

# 重力レンズ銀河団のALMAデータを用いた 無バイアス輝線銀河探査

Yamaguchi et al. 2017, ApJ, submitted

銀河進化研究会 2017 @ 大阪大学豊中キャンパス

2017/06/08 (木)

東京大学天文センター D2

山口裕貴

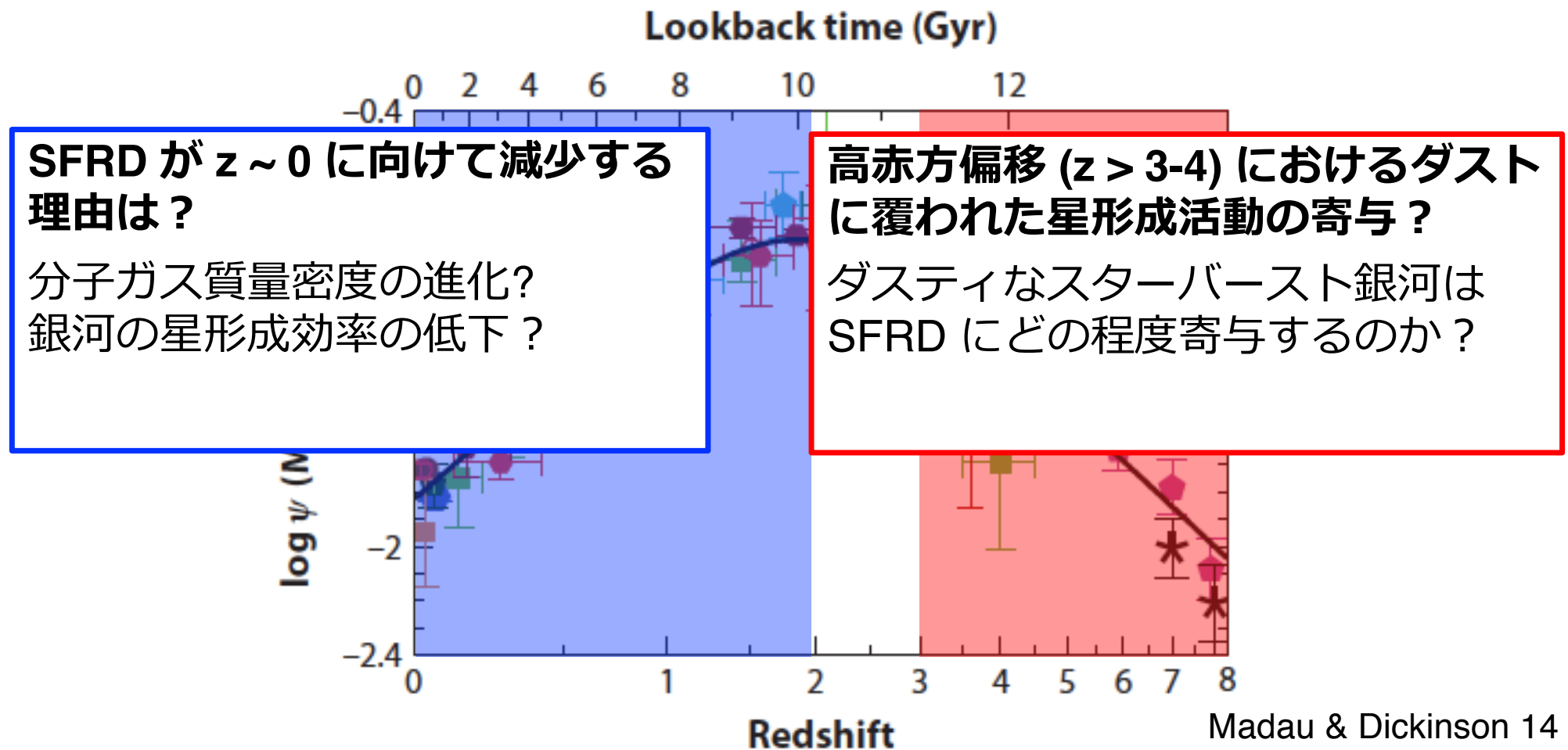
# もくじ

- イントロダクション
  - ミリ波・サブミリ波輝線の重要性
  - 先行研究 & 本研究
- ALMA データ
  - 我々の観測データ + ALMA アーカイブデータ
- 輝線探査の手法と結果
- 考察
  - CO & [CII] 輝線光度関数への制限
- まとめ

# イントロダクション

## “ミリ波・サブミリ波輝線銀河の重要性”

- 宇宙星形成率密度 (SFRD) の進化



# イントロダクション

## “ミリ波・サブミリ波輝線銀河の重要性”

- 宇宙星形成率密度 (SFRD) の進化

Lookback time (Gyr)

