

**SMA observation of faint submillimeter galaxies  
with  $S_{850} < 2$  mJy: Ultra dusty low-luminosity  
galaxies at high redshift**

Chen et al. 2014, ApJ, 789, 12

Journal Club 2015/06/10

河野研修士 2 年

山口裕貴

# 0. Abstract

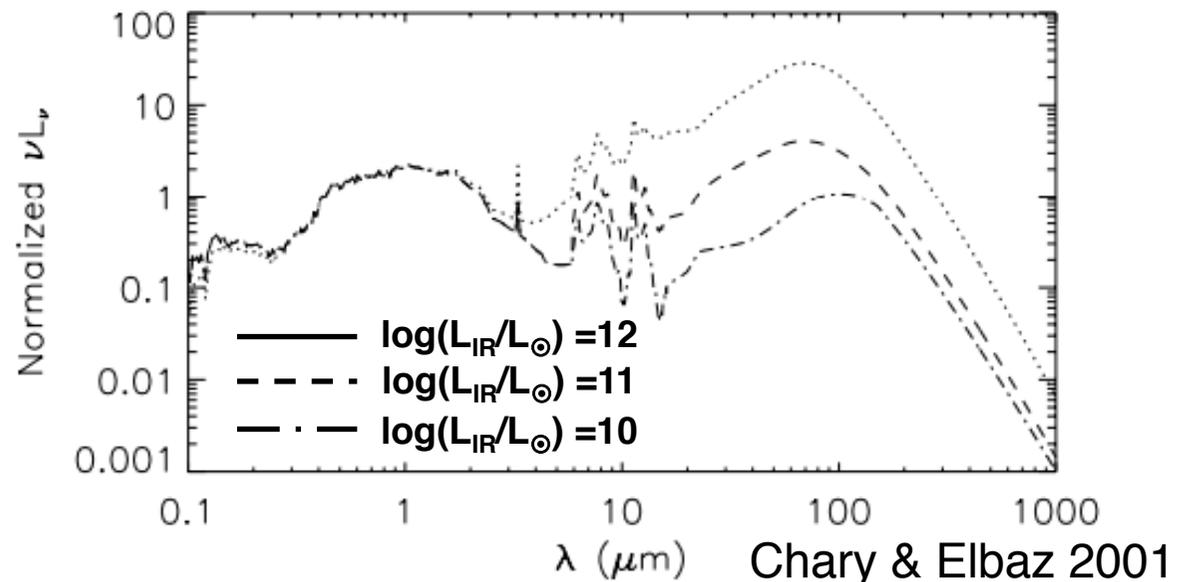
We obtained Submillimeter Array (SMA) observations of eight faint (intrinsic  $850\ \mu\text{m}$  fluxes  $< 2\ \text{mJy}$ ) submillimeter galaxies (SMGs) discovered in SCUBA images of the massive lensing cluster fields A370, A2390, and A1689 and detected five. In total, we obtain five SMA detections, all of which have de-lensed fluxes  $< 1\ \text{mJy}$  with estimated total infrared luminosities  $10^{10}\text{--}10^{12}\ L_{\odot}$ , comparable to luminous infrared galaxies and normal star-forming galaxies. Based on the latest number counts, these galaxies contribute  $\sim 70\%$  of the  $850\ \mu\text{m}$  extragalactic background light and represent the dominant star-forming galaxy population in the dusty universe. However, only  $40^{+30}_{-16}\%$  of our faint SMGs would be detected in deep optical or near-infrared surveys, which suggests many of these sources are at high redshifts ( $z \gtrsim 3$ ) or extremely dusty, and they are not included in current star formation history estimates.

*Key words:* cosmology: observations – galaxies: formation – galaxies: starburst – gravitational lensing: strong – submillimeter: galaxies

- SMA を用いて SCUBA で見つかった lensed SMGs (de-lensed flux  $< 1\ \text{mJy}$ ;  $L_{\text{IR}} \sim 10^{10-12}\ L_{\odot}$ ) を観測し, 5 つ検出.
- 検出された faint SMGs の  $\sim 40^{+30}_{-16}\%$  程度しか optical / NIR の deep survey では見つからない.
- これは faint SMGs が high- $z$  ( $z > 3$ ) に存在する or extremely dusty であり, 現状の CSFH には組み込まれていない天体であることを示唆している.

# 1. Introduction

- Bright Submillimeter Galaxies (SMGs;  $S_{850 \mu\text{m}} > 2 \text{ mJy}$ )
  - 赤外線で非常に明るい (ULIRG class;  $L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\odot}$ )
  - Optical / NIR で非常に暗い
- Faint SMG class ではどうなるのか？
  - IR 光度が小さくなり, SED が UV dominated になる？ (e.g. Chary & Elbaz 2001)
  - Optically selected galaxies と overlap するようになる？



# 1. Introduction

- これまでの観測で bright SMGs の性質が調べられてきた
  - 赤方偏移分布, ガス・星質量, ダスト温度 etc...
  - SMG の赤外光度は**爆発的星形成由来**
  - Bright SMGs の CIB への寄与は 20-30% ほど
    - Dusty star formation の**大部分が未だ分解されていない**  
=> Faint SMG class の天体を理解する必要がある
- Faint SMGs (S ~ 0.1 - 2 mJy)
  - 単一鏡では confusion limit のため観測が難しい
    - **重力レンズ銀河団領域**を利用
  - 850  $\mu\text{m}$  における CIB の ~70%を占める
- この論文では...
  - SCUBA を用いて**重力レンズ銀河団で検出された 8 天体**を扱う
    - A370, A239, and A1689
    - 高い増光率 ( $\mu > 3$ ), intrinsic 850  $\mu\text{m}$  flux < 2 mJy

