

ALMA SPECTROSCOPIC SURVEY IN THE HUBBLE ULTRA DEEP FIELD: CO LUMINOSITY FUNCTIONS
AND THE EVOLUTION OF THE COSMIC DENSITY OF MOLECULAR GAS

ROBERTO DECARLI¹, FABIAN WALTER^{1,2,3}, MANUEL ARAVENA⁴, CHRIS CARILLI^{3,5}, RYCHARD BOUWENS⁶, ELISABETE DA
CUNHA^{7,8}, EMANUELE DADDI⁹, R. J. IVISON^{10,11}, GERGÖ POPPING¹⁰, DOMINIK RIECHERS¹², IAN SMAIL¹³, MARK
SWINBANK¹⁴, AXEL WEISS¹⁵, TIMO ANGUITA^{15,16}, ROBERTO ASSEF⁴, FRANZ BAUER^{17,18,19}, ERIC F. BELL²⁰, FRANK
BERTOLDI²¹, SCOTT CHAPMAN²², LUIS COLINA²³, PAULO C. CORTES^{24,25}, PIERRE COX²⁴, MARK DICKINSON²⁶, DAVID
ELBAZ⁹, JORGE GÓNZALEZ-LÓPEZ²⁷, EDO IBAR²⁸, LEOPOLDO INFANTE²⁷, JACQUELINE HODGE⁶, ALEX KARIM²¹, OLIVIER LE
FEVRE²⁹, BENJAMIN MAGNELLI²¹, ROBERTO NERI³⁰, PASCAL OESCH³¹, KAZUAKI OTA^{32,5}, HANS-WALTER RIX¹, MARK
SARGENT³³, KARTIK SHETH³⁴, ARJEN VAN DER WEL¹, PAUL VAN DER WERF⁶, JEFF WAGG³⁵

2016 年 8 月 8 日 (月)

Journal Club

D1 山口裕貴

Abstract

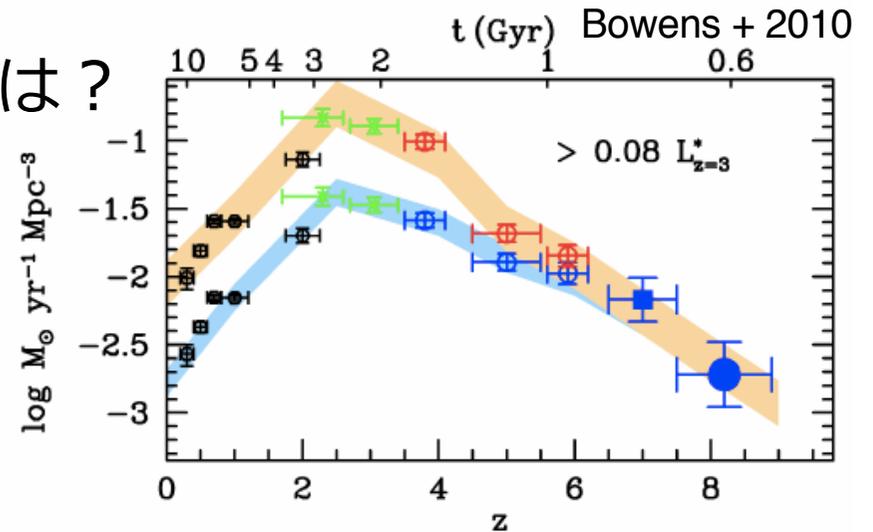
ABSTRACT

In this paper we use ASPECS, the ALMA Spectroscopic Survey in the *Hubble* Ultra Deep Field (UDF) in band 3 and band 6, to place *blind constraints* on the CO luminosity function and the evolution of the cosmic molecular gas density as a function of redshift up to $z \sim 4.5$. This study is based on galaxies that have been solely selected through their CO emission and not through any other property. In all of the redshift bins the ASPECS measurements reach the predicted ‘knee’ of the CO luminosity function (around $5 \times 10^9 \text{ K km s}^{-1} \text{ pc}^2$). We find clear evidence of an evolution in the CO luminosity function with respect to $z \sim 0$, with more CO luminous galaxies present at $z \sim 2$. The observed galaxies at $z \sim 2$ also appear more gas-rich than predicted by recent semi-analytical models. The comoving cosmic molecular gas density within galaxies as a function of redshift shows a factor 3–10 drop from $z \sim 2$ to $z \sim 0$ (with significant error bars), and possibly a decline at $z > 3$. This trend is similar to the observed evolution of the cosmic star formation rate density. The latter therefore appears to be at least partly driven by the increased availability of molecular gas reservoirs at the peak of cosmic star formation ($z \sim 2$).

Keywords: galaxies: evolution — galaxies: ISM — galaxies: star formation — galaxies: statistics — submillimeter: galaxies — instrumentation: interferometers

1 Introduction

- 宇宙の星形成率密度進化の原因は？
 - 星の材料である, **分子ガスを観測する必要がある**
 - ✓ 分子ガスの総量が減少？
 - ✓ 星形成効率の低下？
 - 近傍宇宙より, 遠い宇宙では, 分子ガス質量密度の情報ほとんどない
- 宇宙での分子ガス質量を制限するための手法
 - ダスト放射の観測による制限
 - **CO 回転遷移輝線の観測による制限**



