

**“First detection of the [O III] 88 um
line at high redshifts: Characterizing
the starburst and narrow-line regions in
extreme luminosity systems”**

Ferkinhoff et al. 2010, ApJL, 714, L147

Y. Tamura (IoA, UTokyo)
IoA Journal Club
30-Sep-2013

Abstract

- ❖ ZEUS/CSOによる High-z ($z > 0.05$) における [OIII] 88 μm の初検出。
- ❖ ターゲットは APM 08279+5255 ($z = 3.911$, QSO) と SMM J02399-0136 ($z = 2.8076$, SB)。いずれのシステムも、[OIII]88 光度は $L_{[\text{OIII}]88}(\text{apparent}) \sim 10^{11} L_{\text{Sun}}$ と並外れて高い。
- ❖ APM08279
 - ❖ [OIII] flux は星形成のパラダイムでモデルが可能。Teff > 36,000 K の星が支配的な輻射場。M82 と似ている。~35%のFIR光度は星形成で説明が可能(残りはAGN)。
 - ❖ 一方で、もし a few $\times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ の密度があるなら、AGN NRLでも説明可能。
- ❖ SMM J02399
 - ❖ [OIII] は、Teff > 40,000 K の熱く若い星がつくるHII領域から出ている可能性が高い。FIR光度はstarburstが dominate している。
- ❖ [OIII]88 は遠方宇宙での starburst / AGN を characterize するのに有効。

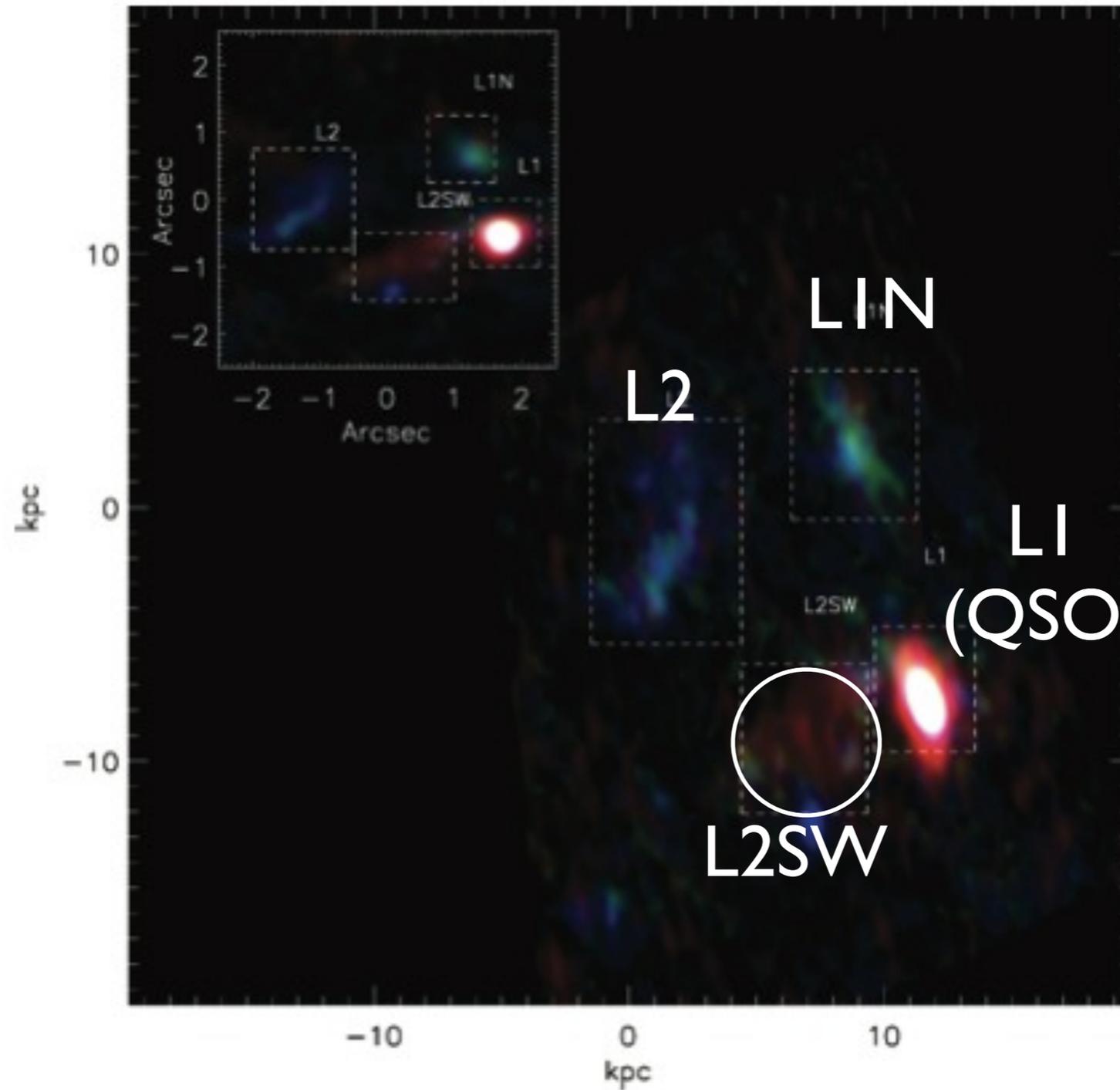
1. Introduction (1/2)

