

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

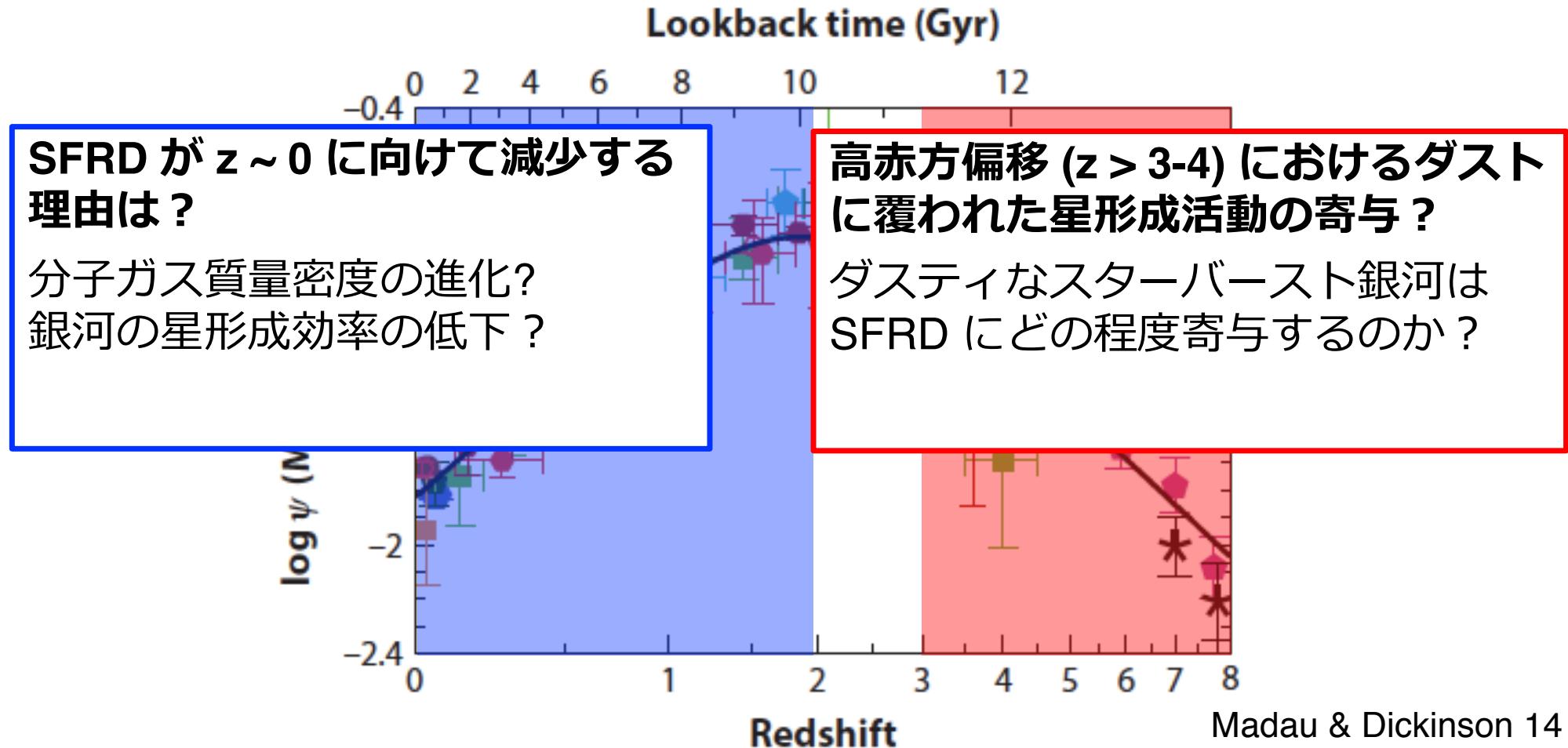
山口裕貴

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

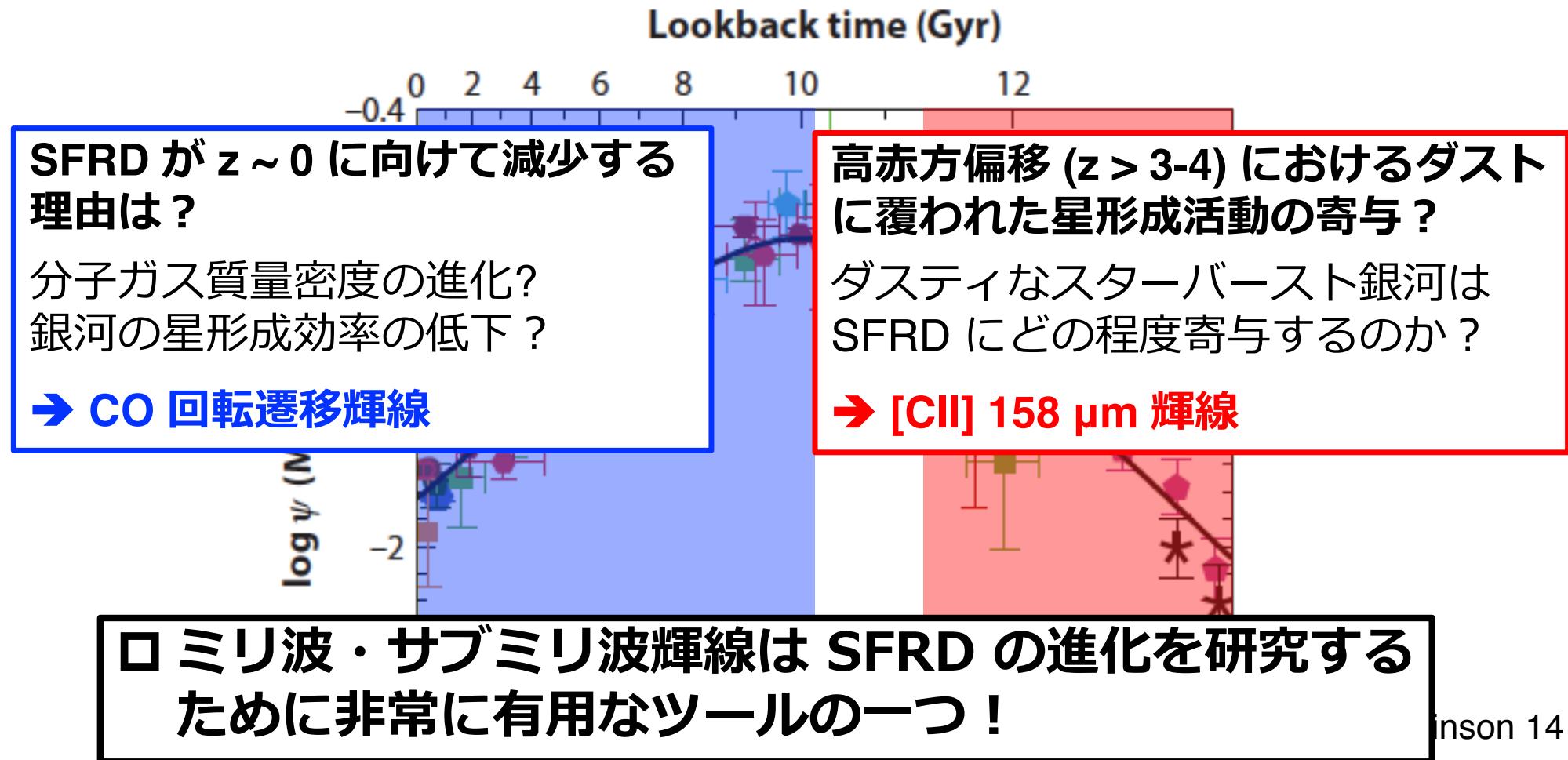
イントロダクション “ミリ波・サブミリ波輝線銀河の重要性”

