

# ALMA CYCLE 2 サーベイデータを用いた $z=6$ [CII] 輝線探査

早津夏己 (東京大学),  
and ALMA deep field in SSA22 team

# 目次

背景 ; [CII]輝線探査で探る遠方星形成史

観測 ; ALMA Deep Field in SSA22 (ADF22) (Umehata et al. 2015)

手法 ; 遠方輝線銀河を検出しやすくする 'S/N cube' の精製

結果 ; 2x 遠方[CII]輝線銀河候補 + 1x CO(4-3) emitter @  $z = 0.7$

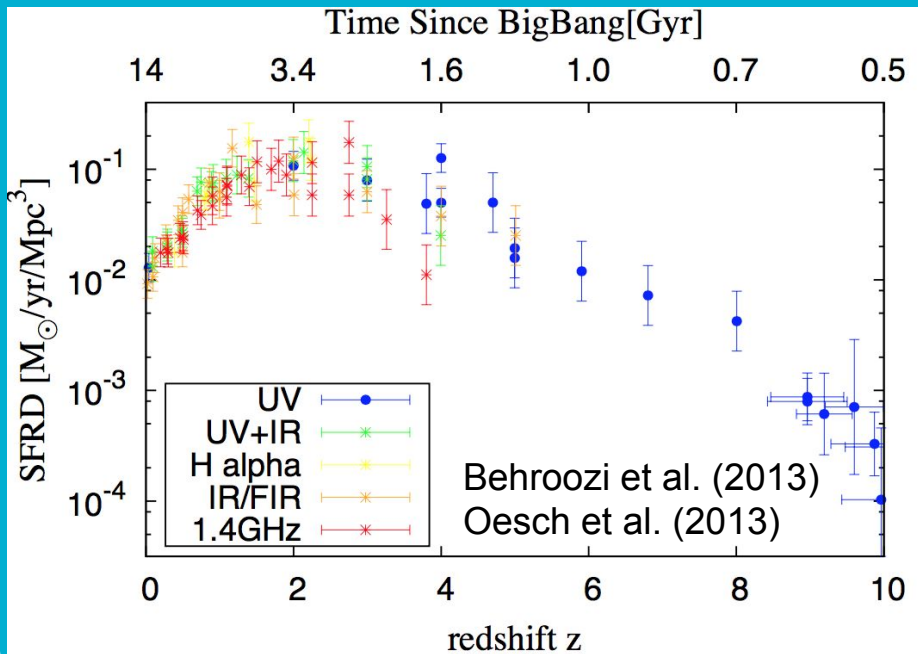
議論 ; 本当に[CII]か？ 個数密度, equivalent width の比較