- ❖ What's [OIII]88?
 - ❖ 8つの明るいFIR fine-structure lineのうちひとつ (cf. [CII]158, [NII]122,205, [NIII]57, [OI]63,146, [OIII]88,52)
 - ❖ ISOで88個の近傍銀河を観測し、75%で検出。典型的には [CII]158, [OI]63 に並んで 2-3番目に強い。~10%では最も強い。 $L_{\text{[OIII]88}} / L_{\text{FIR}} = 0.03\% - 2\%$ (median: 0.15%)
 - ❖ O++を作るには35eV photon ($T_{\text{eff}} > 36000\text{K}$) が必要。簡単に励起 (level: 164 K, critical density: 510 cm^{-3})するので、電離ガスの温度には insensitive。~100 cm^{-3} 程度の ionized gas cloud を見ている。
 - ❖ ちなみに [OIII]5007Å は AGN NLR で一番明るい可視輝線
- ❖ この論文では
 - ❖ $z > 0.05$ での [OIII]88 初検出を報告。
 - ❖ ターゲットは、BAL QSO APM08279 ($\mu_g \sim 4-90, z = 3.9$), SMG SMMJ 02399 ($\mu_g \sim 2.38, z = 2.8$)

1. Introduction (2/2)

- ❖ APM08279
 - ❖ AGN/starburst コンポジットシステム。 $L_{\text{bol}}(\text{apparent}) \sim 7 \times 10^{15} L_{\odot}$ で、このうち $2 \times 10^{14} L_{\odot}$ はFIR が出ている。 Demagnifyしても、 $8 \times 10^{13} L_{\odot}$
 - ❖ CO 6 transition が中心 900 pc ディスクから受かっていて、 $M(\text{H}_2) \sim 5.3\text{E}+11 \mu_{\text{g}}^{-1} M_{\odot}$ に達する。 SEDモデリングからは AGN が dominant heating source らしい。
- ❖ SMMJ02399
 - ❖ こちらも AGN/SB コンポジット。 最初に見つかった / CO検出されたSMG。
 - ❖ $M(\text{H}_2) \sim 2.38\text{E}+11 \mu_{\text{g}}^{-1} M_{\odot}$, $L_{\text{FIR}} \sim 1.9\text{E}+13 \mu_{\text{g}}^{-1} L_{\odot}$ と巨大。
 - ❖ 4コンポーネント。 L1: weak BAL QSO, L2: 3"にひろがっている。 HSTでさらに2コンポーネント (L2SW, L1N)。 COや L_{FIR} は、 (L1でもL2でもなく) L2SWから来ており、ここが starburst のサイト。

