



微細構造線を用いたサイエンス
--SPICAの検討を南極テラヘルツ望遠鏡に活かす--

橋本拓也
筑波大学

目次

- SPICA の微細構造線のサイエンス検討

- ATT12 の微細構造線のサイエンス検討

- テラヘルツ帯の分光の利点
- ALMA (Band 9, 10) と ATT12 の分光性能の比較

(時間があれば)

- サイエンス案1 : [CII] 158 μm -based cosmic density of molecular gas
- サイエンス案2 : 銀河の星間物理学 (重元素量/電子密度/電離パラメータ)

SPICAの微細構造線のサイエンス検討

https://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/SPICA_HP/suishin/docs/SPICA_final_report_20201201.pdf

4.2.3 稲見さん

表 4.1 「近傍銀河・銀河系」班での検討項目一覧

| 章 | テーマ | 対象天体 | 空間分解能 | 分光対象輝線 or 波長帯域 | 波長分解能 | 撮像波長 帯域 | 目標感度 | 観測時間 | 担当 |
|-------|-----------------------------------|--------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.3 | 星形成主系列銀河の進化過程に直結する星間ガスとダストの物理化学状態 | 高光度赤外線 | $\lesssim 1$ kpc | PAH, [NeII]16 μ m, [NeII]13 μ m, [OI]63 μ m, [OIII]88 μ m, [CII]158 μ m | $\gtrsim 100$ (PAH), $\gtrsim 1000$ (微細構造線) | N/A | $\sim 10^{-9}$ $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ | 1' \times 1' のサーベイにつき MR: ~ 30 mins, SAFARI: ターゲット輝線次第で数時間から数 10 時間 | 稲見 |

- これまでにないほど高い空間分解能 (< 1 kpc) で (U)LIRGの化学状態を調べる
- ATT12 で Higher-z (U)/LIRGs? (江草さん発表)

3.6 橋本

表 3.2 検討内容の概要

| 章 | テーマ | 対象天体 | 輝線/連続波 | 波長分解能 | 要求感度 | 観測時間 |
|-----|------------|-------------------------|--------|------------|------------------------------------------|-----------|
| 3.6 | 再電離期の銀河の性質 | 赤方偏移 $\sim 0 - 0.4$ の銀河 | 輝線、連続波 | ~ 100 | $\sim 3 \times 10^{-19} \text{W m}^{-2}$ | 1 hr/1 天体 |

FIR微細構造線と、電離光子 (LyC: $\lambda < 912 \text{ \AA}$) の脱出の物理を結びつける (波長横断)

- $z = 0 - 0.4$ にある LyC 放射天体の赤外線の性質 (宇宙再電離)
- 準備研究 : SOFIA/FIFI-LS による観測 (PI: 橋本) \rightarrow SPICA \rightarrow

\rightarrow ATT12 [OIII] 88 + [CII] 158 の同時観測

SPICAの微細構造線のサイエンス検討

ATT12

①宇宙望遠鏡とは異なり、「**大気の窓**」が重要

複数輝線の同時観測は **一部の z に限られる**

例: [OIII] 88 + [CII] 158 の同時観測は、 $z \sim 1.2, 3.2, 6.0$

②分光の感度が違うため、**同様のサイエンスは難しいかもしれない**

[OIII]88 + [CII] 158 の同時観測は、ULIRG – HyLIRG クラス
metal-poor dwarfs を利用した LyC 放射研究のコンテクストとはずれるので、
微細構造線のサイエンス一般の話をしませぬ。

表 2: ATT12 の分光観測で得られる物理量

| 物理量 | 必要な輝線 | 対象となる赤方偏移 | 赤外光度の下限 $\log(LIR/L_0)$ |
|------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------|
| 電離状態 | [OIII]88, [CII]158 または [OIII]88, [OI]145 | $\sim 1.2 - 6.0$ ↓ (具体的には 1.2, 3.2, ~ 6.0) | 12.8 または 13.0 |

ATT12 による微細構造線のサイエンス

分光の重要性 (連続波の観測は中井さんスライド参照)

赤方偏移の確定

ダスト SED による photo-z は不定性「大」(Casey 2020, ApJ, 900, 68)

$z > 5$ SMGs の分光例は 20-30 天体しかない (e.g., Riechers+2020 ApJ, 895, 81)

z_{spec} の確定自体、重要

複数の輝線による星間物理学

ALMA などを待たず、自前で分光できる

ただし、「大気の窓」の影響が大きい (以下は例)

