

サブミリ波銀河は 原始クエーサーの母銀河か？

田村 陽一（東京大学 天文学教育研究センター）

泉 拓磨, 河野 孝太郎, 斎藤 俊貴 (東京大), 長尾 透 (愛媛大), 鶴 剛, 内田 裕之 (京都大)

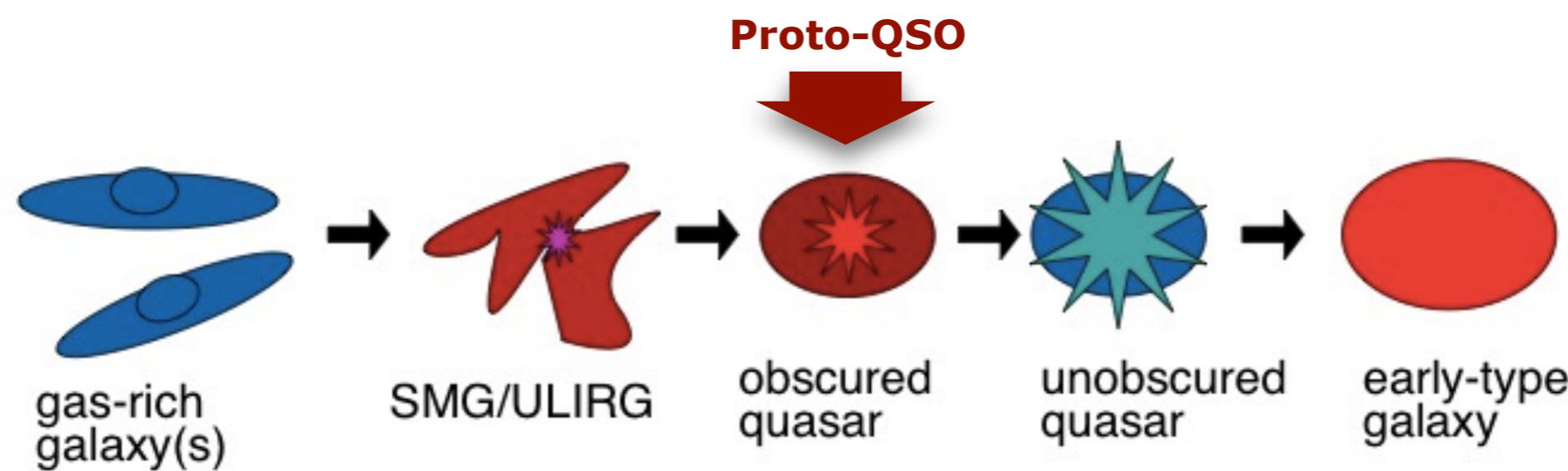
アウトライン

- ・ QSO 直前の段階としてのサブミリ波銀河 (SMG)
- ・ 広域 ($\sim 50\text{deg}^2$) サブミリ波サーベイ SIXER での QSO 研究の展望

「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第2回ワークショップ
筑波大学計算科学研究中心, 3-4 Nov 2014

What drives MBH growth?

- ❖ 星(バルジ)形成と大質量ブラックホールの成長(AGN形成)の関連は深い(Sanders et al. 1988, ApJ, 328, L35)
- ❖ 銀河衝突 → QSO現象
 - ❖ 銀河衝突は、ガスを中心付近に輸送させる“ひき金”(e.g. Di Matteo et al. 2005)
 - ❖ QSOの前段階(proto-QSOs, pre-QSOs)は、大規模な星形成活動をともなう(Kawakatu et al. 2005, 2006, 2007)
 - ❖ Quasarの母銀河にも銀河相互作用の観測的兆候。

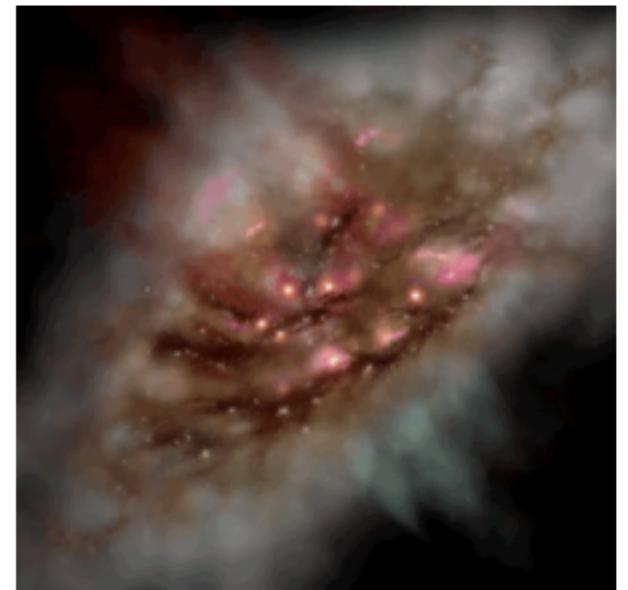
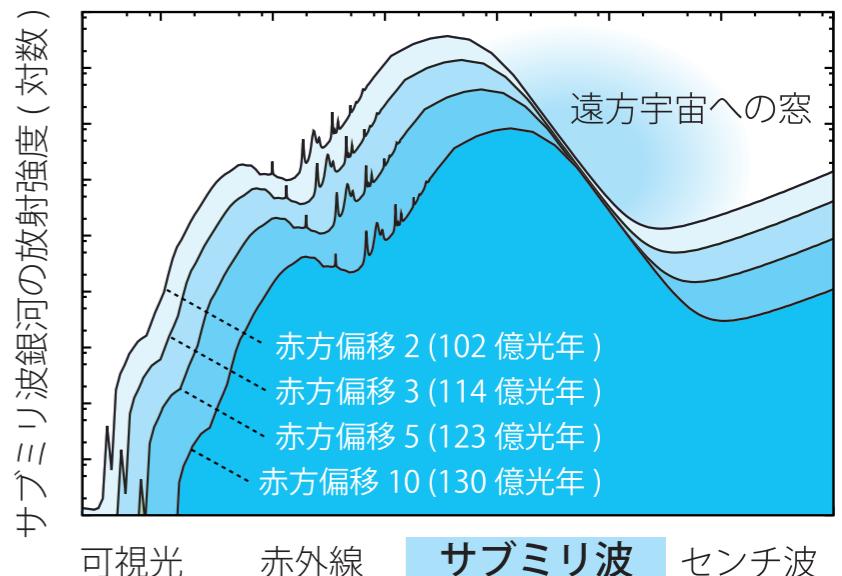


銀河とMBHの進化シナリオ(Alexander & Hickox 2012, NewAR, 56, 93より抜粋.)

Submillimeter galaxies (SMGs)

田村 2009, 天文月報

- ❖ Basic properties
 - ❖ Sub/mm bright ($S_{850\mu\text{m}} > 4 \text{ mJy}$, $S_{1.1\text{mm}} > 2 \text{ mJy}$)
 - ❖ $L_{\text{FIR}} > \sim 4 \times 10^{12} L_{\odot} \Leftrightarrow \text{SFR} > \sim 1000 M_{\odot}/\text{yr}$
 - ❖ **Redshift $< z > = 2.2$** (Chapman+05, ApJ, 622, 772)
 - ❖ **Progenitors of massive ellipticals**
 - ❖ Stellar mass $< M_{\text{star}} > = 2 \times 10^{11} M_{\odot}$ (Borys+05, ApJ, 635, 853)
 - ❖ Massive gas reservoir (Greve+05, MN, 359, 1165; Tacconi+06, ApJ, 640, 228)
 - ❖ High dynamical mass (Swinbank+06, ApJ, 617, 64; Greve+05)
 - ❖ SF is driven by **Major-merger** (Tacconi+08, ApJ, 680, 246)
 - ❖ Hosted by massive dark halos ($\sim 10^{12}\text{-}10^{13} M_{\odot}$)
- ❖ Open questions on the SMG-AGN/QSO connection
 - ❖ **At the rapid coevolution phase of MBHs and hosts?**
 - ❖ **What powers SMGs (AGN or SB)?**



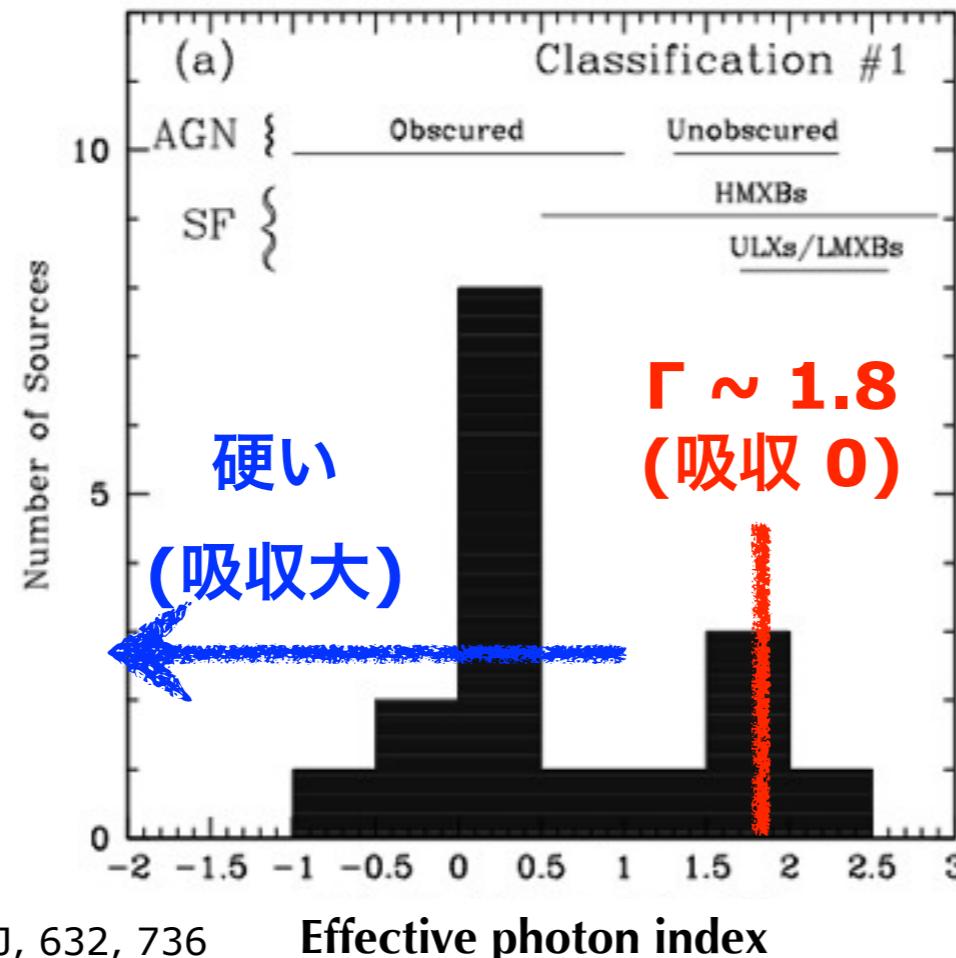
(c) NAOJ

AGNs in SMGs

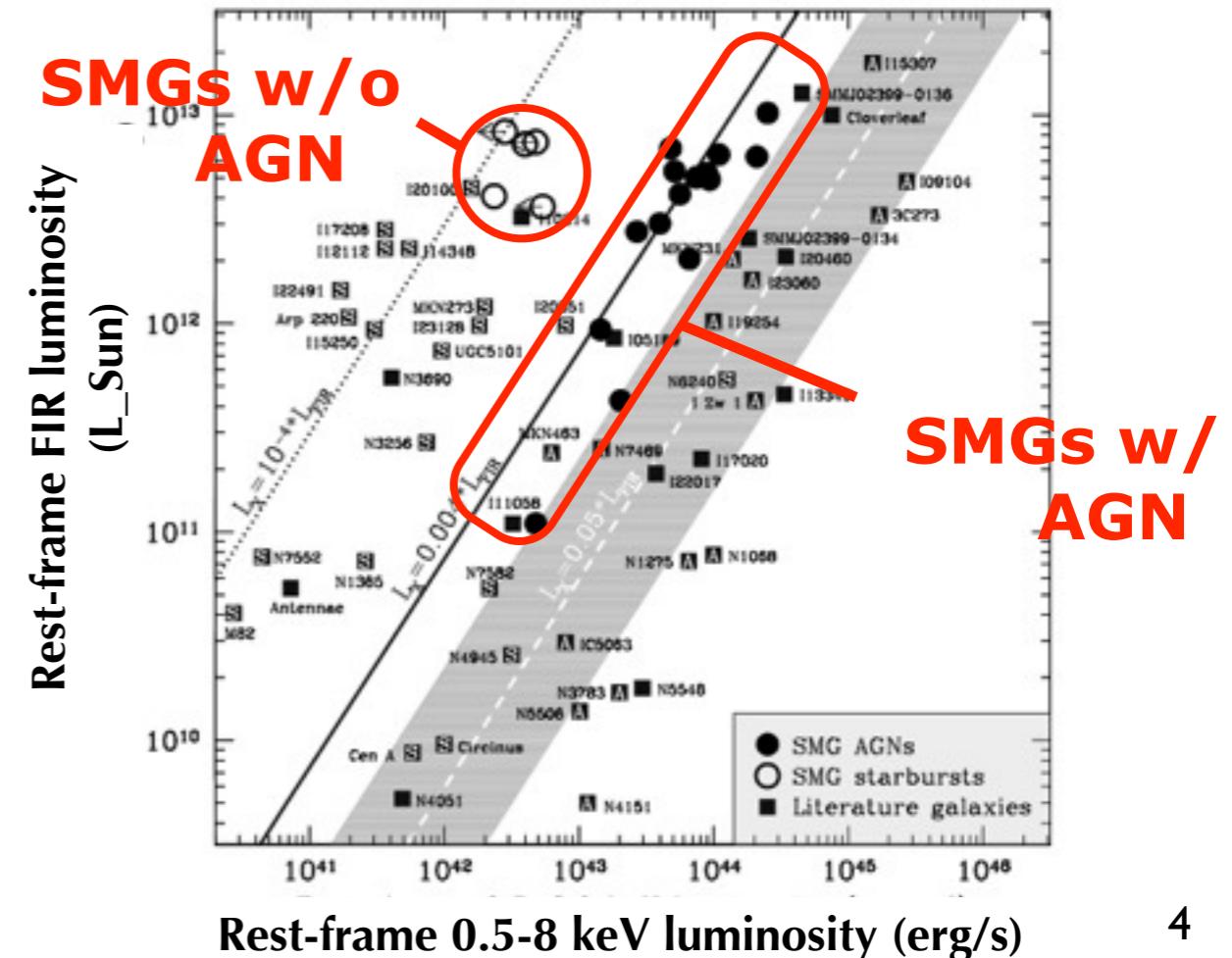
Alexander et al. 2005a, Nature, 434, 738
 Alexander et al. 2005b, ApJ, 632, 736
 Laird et al. 2010, MN, 401, 2763
 Georgantopoulos et al. 2011, A&A, 526, 46
 Johnson, YT et al. 2012, MN, 431, 662

- ❖ ~20–50% のSMGがAGNをもつ

- ❖ GOODS-N SMG のうち >38% にAGNが付隨. (cf. 同時代の銀河: 3-15%) (Alexander05b)
- ❖ AGN を持つ割合は ~20%. 星形成活動起源のX線ソース (HMXBs) が少なからずコンタミ. ($L_x \sim 10^{42}$ erg/s for SFR = 1000 Mo/yr; Laird+10; Johnson, YT+12)
- ❖ Obscured AGN が多い ($N_H > \sim 10^{22-23} \text{ cm}^{-2}$). ただし Compton-thick はきわめて稀. (Laird+10; Georgantopoulos+11; Johnson, YT+12)
- ❖ (ある L_x に対して) QSO よりも L_{FIR} が大きい → **SB-dominant**
- ❖ 質量降着率は QSO に及ばない. → **SMG = Pre-quasar?**