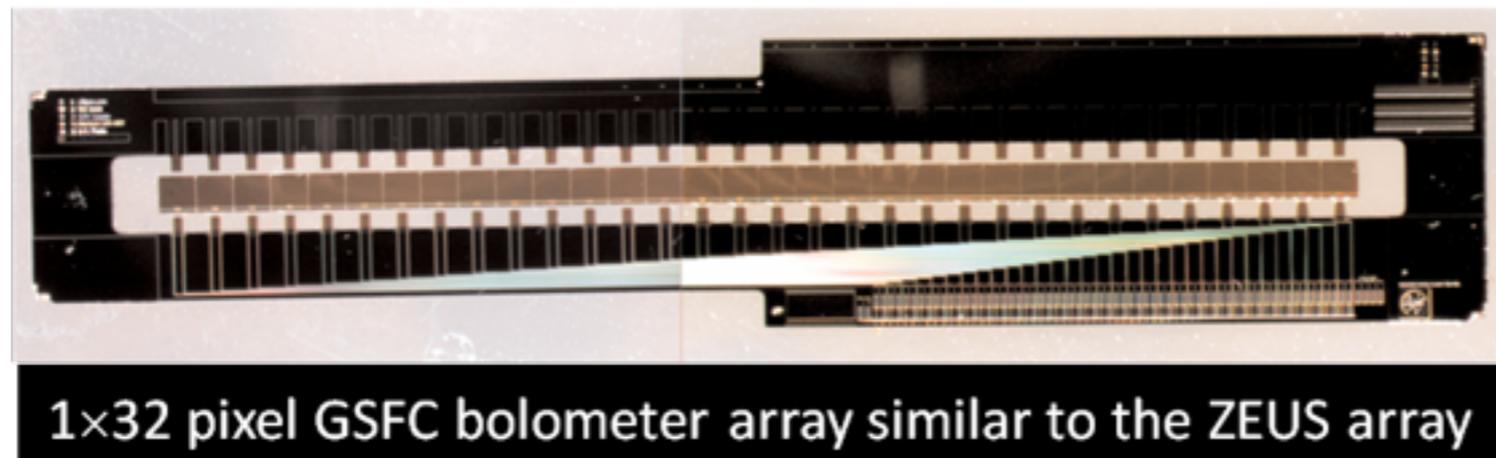
SMM J02399



Ivison+10

2. Observations

- ❖ ZEUS (Redshift (z) and Early Universe Spectrometer; Stacey+07, Hailey-Dunsheath+09) / CSO
 - ❖ Echelle grating spectrometer
 - ❖ 1 x 32 pix bolometer array, $R \sim 1000$, 半分ずつ 350 μm と 450 μm をそれぞれ5次、4次回折光として分光検出。速度分解能は、280 km/s (434 μm), 320 km/s (336 μm) 程度。
 - ❖ CSO 10.4m で 11" ビーム。 $T_{\text{RX}} < 50 \text{ K}$ に相当。
- ❖ APM08279を7 σ 検出。 77min on-source、 37%大気透過率
- ❖ SMMJ02399を4.1 σ 検出。 77min on-source、 23%大気透過率。



3. Results

3.1. Line Luminosity

- ❖ $L_{[\text{OIII}]} / L_{\text{FIR}} \sim 5.3\text{E-}04$ (APM, ISO typ.の1/3倍), $3.6\text{E-}3$ (SMM, ISO typ.の2倍)
- ❖ 線幅 $< 400\text{-}600$ km/s なので、HII regionかNLRのいずれか (BLRでない)。

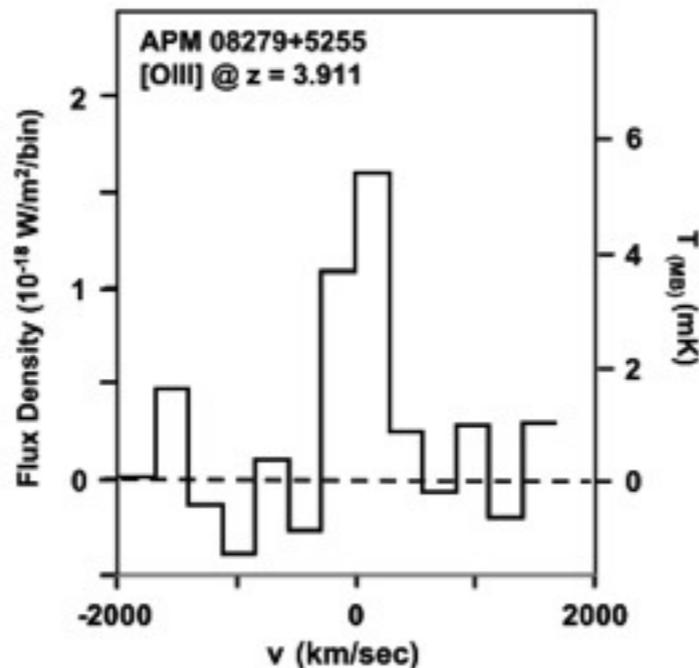


Figure 1. ZEUS/CSO detection of the [O III] $88\mu\text{m}$ line from APM 08279+5255. Velocity is referenced to $z = 3.911$. The continuum emission has been subtracted off.