1 Introduction

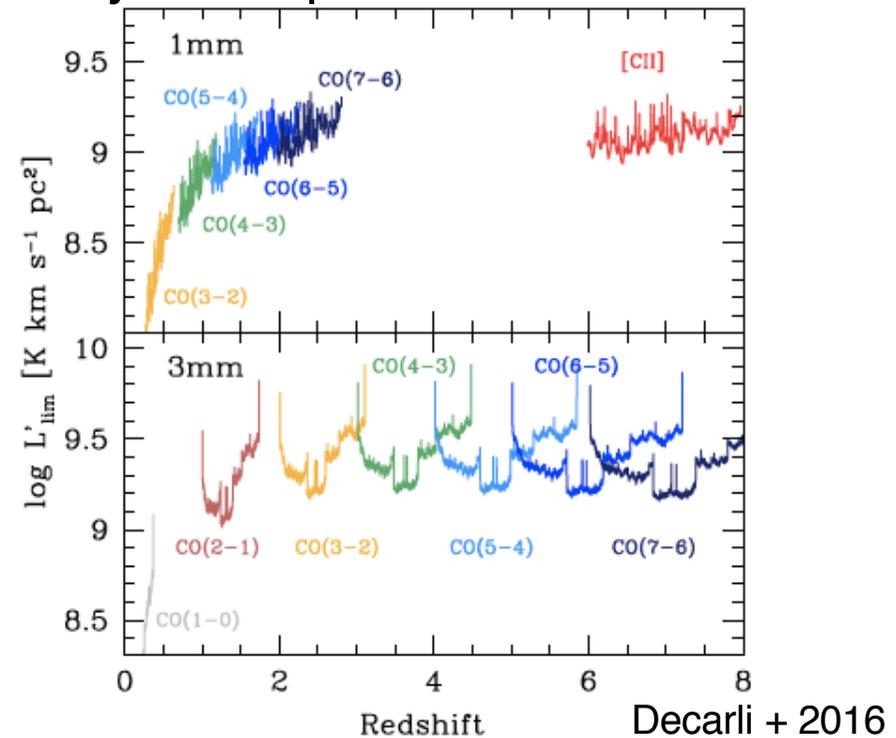
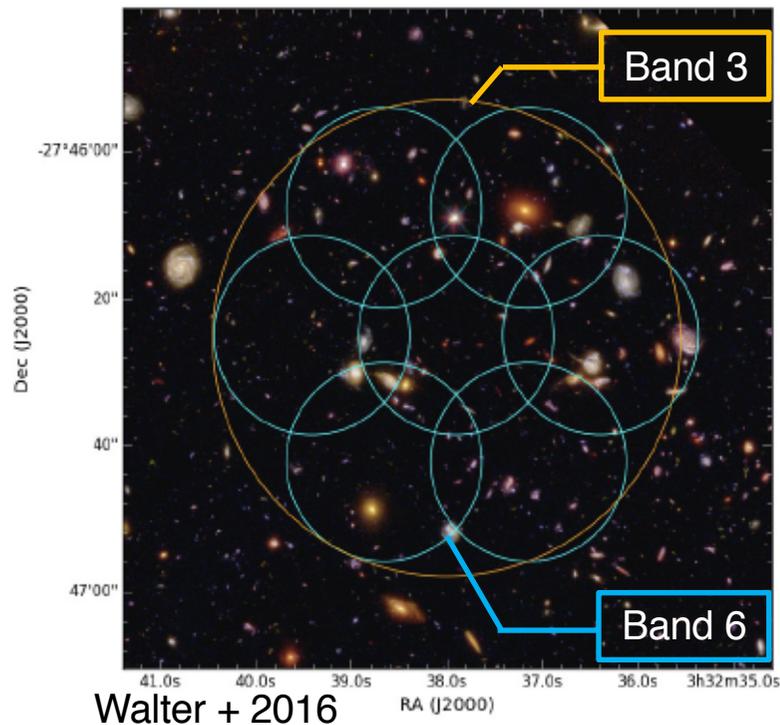
- 一酸化炭素分子 (CO)
 - 水素分子に次いで多い分子
 - 銀河に含まれる分子ガス質量のよいトレーサー
 - 宇宙の分子ガス質量密度の進化を知るために、様々な赤方偏移で、CO 輝線光度関数を知る必要
- これまでの CO 輝線銀河観測では...
 - 他波長であらかじめ選択された銀河に対する追観測
 - ✓ 銀河の星質量・星形成率にバイアス
 - 無バイアスな探査による、CO 輝線光度関数の制限が必要となる

1 Introduction

- 本論文の狙い
 - CO ブラインド探査による, CO 輝線光度関数・宇宙分子ガス質量密度の制限
 - IRAM PdBI を用いたパイロットサーベイをふまえ, ALMA を用いた探査を行う
 - ✓ Hubble Ultra Deep Field
 - ✓ PdBI の探査に比べて, 3-4 倍の感度
 - ✓ 2 band (band 3, band 6) による, CO 励起状態への制限
 - CO(1-0) を求めるのに有利

2 Observation

- ALMA を用いた HUDF の分光観測
 - Band 3
 - ✓ 84-115 GHz, rms = 0.15 mJy/beam per 20 MHz
 - Band 6
 - ✓ 212-272 GHz, rms = 0.5 mJy/beam per 30 MHz