$$T_{\text{on}} = 10 \text{ hrs} \times N_{\text{line}} \text{ 程度}$$

$$\Delta v = 100 \text{ km/s}$$

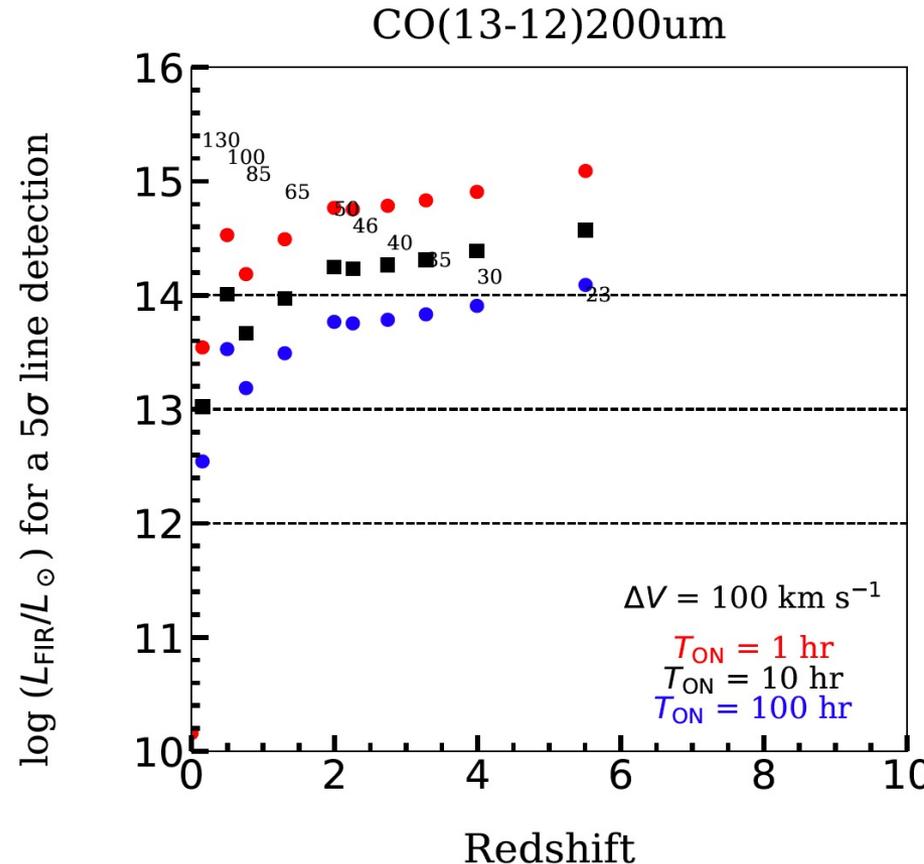
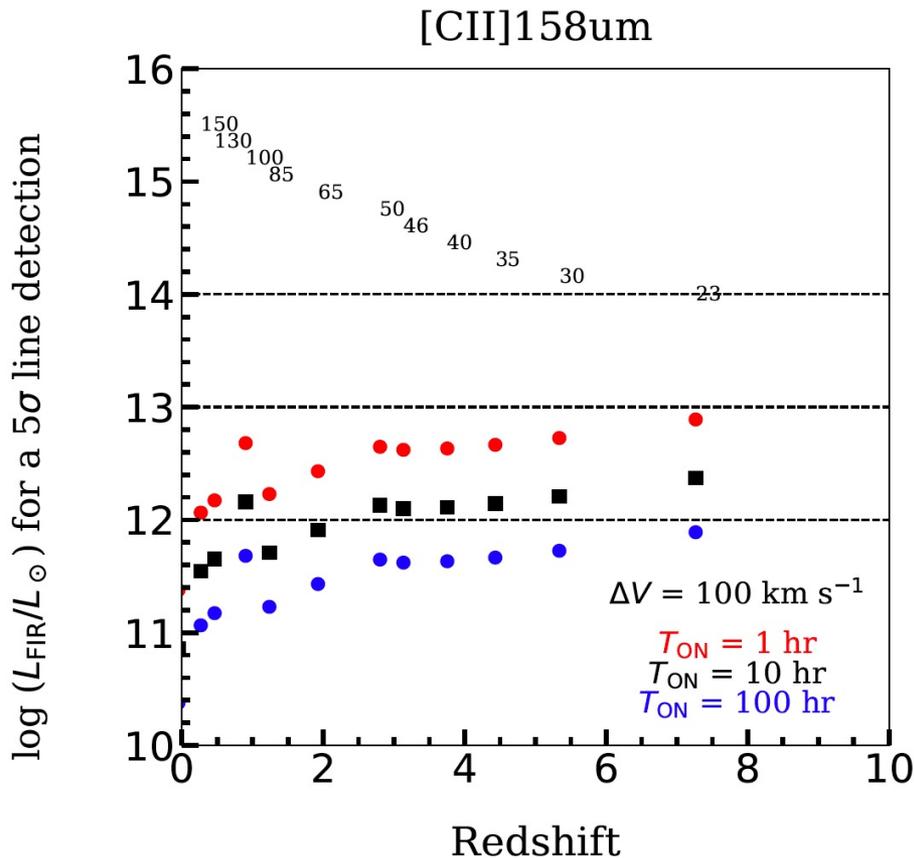
表 2: ATT12 の分光観測で得られる物理量

| 物理量 | 必要な輝線 | 対象となる赤方偏移 | 赤外光度の下限 $\log(\text{LIR}/L_{\odot})$ |
|---------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 電子密度 | [OIII]52/88 または [NII]122/205 | $\sim 0.7 - 6.0$ ↓ (具体的には 0.7, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, ~ 6.0) | 13.4 または 13.0 |
| 重元素量 (金属量) | [NIII]57, [OIII]52/88 または [CII]158, [NII]205 | $\sim 0.4 - 6.0$ (具体的には 0.4, 0.9, 3.0, 4.0, 5.0, ~ 6.0) | 14.0 または 13.0 |
| 電離状態 | [OIII]88, [CII]158 または [OIII]88, [OI]145 | $\sim 1.2 - 6.0$ ↓ (具体的には 1.2, 3.2, ~ 6.0) | 12.8 または 13.0 |

