

AzTEC/ASTE サブミリ波広域探査でさぐる サブミリ波銀河とproto-QSO

田村 陽一

(国立天文台 野辺山宇宙電波観測所)

河野 孝太郎 (東大), Grant Wilson (UMass),

廿日出 文洋, 内一・勝野 由夏, 五十嵐 創 (東大), 伊王野 大介, 川辺 良平, 中西 康一郎, 江澤 元 (NRO)

Min Yun, Jason Austermann, Thushara Perera, Kimberly Scott (UMass),

David Hughes, Itziar Aretxaga (INAOE), David Wilner (Harvard-Smithsonian CfA),

David Alexander, Bret Lehmer, 松田 有一 (Durham U.), 山田 亨, 内一 由香, 林野 友紀 (東北大)

AzTEC/ASTE チーム

研究会「超広域サーベイによる巨大ブラックホール進化の研究：観測と理論の連携」

松山, 愛媛, 15-17 Oct. 2009



なぜサブミリ波で遠方を観測？

＊ ① “隠された” 星形成の歴史をあばく

- ＊ 星形成が活発な銀河では、大質量星がガス・ダストに隠される
- ＊ 宇宙が歩んできた星形成活動の “Complete” な描像
- ＊ SMBH 形成現場もガス・ダストに隠されている