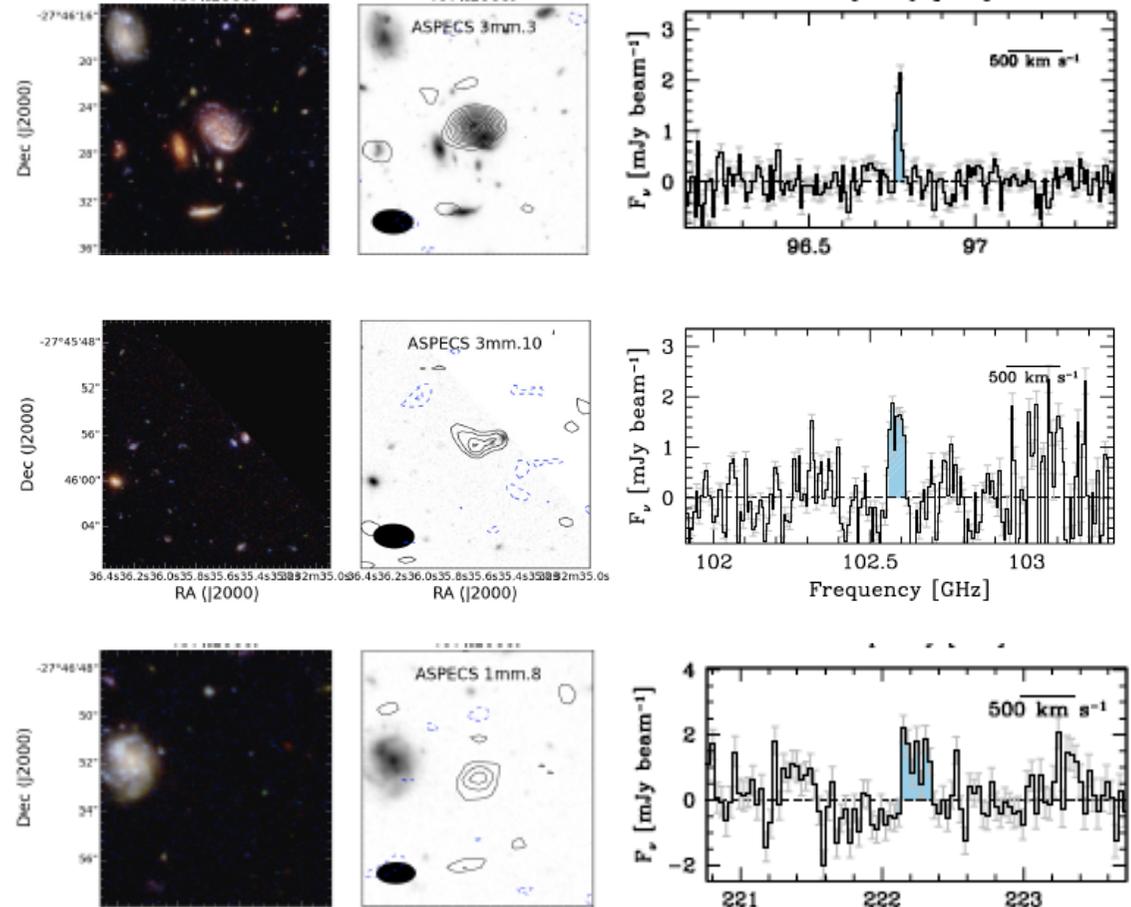
3 Analysis

- 輝線検出

- Band 3 で 10 輝線, Band 6 で 11 輝線を検出

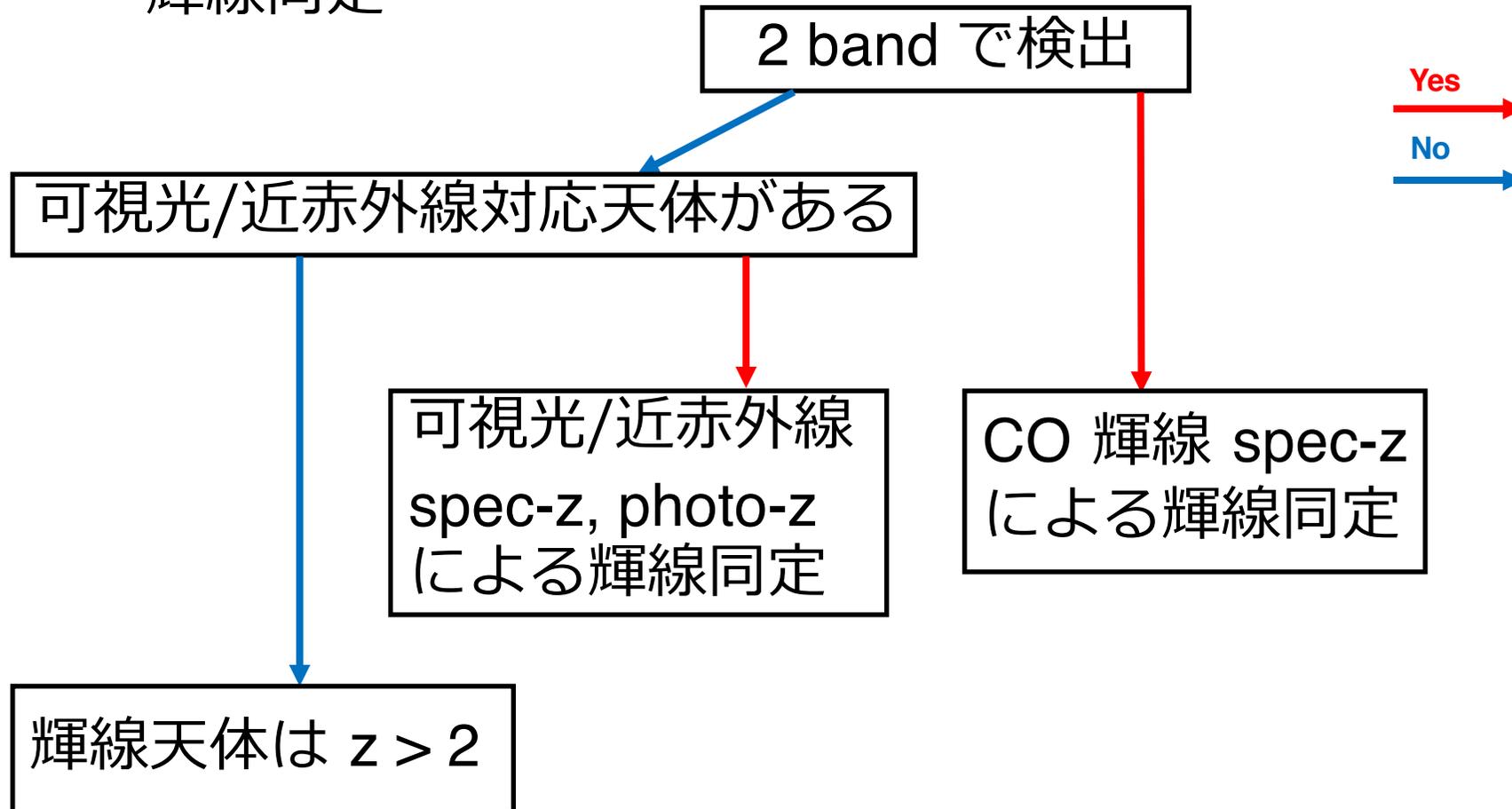
Walter + 2016

ID	RA	Dec	Frequency	Flux	FWHM	S/N
ASPECS...	(J2000.0)	(J2000.0)	[GHz]	[Jy km s ⁻¹]	[km s ⁻¹]	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
3mm (band 3)						
3mm.1	03:32:38.52	-27:46:34.5	97.567 ^{+0.003} _{-0.003}	0.72 ± 0.03	500 ⁺³⁰ ₋₃₀	19.91
3mm.2	03:32:39.81	-27:46:11.6	90.443 ^{+0.003} _{-0.003}	0.44 ± 0.08	540 ⁺³⁰ ₋₃₀	12.80
3mm.3	03:32:35.55	-27:46:25.7	96.772 ^{+0.003} _{-0.003}	0.13 ± 0.01	57 ⁺³⁰ ₋₃₀	9.48
3mm.4	03:32:40.64	-27:46:02.5	91.453 ^{+0.003} _{-0.003}	0.23 ± 0.03	73 ⁺³⁰ ₋₃₀	5.86
3mm.5	03:32:35.48	-27:46:26.5	110.431 ^{+0.003} _{-0.003}	0.18 ± 0.02	82 ⁺²⁵ ₋₂₅	5.42
3mm.6	03:32:35.64	-27:45:57.6	99.265 ^{+0.003} _{-0.003}	0.23 ± 0.02	160 ⁺³⁰ ₋₃₀	5.40
3mm.7	03:32:39.26	-27:45:58.8	100.699 ^{+0.003} _{-0.003}	0.08 ± 0.01	60 ⁺²⁵ ₋₃₀	5.40
3mm.8	03:32:40.68	-27:46:12.1	101.130 ^{+0.003} _{-0.003}	0.19 ± 0.01	100 ⁺²⁵ ₋₃₀	5.30
3mm.9	03:32:36.01	-27:46:47.9	98.082 ^{+0.003} _{-0.003}	0.09 ± 0.01	64 ⁺³⁰ ₋₃₀	5.28
3mm.10	03:32:35.66	-27:45:56.8	102.587 ^{+0.003} _{-0.003}	0.24 ± 0.02	120 ⁺²⁵ ₋₂₅	5.18
1mm (band 6)						
1mm.1	03:32:38.54	-27:46:34.5	227.617 ^{+0.003} _{-0.003}	0.79 ± 0.04	463 ⁺⁸⁰ ₋₁₀	18.28
1mm.2	03:32:38.54	-27:46:34.5	260.027 ^{+0.003} _{-0.059}	1.10 ± 0.05	478 ⁺¹¹ ₋₇₀	16.46
1mm.3	03:32:38.54	-27:46:31.3	225.181 ^{+0.003} _{-0.003}	0.22 ± 0.02	101 ⁺¹⁸ ₋₁₈	5.87
1mm.4	03:32:37.36	-27:46:10.0	258.333 ^{+0.016} _{-0.003}	0.27 ± 0.02	150 ⁺²⁰ ₋₂₀	5.62
1mm.5	03:32:38.59	-27:46:55.0	265.320 ^{+0.003} _{-0.031}	0.72 ± 0.03	211 ⁺³⁷ ₋₁₀	5.47
1mm.6	03:32:36.58	-27:46:50.1	222.553 ^{+0.003} _{-0.003}	0.56 ± 0.02	302 ⁺¹² ₋₄₀	5.45
1mm.7	03:32:37.91	-27:46:57.0	257.042 ^{+0.003} _{-0.003}	1.78 ± 0.03	179 ⁺¹¹ ₋₁₁	5.43
1mm.8	03:32:37.68	-27:46:52.6	222.224 ^{+0.022} _{-0.003}	0.39 ± 0.02	210 ⁺³⁰ ₋₁₂	5.33
1mm.9	03:32:36.14	-27:46:37.0	249.085 ^{+0.016} _{-0.003}	0.34 ± 0.02	150 ⁺²⁰ ₋₂₀	5.19
1mm.10	03:32:37.08	-27:46:19.9	237.133 ^{+0.003} _{-0.003}	0.49 ± 0.04	281 ⁺⁴⁸ ₋₁₂	5.18
1mm.11	03:32:37.71	-27:46:41.0	223.067 ^{+0.003} _{-0.025}	0.27 ± 0.02	169 ⁺³⁵ ₋₁₂	5.16



3 Analysis

- 輝線同定



3 Analysis

- 輝線同定
 - 10/21 で一意的に輝線が決定

ASPHCS ID	RA	Dec	V _{lsr}	C	C _{part?}	Notes	Line ident.	τ_{CO}	L' [10 ⁶ K km s ⁻¹ pc ²]	M_{H_2} [10 ⁶ M _⊙]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