# 2. Observation and data reduction

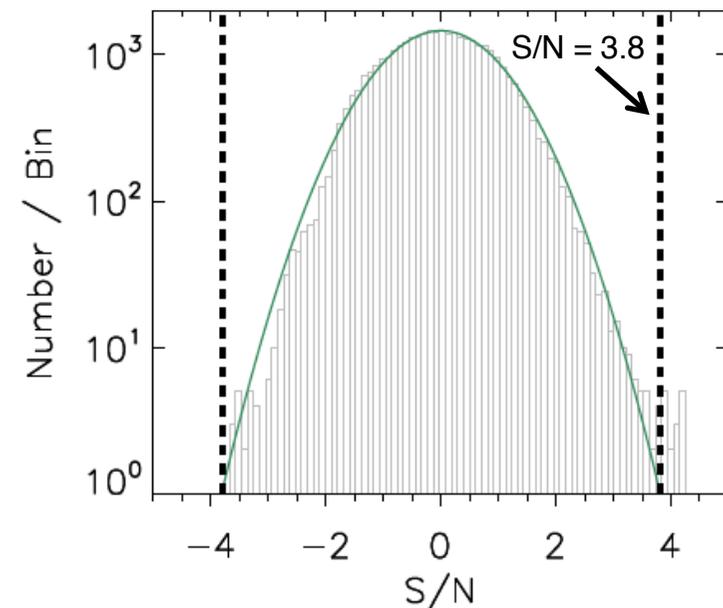
## 2.1 SMA observation

- SMA compact configuration (16-77 m baselines)

Table 1  
SMA Observations

I.D.	Source Name	Track Dates	Beam <sup>a</sup> FWHM ( $'' \times ''$ ) (4)	Beam <sup>a</sup> P.A. (deg) (5)	$\sigma^a$ (mJy beam <sup>-1</sup> ) (6)	Flux Calibrator(s) (7)	Passband Calibrator(s) (8)	Gain Calibrator(s) (9)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Chen-1	4 <sup>b</sup>	20121030, 20121109, 20121111	2.08 × 2.06	55.8	0.61	Neptune	bllac	0309+104, 0339-017
Chen-2	12 <sup>b,c</sup>	20090626 <sup>d</sup> , 20090627 <sup>d</sup> , 20091016	1.98 × 1.63	44.8	0.80	Callisto, Uranus	3c454.3	3c454.3, 2148+069
Chen-3	14 <sup>b</sup>	20110524, 20110925	2.22 × 1.80	-33.3	1.01	Uranus	3c454.3, 3c84	3c454.3, 2203+174
Chen-4	SMM J131128.6-012036 <sup>e</sup>	20120506, 20120509	1.93 × 1.74	80.7	0.92	Neptune, Titan	bllac, 3c279	3c279, 3c273, 1337-129
Chen-5	SMM J131129.1-012049 <sup>e</sup>	20120508	2.05 × 1.78	78.6	1.10	Titan	bllac	3c273, 1337-129
Chen-6	SMM J131132.0-011955 <sup>e</sup>	20130226, 20130303	2.36 × 1.86	-43.7	0.74	Titan, Callisto	bllac, 3c84	3c273, 1337-129
Chen-7	SMM J131134.1-012021 <sup>e,f</sup>	20130226, 20130303, 20130306	2.36 × 1.98	-43.4	0.65	Titan, Callisto	bllac, 3c84	3c273, 1337-129
Chen-8	SMM J131135.1-012018 <sup>e,f</sup>	20130226, 20130303, 20130306	2.36 × 1.98	-43.4	1.00 <sup>g</sup>	Titan, Callisto	bllac, 3c84	3c273, 1337-129

- $S / N > 3.8$  を robust detection
- 典型的な positional uncertainty  
– 0.2'' ~ 0.3 ''



# 2. Observation and data reduction

## 2.2 SCUBA-2 Observation

- $\tau_{225 \text{ GHz}} < 0.05$   $\mathcal{D}$  best weather,  $1\sigma \sim 0.8 - 1 \text{ mJy/beam}$

## 2.3 HST and Spitzer observation

- HST WFC3/F125W  $1\sigma = 26.3, 26.0 \text{ mag}_{\text{AB}}$  for A2390 and A1689, respectively
- Spitzer IRAC, MIPS  $24 \mu\text{m}$

Table 2  
Spitzer Super Mosaics

Field	$3.6 \mu\text{m}$ (ks)	Sensitivity ( $\mu\text{Jy}$ )	$4.5 \mu\text{m}$ (ks)	Sensitivity ( $\mu\text{Jy}$ )	$5.8 \mu\text{m}$ (ks)	Sensitivity ( $\mu\text{Jy}$ )	$8.0 \mu\text{m}$ (ks)	Sensitivity ( $\mu\text{Jy}$ )	$24 \mu\text{m}$ (ks)	Sensitivity ( $\mu\text{Jy}$ )
A370	13.0	0.3	12.3	0.3	13.1	1.5	11.8	1.5	2.6	31
A2390	6.3	0.4	6.9	0.4	6.3	1.7	6.6	2.5	0.6	41
A1689	10.8	0.3	10.7	0.3	10.7	1.4	10.3	1.5	0.5	36

Notes. The exposures are the median exposure time in each super mosaic in kiloseconds (ks). The sensitivities represent  $1\sigma$  errors of the aperture photometry.

## 2. Observation and data reduction

### 2.4 VLA observation

- 1.4 GHz observation

	$1\sigma$ [ $\mu\text{Jy}/\text{beam}$ ]	Beam size [“]
A2390	5.6	1”.4
A370	5.7	1”.7
A1689	~ 150	~ 6”

