

# 塵に埋もれた宇宙の星形成

廿日出 文洋

(国立天文台・チリ観測所)



# 自己紹介

## 研究歴

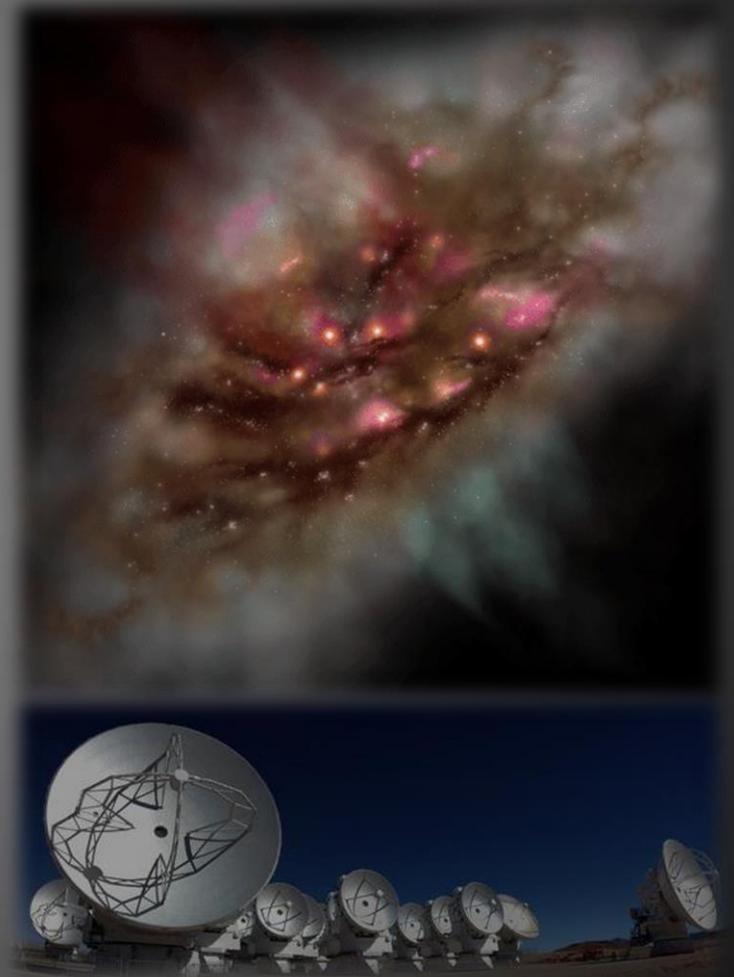
- 野辺山宇宙電波観測所・  
研究員
- 学振研究員
  - 京都大学
  - Open University (UK)
- 国立天文台・チリ観測所
  
- 赤外線より長い波長、特に  
サブミリ波・ミリ波・センチ波  
を使って遠方銀河を観測

## 夏の学校

- 2005～2008参加

# 内容

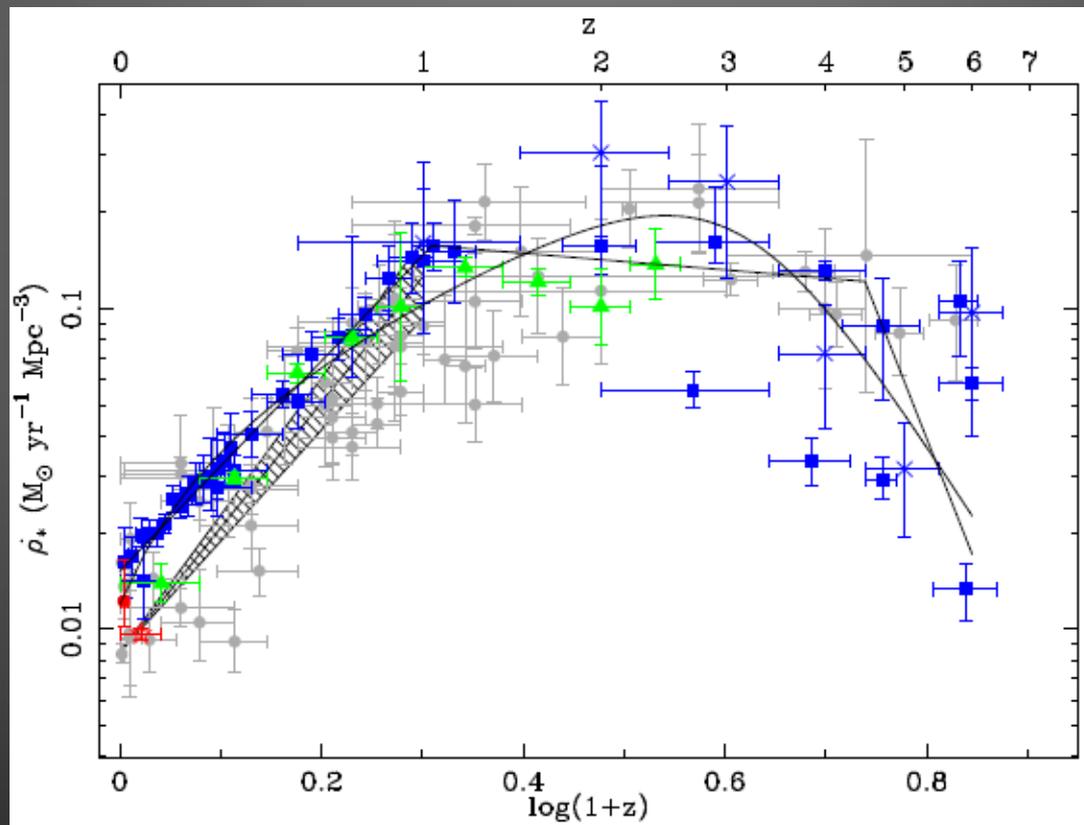
- Introduction
  - ダストに隠された星形成活動
  - ミリ波・サブミリ波観測の重要性
  - サブミリ波銀河
- ミリ波・サブミリ波探査
  - サブミリ波銀河の寄与
    - 宇宙の星形成活動
    - ミリ波・サブミリ波での背景放射
- ALMA
  - ALMAの成果
  - 今後