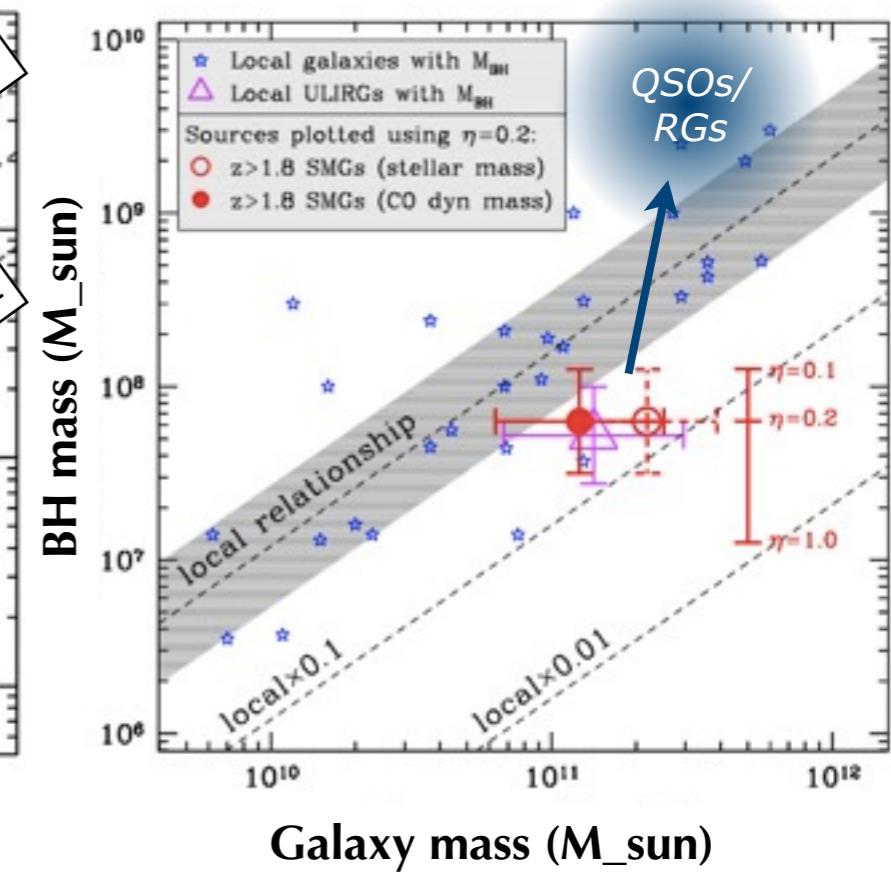
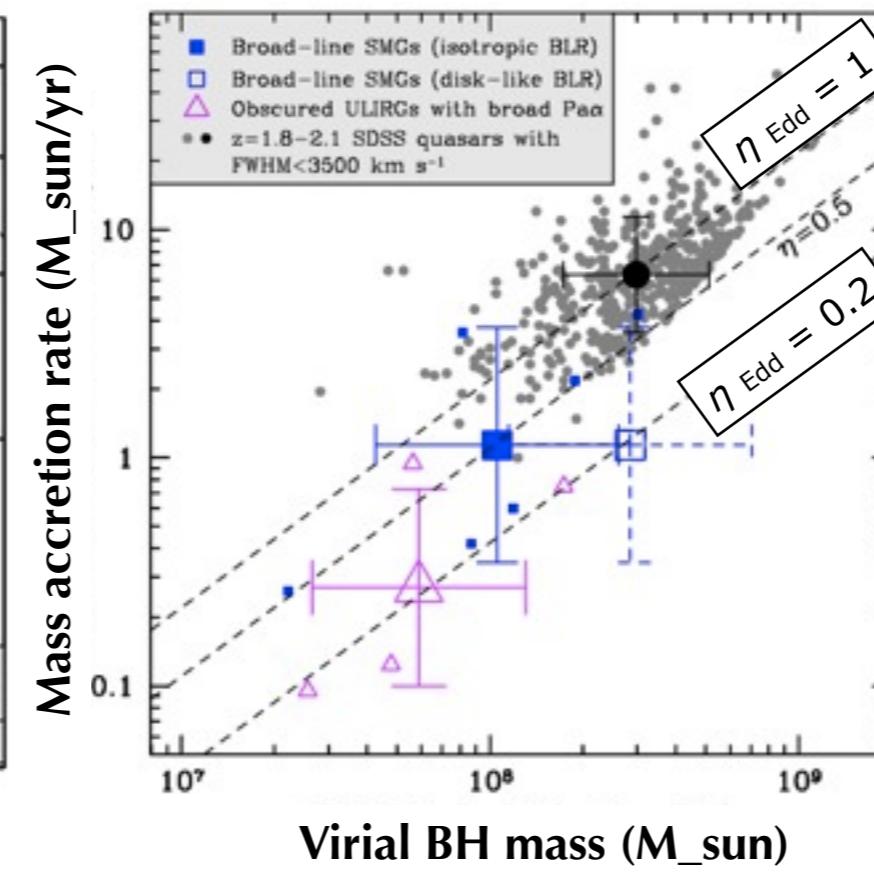
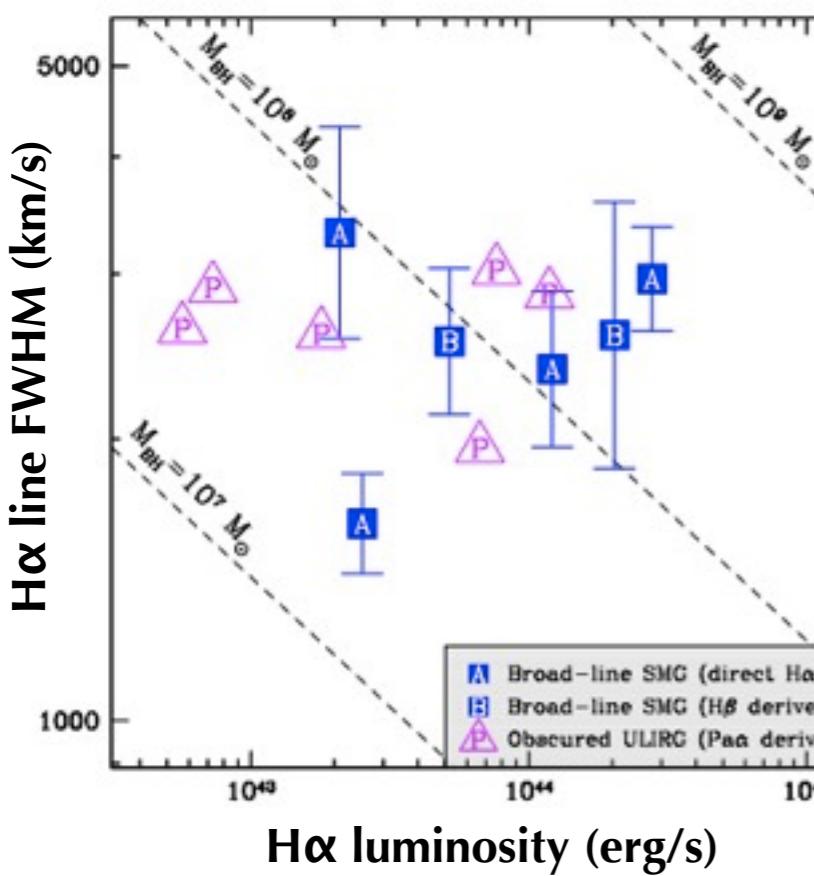
Alexander+05b, ApJ, 632, 736



Weighing MBH in broad-line SMGs

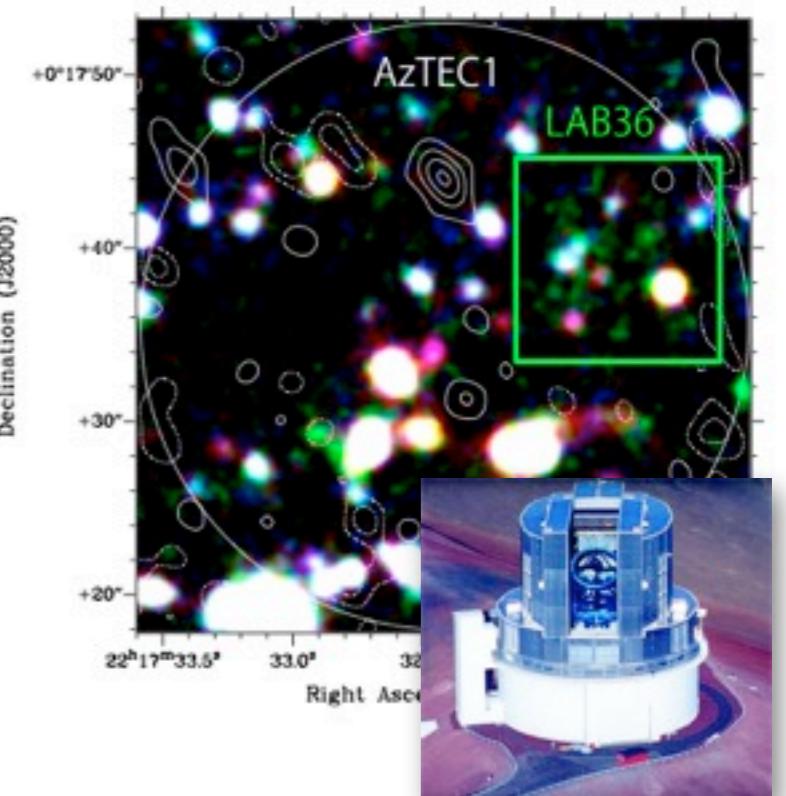
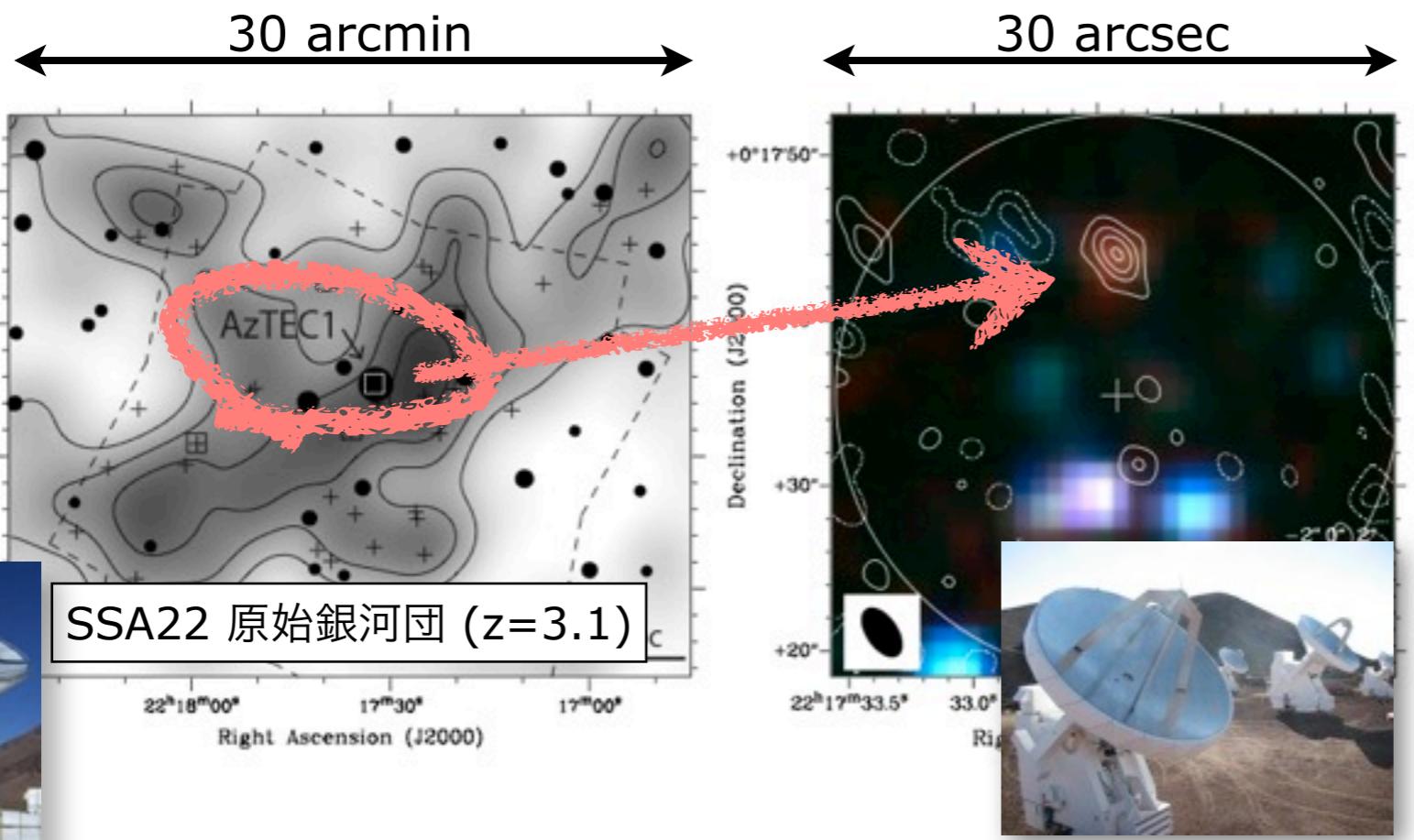
Alexander+08, AJ, 135, 1968

- ❖ 可視 BLR 輝線による BH 質量測定.
- ❖ Eddington 比は、比較的高い ($\eta_{\text{Edd}} = 0.2-0.5$).
- ❖ $M_{\star}-M_{\text{BH}}$ 関係 (local より小さい) からは、成長途上の MBH を示唆.

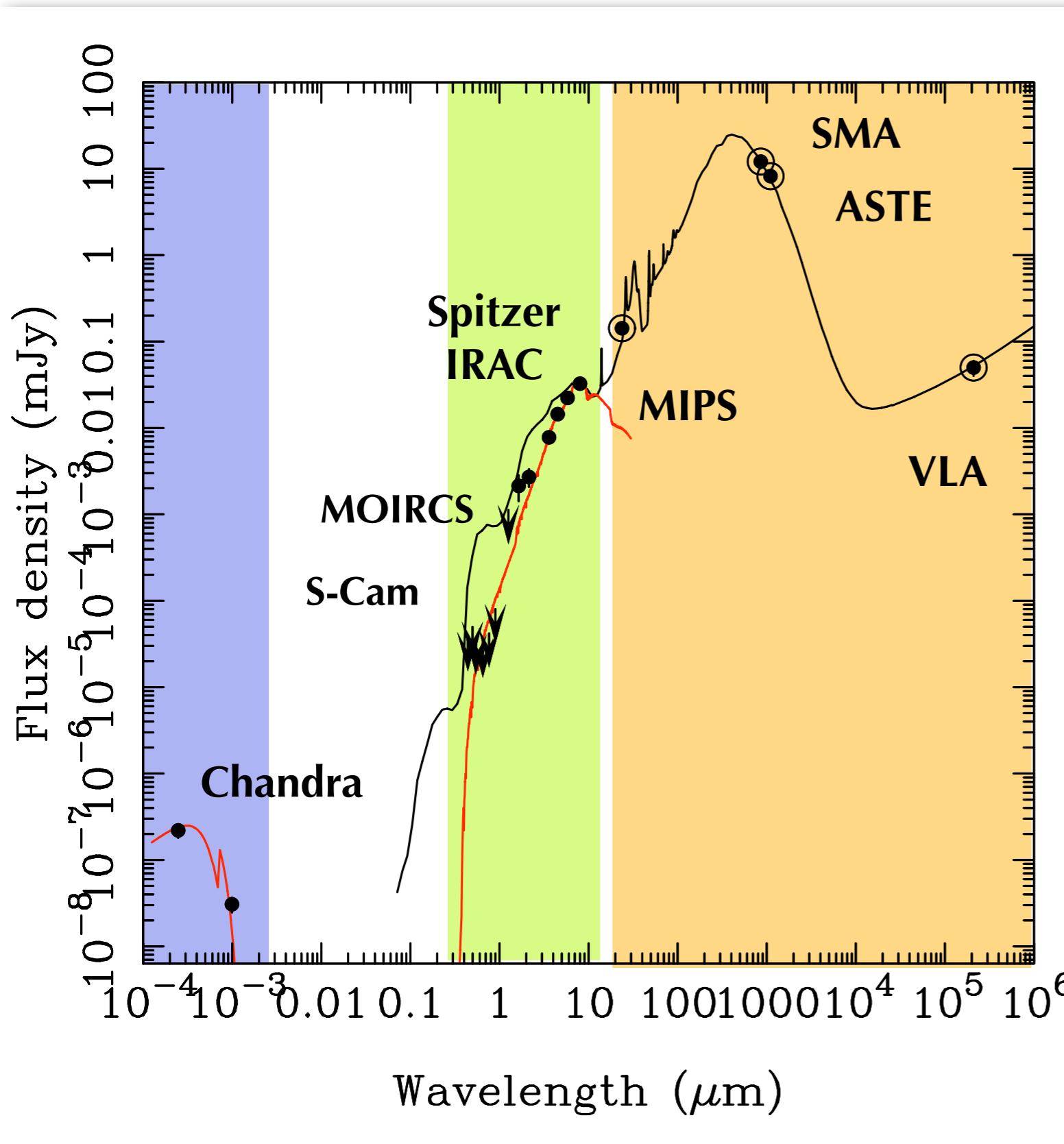


SSA22-AzTEC1: A proto-QSO in a proto-cluster?