； [CII] 輝線による星形成率密度 (SFRD) の見積もり

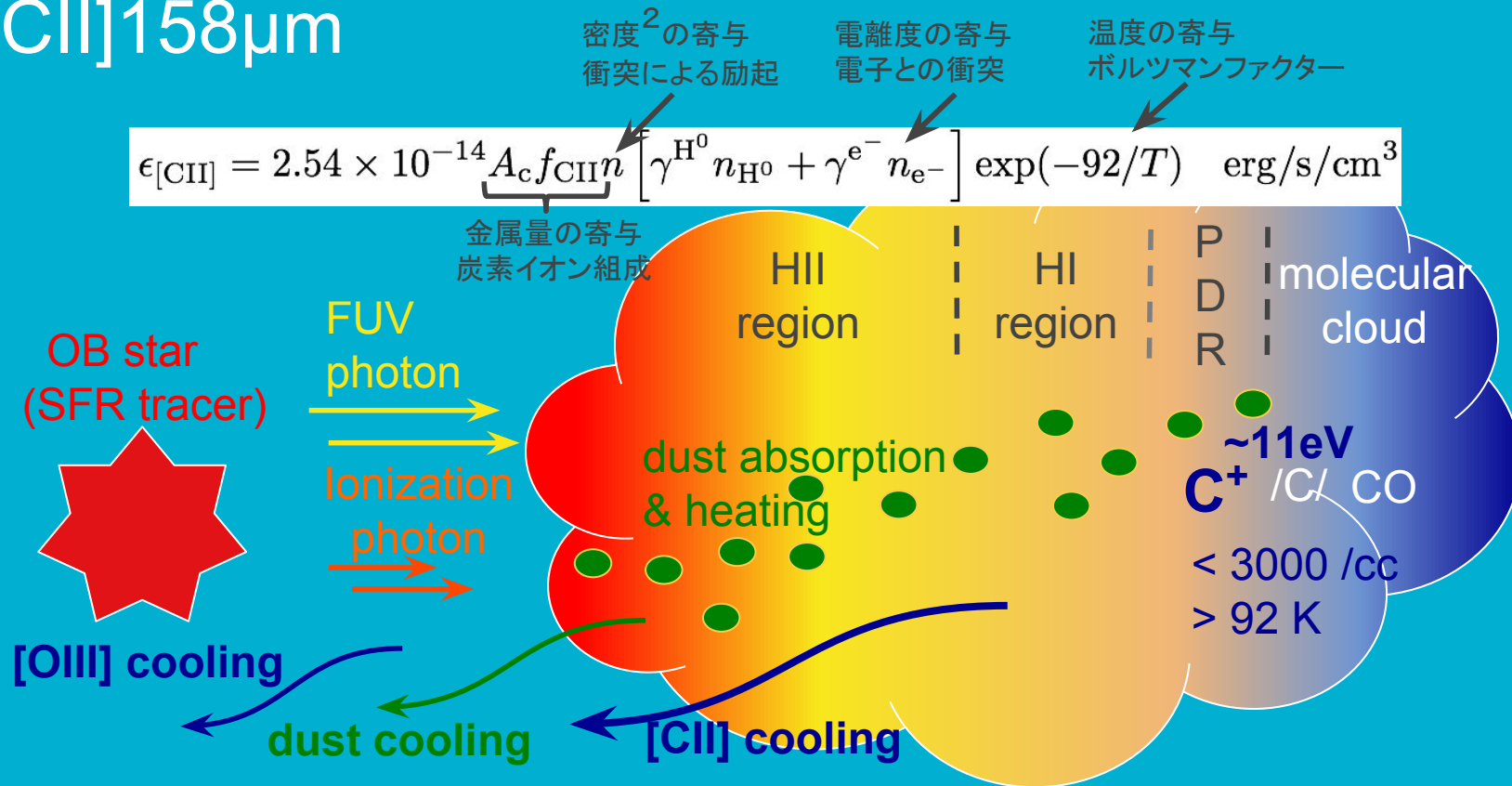
まとめ

# 遠方( $z>4$ )星形成史の相補的な理解を目指す

- 紫外線によるSFRDの見積もり
  - ☺ ライマンブレイク法
  - ⚠ 紫外線で暗い星形成銀河の寄与
- サブミリ波連続光 (ダスト再放射成分)
  - ☺ 負の K 補正
  - ⚠ 測光赤方偏移の不定性
  - ⚠ ダスト起源の情報のみ
- サブミリ輝線 (e.g., [CII]輝線 $158\mu\text{m}$ )
  - ☺ 分光赤方偏移が得られる
  - ☺ ガス起源の情報も手に入る
  - ⚠ [CII] deep survey は行われていない



# [CII]158 $\mu$ m

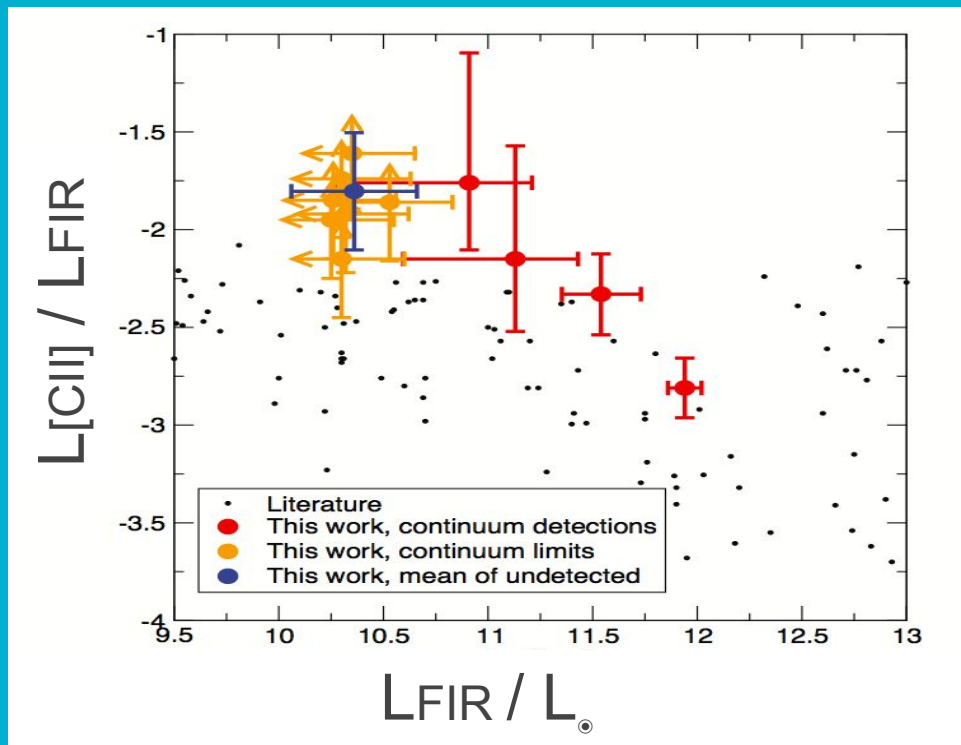


光解離領域(PDR)を主とする星形成領域の冷却源 = 遠方でも明るい, 星形成活動の指標

(Capak et al.2015)

## 遠方[CII]輝線銀河

- LBG, SMGの追観測により $z \leq 7.1$  で検出  
(e.g., Maiolino et al. 2015)
- $z \sim 7$  LAE の [CII] 非検出  
(e.g., Ota et al. 2014)
- $z \sim 6$  LBG の追観測  
→赤外線連続光が暗い  
[CII]輝線銀河の発見  
(Capak et al.2015, nature)

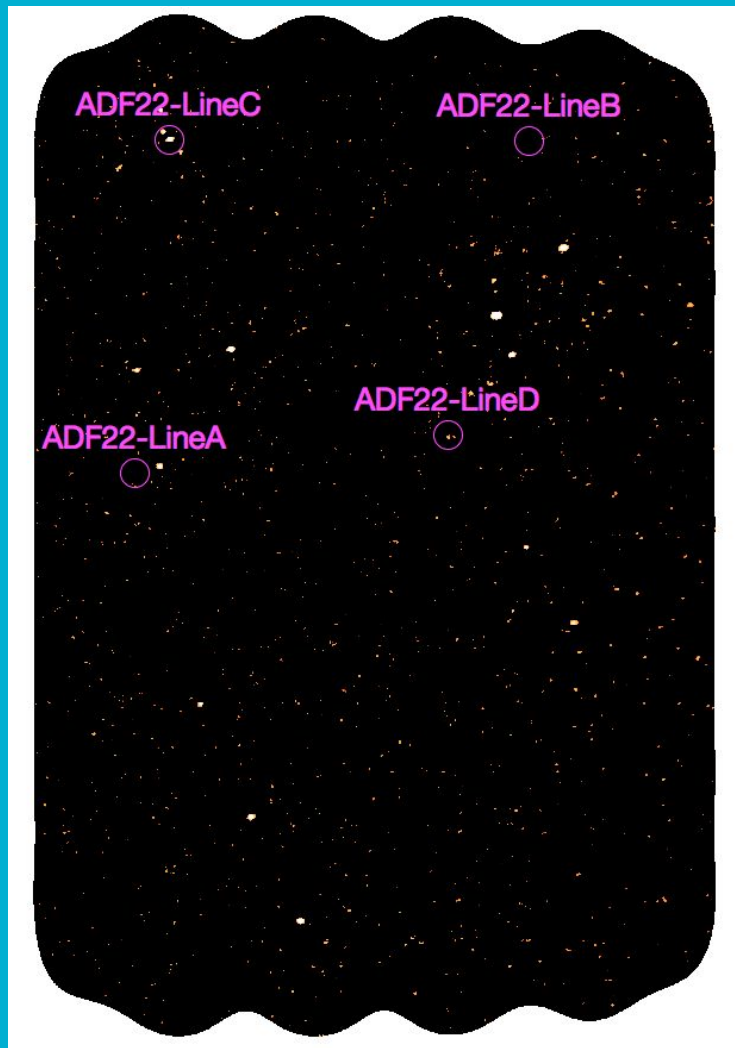


→ [CII] 輝線で遠方星形成史を議論できないか？

# ALMA Deep Field in SSA22

$z = 3$  protocluster 中心を狙ったサーベイ観測  
(Umehata et al. 2015)

