

# **SXDF-ALMA 2 arcmin<sup>2</sup> Deep Survey:**

**The properties of faint SMGs and their contribution to the IR EBL**

第 3 回銀河進化研究会 @ 東北大学 青葉サイエンスホール

2016 年 6 月 2 日 (木)

東京大学天文センター河野研究室 博士 1 年

山口裕貴

# SXDF-ALMA 2 arcmin<sup>2</sup> deep survey

- : ALMA 観測, ソースカタログ:
  - Kohno et al. 2016, arXiv: 1601.0019
  - Kohno et al. in prep.
- H $\alpha$  emitters (HAEs):
  - Tadaki et al. 2015, ApJ, 811, L3
- IR EBL の分解と検出された暗いサブミリ波銀河の性質:
  - Yamaguchi et al. 2016, submitted to PASJ (本講演)
- ナンバーカウント:
  - Hatsukade et al. 2016, PASJ in Press
- NIR-selected 銀河のスタッキング解析:
  - Wang et al. in prep.

# もくじ

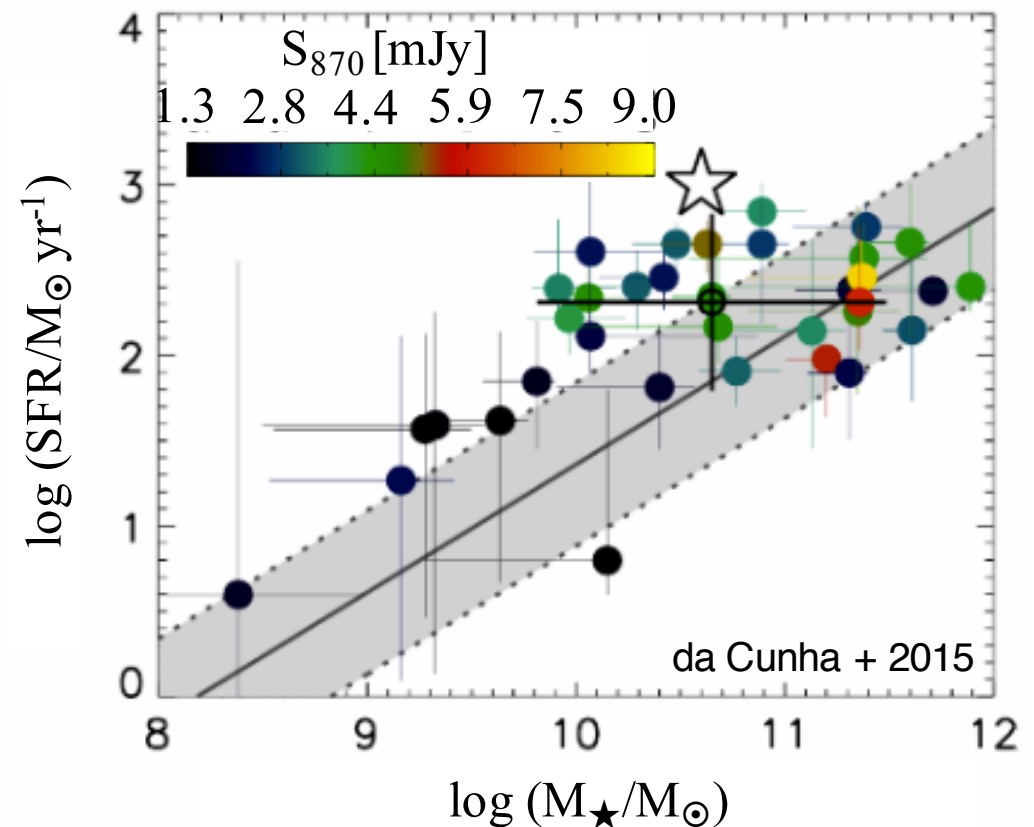
- イントロダクション
  - 明るいサブミリ波銀河・暗いサブミリ波銀河とは？
    - サブミリ波銀河観測の現状・問題点
  - 研究の目的
- ALMA 観測
  - 観測領域・観測諸元
- ALMA 連続波源の多波長解析
  - 測光赤方偏移, 星質量, 星形成率の推定
- 考察
  - IR EBL・宇宙赤外線星形成率密度への寄与
  - ALMA 連続波源の星形成モード
- まとめ

# イントロダクション (先行研究)

## • 明るいサブミリ波銀河

- サブミリ波帯で明るい ( $S_{1.1\text{mm}} > 1 \text{ mJy}$ )
- 単一鏡による大規模探査で数多く報告されている
- 明るいサブミリ波銀河には 2 つの星形成モード

- Main sequence (MS)
  - $M_{\star} \sim 10^{11}\text{-}10^{12} M_{\odot}$
- スターバースト
  - $M_{\star} \sim 10^{10}\text{-}10^{11} M_{\odot}$
  - main sequence の数倍 ~ 数10 倍程度のSFR





# イントロダクション (先行研究)

## • 明るいサブミリ波銀河

– 赤方偏移分布や星形成率密度への寄与は  $z \sim 2-3$  で  
ピークとなる (e.g., Chapman + 2005, Wardlow + 2011)

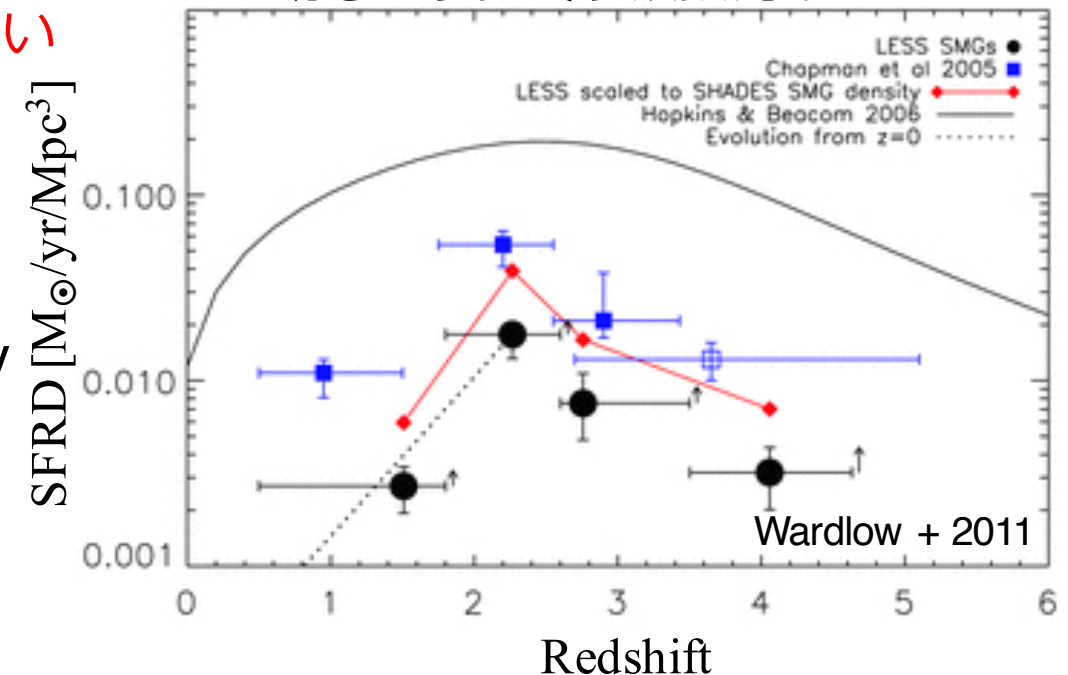
•  $\sim (1-2) \times 10^{-2} M_{\odot}/\text{yr}/\text{Mpc}^3$  (@  $z \sim 2-3$ ; Chabrier IMF)