- ❖ SSA22-AzTEC1: SSA22原始銀河団 ($z=3.09$) で最も明るいSMG
 - ❖ 原始銀河団に付随 ($z_{\text{photo}} \sim 3.1$)
 - ❖ 埋もれたSMBH ($L_x \sim 10^{44.5} \text{ erg/s}$) → Proto-QSO!?

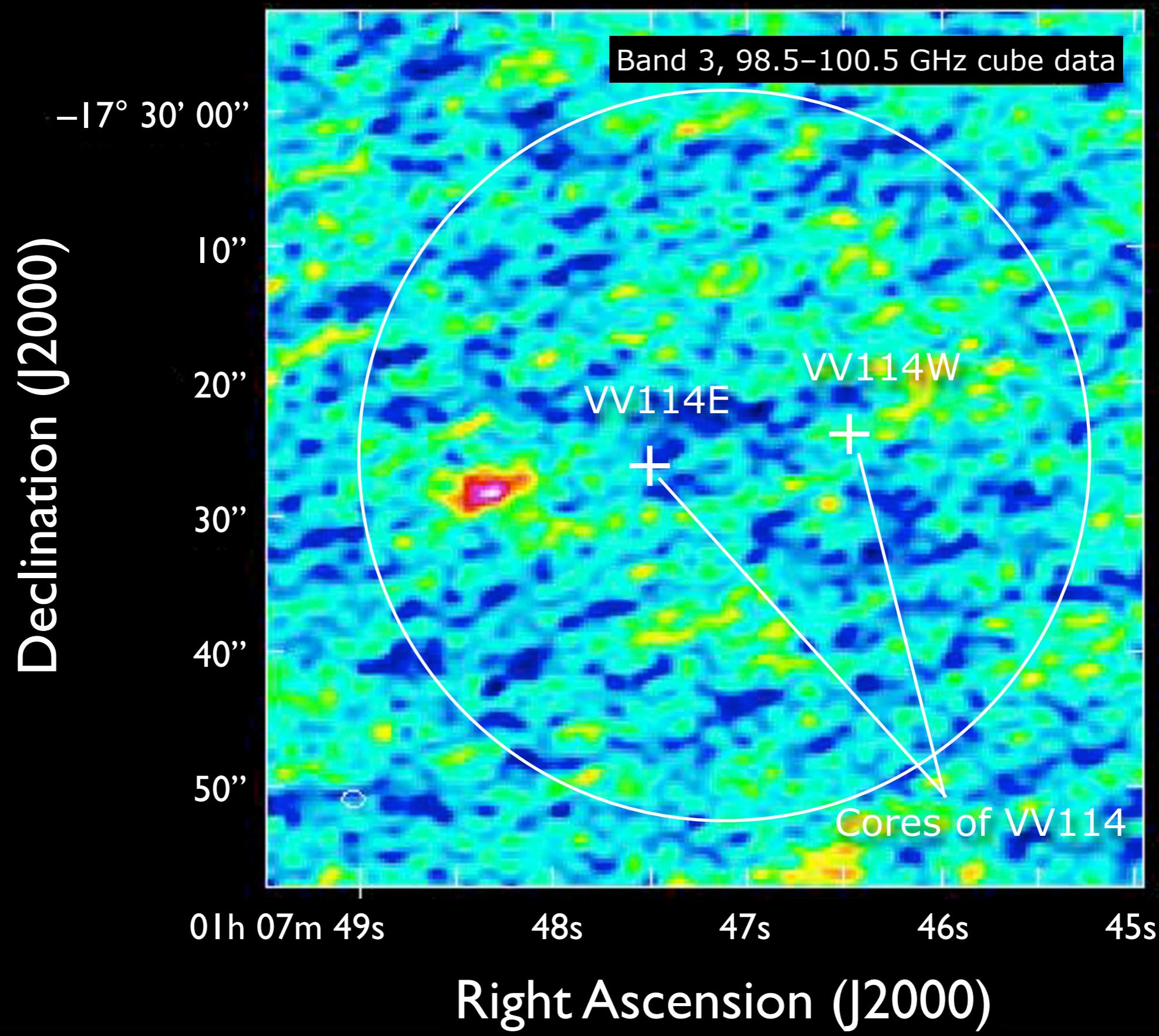


SSA22-AzTEC1: A proto-QSO in a proto-cluster?

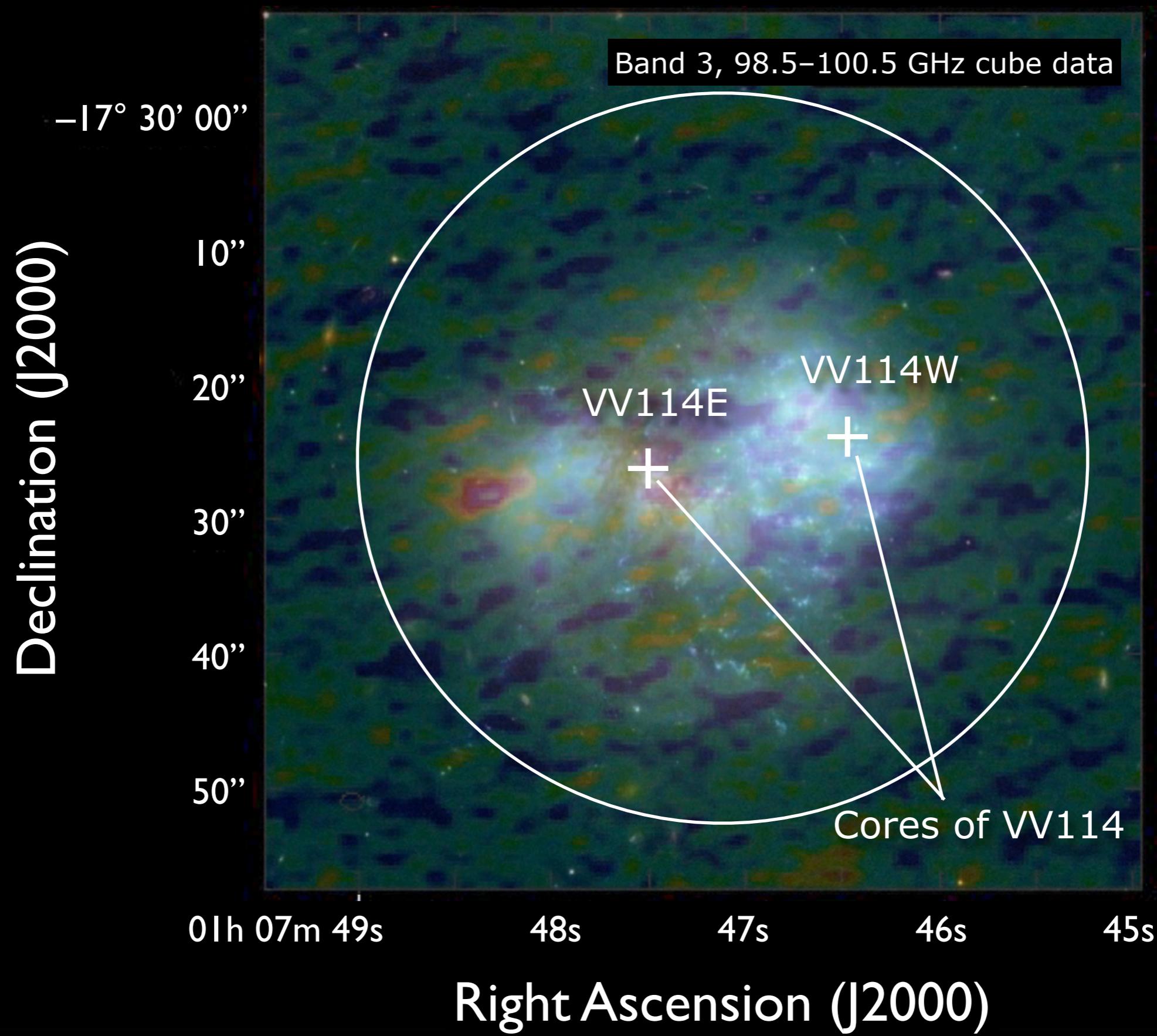


- ❖ $\lambda > 10 \mu\text{m}$ では、dusty な SED ($z = 3.1$) と consistent.
- ❖ 星成分は、 $\text{Av} \sim 3.4$, $M_\star = 10^{10.9} \text{ M}_\odot$
- ❖ X 線スペクトル診断
 - ❖ $N_\text{H} \sim 1 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$
 - ❖ $L(0.5\text{-}8\text{kev}) \sim 3 \times 10^{44} \text{ erg/s}$
- ❖ 銀河の“熱源”的診断
 - ❖ $L_{\text{FIR}} = 2 \times 10^{13} \text{ L}_\odot$
 - ❖ $L_{\text{bol}}(\text{AGN}) \sim 2 \times 10^{12} \text{ L}_\odot$
 - ❖ 銀河全体の $\sim 10\% \rightarrow$
- Starburst-dominant**

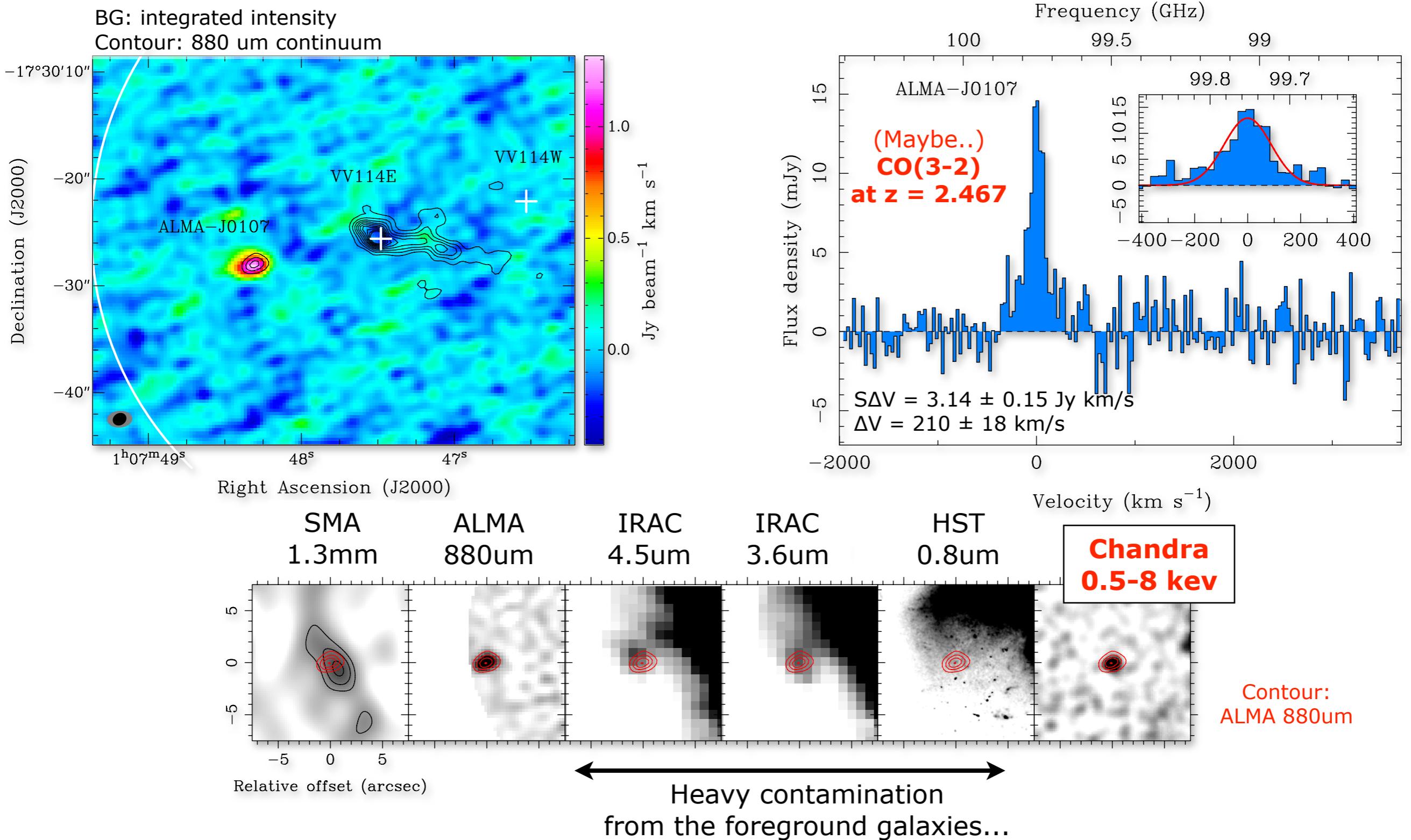
ALMA J0107: CO-selected X-ray bright SMG



ALMA J0107: CO-selected X-ray bright SMG

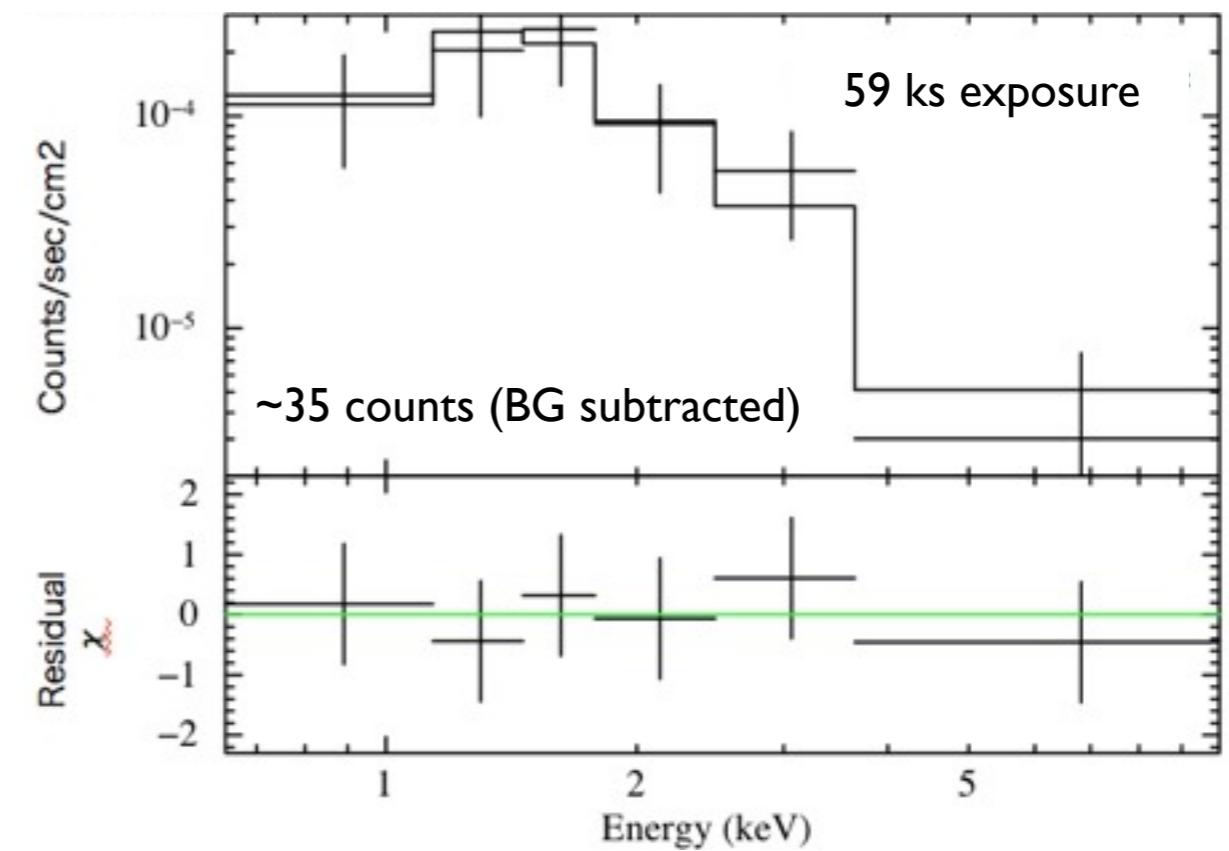
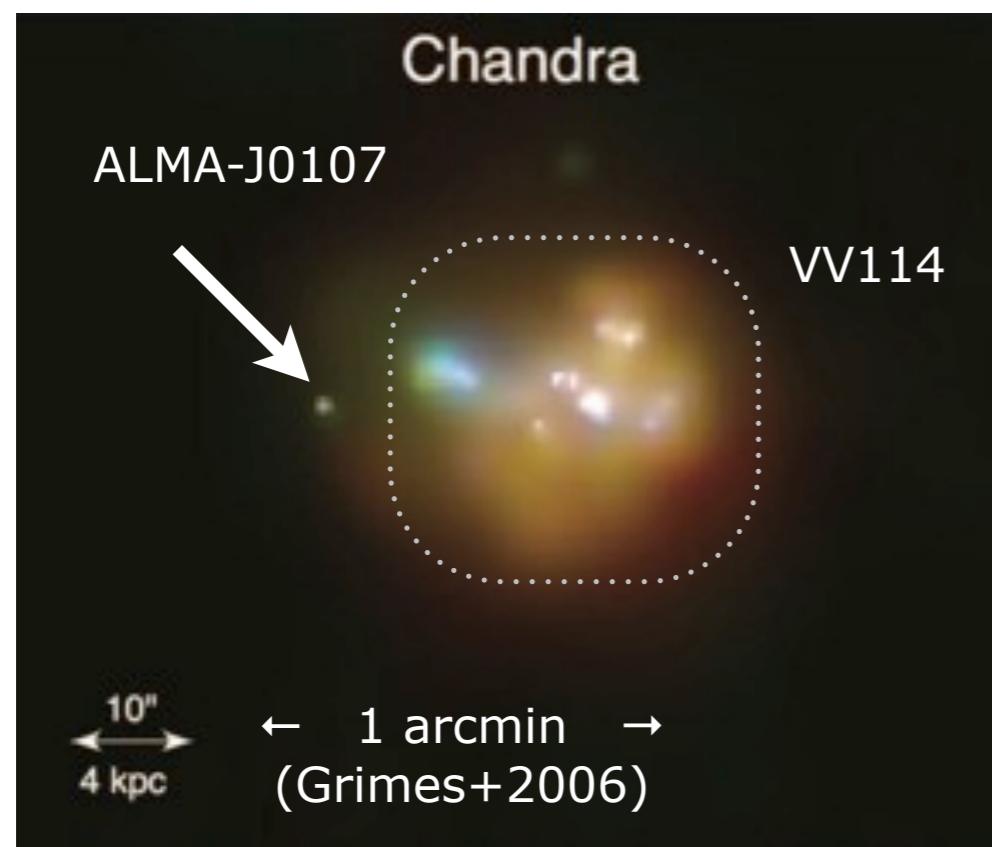