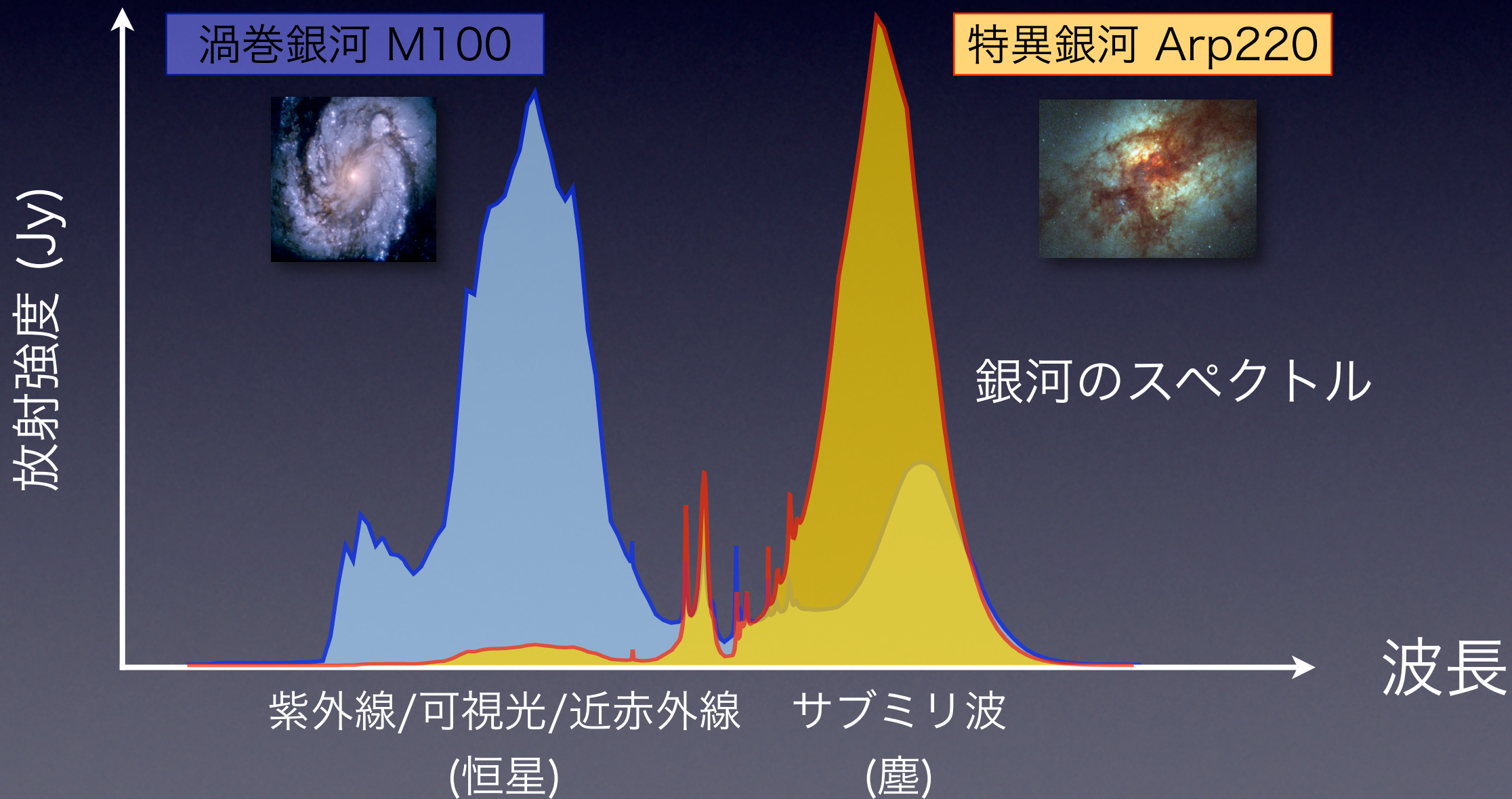
＊ ② (ダスト放射をみるかぎり) 遠方でも暗くならない

- ＊ ダスト熱放射のレイリー・ジーンズ域 --> 負のK補正



① ダストに“隠された”星形成

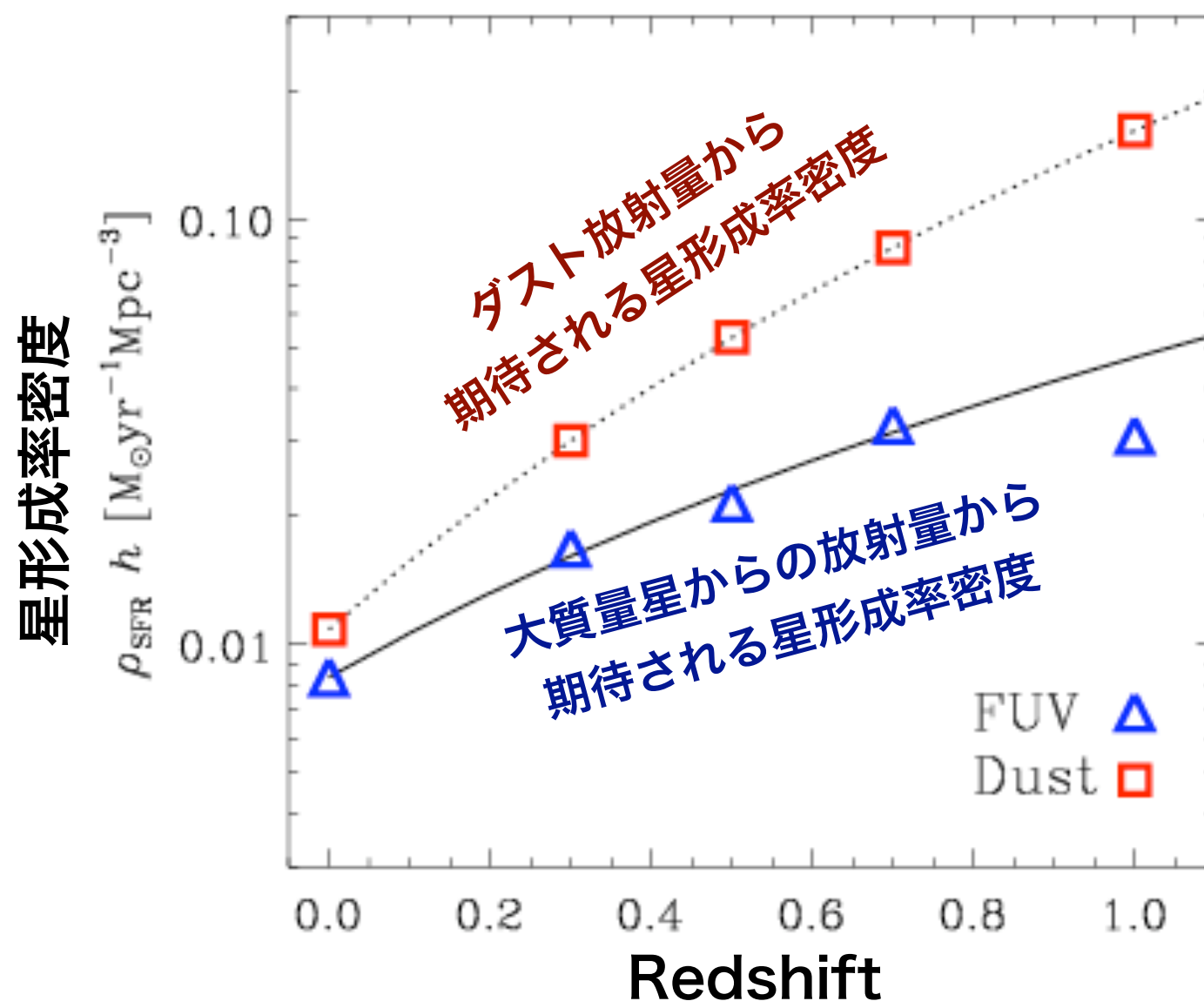
＊ 高温の恒星がダストを暖め、ダストが遠赤外線～サブミリ波を放射





① ダストに“隠された”星形成

- ＊ 銀河形成のきわめて基本的な素過程である“星形成”は、可視光だけでは拾いきれない