0 2 4 6 8 10 12

SFRD が  $z \sim 0$  に向けて減少する理由は？

分子ガス質量密度の進化？  
銀河の星形成効率の低下？

→ CO 回転遷移輝線

高赤方偏移 ( $z > 3-4$ ) におけるダストに覆われた星形成活動の寄与？

ダスティなスターバースト銀河は SFRD にどの程度寄与するのか？

→ [CII] 158  $\mu\text{m}$  輝線

ミリ波・サブミリ波輝線は SFRD の進化を研究するために非常に有用なツールの一つ！

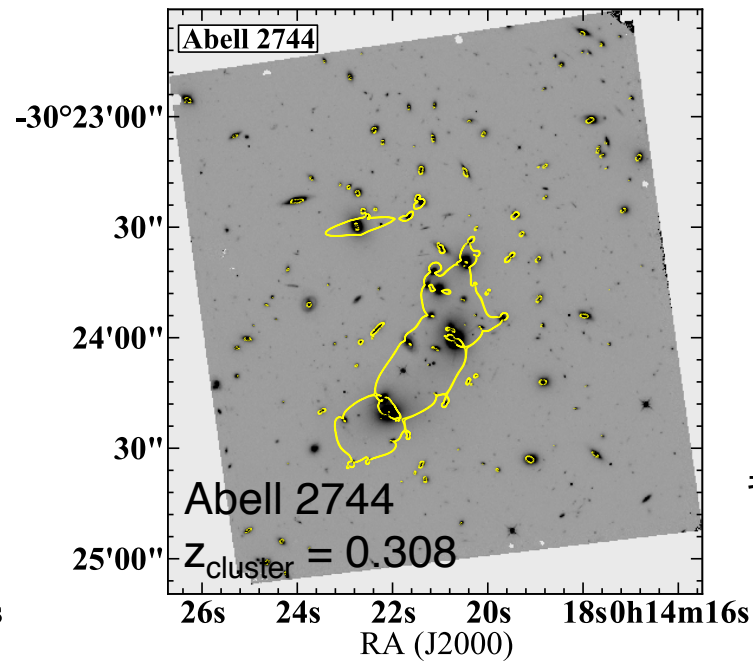
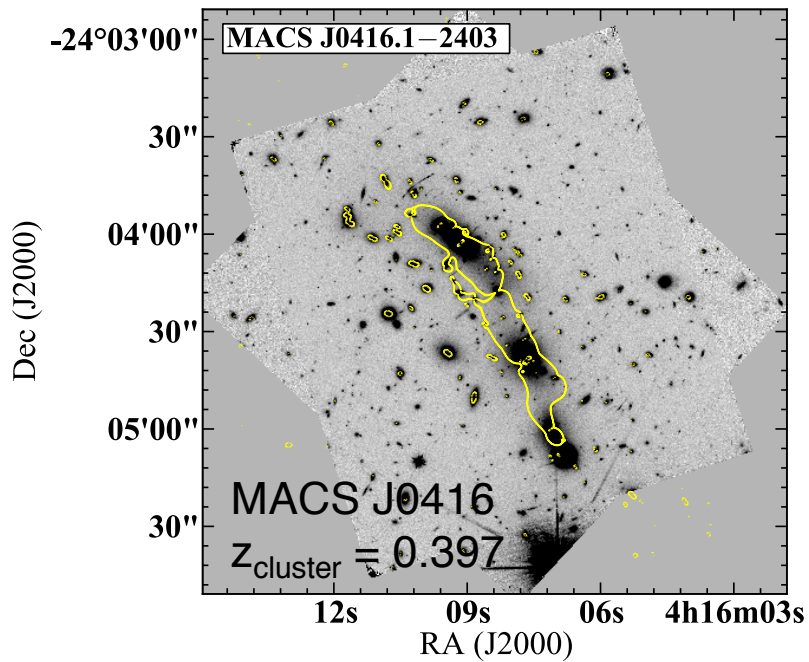
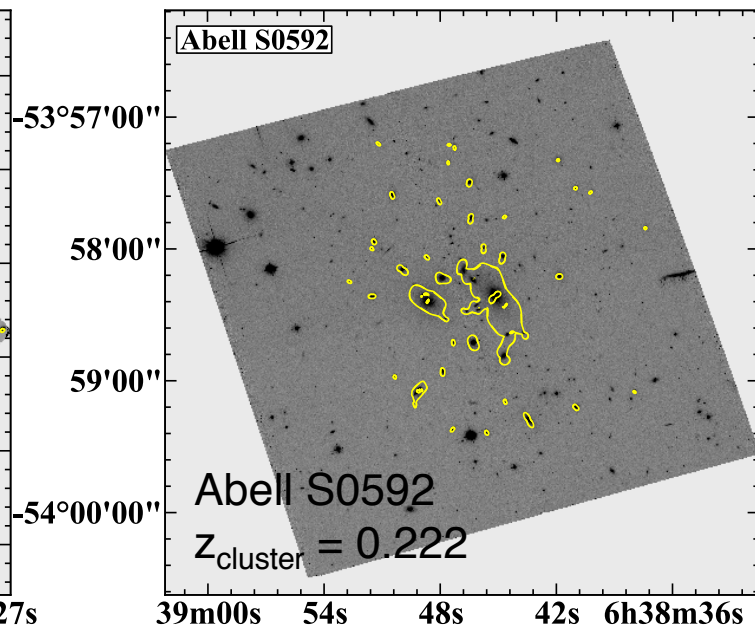
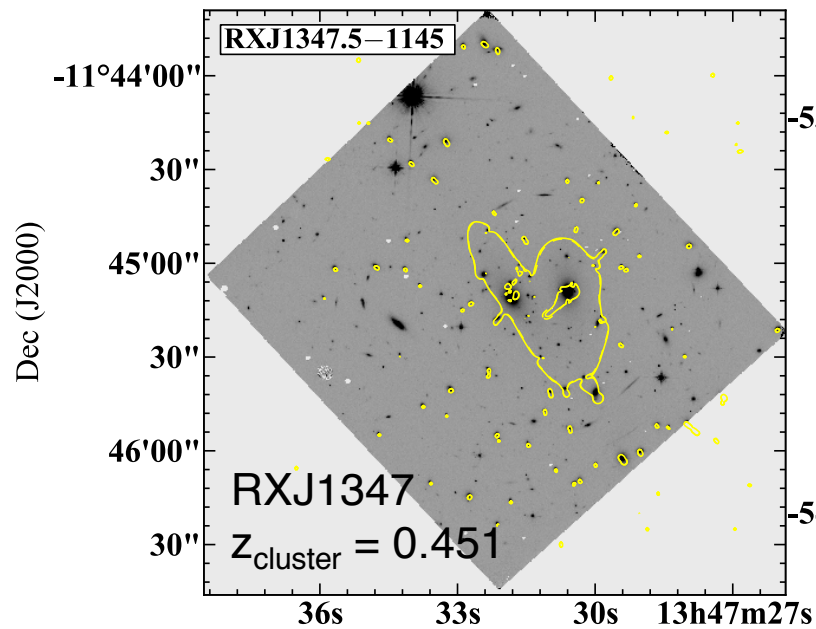
# イントロダクション “先行研究”

- 先行研究における問題点 → 観測バイアス
  - 他波長で選択された銀河に対する追観測がその多くを占めている (e.g., 可視光/近赤外線で明るい銀河)
    - ✓ 星質量や星形成率 (爆発的星形成銀河等) にバイアスがかかる
  - 無バイアス輝線銀河探査が必要！