- 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



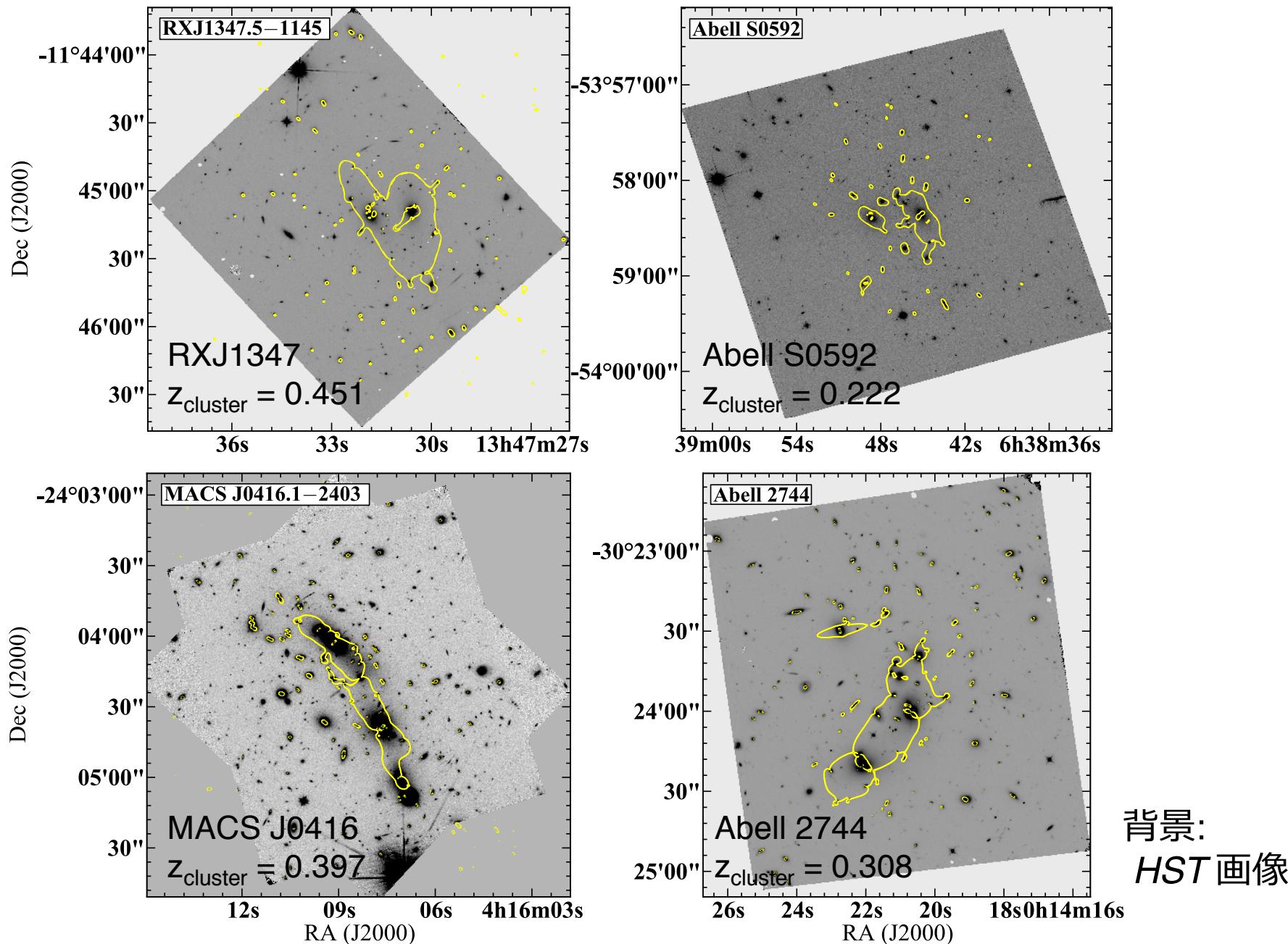
イントロダクション “先行研究”

- 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)

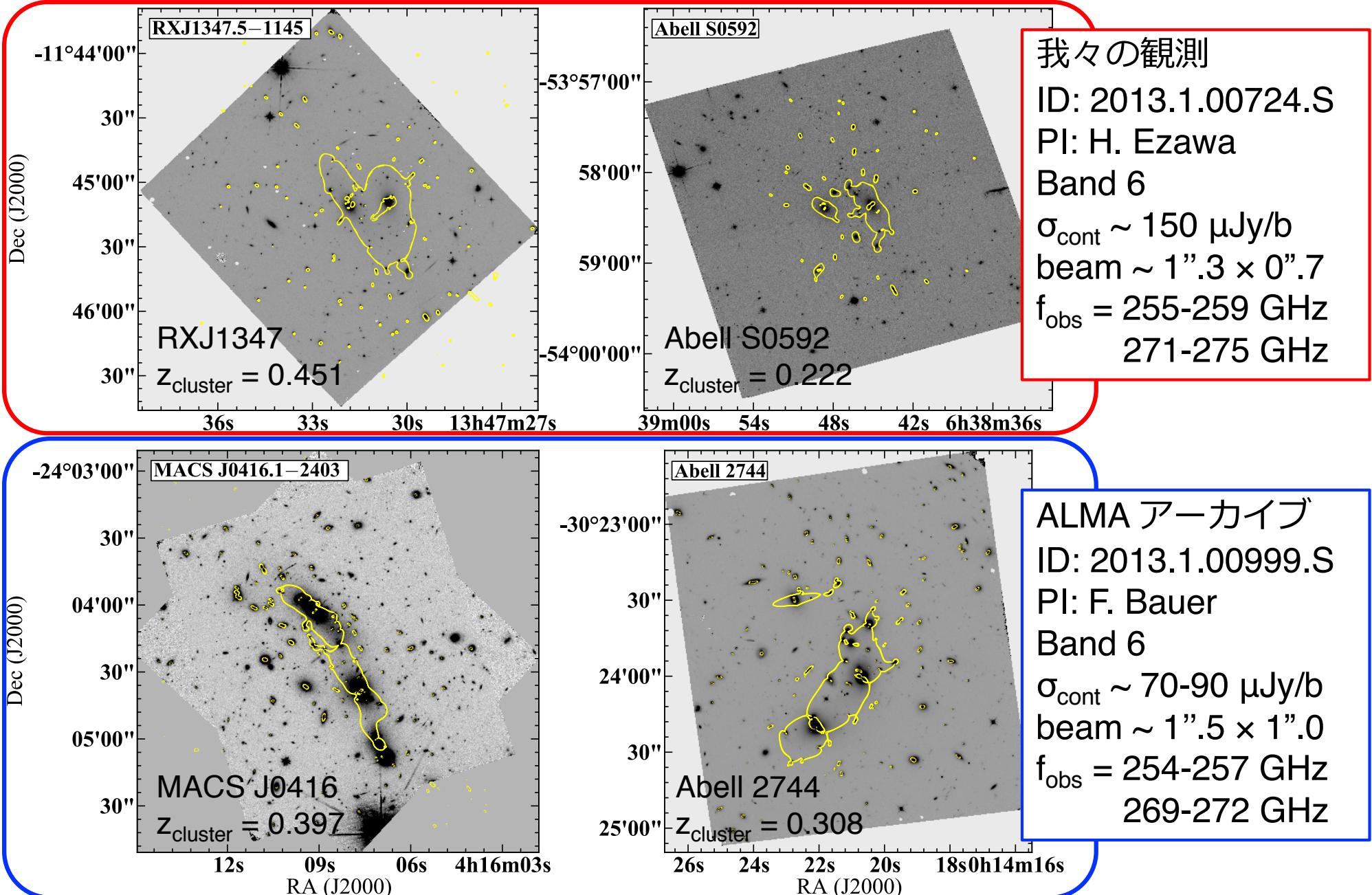
イントロダクション “本研究”