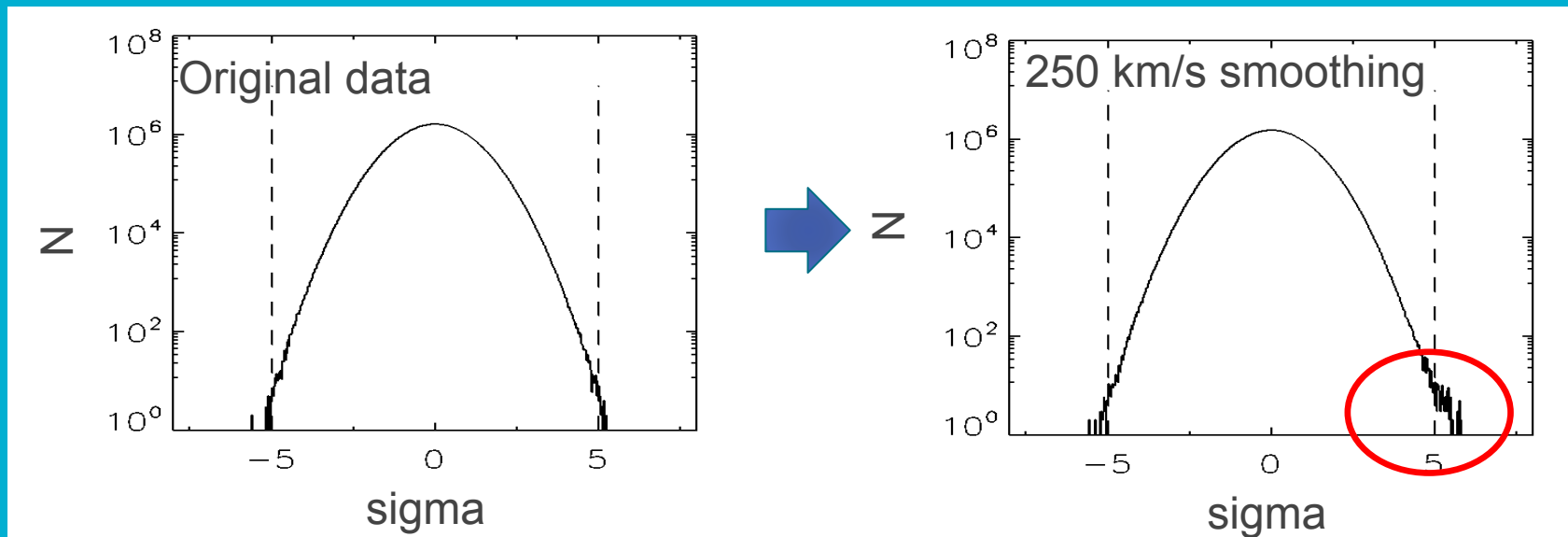
- Central frequency = 263 GHz (1.14 mm)
- $z_{\text{[CII]}} = 5.97\text{-}6.51$
- Synthesized beam =  $0.''70 \times 0.''59$
- r.m.s. of sensitivity = 0.61 - 0.86 mJy/beam  
@ 36 km/s velocity resolution
- Observed area =  $2' \times 3'$
- [CII] survey volume  $\sim 2200$  comoving  $\text{Mpc}^3$