3mm										
3mm.1	03:32:38.62	-27:46:34.5	1.00	1.00	Y	i, iii(b)	3	2.5442	240.4 ± 1.0	2061 ± 9
3mm.2	03:32:39.81	-27:46:11.6	1.00	1.00	Y	i, iii(a)	2	1.5490	136.7 ± 2.1	648 ± 10
3mm.3	03:32:35.55	-27:46:25.7	1.00	0.85	Y	iii(a)	2	1.3823	53.7 ± 0.7	160 ± 3
3mm.4	03:32:40.64	-27:46:02.5	1.00	0.85	N	ii	3	2.5733	45.8 ± 1.0	393 ± 9
							4	4.0413	92.2 ± 2.8	1071 ± 33
							5	5.3012	89.5 ± 2.7	—
3mm.5	03:32:35.48	-27:46:26.5	0.87	0.85	Y	iii(a)	2	1.0876	28.3 ± 0.9	134 ± 4
3mm.6	03:32:35.64	-27:46:57.6	0.86	0.85	N	ii, iii	3	2.4836	72.8 ± 1.0	624 ± 9
							4	3.6445	77.3 ± 1.0	898 ± 12
							5	4.8053	76.2 ± 1.0	—
3mm.7	03:32:39.26	-27:46:58.8	0.86	0.85	N	ii, iii	3	2.4340	25.9 ± 1.0	222 ± 9
							4	3.5784	27.6 ± 1.0	321 ± 12
							5	4.7227	27.3 ± 1.0	—
3mm.8	03:32:40.68	-27:46:12.1	0.76	0.85	N	ii, iii	3	2.4193	58.6 ± 0.9	502 ± 8
							4	3.5589	62.6 ± 1.0	727 ± 12
							5	4.8983	62.0 ± 1.0	—
3mm.9	03:32:36.01	-27:46:47.9	0.74	0.85	N	ii, iii	3	2.5256	30.5 ± 1.0	261 ± 9
							4	3.7006	32.3 ± 1.0	375 ± 12
							5	4.8754	31.8 ± 1.0	—
3mm.10	03:32:35.66	-27:46:56.8	0.61	0.85	Y	ii, iii(b)	3	2.3708	70.4 ± 0.9	603 ± 8
1mm										
1mm.1*	03:32:38.54	-27:46:34.5	1.00	1.00	Y	i, iii(b)	7	2.5439	48.02 ± 0.37	—
1mm.2*	03:32:38.54	-27:46:34.5	1.00	1.00	Y	i, iii(a)	8	2.5450	51.42 ± 0.23	—
1mm.3	03:32:38.54	-27:46:31.3	0.93	0.85	Y	iii(b)	3	0.5356	3.66 ± 0.08	31 ± 1
1mm.4	03:32:37.36	-27:46:10.0	0.85	0.65	N	i	[C II]	6.3570	12.49 ± 0.23	—
1mm.5	03:32:38.59	-27:46:55.0	0.79	0.75	N	ii	4	0.7377	12.95 ± 0.09	150 ± 1
							[C II]	6.1632	31.84 ± 0.22	—
1mm.6	03:32:36.58	-27:46:50.1	0.78	0.75	Y	iii(c)	4	1.0716	21.45 ± 0.15	249 ± 2
							5	1.5894	29.12 ± 0.21	—
							6	2.1070	33.68 ± 0.24	—
1mm.7	03:32:37.91	-27:46:57.0	0.77	1.00	N	ii, iii	4	0.7936	37.53 ± 0.10	436 ± 1
							[C II]	6.3939	84.01 ± 0.23	—
1mm.8	03:32:37.68	-27:46:52.6	0.71	0.72	N	ii, iii	[C II]	7.5524	23.22 ± 0.24	—
1mm.9	03:32:36.14	-27:46:37.0	0.63	0.75	N	ii, iii	4	0.8509	8.21 ± 0.12	95 ± 1
							[C II]	6.6301	16.84 ± 0.25	—
1mm.10	03:32:37.08	-27:46:19.9	0.62	0.75	N	ii, iii	4	0.9442	14.74 ± 0.18	171 ± 2
							6	1.9160	25.05 ± 0.30	—
							[C II]	7.0147	26.59 ± 0.32	—
1mm.11	03:32:37.71	-27:46:41.0	0.61	0.85	N	ii, iii	3	0.5502	4.84 ± 0.09	41 ± 1
							[C II]	7.5201	16.25 ± 0.30	—