# INTRODUCTION

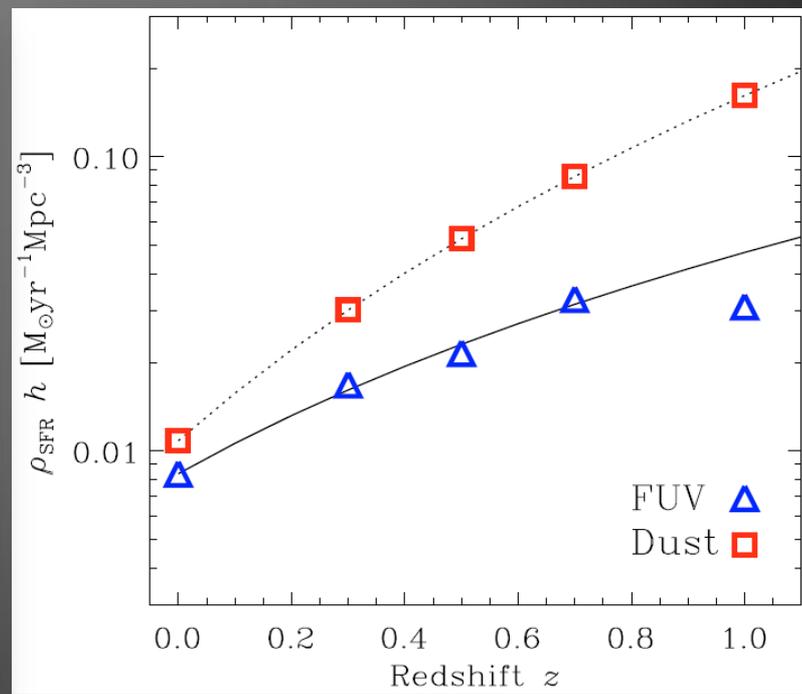
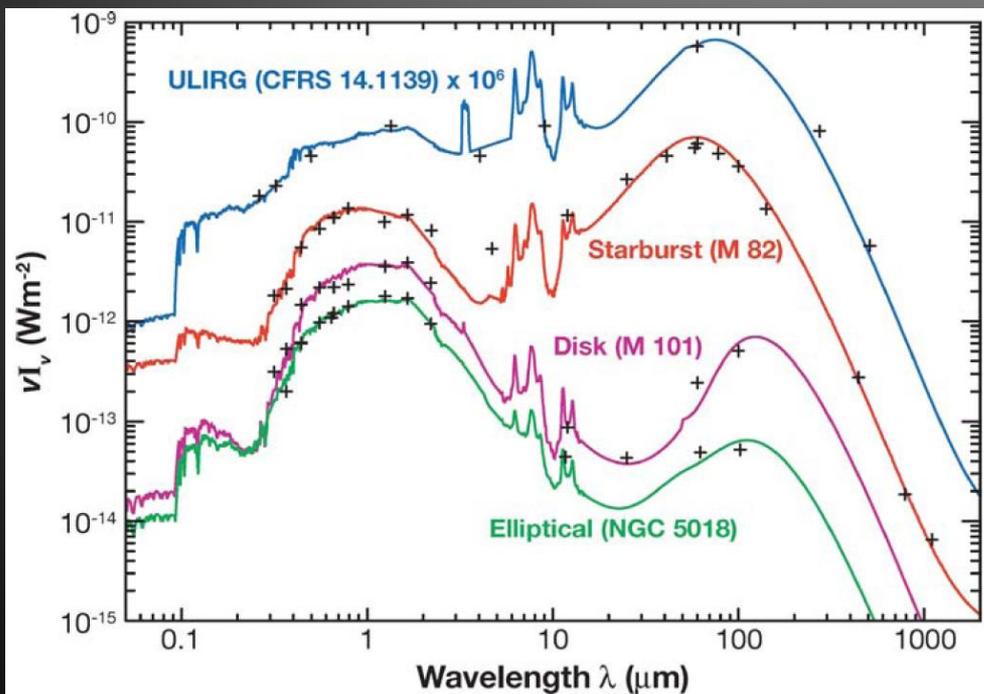
# 宇宙星形成史