ATT12 による微細構造線のサイエンス

- MIR/FIR 微細構造線 や high-J CO 輝線の feasibility
- NASA **Origins Space Telescope** と同じ手法 (M. Bonato+19 PASA, 36, 17), **26 輝線**を検討

- LIR vs. L_line 関係
- 空間分解を考えず、**1点観測を想定**



テラヘルツ波の利点 (分光)

① ALMA で観測できない周波数帯は、ATT12 が大きな威力を発揮する

・THz 帯で観測できる、FIR 輝線の例

表 1

$\Delta V = 100 \text{ km/s}$ を想定

| 輝線 | THz 帯で探る赤方偏移 | 輝線検出 5σ に必要な $\log(L_{\text{IR}}/L_{\text{sun}})$ $T_{\text{ON}} = 100 \text{ (10) hrs}$ |
|-----------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [OIII] 52 | ~2 - 4.5 | ~13.4 - 14.2 (13.9 - 14.7) |
| [OI] 63 | ~1 - 3.5 | ~13.2 - 13.8 (13.7 - 14.3) |
| [OIII] 88 | ~0.5 - 2.5 | ~12.6 - 13.2 (13.1 - 13.7) |
| [NII] 122 | ~0 - 1.5 | ~12.6 - 13.0 (13.1 - 13.5) |
| [OI] 145 | ~0 - 1.0 | ~11.0 - 12.9 (11.5 - 13.4) |
| [CII] 158 | ~0 - 1.0 | ~11.0 - 11.8 (11.5 - 12.3) |
| [NII] 205 | ~0 - 0.5 | ~11.2 - 12.2 (11.7 - 12.9) |