- 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 ~ 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)

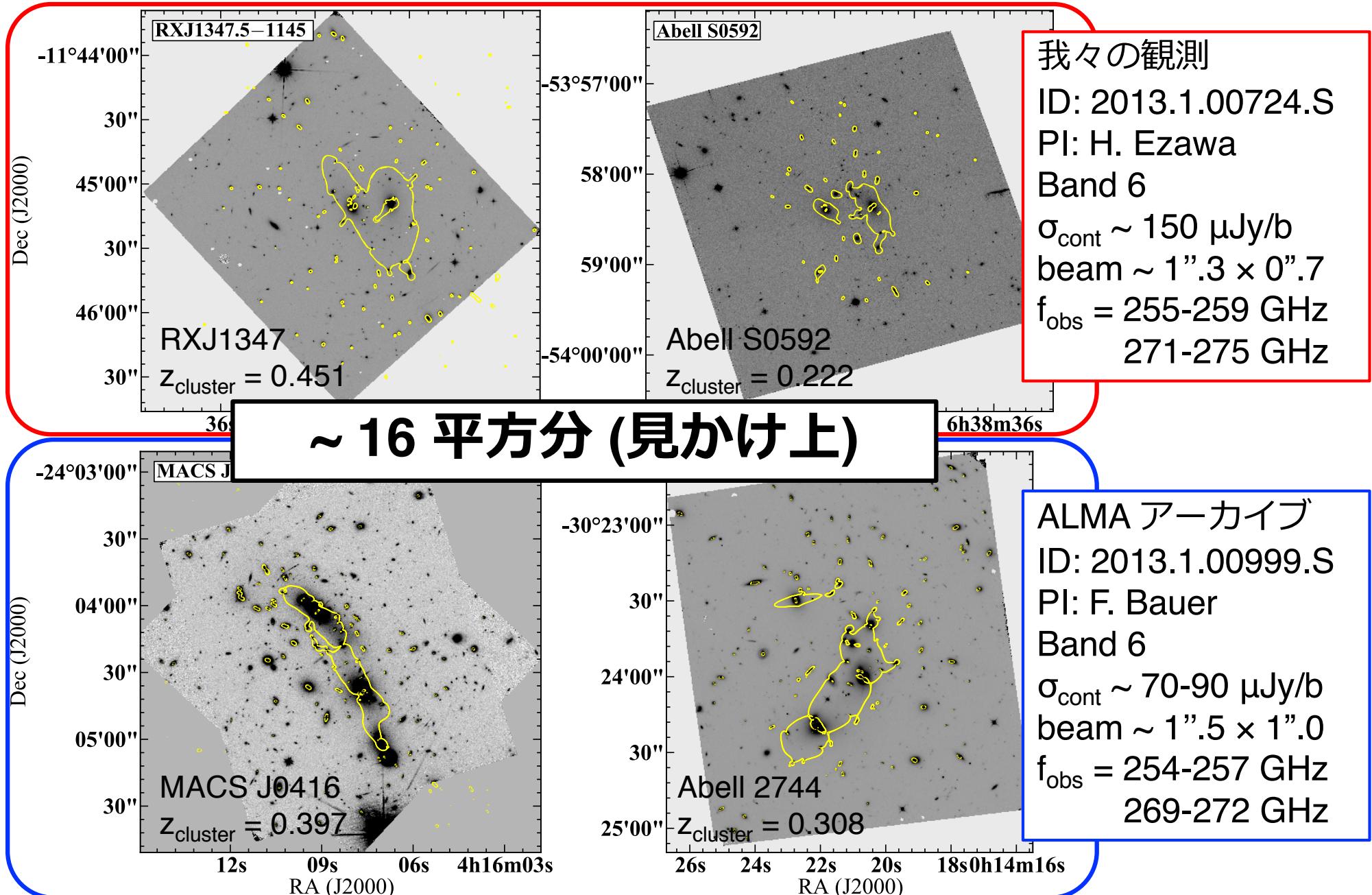
ALMA データ “4 つの銀河団”



ALMA データ “我々の観測+アーカイブ”