– 宇宙赤外線背景放射 (IR EBL) への寄与は波長 1.1 mm  
~ 10-20% (Hatsukade + 2011)

## 明るいサブミリ波銀河の SFRD

• 大部分は説明できていない

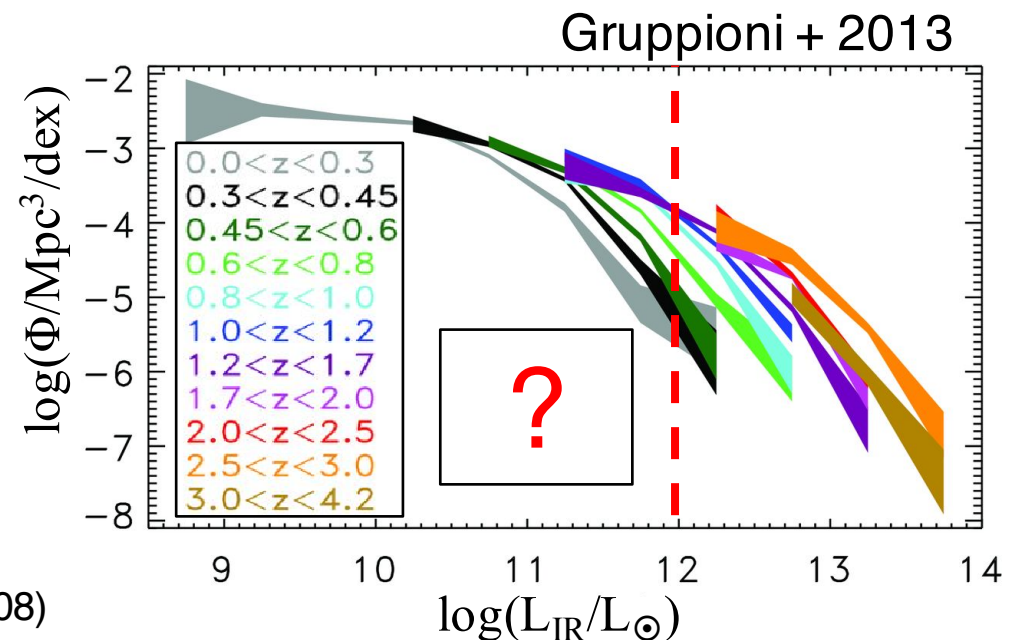
– 単一鏡望遠鏡の  
confusion 限界  
( $\sigma \sim 1$  mJy; 1.1 mm)  
のため  $S_{1.1\text{mm}} < 1\text{mJy}$   
の検出は難しい



# イントロダクション (先行研究と問題)

## • 暗いサブミリ波銀河

- 観測フラックス密度:  $S_{1.1\text{mm}} < 1 \text{ mJy}$
- IR EBL へ大きな寄与:  $\sim 50\text{-}80\%$  (Hatsukade + 2013, Ono + 2014, Carniani + 2015, Fujimoto + 2016)
- 赤外線星形成率密度への寄与は分かっていない
  - 赤外線光度関数の外挿 ( $L_{\text{IR}} \lesssim 10^{12} L_{\odot}$ )
    - e.g., Burgarella + 2013
  - 赤方偏移の不定性
- 星形成活動は？
  - 明るいサブミリ波銀河と同じ？
- 重力レンズの利用
  - 探査体積の減少 (Knudsen + 2008)



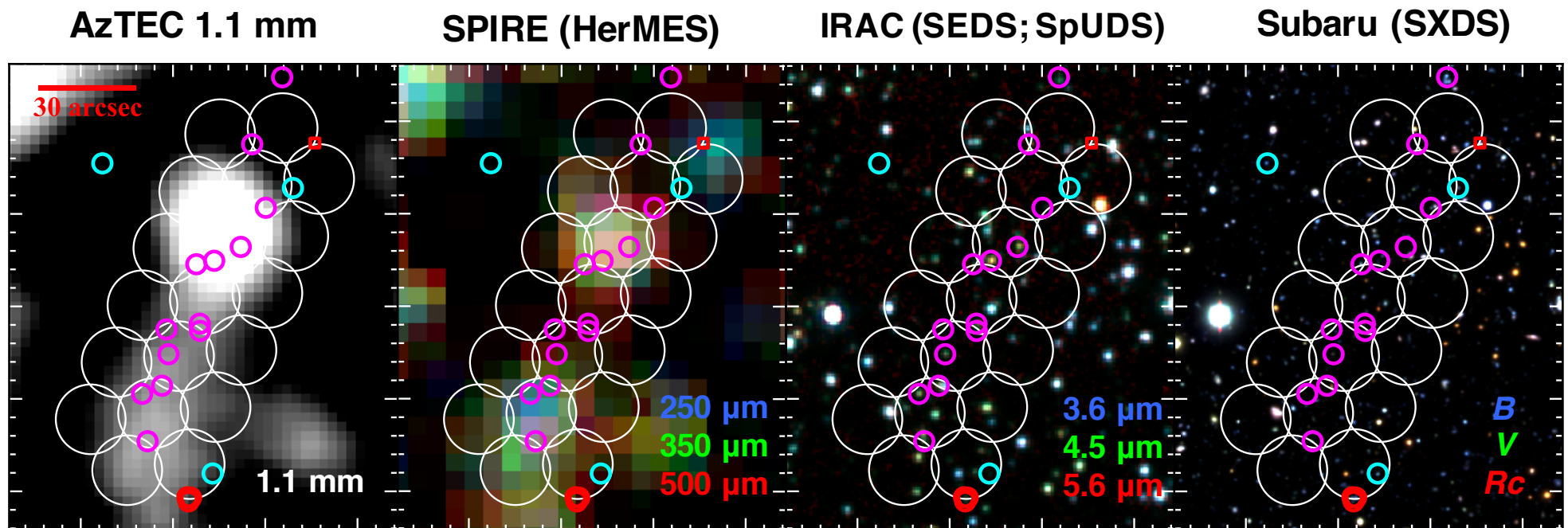
# イントロダクション (目的)