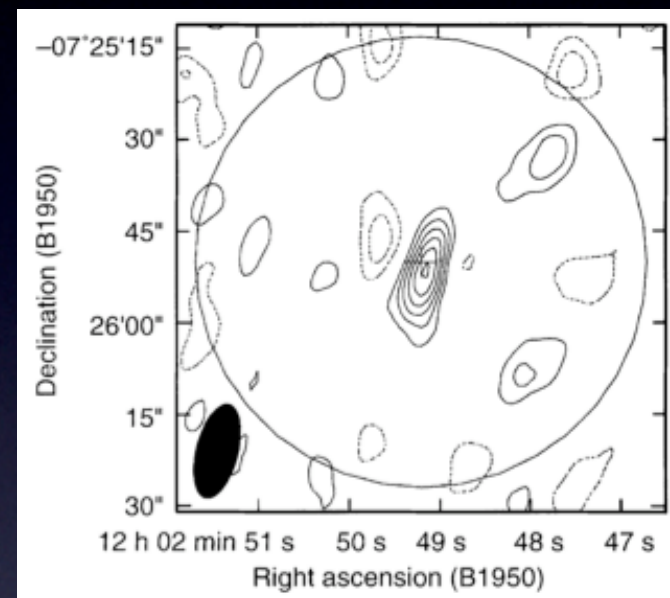
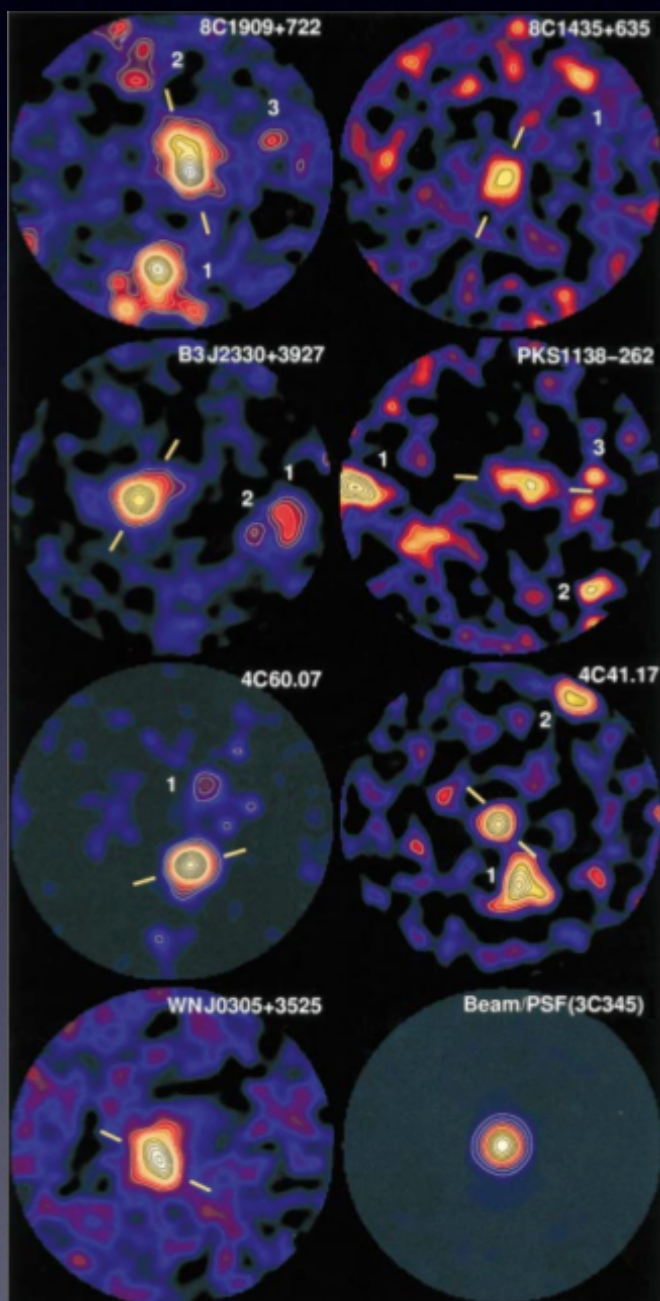


＊ Takeuchi et al. (2008)

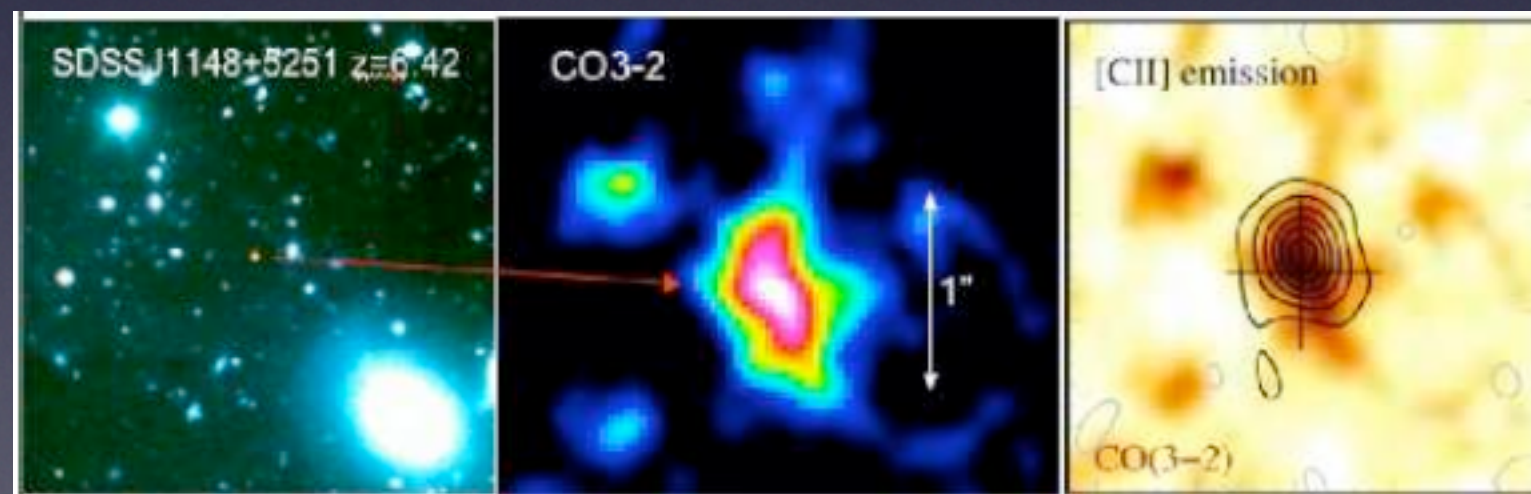


① ダストに “隠された” 星形成

＊ high- z のパワフルなAGNには、大規模な星形成活動がともなっている



＊ Molecular gas in high- z QSO BR1202-0725 (Ohta+96, Nature)