* Not used for deriving the H₂ mass for this source, as a lower-J line is available.

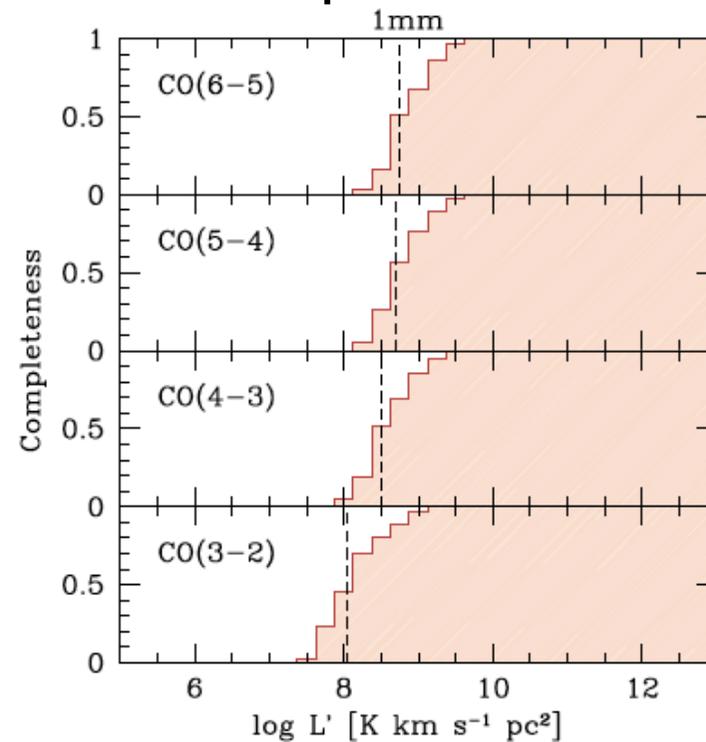
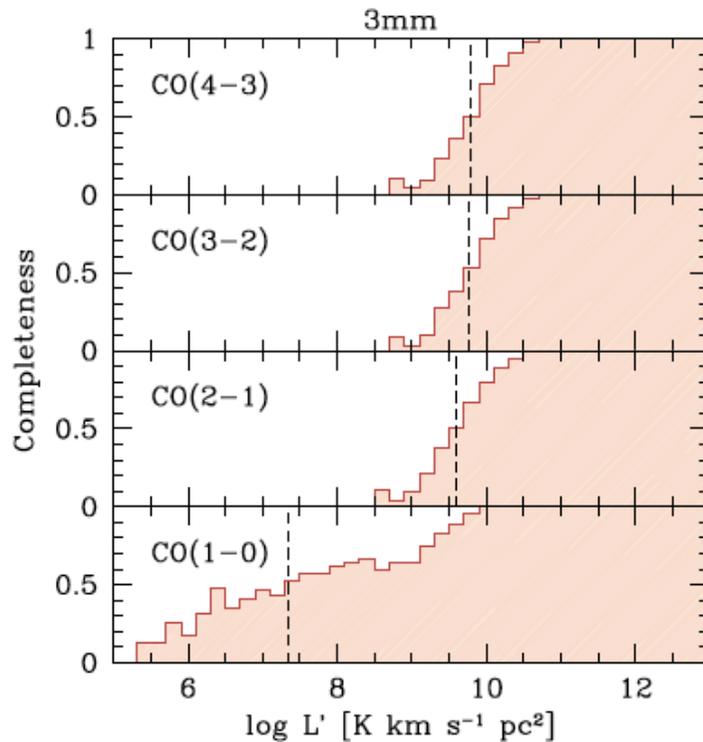
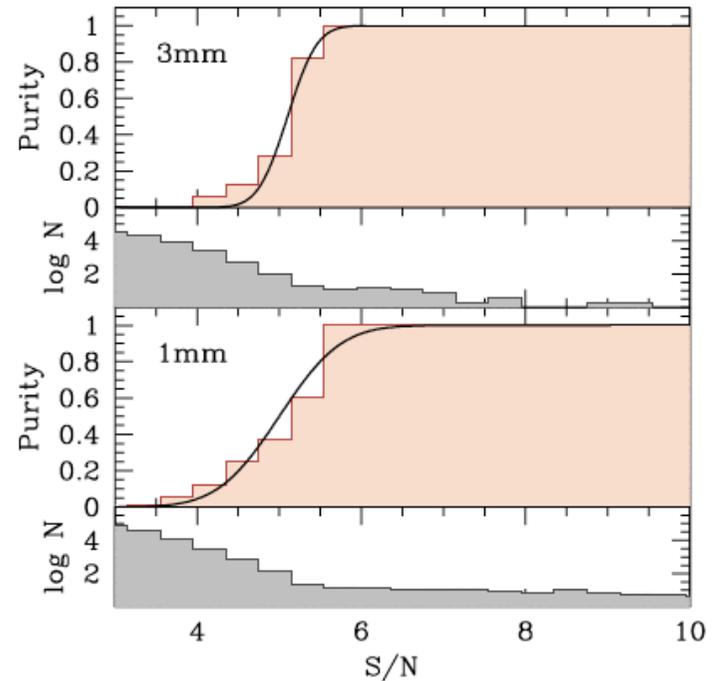
3 Analysis