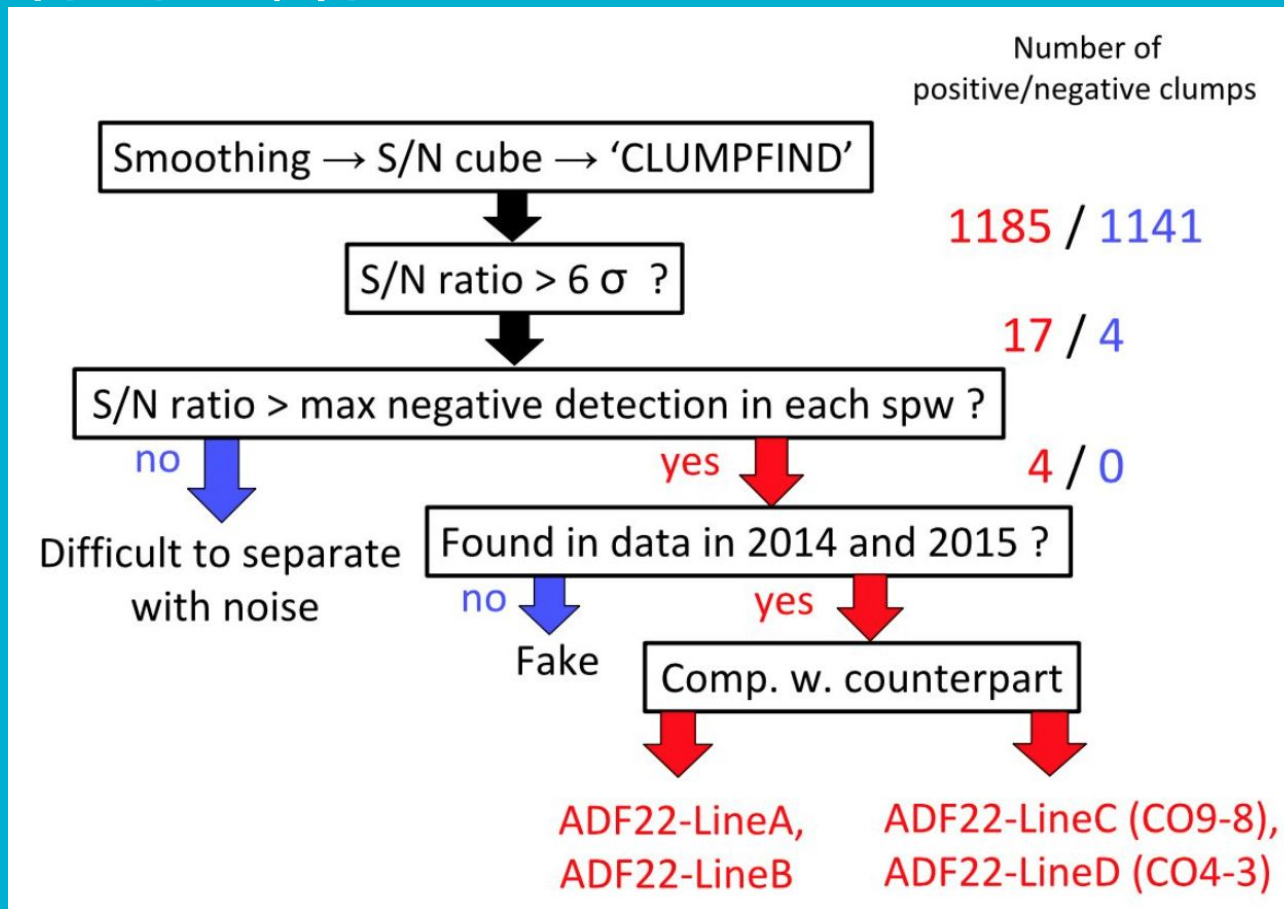
# 'S/N cube' の精製 + スムージング

'CLFIND' する前に, 輝線天体を検出しやすくする2つの処理をする:

- 各データスライスのRMSで規格化したデータキューブの精製
- スペクトル方向のスムージング(18 ~ 400 km/s)



# 偽天体・他輝線との区別





# 目次

背景 ; [CII]輝線探査で探る遠方星形成史

観測 ; ALMA Deep Field in SSA22 (ADF22) (Umehata et al. 2015)

手法 ; 遠方輝線銀河を検出しやすくする 'S/N cube' の精製

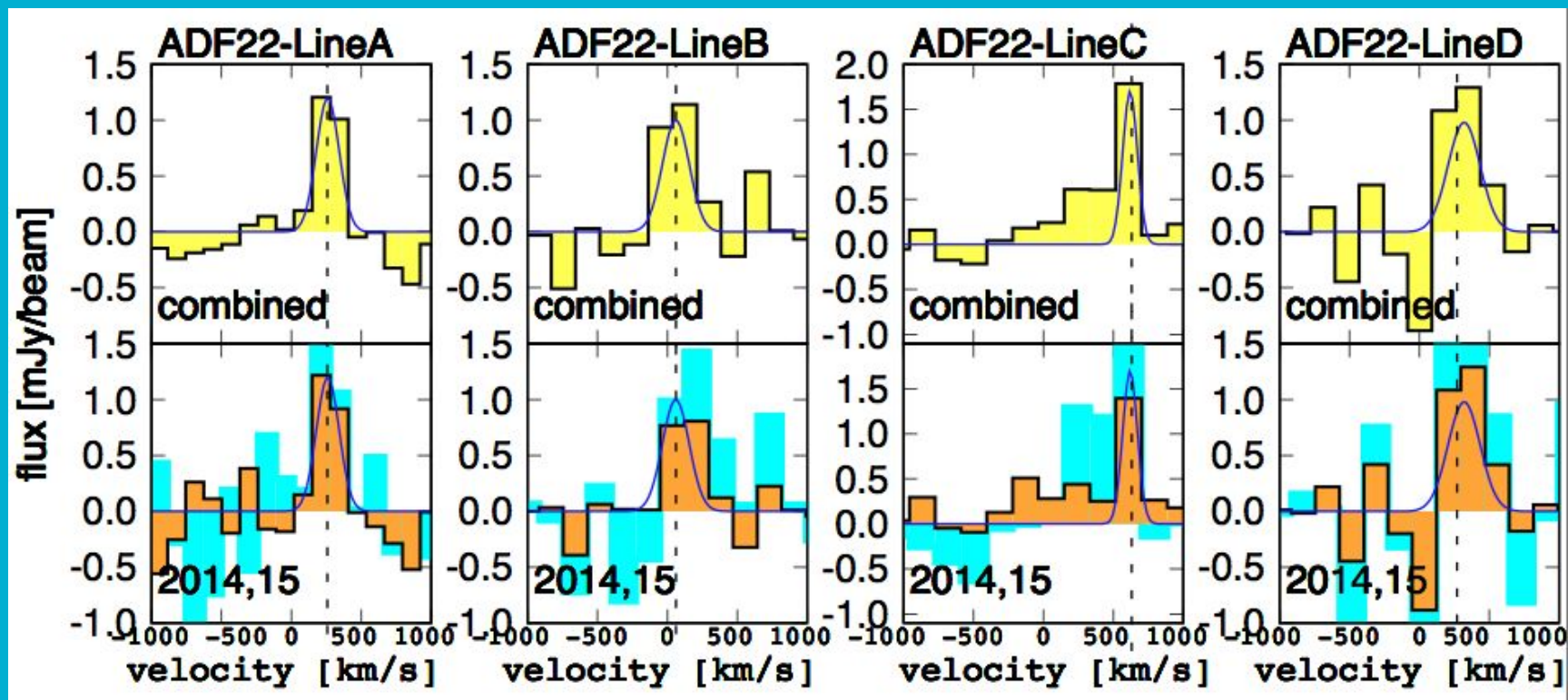
結果 ; 2x 遠方[CII]輝線銀河候補 + 1x CO(4-3) emitter @  $z = 0.7$

議論 ; 本当に[CII]か? 個数密度, equivalent width の比較.