＊ Molecular/atomic gas in SDSS J1148 (Walter+04, 09)

＊ Dust in HzRGs (Stevens+03, Nature)

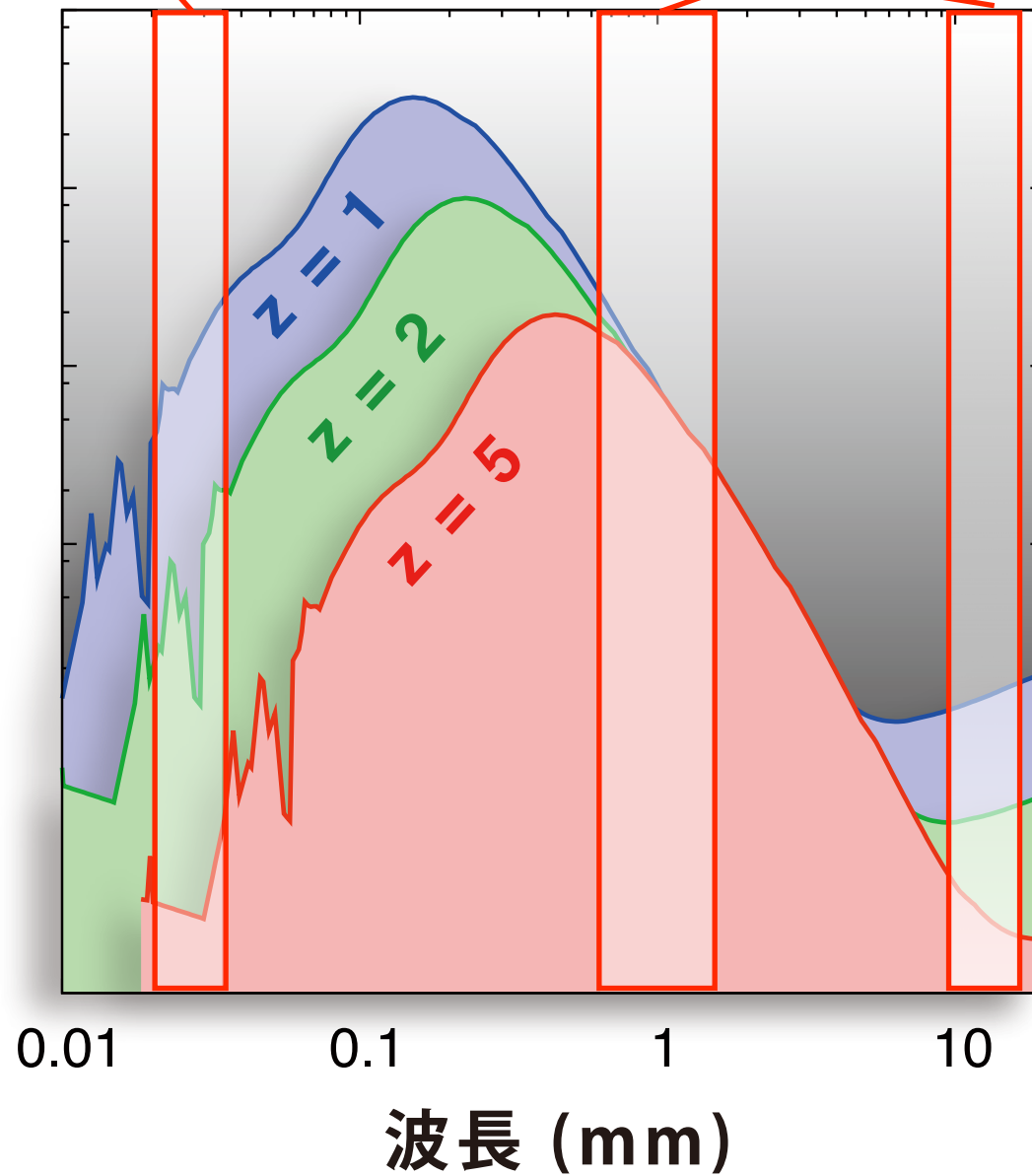
② 遠方でも暗くならない

* 可視・赤外・センチ波

* (サブ)ミリ波



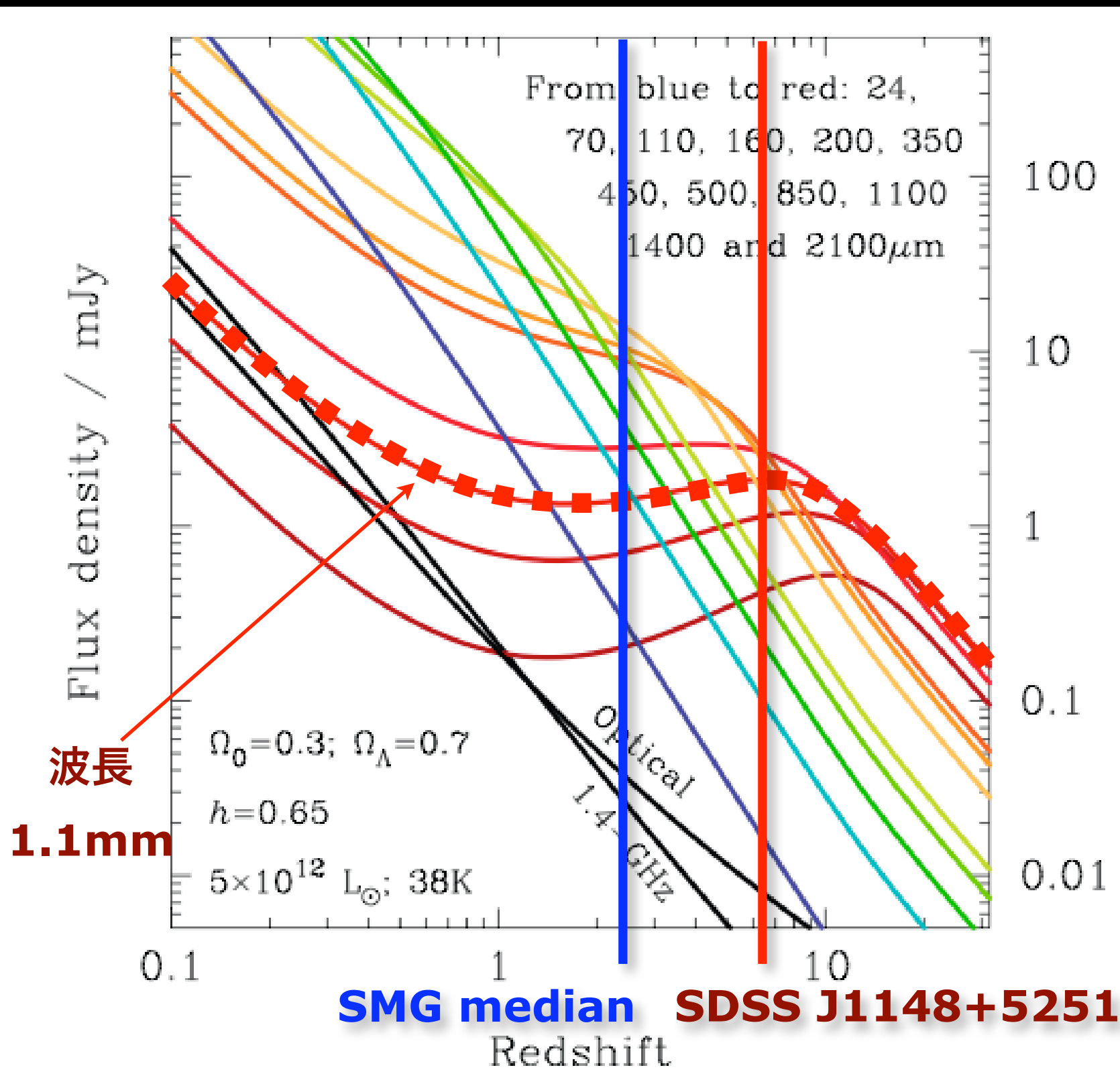
* 急激に暗くなる



* 明るさ一定！



② 遠方でも暗くならない



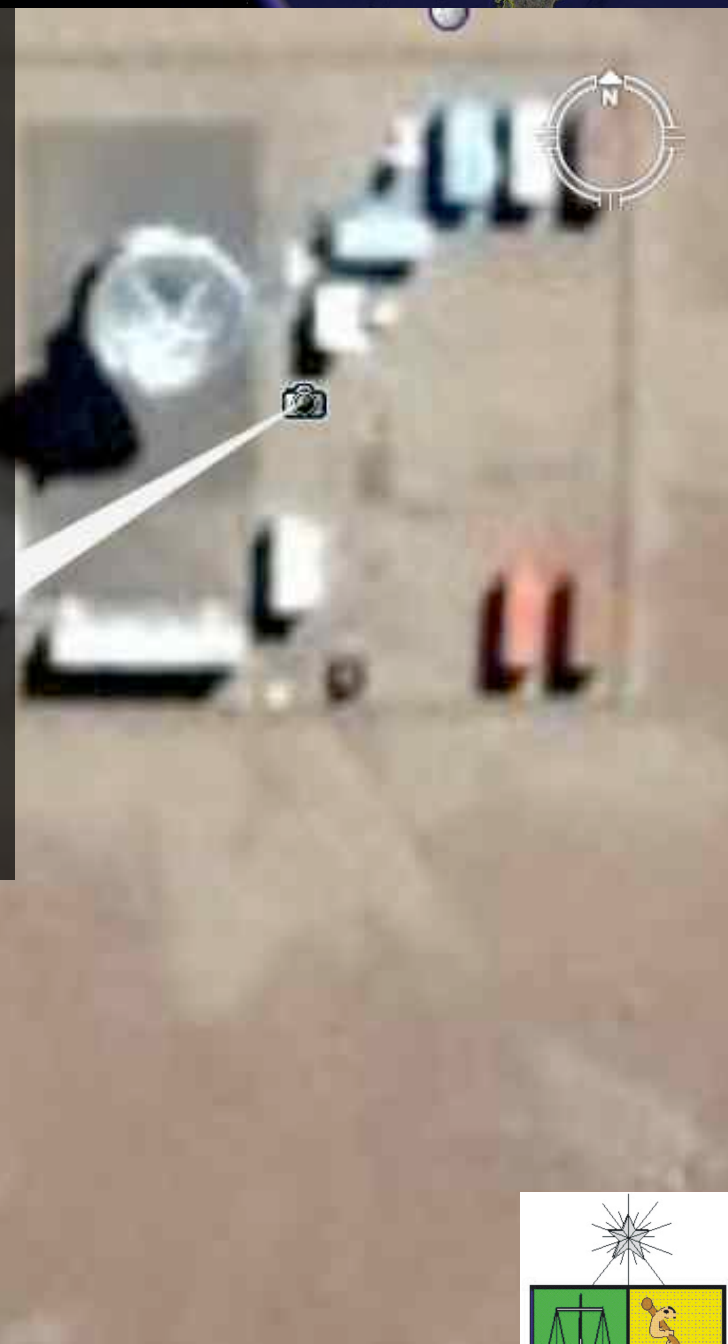
Blain et al. (2002)



ASTE - アタカマサブミリ波望遠鏡実験



- * 主鏡：口径 10 m, 鏡面精度 20 μm (rms)
- * 分光 (ヘテロダイン受信機)
 - * CATS345 : 850 μm (350 GHz)
 - * WHSF : ALMA型(prototype) 8 GHz デジタル分光計
- * 連続波撮像 (ボロメータ・アレイ カメラ)
 - * AzTEC : 1100 μm *2007-2008
 - * TES Camera : 1100/850/450 μm * 鋭意開発中
- * 国立天文台 (三鷹・野辺山) からの遠隔観測



Radiotelescopio

Photograph by
Rodox



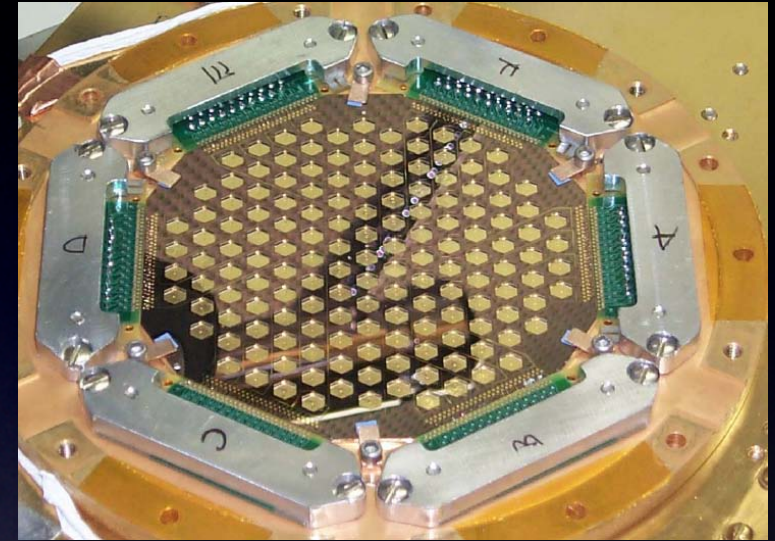


AzTEC Camera

PI: Grant W. Wilson (UMass)

- * 144 pix Si_3N_4 micromesh spider-web bolometers
- * Wavelengths: **$1100\ \mu\text{m}$ (270 GHz)**
- * Spatial resolution: **28 arcsec @ ASTE 10m**
- * Mapping speed: **$10\text{-}30\ \text{arcmin}^2\ \text{hr}^{-1}\ \text{Jy}^{-2}$**
 - * Atmospheric emission removal technique
 - * Superb transmission of sky in Atacama
 - * Developed for LMT 50m; waiting for it
 - * Successful operation on JCMT (late 2005)