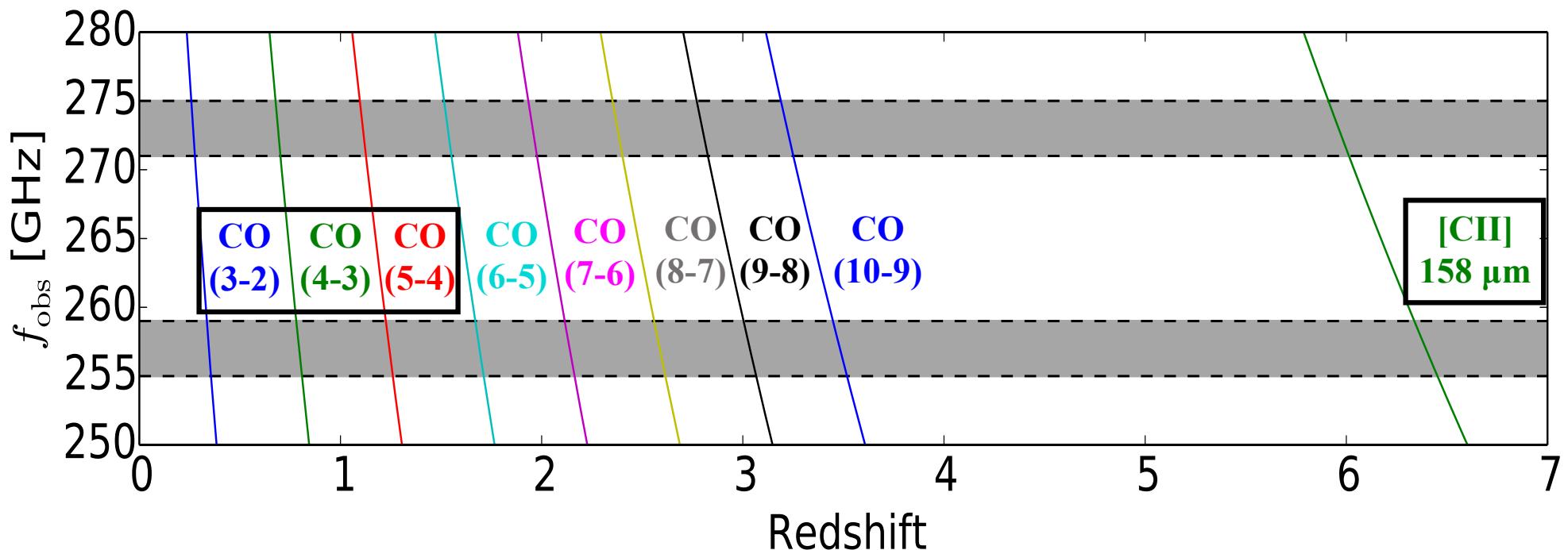


ALMA データ “我々の観測+アーカイブ”



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査



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査

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!

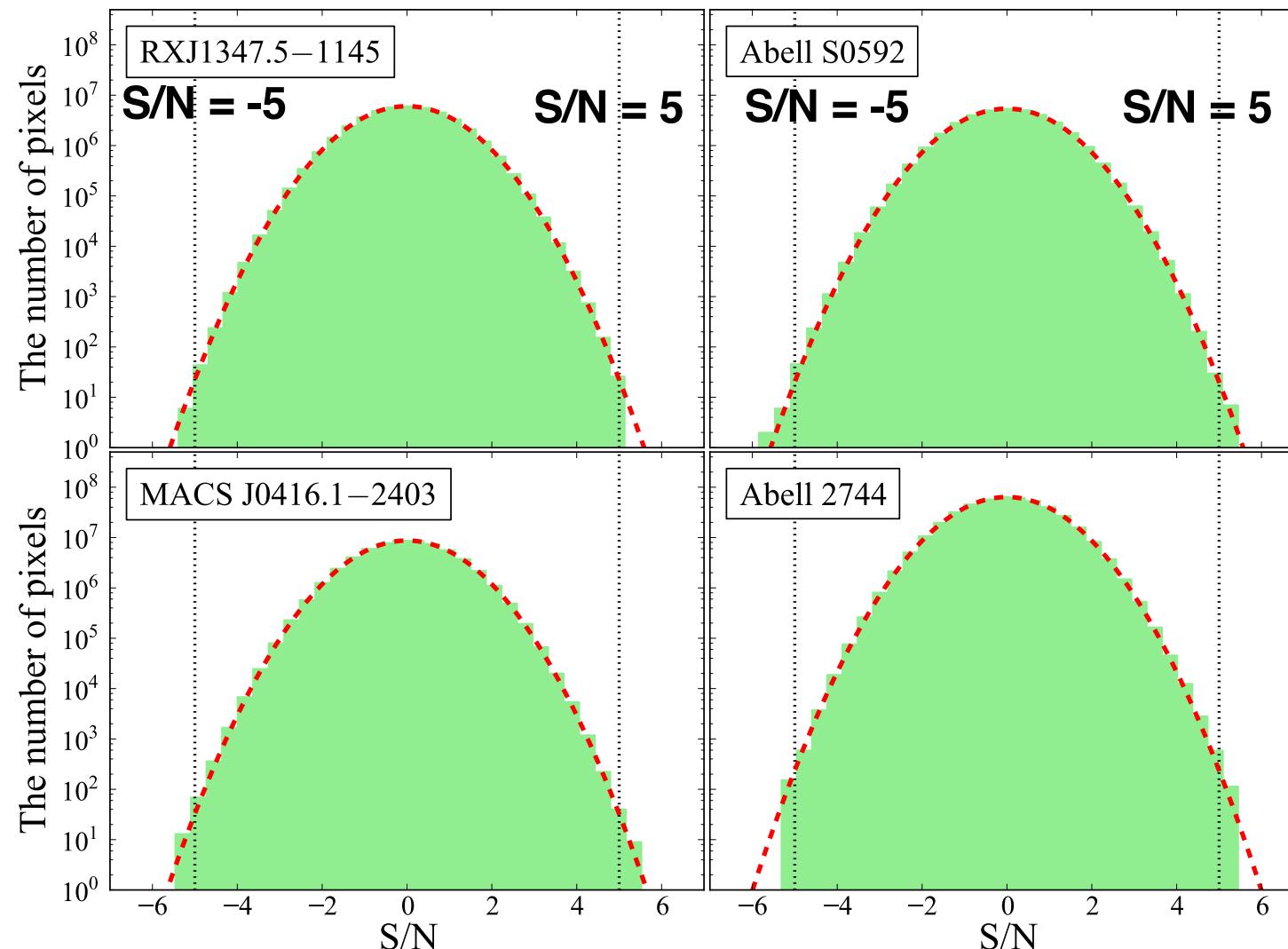
No

No

輝線天体未検出!

