

ALMA reveals weak [NII] emission in “typical” galaxies and intense starbursts at $z = 5-6$

R, Pavesi et al. 2016, arXiv: 1607.02520v3
accepted for publication in the Astrophysical Journal

Journal Club (2016/11/25)

山口裕貴

0. Abstract

ABSTRACT

We report interferometric measurements of [NII] 205 μm fine-structure line emission from a representative sample of three galaxies at $z = 5\text{--}6$ using the Atacama Large (sub)Millimeter Array (ALMA). These galaxies were previously detected in [CII] and far-infrared continuum emission and span almost two orders of magnitude in star formation rate (SFR). Our results show at least two different regimes of ionized inter-stellar medium properties for galaxies in the first billion years of cosmic time, separated by their $L_{\text{[CII]}}/L_{\text{[NII]}}$ ratio. We find extremely low [NII] emission compared to [CII] ($L_{\text{[CII]}}/L_{\text{[NII]}} = 68^{+200}_{-28}$) from a “typical” $\sim L_{\text{UV}}^*$ star-forming galaxy, likely directly or indirectly (by its effect on the radiation field) related to low dust abundance and low metallicity. The infrared-luminous modestly star-forming Lyman Break Galaxy (LBG) in our sample is characterized by an ionized-gas fraction ($L_{\text{[CII]}}/L_{\text{[NII]}} \lesssim 20$) typical of local star-forming galaxies and shows evidence for spatial variations in its ionized-gas fraction across an extended gas reservoir. The extreme SFR, warm and compact dusty starburst AzTEC-3 shows an ionized fraction higher than expected given its star-formation rate surface density ($L_{\text{[CII]}}/L_{\text{[NII]}} = 22 \pm 8$) suggesting that [NII] dominantly traces a diffuse ionized medium rather than star-forming HII regions in this type of galaxy. This highest redshift sample of [NII] detections provides some of the first constraints on ionized and neutral gas modeling attempts and on the structure of the inter-stellar medium at $z = 5\text{--}6$ in “normal” galaxies and starbursts.

1. Introduction

- ビッグバン後 10 億年程度の宇宙は銀河進化を理解する上で重要な時代
 - ➔ Galaxy assembly の初期段階を直接制限できる！
 - 星形成の初期段階, IGM からの原始ガス流入, ISM の化学進化が進んでいない時代
 - この時代で, ISM と星形成の関係を調べるのは銀河形成モデルのテストベッド
 - $z \sim 2-3$ の galaxy assembly の時代と相補的
- ➔ 銀河の ISM の物理状態を正確に診断することが必要!

1. Introduction

- これまで, $z > 5$ の ISM 診断のターゲットは SMG やクエーサー母銀河に限られていた
 - ➔ 技術の発達で $z > 5$ の “普通の” 星形成銀河もターゲットにできるようになってきた
- どんな手法で診断するのが良いか？
 - CO excitation ladder? ➔ $z > 5$ での観測は難しい
 - サブミリ・遠赤外微細構造棋戦
 - ➔ ALMA で観測可能, ダスト減光の影響が小さい
複数を組み合わせることで, 物理状態を制限可能
- 本論文では [NII] 205 μm , [CII] 158 μm を利用

1. Introduction

- [NII]
 - N^+ のイオン化エネルギー: 14.5 eV
 - ➔ 広がった HII 領域の envelope, 原子・分子雲の電離表面, WIM, etc...
- [CII]
 - C^+ のイオン化エネルギー: 11.3 eV
 - ➔ 電離領域, PDR, CNM, CO-dark cloud, etc...
- [CII]158/[NII]205
 - HII 領域において, 両者の臨界密度はほぼ同じ ($n_{\text{crit}} \sim 50 \text{ cm}^{-3}$)
 - ➔ [CII] が電離領域から放出されている割合の指標

1. Introduction

- 本論文では $z = 5-6$ の 3 つの星形成銀河について議論する
 - Hyper-luminous nuclear starburst (AzTEC-3; $\text{SFR} \sim 1100 \text{ M}_{\odot}/\text{yr}$, $L_{\text{FIR}} \sim 10^{13} L_{\odot}$)
 - Dusty, high star-forming LBG (HZ10; $\text{SFR} \sim 170 \text{ M}_{\odot}/\text{yr}$, $L_{\text{FIR}} \sim 10^{12} L_{\odot}$)
 - Typical less star-forming LBG (LBG-1; $\text{SFR} \sim 10-30 \text{ M}_{\odot}/\text{yr}$, $L_{\text{FIR}} \sim 10^{11} L_{\odot}$)
- 2 つの LBG は $z = 5-6$ の $\sim L_{\text{UV}}^*$ の main sequence 星形成銀河
- 3 つすべてで, [CII] $158 \mu\text{m}$ が検出済み

2. Observation

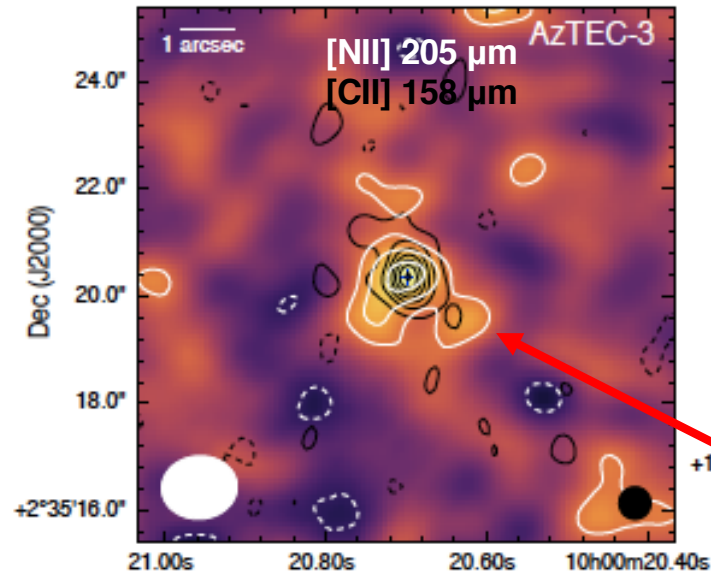
- [NII] 205 μm
 - ALMA Band 6 (Cycle 3)
 - アンテナ台数: 32-47

	$\sigma_{\text{cont.}}$ [$\mu\text{Jy/b}$]	σ_{line} ($\sim 40 \text{ km/s}$) [mJy/b]	beam size
AzTEC-3	20	0.34	1.4'' $\times$ 1.2''
HZ10	35	0.20	1.7'' $\times$ 1.2''
LBG-1	16	0.21	1.3'' $\times$ 1.1''