- ALMA によって無バイアス輝線銀河探査が現実的に
  - ALMA SPECTroscopic Survey in HUDF (ASPECS; Walter+16, Decarli+16, Aravena+16)
    - ✓ スペクトル・スキャン観測 (観測周波数幅 > 数十 GHz)
    - ✓ 総観測時間が膨大になる...
      - e.g., ASPECS では ~ 40 hours (観測面積 ~ 1 平方分)

# イントロダクション “本研究”

- 重力レンズ銀河団の ALMA データを用いた無バイアスミリ波輝線銀河探査
  - 1 周波数チューニング (観測周波数幅  $\sim 8$  GHz)
    - ✓ 我々の観測データ + ALMA アーカイブデータ 計 4 領域
  - ➔ スペクトル・スキャン観測よりも効率的
  - CO & [CII] 輝線光度関数の制限
- なぜ重力レンズ領域なのか？
  - 重力レンズによる増光を利用して輝線光度関数の faint-end 側を制限できる
    - ✓ “普通の” 星形成銀河が支配的
    - ✓ 銀河中のISMの性質が反映されている (励起状態等)

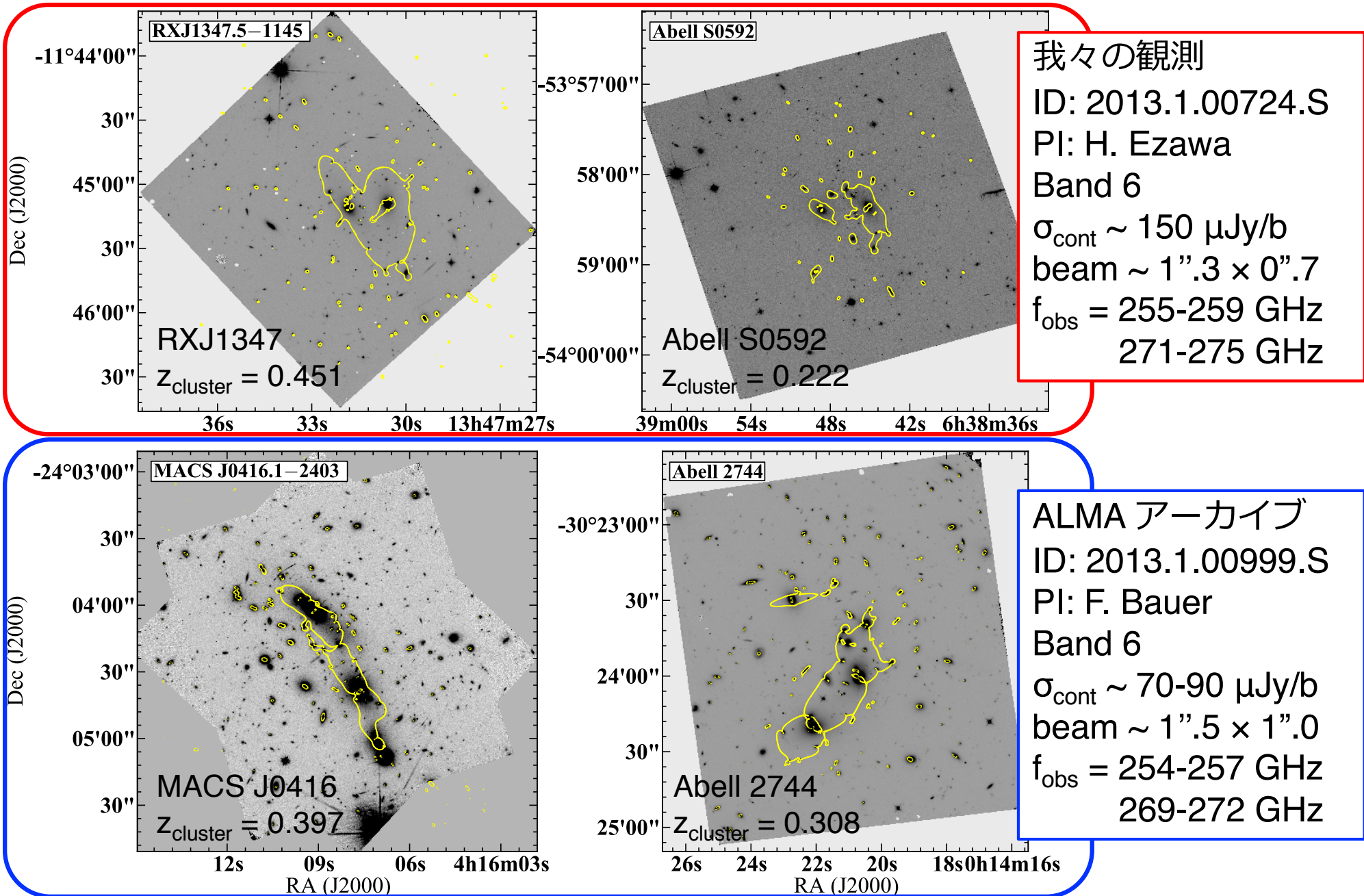
# ALMA データ “4つの銀河団”