### 2.5 LENSTOOL

- 重カレンズモデル LENSTOOL (Lneib + 1996) を用いる

# 3. Results

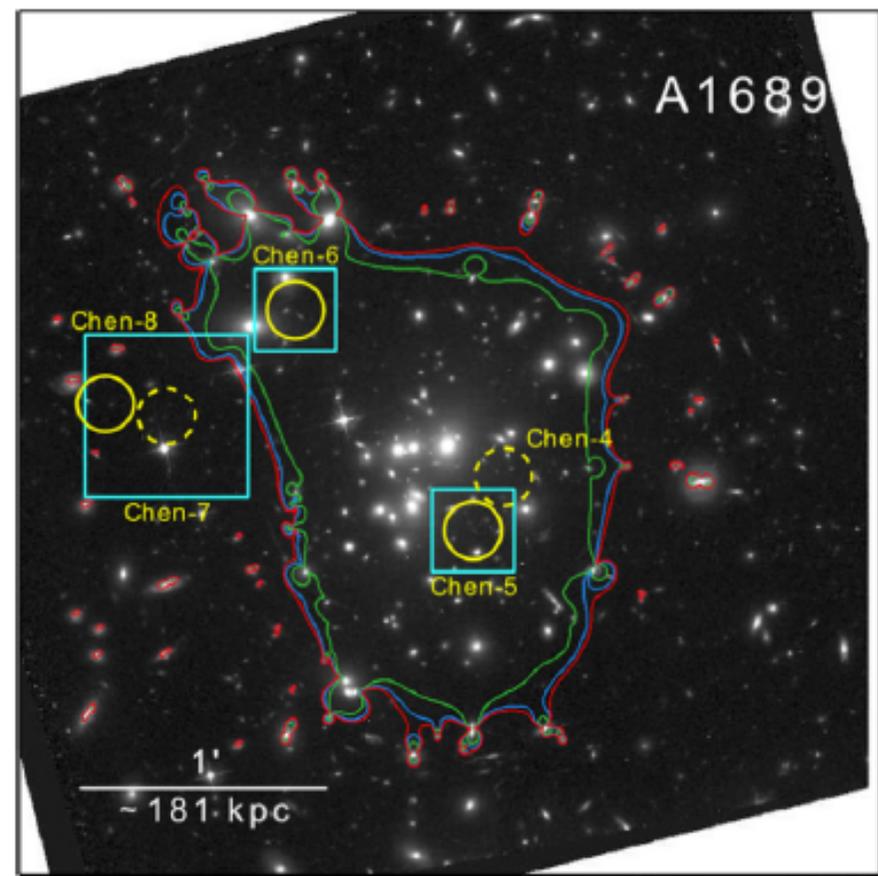
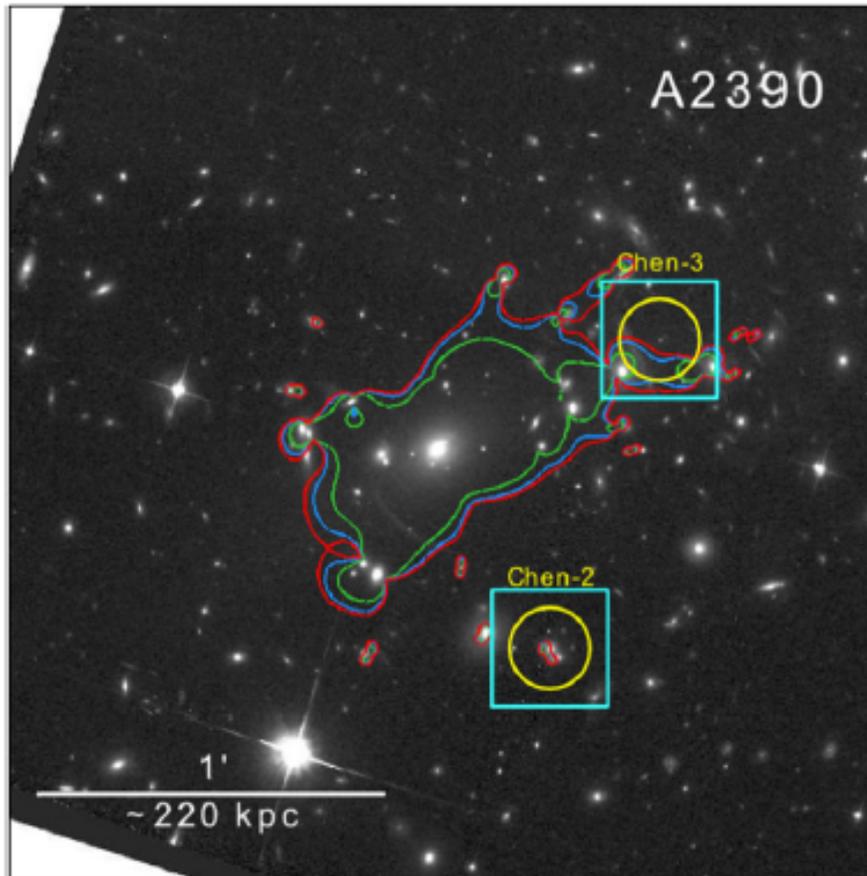
- SMA では 5 / 8 検出
  - 未検出のうち 2 天体 (Chen-1, 4) は SCUBA 2 でも未検出  
=> **spurious detection**
  - もう 1 天体 (Chen-7) は multiple faint source: 詳細は 3.3 節

**Table 3**  
The Properties of the SMA Observed Sources

I.D.	SMA R.A. (J2000) (h m s)	SMA Decl. (J2000) (d m s)	SCUBA R.A. (J2000) (h m s)	SCUBA Decl. (J2000) (d m s)	SCUBA 850 $\mu$ m (mJy)	SCUBA-2 850 $\mu$ m (mJy)	SMA 870 $\mu$ m (mJy)
Chen-1	...	...	02 39 53.83	-01 33 37.0	$2.17 \pm 0.57$	$-0.01 \pm 0.51$	$<2.52 (4 \sigma)$
Chen-2	21 53 35.16	17 41 06.1	21 53 35.48	17 41 09.3	$3.24 \pm 0.78$	$2.35 \pm 0.51$	$3.96 \pm 1.01$
Chen-3	21 53 34.37	17 42 01.5	21 53 34.15	17 42 02.3	$2.64 \pm 0.72$	$1.93 \pm 0.51$	$4.72 \pm 0.89$
Chen-4	...	...	13 11 28.6	-01 20 36	$2.6 \pm 0.8$	$-0.95 \pm 0.48$	$<3.72 (4 \sigma)$
Chen-5	13 11 29.22	-01 20 44.5	13 11 29.1	-01 20 49	$4.7 \pm 0.8$	$4.39 \pm 0.48$	$5.25 \pm 0.87$
Chen-6	13 11 31.93	-01 19 55.1	13 11 32.0	-01 19 55	$3.3 \pm 1.0$	$3.28 \pm 0.50$	$2.73 \pm 0.81$
Chen-7	...	...	13 11 34.1	-01 20 21	$3.2 \pm 1.0$	$4.32 \pm 0.52$	$<2.56 (4 \sigma)$
Chen-8	13 11 34.95	-01 20 17.2	13 11 35.1	-01 20 18	$4.9 \pm 1.6$	$4.15 \pm 0.54$	$3.92 \pm 0.99$