; [CII] 輝線による星形成率密度 (SFRD) の見積もり

まとめ

# 輝線スペクトル

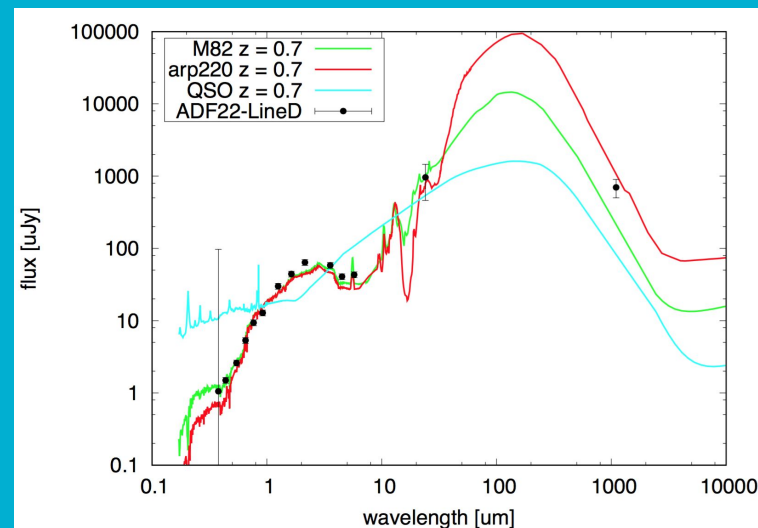
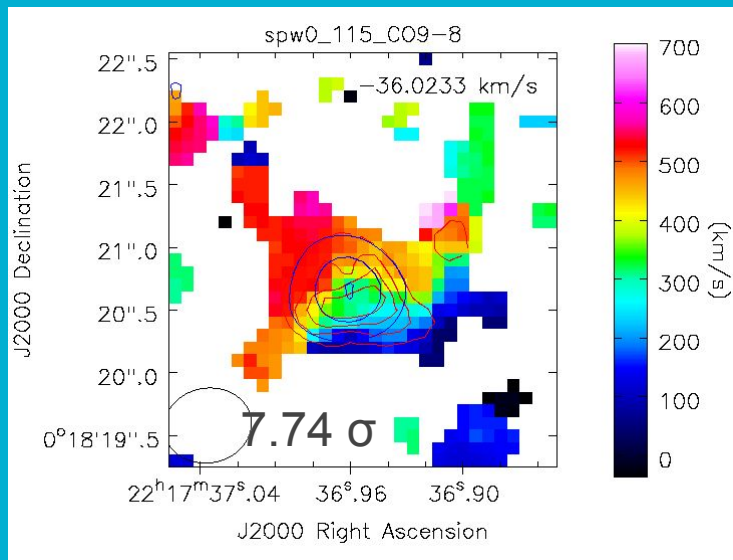


(Hayatsu et al. in prep)

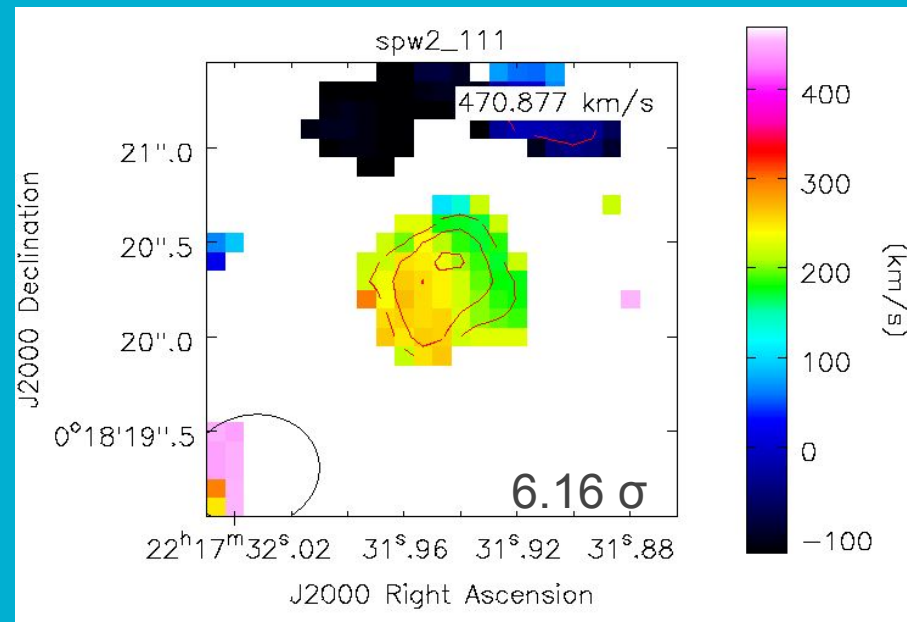
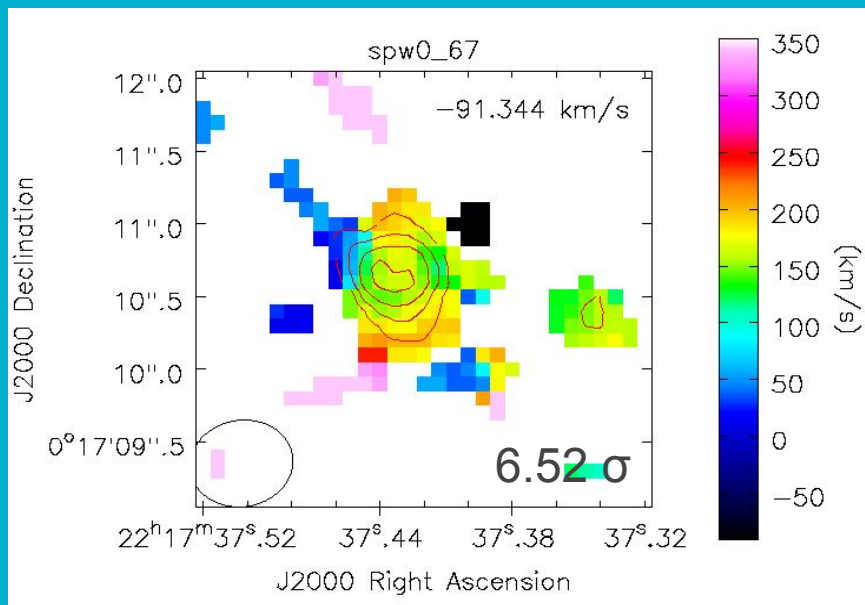
# ADF22-LineC; CO(9-8) emitter

# ADF22-LineD; CO(4-3) emitter at $z = 0.69$

protocluster 中の既知の銀河と、偽天体でない輝線天体の  
 検出に成功 → 解析手法は妥当！



# ADF22-LineA, LineB; [CII] 輝線銀河候補



✓ 対応天体なし, 1.1mm 連続光も非検出

## [CII]以外の輝線である可能性

CO(3-2) at  $z = 0.3$

CO(4-3) at  $z = 0.8$

CO(5-6) at  $z = 1.2$

...