背景:  
HST 画像

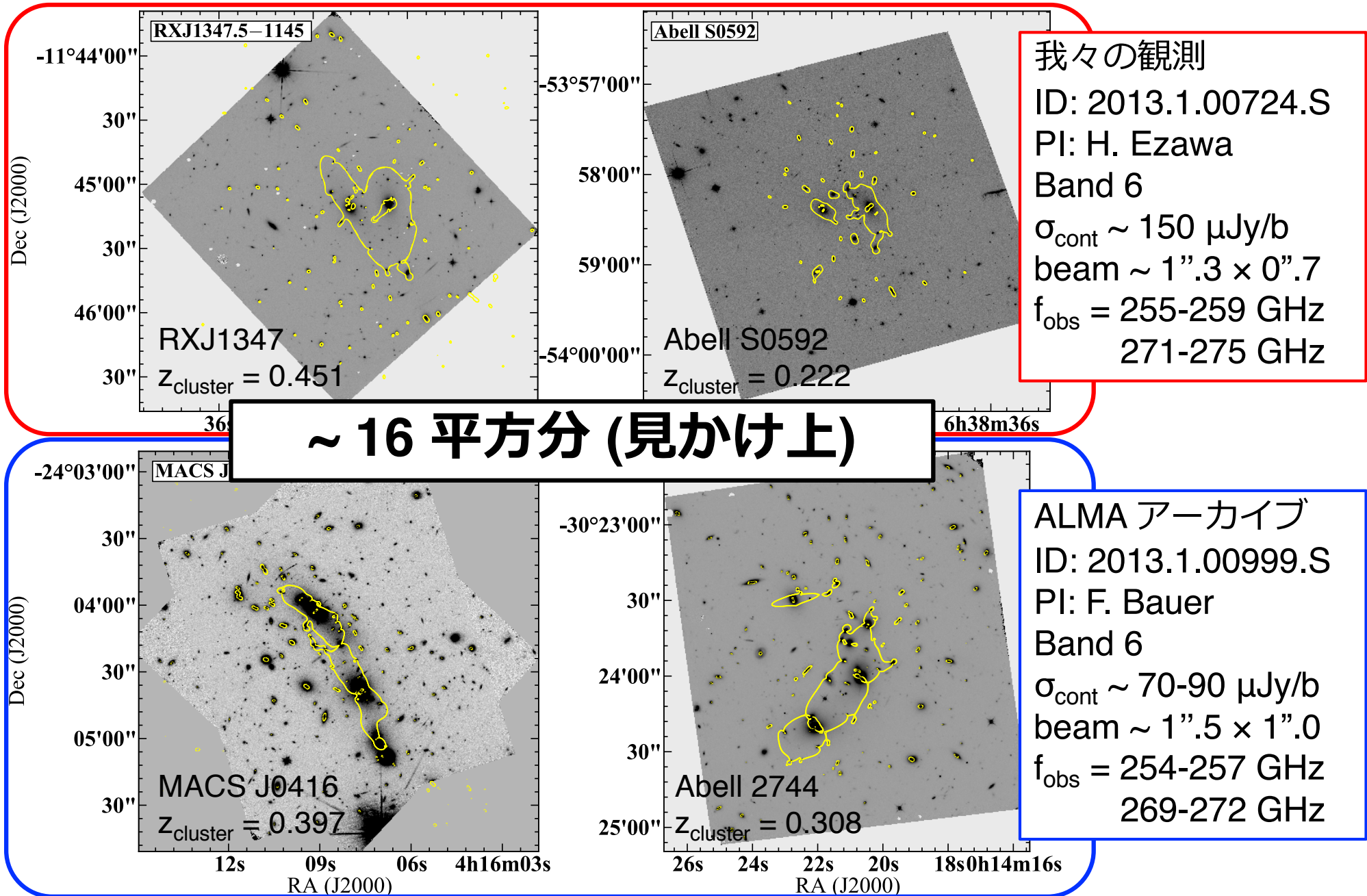


# ALMA データ “我々の観測+アーカイブ”



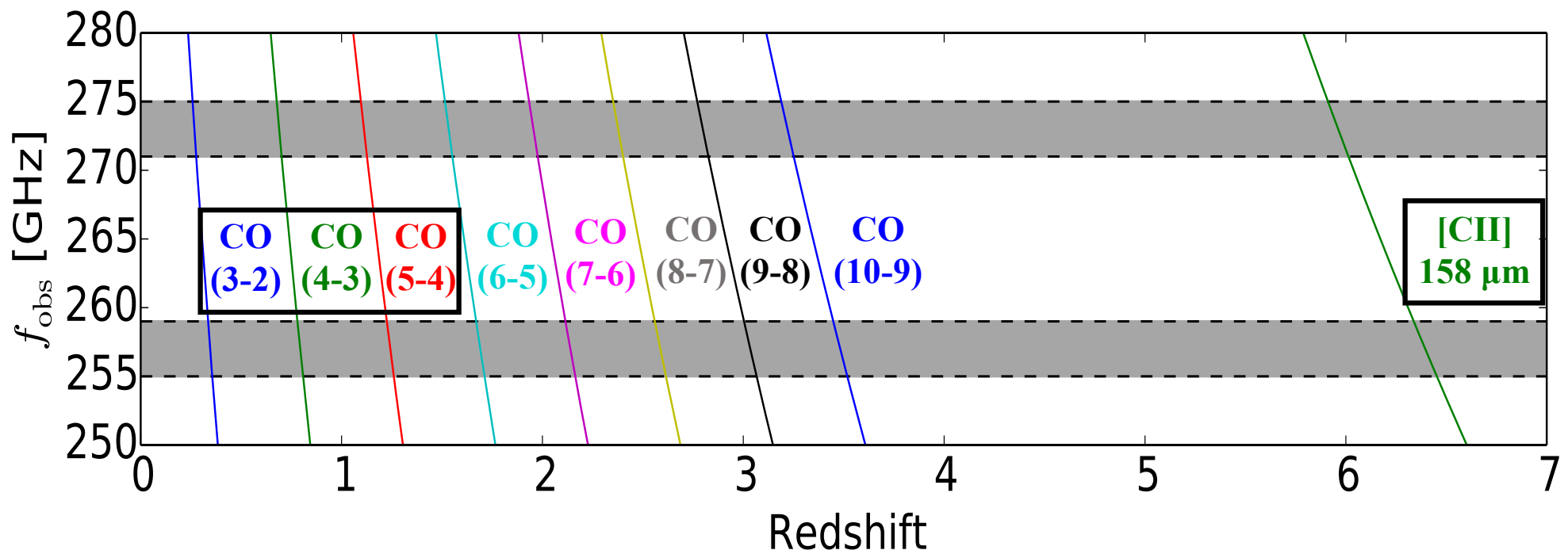


# ALMA データ “我々の観測+アーカイブ”



# 輝線銀河探査の手法

- CASA の CLEAN コマンドを使って, **3次元のデータキューブ**を作成
  - 60, 100 MHz ビニング ( $\sim 67, 111$  km/s @ 270 GHz)
  - $1\sigma \sim 0.7\text{--}1.4$  mJy/beam (見かけ上)
- ピークが  $S/N > 5$  となる輝線天体候補を探索