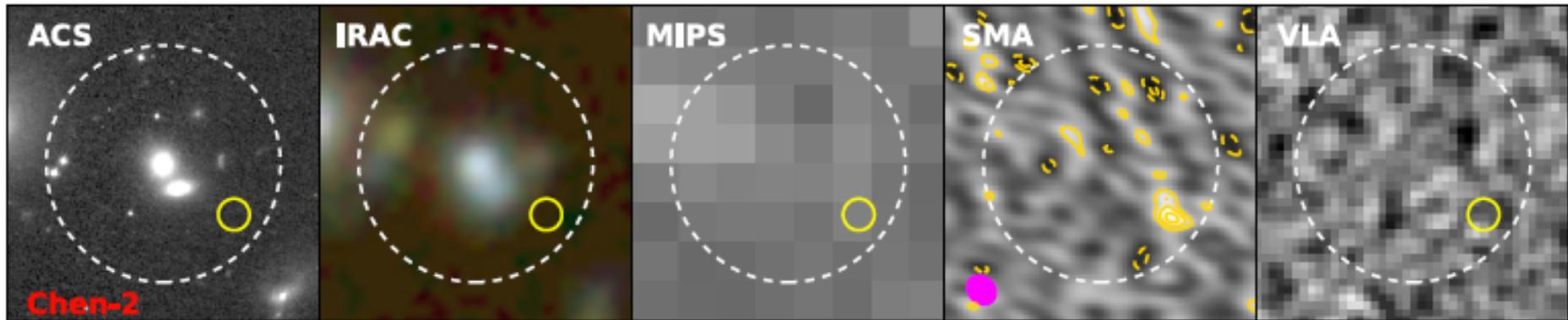
# 3. Results

- SMA では 5 / 8 検出
  - 未検出のうち 2 天体 (Chen-1, 4) は SCUBA 2 でも未検出  
=> **spurious detection**
  - もう 1 天体 (Chen-7) は multiple faint source: 詳細は 3.3 節



# 3. Results

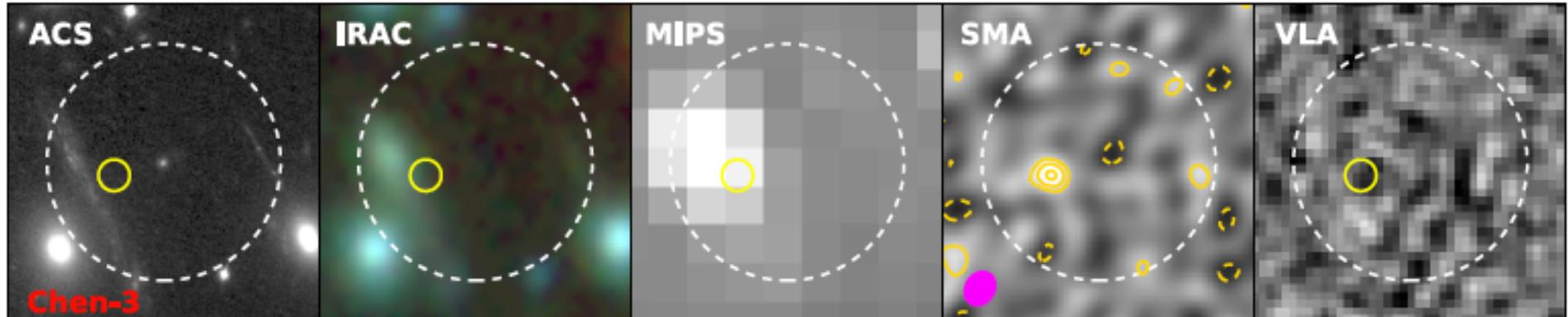
## 3.1 Chen-2



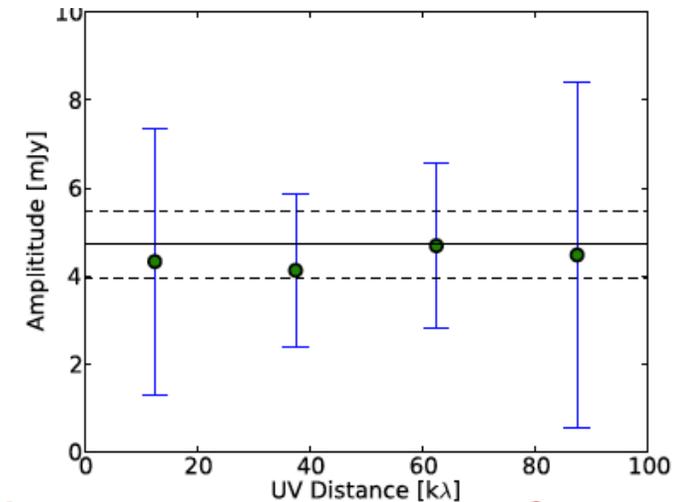
- サブミリ以外で検出がない
  - High-z faint SMG ?
  - VLA 1.4 GHz の  $3\sigma$  upper limit との比は  $z > 3$  を示唆
- 増光率  $\mu = 4.8^{+0.5}_{-0.25}$ 
  - Intrinsic 870  $\mu\text{m}$  flux density =  $0.8 \pm 0.25$  mJy
  - Arp 220 SED ( $T_{\text{dust}} = 47$  K,  $\beta = 1$ ) を仮定すると  $L_{\text{IR}} = (0.62-1.1) \times 10^{12} L_{\odot}$