## 本研究の目的 (暗いサブミリ波銀河)

- 暗いサブミリ波銀河を研究するには, レンズモデルの不定性のない領域を広く, 深く, 高分解能で観測が必要である
  - ALMAの登場でようやく**本格的に研究できる領域**
- ALMAによる観測で検出された天体の**多波長 SED 解析**
  - 非常に深い多波長データが利用できる
    - 測光赤方偏移・星質量・星形成率の推定
    - ALMA で検出された天体の**IR EBL・赤外線星形成率密度への寄与**を明らかにする
    - ALMAで検出された天体の**星形成モード**を調べる

# 観測領域

- SXDF-UDS-CANDELS 領域
  - 深い多波長データが利用できる (e.g. VLT, *HST*, IRAC)
    - 我々の研究グループによる, AzTEC/ASTE 探査で見つかった  
明るいサブミリ波銀河 (五十嵐, 博士論文)
    - 多くの種類の星形成銀河
      - e.g., HAEs @  $z = 2.2, 2.5$  (Tadaki + 2013; magenta circle)





# ALMA 観測

- ALMA 観測のパラメータ
  - ALMA Cycle 1 (Band 6; 1.1 mm, 2.0 arcmin<sup>2</sup>)
    - Project ID: 2012.1.00756.S, PI: K. Kohno
  - 観測日: 2014 7/17, 7/18
  - アンテナ台数: 30-32
  - 基線長: 20-650 m
  - 可降水量: 0.42-0.55 mm





# ALMA 連続波源の検出

SXDF-UDS-CANDELS  
-ALMA 2.0 arcmin<sup>2</sup>  
領域

視野数: 19

合成ビーム: 0".53 × 0".41

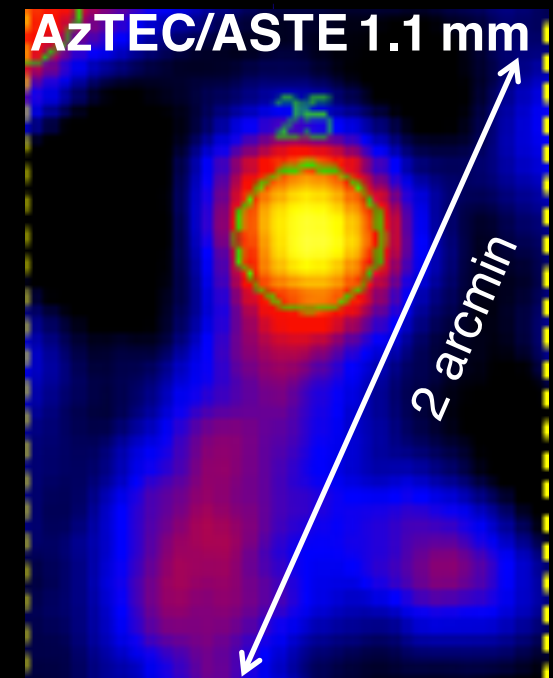
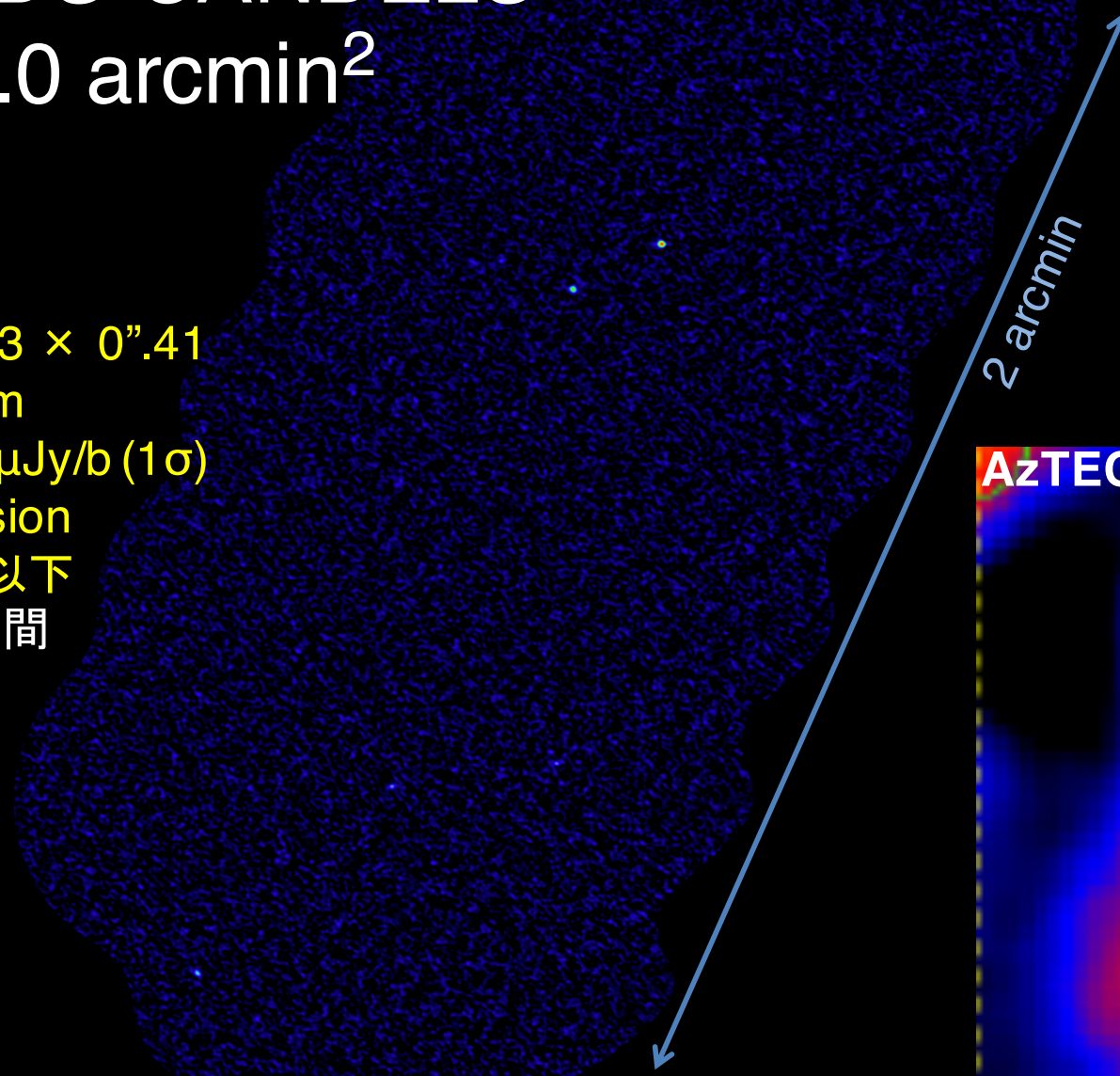
観測波長: 1.1mm

ノイズレベル: 55μJy/b (1σ)