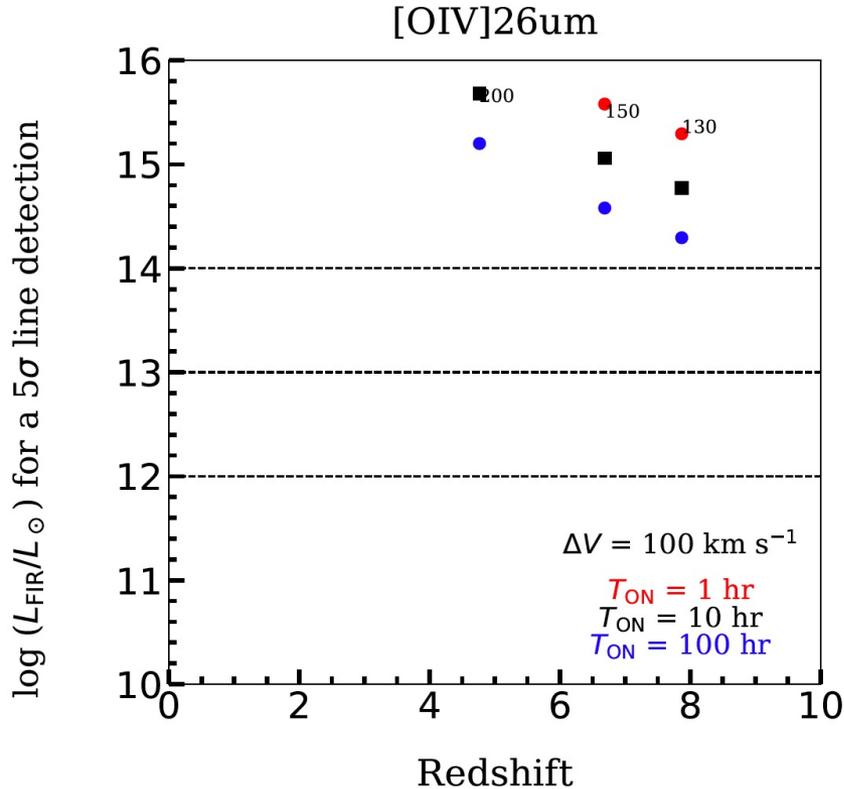
感度計算, 要確認

→ $z \sim 0 - 3$ の研究

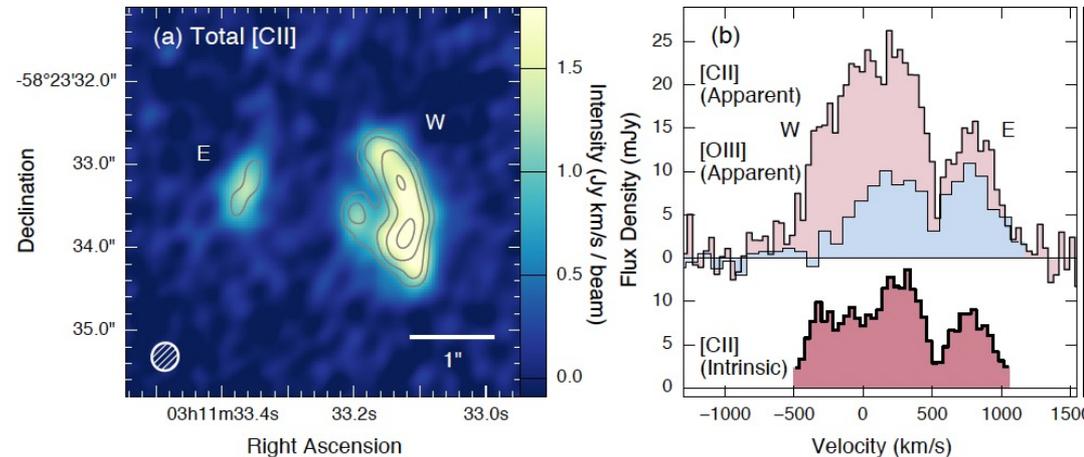
テラヘルツ波の利点 (分光)

- ② MIR 輝線 ([Ar III]22, [OIV]26, [SIII] 34, [SiIII]35など)
 →再電離期のMIR輝線を狙える ``可能性`` (OST-6 m サイエンスケースの主テーマの一つ)

| Line | [OIV]26 | [SIII]34 | [SiIII]35 |
|----------------|---------|----------|-----------|
| Lower redshift | ~5 | ~3.5 | ~3.5 |



Marrone+18 Nature, 553, 51



- $z = 6.90$ lensed SMG “SPT 0311-058”
- LIR/ $L_{\text{sun}} = 4e+13$ (total)

[OIII] 88 vs. [OIV] 26 → AGN 診断

$T_{\text{ON}} \sim 10,000 \text{ hrs}!!!!$

より明るい $z \sim 7$ SMG サンプルが見つかるかが鍵

ATT12 と ALMA B9, B10の比較 (分光)

Band 9 = 650 GHz (450 μm)

Band 10 = 850 GHz (350 μm)

THz 帯に比べ、同一の輝線をより遠方まで見る (主に $z \sim 1 - 4$)

THz 帯に比べ、大気透過率が良いので、限界光度は同程度

表 3

| 輝線 | 850、650 GHz 帯で探る 赤方偏移 | 輝線検出 5σ に必要な $\log(L_{\text{IR}}/L_{\text{sun}})$ $T_{\text{ON}} = 100$ (10) hrs |
|-----------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| [OIII] 52 | ~5.9、8.0 | ~12.9、13.0 (13.4、13.5) |
| [OI] 63 | ~4.5、6.3 | ~12.8、12.8 (13.3、13.3) |
| [OIII] 88 | ~3.0、4.3 | ~12.3、12.4 (12.8、12.9) |
| [NII] 122 | ~2.0、2.8 | ~12.4、12.6 (12.9、13.0) |
| [OI] 145 | ~1.5、2.2 | ~12.4、12.6 (12.9、13.0) |
| [CII] 158 | ~1.2、2.0 | ~11.2、11.4 (11.7、12.1) |
| [NII] 205 | ~0.9、1.2 | ~12.0、12.3 (12.5、12.8) |

ATT12 と ALMA B9, B10の比較 (分光)

具体的な比較

850 (650) GHz 帯で $z = 1.15$ (2.0) 天体の [CII] 158 μ m 輝線

$\log(L_{[\text{CII}]} / L_{\text{sun}}) = 9.0$ および輝線幅 (FWHM) 300 km/s を仮定
100 km/s ビンあたり 5 σ 検出を達成するために必要な観測時間

表 4 $\Delta V = 100$ km/s、それぞれ 冬季 50% PWV のフェアな条件

| | 850 GHz 帯 Band 10 | 650 GHz 帯 Band 9 |
|----------------------------|----------------------|---------------------|
| 視野 [arrmin ²] | 4.5 | 7.5 |
| 上段 ATT12 (300 ビーム) | 0.015 | 0.025 |
| 下段 ALMA | | |
| 観測時間 T_{ON} [hrs] | 6.3 | 23 |
| 上段 ATT12 | 2.3 | 4.6 |
| 下段 ALMA | | |

- ALMA (2030年代に10ビーム程度) に比べビーム数を増やせば、視野で有利
- 南極の感度ゆえ、感度はアンテナ数ほどの分光感度の差が出ない (ATT12 に追い風)

ATT12 と ALMA B9, B10の比較 (分光)

- ALMA サイトで Band 9, 10 の長時間観測は、難しい

| | Band 9 | Band 10 |
|----------------|--------|---------|
| メジアン Ton [hrs] | 0.3 | 0.4 |
| 最大 Ton [hrs] | 3.2 | 1.1 |

ALMA Cycle 9 – 7 で実行された Band 9, 10 観測を網羅

ATT12 のアドバンテージを活かすためには...