- Fidelity

$$\text{fidelity}(S/N) = 1 - \frac{N_{\text{neg}}(S/N)}{N_{\text{pos}}(S/N)}$$

- Completeness

- 2500 個の mock line source を map に埋め込む



3 Analysis

- CO 輝線光度関数

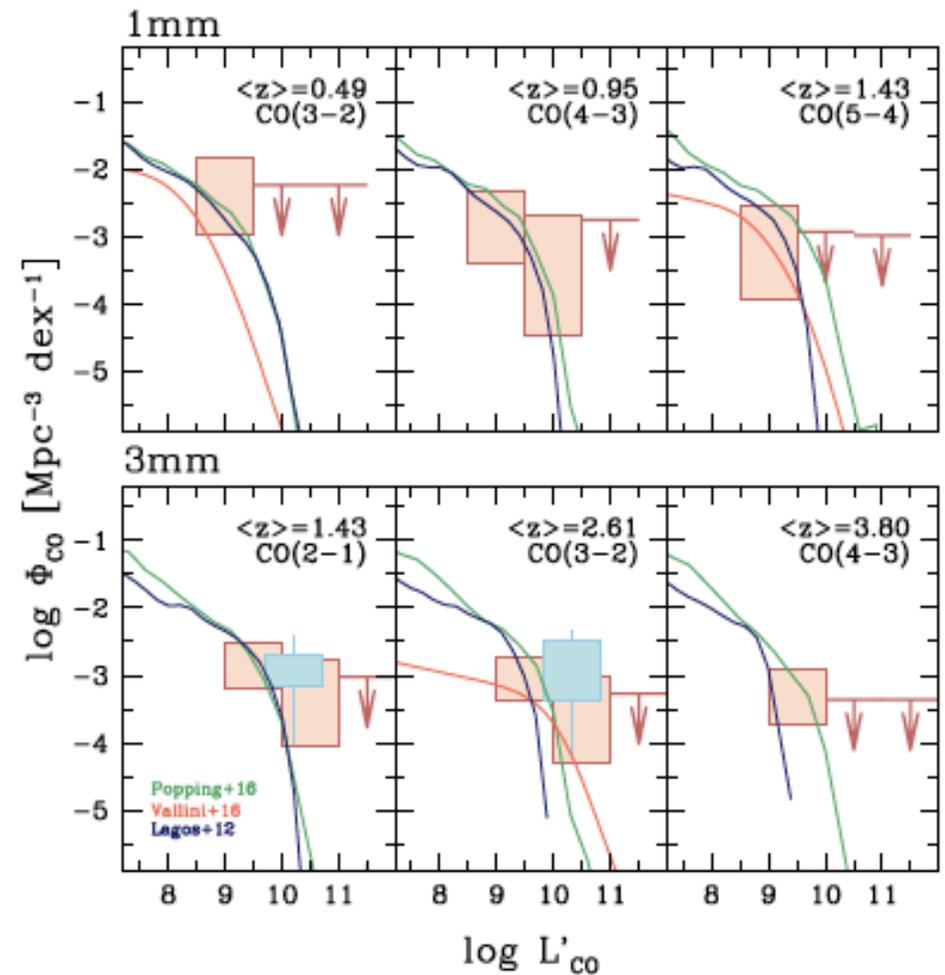
- 光度関数の “knee” まで制限している
- 明るい側で, セミアナのモデルよりも超過

