

Sub-mm Emission Line Deep Fields: CO and [CII] Luminosity Functions out to $z = 6$

Popping et al. (2016), arXive: 1602.0276v1

天文センター河野研 D1

山口裕貴

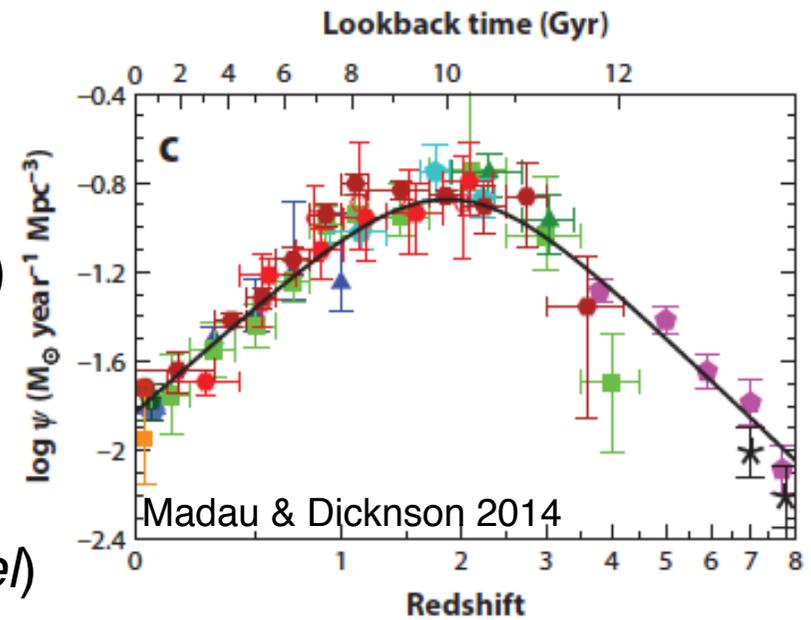
0. Abstract

Now that ALMA is reaching its full capabilities, observations of sub-mm emission line deep fields become feasible. Deep fields are ideal to study the luminosity function of sub-mm emission lines, ultimately tracing the atomic and molecular gas properties of galaxies. We couple a semi-analytic model of galaxy formation with a radiative transfer code to make predictions for the luminosity function of CO J=1–0 up to CO J=6–5 and [CII] at redshifts $z=0–6$. We find that: 1) our model correctly reproduces the CO and [CII] emission of low- and high-redshift galaxies and reproduces the available constraints on the CO luminosity function at $z \leq 2.75$; 2) we find that the CO and [CII] luminosity functions of galaxies increase from $z = 6$ to $z = 4$, remain relatively constant till $z = 1$ and rapidly decrease towards $z = 0$. The galaxies that are brightest in CO and [CII] are found at $z \sim 2$; 3) the CO J=3–2 emission line is most favourable to study the CO luminosity and global H_2 mass content of galaxies, because of its brightness and observability with currently available sub-mm and radio instruments; 4) the luminosity functions of high-J CO lines show stronger evolution than the luminosity functions of low-J CO lines; 5) our model barely reproduces the available constraints on the CO and [CII] luminosity function of galaxies at $z \geq 1.5$ and the CO luminosity of individual galaxies at intermediate redshifts. We argue that this is driven by a lack of cold gas in galaxies at intermediate redshifts as predicted by cosmological simulations of galaxy formation. This may lay at the root of other problems theoretical models face at the same redshifts.

Key words: galaxies: formation - galaxies: evolution - galaxies: ISM - ISM: atoms - ISM: molecules - ISM: lines and bands

1 Introduction

- X線 - 電波の観測
 - 銀河の性質 (e.g., SFR, 星質量)
 - 宇宙の星形成史
 - SFRD の進化
 - Submm 連続波探査 (*Herschel*)



- ALMA, PdBI/NOEMA, JVLA, ngJVLA
 - 高感度, 広周波数幅, 高分解能の観測により, 輝線銀河をより効率的に特定できる
 - 銀河の中の分子ガス・原子ガスの物理化学状態を解明できるようになる

1 Introduction

- ブラインド輝線探査の利点
 - SFR や星質量で選択されたサンプルから漏れた, **新たな種族の銀河が検出できる**可能性
 - e.g., 星質量が小さい一方で, ガス質量の大きい銀河
 - 輝線銀河の数密度 (光度関数) に**バイアスがかからない**
- どんな輝線を観測するのか？
 - CO → 星の材料となる分子ガスのトレーサー
 - 宇宙の**分子ガス質量密度の制限**
 - [CII] → 星形成活動のトレーサー
 - (特に $z > 3-4$ の) **ダストに隠された星形成活動を解き明かす手がかり**

1 Introduction

- 銀河形成モデルとの関わり
 - 金属量やフィードバックといった銀河のフィジカルメカニズムの縮退を解くために、銀河に含まれる原子・分子ガスの情報が必要
 - CO や [CII] 輝線のモデルには準解析的モデルが強力
- この論文では...
 - 準解析的モデルと輻射輸送モデルを組み合わせて、CO と [CII] の光度関数を計算する
 - cf. Popping et al. 2014, MNRAS, 444, 1301
 - Popping, Somerville, & Trager, 2014, MNRAS, 442, 2398

2 Model description

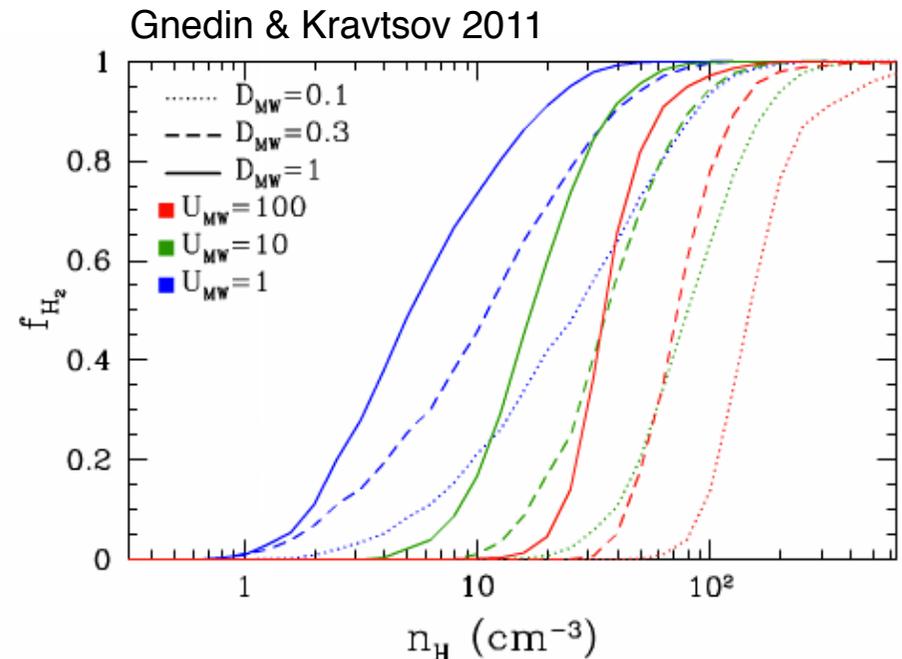
2.1 Galaxy formation model

- Popping + 14, Somerville + 08, 12
 - Λ CDM model, ガスの shock heating · radiative cooling, SF, SN · AGN feedback, metal enrichment, 銀河衝突, スターバースト, 星の種族進化, ダスト遮蔽