単一鏡の confusion

限界 (~ 1 mJy) 以下

観測時間: 3.8 時間



# ALMA 連続波源の検出

## SXDF-UDS-CANDELS -ALMA 2.0 arcmin<sup>2</sup> 領域

視野数: 19  
合成ビーム:  $0''.53 \times 0''.41$   
観測波長: 1.1mm  
ノイズレベル:  $55 \mu\text{Jy/b}$  ( $1\sigma$ )  
単一鏡の confusion  
限界 ( $\sim 1 \text{ mJy}$ ) 以下  
観測時間: 3.8 時間

SXDF-ALMA1 (**HAE @  $z = 2.5$** )  
2.02 mJy

1.38 mJy

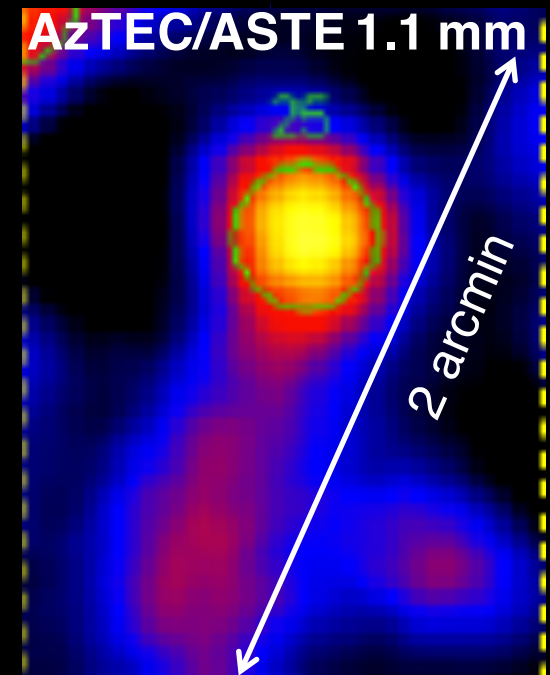
SXDF-ALMA2 (**HAE @  $z = 2.5$** )

SXDF-ALMA4  
0.54 mJy

SXDF-ALMA5  
0.56 mJy

SXDF-ALMA3  
1.16 mJy

Kohno, K., Tadaki, K.,  
Kodama, T.,  
Ikarashi, S., Tamura, Y.,  
Hatsukade, B.,  
Yamaguchi, Y., Ivison, R.,  
Rujopakarn, W.,  
et al., in prep.