- ①マルチビームによる広視野の分光観測
- ②ALMA で長時間観測が必要なサイエンス → 3-5 倍 Ton が大きくても ATT12 に利点

①' QSO 周辺的环境 (可視 1-100 平方度級: S. Kikuta+19, PASJ, 71, 2、H. Uchiyama+20, 905, 125 z ~ 1-3 で、QSO 周辺の [OIII] 88, [CII] 158 輝線天体のサーベイ観測
多波長/広視野による QSO の環境 (Decarli+17 Nature, 545, 457; Champagne+18, ApJ, 867, 153)
(久保さん発表 参照) メンバー銀河の分解は難しい

②' 再電離期の天体の [OIII] 52 um は ALMA で**次のフロンティア** (Cy 6-7, PI: 松尾さん)
しかし、採択されても観測実行されにくい... → ATT 12

Cosmic density of molecular gas

ALMA large program, ASPECS (F. Walter) R. Decarli+20, ApJ, 902, 110

HUDF 1.2 & 3 mm survey
H₂ mass based on CO

A frontier of the galaxy
formation and evolution
(c.f., Cosmic SFR density evolution)

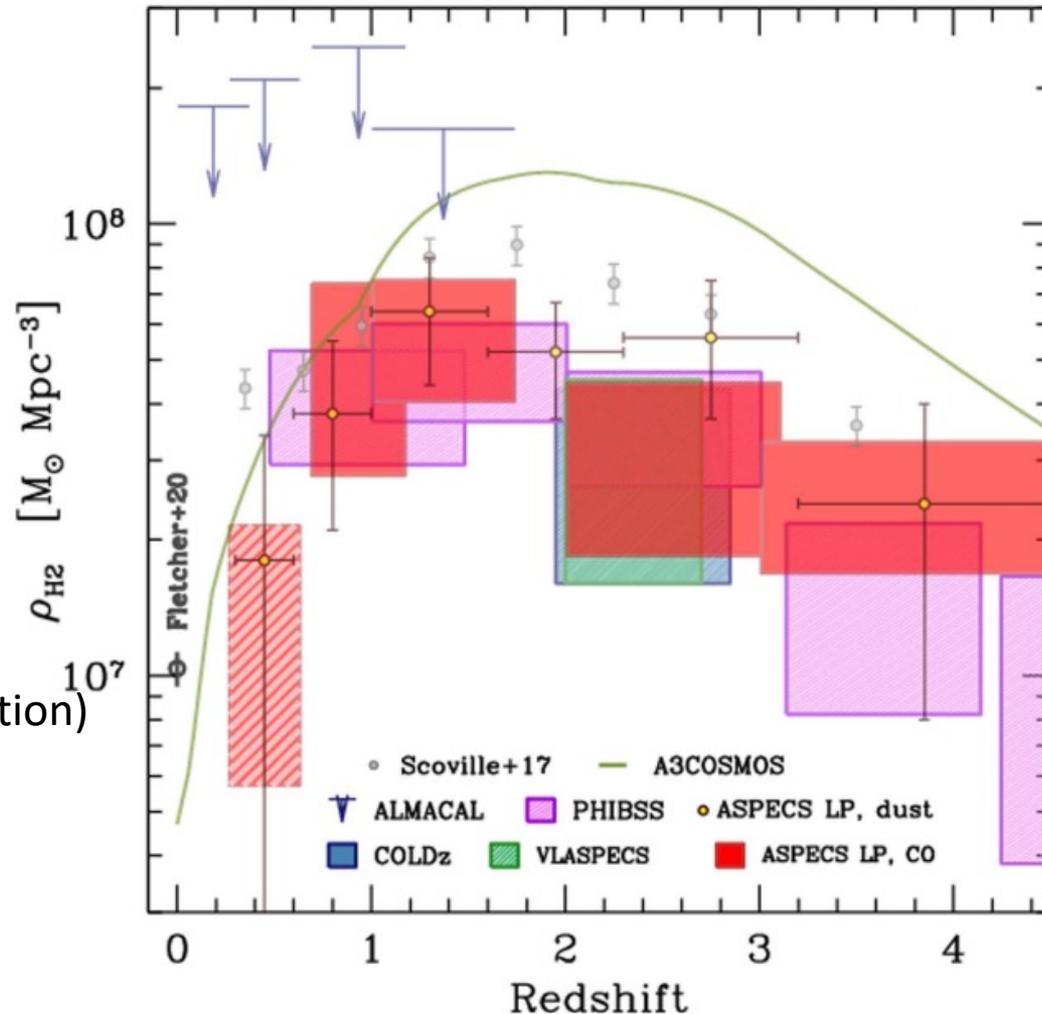
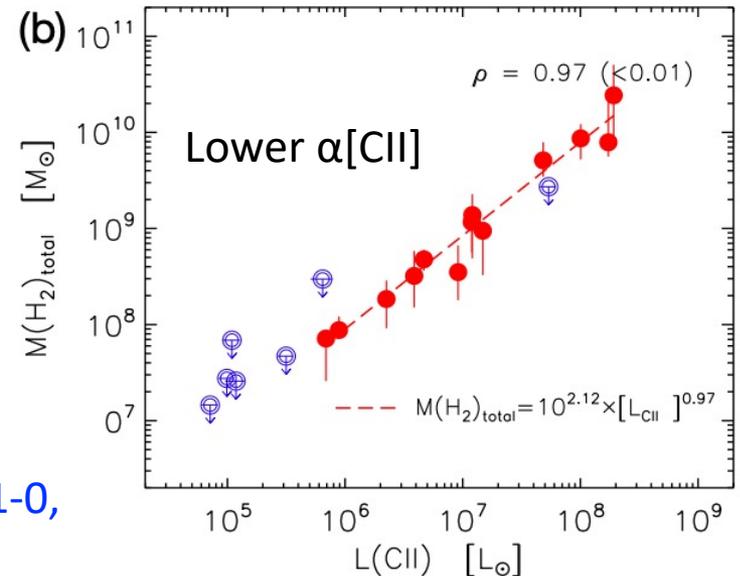
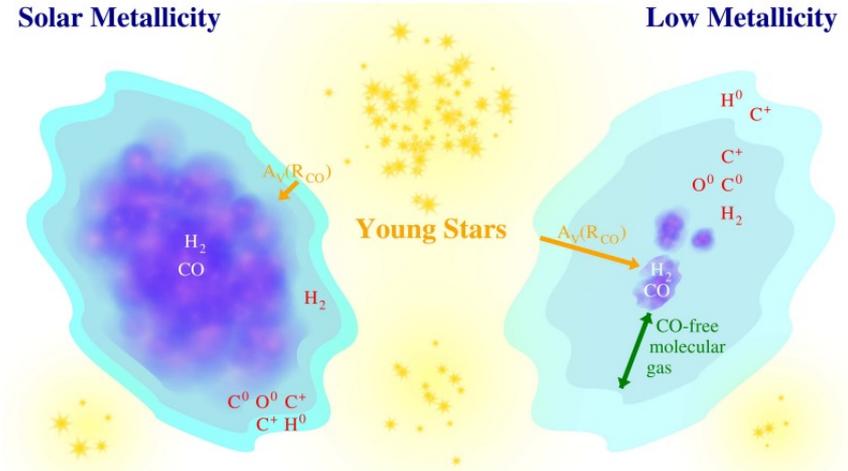
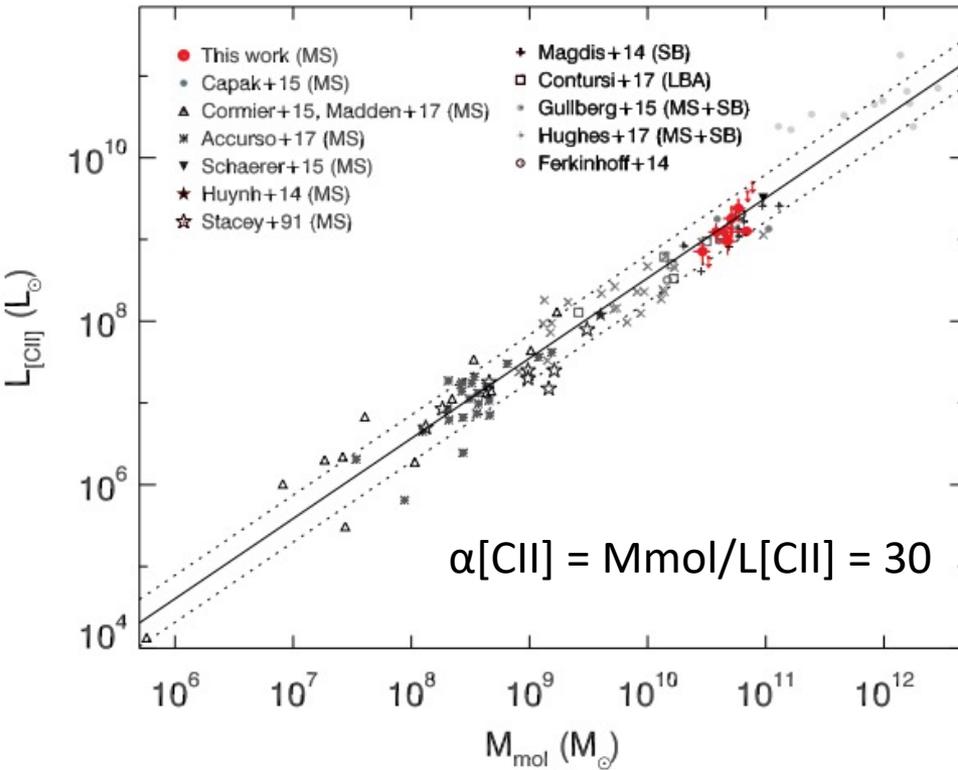