- H₂ fraction

- 銀河の金属量と背景 UV 光の強さに依存

- 詳しい式は Popping+14 式 (8) や Gnedin & Kravtsov 11 式 (6)-(8) を参照

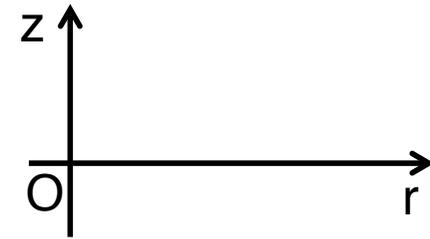


2 Model description

2.2 Creating a 3D realization of the ISM

- Gas density

$$n_H(r, z) = n_0(r) \exp\left(-\frac{r}{R_g}\right) \exp\left(-\frac{|z|}{z_g(r)}\right)$$



- Abundances

$$-\text{CO} \rightarrow f_{\text{CO}} = f_{\text{H}_2} \times e^{-4 \left(0.52 - 0.045 \ln \frac{G_{\text{UV}} / (1.7 G_0)}{n_H} - 0.097 \ln \frac{Z_{\text{gas}}}{Z_{\odot}} \right) / A_V}$$

Wolfiew + 10

–CO になっていない C は CI or CII

- Temperature

–主な加熱課程 → 宇宙線, 光電効果による加熱, ダストとガスの熱交換

–主な冷却課程 → CO, CI, CII 輝線による冷却

–ガス・ダスト温度の下限値は $T_{\text{CMB}}(z)$

2 Model description

2.3 Radiative-transfer and line tracking

- 3次元輻射輸送計算

- β 3D (Poelman & Spaans 05, 06; Pérez-Beaupuits + 11)

- 分子雲からの光子の脱出率を 6D で計算

- 分子・原子からの放射

- 統計平衡 (statistical equilibrium) を仮定

$$dI_{\nu}^z = \frac{1}{4\pi} n_i A_{ij} h\nu_{ij} \beta(\tau_{ij}) \left(\frac{S_{ij} - B_{ij}(\nu_{ij})}{S_{ij}} \right) \phi(\nu) dz,$$

cf. 本文の式 (7)- 式 (15)