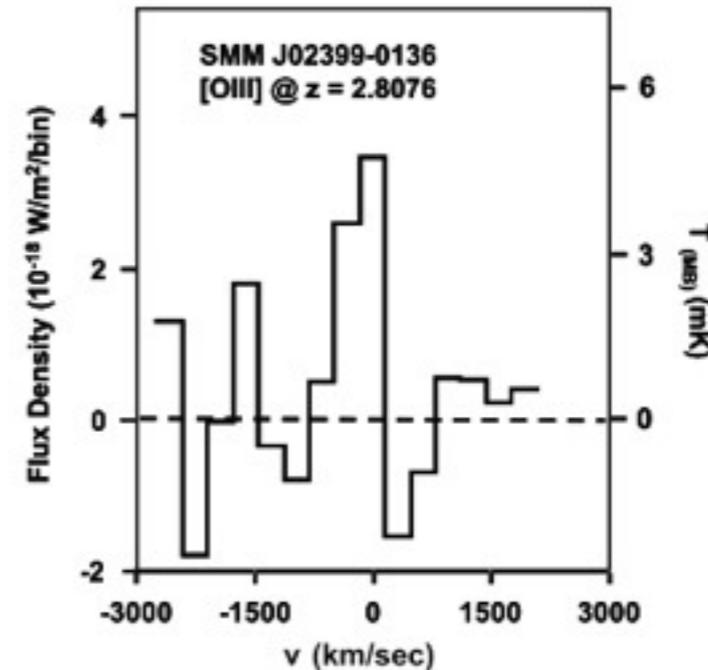


Figure 2. ZEUS/CSO detection of the [O III] $88\mu\text{m}$ line from SMM J02399-0136. Velocity is referenced to $z = 2.8076$. The continuum emission has been subtracted off.

Table 1
Source Parameters

Source	R.A. (J2000)	Decl. (J2000)	z	D_L (Gpc)	$L_{\text{far-IR}} (L_{\odot})$	$F([\text{O III}]) (10^{-18} \text{ W m}^{-2})^a$	$L([\text{O III}]) (L_{\odot})$
SMM J02399	$02^{\text{h}}39^{\text{m}}51^{\text{s}}.9$	$-01^{\circ}35'59''$	2.8076	23.8	$2.9\text{E}13^b$	6.04 ± 1.46	$1.06\text{E}11$
APM 08279	$08^{\text{h}}31^{\text{m}}41^{\text{s}}.6$	$52^{\circ}45'17''$	3.911	35.6	$2.0\text{E}14^c$	2.68 ± 0.38	$1.05\text{E}11$

3. Results

3.1. Minimum Mass of Ionized Gas

- ❖ 最小電離ガス質量
- ❖ 高密度・高温極限
- ❖ HII region中の全酸素がO++にあると仮定。Teff > 40,000 Kが必要

$$M_{\min}(H^+) = F_{10} \cdot \frac{4\pi \cdot D_L^2}{\frac{g_1}{g_t} A_{10} h \nu_{10}} \frac{m_H}{\chi(O^{++})}$$

- ❖ A₁₀: Einstein A係数, g₁: 統計的重み(3), g_t: 分配関数=Σ g_i exp[-ΔE_i/kT], h: Planck定数, ν₁₀: 静止周波数, D_L: 光度距離, χ(O⁺⁺): アバundance (O⁺⁺/H⁺ ≅ O/H) ここでは O/H = 5.9E-4 を仮定。
- ❖ 結果
 - ❖ M_{min}(H⁺) ~ 3.0E+9 μ_g⁻¹ M_o ~ 1% M(H₂)
 - ❖ ionized/molecular fraction が小さい (<=> ~12% for M82)
 - ❖ 実際の質量はO/H比に反比例するので、Teffに強く依存する
 - ❖ Teff ~ 36,000 K => 酸素の~14%がO++ => 電離ガスは7倍