Figure 9. The evolution of the cosmic molecular gas density, $\rho_{\text{H}_2}(z)$, from ASPECS LP compared to similar studies in the literature: CO-based measurements from VLASPECS (Riechers et al. 2020), COLDz (Riechers et al. 2019), PHIBSS fields (Lenkić et al. 2020), ALMACAL (Klitsch et al. 2019); and dust-based measurements from ASPECS (Magnelli et al. 2020), A3COSMOS (Liu et al. 2019), and from Scoville et al. (2017; see their footnote 2). The $\rho_{\text{H}_2}(z=0)$ measurement by Fletcher et al. (2020) is also shown for reference. All of the uncertainties are shown at 1σ significance. The ASPECS LP constraints at $z \lesssim 0.5$ are shaded to highlight the non-negligible impact of cosmic variance at these redshifts. The available data sets all point toward a steep decrease in ρ_{H_2} from cosmic noon to the local universe preceded by a smooth increase from higher redshift. Different surveys targeting different regions of the sky appear to find the same trend, implying that cosmic variance does not dominate the results (see Appendix B).

[CII]-based cosmic density of molecular gas?

- [CII] 158 um as a tracer of molecular gas mass
e.g., Zanella+18, MNRAS, 481, 1976

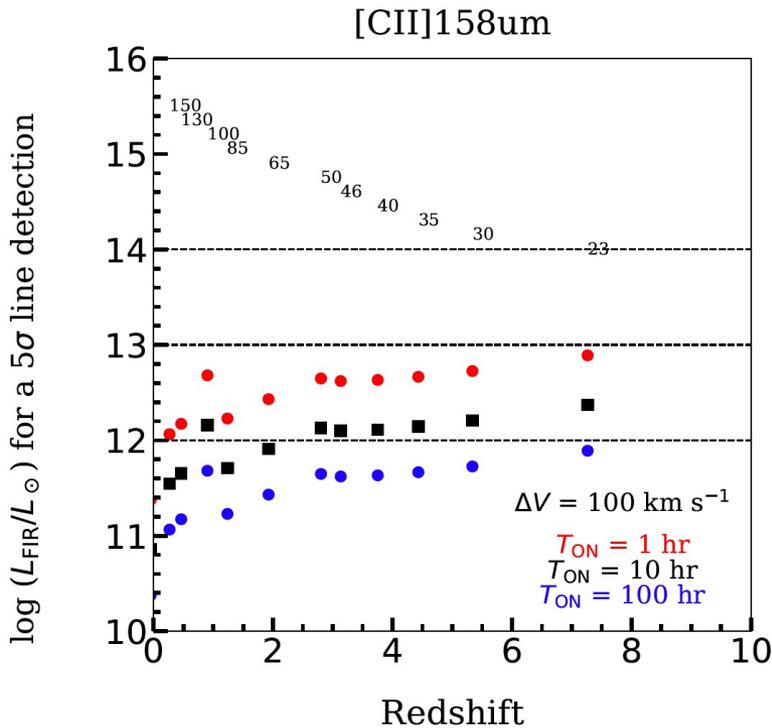
- [CII] 158 um as a tracer of CO-dark molecular gas
Madden+20, A&A, 643A, 141



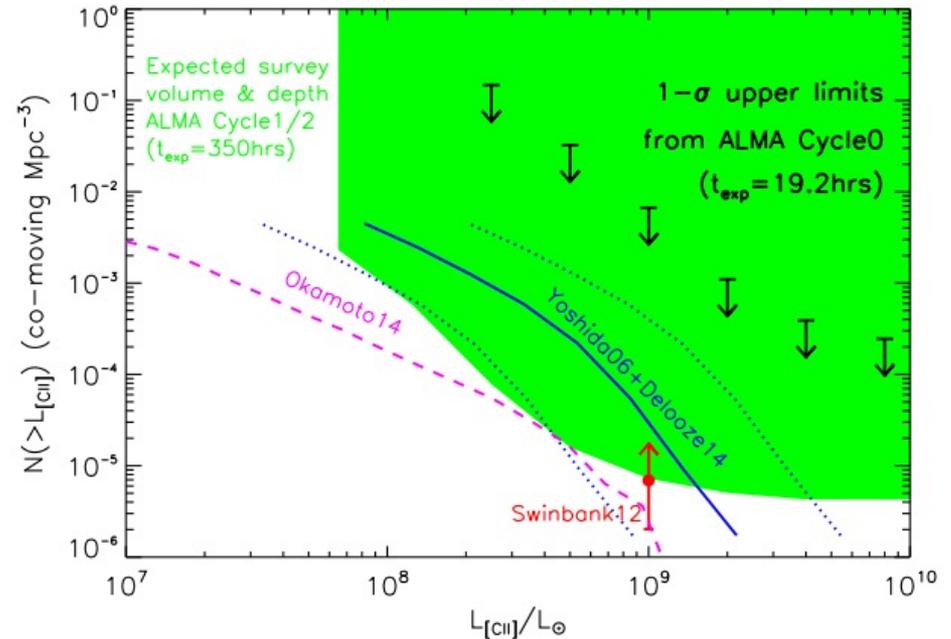
Vizgan+22 (arXiv: 2203.05316)

"[CII] is a better tracer of the molecular gas than CO J = 1-0, especially at the lowest metallicity..."