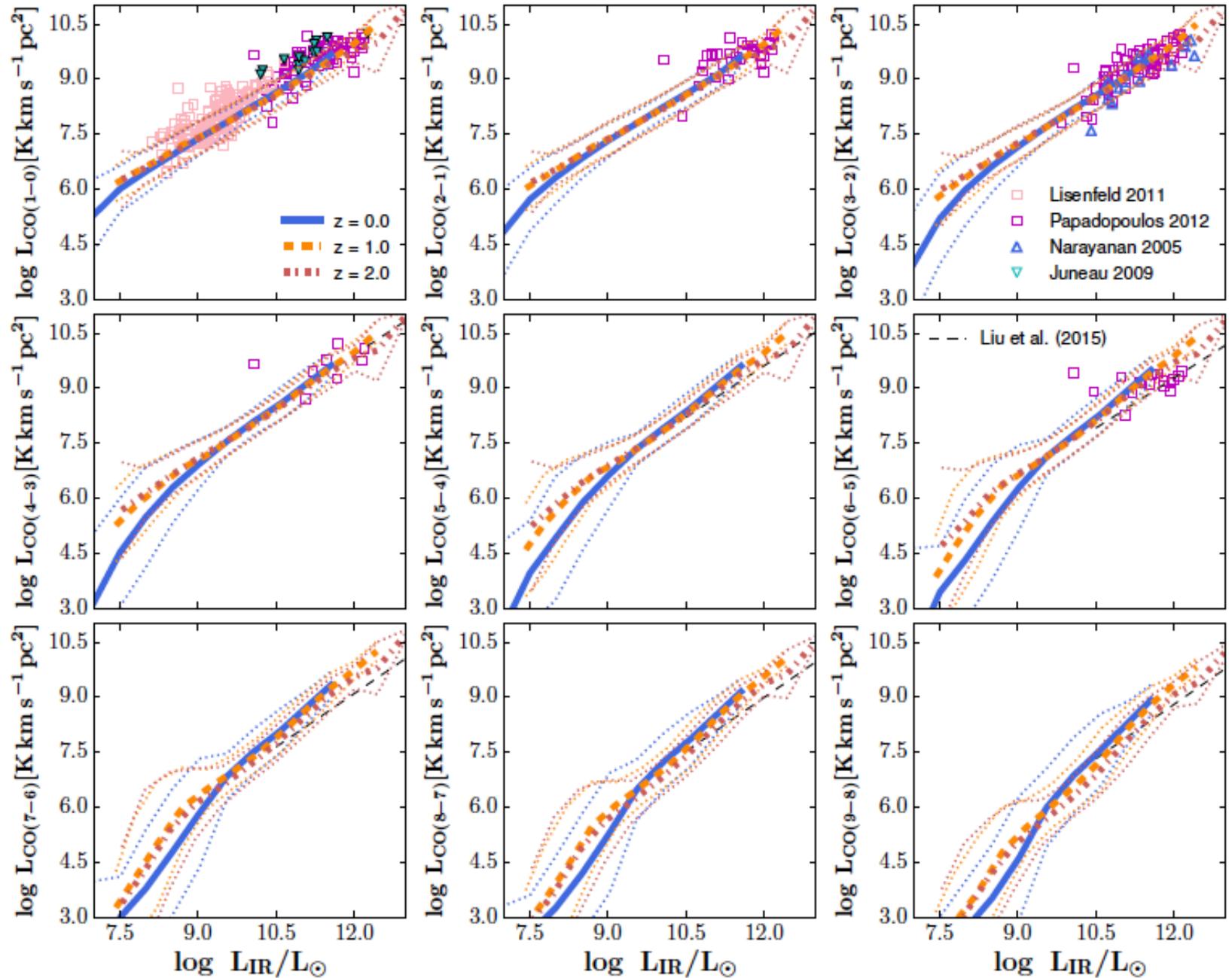
- グリッド分解能 (200 pc) 以下の分子雲

- グリッドは **ジーンズ長程度の大きさの小さな分子雲からなる**

- 温度・密度は一定, **それぞれの分子雲は平均 0 km/s のガウシアン状の速度分布で互いに運動している**

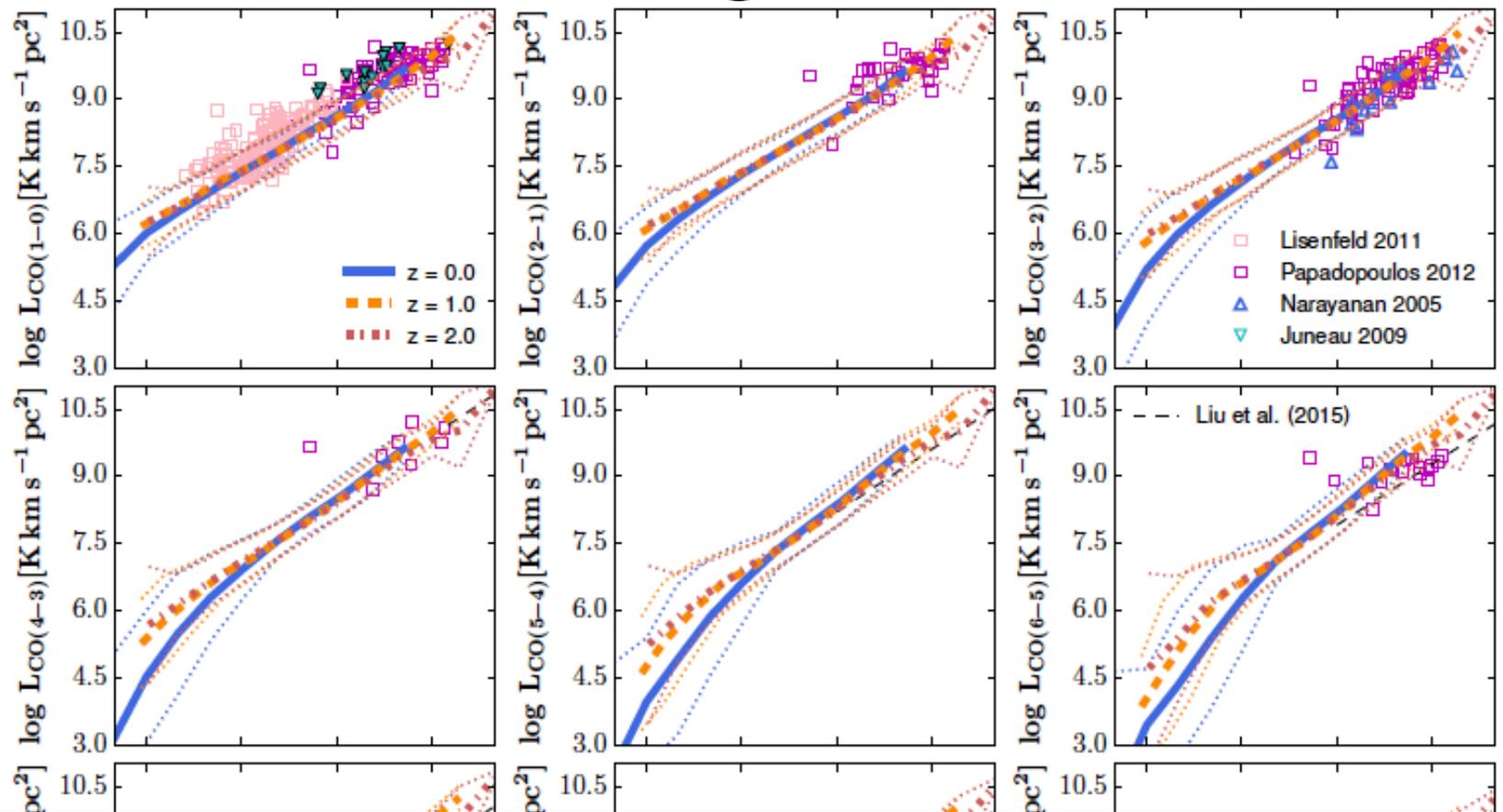
3 CO and [CII] scaling relations

- CO

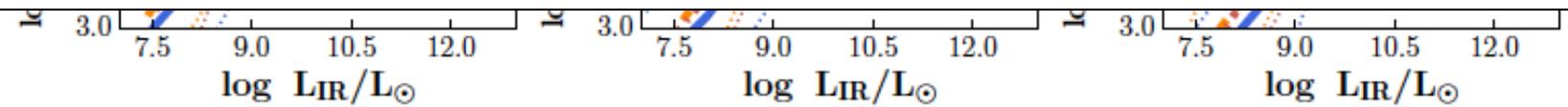


3 CO and [CII] scaling relations

- CO

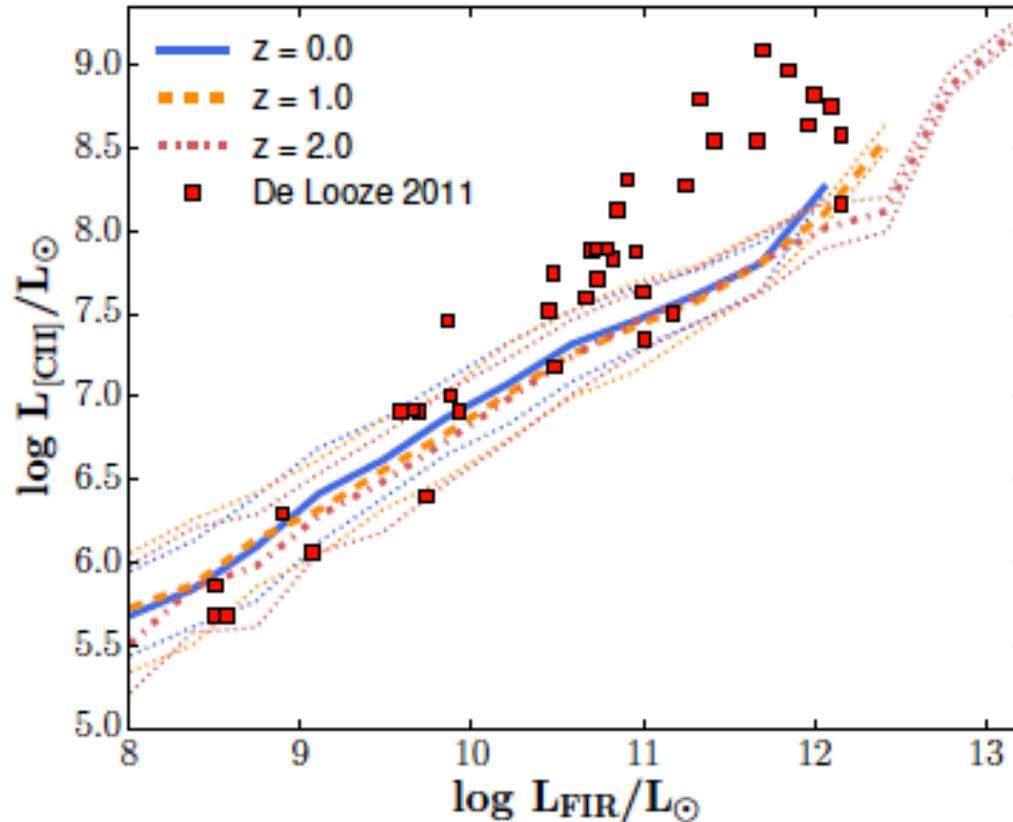


- $z = 0$ の場合, CO(1-0) から CO(5-4) (?) まで観測をよく再現
- より高い遷移では CO luminosity を overestimate
- 赤方偏移による L_{IR} vs. L_{CO} の進化はない



3 CO and [CII] scaling relations

- [CII]