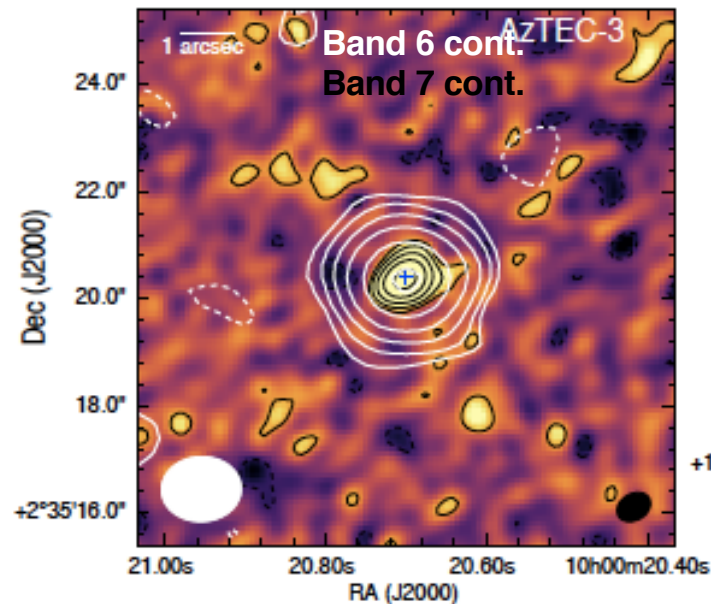
- [CII] 158 μm
 - ALMA archival data (Cycle 0, Cycle 1)
 - Riechers + 2014, Capak + 2015

3. Results

AzTEC-3

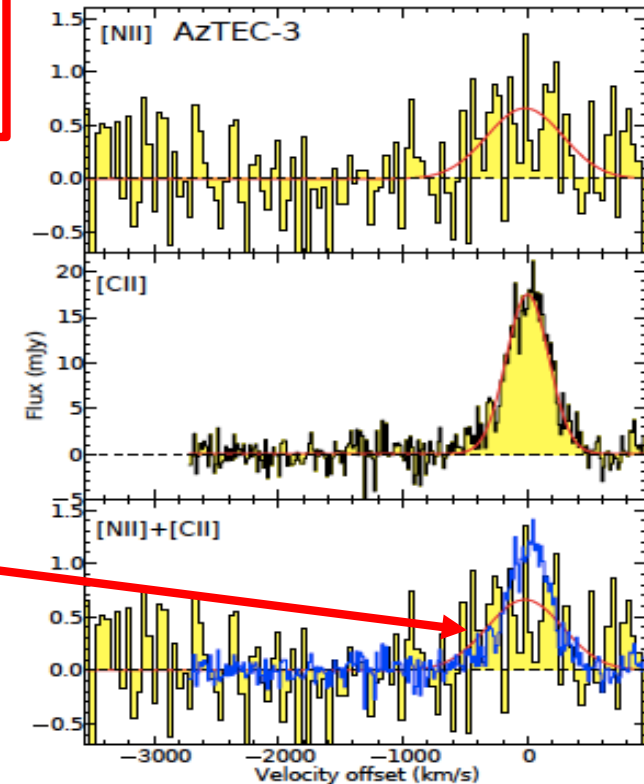


[CII] よりも広がった放射？



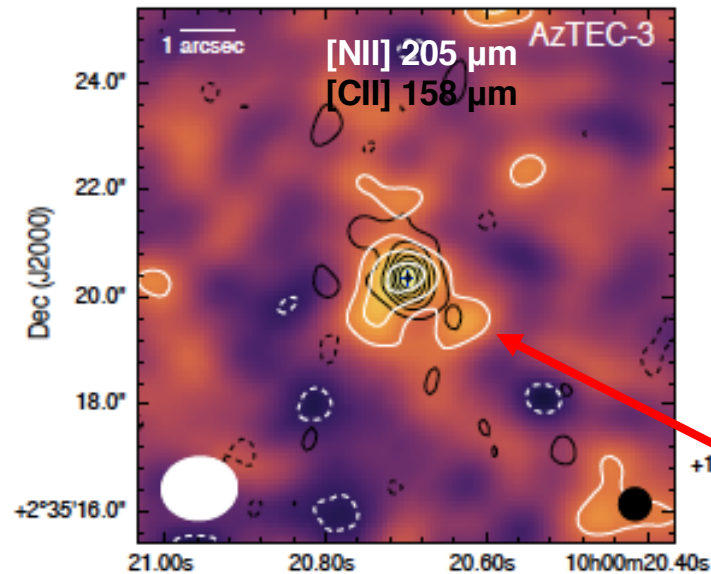
[CII] よりも広い速度幅？

Quantity	AzTEC-3
[CII] line properties	
ν_{obs} (GHz)	301.771 ± 0.006
Redshift	5.29795 ± 0.00013
$S_{\text{[CII]}}$ (mJy)	17.5 ± 0.7
$FWHM_{\text{[CII]}}$ (km s^{-1})	410 ± 15
$I_{\text{[CII]}}$ (Jy km s^{-1})	7.8 ± 0.4
$L_{\text{[CII]}}$ ($10^9 L_{\odot}$)	6.4 ± 0.3
deconvolved size	$(0.65'' \pm 0.06'') \times (0.33'' \pm 0.07'')$
size (kpc^2)	$(4.0 \pm 0.4) \times (2.1 \pm 0.4)$
[NII] line properties	
ν_{obs} (GHz)	232.02 ± 0.06
$S_{\text{[NII]}}$ (mJy)	0.65 ± 0.14
$FWHM_{\text{[NII]}}$ (km s^{-1})	660 ± 180
$I_{\text{[NII]}}$ (Jy km s^{-1})	0.46 ± 0.16
$L_{\text{[NII]}}$ ($10^9 L_{\odot}$)	0.29 ± 0.10
$L_{\text{[CII]}}/L_{\text{[NII]}}$	22 ± 8



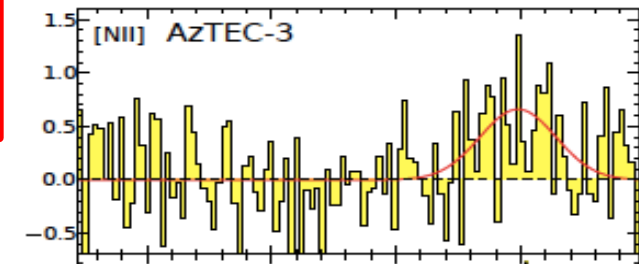
3. Results

AzTEC-3

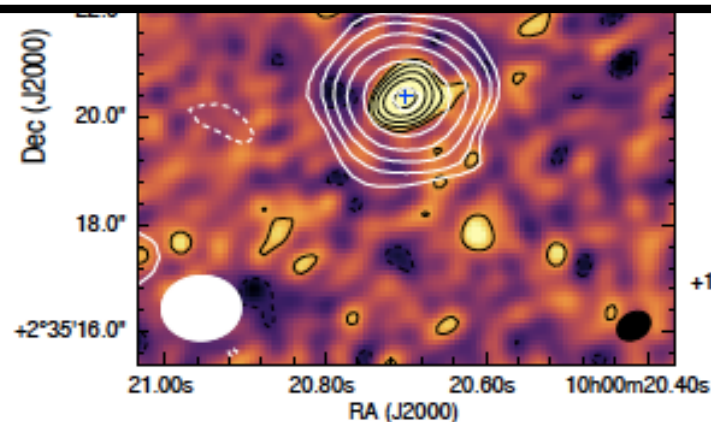


Quantity	AzTEC-3
[CII] line properties	
ν_{obs} (GHz)	301.771 ± 0.006
Redshift	5.29795 ± 0.00013
$S_{\text{[CII]}}$ (mJy)	17.5 ± 0.7
$FWHM_{\text{[CII]}}$ (km s^{-1})	410 ± 15
$I_{\text{[CII]}}$ (Jy km s^{-1})	7.8 ± 0.4
$L_{\text{[CII]}}$ ($10^9 L_{\odot}$)	6.4 ± 0.3
deconvolved size	$(0.65'' \pm 0.06'') \times (0.33'' \pm 0.07'')$
size (kpc^2)	$(4.0 \pm 0.4) \times (2.1 \pm 0.4)$
[NII] line properties	
ν_{obs} (GHz)	232.02 ± 0.06
$S_{\text{[NII]}}$ (mJy)	0.65 ± 0.14
$FWHM_{\text{[NII]}}$ (km s^{-1})	660 ± 180
$I_{\text{[NII]}}$ (Jy km s^{-1})	0.46 ± 0.16
$L_{\text{[NII]}}$ ($10^9 L_{\odot}$)	0.29 ± 0.10
$L_{\text{[CII]}}/L_{\text{[NII]}}$	22 ± 8