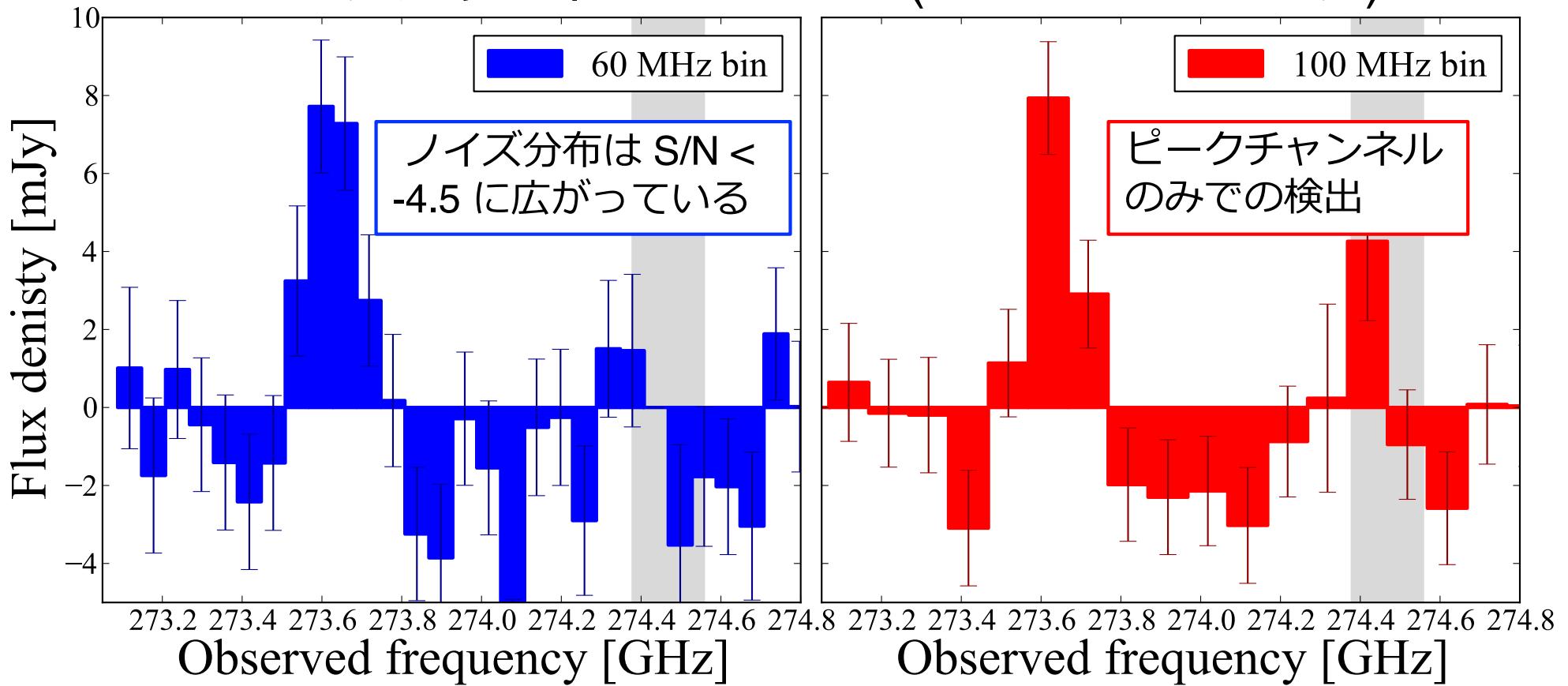
輝線銀河探査の結果

- ・ピーカ S/N > 5 となる輝線候補天体は未検出...