CO(9-8) at  $z = 3.1$

[NII]205  $\mu\text{m}$  at  $z = 4.6$

[OI] 146  $\mu\text{m}$  at  $z = 7.0$

[NII]122  $\mu\text{m}$  at  $z = 8.4$

} 近傍なのでfluxを稼ぎやすい  
(しかし, 観測体積は小さい)

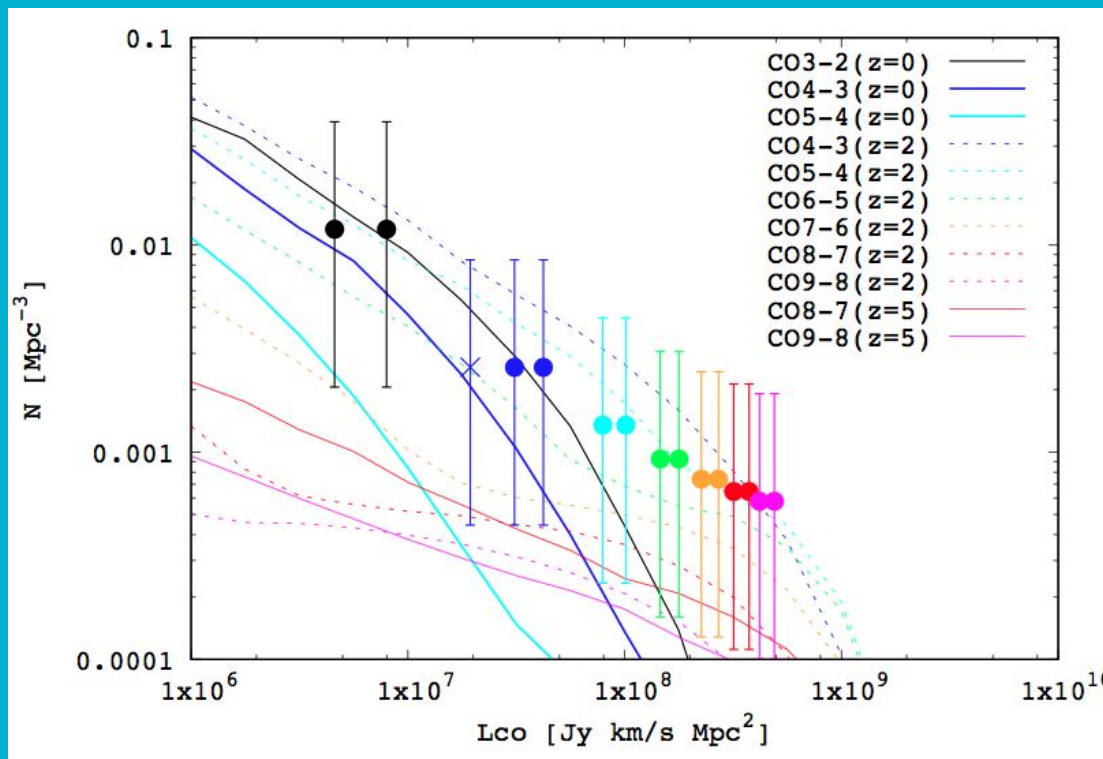
← protocluster 内の銀河

← e.g., Nagao et al. (2012) の追観測

← [OI]/[CII]  $\sim 0.5$  (Smail et al. 2011)

← [NII]/[CII]  $\sim 0.7$  (Smail et al. 2011)

# 数密度の見積もり; CO 輝線 $z < 3.1$

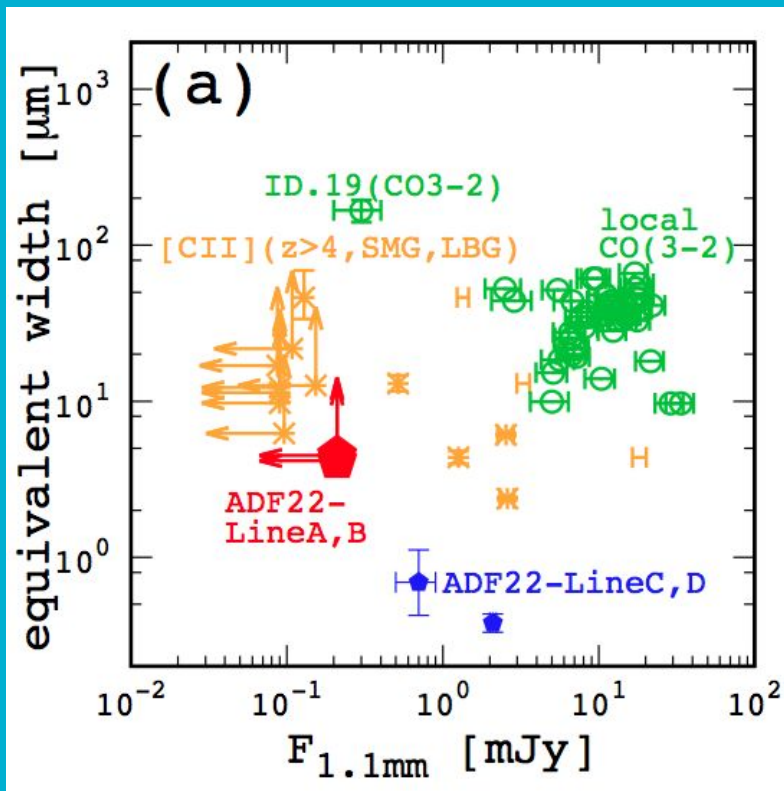


Jup  $\geq 5$  の検出可能性は低い

CO(3-2), CO(4-3) 以外の  
検出可能性は低い

Obreschow et al. (2009)