ALMA J0107: CO-selected X-ray bright SMG



X-Ray Analysis: What powers ALMA J0107?

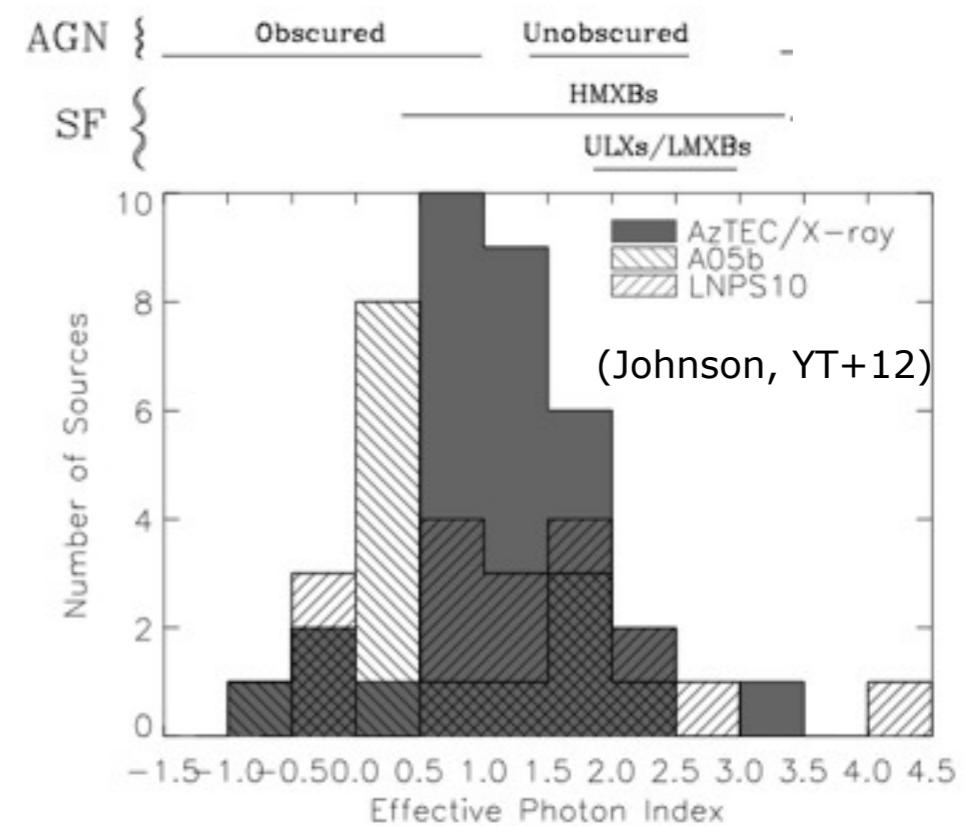
- ❖ Spectral modeling
 - ❖ Chandra/ACIS-I data (Grimes+2006)
 - ❖ $L_x \sim 1 \times 10^{43} \text{ erg/s}$, $N_h \sim 2 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ (if assuming $z = 2.47$)
- ❖ AGN Bolometric luminosity $\sim 10^{12} L_{\text{Sun}}$. (Up to 30% of the host luminosity) → **The host is powered by SF.**
- ❖ $M_{\text{BH}} \sim (0.1-5) \times 10^8 (0.2 / \eta_{\text{Edd}}) M_{\text{Sun}}$ (cf. SMG: $\eta_{\text{Edd}} \sim 0.2-0.6$; Alexander +08)



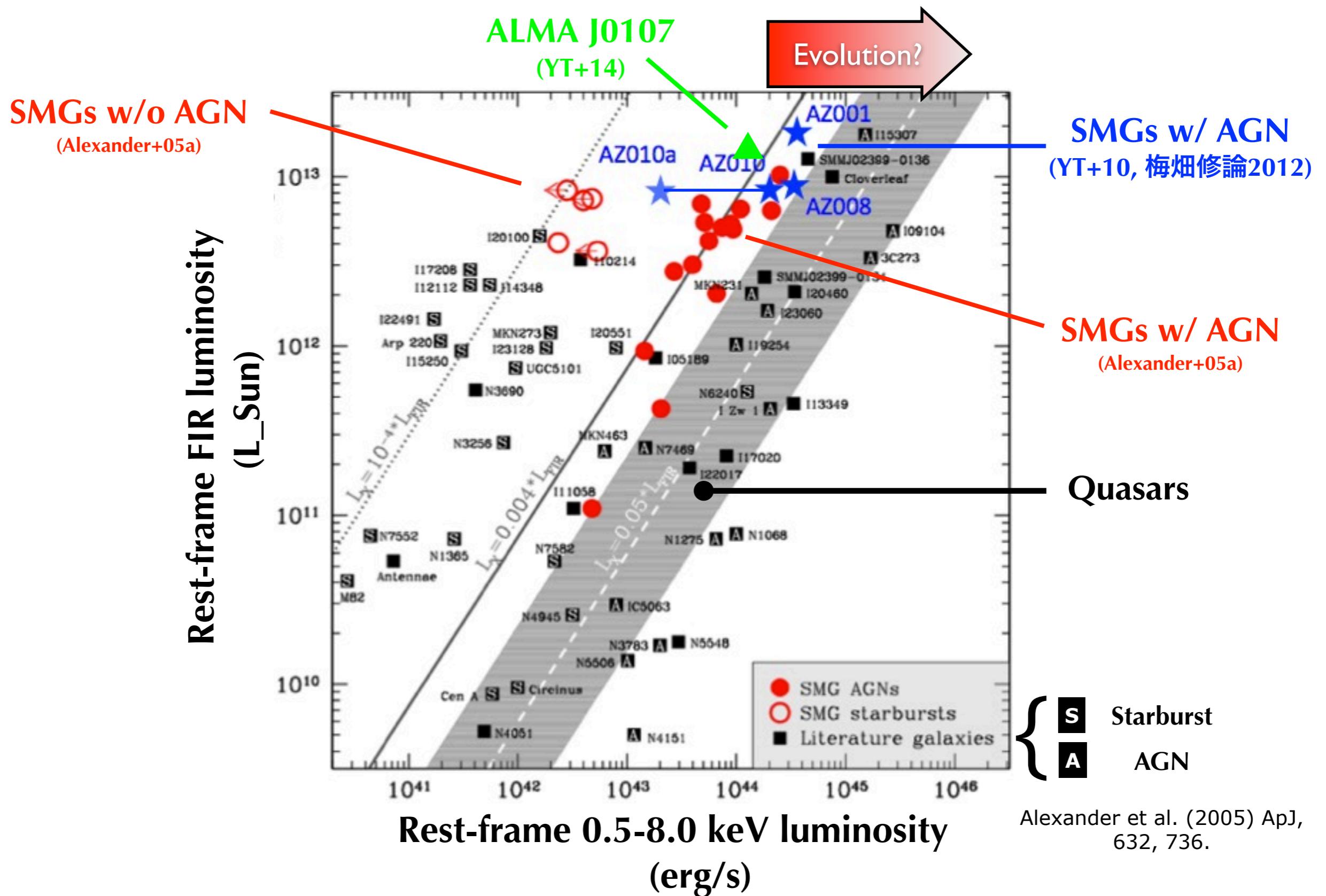
AGNs in X-ray faint SMGs

Laird et al. 2010, MN, 401, 2763
Georgantopoulos et al. 2011, A&A, 526, 46
Johnson, YT et al. 2012, MN, 431, 662

- ❖ AGN が同定されない SMG の性質
 - ❖ じつは Compton-thick AGN が埋もれている可能性は？ → 少ない
 - ❖ X 線未検出の SMG のスタッキング解析から、soft なX線検出.
 - ❖ Compton-thick AGN はない. (Laird +10; Georgantopoulos+11)
 - ❖ SMG には、MBH 成長に関連する大質量形成銀河 (merger-driven?) と、episodic な SB を経験しているだけの星形成銀河 (secular evolution / cold accretion?) の 2 通り存在する?
(Johnson, YT+12)



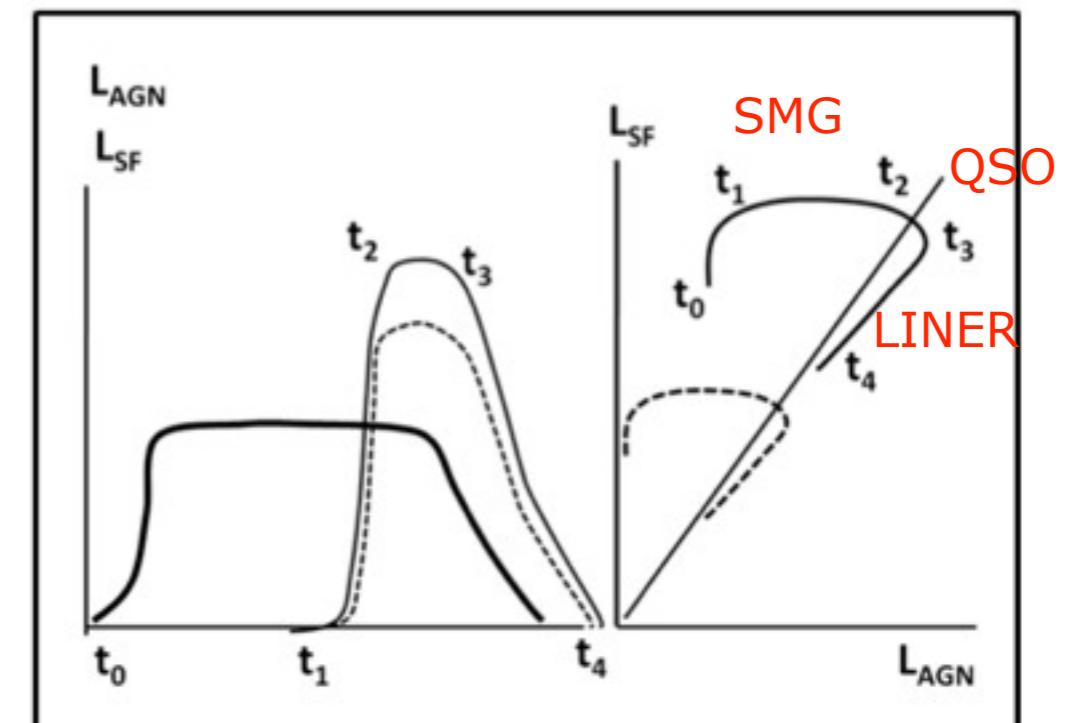
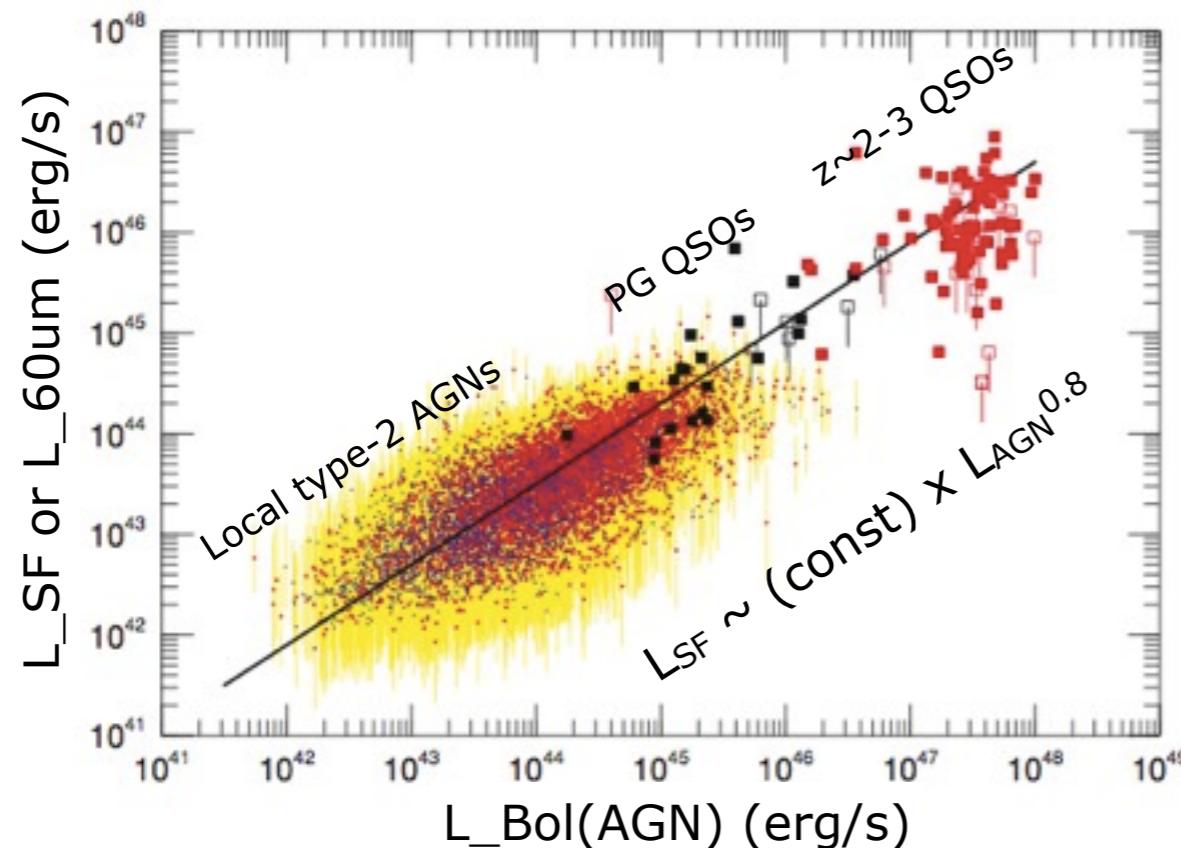
“微分型” マゴリアン関係： L_X vs. L_{FIR}



Alexander et al. (2005) ApJ, 632, 736.