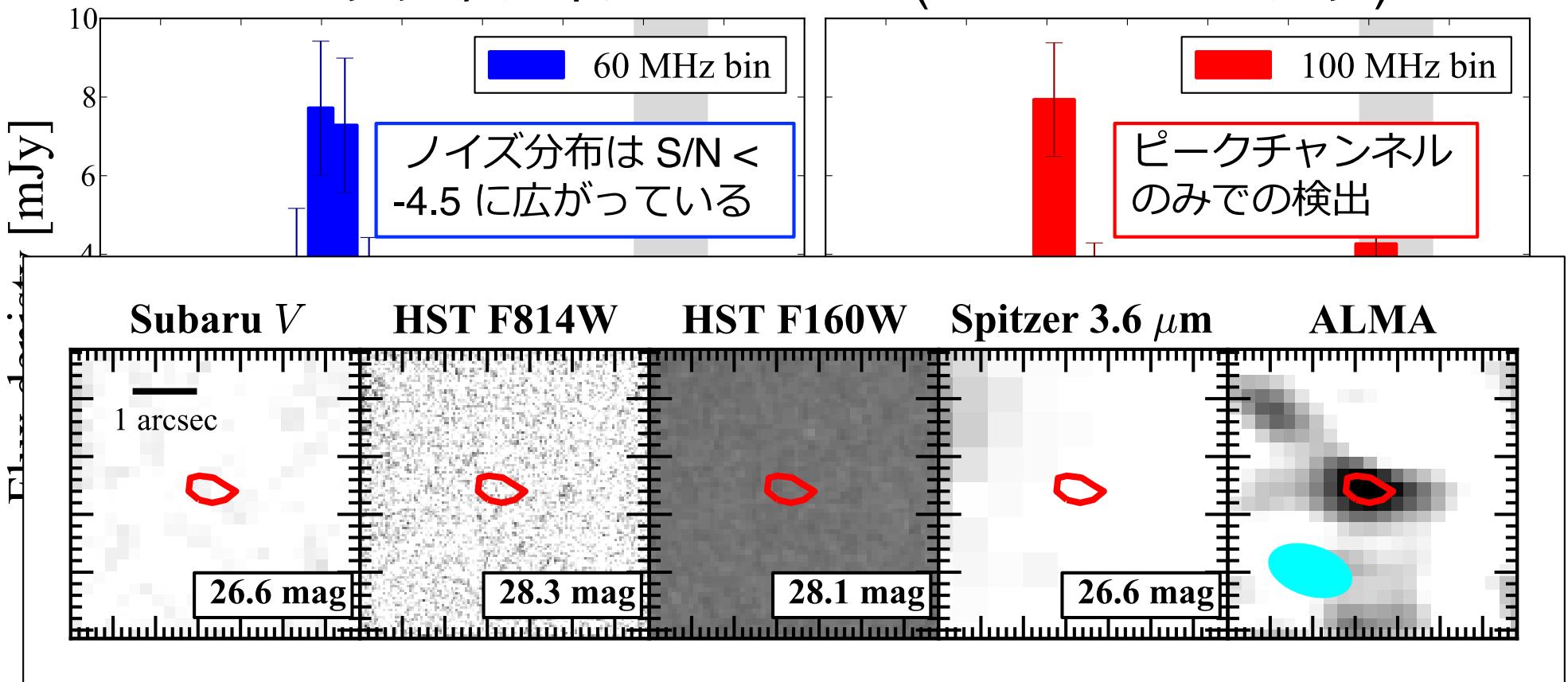
輝線銀河探査の結果

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



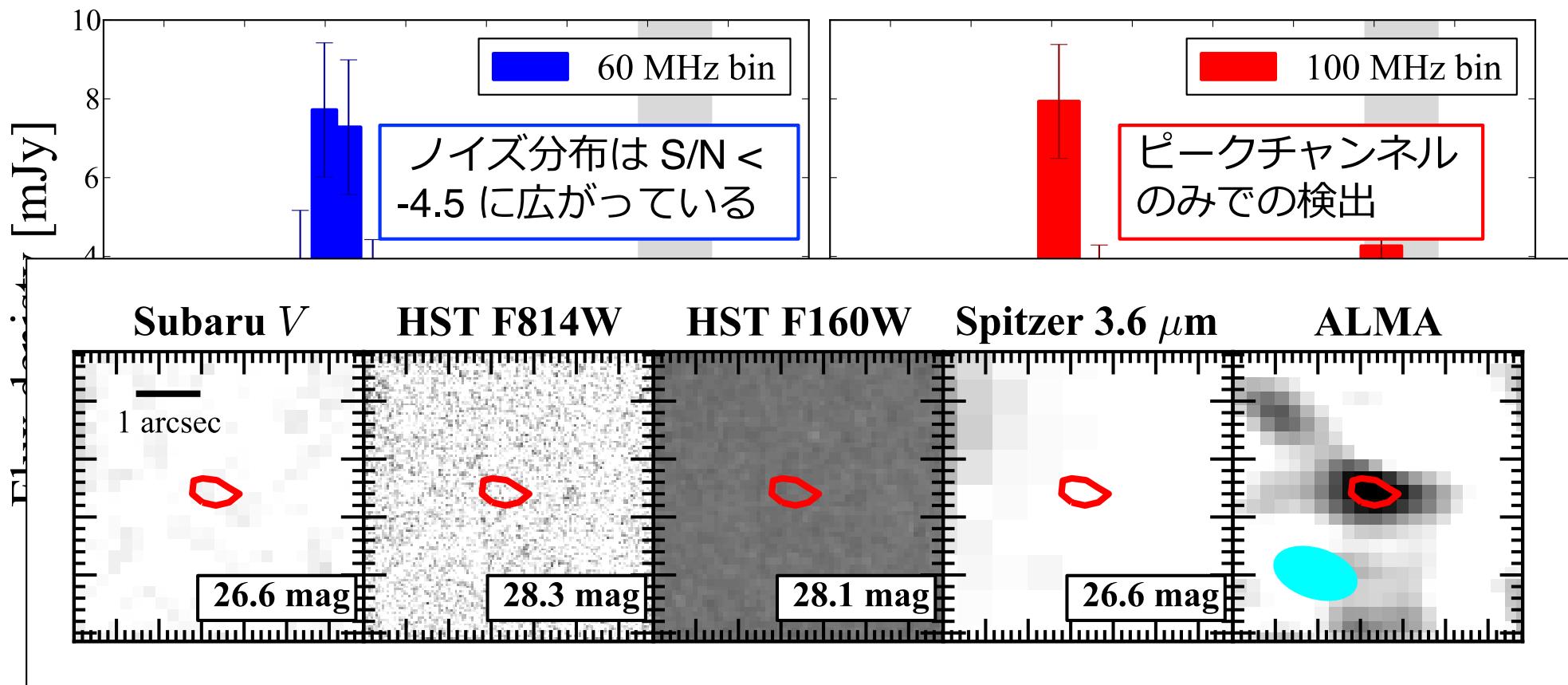
輝線銀河探査の結果

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



輝線銀河探査の結果

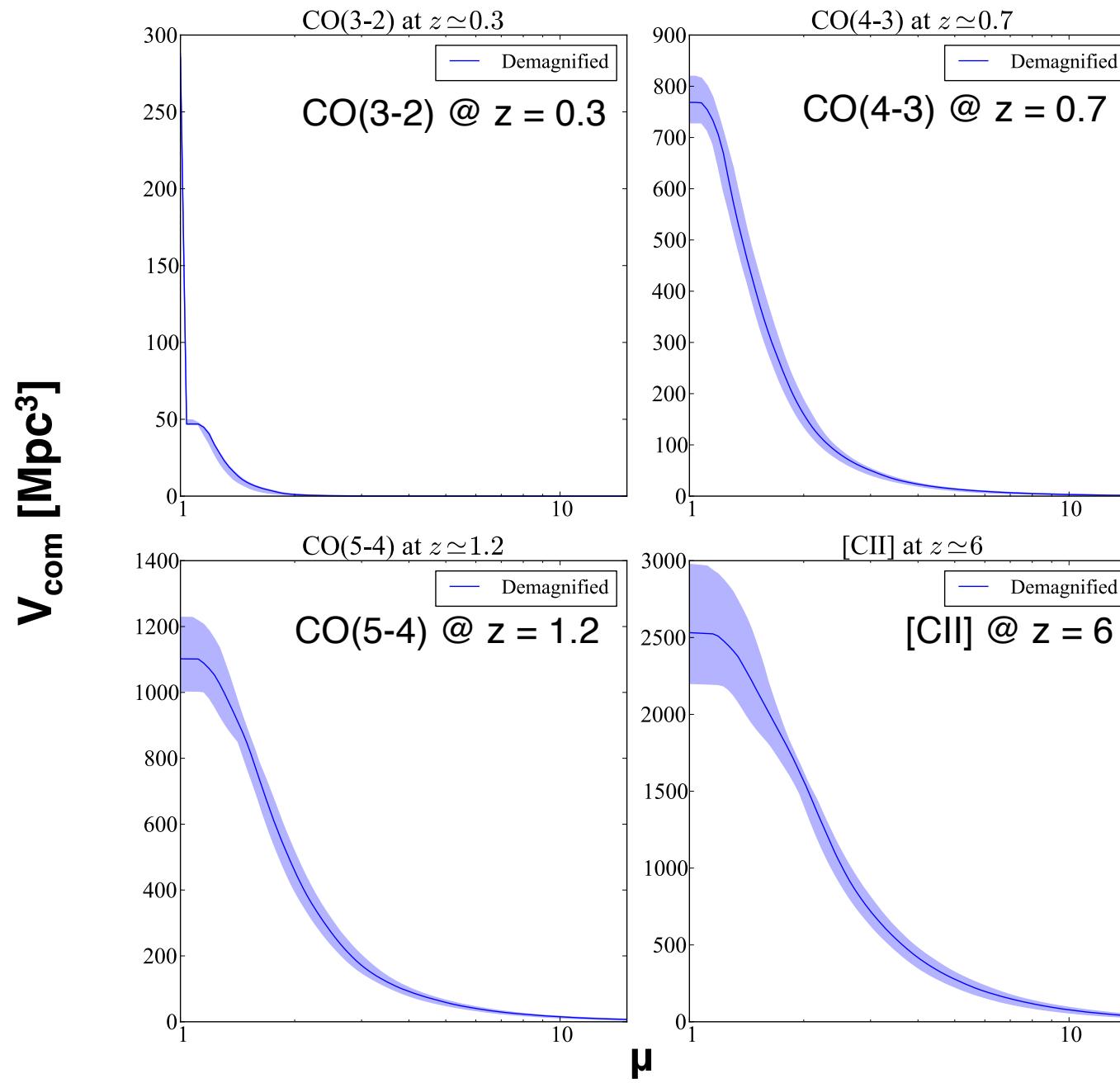
- RXJ1347 で検出された輝線天体候補 ?
 - 本研究では検出天体として扱わない
 - 検出 or 未検出を確かめるには新たな観測が必要