# equivalent width vs 連続光



High-z [CII] emitter (SMG, LBG) と  
LineA, LineB は同じ所に分布

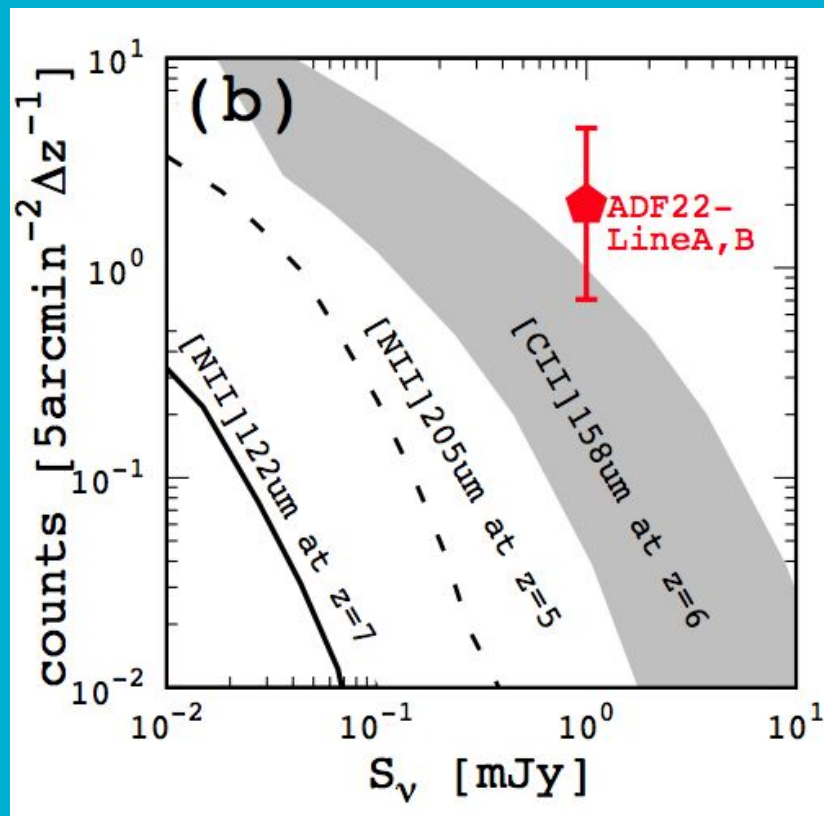
LineC, LineD; CO(4-3), (9-8) はEWが小さい  
⇒ 今回のCO emitters と [CII] 候補は  
EWで区別できる

CO(3-2) と[CII] はEWで区別できそうにない  
⇒ 連続光の検出から区別できる

Seaquist et al. (2004), Yao et al. (2003),  
Decarli et al. (2014), Swinbank et al (2012),  
Capak et al. (2015)



# 数密度の見積もり; $z > 4$



[NII] 輝線の検出可能性は低い  
(Orsi et al. 2004 の理論予測より)

[CII] 輝線は説明できる！

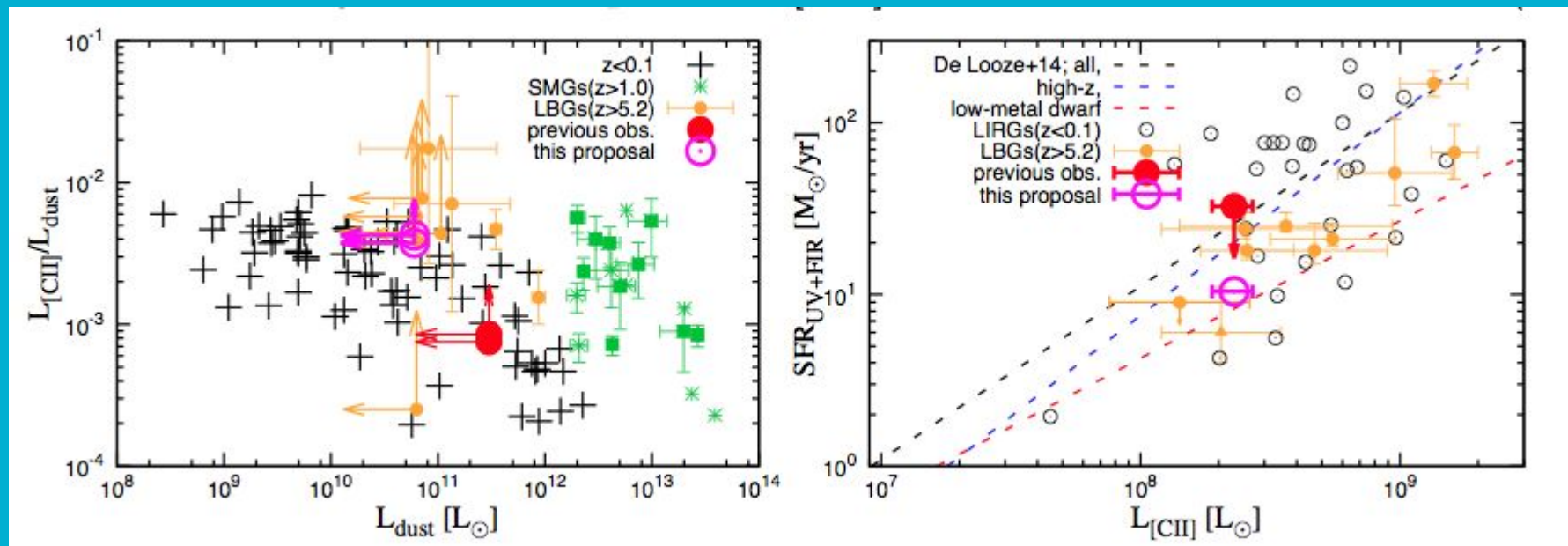
[CII] の数密度の分布は、  
観測的な星形成率分布 at  $z = 6$  に  
SFR - L[CII] の関係を仮定して変換  
(Smit et al. 2012,  
DeLooze et al 2014; low-metal dwarf )