“微分型” マゴリアン関係 (local universe)

Netzer 2009, MN, 399, 1907



- ❖ 近傍 AGN luminosity と 星形成 luminosity (それぞれ、BH降着率と星形成率=バルジ質量変化) に 4 枝にわたる相関が見られる
- ❖ Parallel growth より少なくとも 6x 速い。→ AGN の duty cycle が存在

$$\text{Parallel growth : } \int \frac{\dot{M}_{\text{BH}}}{\dot{M}_{\text{bulge}}} dt \simeq \frac{M_{\text{BH}}}{M_{\text{bulge}}} \sim 0.1 - 0.4\%$$

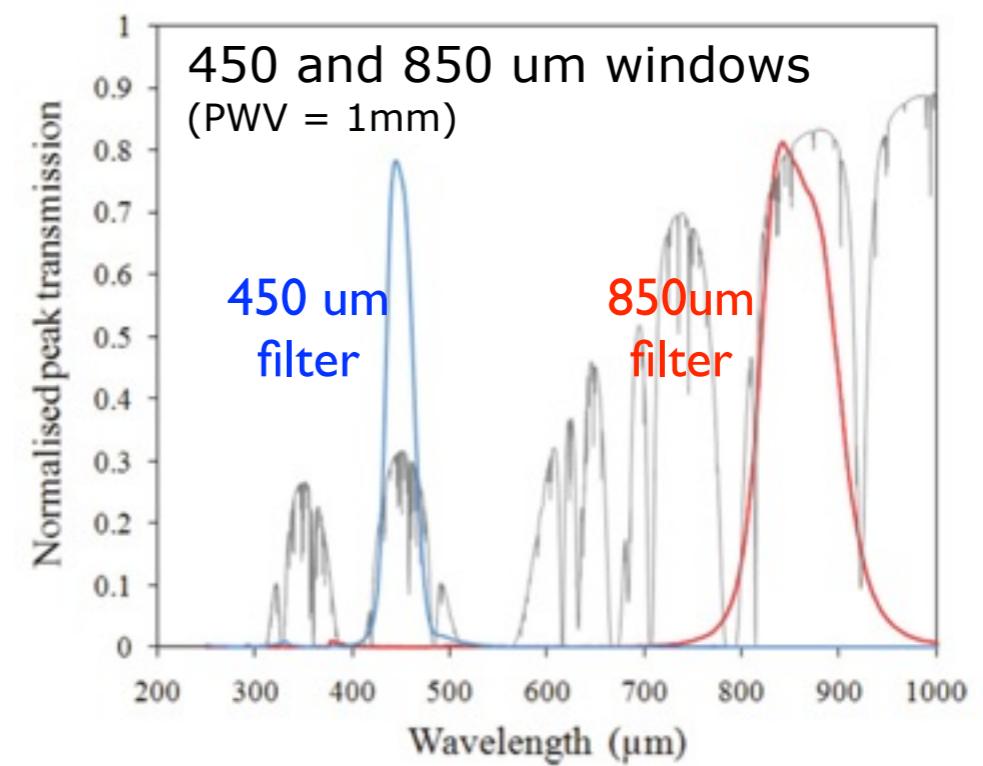
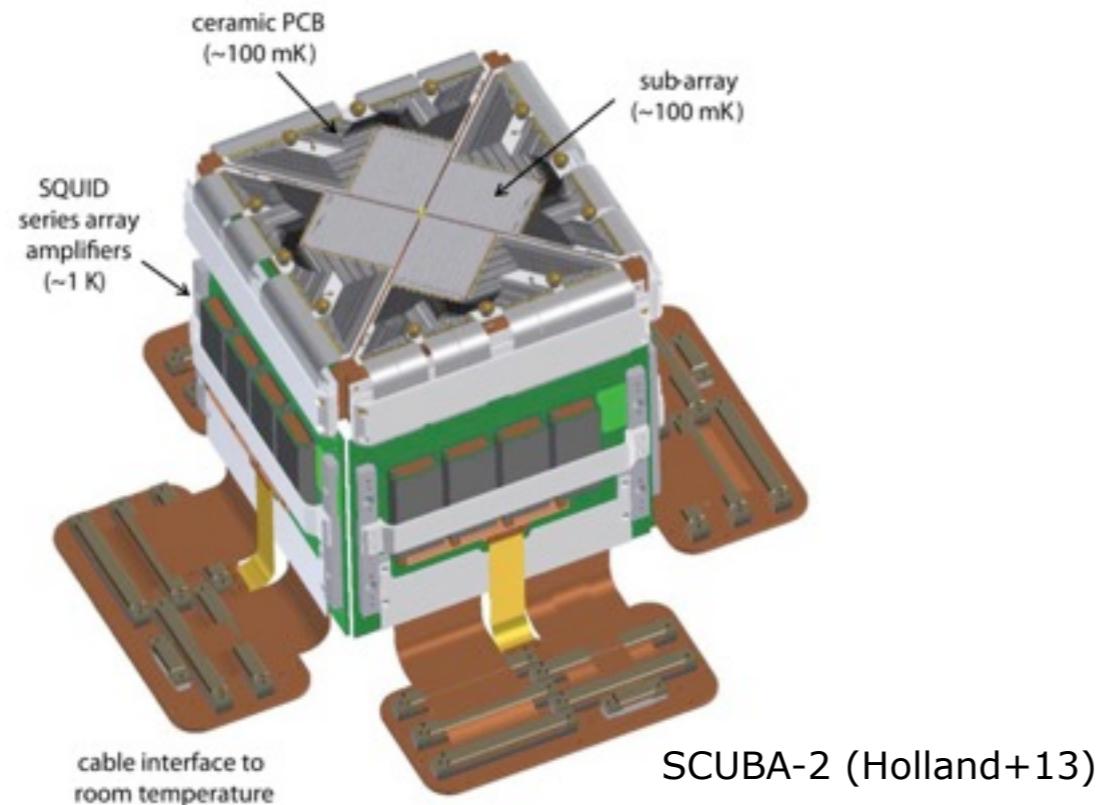
SCUBA-2 Imaging Exploration of the Epoch of Reionization (SIXER)



SCUBA-2 / JCMT

Holland et al. 2013, MN, 430, 2513

- ❖ Submm Common User Bolometer Array 2 (Holland+13)
 - ❖ Large-format bolometer array camera using TES + SQUID technologies, installed on JCMT 15m
 - ❖ Simultaneous **450 and 850 um** observations with **5120 pix** each + dichroic filter (yield $\sim 70\%$)
 - ❖ FoV: **45 arcmin²** each
 - ❖ θ_{HPBW} : **8" (450um)** and **13" (850um)**
 - ❖ $\Omega_{850\text{um}} = 1/6$ of SPT, 1/4 of AzTEC/ASTE
 - ❖ Well-constructed, **user-friendly** reduction software suite (SMURF) and pipelines are available



Mapping speed (MS)

- ❖ SCUBA-2 is one of the most sensitive camera, but AMKID is coming online.
- ❖ A well-organized/designed survey that **completes quickly** is important.

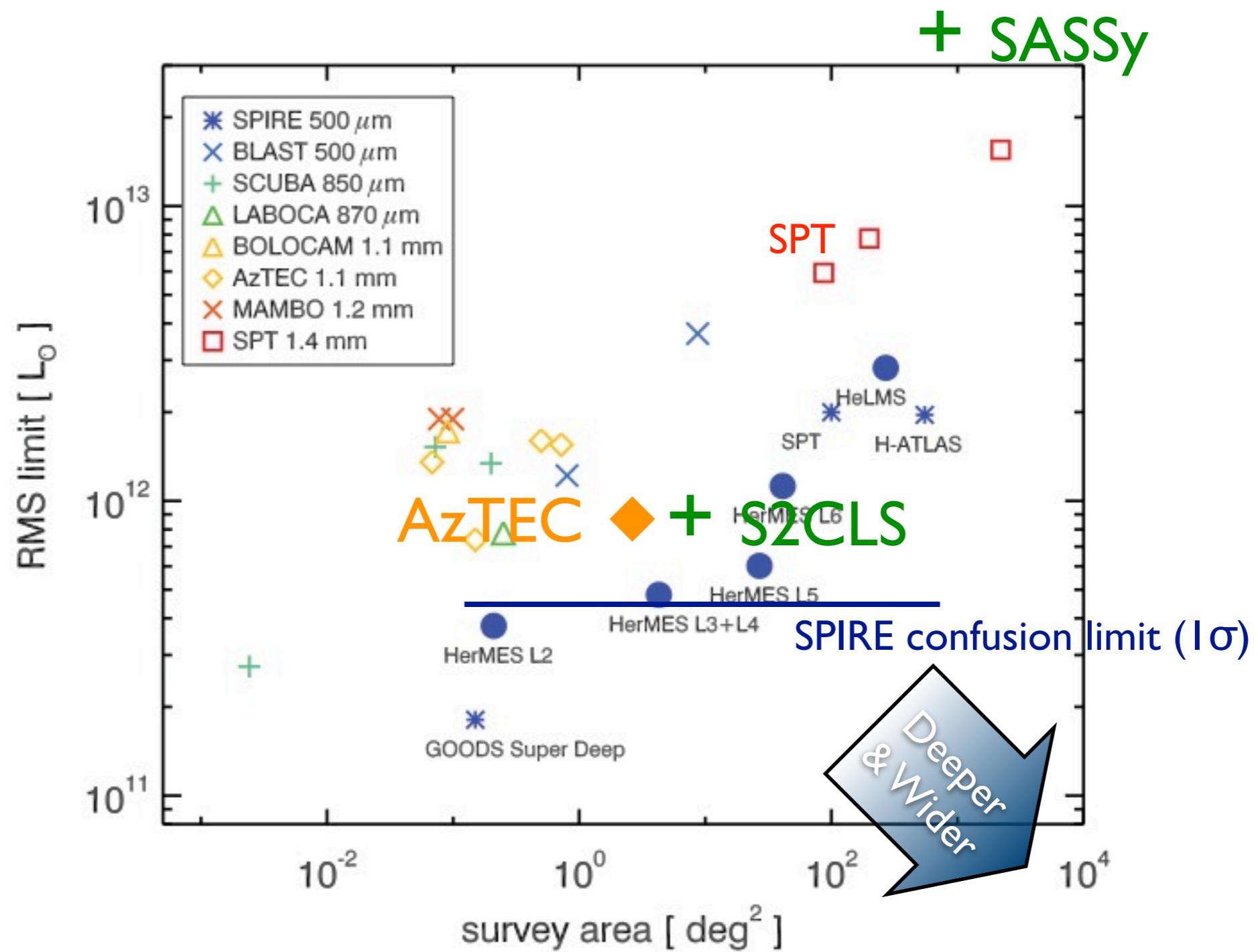
Instrument	Wavelength	# of Pixels	MS (\square' /hr/mJy 2)	MS@1.1mm $^{\#}$ (\square' /hr/mJy 2)	MS@1.1mm $^{\$}$ (\square' /hr/mJy 2)
SCUBA-2/JCMT	850 um	5000 (nom.)	15*	60*	30*
SCUBA-2/JCMT	450 um	5000 (nom.)	0.2	-	-
AzTEC/ASTE	1.1 mm	110	15	15	15
AzTEC/JCMT	1.1 mm	110	20	20	20
LABOCA/APEX	870 um	266	3	12	6
GISMO/IRAM	2.0 mm	128	20–25	1–1.3	3–4

#) scaled to 1.1 mm by assuming $\alpha = 2.65$ ($S_{1100\text{um}}/S_{850\text{um}} = 0.5$), valid for $z \sim 2\text{-}3$.

\$) scaled to 1.1 mm by assuming $\alpha = 1.5$ ($S_{1100\text{um}}/S_{850\text{um}} = 0.7$), valid for $z \sim 6$.

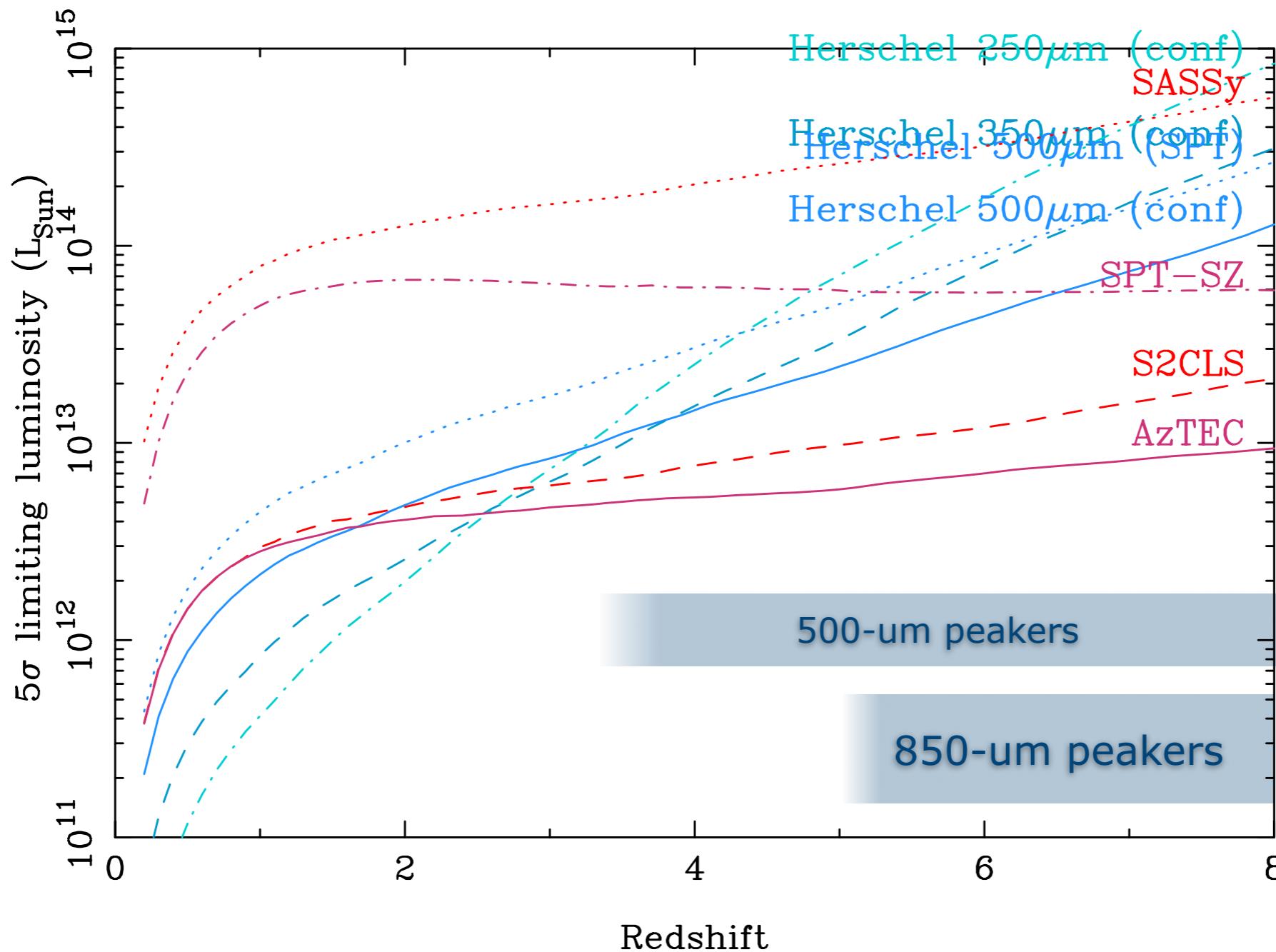
***) Matched-filter is applied. The number is computed under Grade 1-2 weather.**