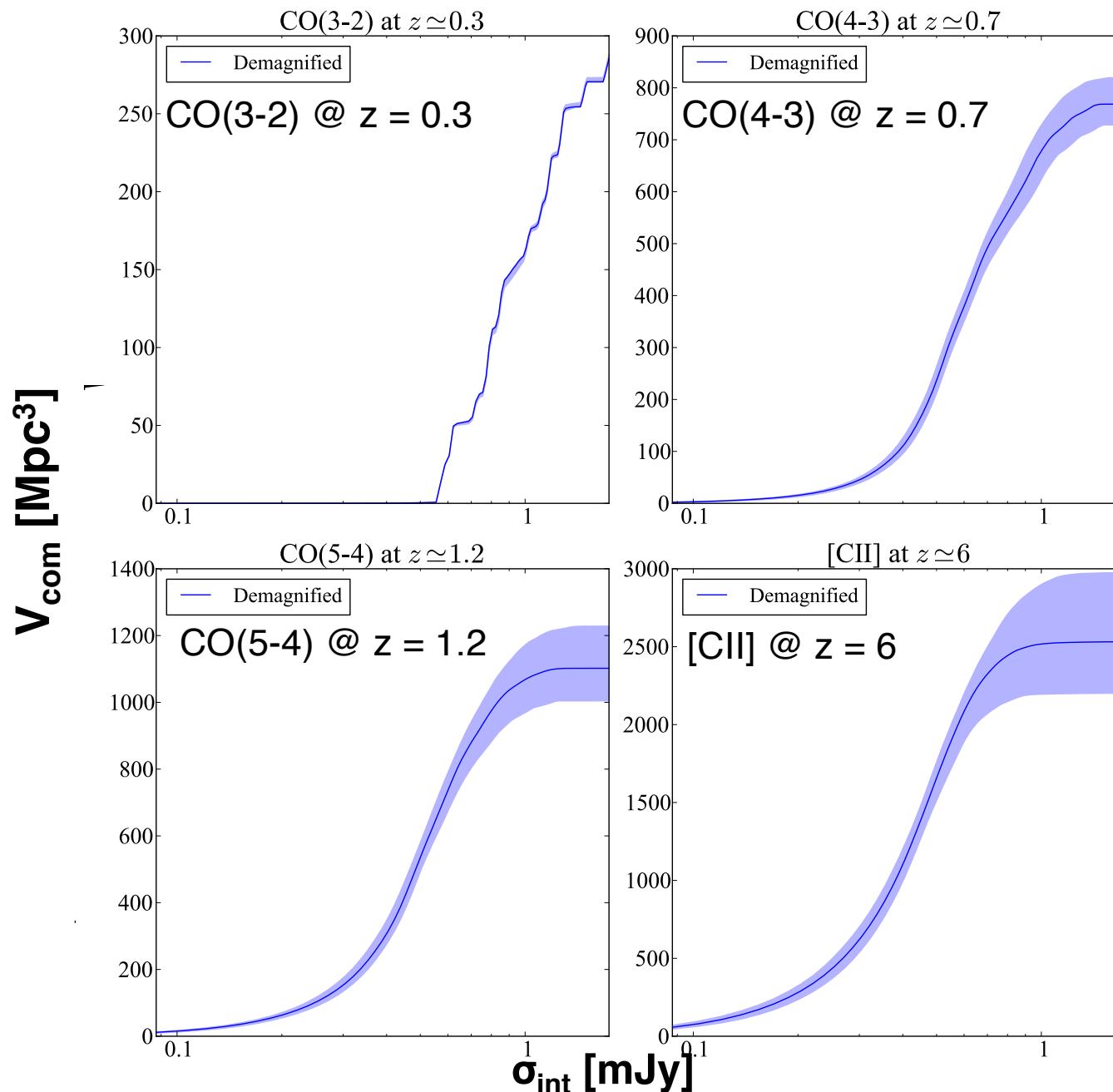
考察 “探査体積の推定”

- 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”

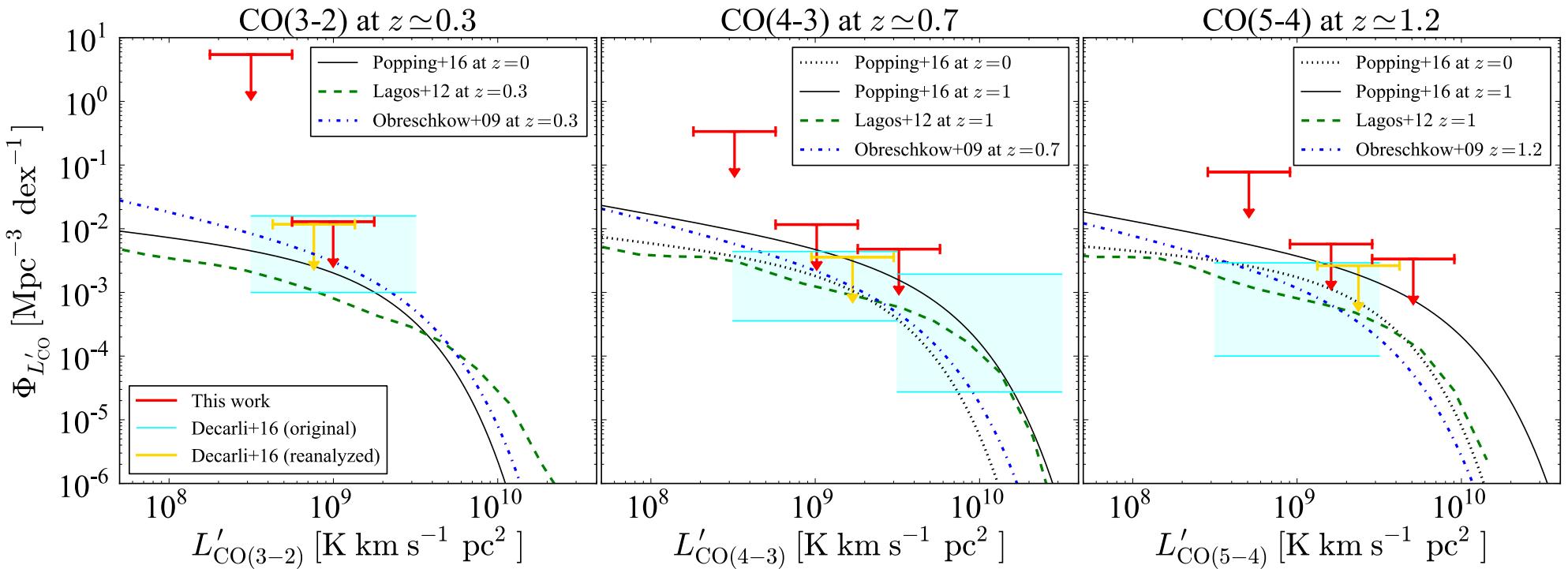


考察 “輝線天体の個数密度の推定”

| Line | Redshift range | $\log L'_{\text{line}}$ | V_{com} | Density |
|--------------|---------------------------------------|---|------------------------------|--|
| | | [K km s ⁻¹ pc ²] | [Mpc ³] | [Mpc ⁻³] |
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
| CO(3-2) | 0.257–0.276, 0.335–0.357 ^a | 8.3–8.8 | $0.6778^{+0.1666}_{-0.2799}$ | $< 2.7^{+1.9}_{-0.5}$ |
| | 0.286–0.271, 0.346–0.361 ^b | 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 ^a | 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 ^b | 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 ^a | 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 ^b | 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 μm | 5.91–6.01, 6.34–6.45 ^a | 8.2–8.7 ^c | $216.0^{+34.9}_{-98.5}$ | $< (8.5^{+1.8}_{-1.1}) \times 10^{-3}$ |
| | 5.99–6.07, 6.40–6.48 ^b | 8.7–9.2 ^c | 1896^{+106}_{-178} | $< (9.7^{+1.0}_{-0.5}) \times 10^{-4}$ |
| | | 9.2–9.7 ^c | 2532^{+444}_{-331} | $< (7.3^{+1.1}_{-1.1}) \times 10^{-4}$ |