- 宇宙における星形成活動の活発さ
  - optical/UV-selected galaxyの観測から $z \sim 7$ まで



# ダストに隠された星形成活動

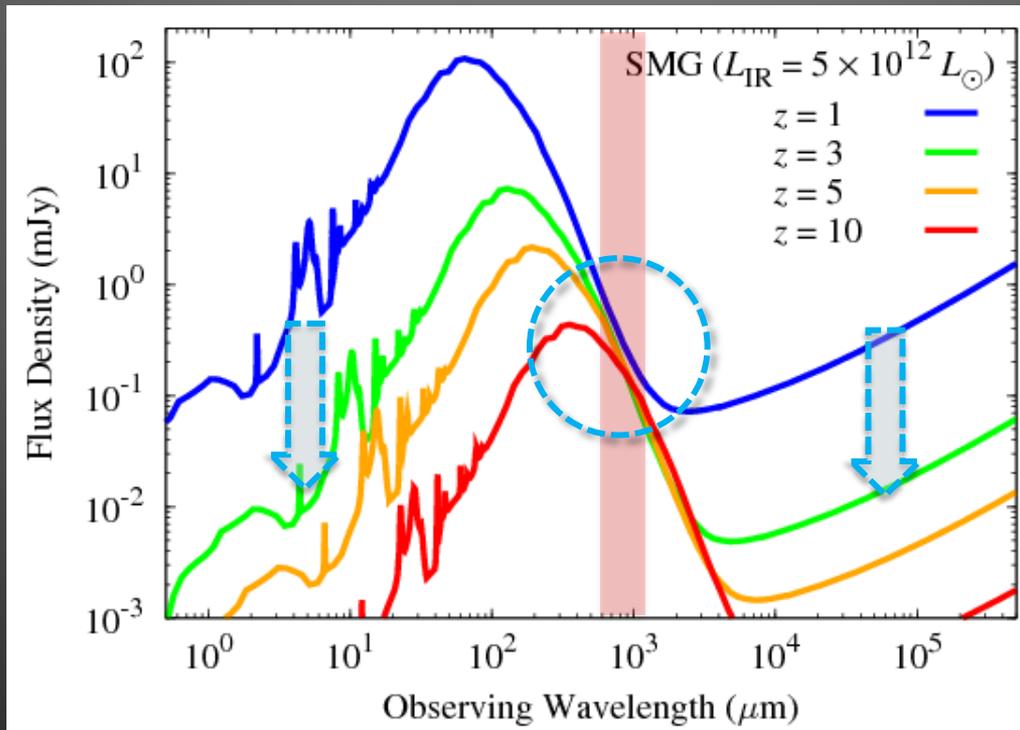
- 大質量星から放射された紫外光はダストに吸収  
→ 赤外～サブミリ波・ミリ波帯でダストから再放射
- 遠方宇宙では、ダストに隠された星形成が増加  
→ ダストからの放射を捉える観測が必要



(Takeuchi+05)

# ミリ波・サブミリ波観測の重要性

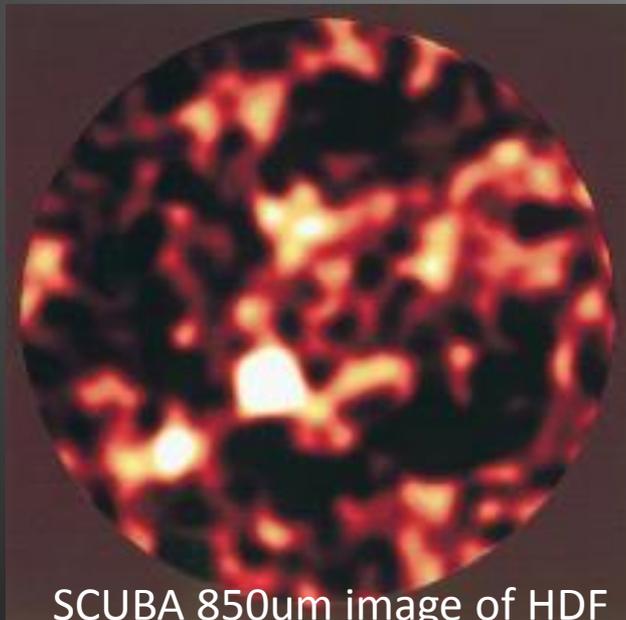
- 数百 $\mu\text{m}$  ~ 数mm
- cold dust ( $\sim 10\text{-}100\text{ K}$ ) からの熱放射
- 観測フラックスが赤方偏移によらずほとんど一定  
→ 遠方銀河を効率よく検出できる