# 輝線銀河探査の手法

60・100 MHz ビニングの 3D データキューブ



60・100 MHz ビニングの 3D S/N キューブ



*CLUMPFIND* (Williams + 94) を用いて, ピーク  $S/N > 5$  となる輝線天体候補を探索

Yes



ピークに隣接するチャンネルで  $S/N > 3$  で検出されている?

Yes



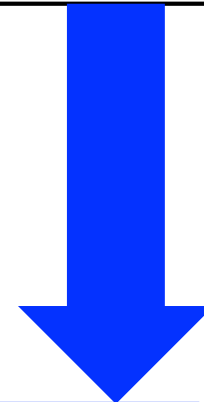
**輝線天体検出!**

No



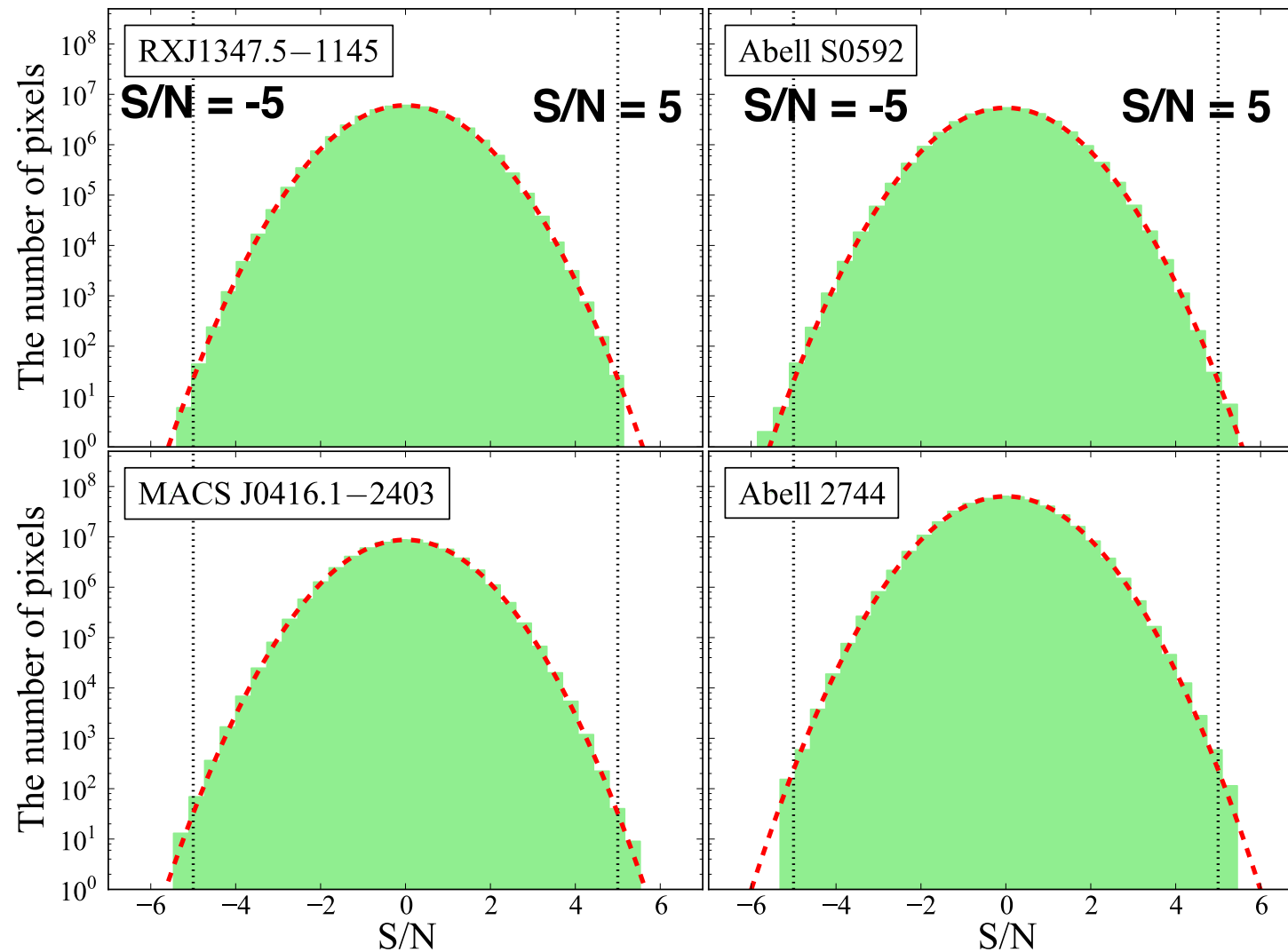
**輝線天体未検出!**

No



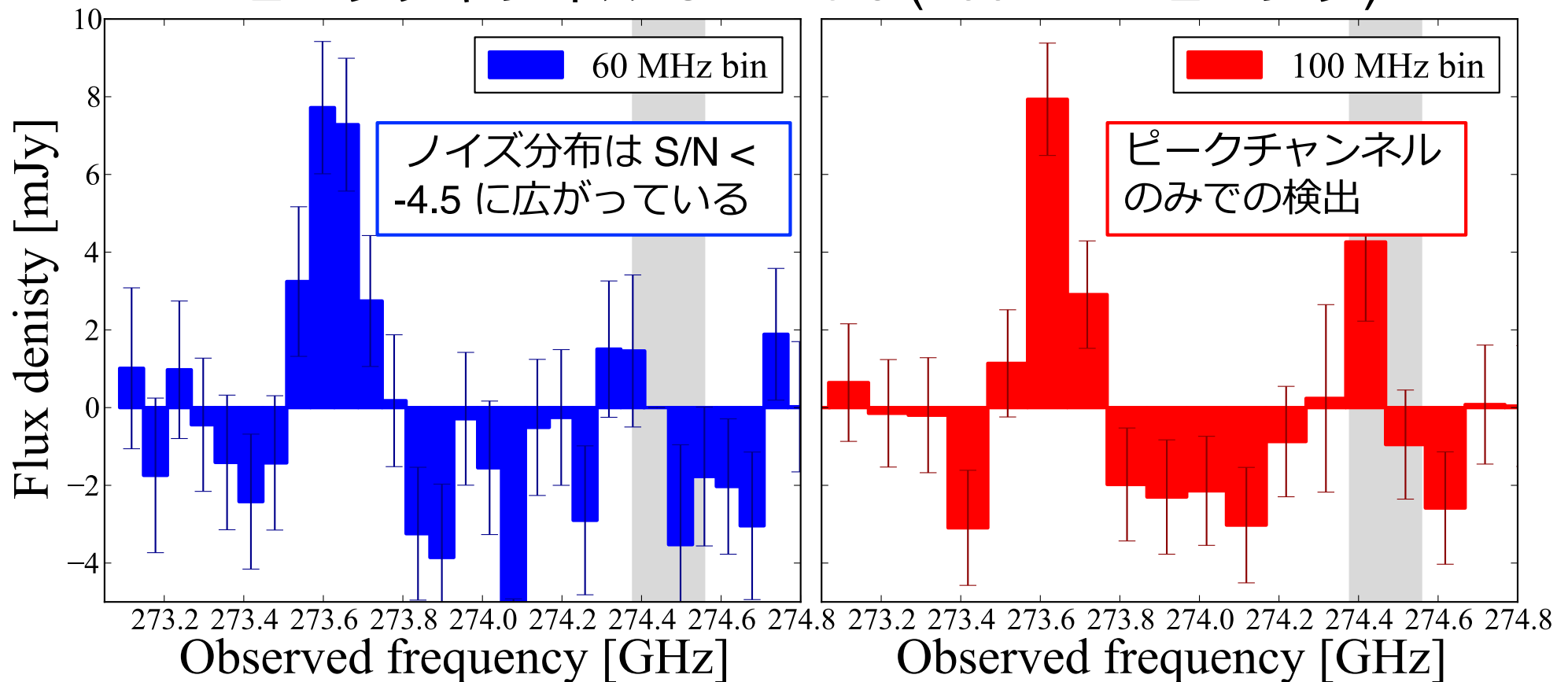
# 輝線銀河探査の結果

- ピーク  $S/N > 5$  となる輝線候補天体は未検出...



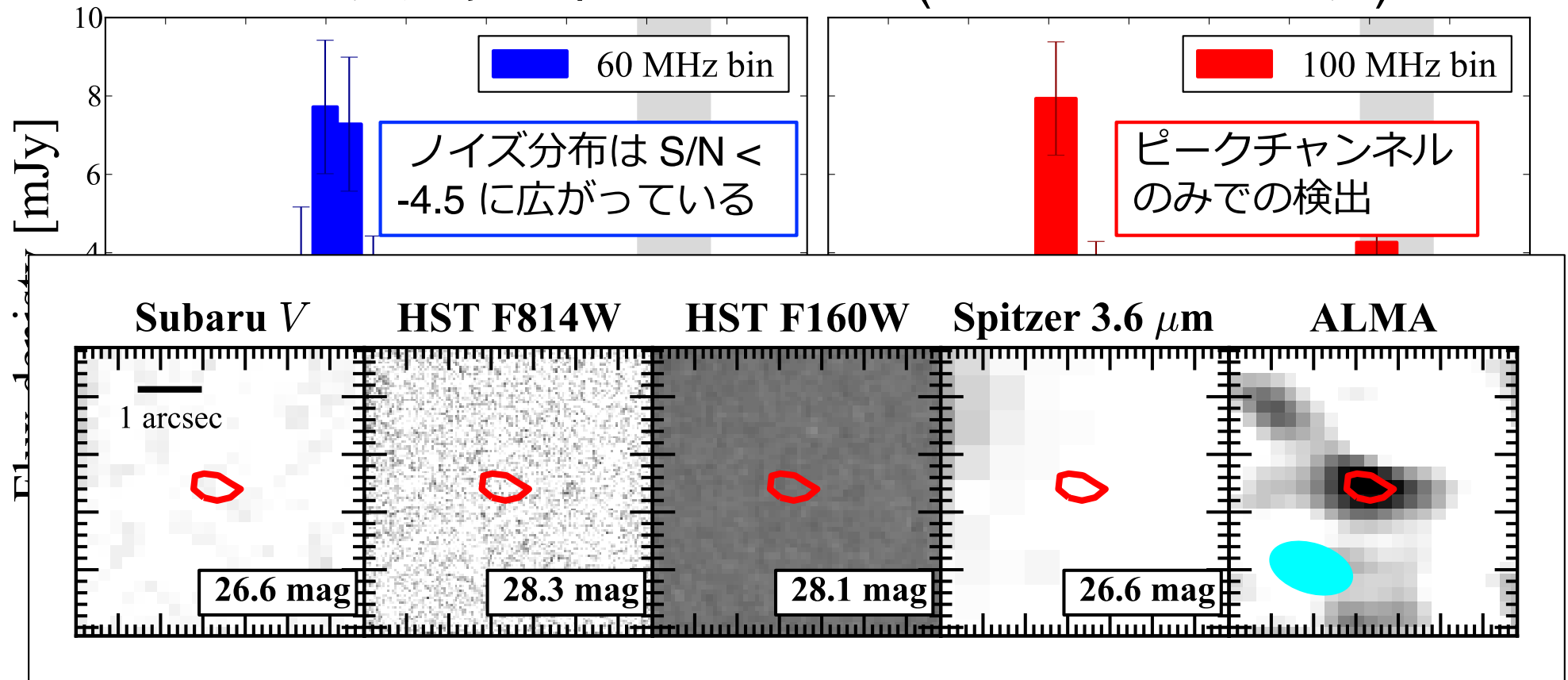
# 輝線銀河探査の結果

- RXJ1347 で検出された輝線天体候補？
  - ピークチャンネル S/N  $\sim 4.5$ , ピークに隣接するチャンネル S/N  $\sim 4.3$  (60 MHz ビニング)
  - ピークチャンネル S/N  $\sim 5.8$  (100 MHz ビニング)