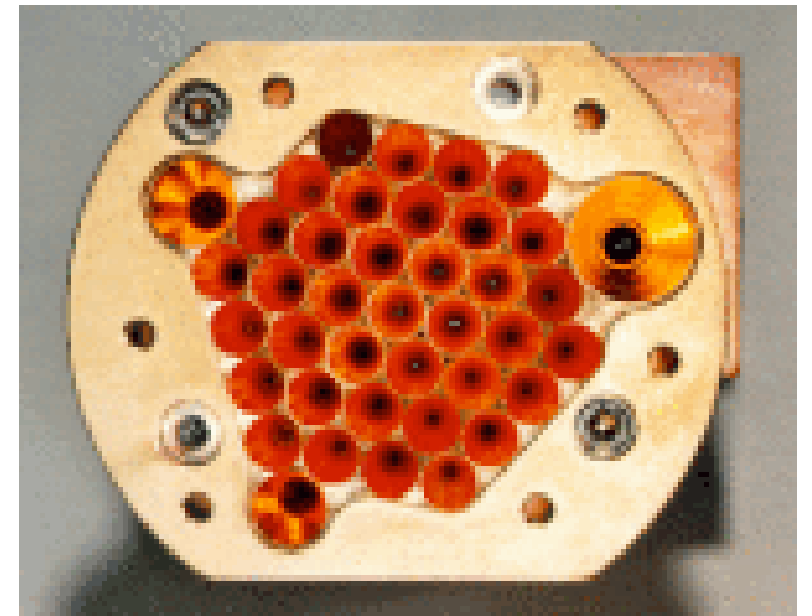
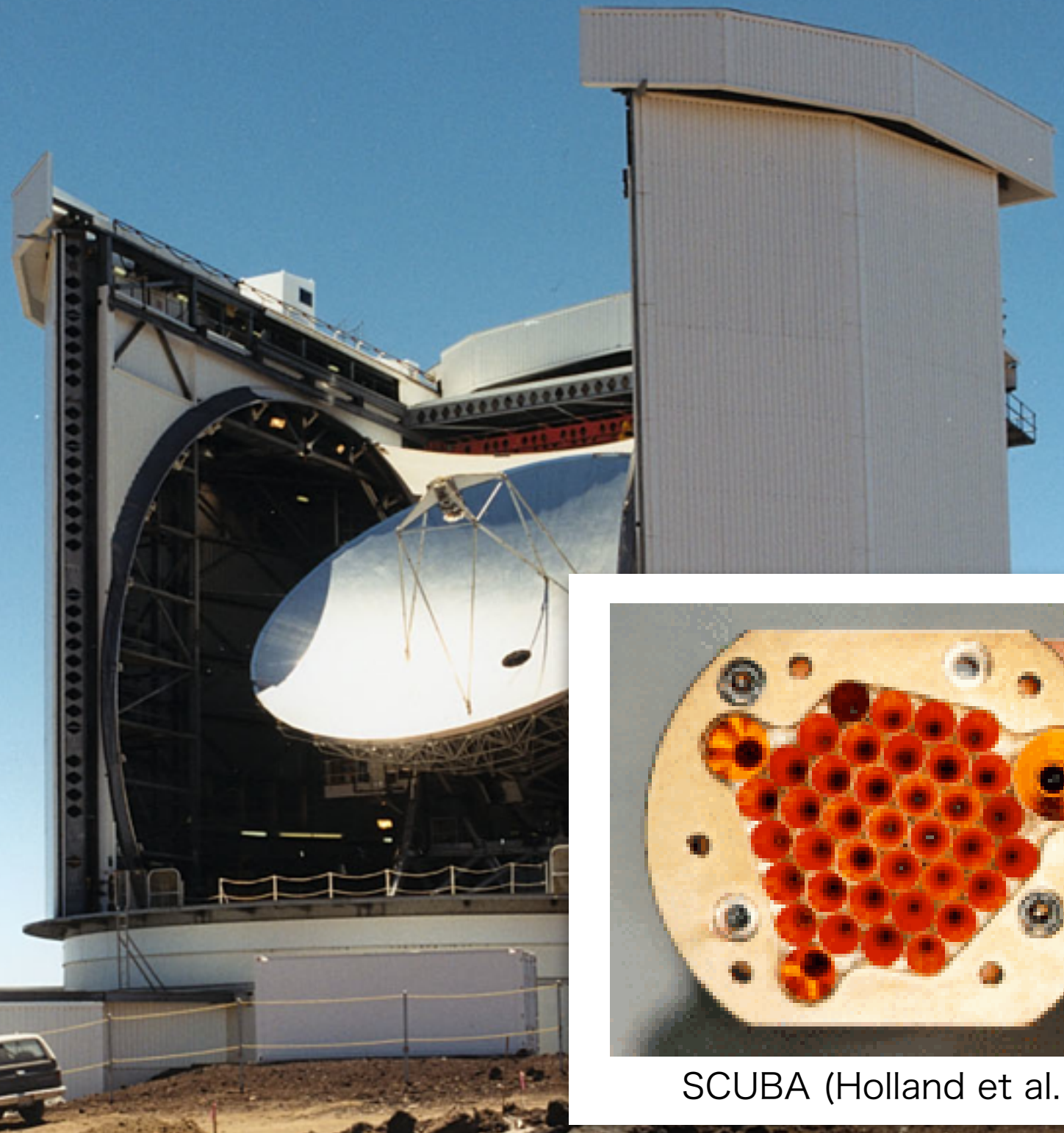
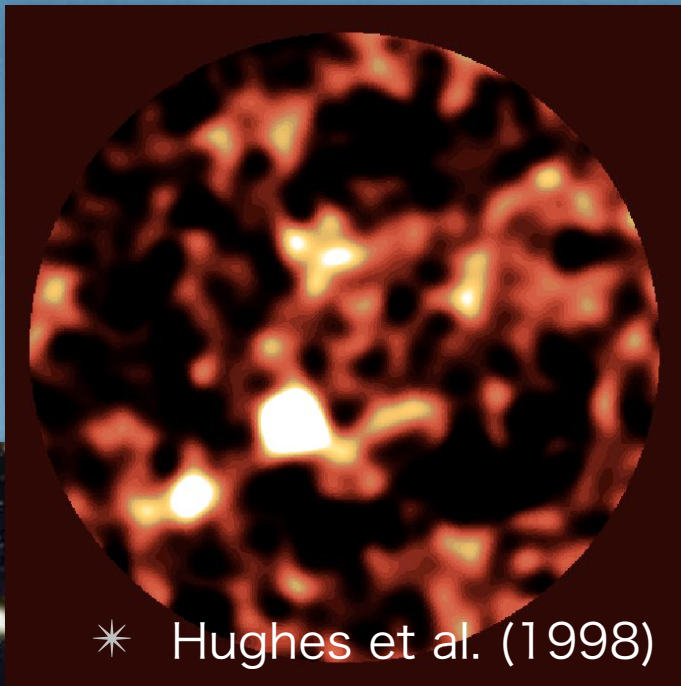
<http://www.astro.umass.edu/aztec/>