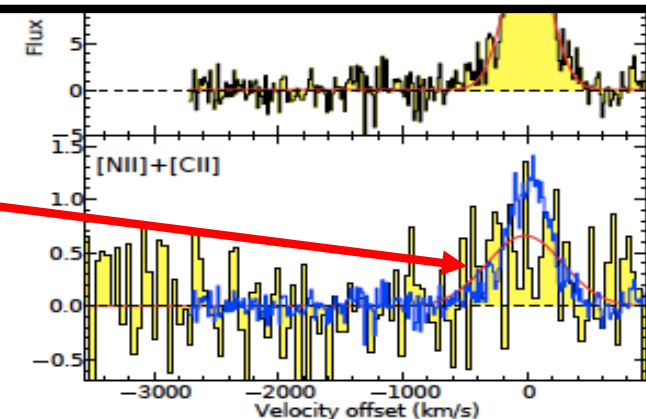
[CII] よりも広がった放射？



[NII] 205 μm と [CII] 158 μm は異なるガスから放射されている？

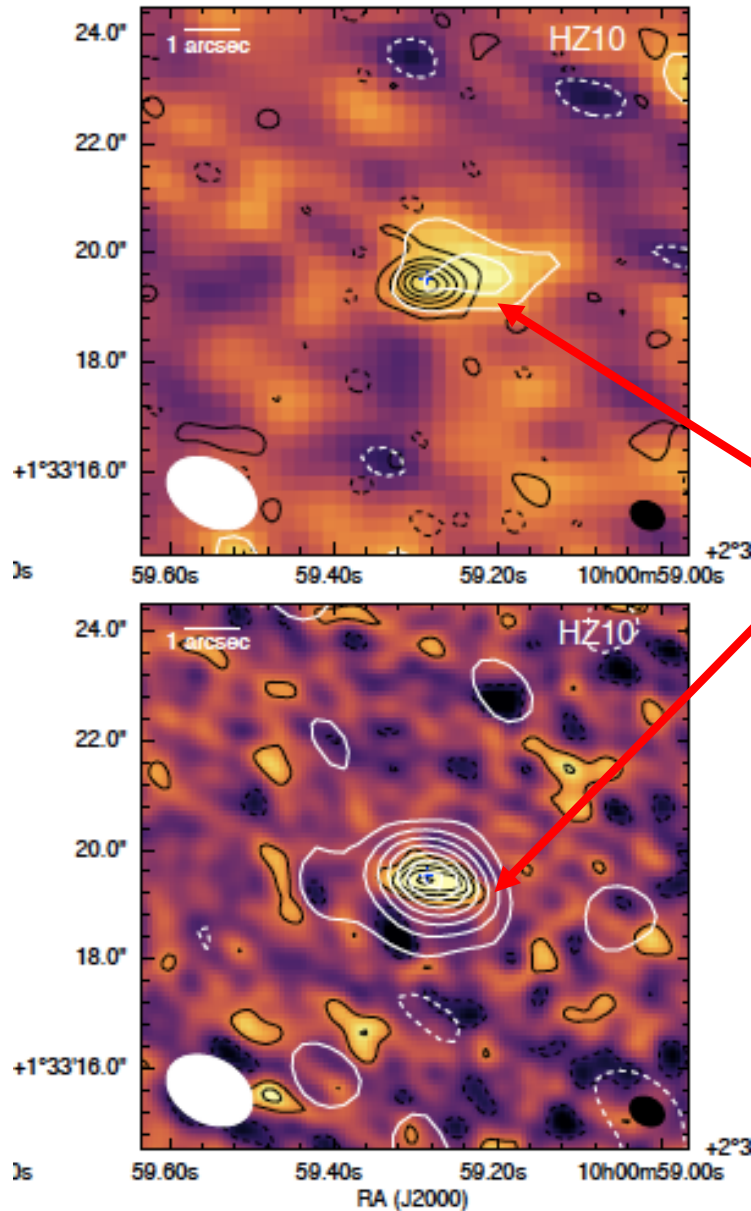


[CII] よりも広い速度幅？



3. Results

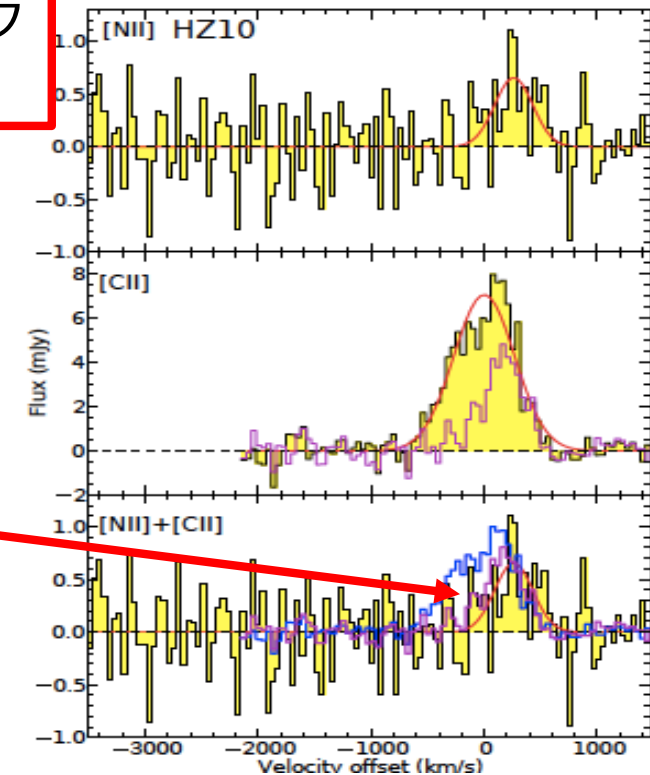
HZ10



Quantity	HZ10
[CII] line properties	
ν_{obs} (GHz)	285.612 ± 0.013
Redshift	5.6543 ± 0.0003
$S_{\text{[CII]}}$ (mJy)	7.1 ± 0.3
$FWHM_{\text{[CII]}}$ (km s ⁻¹)	630 ± 30
$I_{\text{[CII]}}$ (Jy km s ⁻¹)	4.5 ± 0.3
$L_{\text{[CII]}}$ (10 ⁹ L _⊙)	4.0 ± 0.3
deconvolved size	$(0.80'' \pm 0.07'') \times (0.42'' \pm 0.06'')$
size (kpc ²)	$(4.8 \pm 0.4) \times (2.5 \pm 0.4)$
[NII] line properties	
ν_{obs} (GHz)	219.39 ± 0.04
$S_{\text{[NII]}}$ (mJy)	0.66 ± 0.18
$FWHM_{\text{[NII]}}$ (km s ⁻¹)	400 ± 120
$I_{\text{[NII]}}$ (Jy km s ⁻¹)	0.31 ± 0.11
$L_{\text{[NII]}}$ (10 ⁹ L _⊙)	0.21 ± 0.08
$L_{\text{[CII]}}/L_{\text{[NII]}}$	19 ± 6 ("red": 14 ± 5)