- ✓ 特に 3 mm 帯でより顕著

- ✓ CO(5-4) @ $z = 1.43$ では, CO(2-1) @ $z = 1.43$ に比べて, 超過成分が見られない

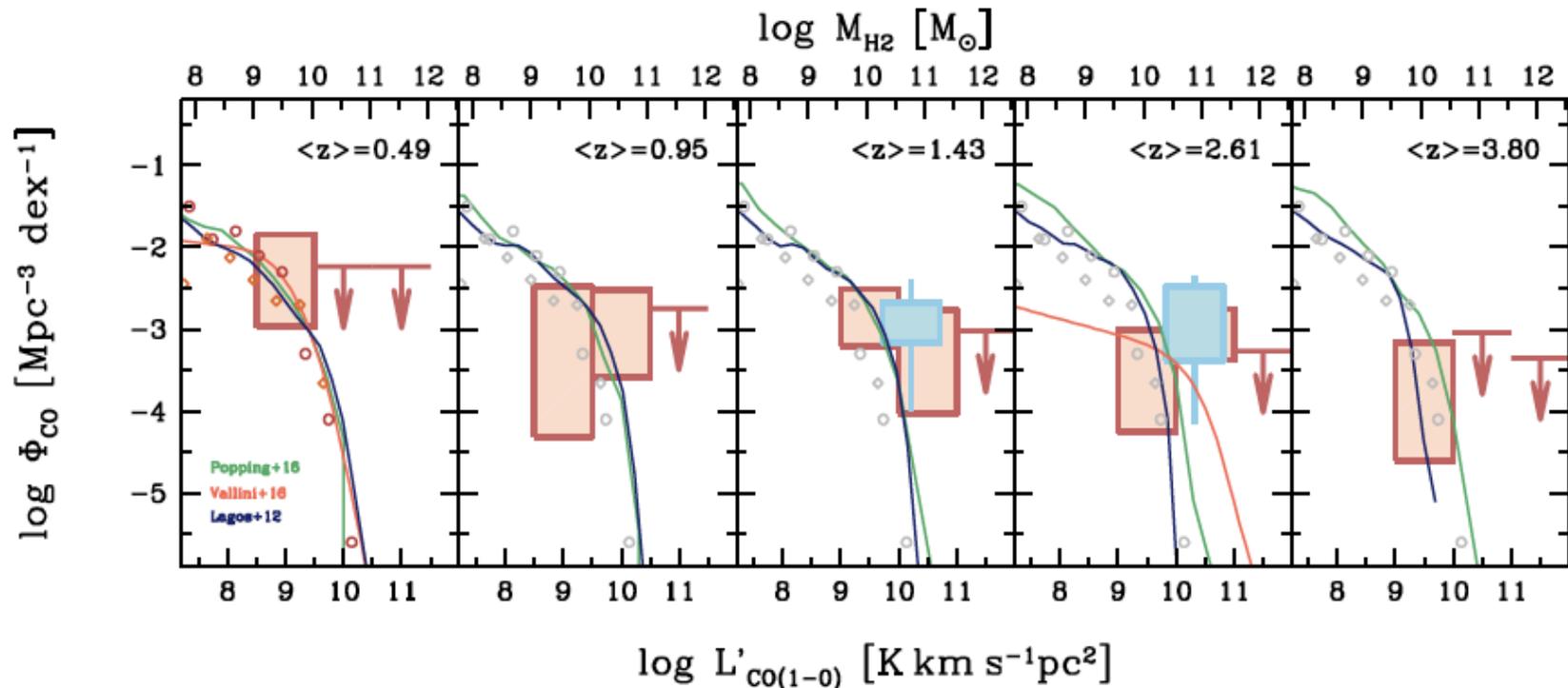
- CO の励起状態が穏やかなことを示唆

$$\Phi(\log L_i) = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{Fid_j}{C_j}$$



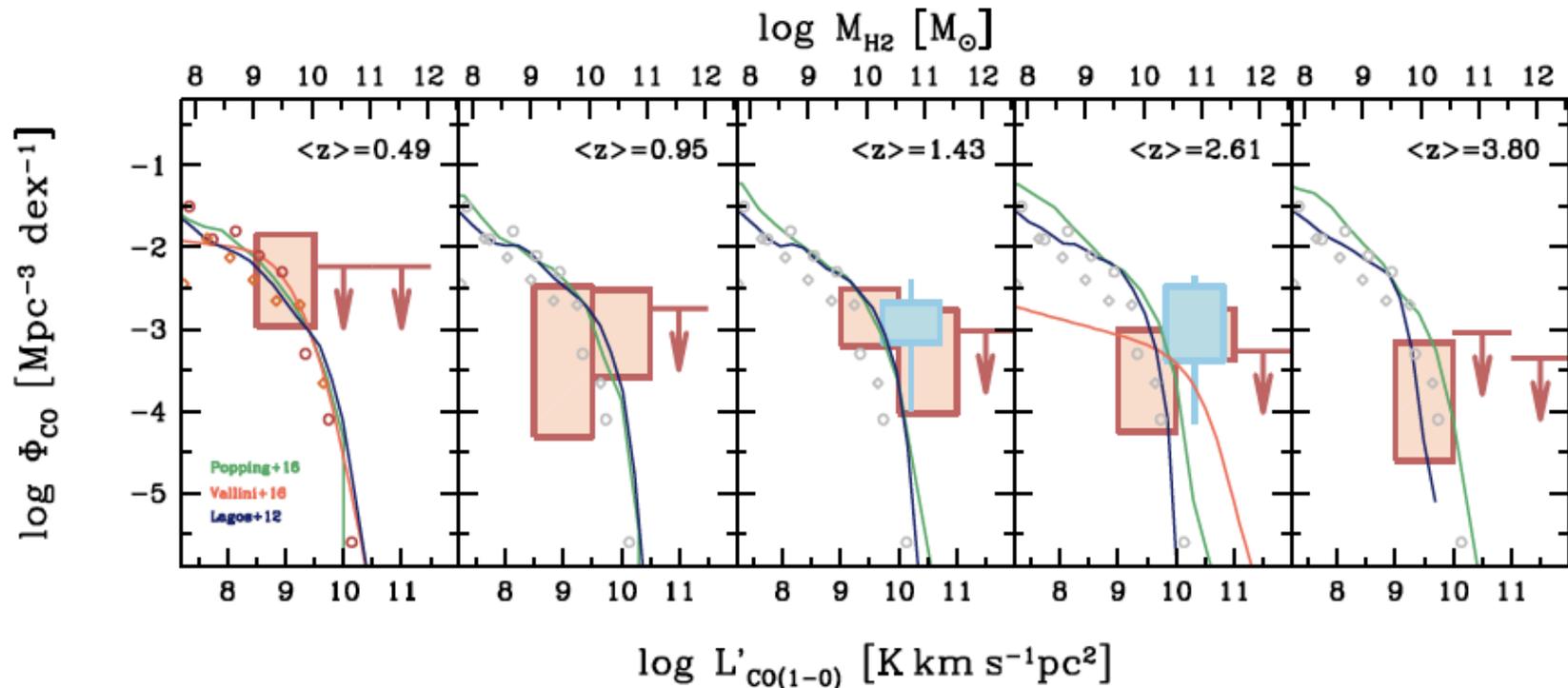
3 Analysis

- CO(1-0) 輝線光度関数 $\log L'_{\text{CO}(1-0)} = \log L'_{\text{CO}(J-[J-1])} - \log r_{J1}$
 - $r_{J1} = 0.76, 0.42, 0.31, 0.23$ ($J = 2, 3, 4, 5$; Daddi + 2015)
 - $z = 1.43$ については, CO(2-1) の光度関数から変換



3 Analysis

- CO(1-0) 輝線光度関数
 - CO(1-0) 輝線光度関数の “knee” は $z = 0$ から $z \sim 2$ にかけて、明るい方へシフトしている
 - $z < 1$ では、セミアナのモデルと一致、 $z > 1$ ではモデルに比べて超過が見られる