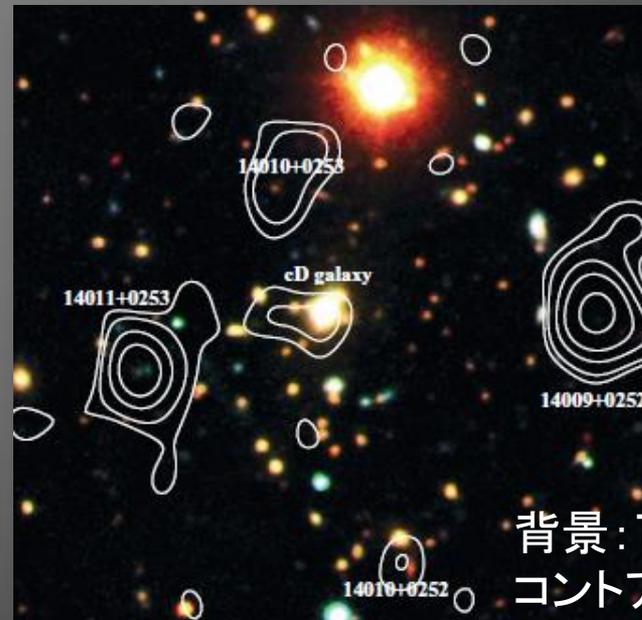
ダストを豊富に持ち  
活発に星形成を行う  
銀河のSED

# サブミリ波銀河 (Submillimeter Galaxy: SMG)

- 高感度のサブミリ波カメラの登場(1990年代終わり)
- サブミリ波で非常に明るい銀河種族「サブミリ波銀河」を多数検出



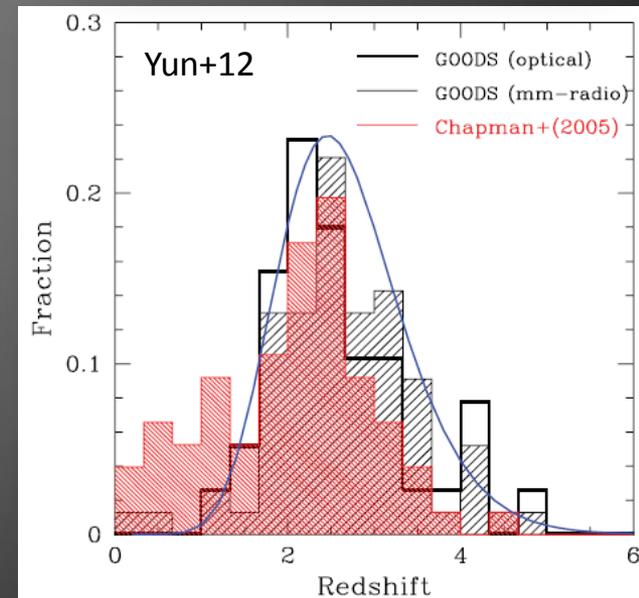
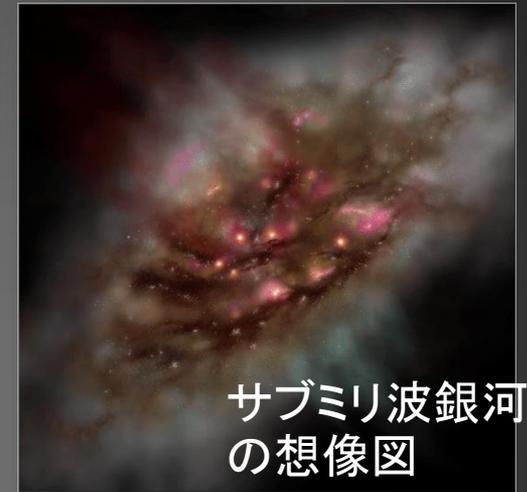
SCUBA 850um image of HDF  
(Hughes+98)



背景: 可視光  
コントア: サブミリ波  
(Blain+02)

# サブミリ波銀河

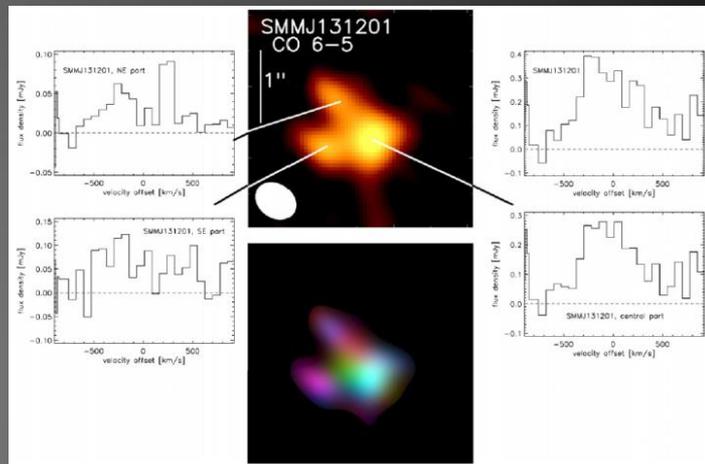
- エネルギーの大部分を遠赤外線～サブミリ波・ミリ波で放射
  - $L(\text{FIR}) \sim > 10^{12-13} L_{\text{sun}}$
- ダストに厚く覆われた爆発的星形成銀河
  - $\text{SFR} \sim 100-1000 M_{\text{sun}}/\text{yr}$
- 星形成のもととなる分子ガスも豊富
  - Molecular gas mass  $\sim 10^{10-11} M_{\text{sun}}$
- 赤方偏移分布
  - $z \sim 1-4$ ,  $z_{\text{median}} \sim 2.5$  (e.g., Chapman+05; Yun+12)
  - $z > 4$ , 5 でも検出 (e.g., Capak+08; Riechers+10)
- 近傍宇宙の大質量楕円銀河の祖先？



# 激しい星形成活動の引き金は？

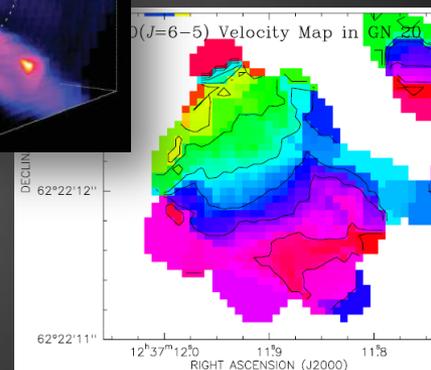
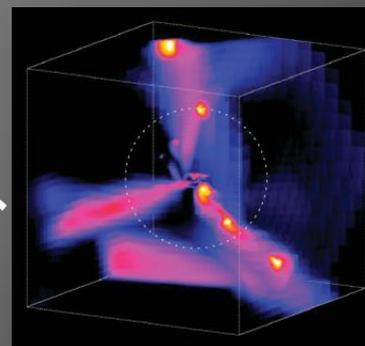
- Major Merger