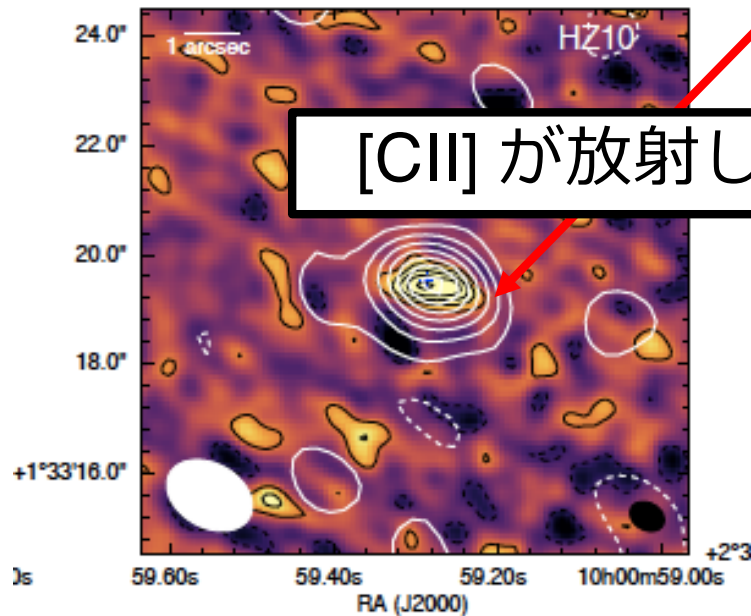
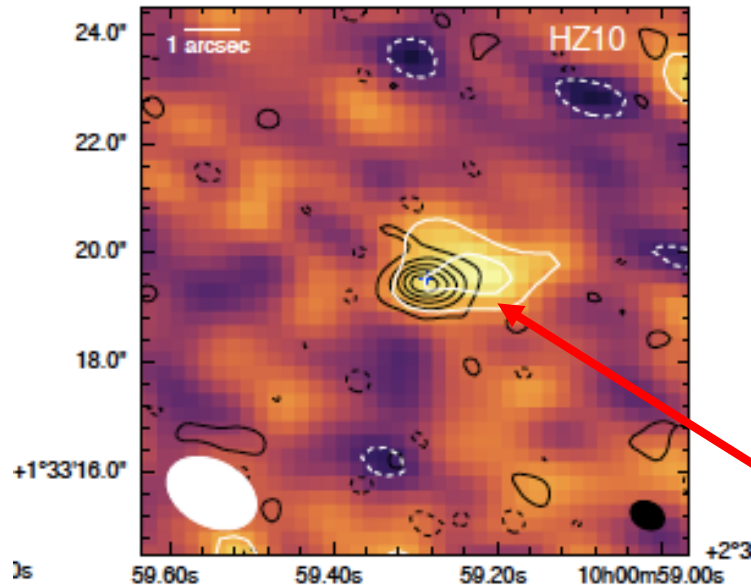
[CII], FIR のピーク
とオフセット

[CII] の速度と異
なる速度成分



3. Results

HZ10

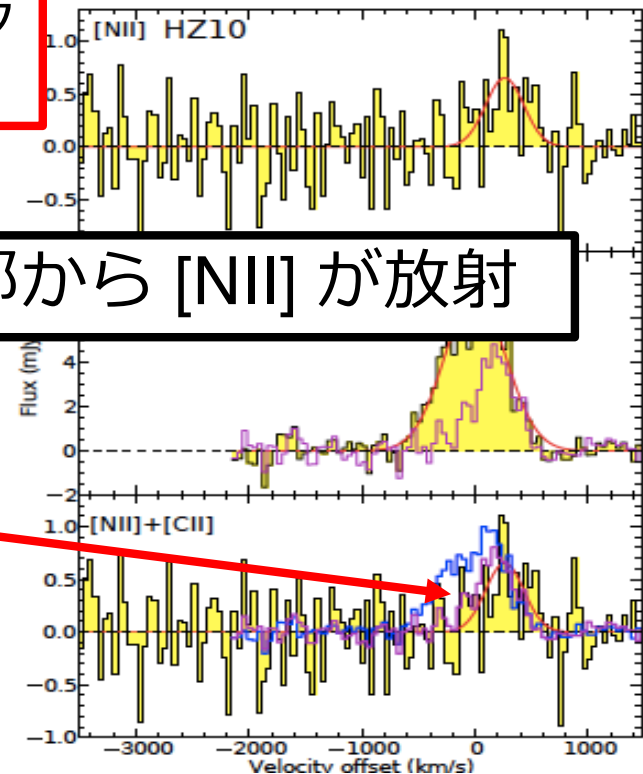


Quantity	HZ10
[CII] line properties	
ν_{obs} (GHz)	285.612 ± 0.013
Redshift	5.6543 ± 0.0003
$S_{\text{[CII]}}$ (mJy)	7.1 ± 0.3
$FWHM_{\text{[CII]}}$ (km s ⁻¹)	630 ± 30
$I_{\text{[CII]}}$ (Jy km s ⁻¹)	4.5 ± 0.3
$L_{\text{[CII]}}$ (10 ⁹ L _⊙)	4.0 ± 0.3
deconvolved size	$(0.80'' \pm 0.07'') \times (0.42'' \pm 0.06'')$
size (kpc ²)	$(4.8 \pm 0.4) \times (2.5 \pm 0.4)$
[NII] line properties	
ν_{obs} (GHz)	219.39 ± 0.04
$S_{\text{[NII]}}$ (mJy)	0.66 ± 0.18
$FWHM_{\text{[NII]}}$ (km s ⁻¹)	400 ± 120
$I_{\text{[NII]}}$ (Jy km s ⁻¹)	0.31 ± 0.11
$L_{\text{[NII]}}$ (10 ⁹ L _⊙)	0.21 ± 0.08
$L_{\text{[CII]}}/L_{\text{[NII]}}$	19 ± 6 ("red": 14 ± 5)