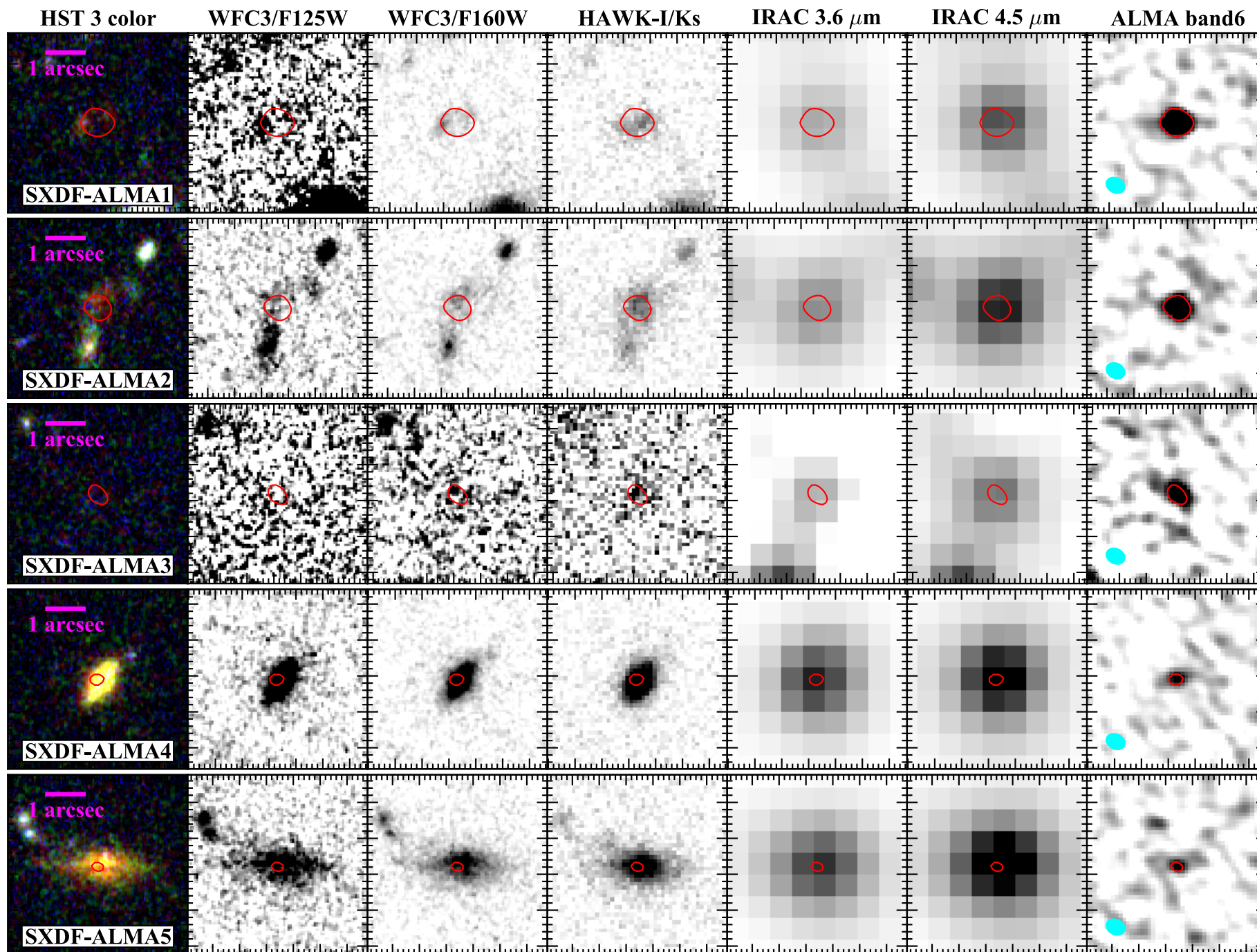
# 対応天体の同定

- 可視光-近赤外線

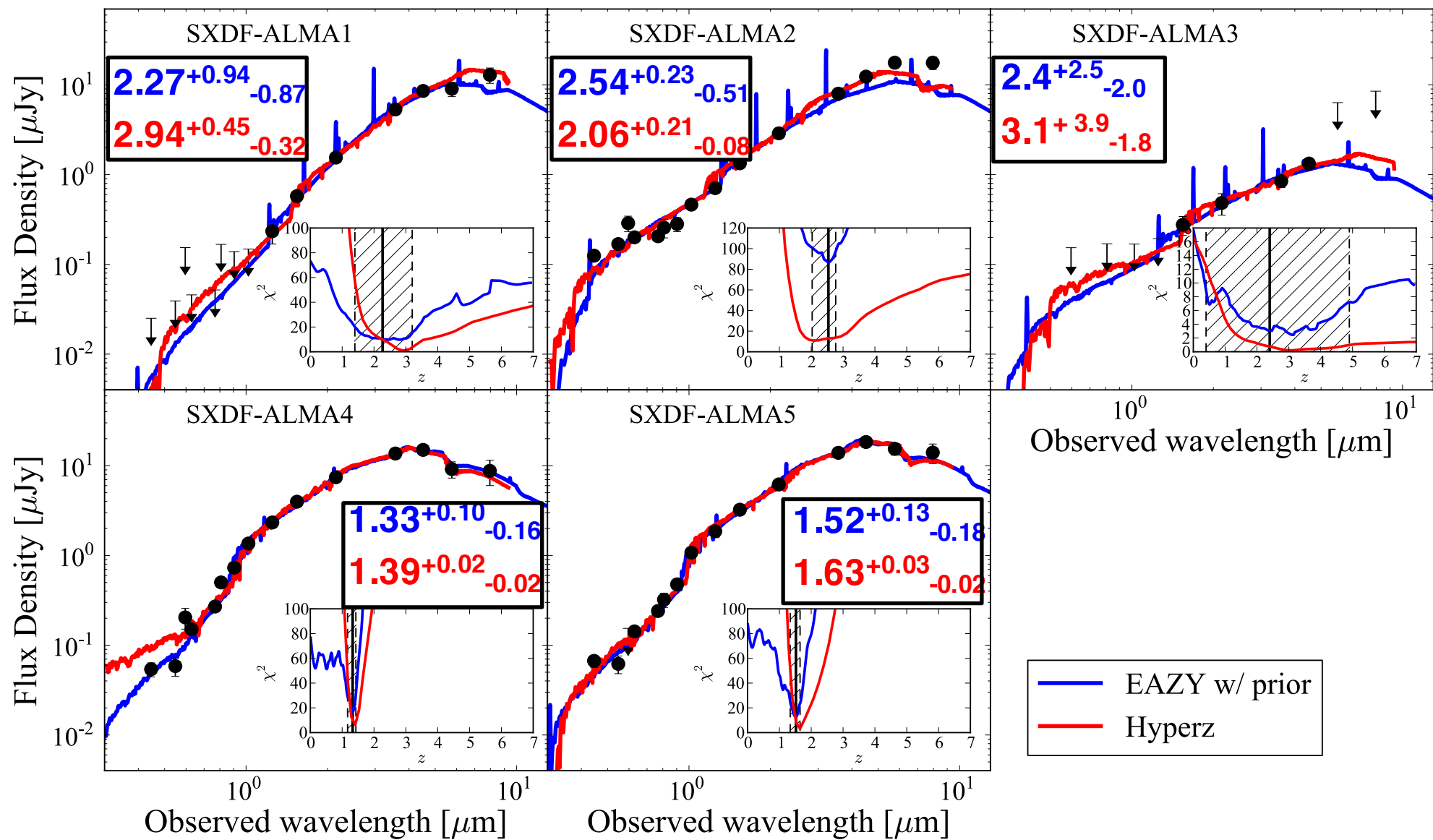
Subaru Suprime-Cam	<i>HST</i> ACS	<i>HST</i> WFC3	VLT HAWK-I	<i>Spitzer</i> IRAC
<i>B, V, Rc, i', z'</i> band	F606W F814W	F125W F160W	<i>Y, Ks</i> band	3.6, 4.5, 5.6, 8.0 $\mu\text{m}$

- SXDF-ALMA1, 2, 4, 5 は, Galametz + 2013 のカタログに記載されている ( $H \sim 22.4\text{-}24.5$ ,  $Ks \sim 21.7\text{-}23.4$ )
- SXDF-ALMA3 は非常に暗く ( $H = 25.3$ ,  $Ks = 24.7$ ),  
 $H$ バンドよりも短い波長の画像では, 検出されていない