# 3. Results

## 3.2 Chen-3

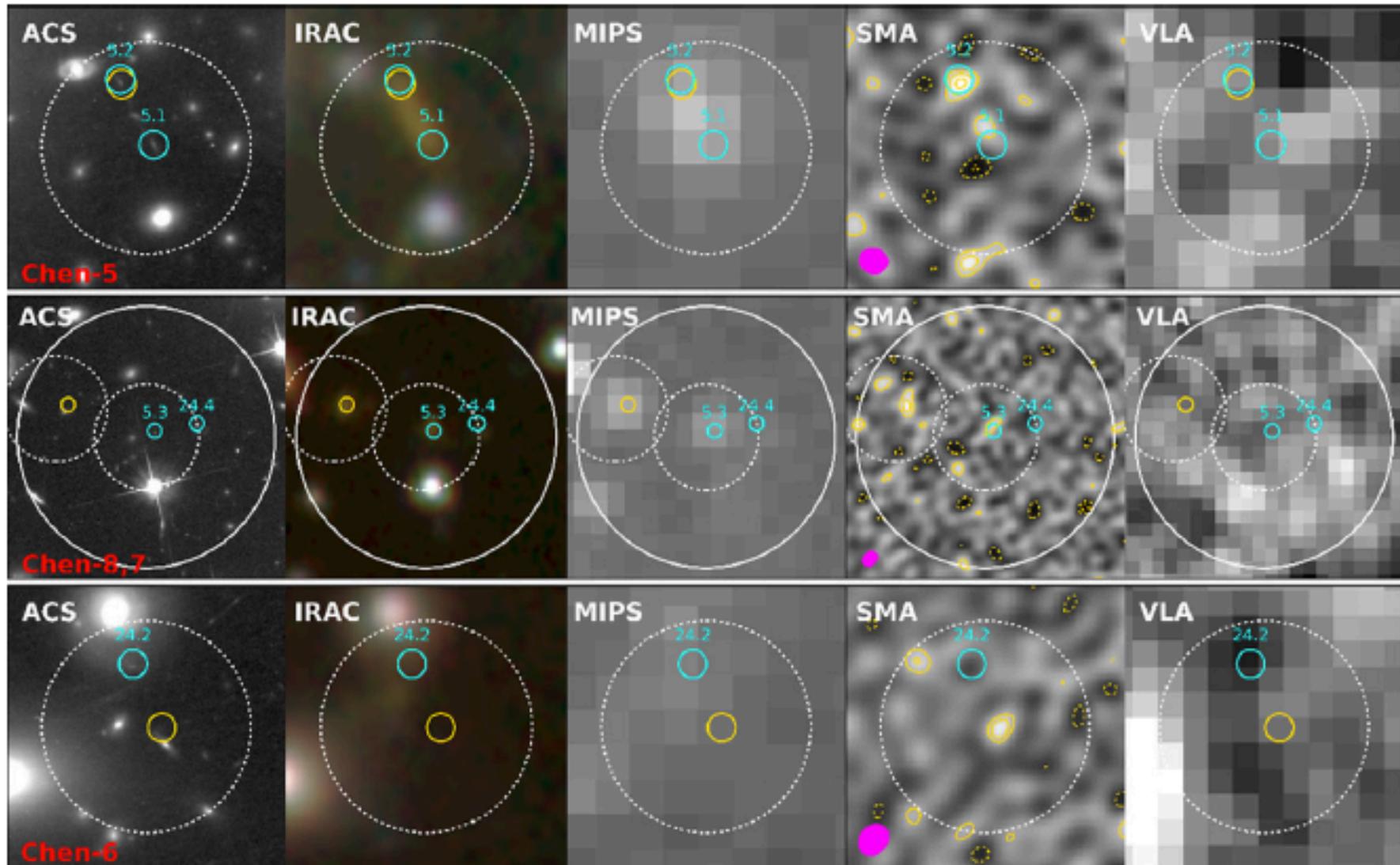


- IRAC と MIPS で対応天体？
  - Optical の arc からの放射
  - VLA  $3\sigma$  との比は  $z > 3.5$  を示唆
- 増光率は  $> 45(!)$
- SMA で分解されていない  $\Rightarrow$  **extremely compact source?**
- Arp 220 SED を仮定すると  $L_{\text{IR}} < 10^{11} L_{\odot}$