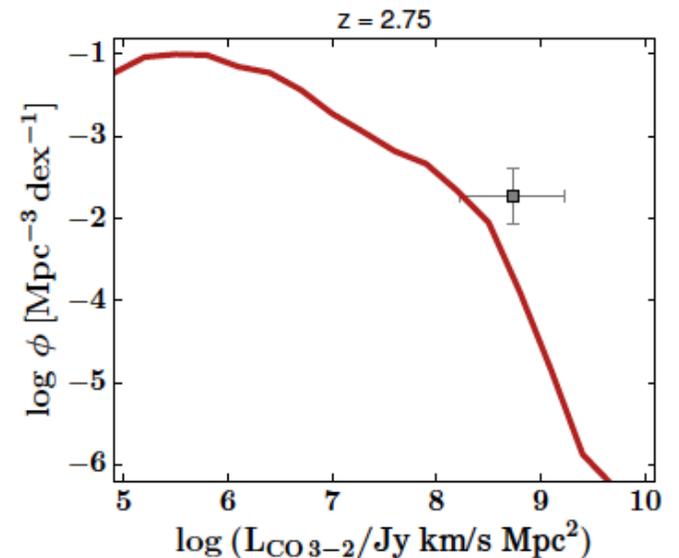
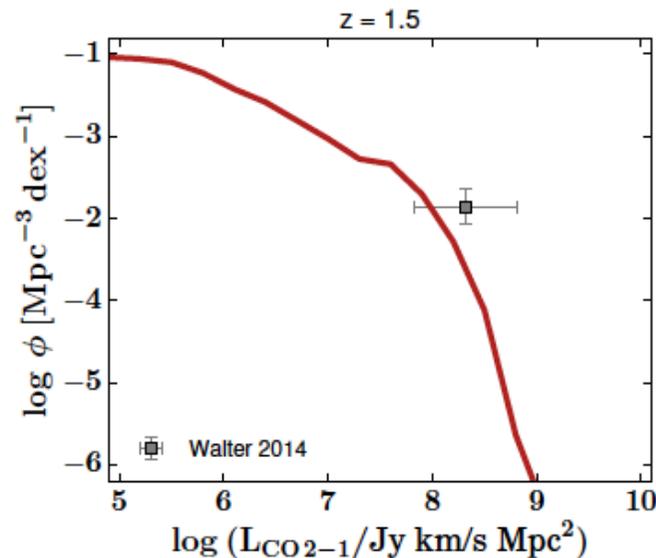
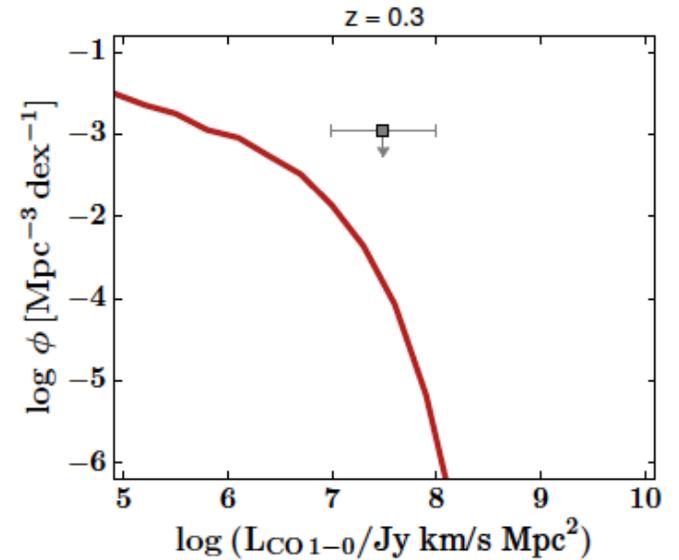
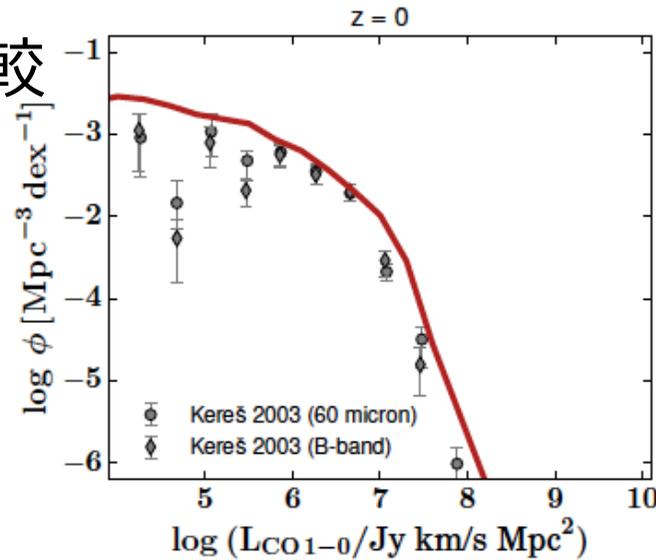


- $L_{\text{FIR}} < 10^{11} L_{\odot}$ では $z = 0$ の観測を再現
- FIR で明るい銀河について $L_{[\text{CII}]}$ を underestimate
- 赤方偏移による L_{IR} vs. $L_{[\text{CII}]}$ の進化はない