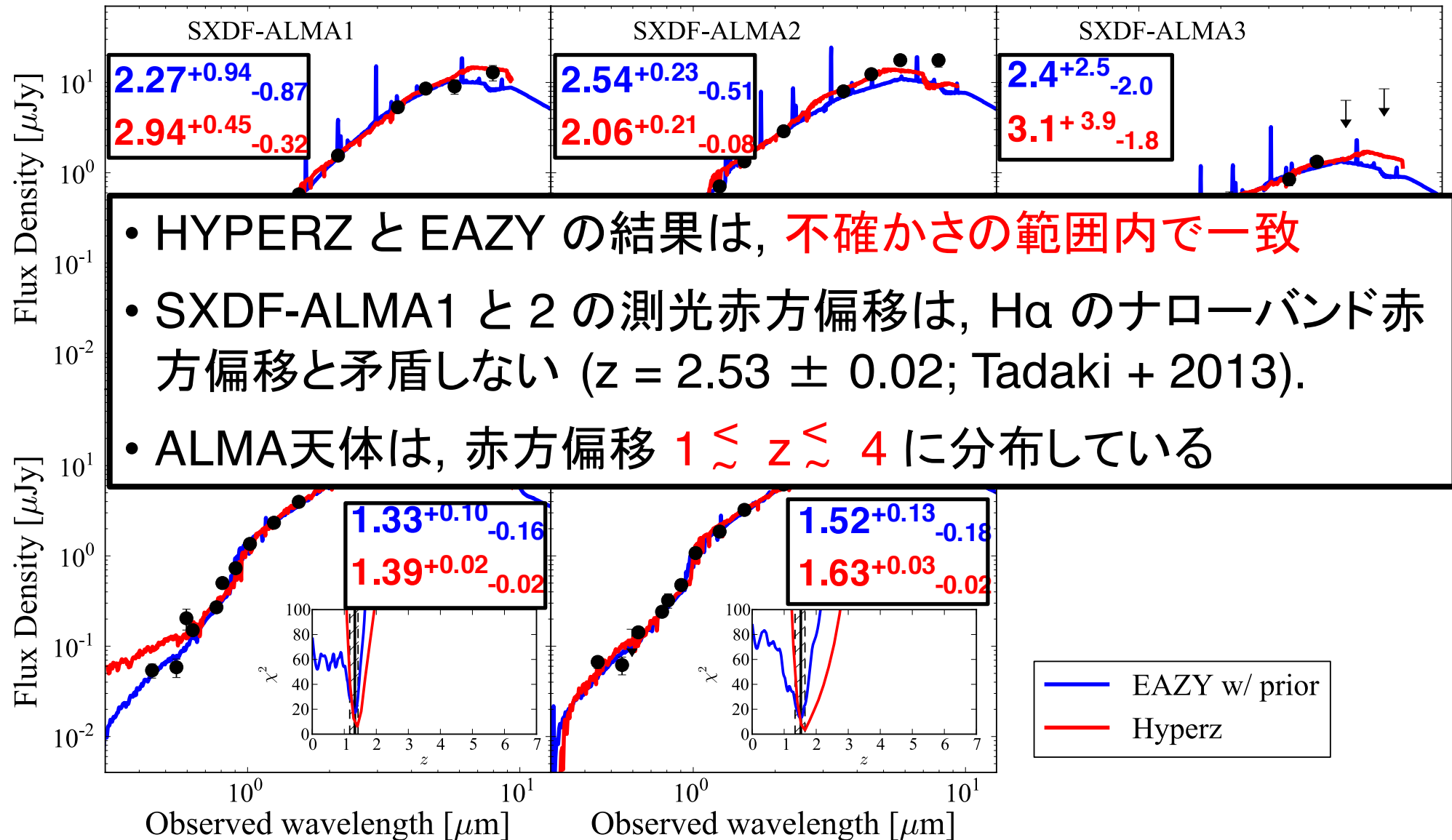




# 測光赤方偏移の推定



# 測光赤方偏移の推定



# 星質量・星形成率の推定

BC03 SED モデル ( $Z = Z_{\odot}$ )

Chabrier IMF

Calzetti 赤化モデル

SFH  $\propto \exp(-t/\tau)$  ( $\tau > 300$  Myr)

- SXDF-ALMA1, 2, 4, and 5

–FAST (Kriek + 2009) による SED フィットで, 星質量を推定

–UV と IR 光度から, 星形成率を推定 (Kennicutt 1998)

- $L_{\text{IR}}$  は Dale & Helou 2002 の SED モデル

– $\beta = 1.5$ ,  $T_{\text{dust}}$ : PACS の上限値から制限 (20-35 K)

Source	Redshift	$M_{\star}$ [ $\times 10^{10} M_{\odot}$ ]	$\text{SFR}_{\text{UV}}$ [ $M_{\odot}/\text{yr}$ ]	$\text{SFR}_{\text{IR}}$ [ $M_{\odot}/\text{yr}$ ]
SXDF-ALMA1	2.53	$9.5^{+2.8}_{-7.3}$	$< 2$	$200^{+200}_{-100}$
SXDF-ALMA2	2.53	$9.3^{+1.1}_{-6.7}$	$6 \pm 2$	$100^{+100}_{-80}$
SXDF-ALMA4	1.33	$3.5^{+1.6}_{-0.9}$	$0.6 \pm 0.2$	$30^{+20}_{-20}$
SXDF-ALMA5	1.52	$4.1^{+3.2}_{-2.2}$	$1 \pm 0.4$	$50^{+50}_{-40}$

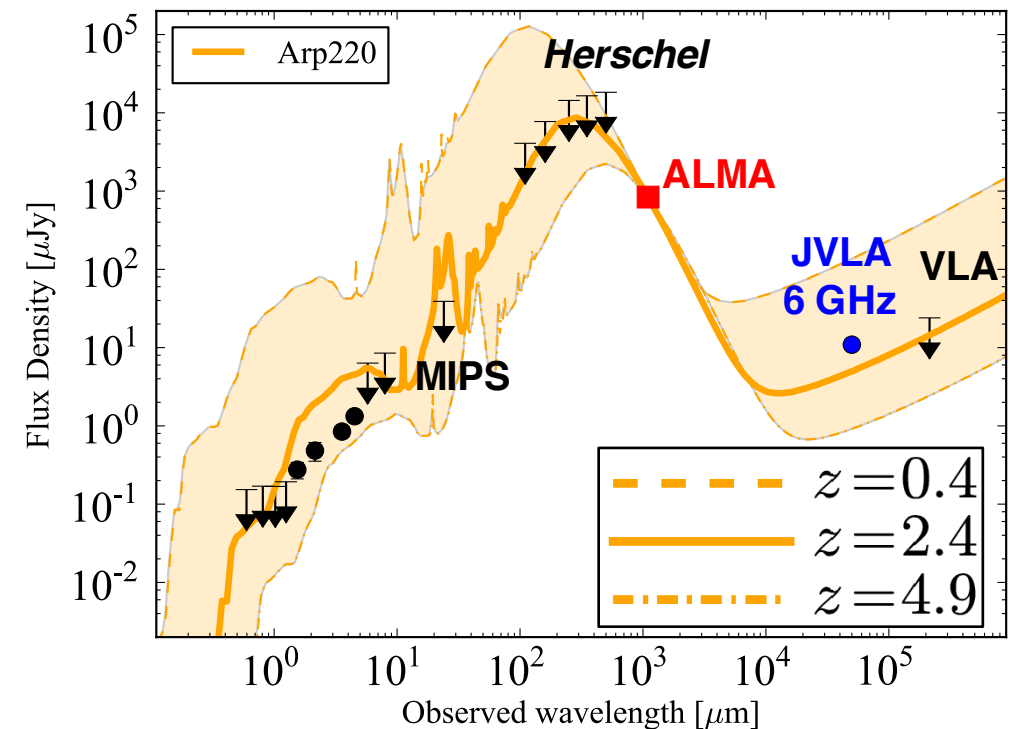
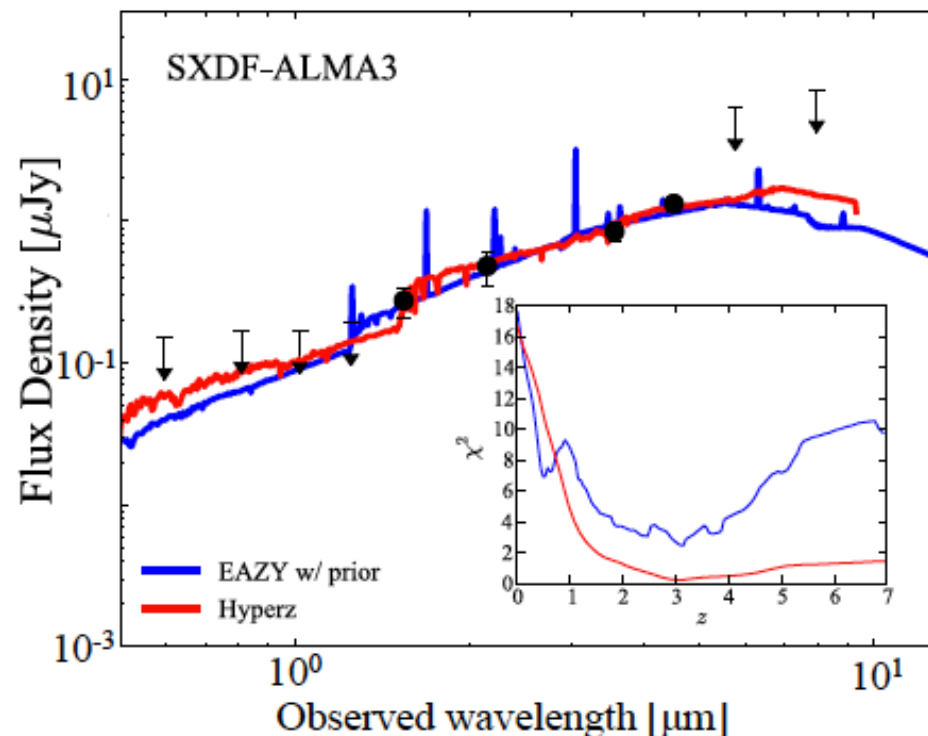
# SXDF-ALMA3