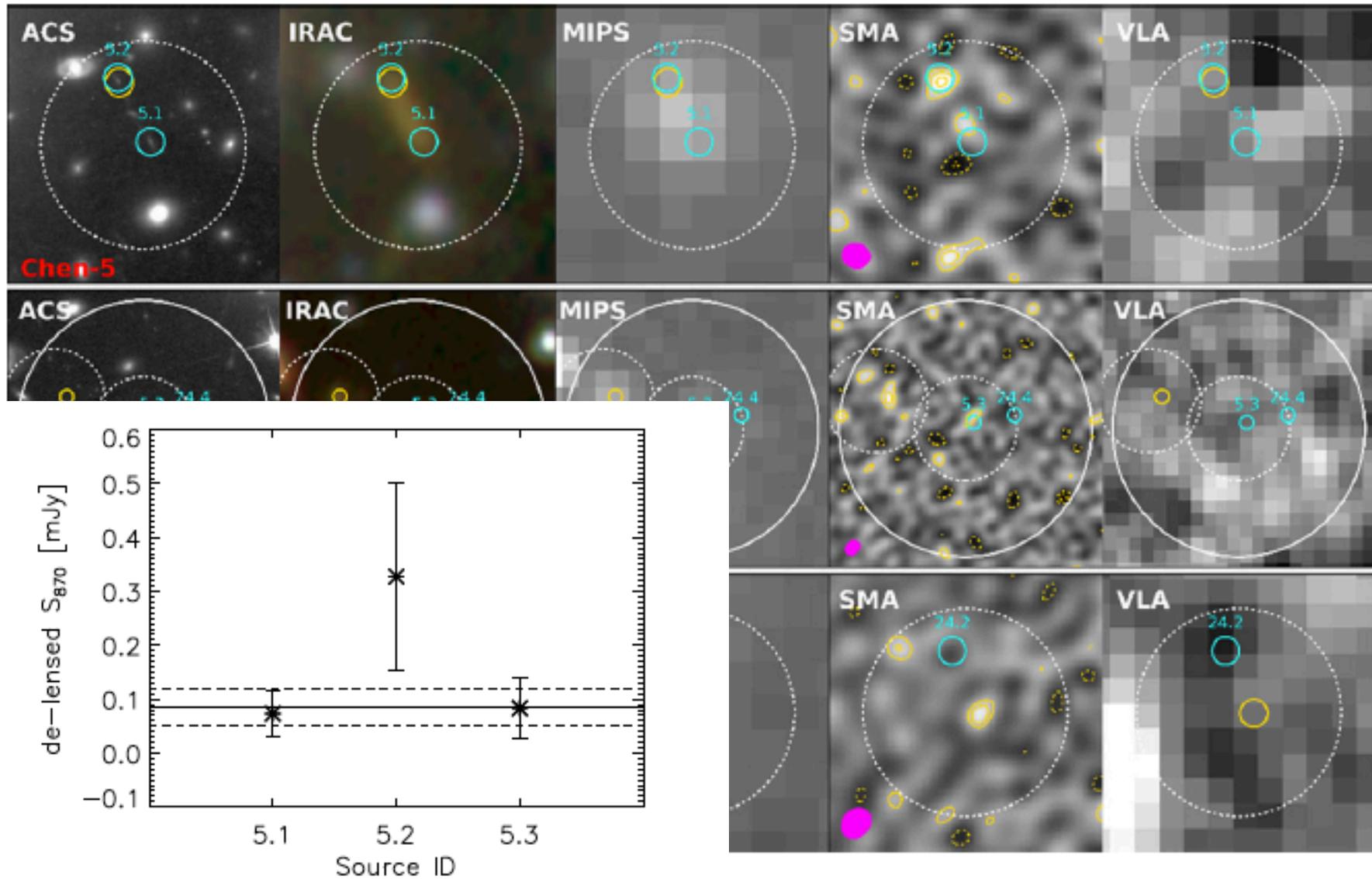
# 3. Results

## 3.2 Chen-4, 5, 6, 7, 8



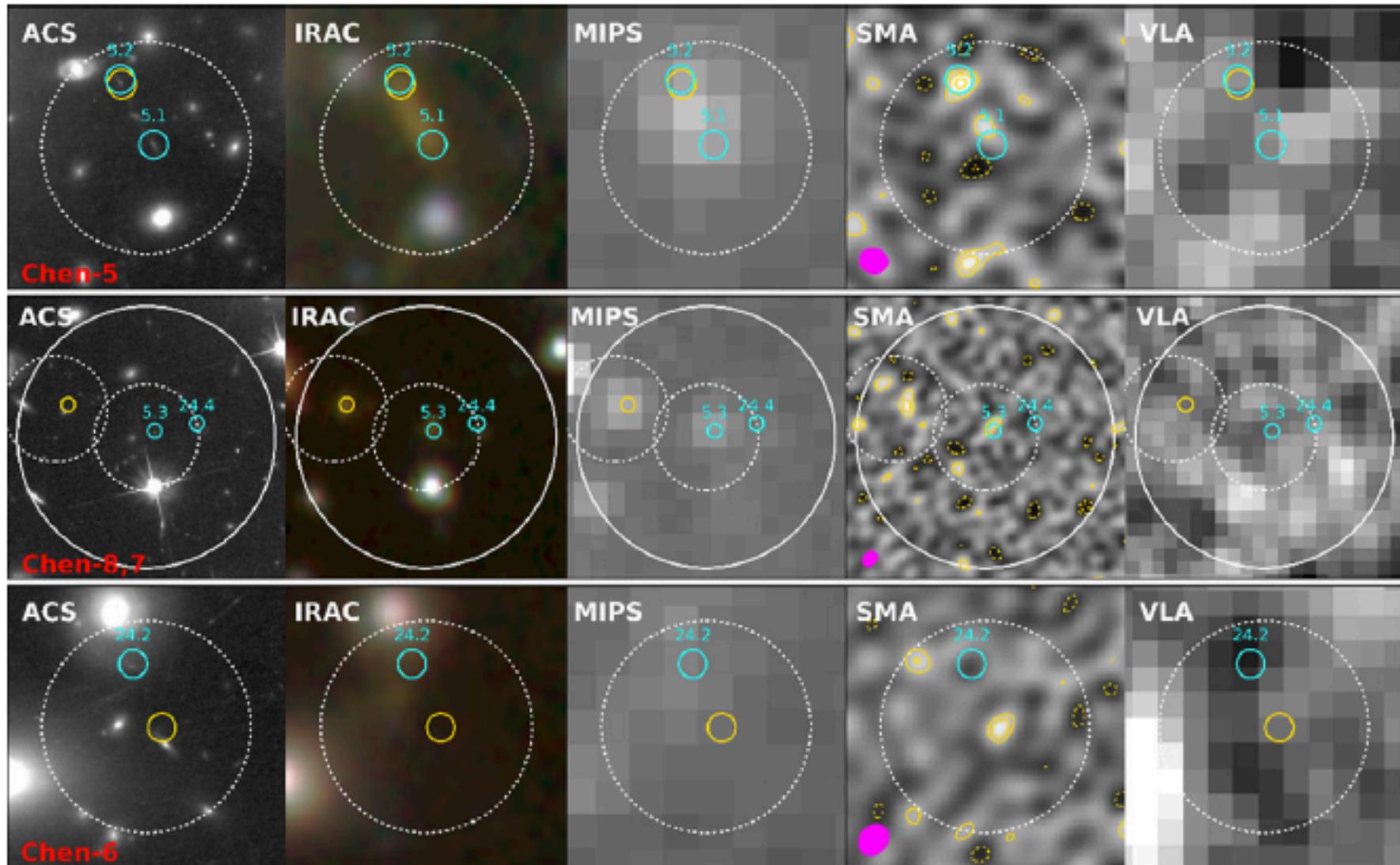
# 3. Results

## 3.2 Chen-4, 5, 6, 7, 8



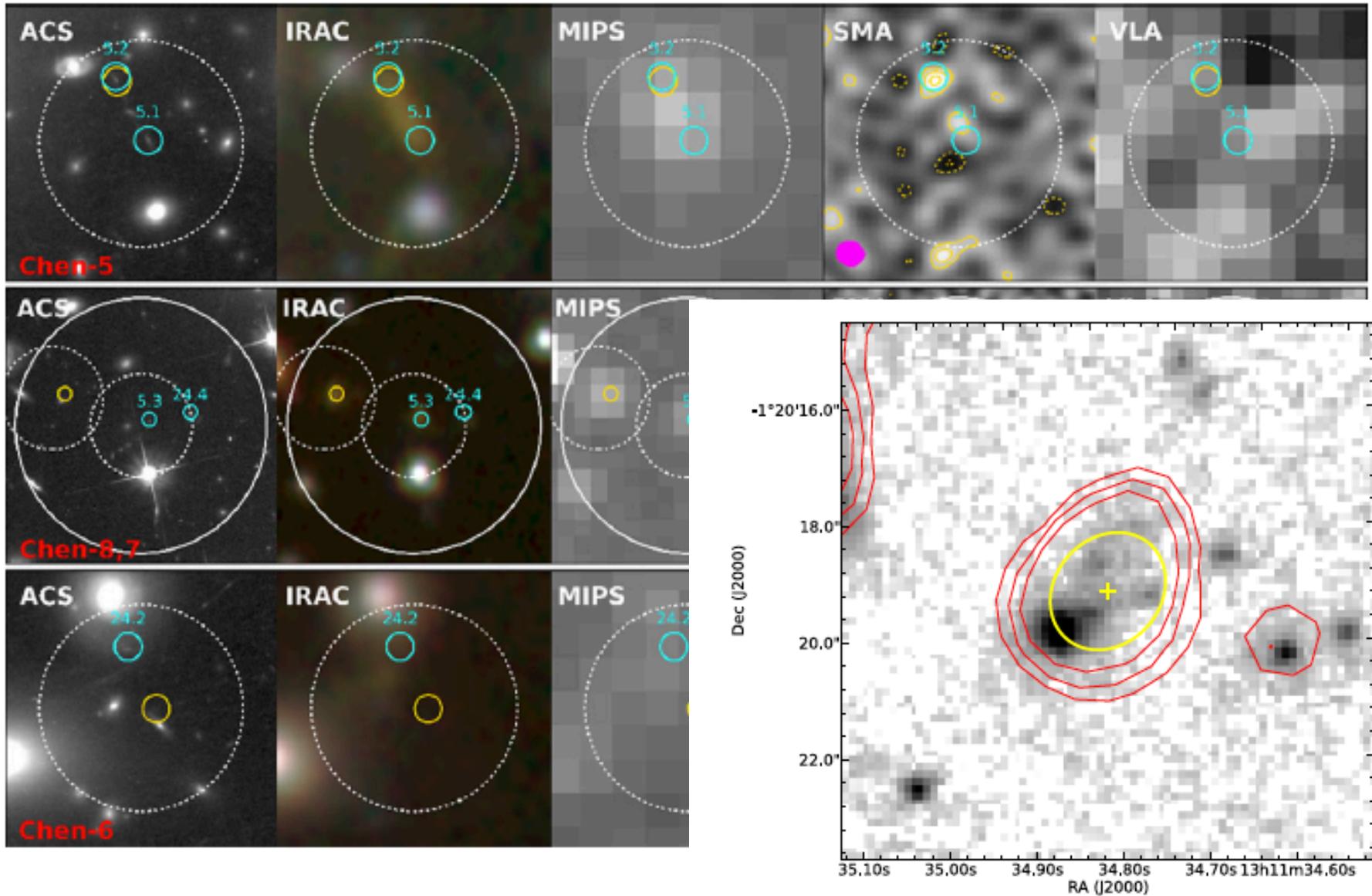
# 3. Results

## 3.2 Chen-4, 5, 6, 7, 8



# 3. Results

## 3.2 Chen-4, 5, 6, 7, 8



# 3. Results

**Table 4**  
The Properties of the SMA Detected Sources

ID	Magnifications	$S_{870, \text{intrinsic}}$ (mJy)	$S_{F125W, \text{intrinsic}}$ (mag)	$z^a$	$\log(L_{8-1000 \mu\text{m}})$