- 衝突・合体に伴う激しい星形成
- 比較的短期間の星形成活動
- 近傍ULIRGsのスケールアップ版？



- Smooth Accretion

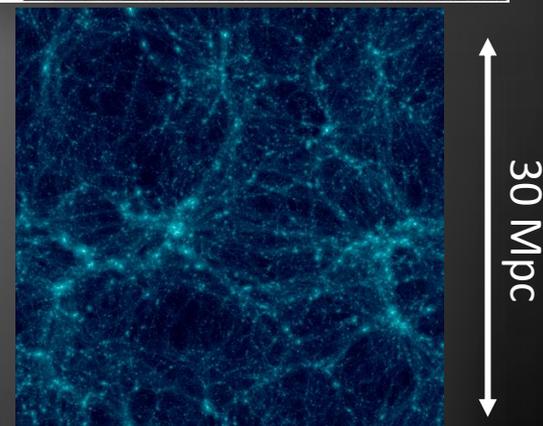
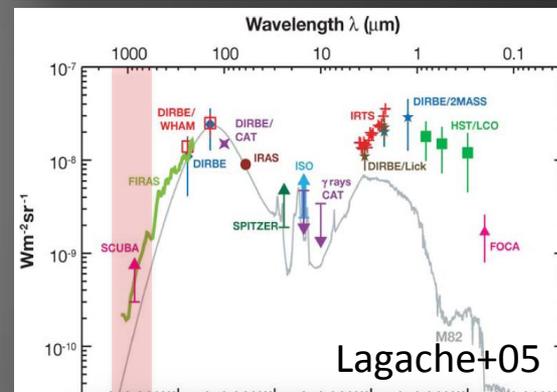
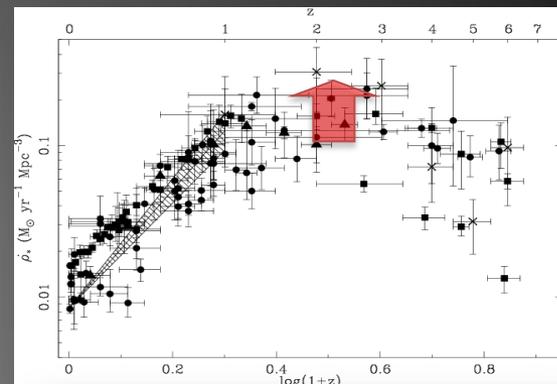
- 周囲からガスが連続的に流れ込み、星形成が起こる
- 比較的長時間の星形成活動
- 一般的な銀河のスケールアップ版？



(Carilli+10)

# サブミリ波銀河探査の意義

1. ダストに隠された星形成を暴く  
→ 真の宇宙星形成史
2. サブミリ波銀河の形成進化や  
他の銀河種族との関係  
→ 銀河の形成・進化過程の解明
3. 宇宙背景放射への寄与  
→ 銀河進化モデルへの制限
4. 宇宙大規模構造との関連  
→ ダークマター分布をトレース  
→ 宇宙論モデルへの制限



# サブミリ波銀河探査

# サブミリ波望遠鏡

- 大気吸収の少ない高地に建設
  - チリ・アタカマ高地(標高5000メートル)



ASTE



NANTEN2



APEX



ALMA

- ハワイ・マウナケア山(標高4000メートル)



CSO



JCMT



SMA

- 他



PdBI



IRAM 30m



AKARI



Herschel

# Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)

- ASTE

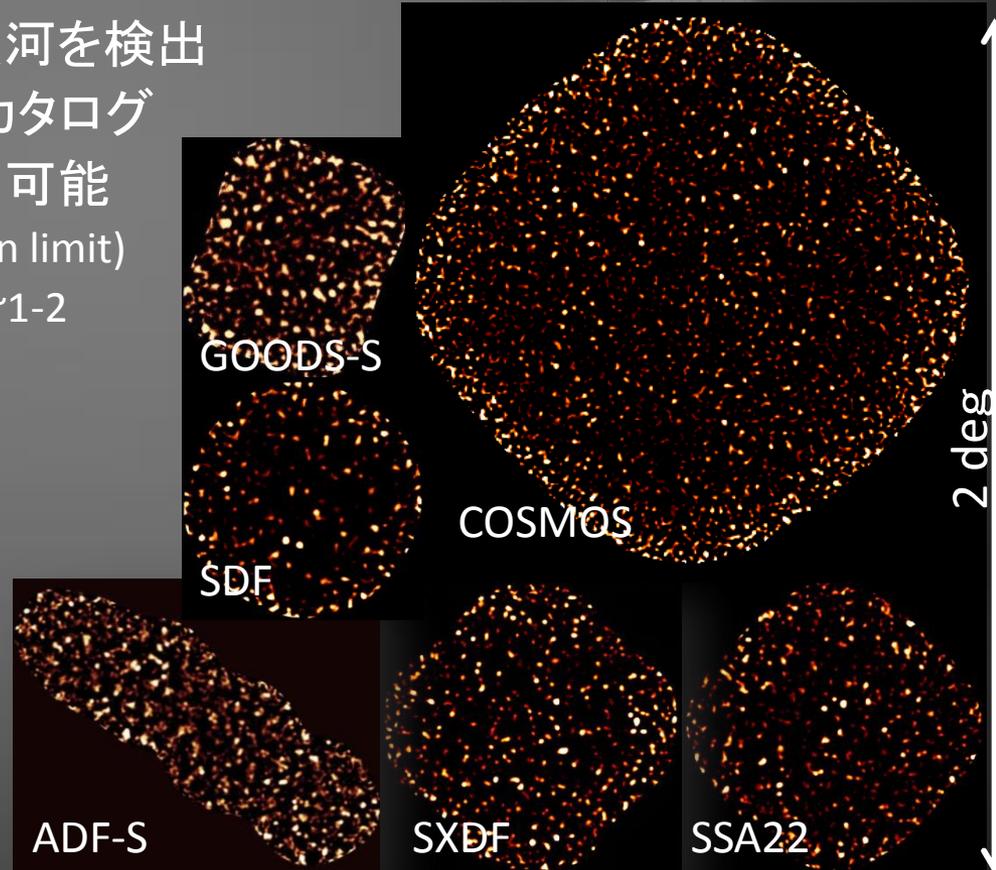
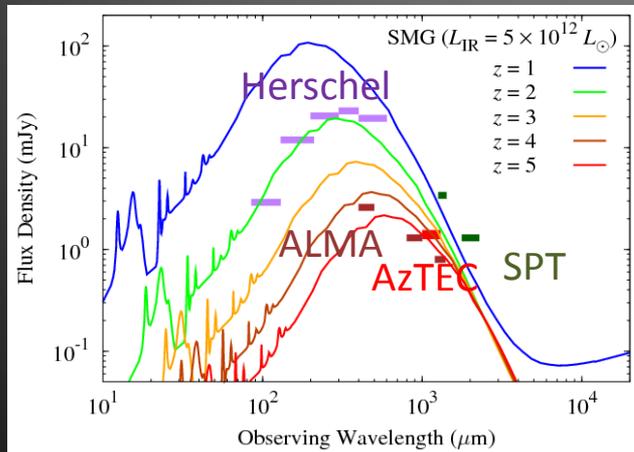
- 口径10mのサブミリ波望遠鏡
- 南米チリ、アタカマ砂漠、標高4860 m
- ~230 GHz – 1 THz receivers
- AzTEC camera
  - 1.1 mm wavelength
  - 144 pixels