- 可視光/近赤外線で暗い

$$-z_{\text{photo}} = 2.4^{+2.5}_{-2.0} \text{ (EAZY)}, M_{\star} < 10^9\text{-}10^{10} M_{\odot}$$

- cf. SXDF-ALMA1, 2, 4, 5 では,  $M_{\star} \sim 10^{10.5}\text{-}10^{11.0} M_{\odot}$

- *Herschel* で未検出, JVLA で検出  $\rightarrow z \sim 2\text{-}3$



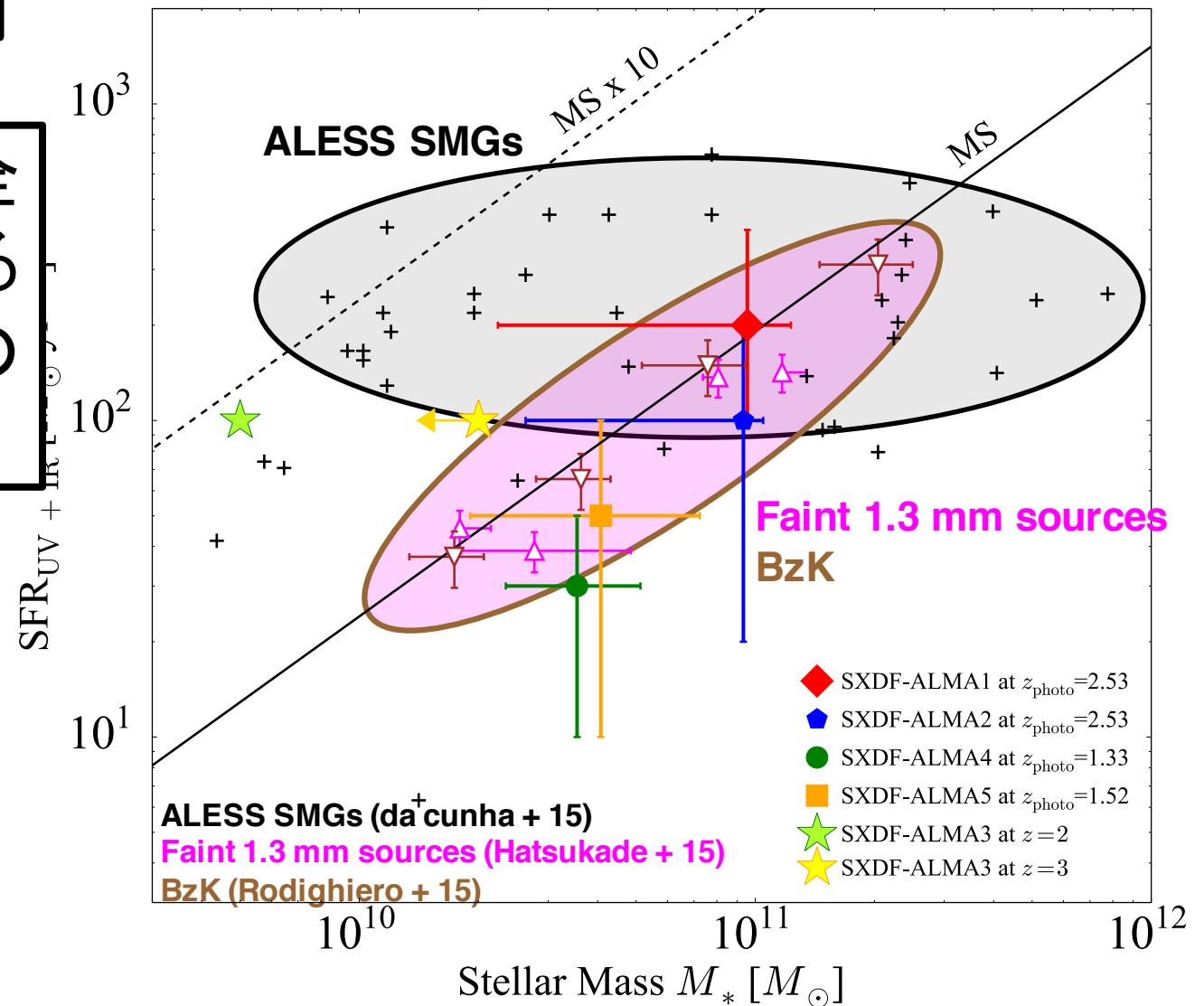
# IR EBL ・ IR SFRD への寄与

- AzTEC/ASTE で選択された天体を除いた 3 天体 (SXDF-ALMA3, 4, and 5;  $S_{1.1\text{ mm}} \sim 0.5\text{-}1\text{ mJy}$ ) の IR EBL への寄与  
 $-4.1^{+5.4}_{-3.0}\text{ Jy/deg}^2$   
 →  $S_{1.1\text{ mm}} > 1\text{ mJy}$  の明るいサブミリ波銀河による寄与  
 ( $\sim 2.9\text{ Jy/deg}^2$ ; Hatsukade + 2011) とほぼ同等
- SXDF-ALMA1, 2を除く3 天体 ( $L_{\text{IR}} \sim 10^{11.5}\text{-}10^{12.3} L_{\odot}$ ) の IR SFRD への寄与  
 $\sim (0.3\text{-}2) \times 10^{-2} M_{\odot}/\text{yr}/\text{Mpc}^3$  ( $1 < z < 4$ )  
 • 明るいサブミリ波銀河と同程度の寄与 (e.g., Wardlow + 2011)  
 – *Herschel* では捉えきれない明るさ ( $L_{\text{IR}} \lesssim 10^{12} L_{\odot}$ ) まで  
 分解することができた