Chen-2	4.8 (4.7–5.3)	0.83 (0.64–0.97)	>26.8	>3.0	11.8–12.0
Chen-3	45 (>45)	0.12 (< 0.12)	>28.2	>3.5	<11.1
Chen-5	19 (16–22)	0.09 (0.05–0.12) <sup>b</sup>	26.6 (26.5–26.8)	2.600	10.7–11.1 <sup>b</sup>
Chen-6	10 (>10)	0.34 (<0.34)	>25.6	>0.5	<11.6
Chen-8	6 (3–9)	0.65 (0.37–1.51)	...	>0.5	11.6–11.8

# 4. Discussion

- MIR/radio counterpart

- MIPS の MIR や VLA の radio データで SMG を cross-identify するというやり方はよく用いられる

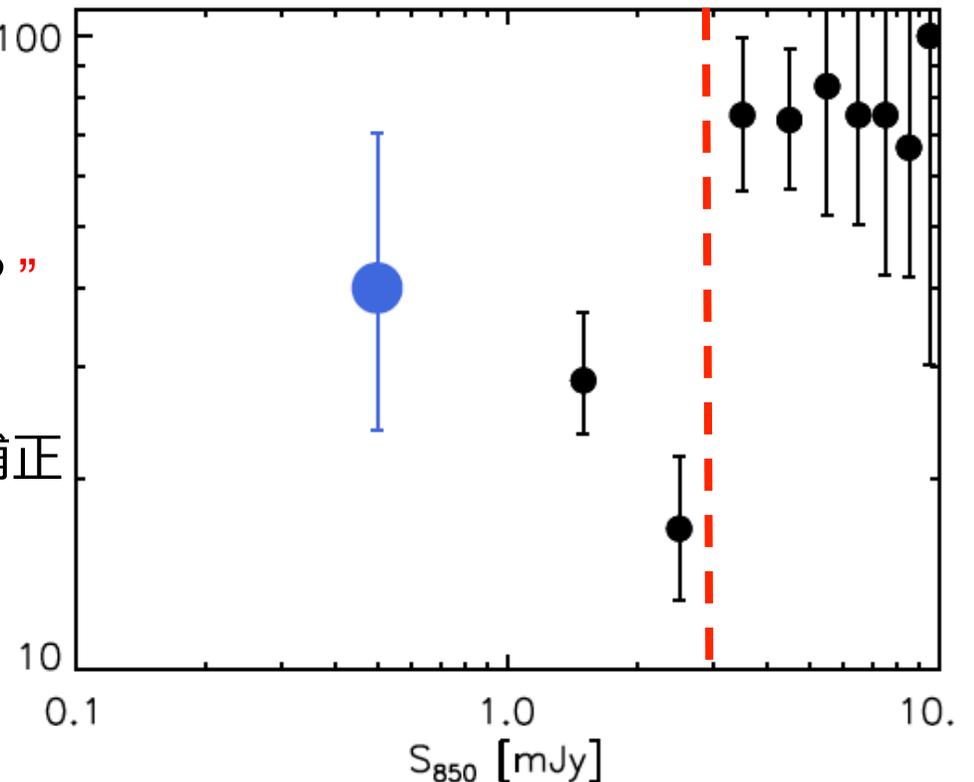
- $S < 3$  mJy では MIPS/radio counterpart の存在する割合が急激に小さくなる