サブミリ波でさぐる遠方宇宙

JCMT/SCUBAによるサブミリ波銀河(SMG)探査の幕開け



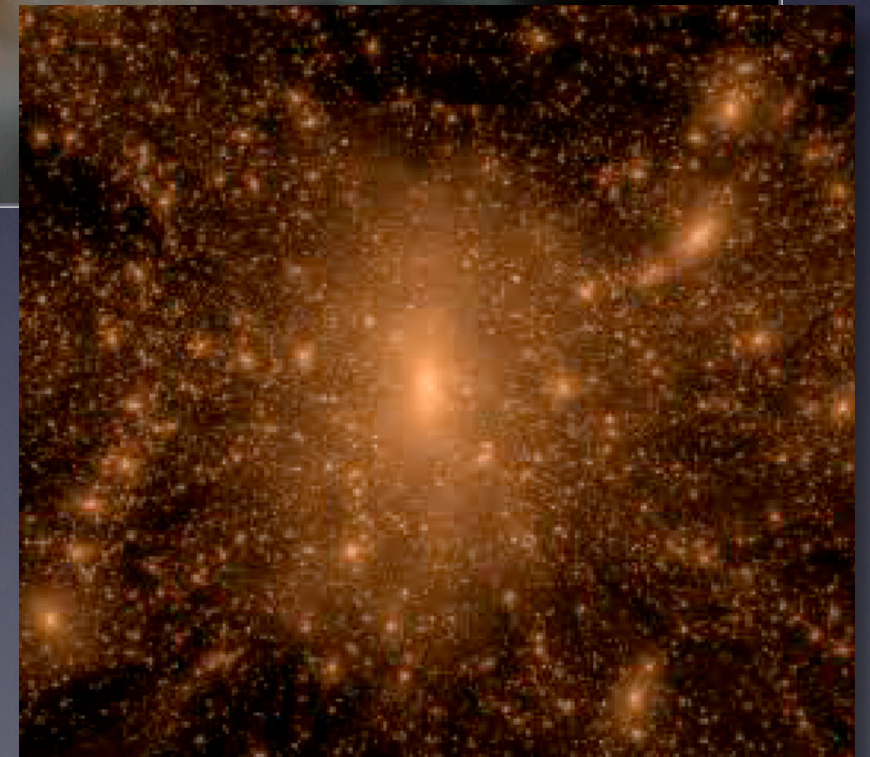
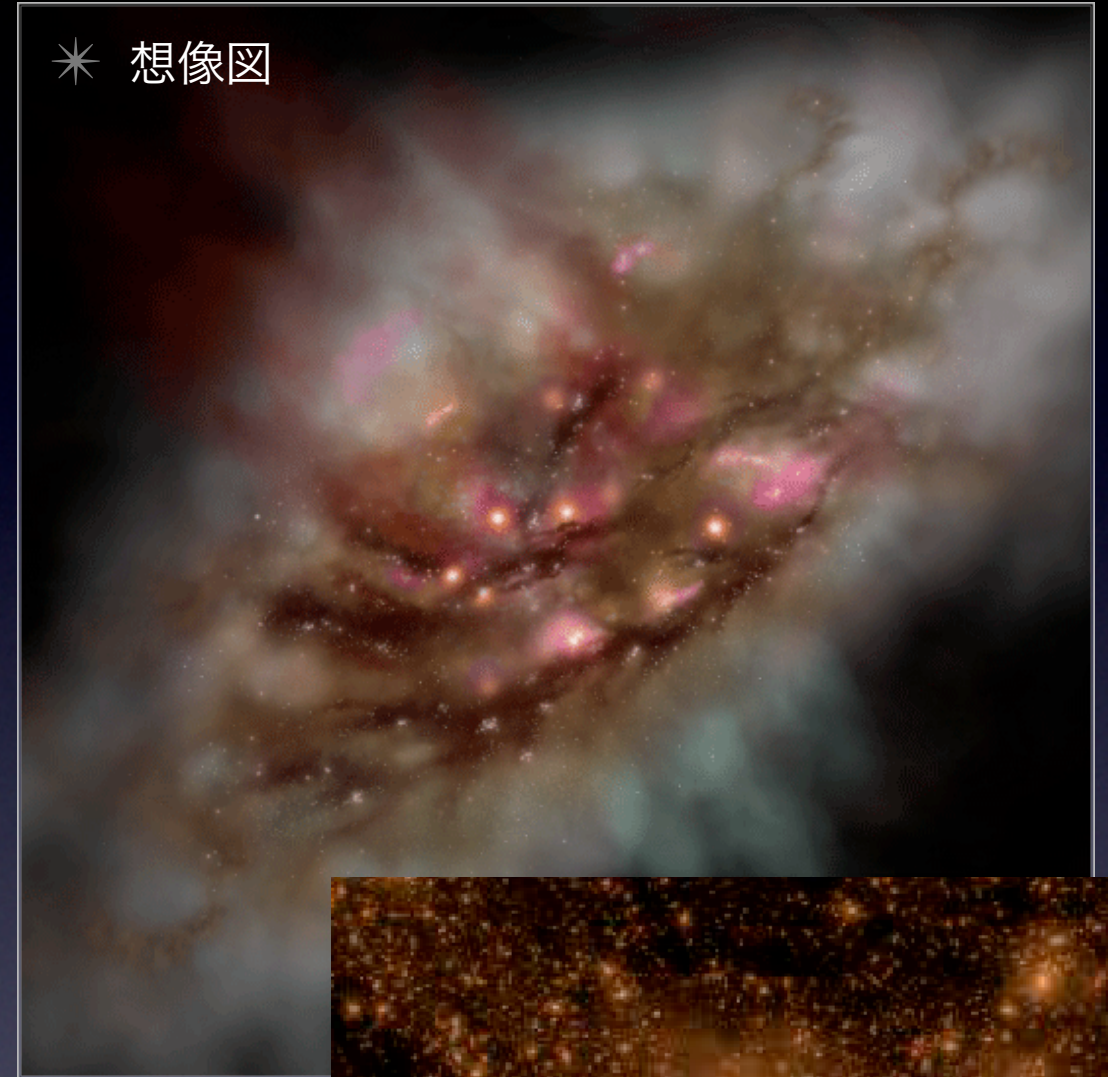
SCUBA (Holland et al. 1998)



SCUBAの成果：SMGの描像

- * 観測事実 → **ULIRGと似てるが1桁上。**
 - * 巨大な赤外線光度 ($\sim 10^{13} L_{\odot}$)
 - * 巨大な分子ガス量 ($\sim 10^{11} M_{\odot}$)
 - * $\Delta V = 700-800 \text{ km/s}$ (cf. 200 km/s in MW)
 - * 可視赤外で赤く、暗い ($K > 22$)
 - * z (median) $\sim 2-3$
 - * 電波銀河(RG)周辺で密度超過？
- * **大質量楕円銀河の progenitor**
 - * 星形成率 $\sim 1000 M_{\odot}/\text{yr}$
 - * 星形成期間 $\sim 10^8 \text{ yr}$
- * **SMBH の成長に関係しているようである**
 - * ガスに埋もれたX線源 $\rightarrow$ 原始QSO?
(Alexander+03,05,08; Kawakatu & Wada 08,09)
 - * High- z RG, QSO母銀河にサブミリ波源
(Stevens+03)

* 想像図





Why are SMGs so important?