4 CO and [CII] luminosity function

- CO 光度関数

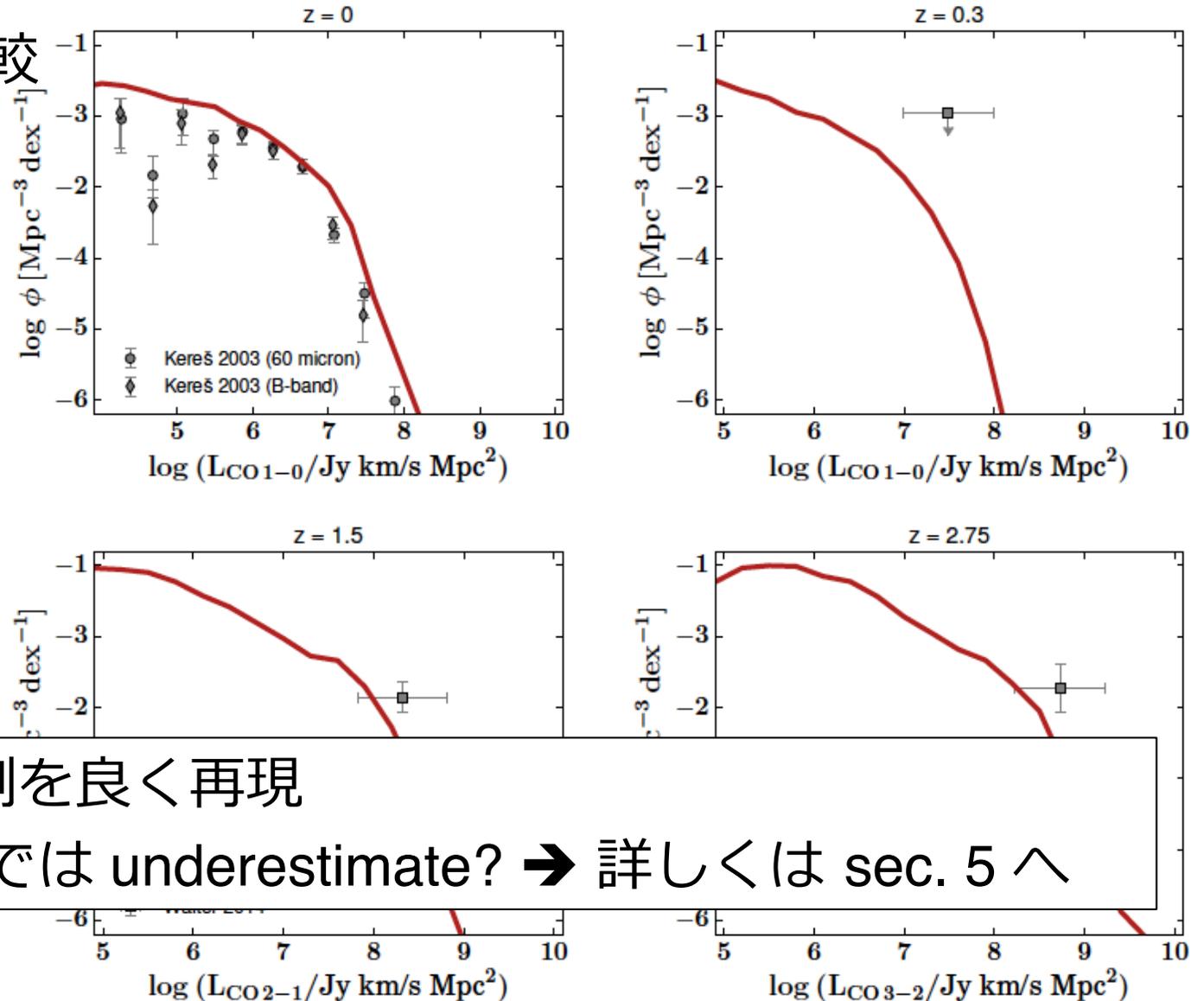
–観測との比較



4 CO and [CII] luminosity function

- CO 光度関数

–観測との比較

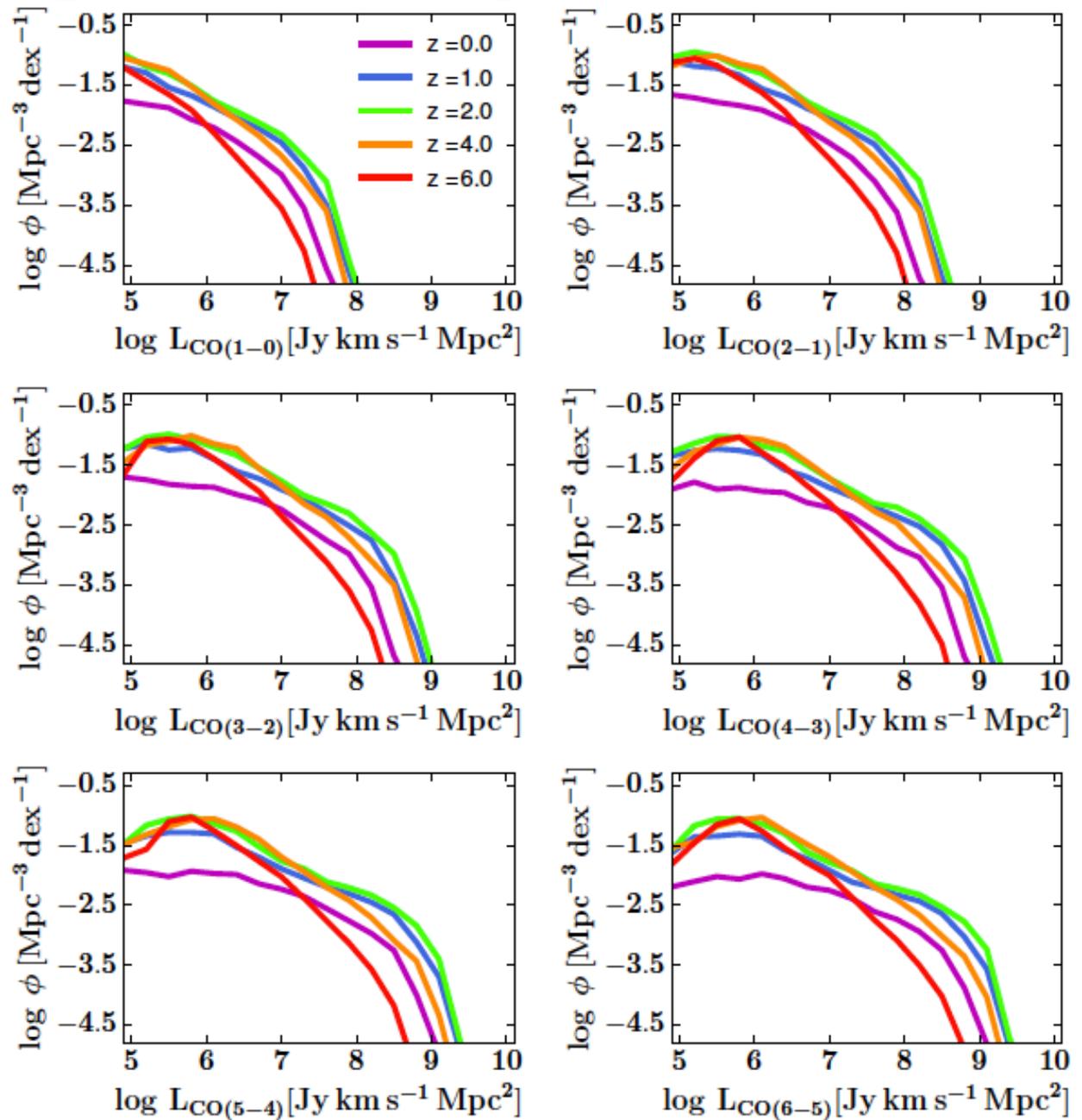


- z = 0 では観測を良く再現

- z = 1.5, 2.75 では underestimate? → 詳しくは sec. 5 へ

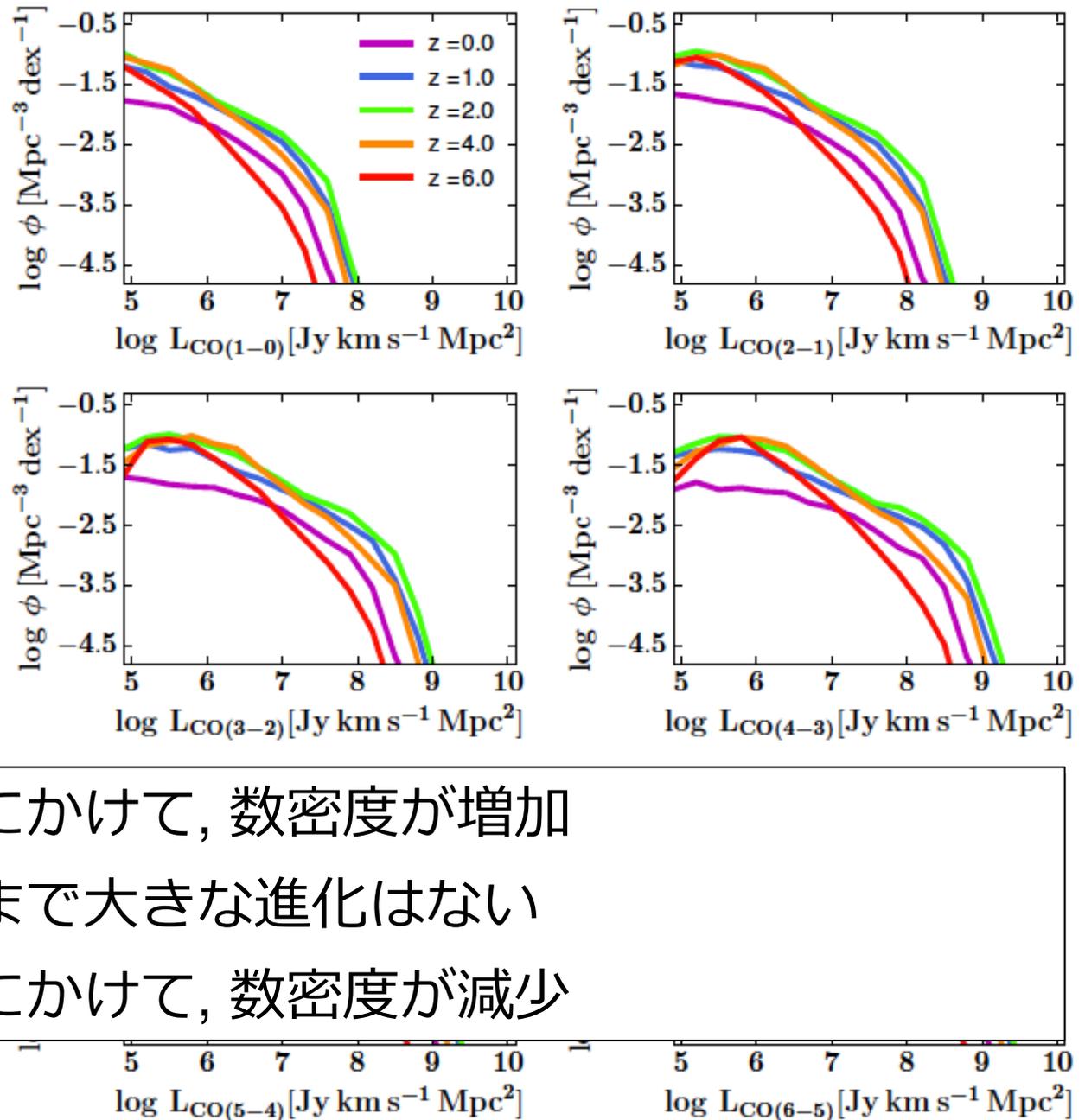
4 CO and [CII] luminosity function

- CO 光度関数
- 赤方偏移進化



4 CO and [CII] luminosity function

- CO 光度関数
– 赤方偏移進化



- $z = 6$ から $z = 4$ にかけて, 数密度が増加
- $z = 4$ から $z = 1$ まで大きな進化はない
- $z = 1$ から $z = 0$ にかけて, 数密度が減少