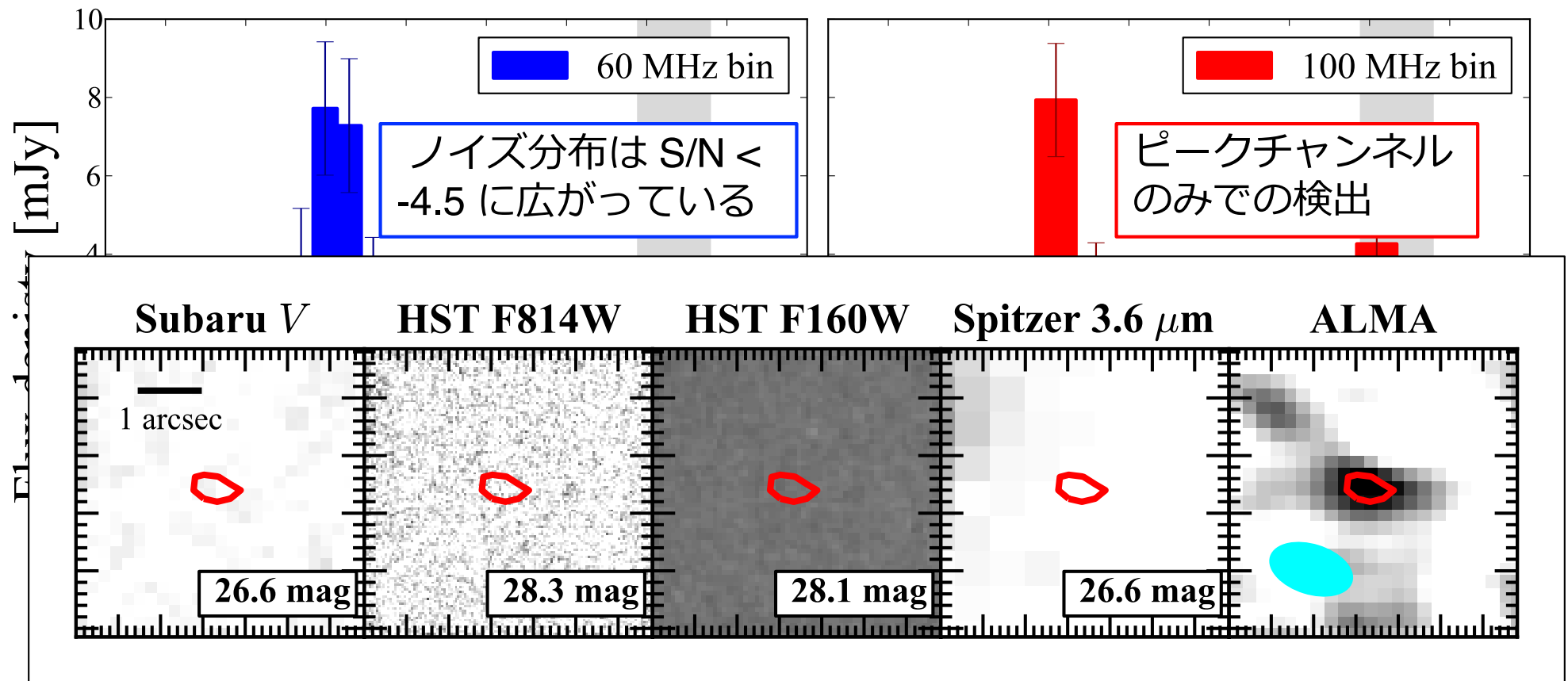
# 輝線銀河探査の結果

- RXJ1347 で検出された輝線天体候補？
  - ピークチャンネル S/N  $\sim 4.5$ , ピークに隣接するチャンネル S/N  $\sim 4.3$  (60 MHz ビニング)
  - ピークチャンネル S/N  $\sim 5.8$  (100 MHz ビニング)



# 輝線銀河探査の結果

- RXJ1347 で検出された輝線天体候補？
  - 本研究では検出天体として扱わない
  - 検出 or 未検出を確かめるには新たな観測が必要

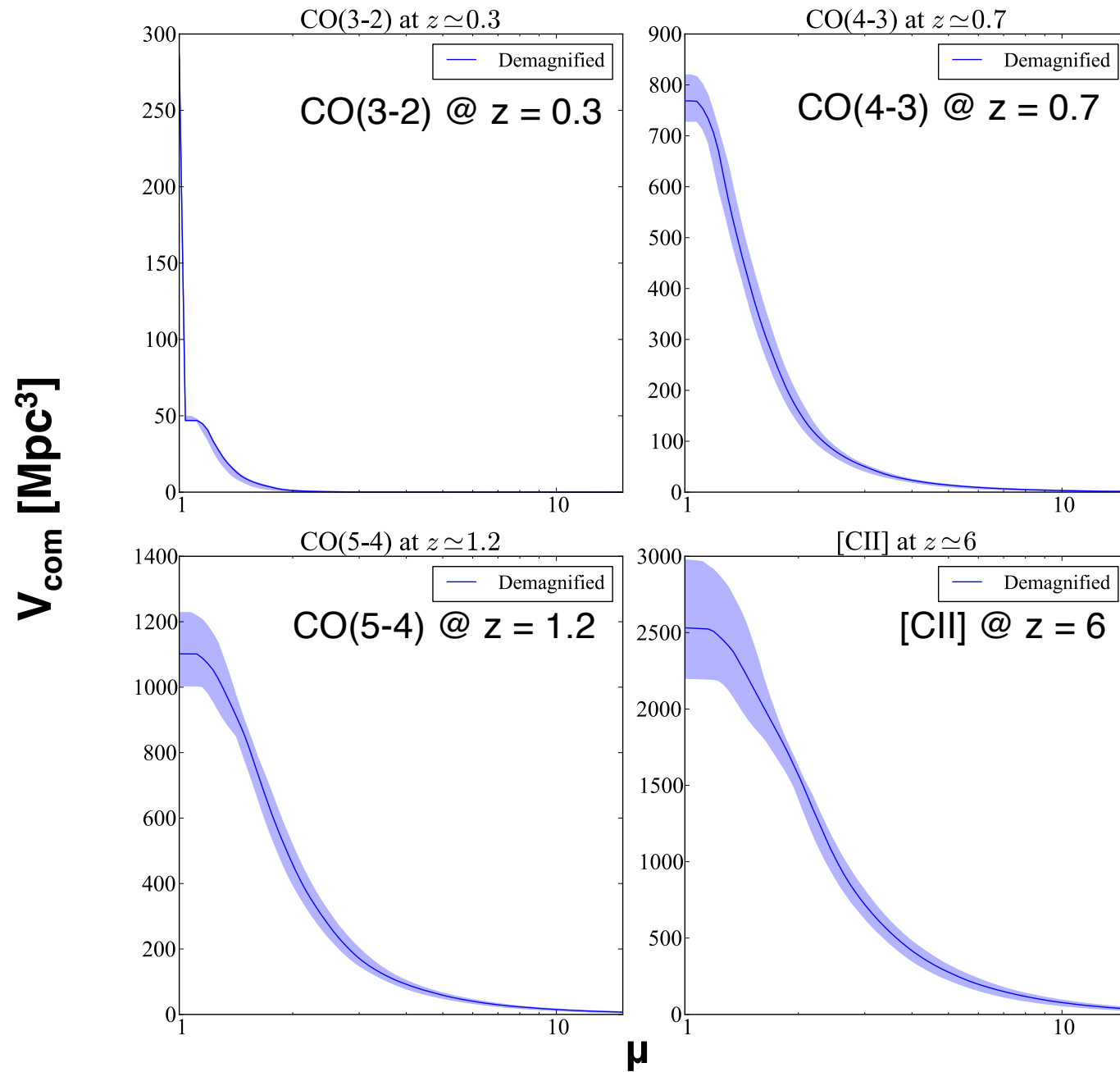




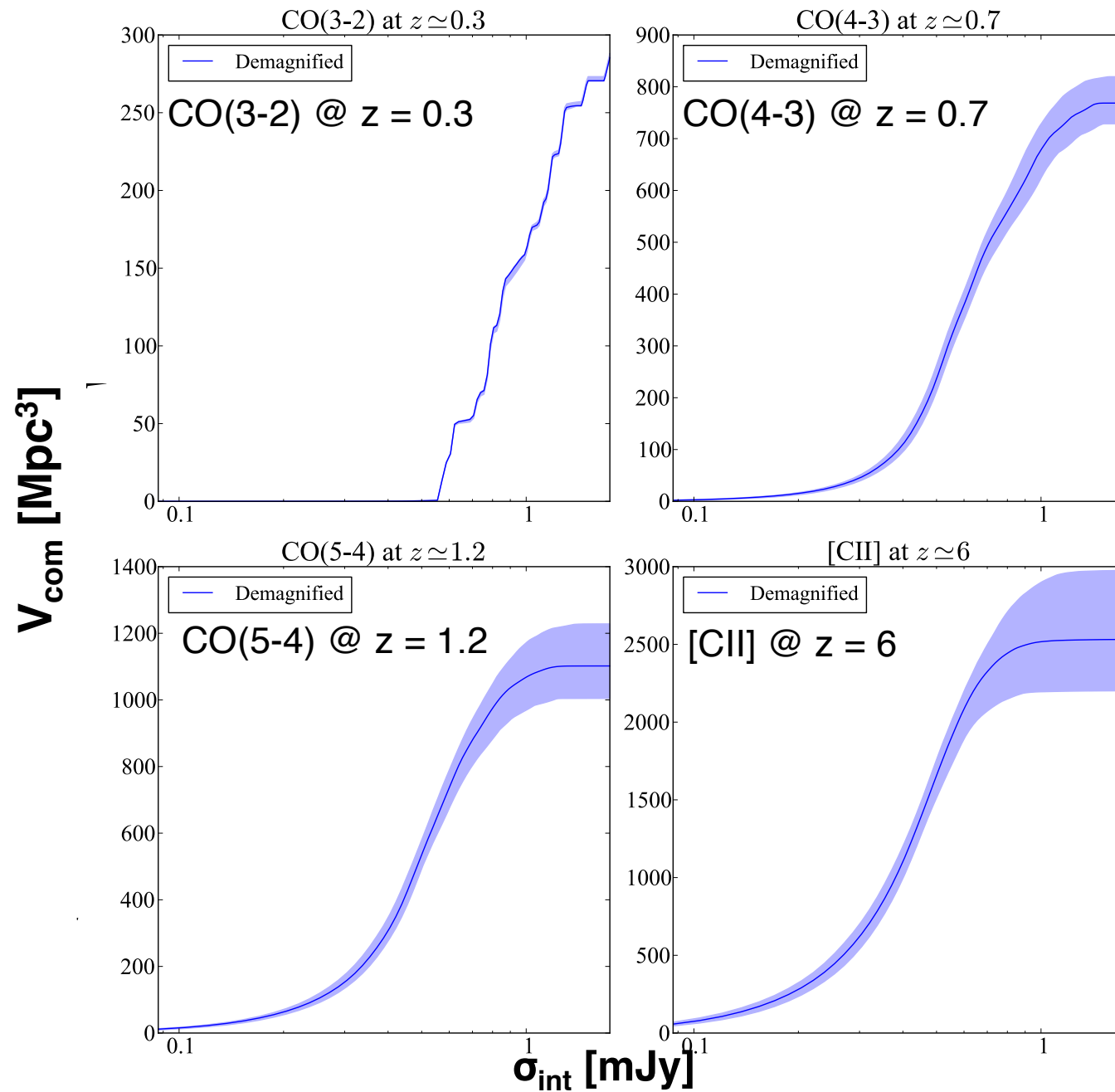
# 考察 “探査体積の推定”