[CII], FIR のピーク
とオフセット

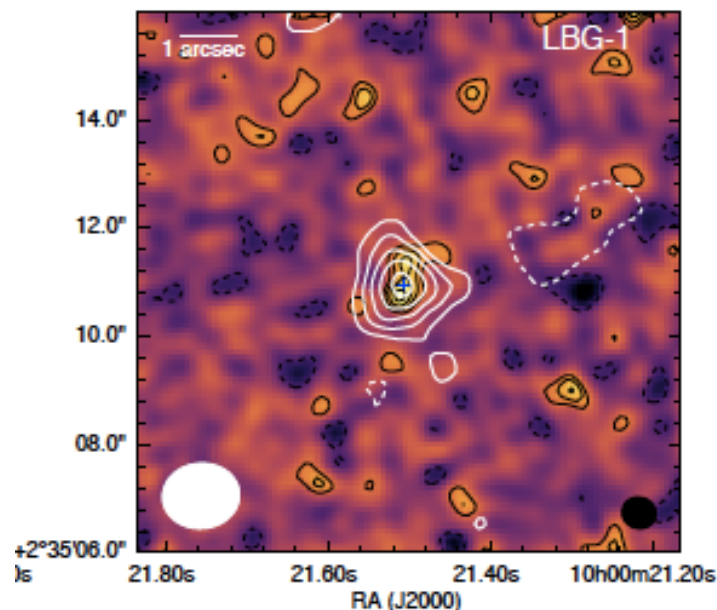
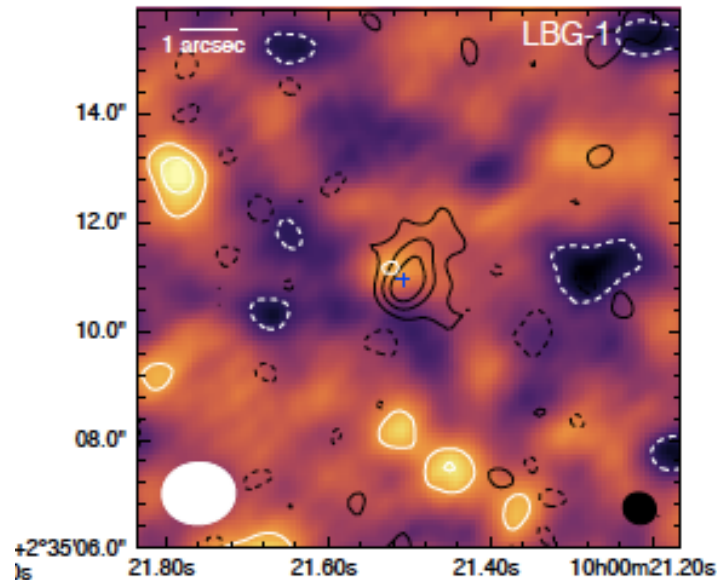
[CII] が放射している領域の一部から [NII] が放射

[CII] の速度と異
なる速度成分



3. Results

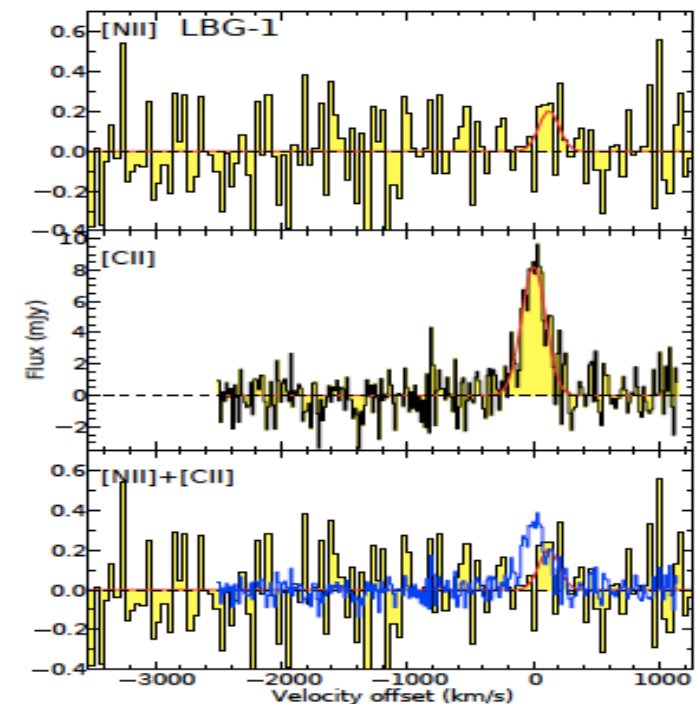
LBG-1



Quantity	LBG-1
[CII] line properties	
ν_{obs} (GHz)	301.980 ± 0.007
Redshift	5.29359 ± 0.00015
$S_{\text{[CII]}}$ (mJy)	8.2 ± 0.5
$FWHM_{\text{[CII]}}$ (km s ⁻¹)	230 ± 20
$I_{\text{[CII]}}$ (Jy km s ⁻¹)	2.1 ± 0.2
$L_{\text{[CII]}}$ ($10^9 L_{\odot}$)	1.71 ± 0.16
deconvolved size	$(1.00'' \pm 0.12'') \times (0.57'' \pm 0.10'')$
size (kpc ²)	$(6.2 \pm 0.7) \times (3.5 \pm 0.6)$
[NII] line properties	
ν_{obs} (GHz)	232.1 ± 0.3
$S_{\text{[NII]}}$ (mJy)	0.20 ± 0.09
$FWHM_{\text{[NII]}}$ (km s ⁻¹)	190 ± 90
$I_{\text{[NII]}}$ (Jy km s ⁻¹)	0.04 ± 0.03
$L_{\text{[NII]}}$ ($10^9 L_{\odot}$)	0.025 ± 0.019
$L_{\text{[CII]}}/L_{\text{[NII]}}$	68^{+200}_{-28}

2 σ (!) tentative
detection?

[CII]/[NII] ~ 68 !



4. CLOUDY modeling of the [CII]/[NII] ratio

- CLOUDY v13.03 (Ferland + 2013) を用いたモデル

- Constant pressure

- Spherical geometry

- $A_V = 10$ まで計算

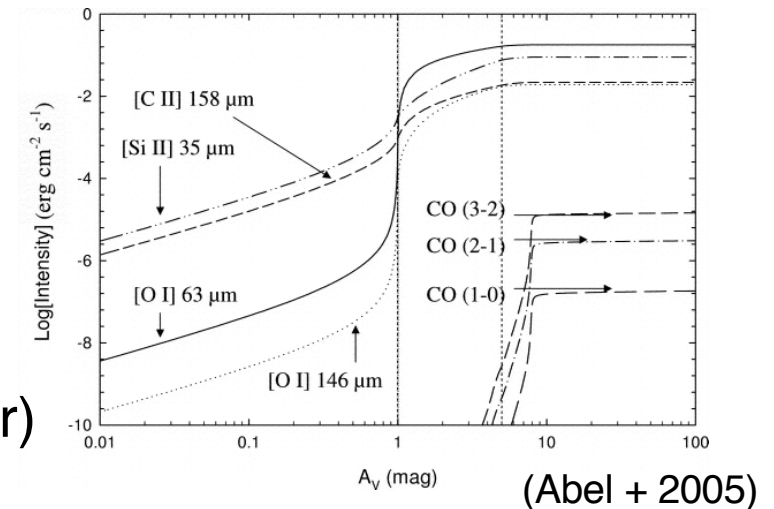
- Stellar SED: Starburst99

- Intense starburst (age = 1, 10 Myr)