Limiting L_{FIR} vs survey area at z = 2

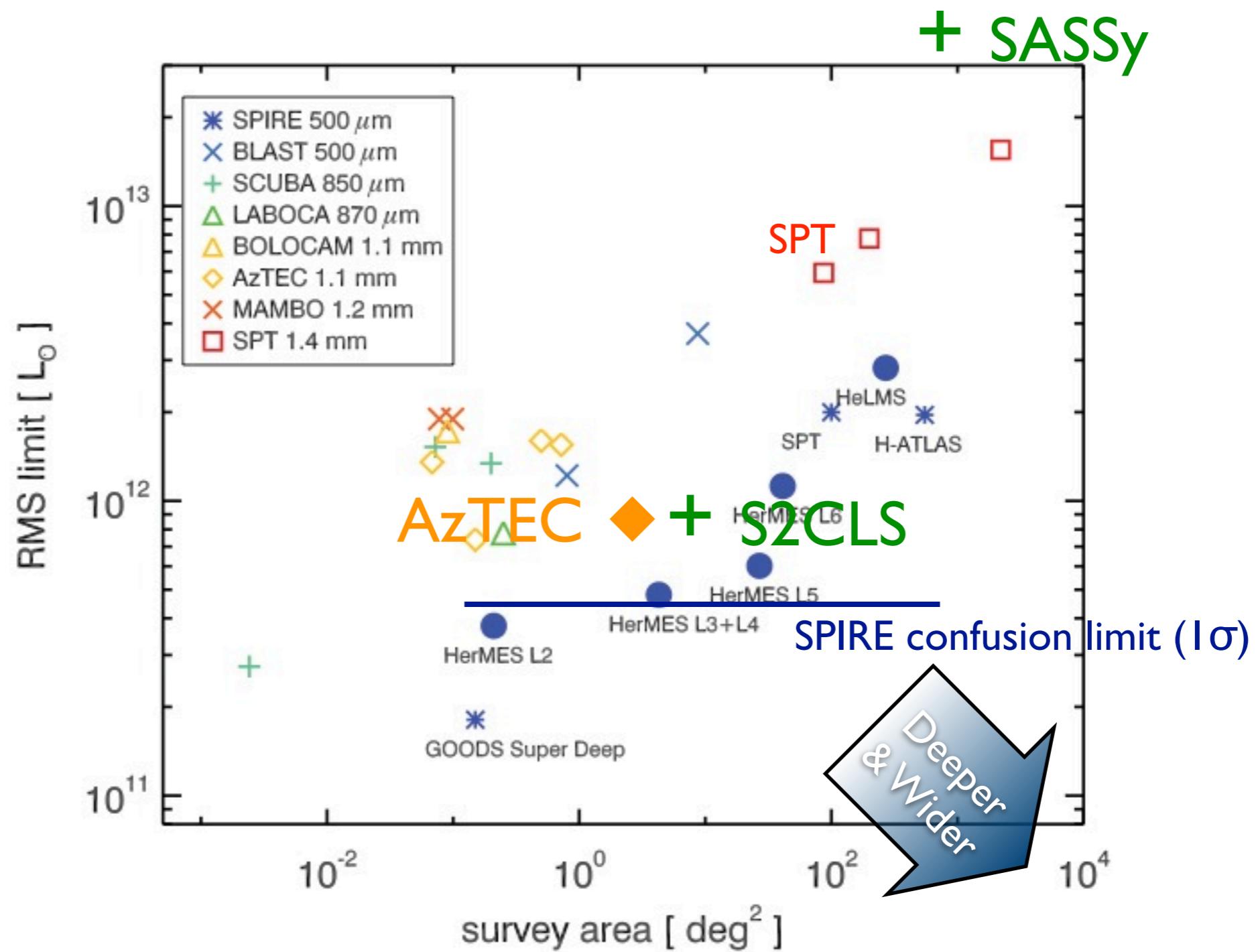


Oliver+2012

5σ limiting FIR luminosity

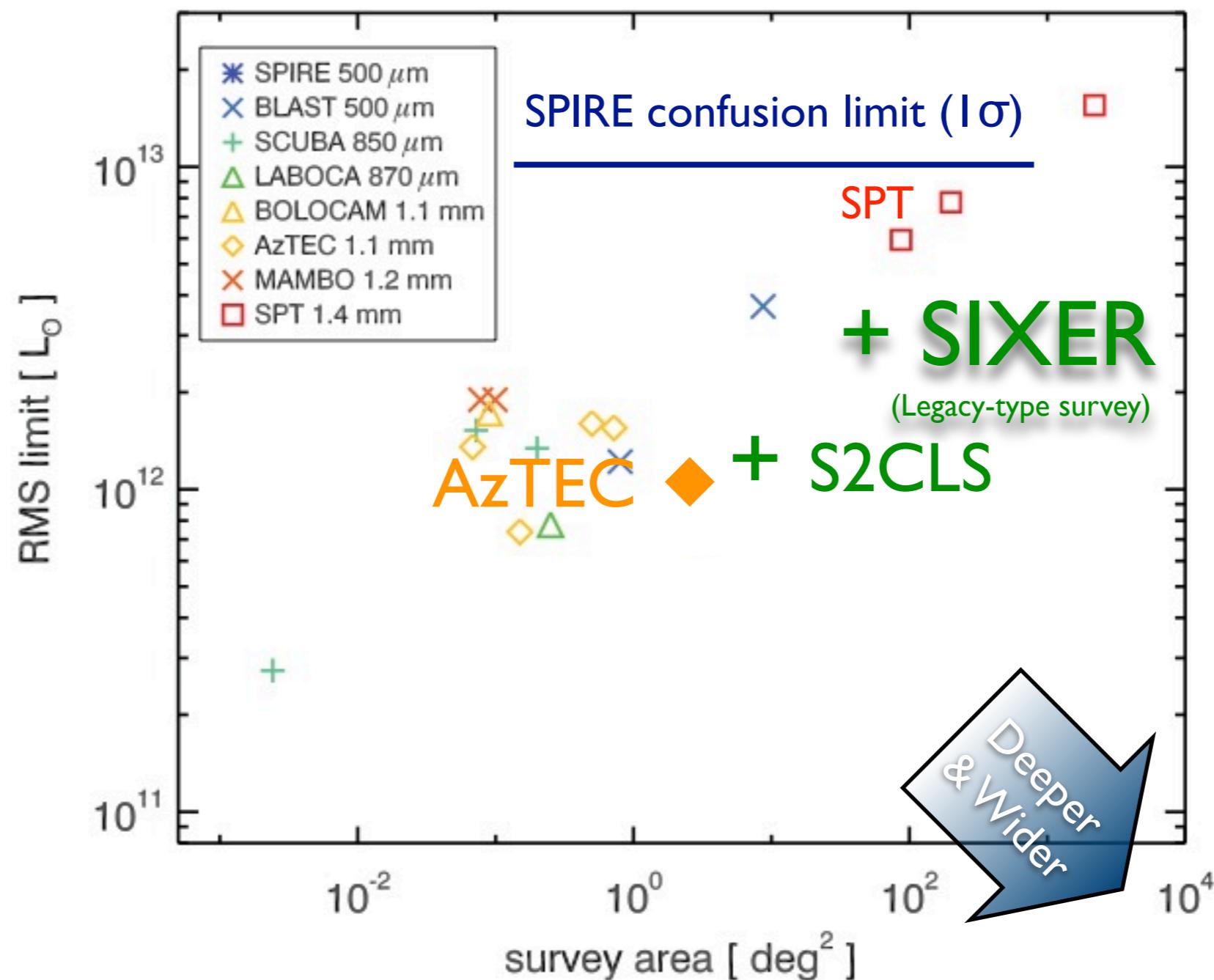


Limiting L_{FIR} vs survey area at z = 2



Oliver+2012

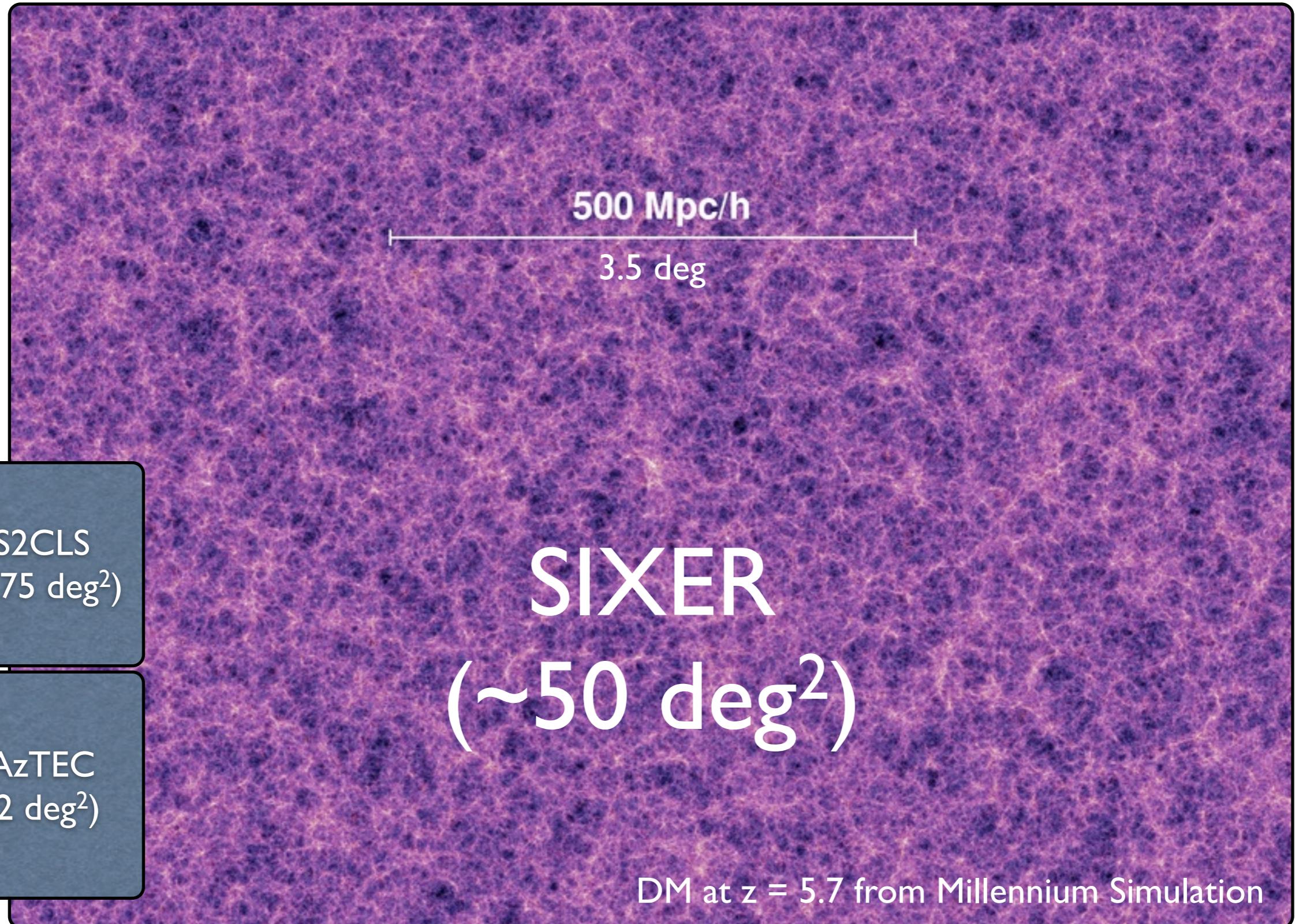
Limiting L_{FIR} vs survey area at $z = 6$



Oliver+2012

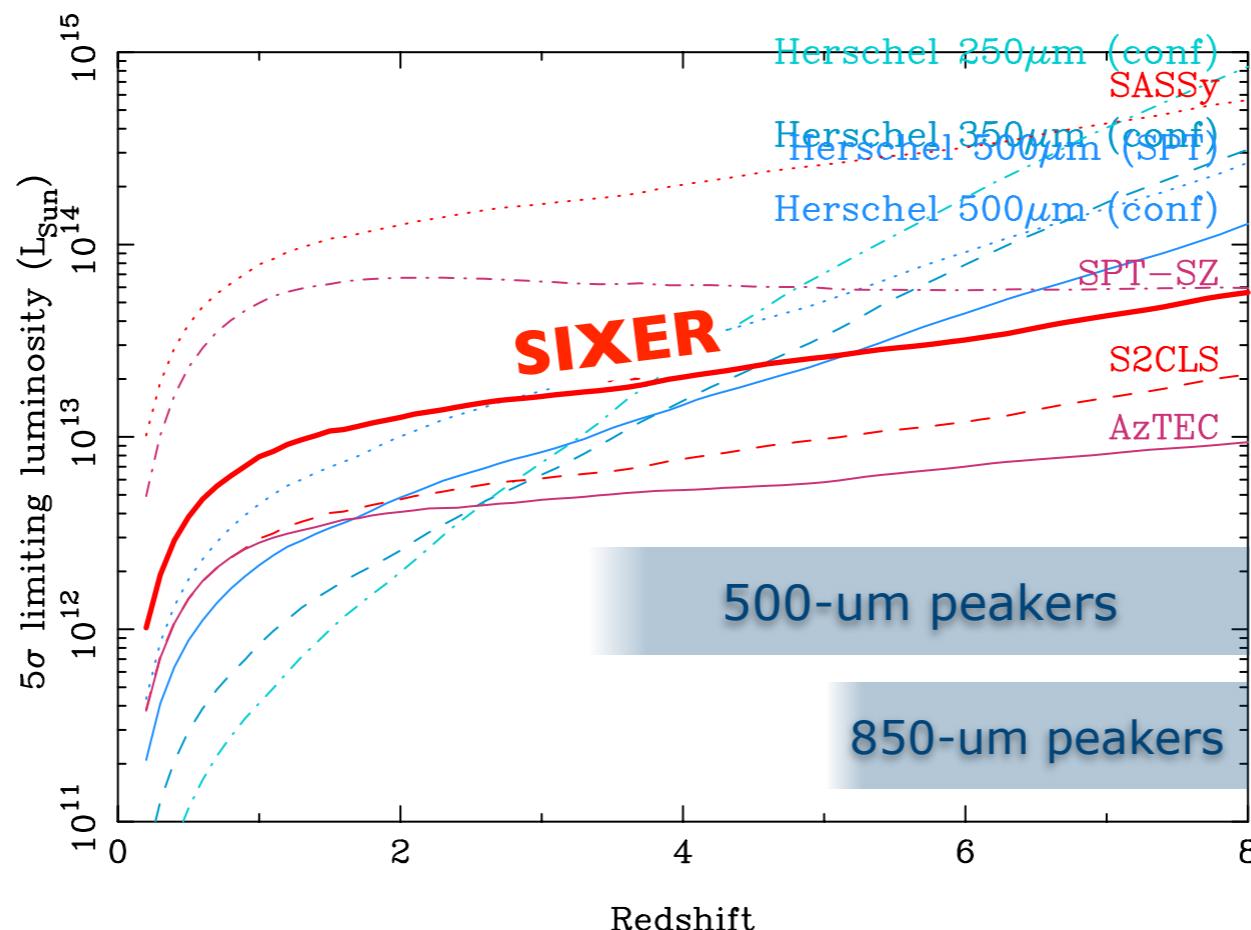
SCUBA-2 Imaging Exploration of the EoR (SIXER)

- ❖ **Survey concept**
 - ❖ Aiming to obtain a **wider (10x)** and **more luminous (3x)** layer than S2CLS.
 - ❖ **"From discoveries to complete follow-up observations"**
- ❖ **Science cases**
 - ❖ **SMGs** - unveiling the redshift distribution of ~ 300 *bright* SMGs (esp. $z > 6$)
 - ❖ **QSOs** - unveiling submm properties of $z > 4$ QSOs (from HSC survey)
 - ❖ **LBGs/LAEs** - unveiling the dust contents of $z > 4$ UV galaxies (HSC survey)
 - ❖ Transients - revealing 100-mJy submm transients (e.g. blazars)
- ❖ **Method/strategy**
 - ❖ will target **bright SMGs ($S_{850} > 20$ mJy)** over **~ 50 deg 2** .
 - ❖ will use **existing Herschel/SPIRE datasets** (HerMES Level 5, $A = 35$ deg 2 , $\sigma_{500\mu\text{m}} \sim 3\text{-}5$ mJy) **to isolate $z > 6$ candidates** using a submm color-color diagram.
 - ❖ (Planned) close collaboration with the **HSC SSP survey**
 - ❖ Wealth of multi- λ data from Spitzer/IRAC, VLA Sky Survey (2015-), etc.
- ❖ **Merits**
 - ❖ **Follow-up is easy!** Will feed flux-limited sample of SMGs for ALMA/ASTE
 - ❖ Less confusion effect, lensing magnification, ...