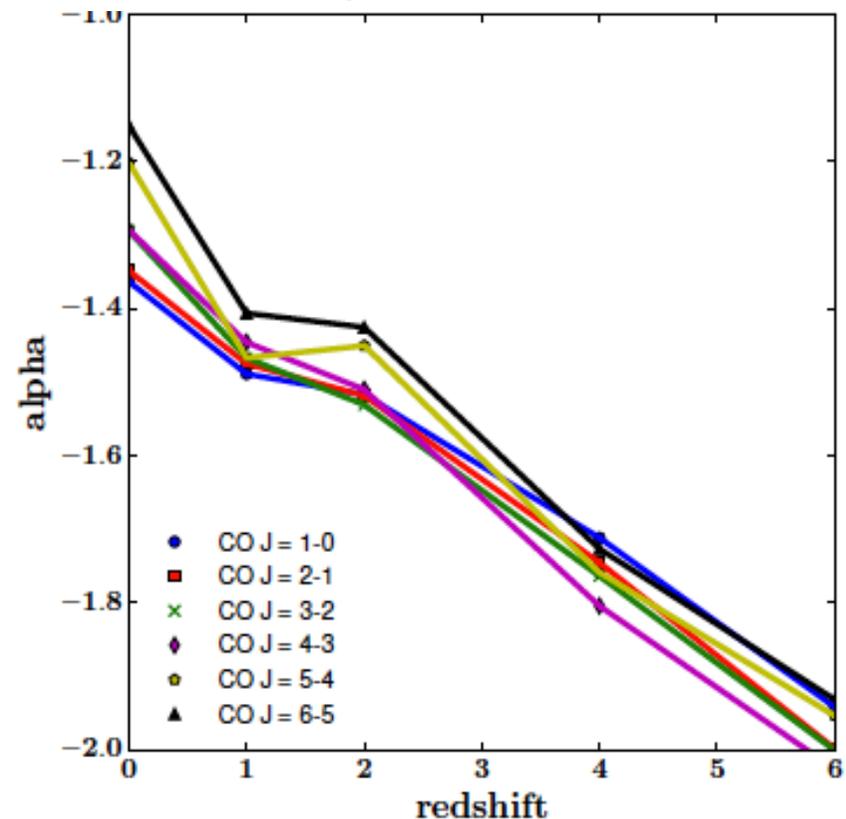
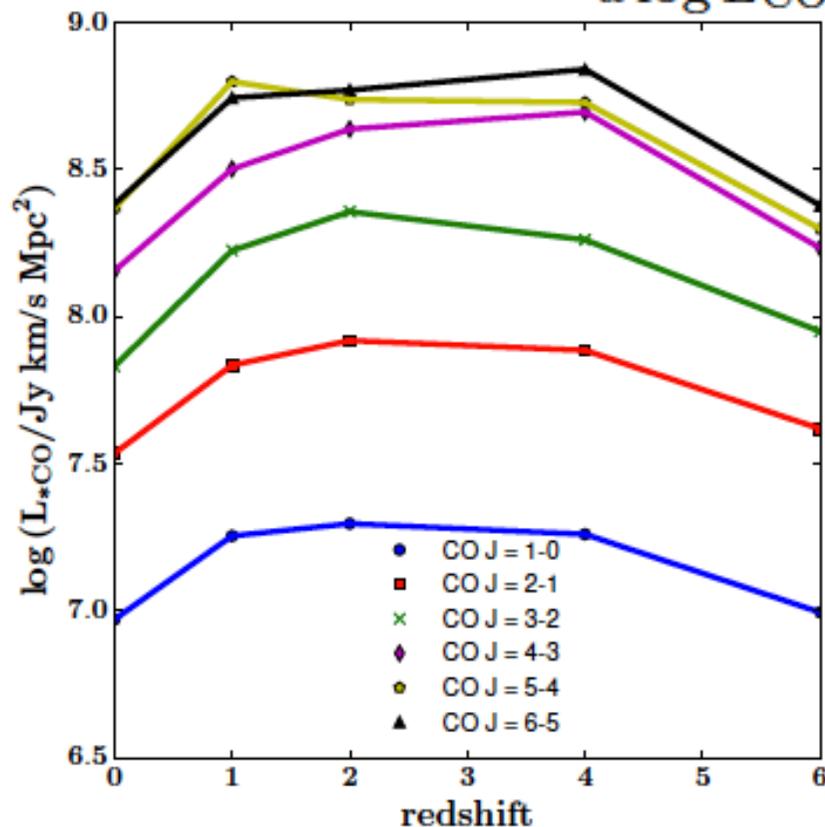
4 CO and [CII] luminosity function

- CO 光度関数

- CO J - transition ごとの, 赤方偏移進化の違い

- Schechter 関数にフィットすることで数値的に考える.

$$\phi(L_{CO}) = \frac{dn}{d \log L_{CO}} = \ln 10 \phi_* \left(\frac{L_{CO}}{L_*} \right)^{\alpha+1} e^{-\frac{L_{CO}}{L_*}}$$



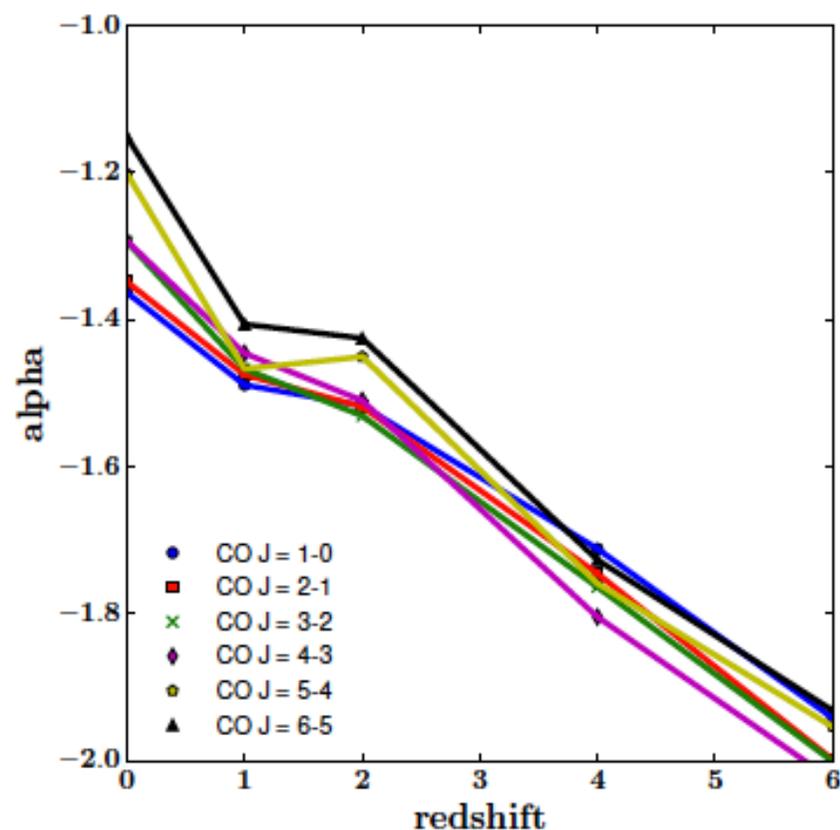
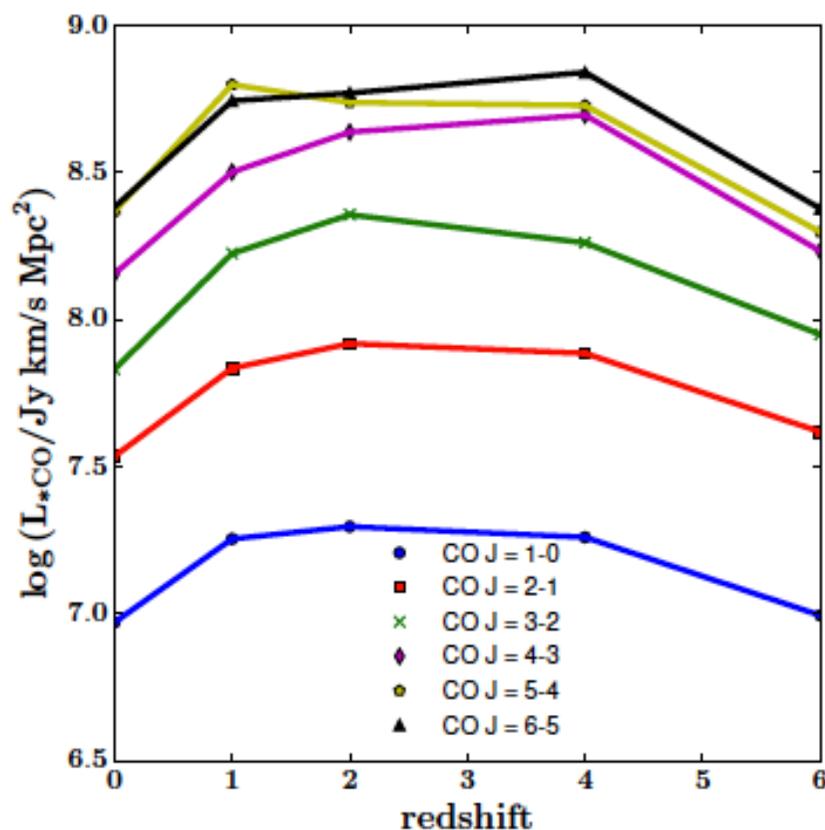
4 CO and [CII] luminosity function