# AzTEC/ASTE 1.1mm 探査

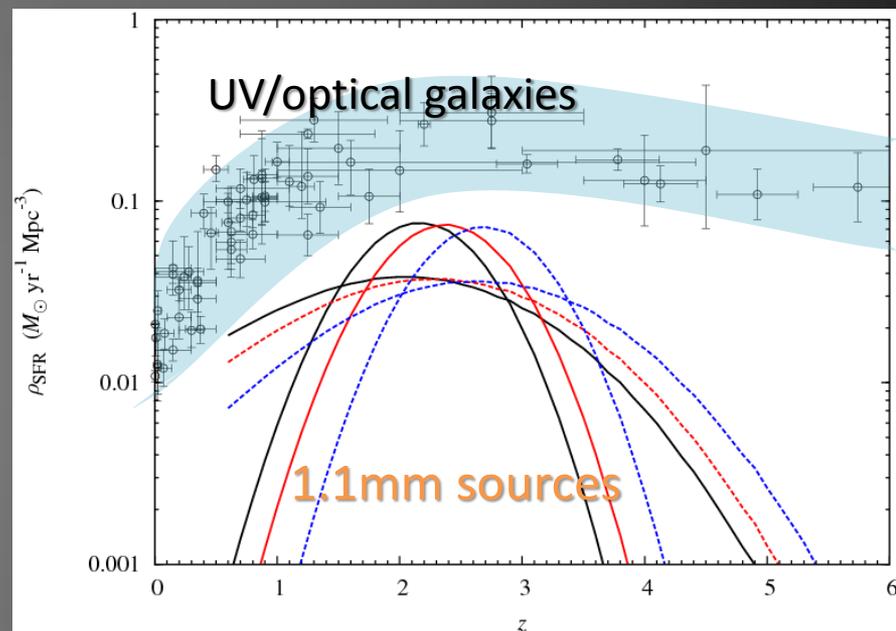
- サブミリ波銀河探査

- total coverage  $>3 \text{ deg}^2$
- $1\sigma \sim 0.5\text{-}1 \text{ mJy}$
- 1000個を超えるサブミリ波銀河を検出
- 850-1100 $\mu\text{m}$ 帯で最大のカタログ
- $z > 3$ のサブミリ波銀河も検出可能
  - c.f., Herschel:  $z < \sim 3$  (confusion limit)
  - South Pole Telescope (SPT):  $z \sim 1\text{-}2$



# サブミリ波銀河の寄与

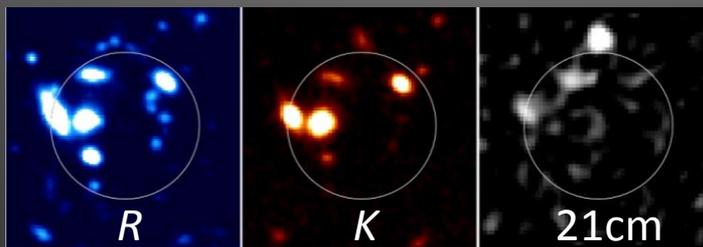
- 星形成活動への寄与
  - UV/optically-selected galaxiesのおよそ1/10 - 1/5
  - $z \sim 2-3$ における星形成活動の $\approx 10-20\%$
- 背景放射への寄与
  - 1.1mm帯での背景放射の $\sim 10-20\%$
  - より暗い天体が大きく寄与



(Hatsukade+11)