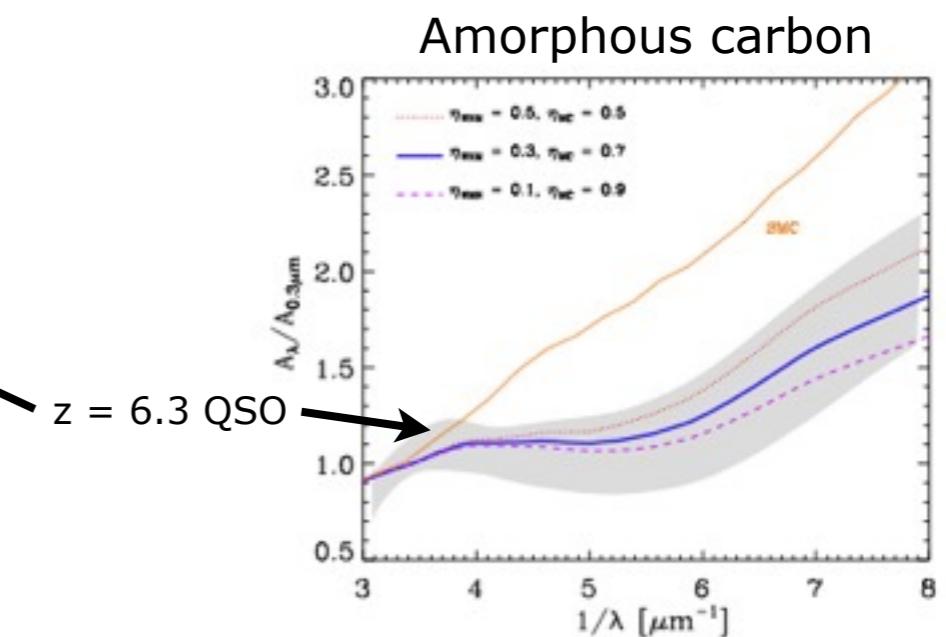
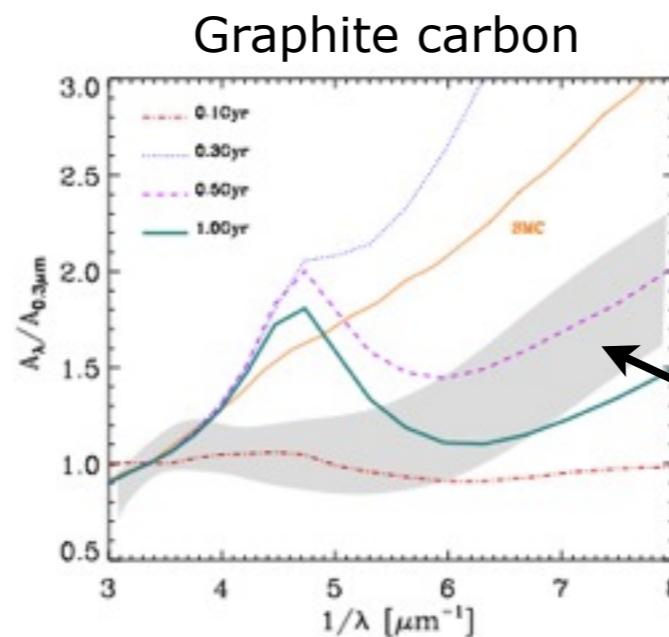
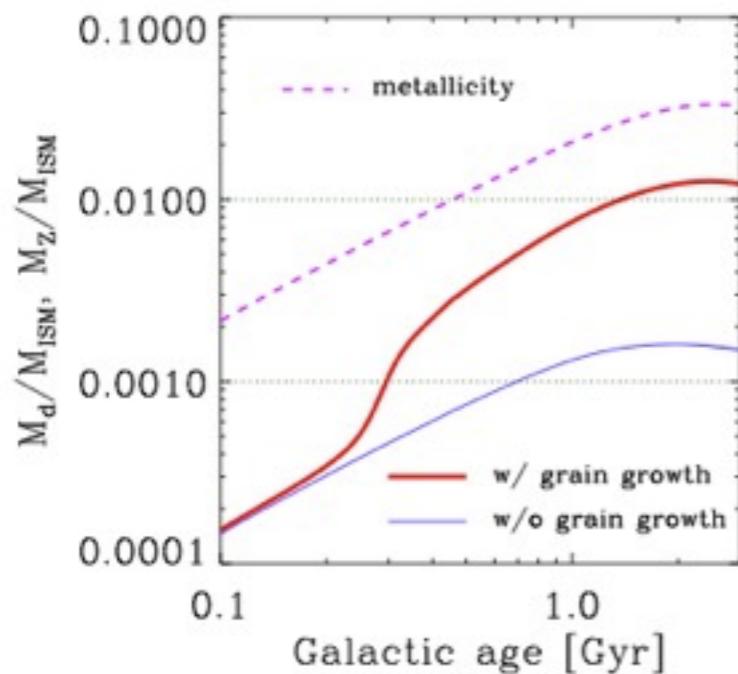
SIXER for QSO studies

- ❖ Exploiting the negative K-correction at 850 μm and the legacy data set from the Herschel survey (HerMES/Level 5), allowing easy detections and SED constraints of low- z ($z < 1$) and distant ($z > 4$) QSO hosts.
- ❖ Wide overlap with the HSC-Deep (27 deg^2) allows **850-um stacking analysis** of HSC quasars/AGNs
 - ❖ ~ 2000 low-luminosity AGNs at $z < 1$, ~ 200 QSOs at $z \sim 4$
 - ❖ Some QSO hosts may individually be detected.



Dust in $z > 5$ QSOs

Nozawa et al. 2014, arXiv:1410.7861



- ❖ 遠方 QSO で大量のダスト ($\sim 10^8$ Msun) が見つかった
 - ❖ Type SNe II で説明しようとすると、巨大な dust yield (~ 0.1 - 1 Msun/SN) が必要
 - ❖ 星間空間中のダスト成長 (shuttering+coagulation) (Asano+13, Nozawa+14)
- ❖ 減光曲線のかたちがちがう？
 - ❖ 分子雲内部で効率的に amorphous carbon を主成分としたダスト成長が生じている (Nozawa+14)

$z > 5$ QSO のダスト質量 + (分子)ガス質量の測定によって検証することが重要 → ALMA, SCUBA-2

2014年10月8日@IoA

SCUBA-2/JCMT survey QSO science検討

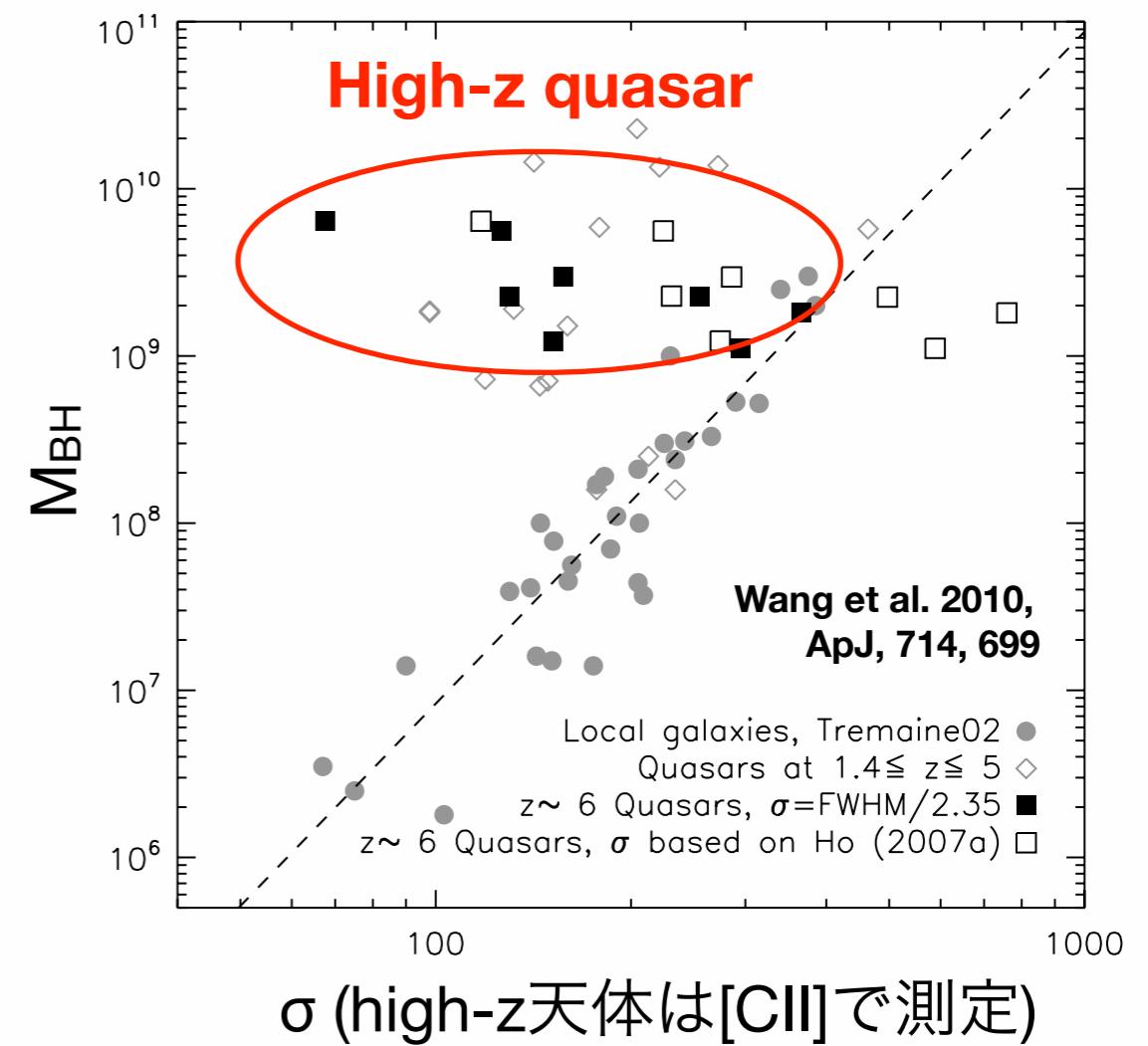
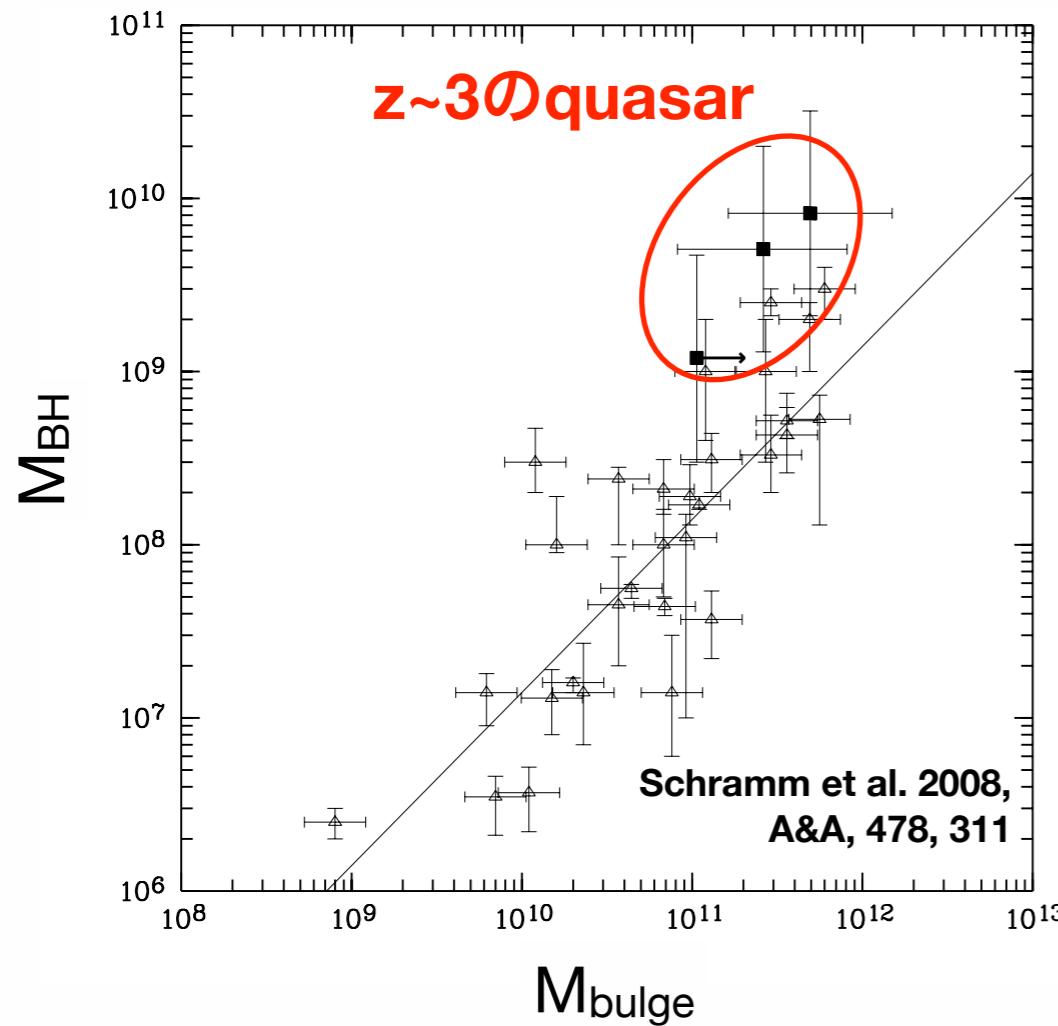
QSO science検討班

(泉拓磨、長尾透)

SMBHは母銀河より先に成長したのか？

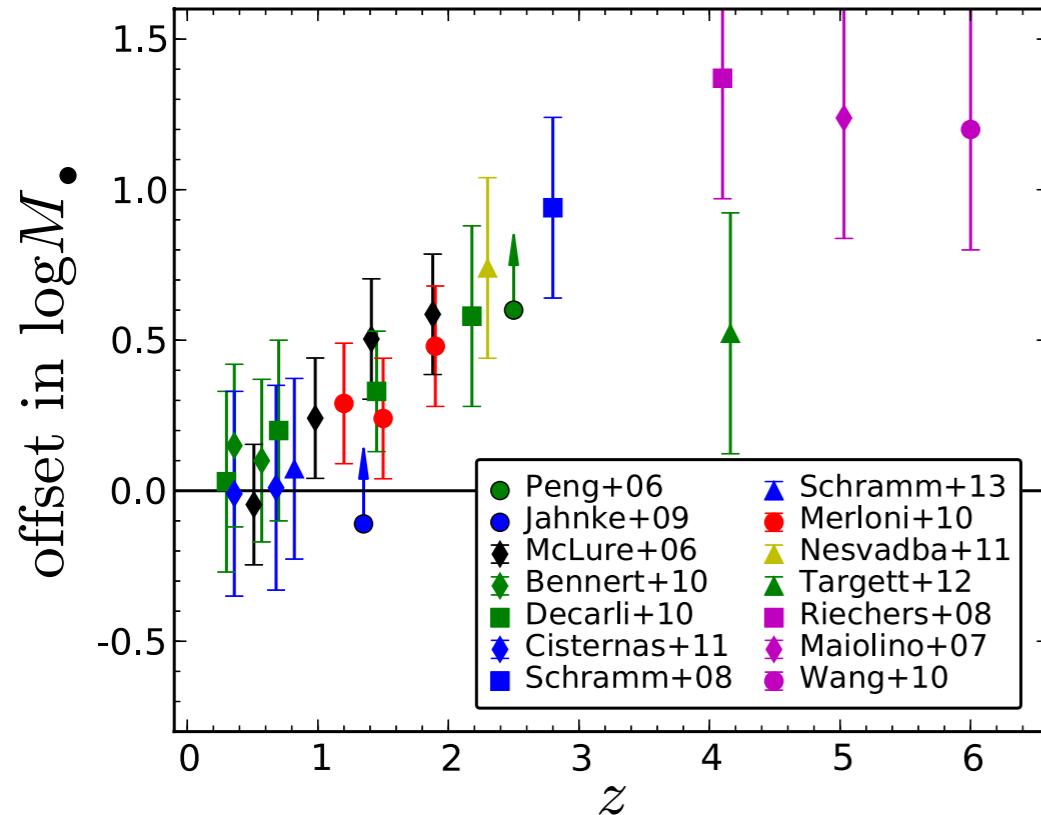
低光度quasarの大量観測 + stacking解析を利用して、微分形マゴリ
アン関係の赤方偏移進化を（極力観測バイアスを低減して）捉える。