- 輝線光度関数を制限するために**実際の探査体積**を推定
  - 重力レンズ銀河団の質量分布モデル
    - ✓ RXJ1347 (Kitayama + ), Abell S0592 (Oguri + ),  
MACS J0416 & Abell 2744 (Kawamata + 16)
    - ✓ 重力レンズモデルは GLAFIC (Oguri 2010) を使用
  - 重力レンズモデルの不定性の推定
    - ✓ MCMC を使って, 重力レンズモデルの不定性を推定 (by  
大栗さん)

# 考察 “探査体積の推定”



# 考察 “探査体積の推定”

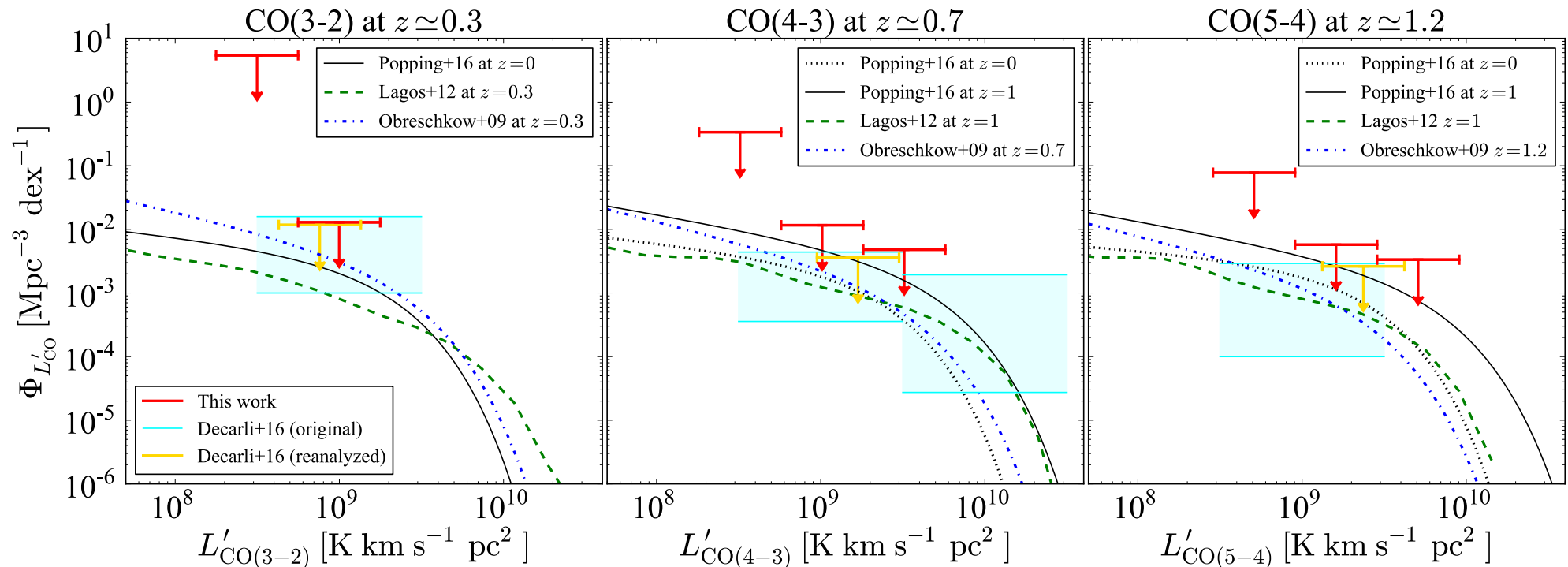


# 考察 “輝線天体の個数密度の推定”

Line	Redshift range	$\log L'_{\text{line}}$ [K km s <sup>-1</sup> pc <sup>2</sup> ]	$V_{\text{com}}$ [Mpc <sup>3</sup> ]	Density [Mpc <sup>-3</sup> ]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
CO(3-2)	0.257–0.276, 0.335–0.357 <sup>a</sup>	8.3–8.8	$0.6778^{+0.1666}_{-0.2799}$	$< 2.7^{+1.9}_{-0.5}$
	0.286–0.271, 0.346–0.361 <sup>b</sup>	8.8–9.3	$285.5^{+2.6}_{-0.4}$	$< (6.4^{+0.0}_{-0.1}) \times 10^{-3}$
CO(4-3)	0.677–0.701, 0.780–0.808 <sup>a</sup>	8.3–8.8	$10.94^{+1.16}_{-1.99}$	$< (1.7^{+0.4}_{-0.2}) \times 10^{-1}$
	0.695–0.714, 0.794–0.815 <sup>b</sup>	8.8–9.3	$316.8^{+26.5}_{-27.0}$	$< (5.8^{+0.5}_{-0.5}) \times 10^{-3}$
		9.3–9.8	$768.5^{+51.0}_{-39.9}$	$< (2.4^{+0.1}_{-0.1}) \times 10^{-3}$
CO(5-4)	1.10–1.13, 1.22–1.26 <sup>a</sup>	8.5–9.0	$47.42^{+5.35}_{-6.88}$	$< (3.9^{+0.7}_{-0.4}) \times 10^{-2}$
	1.12–1.14, 1.24–1.27 <sup>b</sup>	9.0–9.5	$642.5^{+50.8}_{-50.8}$	$< (2.9^{+0.2}_{-0.2}) \times 10^{-3}$
		9.5–10.0	$1102^{+126}_{-96}$	$< (1.7^{+0.2}_{-0.2}) \times 10^{-3}$
[CII] 158 $\mu\text{m}$	5.91–6.01, 6.34–6.45 <sup>a</sup>	8.2–8.7 <sup>c</sup>	$216.0^{+34.9}_{-98.5}$	$< (8.5^{+1.8}_{-1.1}) \times 10^{-3}$
	5.99–6.07, 6.40–6.48 <sup>b</sup>	8.7–9.2 <sup>c</sup>	$1896^{+106}_{-178}$	$< (9.7^{+1.0}_{-0.5}) \times 10^{-4}$
		9.2–9.7 <sup>c</sup>	$2532^{+444}_{-331}$	$< (7.3^{+1.1}_{-1.1}) \times 10^{-4}$