# サブミリ波観測の限界

- サブミリ波銀河は非常に明るい特殊な銀河種族
  - サブミリ波銀河よりも暗い銀河は？
  - サブミリ波銀河の内部構造は？
- 感度・空間分解能
  - 1天体受けるのに～数時間かかる
  - コンフュージョン限界のため、くらい天体を検出するのは困難
  - 既存のサブミリ波カメラは空間分解能～10-30''
  - サブミリ波干渉計では空間分解能<1''も達成できるが、長時間積分時間が必要



白丸：  
典型的なサブミリ波カメラ  
の分解能

# ALMA時代のサブミリ波観測

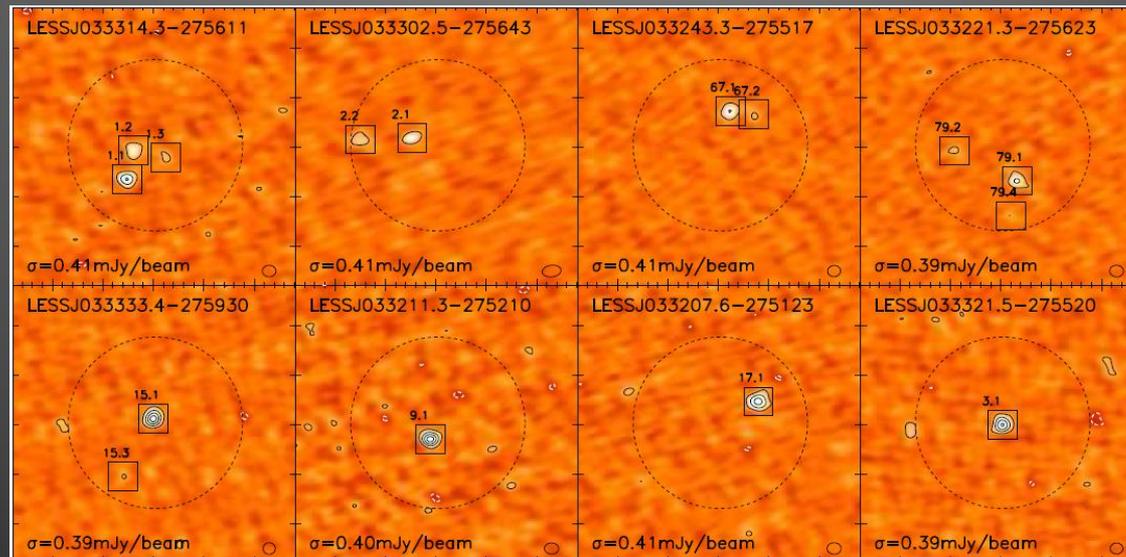
# Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)

- 世界最大・最高性能のミリ波・サブミリ波干渉計
  - 日米欧を中心とした国際プロジェクト
  - 南米チリのアタカマ砂漠の標高5000mに建設中
  - 最終的に66台のアンテナ(口径12m x 50 + ACA)
  - 感度・空間分解能ともに既存の望遠鏡の10倍以上！
- 初期科学運用
  - 2011年9月～
  - アンテナ数 16 – 32



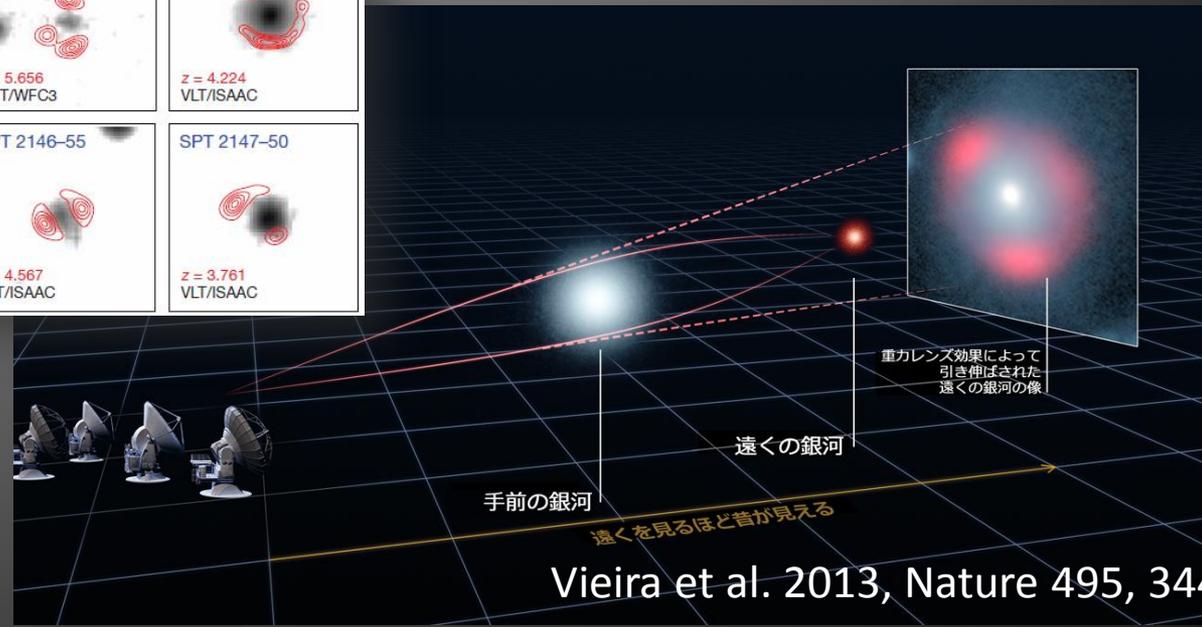
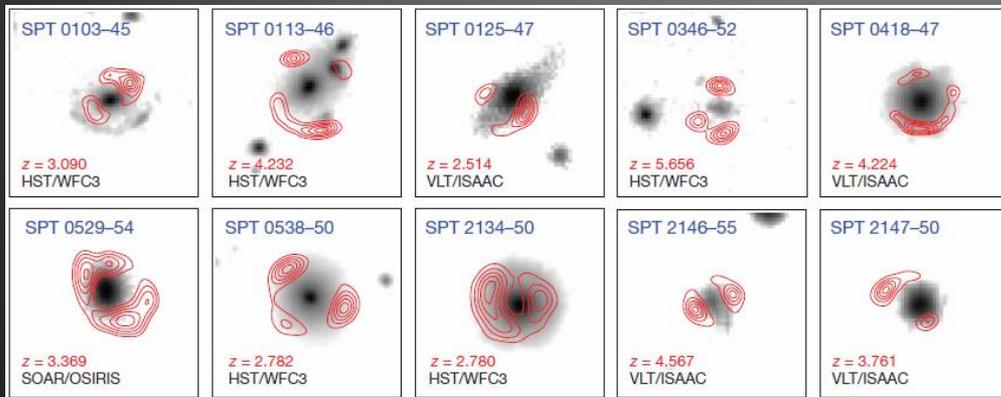
# ALMA初期科学運用の成果