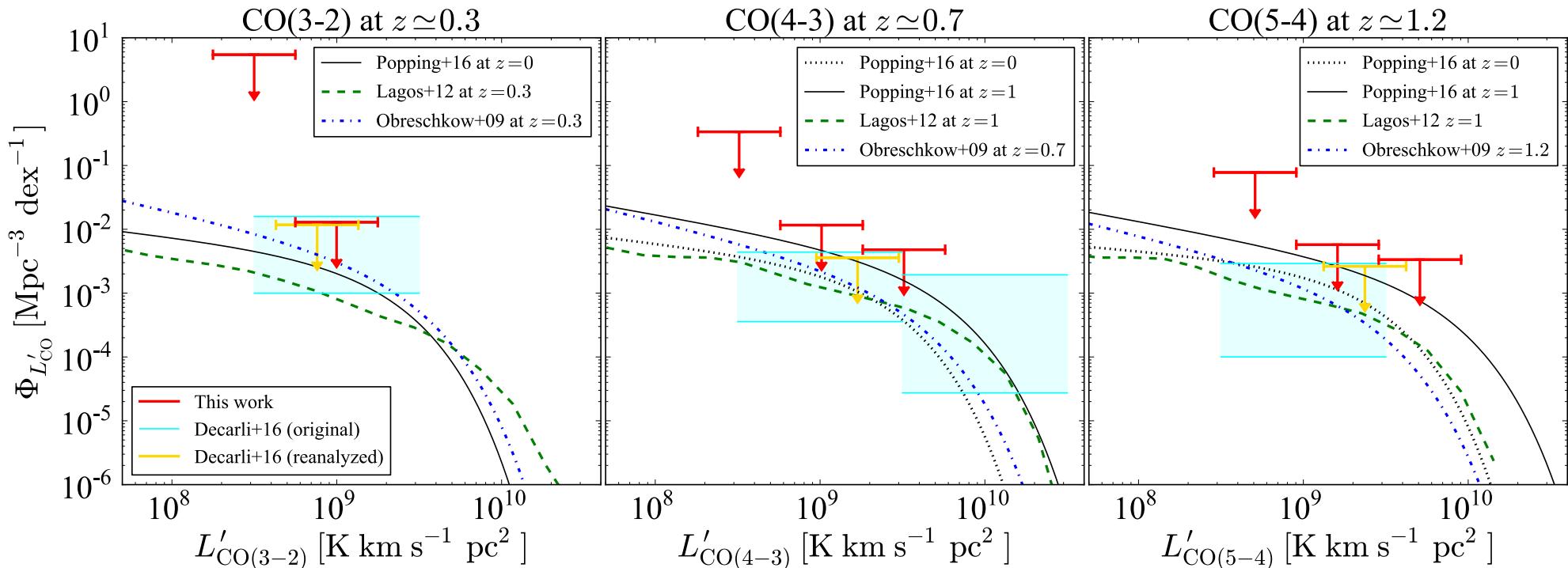
* [CII] 輝線の単位は [L_{\odot}]

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

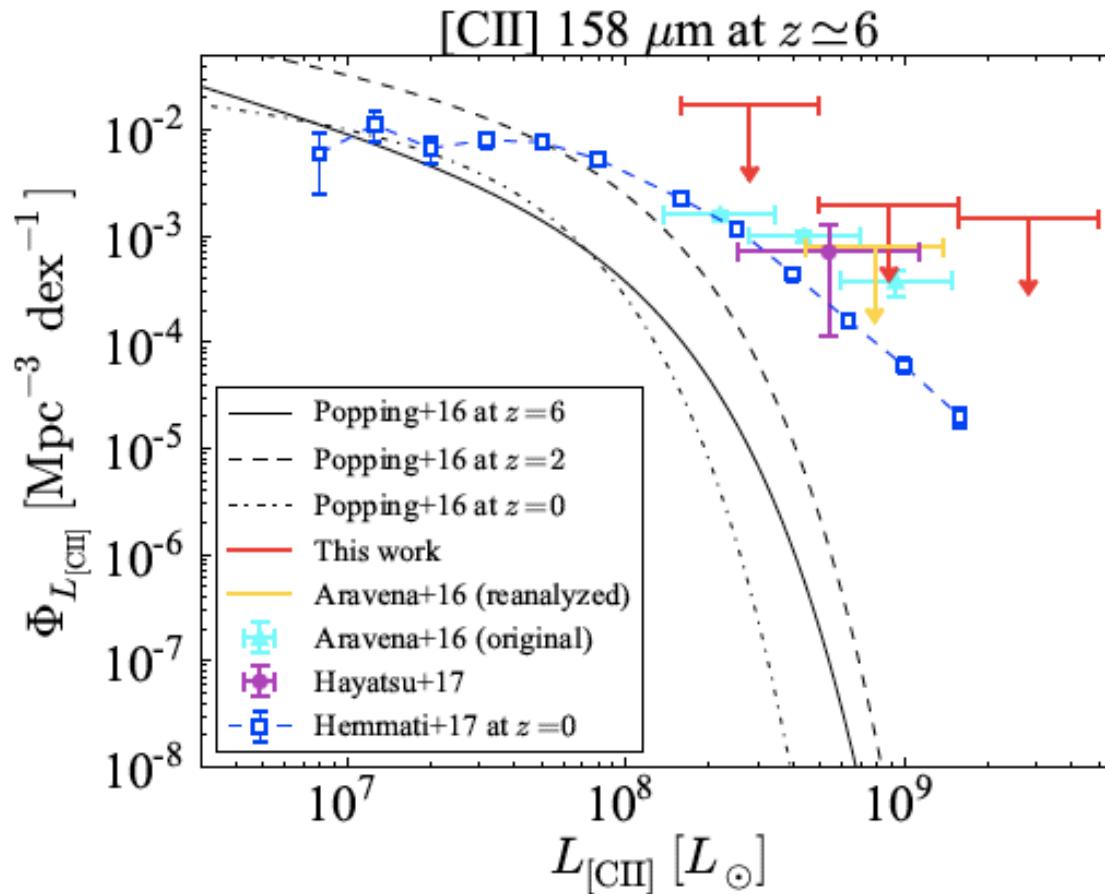
考察 “CO 輝線光度関数”



→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 $> 0.5 \text{ dex}$ 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行上に位置するが、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 $> 0.5 \text{ dex}$ 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