マゴリアン関係の赤方偏移進化

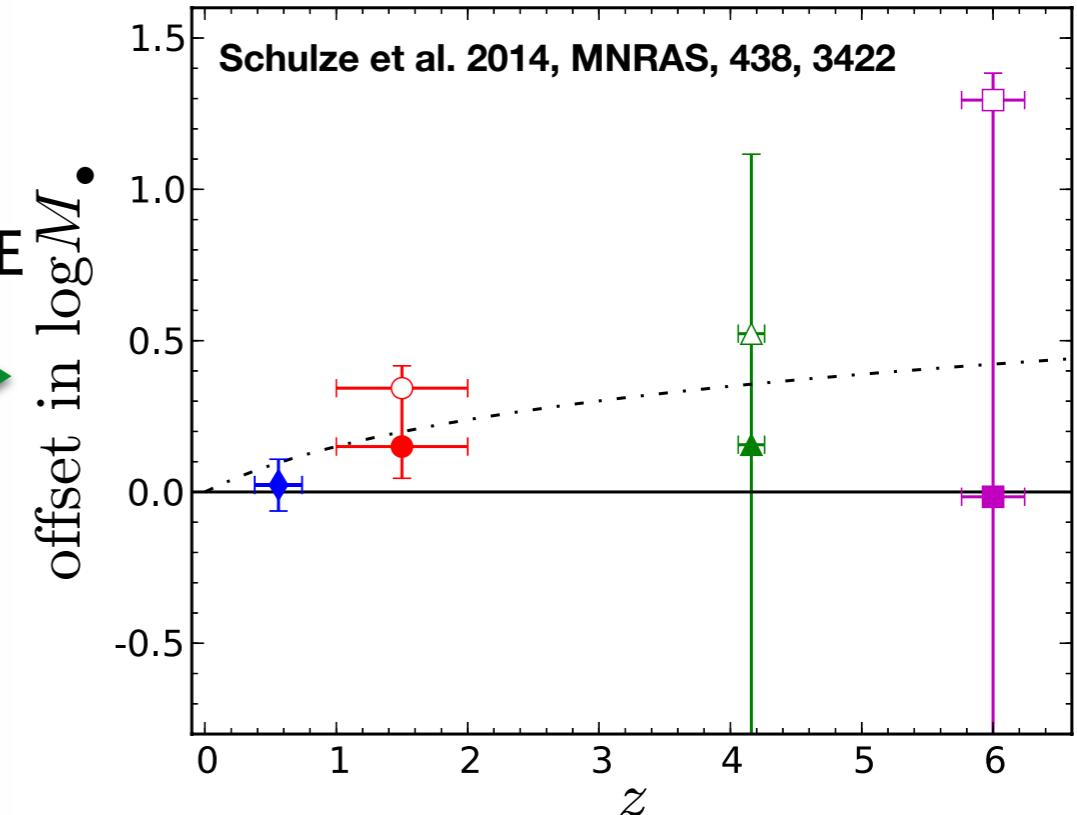
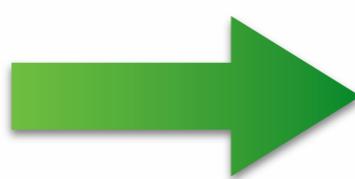


- BHと母銀河の共進化関係。High- z では $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ 比、 M_{BH}/σ 比などで $z=0$ の値よりも大きいという報告がある。
→ SMBHの方が先に成長したことを示唆。
- ただし、小サンプル、大測定誤差に基づく議論である。**選択効果**も考慮すべき。

マゴリアン関係の赤方偏移進化



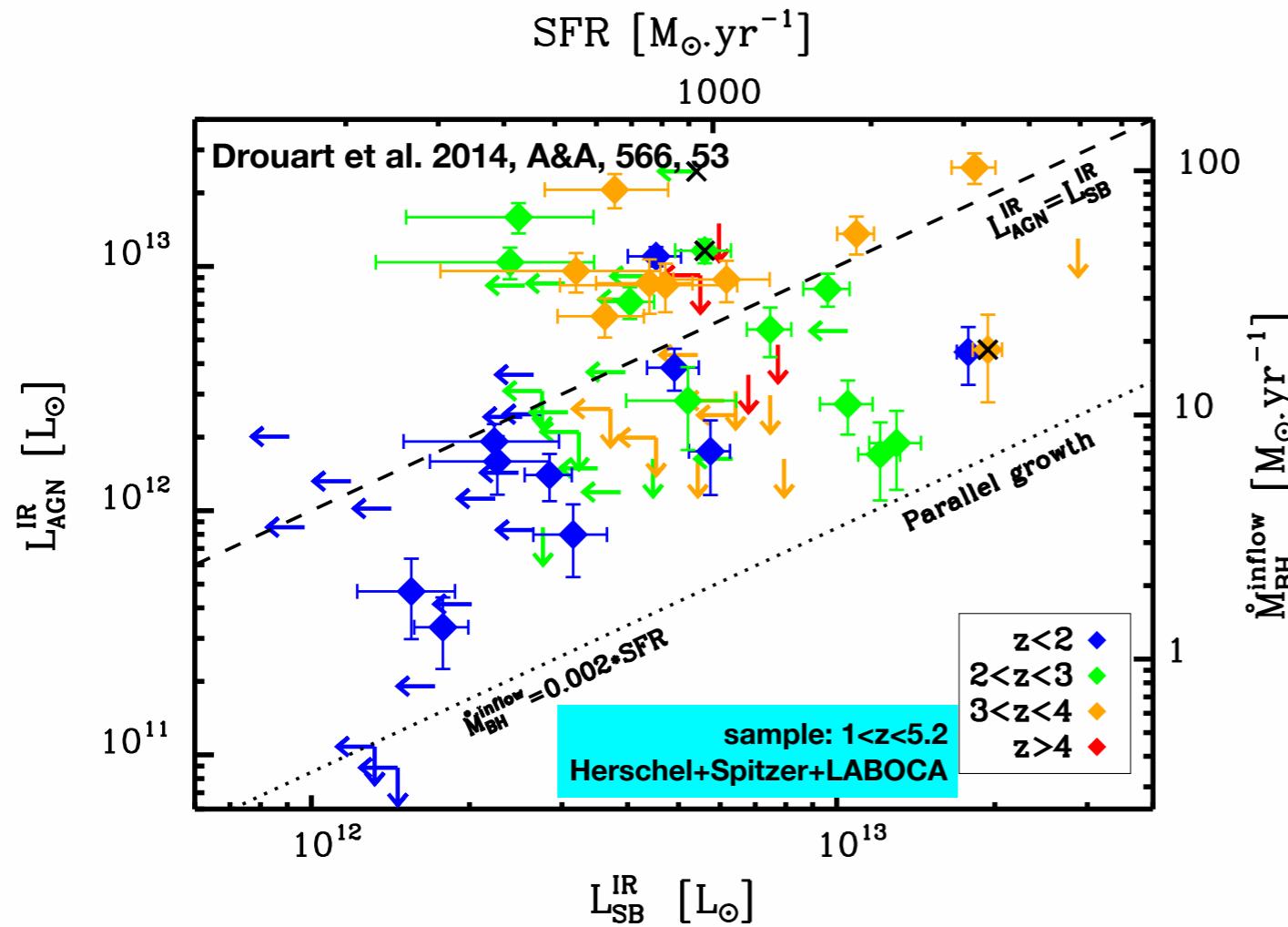
選択効果の補正



- 特にhigh-z天体の観測は、明るい側にバイアスされていることに注意！！
→ “選択効果”をうむ。
- 適切に選択効果を考慮すると、実は $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ は無進化という予測も。
- e.g., Lauer et al. 2007; Schulze et al. 2014

低光度側のquasar観測が重要

“微分形” マゴリアン関係の赤方偏移進化



- 上図のように、high-z quasarでは L_{Bol} がparallel growthの場合に比べて卓越している。
→ SMBHが先に進化したことを示唆
(e.g., Willot et al. 2013; Drouart et al. 2014)
- ただし、先述のバイアス問題が再発する。

- これをふまえて、SCUBA-2/JCMTのsubmm観測で何ができるかを考えてみる。

- submm観測から L_{FIR} を、他波長観測から L_{Bol} を導出。これらは、

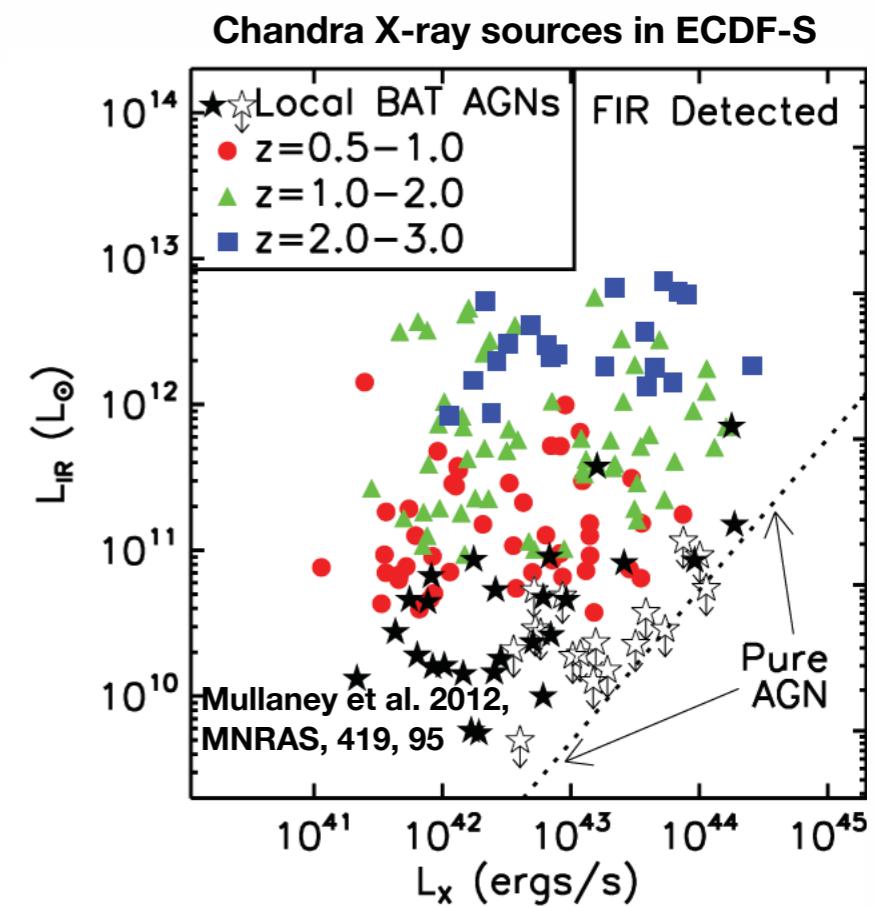
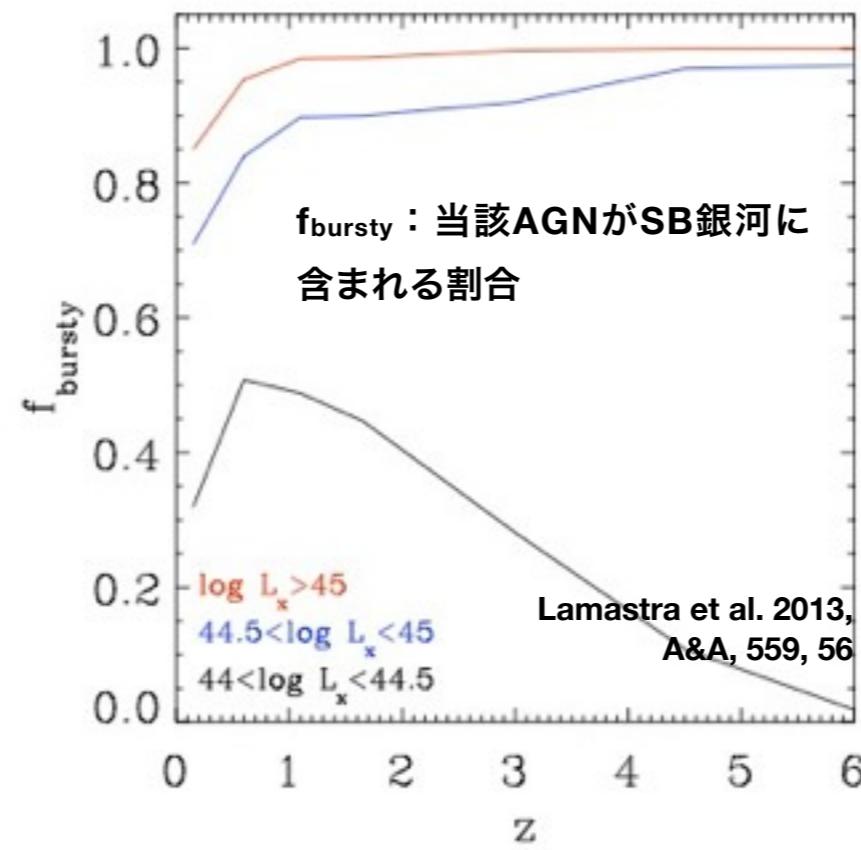
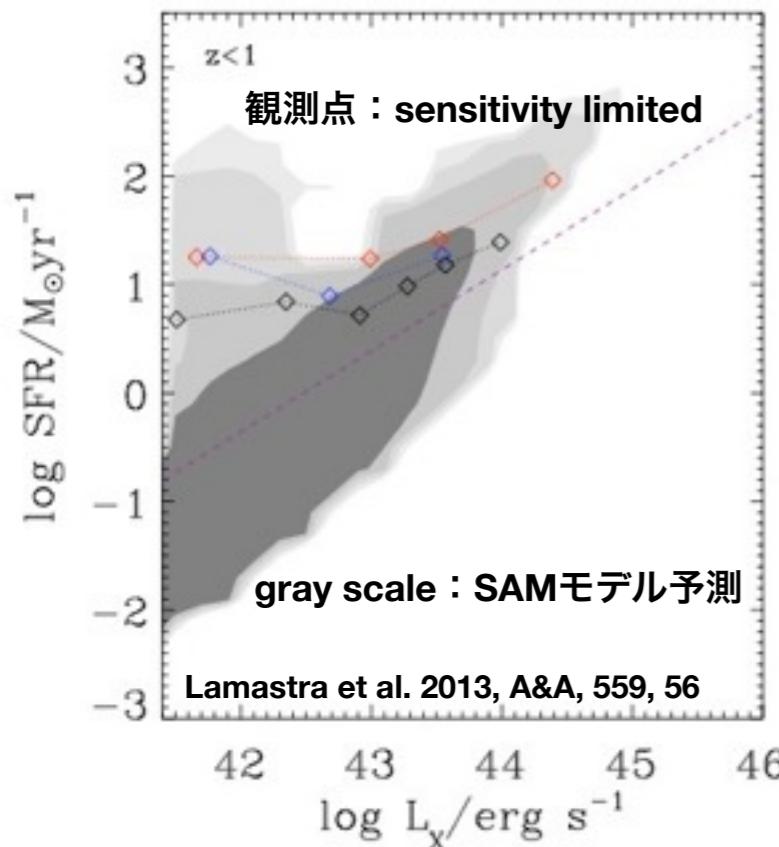
$$\frac{L_{\text{Bol}}}{L_{\text{FIR}}} \propto \frac{dM_{\text{BH}}}{dt} / \frac{dM_{\text{bulge}}}{dt}$$

- もし銀河とSMBHの共進化のペースが一定 (parallel growth) なら、

$$\frac{L_{\text{Bol}}}{L_{\text{FIR}}} \propto \frac{\dot{M}_{\text{BH}}}{\dot{M}_{\text{bulge}}} = \frac{M_{\text{BH}}}{M_{\text{bulge}}} \sim 0.1 - 0.4\%$$

低光度側のquasar観測が重要

AGN-starburst connection@high-z



- 銀河形成モデルで、AGN光度とSFRの相関が予測されている。観測は全然相関を示さないが、ここでも選択効果が問題となる。
→暗いAGNが重要。

広域サーベイによるquasar研究

- ・ 微分形マゴリアン関係の赤方偏移進化を観測バイアスを克服して捉える。
→SMBHは真に母銀河よりも先に成長したのか？
- ・ そのためには暗いquasarの観測が重要。
→**広域サーベイを活かした大量観測 + stacking解析**で、暗いquasarの統計的性質を調べる（ALMAがやりづらうこと）。
- ・ 観測は、HSC-AGNとのpossible collaborationを考慮すると、 $z=5-6$ quasarまで頑張りたいところだが、サーベイデザインに大きく依存する。

Summary

- ❖ 近年の大規模サブミリ波サーベイ + X線サーベイ
 - ❖ (X-ray-selected な) AGN を持つ SMG は、全体の ~20%.
 - ❖ 埋もれた powerful な AGN ("proto-QSO") が、いくつかのSMGに見つかった
 - ❖ SMG のある割合は、QSO に近い L_x をもつ埋もれた AGN をホスト. → **Proto-QSO?**
 - ❖ SMG のすべてで顕著な MBH が成長しているわけではない.



さらなる SMG-QSO の理解が必要.

大規模サブミリ波サーベイ (SIXER) によるサンプルの拡大, および低光度 AGN の大量観測とスタッキング解析を利用した微分型マゴリアン関係の理解. → **他波長の広視野サーベイの相補性.**

ALMA による高空間分解能 ($< 0.1''$) イメージング. → **母銀河・トーラス**

ALMA による埋もれたAGN (XDR) 探査. → **Compton-thick AGN の理解**