- Deep survey of SMGs in Chandra Deep Field South
  - 122個のサブミリ波銀河をALMAで観測
  - FWHM  $\sim 1.5''$  (c.f.,  $19''$  for LABOCA)
  - 35% - 50% が複数のソースに分解



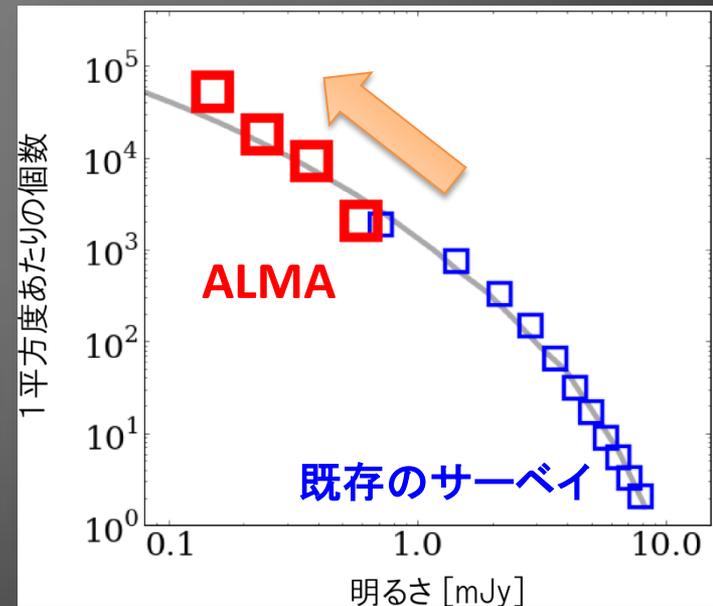
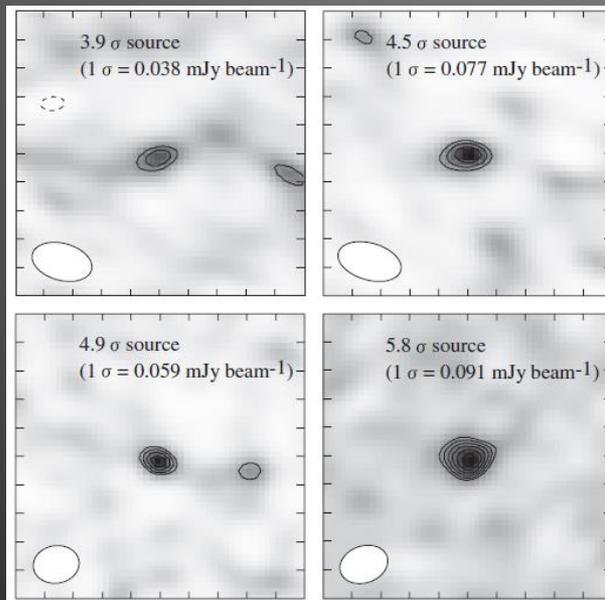
# ALMA初期科学運用の成果

- Dusty starbursts galaxies in the early Universe
  - 重力レンズを利用して26個のSMGの赤方偏移を測定
  - 少なくとも10個のSMGが $z > 4$
  - これまで考えられていたよりも高赤方偏移に多く分布



# ALMA初期科学運用の成果

- Faint end of 1.3 mm number counts
  - 既存のサーベイよりも $\sim 10$ 倍暗い天体の個数密度を測定
  - 1.3mmにおける背景放射のうち、およそ80%が点源に分解
  - 爆発的星形成銀河であるサブミリ波銀河と、より穏やかな一般的星形成銀河をつなぐ重要な一歩



# ALMAと今後

- ALMA cycle 2
  - 10月下旬にCall for Proposal、締切は12月
  - 世界最高性能の装置に是非観測提案を！
  - 複数の大学でタウンミーティング(説明会)を開催予定
    - 北大、東北大、IPMU、JAXA、京大、大阪大/神戸大、愛媛大、鹿児島大、Hawaii/Subaru、天文台三鷹
- 他波長望遠鏡との連携も必須