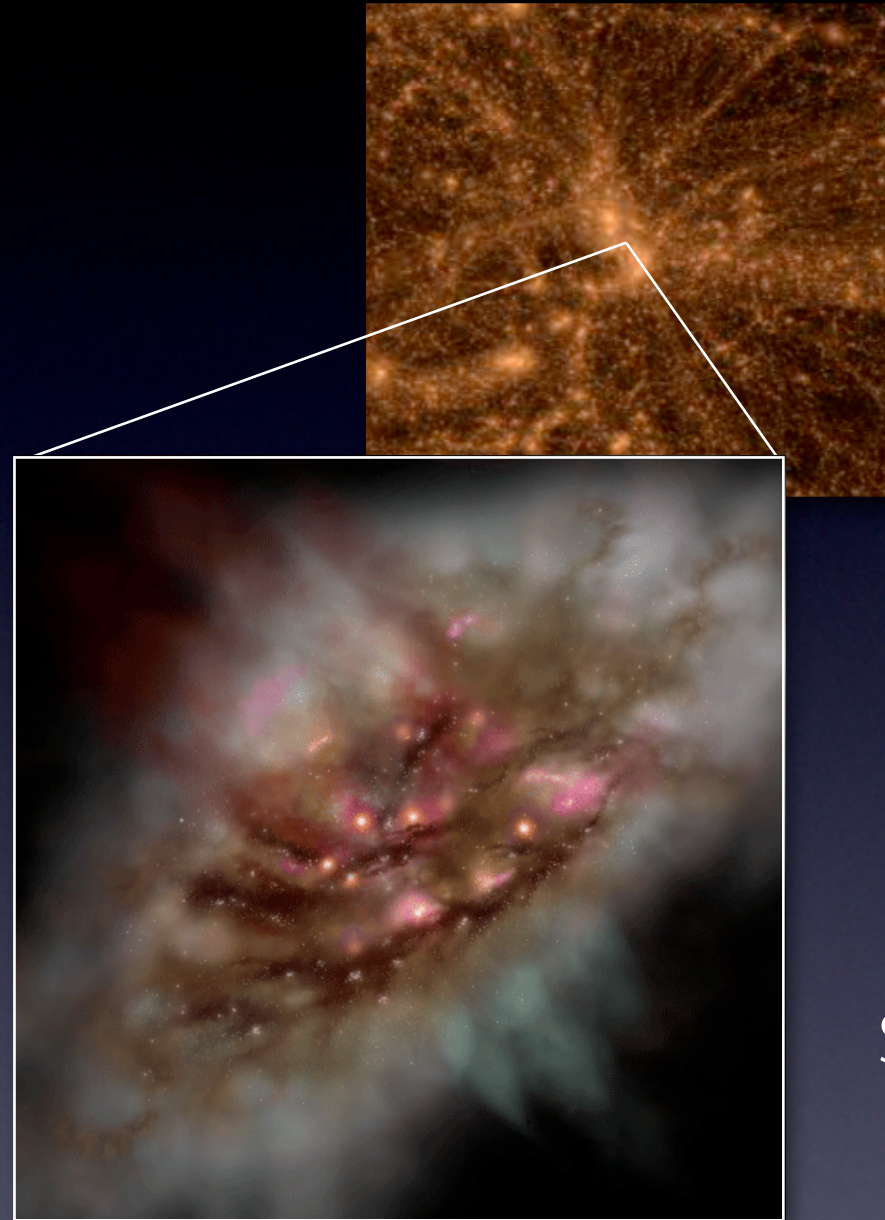
Cosmic Infrared Background

Cosmic star-formation history

Large-scale structure

Dark matter

Large sample (statistics)



Formation of
Giant ellipticals

"Galaxy Zoo"

Formation of
Super-massive black hole

Quasar

Multi-wavelength data



Motivations

1. Unveil “hidden” star-forming populations in the early universe
 - * “complete” picture of cosmic star formation history
2. Clustering properties/LSS of SMGs
 - * underlying dark matter distributions
3. Understanding the formation of massive population of galaxies
 - * Comparison with other high- z ; QSOs, HzRGs, LBGs, LAEs, LABs, DRGs, BzKs, ...
 - * Co-evolution of galaxies and super-massive BHs
4. Understand the FIR cosmic backgrounds
 - * Only $\sim 10\%$ of CFIRB ($@ \lambda \sim 1 \text{ mm}$) is resolved into point sources so far. --> constraint on galaxy formation in the early epoch

A large portion of cosmic SF is hidden by dust!

Mm/submm wide & deep surveys can probe them by negative K corr.



AzTEC/ASTE SMG Survey (2007-08)

- * 巨大なサンプルを構築 (数平方度, 1000ソース)
 - * AzTEC/ASTE --- 波長 1.1 mm, HPBW=28"
- * すばる/あかりとの連携で多波長データを確保
 - * SSA22, ADF-S, SDF, **SXDF**, GOODS-S, HzRG, ...

カメラ/望遠鏡 (波長)	AzTEC/ASTE (1.1mm)	SCUBA/JCMT (850 μ m)	MAMBO/IRAM (1.2mm)
運用期間	2007-08 (7ヶ月)	1997-2005	1998-2007
面積 (平方分)	~ 8000 (注1)	1200	1500
深さ (mJy/b)	0.5-1.0	0.5-1.2 (注2)	0.7-1.5 (注2)
検出数	~ 1000 (注1)	210	60

(注1) この値はテンタティブ. 2008年シーズンの詳細な解析は現在進行中.

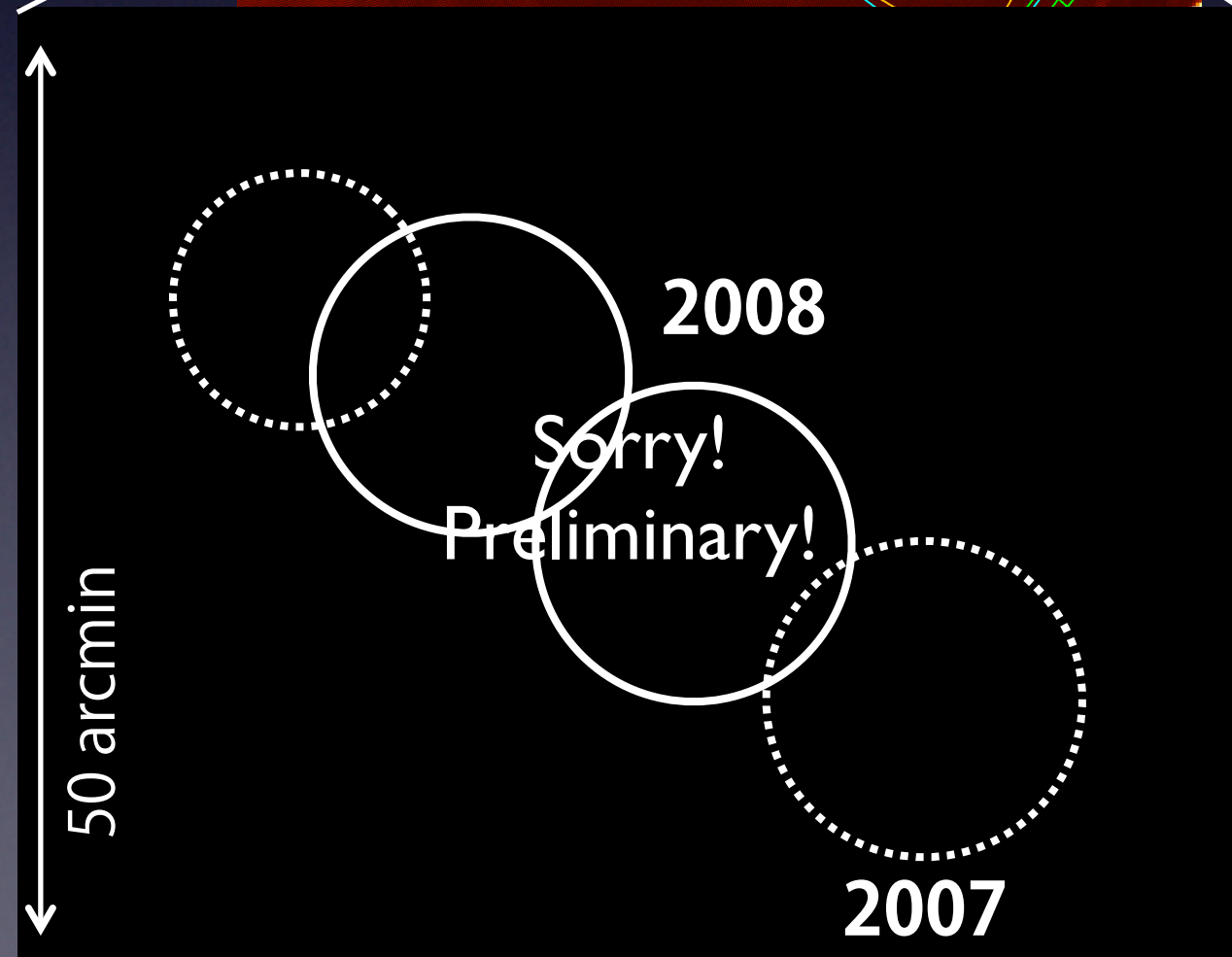
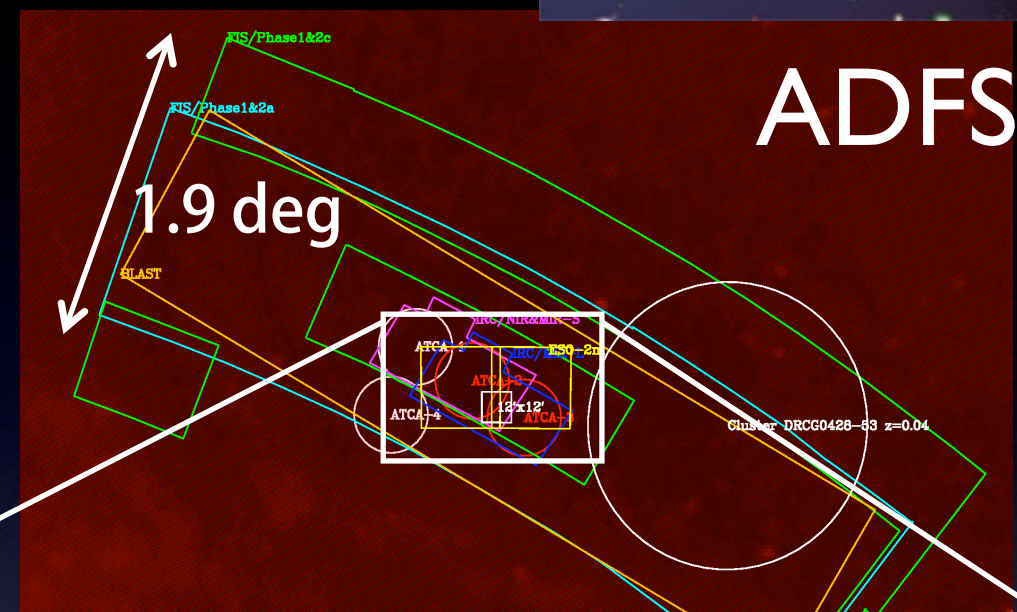
(注2) 深さは、1.1mmにスケールしている.