[CII]-based cosmic density of molecular gas?



① Bright-end of the [CII] luminosity function
c.f., Y. Matsuda+15, MNRAS, 451, 1141



- A huge [CII]158 sample at $z = 0 - 6$ in $20,000 \text{ deg}^2$
 - $N \sim O(10^6)$ photo-z objects with $\log(L_{\text{FIR}}/L_{\text{sun}}) = 12$ at $\Delta z = 1$
 - Follow-up obs: 10 hrs/source \rightarrow SFR $\sim 100 \text{ Msun/yr}$

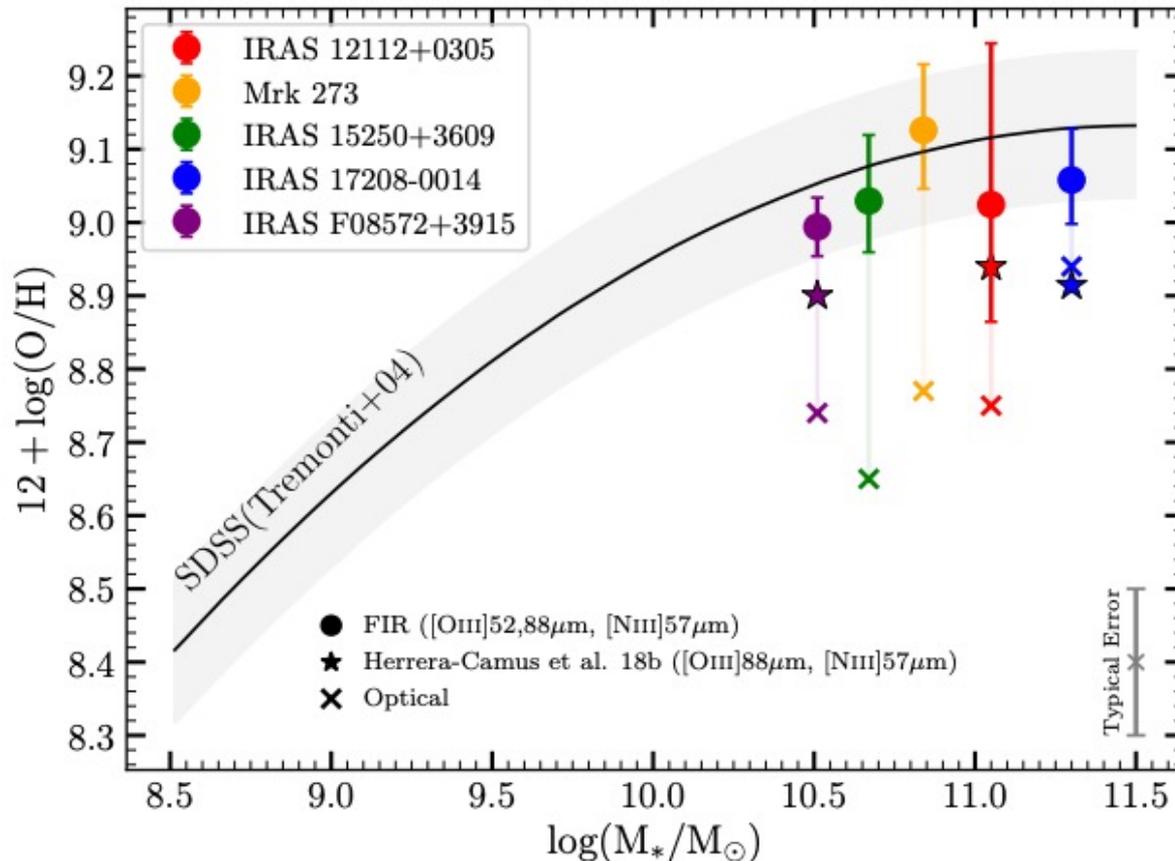


② [CII]-based ρ_{H_2} evolution
e.g., Uzgil+21, ApJ, 912, 67 ([CII] upper limits for $z \sim 6$ LBGs; ASPECS)

Gas Phase Metallicities of Local Ultra-Luminous Infrared Galaxies Follow Normal Star-Forming Galaxies

Nature

Nima Chartab¹, Asantha Cooray¹, Jingzhe Ma², Hooshang Nayyeri¹, Preston Zilliot¹, Jonathan Lopez¹, Dario Fadda³, Rodrigo Herrera-Camus⁴, Matthew Malkan⁵, Dimitra Rigopoulou⁶, Kartik Sheth⁷, Julie Wardlow⁸



- FIR-based metallicity based on SOFIA's [OIII] 52 + Herschel's [NIII] 57 & [OIII] 88
- ULIRGs lie ON the mass metallicity relation (No evidence for low Z_{gas})
 - 可視光だけでなく、MIR/FIR 輝線によるダストの影響を受けにくい星間物理学は重要