[OI] 146  $\mu\text{m}$  の可能性は追観測で  
棄却する (PI: 早津)。

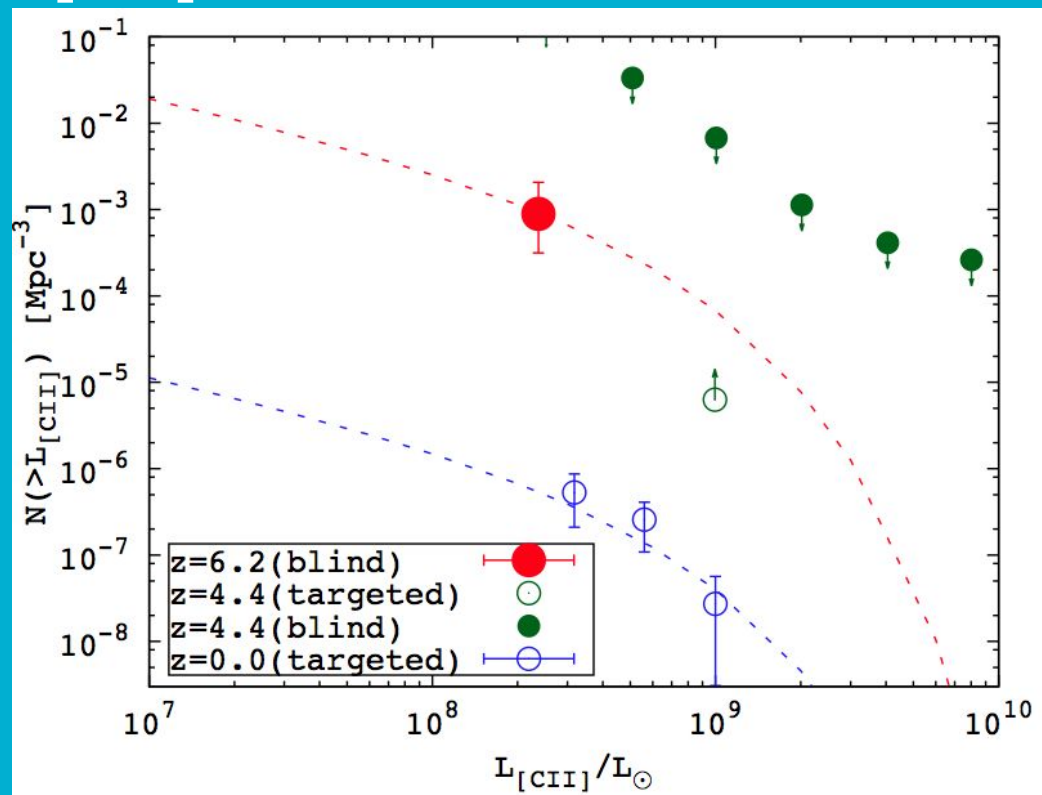


# ダスト光度, 星形成率と[CII]輝線光度の関係

[CII]候補天体の特徴を議論するには, ダスト光度により強い制限が必要.



# [CII] 輝線光度関数

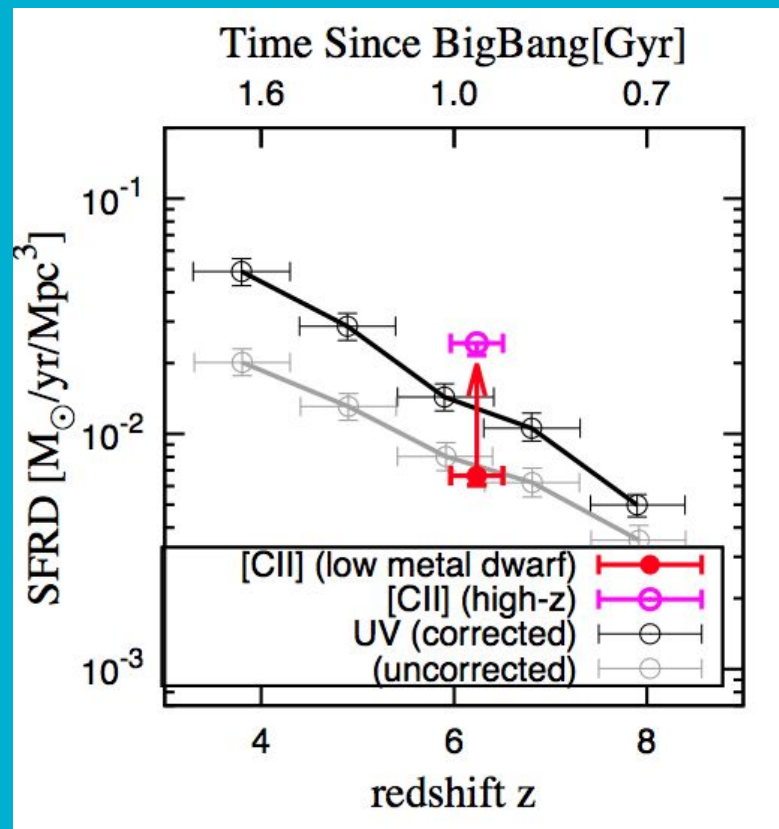


[CII] SFRD の見積もりには  
光度関数への制限が重要.

ALMA Cycle 4  
[CII] deep survey  
Large program

100時間超えの大型観測で  
各 10個程度の検出見込み!  
(PI: 河野さん)

# [CII] SFRD > UV SFRD at $z = 6$ ??



2個の検出 + low metal dwarf の仮定で  
計算した [CII] SFRD の下限値  
~ ダスト補正無しの UV SFRD

High- $z$  [CII] emitter の仮定をした SFRD  
> 補正済みの UV SFRD

[CII] LF を仮定して積分した SFRD  
> 補正済みの UV SFRD

※ ただし, まだまだ不定性の大きい議論

## [CII] SFRD > UV SFRD at $z = 6$ ??

結局, ダストの存在を[CII]によって間接的に見ている可能性

その場合, 紫外線でも赤外線連続光でもトレースできない,  
ダストに『隠された』遠方星形成史の存在を示唆

ダスト・ガス比 $\downarrow\downarrow \rightarrow$  高い輻射場を形成  $\rightarrow$  ダストの光電加熱  $\uparrow\uparrow \rightarrow$   
[CII] の冷却 $\uparrow\uparrow$

(以下, 講演中, 後の議論)

ダスト・ガス比 $\downarrow\downarrow$  だけを仮定して, 吸収するtotalの FUV photon が変わらなければ, continuum が暗いことを説明できないのでは.

$\Rightarrow$  ダストサイズ分布, dust temperature  $\uparrow\uparrow$ , dust-to-metal ratio  $\downarrow\downarrow$   
などの寄与を考慮して説明できるかも.

## まとめ：世界初 [CII] blind detection ?

- 遠方輝線銀河を見つける解析法 'S/N cube'
- 2x 遠方[CII]輝線銀河候補 + 1x CO(4-3) emitter @  $z = 0.7$
- サブミリ波輝線で遠方SFRDを測ることができる！
- [CII] SFRD > UV SFRD at  $z = 6$  ??

今後は

- 解析手法の自動化, 輝線探査 (観測的研究を一段落)
- 追観測で検出を確定, [OI]146 $\mu$ m と区別 (8月に採択結果)
- 他の輝線も入った理論モデル (修論の理論モデルを進化)