- CO 光度関数

- L_{\star} はより高い遷移で進化が大きい

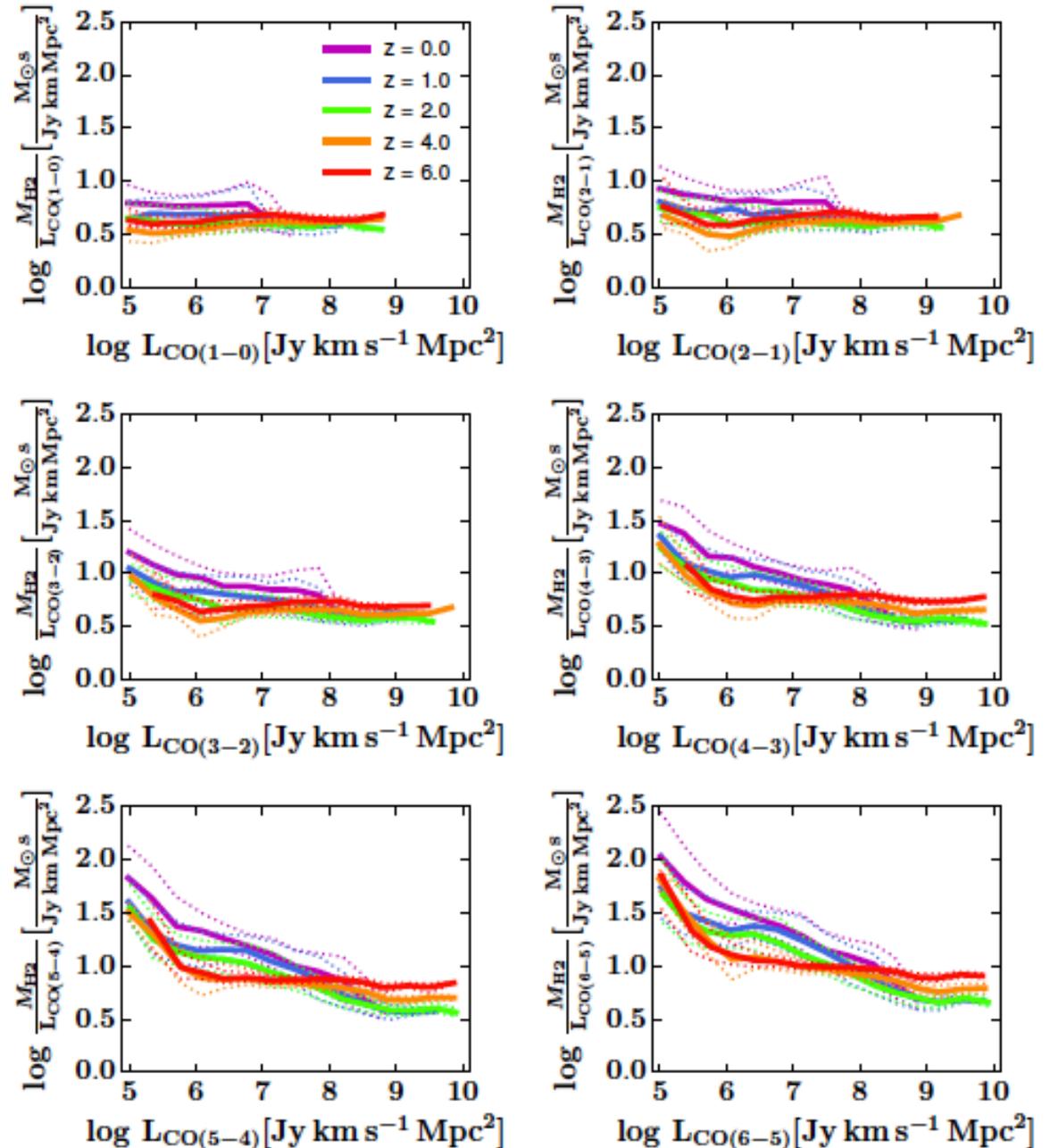
- CO(1-0) \rightarrow ~ 0.1 dex, CO(6-5) \rightarrow ~ 0.5 dex

- α は CO(1-0) の進化が小さい \rightarrow H₂-to-CO 比の違い?