4. Discussion: Gas Excitation Mechanisms

4.1. APM08279 (1/3)

- ❖ 4.1.1. The Ionization State of the Gas
 - ❖ [NII]205um も使うと電離状態が分かる。N+ ion. potential: 14.5eV, N++: 30 eV
なので、O++ が出るガスはN++になっている。N+/O++比はUV場の硬さに依存
 - ❖ [OIII]88 / [NII] 205 > 17 ==> Teff の下限値を与える
- ❖ 4.1.2. Stars as the Energy Source
 - ❖ 強度を決めるのは : gas density, abundance, stellar Teff
 - ❖ O/H = 6.76E-4, N/H = 1.15E-4 を仮定 ("K" model, Rubin85)
 - ❖ [OIII]/[NII] ==> Teff > 36,000 K (O9V star)
 - ❖ $n_H > \text{few cm}^{-3}$ if $M(\text{H}^+) < M(\text{H}_2)$
 - ❖ $n_H < 10000 \text{ cm}^{-3}$ if $L(\text{ion. star}) \leq L_{\text{FIR}}$
 - ❖ "K49" model (10^{49} ion. photons/s/HII region) → O starの個数が分かる
 - ❖ $M(\text{H}^+) \sim 4.3\text{E}+10 \mu_g^{-1} \text{ Mo}$ if $T_{\text{eff}} = 36,000 \text{ K}$
 - ❖ (3-30)E+8 O9V stars ($T_{\text{eff}} = 36,000 \text{ K}$)
 - ❖ $L(\text{O9V}) \sim (4-40)\text{E}+13 \mu_g^{-1} L_o$
 - ❖ $M(\text{H}^+) \sim (3-8)\text{E}9 \mu_g^{-1} \text{ Mo}$ if $T_{\text{eff}} = 40,000 \text{ K}$
 - ❖ (3-10)E+7 O7.5V stars ($T_{\text{eff}} = 40,000 \text{ K}$)
 - ❖ $L(\text{O7.5V}) \sim (6-20)\text{E}+12 \mu_g^{-1} L_o$
 - ❖ $M(\text{H}^+) \sim 0.6\% - 8\%$ of $M(\text{H}_2)$
 - ❖ low-metallicity "D49" model (O/H = 1.27E-4) だと、M(H+)は5倍、O星数は3倍

4. Discussion: Gas Excitation Mechanisms

4.1. APM08279 (2/3)

- ❖ 4.1.2. Stars as the Energy Source (cont'd)
 - ❖ M82との比較
 - ❖ 60,000 ionization-bounded HII regions, $n_e \sim 180 \text{ cm}^{-3}$, それぞれのHII regionは 10^{49} photonを出す1個の大質量星
 - ❖ $M(\text{H}_2) \sim 8\text{E}+8 \text{ Mo}$
 - ❖ 2-3 Myr 前に生じた instantaneous burst ($M < 100\text{Mo IMF}$)を仮定すると、 $L_{\text{star}} \sim (3-5)\text{E}+10 L_{\odot}$ となる。 $L_{\text{FIR}} \sim 2.3\text{E}+10 L_{\odot}$ とconsistent。
 - ❖ 他のSF indicator (H^+ , PAH)との比較→残念ながらAPM08279はBLRの影響で H^+ , PAHは役に立たず。
 - ❖ AGN
 - ❖ $L_{\text{[OIII]}}$, L_{FIR} , $M(\text{H}_2)$ は、M82 の $3000 \mu_{\text{g}}^{-1}$ 倍にスケールできる。(ただし、 L_{FIR} の $1/3-1/2$ が staruburst なら)。
 - ❖ のこりはAGN heated ($T_{\text{dust}} = 65 \text{ K}$ と思えば consistent)
 - ❖ 星
 - ❖ 上記M82の推定と同様とおもえば、 $5\text{E}+8 \mu_{\text{g}}^{-1}$ O9V stars, IMF を足し合わせれば、 $L_{\text{FIR}} \sim 6.9\text{E}+13 \mu_{\text{g}}^{-1} L_{\odot}$ を説明できる
 - ❖ $\text{SFR}_{\text{FIR}} \sim 12,000 \mu_{\text{g}}^{-1} \text{ Mo/yr}$

4. Discussion: Gas Excitation Mechanisms

4.1. APM08279 (3/3)

- ❖ 4.1.3. The AGN as the Energy Source → [OIII] flux を NLR で説明するとどうなる？
 - ❖ 一般に ...
 - ❖ AGN NLR $nH \sim 100-10,000 \text{ cm}^{-3}$ (average 2000 /cc)
 - ❖ このとき、[OIII]5007A/88um ~ 0.3 (3) to 65 (180) for "K" ("D") model
 - ❖ [OIII]5007はAGN L_{bol} と良い相関。 $L_{O3} = L_{bol} / 3500$
 - ❖ APM
 - ❖ $L_{bol} \sim 7E+15 \mu_g^{-1} L_o \rightarrow L_{O3} \sim 2E+12 \mu_g^{-1} L_o \rightarrow L_{[OIII]88} \sim 1E+10 - 6E+12 \mu_g^{-1} L_o$ (nH , abundanceによる) --> "abundance"? see Rubin 85
 - ❖ $nH \sim 2000$ (1000) /cc for "K" ("D") model ならば、観測された $L_{[OIII]}$ は 100% AGN 起源でもよい

