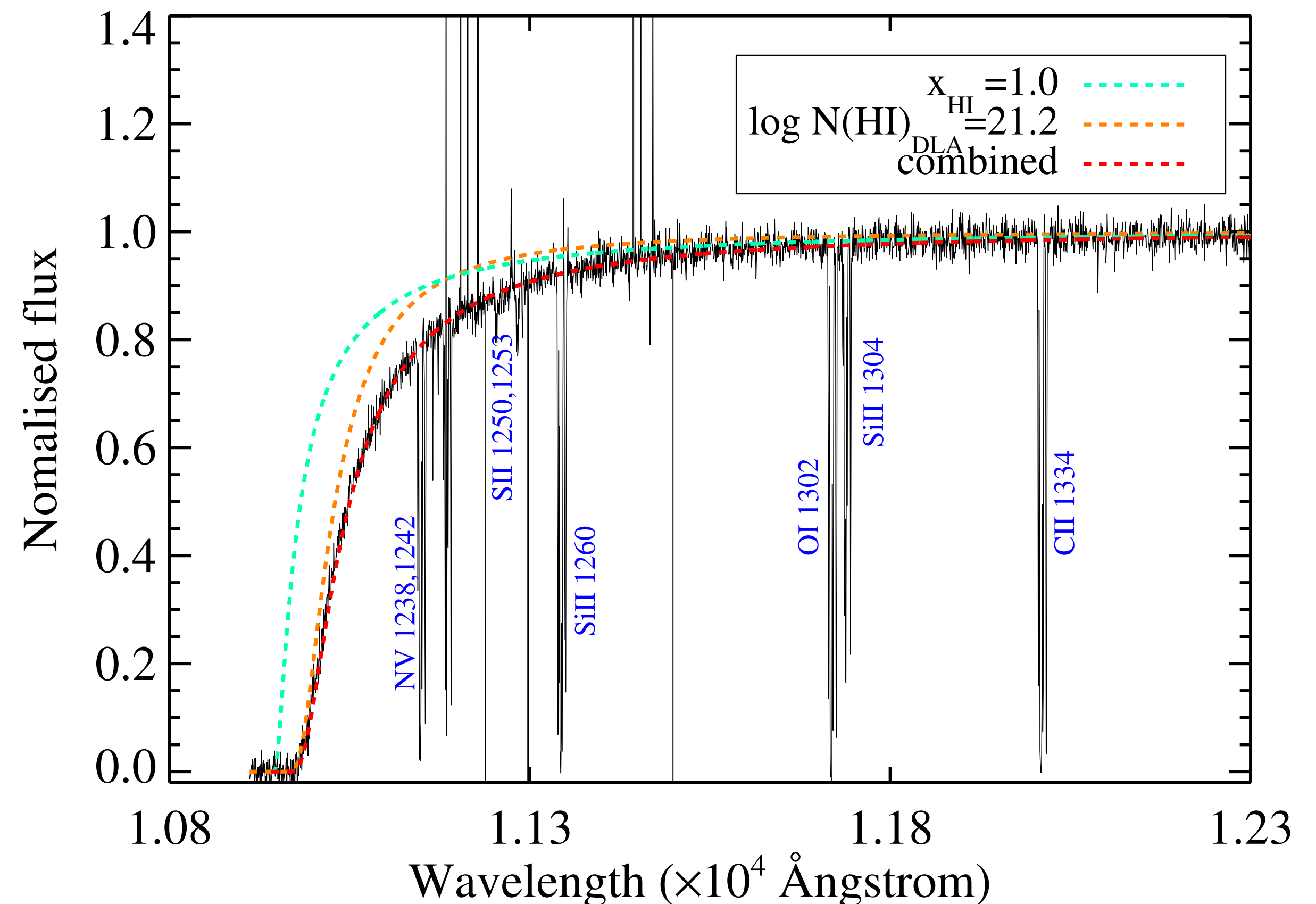
Tanvir et al. 2021

30m級望遠鏡によるアフターグロー分光観測

- TMT/IRIS ($R \sim 8000$)、E-ELT/MICADO ($R < 20000$) 観測 (with AO) によって極めて高いS/Nのスペクトルが得られる
- 種々の金属吸収線に加えて、 $\text{Ly}\alpha$ ダンピングウィングの形からホストDLAの水素柱密度も高い精度で制限可能
 - IGMも制限できる→明日の梅田さんTalk
- 金属量 (X/H) や金属組成が高精度に測定できると期待できる

E-ELT/MICADO (w/MAORY) 観測により期待される残光スペクトル:

$z=8.0$, $J_{AB}=20$, 30-minutes, ~ 0.5 日後



Tanvir et al. 2021

まとめ

- **GRBアフターグロー**は、（クエーサーに加えて）そのホスト銀河内の星間物質 (ISM) や視線上の介在吸収体の金属量や組成を、吸収線分光によって調べるための重要なツールである。
- （背景光源としてのクエーサーと比較して）**GRB**は、1) 宇宙最初期の星形成が始まった時代にまで発生しうる、2) 極めて暗く低質量な銀河のガスを調べることができる、という点で背景光源としてのクエーサーに対して重要な利点を持つ。
- HiZ-GUNDAM (やTHESEUSなど) による迅速なアラートと大型 (特に30m) 級望遠鏡によるフォローアップ分光観測により、極めて高い精度で初期宇宙の化学進化やPopIIIの兆候の探査が可能になる。