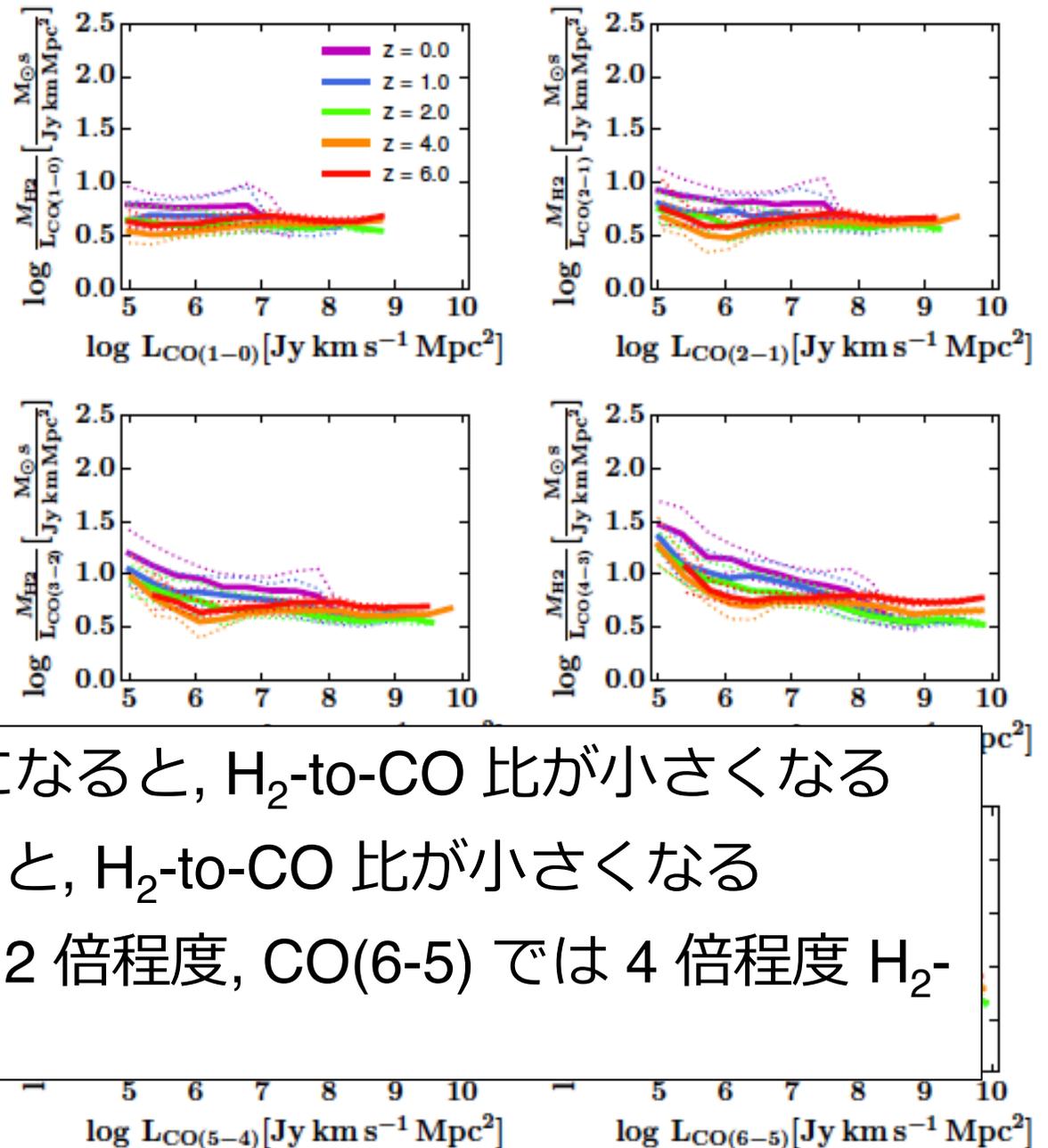
4 CO and [CII] luminosity function

- CO 光度関数
-H₂-to-CO 比の進化



4 CO and [CII] luminosity function

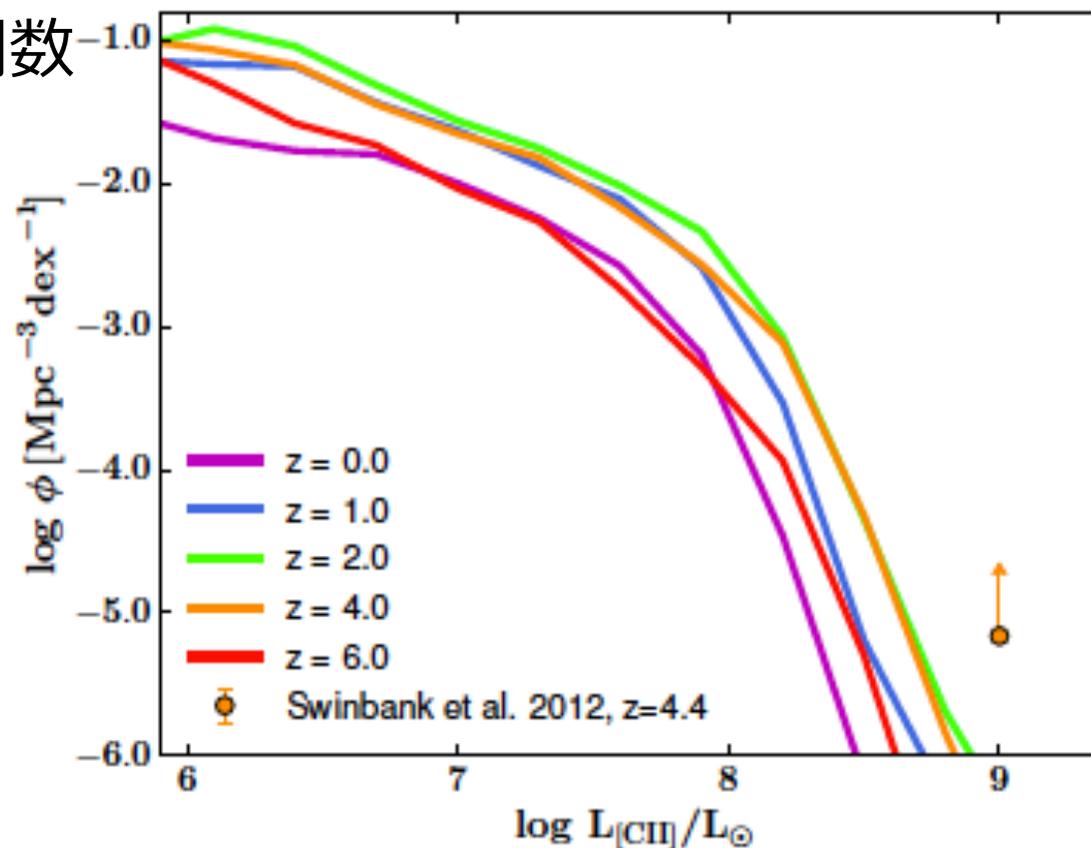
- CO 光度関数
 - H₂-to-CO 比の進化



- 全体的に高赤方偏移になると, H₂-to-CO 比が小さくなる
- CO 光度が大きくなると, H₂-to-CO 比が小さくなる
- CO(1-0) は $z = 6-0$ で 2 倍程度, CO(6-5) では 4 倍程度 H₂-to-CO が変化する

4 CO and [CII] luminosity function

- [CII] 光度関数



- $z = 6$ から $z = 4$ で数密度が上昇, $z = 2$ から $z = 0$ で数密度が減少
 - SFRD の進化に対応していると考えられる
- Swinbank + 12 と矛盾 → sec. 5 へ

5 Discussion

5.1 Observing CO deep fields

- 得られた光度関数から, CO 輝線の観測を考える
 - L_{\star} を $S/N = 5$ で検出する (300 km/s 分解能)
 - 観測装置は ALMA, JVLA, ngVLA を想定
- 得られた結果 (詳しくは, 本文 table 3)
 - CO(1-0) の観測は, 非効率的 (数 10 h/arcmin²)
 - 現状の装置を用いた SFRD がピーク値をとる時代 ($z \sim 2-3$), のガス観測については, CO(3-2) が効率的
 - cf. CO(3-2) の臨界密度は $\sim 10^{4.5} \text{ cm}^{-3}$

5 Discussion

5.3 Evolution of the shape of the CO LF

- L_{\star} はより高い遷移で進化が大きい
 - CO の SLED が進化している
 - z が高い方では, SLED のピークが high-J になる
 - Popping + 14 の予想や Daddi + 15 の観測 (at $z = 1.5$) と矛盾しない
- CO 輝線銀河の数密度は $z = 2-3$ で最大となる
 - 宇宙の分子ガス質量密度を反映
- CO 光度関数の赤方偏移進化は宇宙の分子ガス質量と, CO SLED の形で定義される, 銀河中のガスの性質に依存している

5 Discussion

5.3 Too few CO-bright galaxies at $z > 2$

- $z = 1.5, 2.75$ では underestimate (図 4)
 - 他の準解析モデル (Obreschkow+09, Lagos+12) も同様
- High-SFR の銀河の個数密度が再現されていない
 - cf. gas mass - SFR 関係
 - 銀河へのガスの降着率が根源にあると考えられる

5.4 The [CII] luminosity function

- [CII] 光度関数の進化は SFRD の進化を反映している
- Swinbank + 14 との矛盾
 - Swinbank + 14 が selection bias (SFR?) のために overestimate している

6 Summary & Conclusion

- CO(1-0) から CO(6-5), および [CII] の輝線光度-FIR 光度関係を再現
- CO 光度関数の赤方偏移進化
 - $z = 6$ から $z = 4$ にかけて, 数密度の増加
 - $z = 4$ から $z = 1$ はあまり進化しない
 - $z = 1$ から $z = 0$ にかけて, 数密度の減少
 - 宇宙全体のガス質量の変化と銀河中の分子ガスの状態の変化に影響されている
- [CII] 光度関数の進化は SFRD の進化を反映している

おまけ

- SXDF-ALMA 領域で検出された輝線候補
 - CO(4-3) @ $z = 0.687$?
 - 星質量の軽い ($M_{\star} \sim 10^{8.5} M_{\odot}$)
 - ガスが豊富 ($f_{\text{gas}} \sim 0.7-1$)
 - 既存のサーベイでは漏れていた
種族の銀河