# ALMA 天体の星形成モード

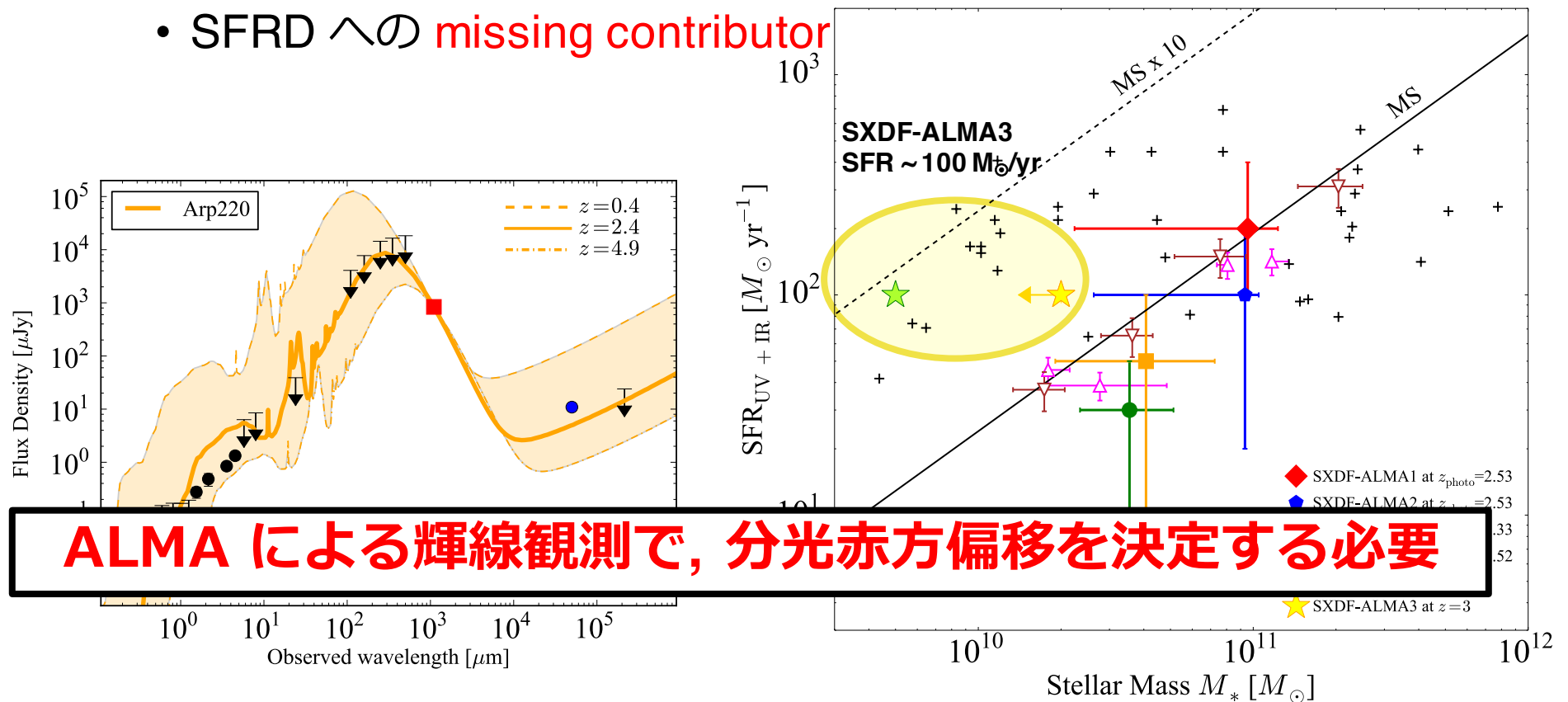
- SXDF-ALMA1, 2, 4, 5 は星形成の MS に乗っている  
 –MS 星形成銀河

ALMA天体は全  
て MS に属する  
星形成銀河なの  
か? → No!



# ALMA 天体の星形成モード

- SXDF-ALMA3:  $z \sim 2-3$  のスターバースト銀河
  - 星質量が小さい ( $M_{\star} < 10^9 - 10^{10} M_{\odot}$ )
    - 明るいサブミリ波銀河  $M_{\star} \sim 9 \times 10^{10} M_{\odot}$  (Hainline + 2011)
  - ALMA でようやく検出され始めた種族
    - SFRD への missing contributor



**ALMA による輝線観測で、分光赤方偏移を決定する必要**





# YUKI YAMAGUCHI

# 2015.1.01222.S

PROJECT TITLE:	Investigating the nature of a new dust obscured star forming galaxy which can only be understood via deep ALMA spectroscopy			SCIENCE CATEGORY:	Cosmology and the High Redshift Universe
PI E-MAIL:	yyamaguchi@ioa.s.u-tokyo.ac.jp			PI INSTITUTE:	School of Science, The University of Tokyo
ESTIMATED 12M TIME:	8.5 h	ESTIMATED ACA TIME:	0.0 h	ESTIMATED NON-STANDARD MODE TIME (12M):	0.0 h
CO-PI NAME(S): (Large Proposals only)					
CO-INVESTIGATOR NAME(S):	Yoichi Tamura; Kotaro Kohno; Hideki Umehata; Yuichi Matsuda; Soh Ikarashi; Minju Lee; Yuta Kato; Bunyo Hatsukade; Takuma Izumi; Ryu Makiya; Ken-ichi Tadaki; Wiphu Rujopakarn; Tadayuki Kodama; Rob Ivison; James Dunlop; Akio Taniguchi; Ryo Ando				
EXECUTIVE SHARES[%]:	NA :	0	STUDENT PROJECT?	Yes	
	EU :	0		RESUBMISSION?	No
	EA :	10			
	CL :				
	OTHER :				

## ABSTRACT

We propose to conduct a blind search of the CO emission lines toward SXDF-ALMA3 which is discovered by ALMA 1.1 mm deep observations of contiguous 1.5 arcmin<sup>2</sup> and in the SXDF-UDS-CANDELS field, with 5 sigma sensitivity of 0.28 mJy.

One of the brightest ALMA source, SXDF-ALMA3 (the target), is very dark in deep WFC3/HST and HAWK-I/VLT NIR images as well as VLA 1.4 GHz and 6 GHz images, despite the fact that this source is rather bright (0.84 +/- 0.09 mJy in 1.1 mm, corresponds to L\_IR ~ 1 x 10<sup>12</sup> L\_sun or SFR ~ 170 M\_sun/yr), which suggests that ALMA deep surveys can unveil dust obscured star forming galaxies which are difficult to identify even with the deepest NIR/radio surveys.

The main aim of this proposal is as follows:

(1) Determining its redshift by scanning CO lines across the band 3 to test whether SXDF-ALMA3 is significantly above the star-formation main sequence at its epoch or not.

(2) Revealing the molecular gas mass fraction of SXDF-ALMA3 to assess its star formation mode.

Through the proposed observation, we aim to characterize the nature of this dusty starburst galaxy which can only be understood via deep ALMA spectroscopy.

# まとめ

- SXDF-ALMA 探査で検出された 5 天体の多波長観測
  - 暗いサブミリ波銀河 3 天体が CIB, IR SFRD に与える寄与は明るいサブミリ波銀河と同程度
    - Herschel や可視光・赤外線による, 従来の探査では分解されていない種族の銀河による寄与を分解できた
  - ALMA 天体の星形成モード
    - 5 天体中 4 天体は MS 星形成銀河
    - SXDF-ALMA3 は  $z \sim 2-3$  にある, 星質量の小さいスターバースト銀河
      - ALMA の登場でようやく検出され始めた種族
      - ALMA cycle 3 で分子輝線の分光観測が採択済
        - » 分光赤方偏移・ガス質量・ガス質量比 etc...