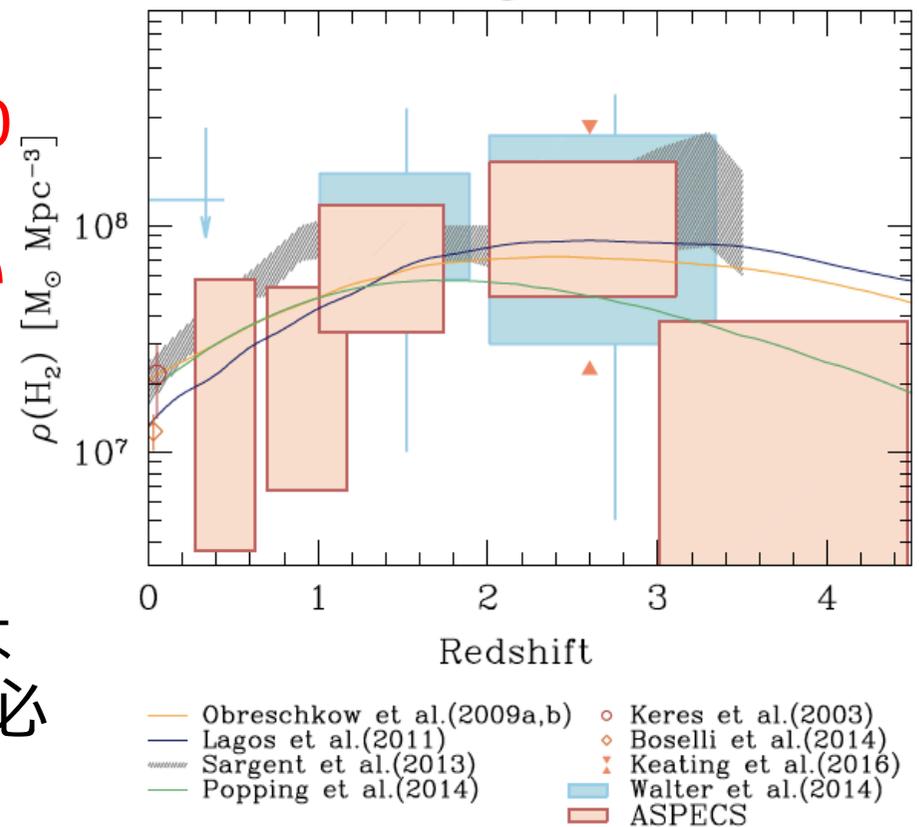


3 Analysis

- 宇宙の分子ガス質量密度
 - $\alpha_{\text{CO}} = 3.6 M_{\odot} / (\text{K km/s pc}^2)$
 - 検出限界より暗い天体の寄与は考慮しない
 - 分子ガス質量密度は $z \sim 0$ から $z \sim 2-3$ にかけて、3-10 倍程度大きくなっている
 - 過去の観測・セミアナと無矛盾
 - $z > 3$ を制限するためにはさらに多くのサンプルが必要

$$M_{\text{H}_2} = \alpha_{\text{CO}} L'_{\text{CO}(1-0)} \quad \text{Fid}_j ?$$

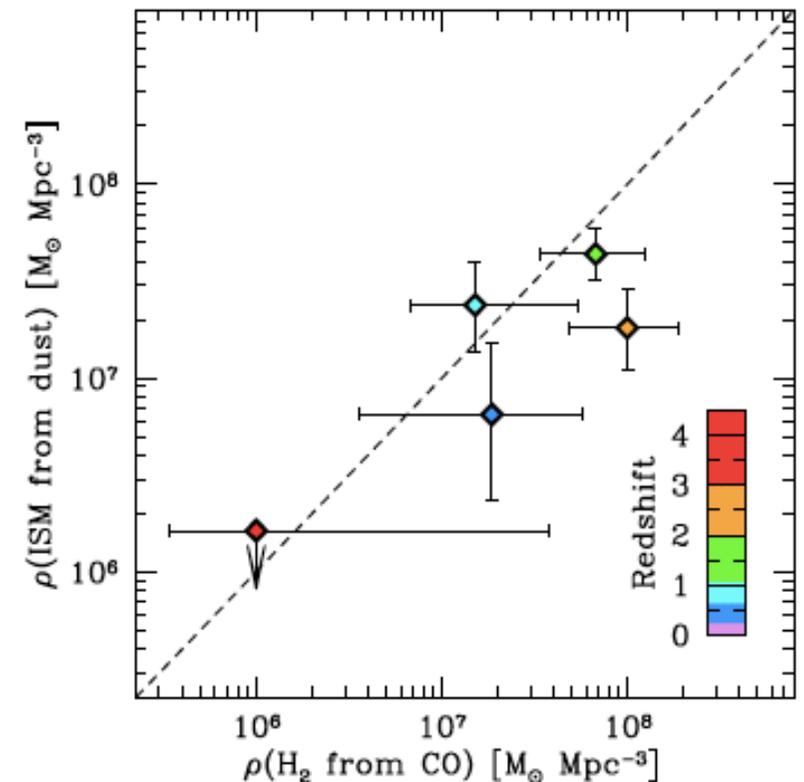
$$\rho(\text{H}_2) = \frac{1}{V} \sum_i \sum_{j=1}^{N_i} \frac{M_{i,j} P_j}{C_j}$$



3 Analysis

- ダスト放射による推定
 - S/N > 3 の 1 mm 連続波天体で、分子ガス質量を推定
 - ダストから求められた分子ガス質量密度
 - ✓ $z < 2$ では CO による推定と一致
 - ✓ $z > 2$ では過小評価
 - S/N > 3.5 の連続波天体が $z > 2$ で 1 つしか検出されていないことが原因？
 - ✓ ダスト温度・opacity?

$$\frac{M_{\text{ISM}}}{10^{10} M_{\odot}} = \frac{1.78}{(1+z)^{4.8}} \frac{S_{\nu}}{\text{mJy}} \left(\frac{\nu}{350 \text{ GHz}} \right)^{-3.8} \frac{\Gamma_0}{\Gamma_{\text{RJ}}} \left(\frac{D_L}{\text{Gpc}} \right)^2$$



4 Summary & Discussion

- ALMA を使った HUDF 分光探査で無バイアス CO 探査
- CO 輝線光度関数の制限
 - 3 mm 帯の輝線光度関数は明るい方でセミアナモデルに対して超過
 - ✓ 観測された銀河はモデルの予測よりもより**ガスが豊富**
 - ✓ CO の**励起は穏やか**
- 宇宙の分子ガス質量密度の進化
 - $z \sim 0$ から $z \sim 2-3$ にかけて, **3-10 倍の増加**
 - 星形成率密度の進化 (~ 20 倍) に, 分子ガス質量密度の進化が寄与
 - ✓ 残りは星形成効率の進化?