AI: K, D model ってなに? (see Rubin 1985)

4. Discussion: Gas Excitation Mechanisms

4.2. SMMJ02399

- ❖ L2SW (pure-SB) に対する議論
 - ❖ $I(\text{PAH}6.2\mu\text{m}) \sim I([\text{OIII}]88)$ なので、star-formation paradigm (not AGN)
 - ❖ $[\text{OIII}]5007$ との比較
 - ❖ $[\text{OIII}]5007 / \text{Ha} (=1.5)$ は $\text{O}^{++}/\text{H}^{+}$ 比に依存 → UV の硬さ
 - ❖ $[\text{OIII}]5007 / 88\mu\text{m} (=4.8)$ は density に依存
 - ❖ $T_{\text{eff}} = 40,000 \text{ K}$ (O7.5 stars), $n_{\text{H}} \sim 100, 1000 \text{ cm}^{-3}$ if low-Z (“D”) and Galactic-Z (“K”) でよく観測結果をフィットできる
 - ❖ $M(\text{H}^{+}) \sim (3.3-30)\text{E}+9 \mu_{\text{g}}^{-1} \text{ Mo}$ (lower value for “K” model)
 - ❖ $L_{[\text{OIII}]}$ は $1.0\text{E}+8 \mu_{\text{g}}^{-1}$ O7.5 stars に対応
 - ❖ この総光度は、 L_{FIR} の75%を説明 → $\text{SFR} = 5000 \mu_{\text{g}}^{-1} \text{ Mo/yr}$

5. Summary and Outlook

- ❖ 他の oxygen fine-structure line
 - ❖ [OIII]52 をつかえば、gas density がわかる。[OIII]52/88 = 0.7 (low n) → 10 (high n, $n > 10^4 \text{ cm}^{-2}$ でサチる)。ちょっと波長短すぎだが、Herschel だといける (当時)
 - ❖ [OIV]26 をつかえば、UV hardness がわかる。AGN/SBの切り分けが可能。

Journal club:
***"An Overview of the Dwarf
Galaxy Survey"***

Madden et al. (2013) PASP, 125, 600

Y. Tamura (IoA, U.Tokyo)
XX-Sep-2013

Abstract

- ❖ Dwarf Galaxy Survey (DSG): Herschel/SPIRE の230hrを投じて低金属量銀河を観測し、ダスト・ガス・星をトレースする様々な波長のデータベースを構築するプロジェクト。
- ❖ 50個の銀河。金属量： $1/50 Z_{\text{sun}}$ から $\sim 1 Z_{\text{sun}}$ まで、SFR：4桁
- ❖ おもに、low-Z dwarf銀河のISMの物理を得ること、とくにダスト・ガスの性質、および heating/cooling プロセスを知ることが目標
- ❖ PACS, SPIREのマップ、FIR微細構造線 ([CII]158, [OI]63, [OI]145, [OIII]88, [NIII]57, [NII]122, [NII]205)、およびSPIRE/FTSによるCO (J=4→3 to 13→12), [NII]205, [CI]370, [CI]609を取得。
- ❖ サンプル選び、サンプル銀河の性質、観測戦略、各波長データの説明
- ❖ 結果の例もあわせて示す。【田村：今後さらに成果が出る？】

[OIII]88?

- ❖ [OIII]88
 - ❖ 8つの明るいFIR fine-structure lineのうちひとつ (cf. [CII]158, [NII]122,205, [NIII]57, [OI]63,146, [OIII]88,52)
 - ❖ ISO で88個の近傍銀河を観測し、75%で検出。[CII]158, [OI]63 に並んで 2-3番目に強い。~10%では最も強い。L[OIII]88 / LFIR = 0.03%–2% (median: 0.15%)
 - ❖ O++を作るには35eV photon ($T_{\text{eff}} > 36000\text{K}$) が必要。簡単に励起 (level: 164 K, critical density: 510 cm^{-3})するので、電離ガスの温度には insensitive。
 - ❖ ちなみに [OIII]5007Å は AGN NLR で一番明るい可視輝線