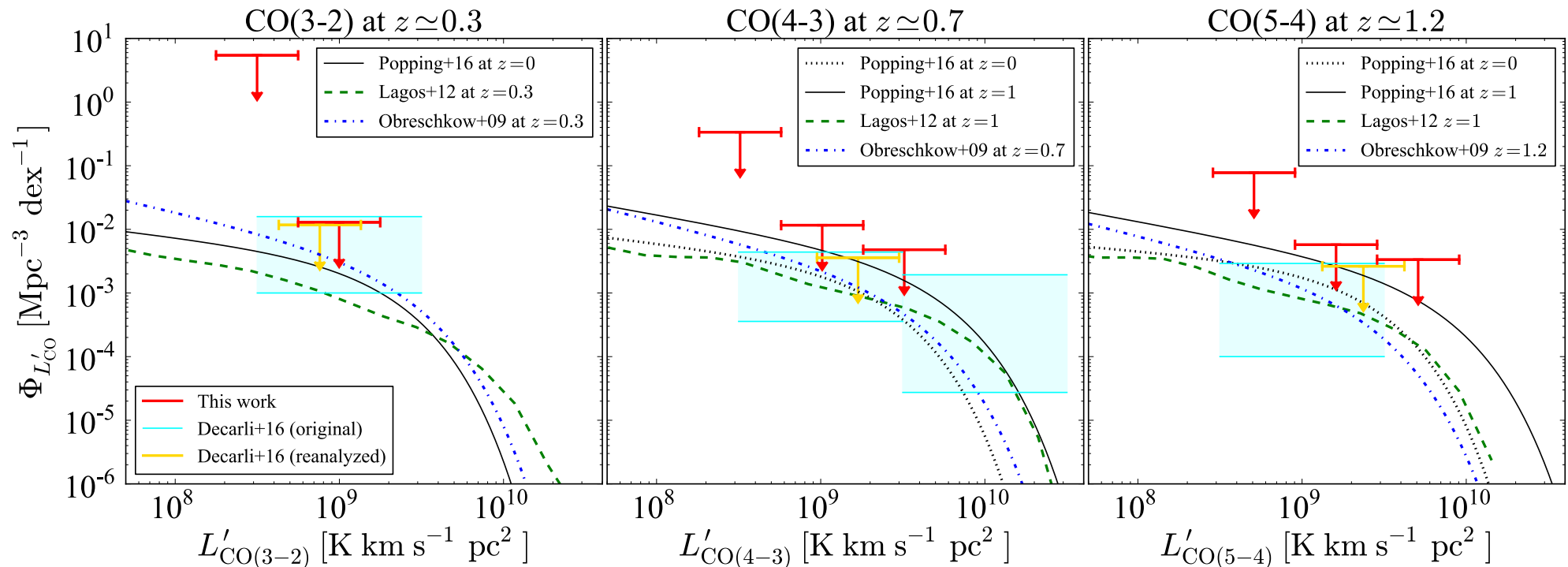
※ [CII] 輝線の単位は [ $L_{\odot}$ ]

# 考察 “CO 輝線光度関数”



- 得られた上限値 (赤いシンボル) は過去の観測値や準解析的モデルの計算結果と矛盾しない
  - CO 輝線光度関数の進化も準解析的モデルと無矛盾
- 一方で, 過去の観測よりも  $> 0.5 \text{ dex}$  程度暗い範囲まで制限することに初めて成功

# 考察 “CO 輝線光度関数”

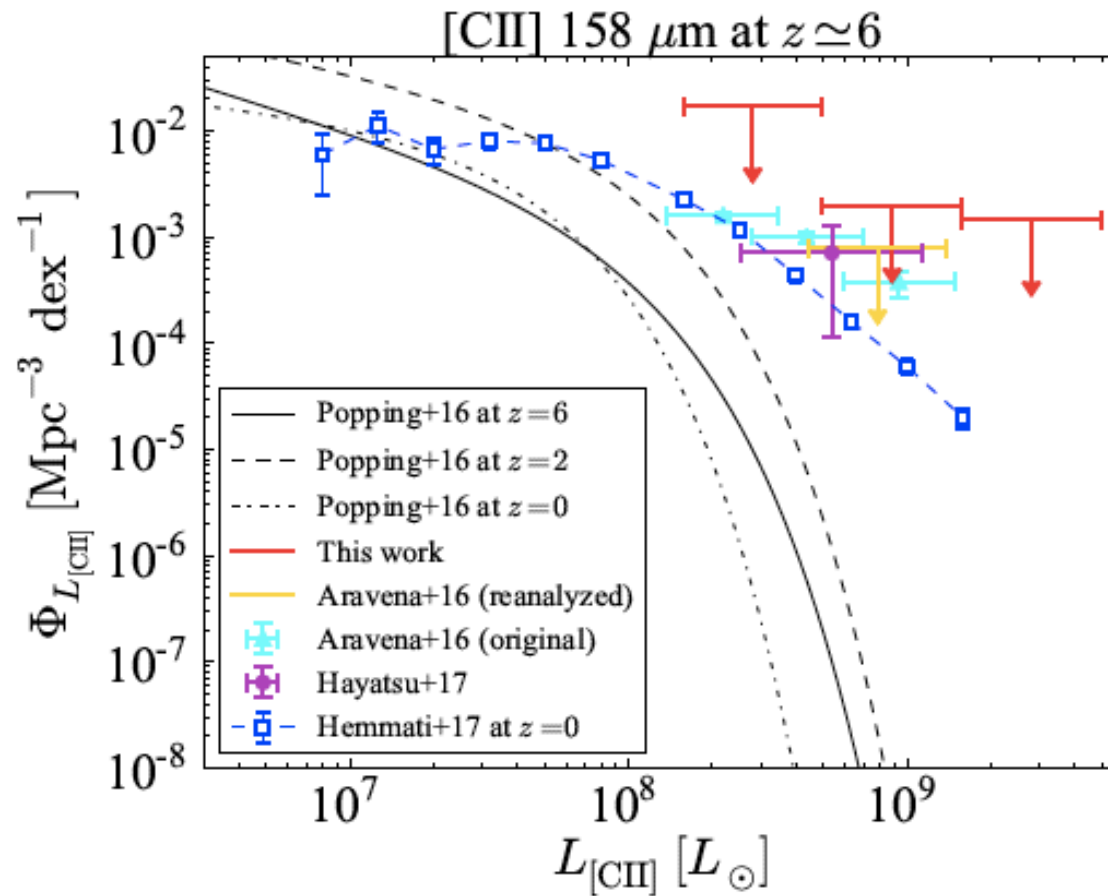


→ 重力レンズ銀河団の ALMA データは CO 輝線光度数を制限するのに有用な手段である！

– CO 輝線光度関数の進化も準解析的モデルと無矛盾

- 一方で, 過去の観測よりも  $> 0.5$  dex 程度暗い範囲まで制限することに初めて成功

# 考察 “[CII] 輝線光度関数”



- 上限値は準解析的モデルの数桁上に位置するが, 依然として観測値と無矛盾
  - 準解析的モデルは [CII] 輝線天体の数密度を過小評価?



# まとめ

- 重力レンズ銀河団の ALMA データを用いた**無バイアスの輝線銀河探査**
  - $S/N > 5$  となる**輝線天体は未検出**
    - ✓  $S/N \sim 4.5$  (60 MHz ビニングキューブ) の“**輝線候補天体**”
- CO・[CII] 輝線光度関数に対する制限
  - **過去の観測・準解析的モデルと無矛盾**
  - 従来の観測よりも  **$> 0.5$  dex 程度暗い領域に初めて制限を与えた (特に CO 輝線)**
  - 準解析的モデルは [CII] 輝線銀河の個数密度を過小評価している可能性がある