- $Z = Z_\odot$

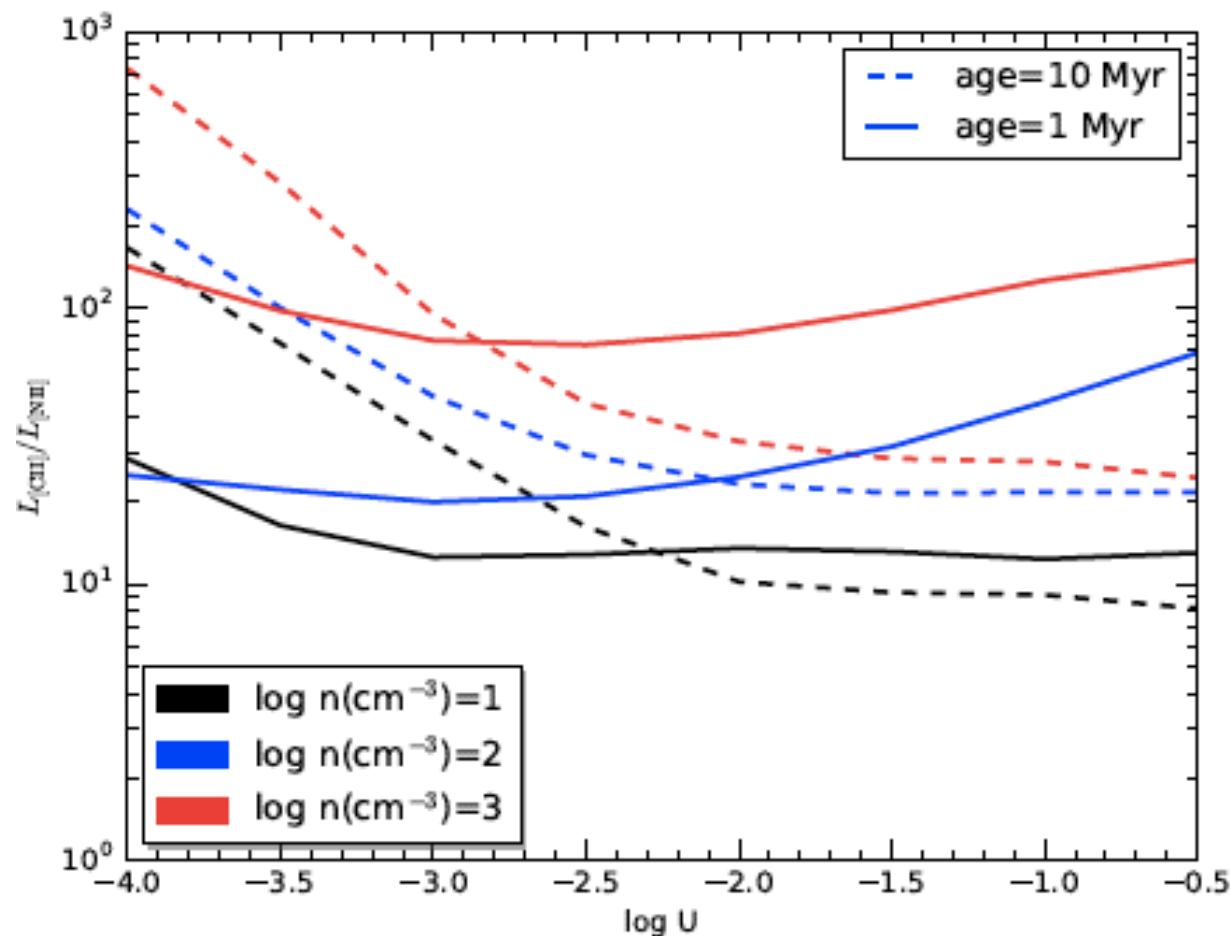
- ガスの element abundance は Nagao + 2011

- Orion-like なダスト, 磁場 ($\sim 10^{-5}$ G)



4. CLOUDY modeling of the [CII]/[NII] ratio

- CLOUDY v13.03 (Ferland + 2013) を用いたモデル



密度が高くなると輝線比は上昇
 ✓ [NII] の放射がサチる一方で,
 [CII] の高密度領域からの放射
 が増える

Age = 1 Myr の場合, 輝線比が右
 肩上がり

✓ N^+ が N^{++} に電離されるため,
 [NII] の放射が減少し, [NIII] の
 放射が増える

5. Analysis of the individual sources

AzTEC-3

- [CII]/[NII] 比 (~ 22) が近傍の ULIRGs や high- z SMG の典型的な値 (~ 10 - 20) よりもやや小さい
 - AzTEC-3 では [CII] にもダスト減光が効いている (Riecherd + 2014) ため, [CII]/[NII] > 22 となり得る
 - AzTEC-3 中心の HII 領域の密度 ($\sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$) を考えると, CLOUDY は [CII]/[NII] ~ 100 を予言
- ➔ [CII] は, 高密度でコンパクトな星形成領域, [NII] は, 広がった密度の小さい領域から放射
- ➔ [NII] は, 銀河中心に落ち込む or 銀河中心から吹き飛ばされた電離ガスから放出
- ➔ [NII] の速度幅が大きいのは, トレースするガスの dynamical mass が大きい or 電離ガス flow を見ている

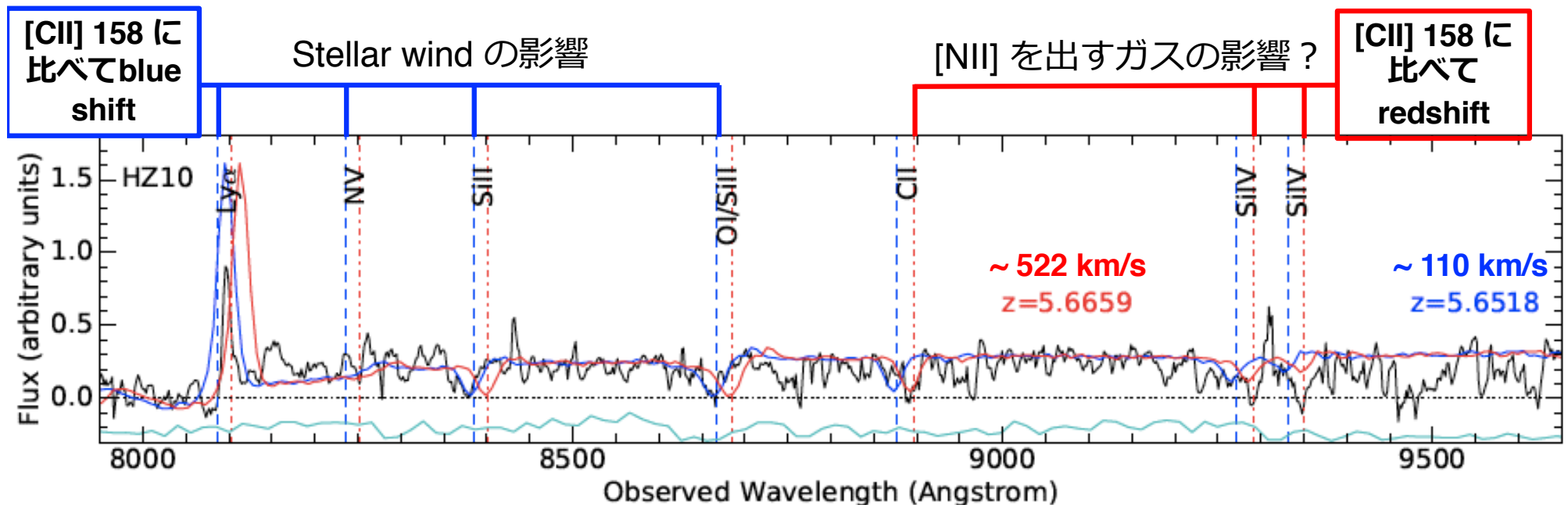
5. Analysis of the individual sources AzTEC-3