- 重力レンズのため十分に深いデータが得られている

- “これらの天体が high-z source であることを示唆？”

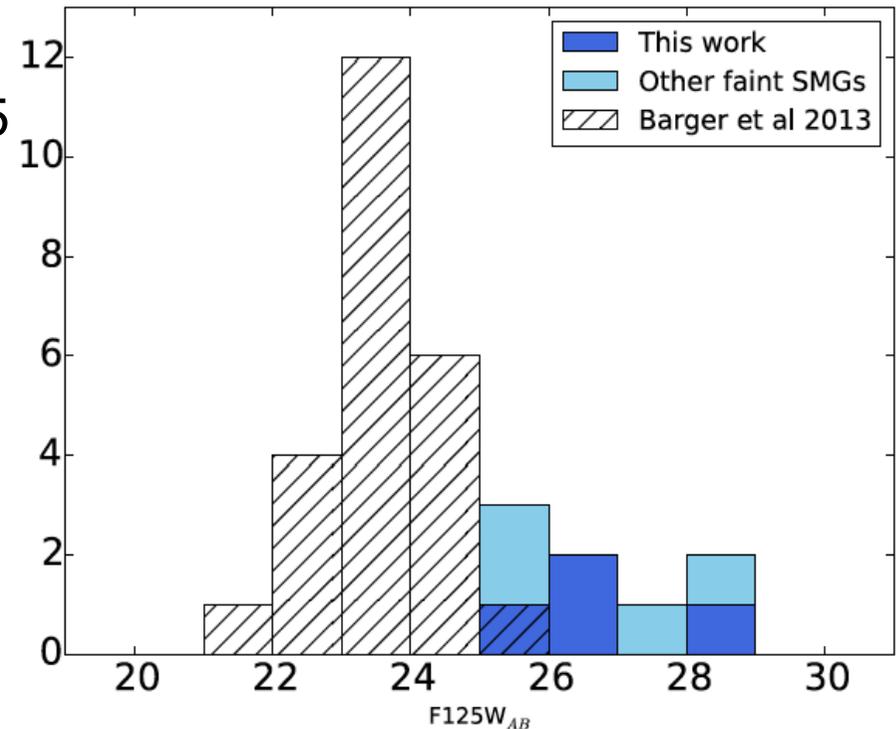
- Submm => 負のK補正

- MIR, Radio => 正のK補正



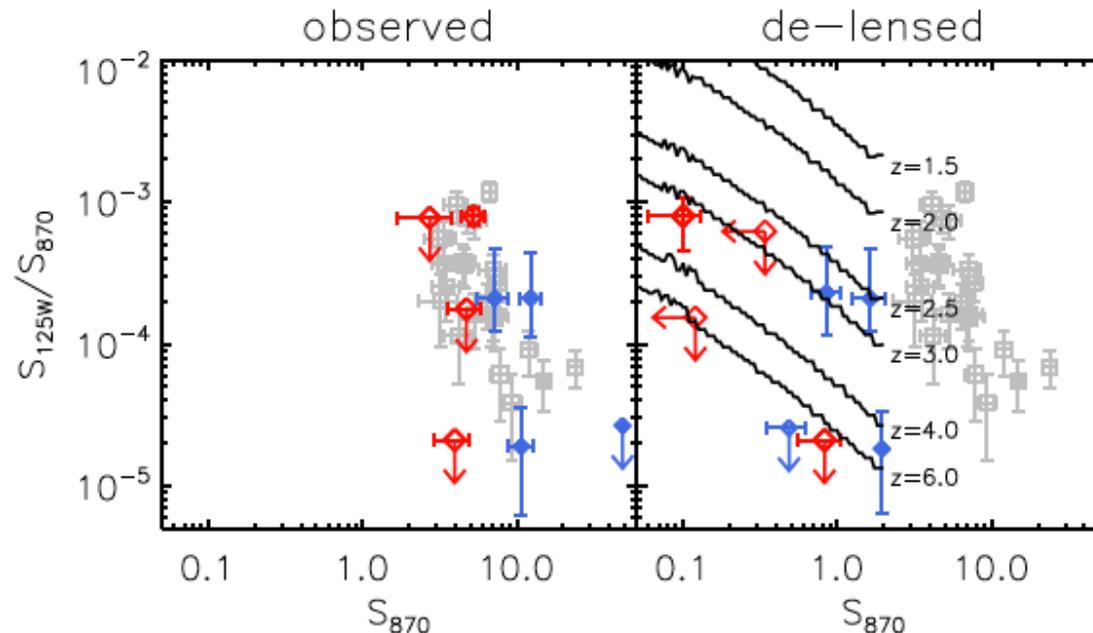
# 4. Discussion

- NIR counterparts
    - Faint SMG (は bright SMG ( $S > 3$  mJy) に比べて, **F125W** で暗い)
  - 既存の optical/NIR survey では**大きな割合の faint SMG** を見逃している
    - 先行研究による示唆と矛盾しない
    - Wang + 2006
      - 850  $\mu\text{m}$  EBL の 1/4 は  $z < 1.5$  の H-band, 3.6  $\mu\text{m}$  detected galaxies から放出される
    - Chen + 2013
      - Bright SMG の 850  $\mu\text{m}$  EBL への寄与は 1/4
- => 850  $\mu\text{m}$  EBL の半分は NIR で分解されていない**



# 4. Discussion

- F125W-to-870  $\mu\text{m}$  flux ratio
  - サブミリフラックスが暗い天体でダスト減光が少ないならば, NIR/submm 比は faint SMG で大きくなるはず
  - ところが...
    - Faint SMG は F125W で暗く, F125W/870 $\mu\text{m}$  比は bright SMG とあまり変わらない
  - Faint SMG は **high-z に存在** or **extremely dusty**



# 5. Summary

- SMA で SCUBA を用いた重力レンズ銀河団探査で検出された faint SMG を観測
- 検出された銀河は dusty universe での星形成活動で支配的な star-forming galaxy
- NIR, MIR, radio で暗い
- High-z galaxy or extremely dusty galaxy
- Optical SFH に含まれないような SFG が high-z に多く存在している

# おまけ

- The faint SMG discovered by ALMA 1.1 mm survey