- [CII]/[NII] 比 (~ 22) が近傍の ULIRGs や high- z SMG の典型的な値 (~ 10 - 20) よりもやや小さい
 - AzTEC-3 では [CII] にもダスト減光が効いている (Riecherd + 2014) ため, $[CII]/[NII] > 22$ となり得る
 - AzTEC-3 中心の HII 領域の密度 ($\sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$) を考えると, CLOUDY は $[CII]/[NII] \sim 100$ を予言
- ➔ [CII] は, 高密度でコンパクトな星形成領域, [NII] は, 広がった密度の小さい領域から放射
 - ✓ [NII] はコンパクトな star-forming core を直接とりかこむ薄い電離ガスから放射されている
 - ✓ [NII] の広がった構造は, 激しい星形成によって, 吹き飛ばされたガスの out-flow or 激しい星形成活動へガスを供給する in-flow をトレースしている

5. Analysis of the individual sources

HZ10

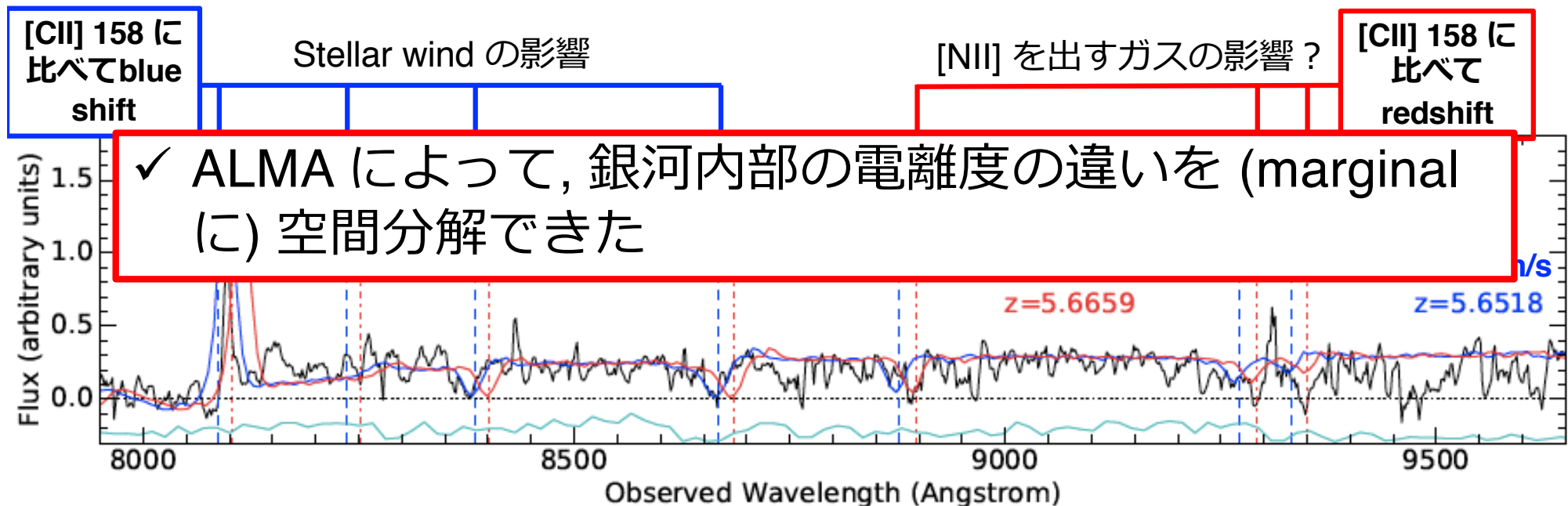
- 銀河全体で見た時, $[CII]/[NII] \sim 20$ で近傍の星形成銀河と同等
 - $[NII]$ と同じ領域での $[CII]$ との比, $[NII]$ のピーク的位置における $[CII]$ との比 ~ 10
 - ➔ 銀河内部における, 電離度の空間的ばらつきを反映
 - ➔ rest-UV の分光も電離度の空間的ばらつきを示唆?



5. Analysis of the individual sources

HZ10

- 銀河全体で見た時, $[CII]/[NII] \sim 20$ で近傍の星形成銀河と同等
 - $[NII]$ と同じ速度成分の $[CII]$ との比, $[NII]$ のピーク的位置における $[CII]$ との比 ~ 10
 - ➔ 銀河内部における, 電離度の空間的ばらつきを反映
 - ➔ rest-UV の分光も電離度の空間的ばらつきを示唆?

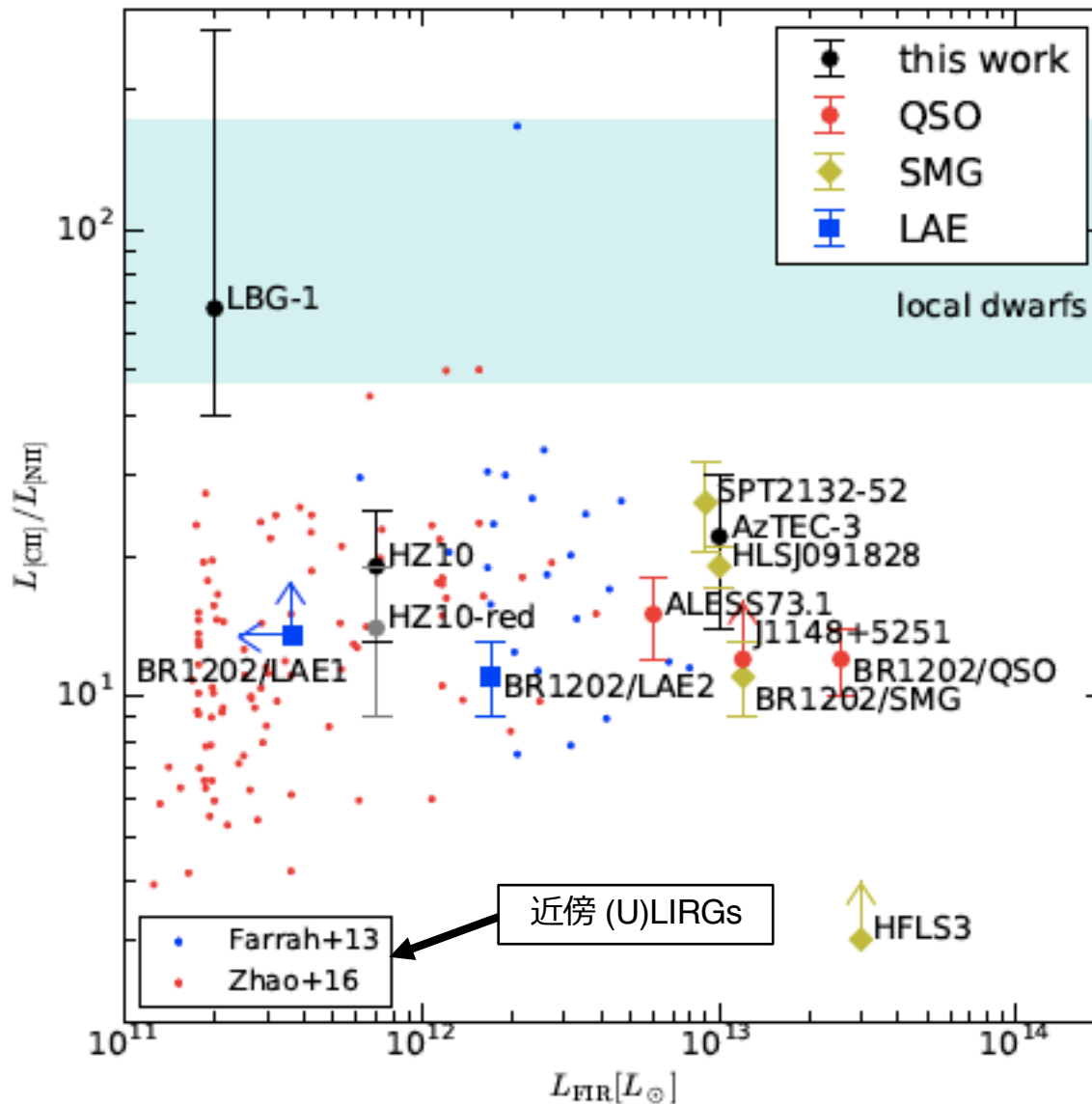


5. Analysis of the individual sources

LBG-1

- $[\text{CII}]/[\text{NII}] = 68!$
 - ほとんどの $[\text{CII}]$ は電離領域以外から放射
 - ISM のほとんどが広がった中性の PDR ガス?
 - ✓ 小さなダスト-ガス比を仮定すると説明できる
 - 電離ガスがより高階電離である (N^+ が N^{++} に電離)?
 - ダスト量が少ない銀河で, 星形成による hard な輻射あると ISM の電離が進む
 - ✓ cf. 近傍の矮小銀河 (Cormier + 2015)
 - ✓ 高階電離ならば $[\text{OIII}]$ 輝線 ($\sim 35 \text{ eV}$) が観測される?
 - そもそも金属量が小さく, N/C abundance 比が小さい?

6. Discussion & conclusion



近傍 (U)LIRGs と high-z SMG の比較

✓ ほぼ同じ (~ 0.5 dex 以内)

– SMG の SFR 面密度を考えればもっと大きくはず

◆ SFR 面密度 は HII 領域の密度と正の相関 (Herrera-Camus + 2016)

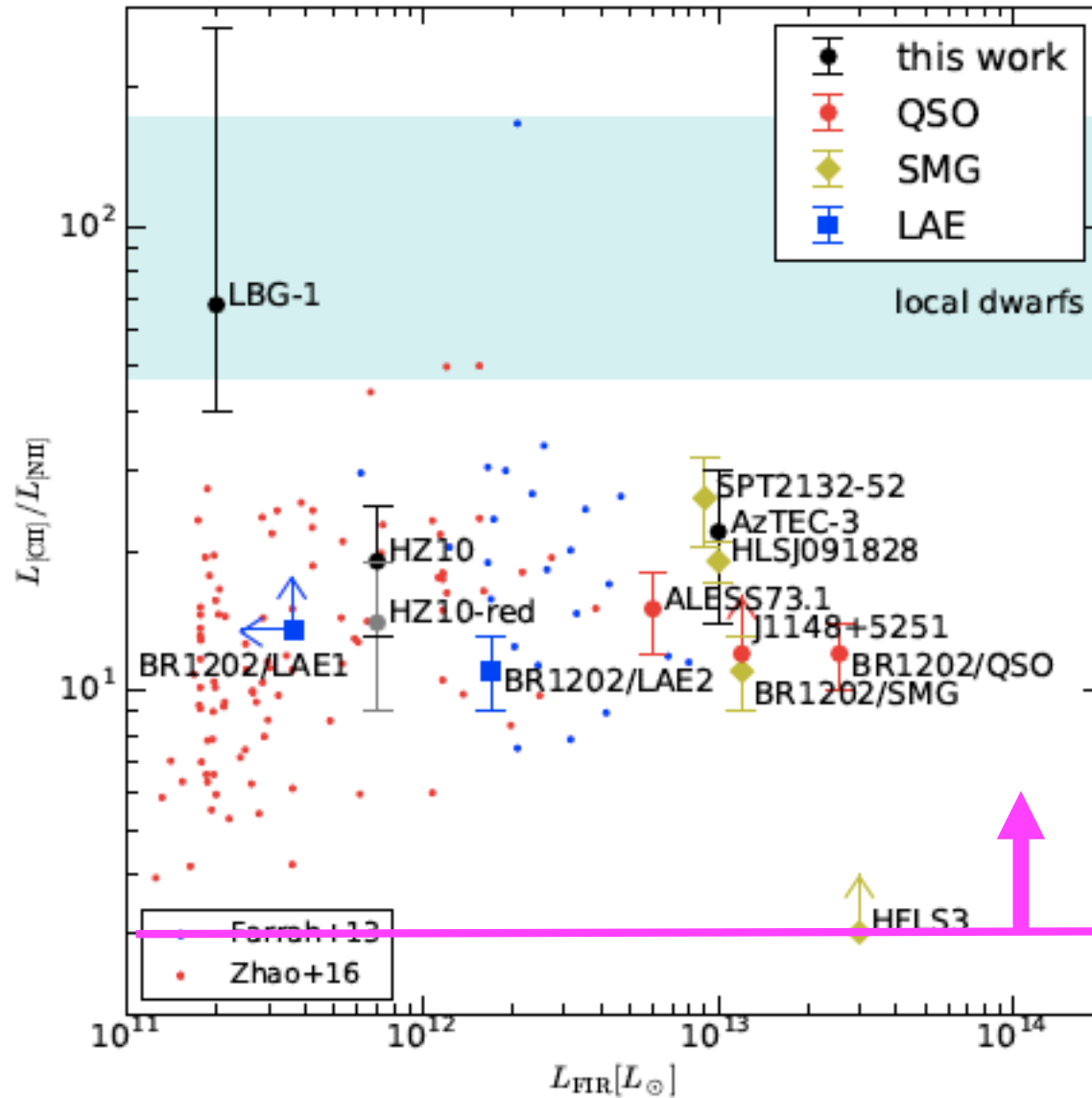
→ [NII] でトレースしているのは diffuse な電離ガス

→ 今まさに、星形成している領域はより高階電離状態にある

6. Discussion & conclusion

- HZ10 で, [NII] と [CII] の空間分布の違いが (marginal に) 検出
 - High- z の “普通の” 銀河において, ISM の状態の空間分布を調べる上で, [NII] のような遠赤外微細構造輝線が有用である
- LBG-1 のような若い星形成銀河で [CII]/[NII] 比が大きい
 - この種の銀河で [CII] が essential neutral gas coolant
 - 電離ガスを高階電離状態になるくらい輻射が硬いはず？
 - 宇宙再電離の電離源の候補？

おまけ



Herschel stacking analysis
による制限 ($[\text{CII}]158/[\text{NII}]205$)