AKARI Deep Field South (ADF-S)



- * Near South Ecliptic Pole (Lowest-cirrus)
- * Deep AKARI observations
 - * IRC: 3.2–24 μm , FIS: 60–160 μm
- * Multi-wavelength follow-up
 - * GALEX, CTIO, Spitzer, BLAST, LABOCA, ATCA
- * AzTEC/ASTE observations
 - * Preliminary
 - * Area = 970 arcmin²
 - * ~ 180 sources





Subaru/XMM-Newton Deep Field

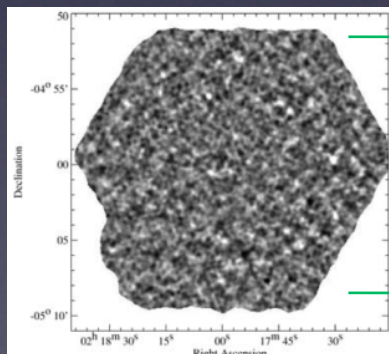
Camera/Telescope	Area	Noise level (1 sigma, mJy)	Num. of Sources
SCUBA/JCMT	406 arcmin ²	~2 mJy @850um	60 (S/N > 3.4)
AzTEC/JCMT	1330 arcmin ²	1.0 – 1.7 mJy @1100um	28 (S/N > 3.7)
AzTEC/ASTE	788 arcmin ²	0.48 – 0.67 mJy @1100um	166 (S/N > 3.5)
	1250 arcmin ²	0.48 – 1.5 mJy @1100um	208 (S/N > 3.5)

AzTEC/JCMT

Austermann et al. 2009
MNRAS, in press.

AzTEC/ASTE

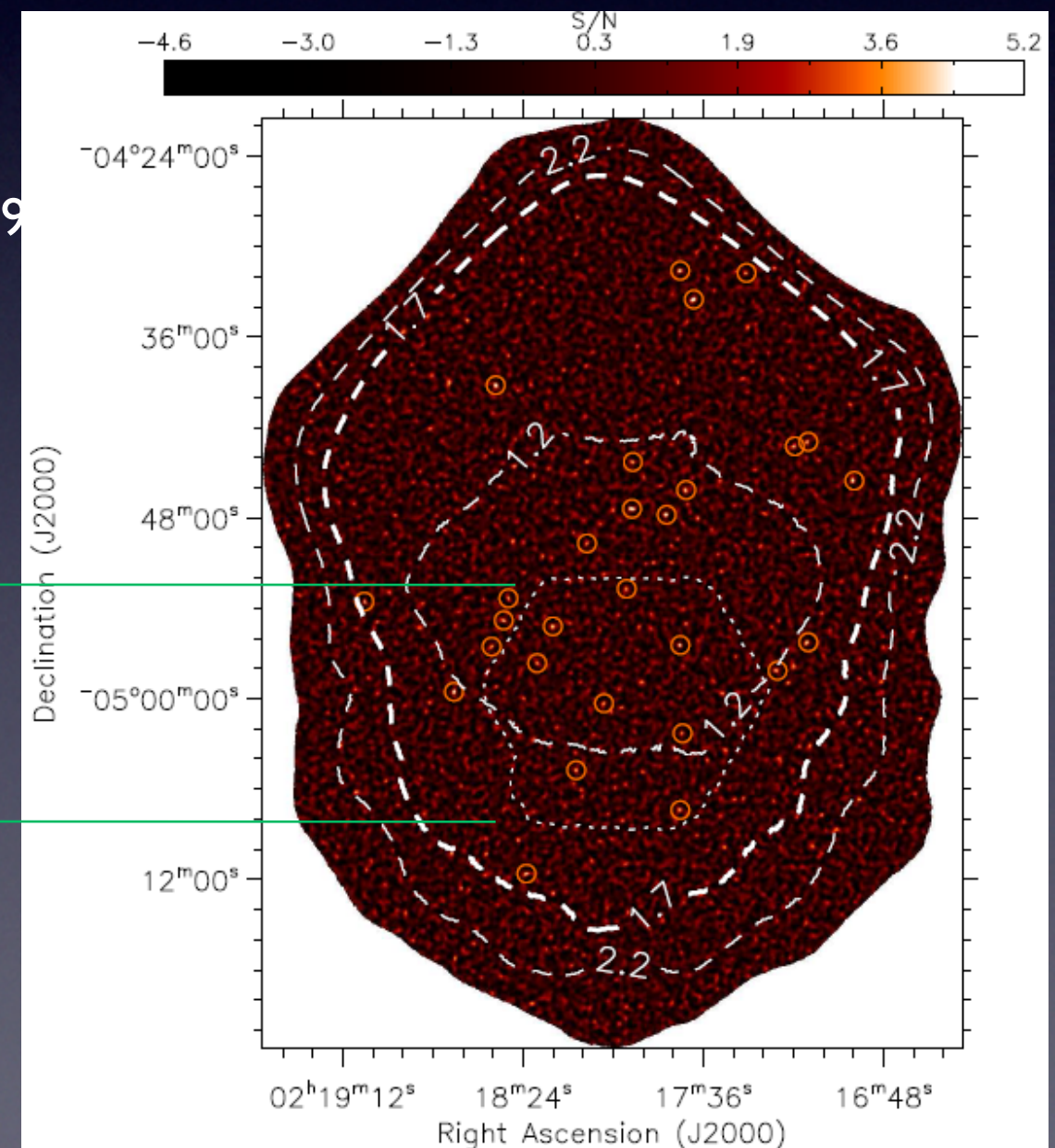
SCUBA/JCMT



Coppin et al. 2006
MNRAS, 372, 1621

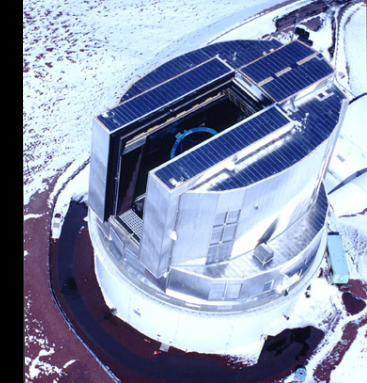
Sorry!
Preliminary!

Ikarashi et al. (2009) in prep.

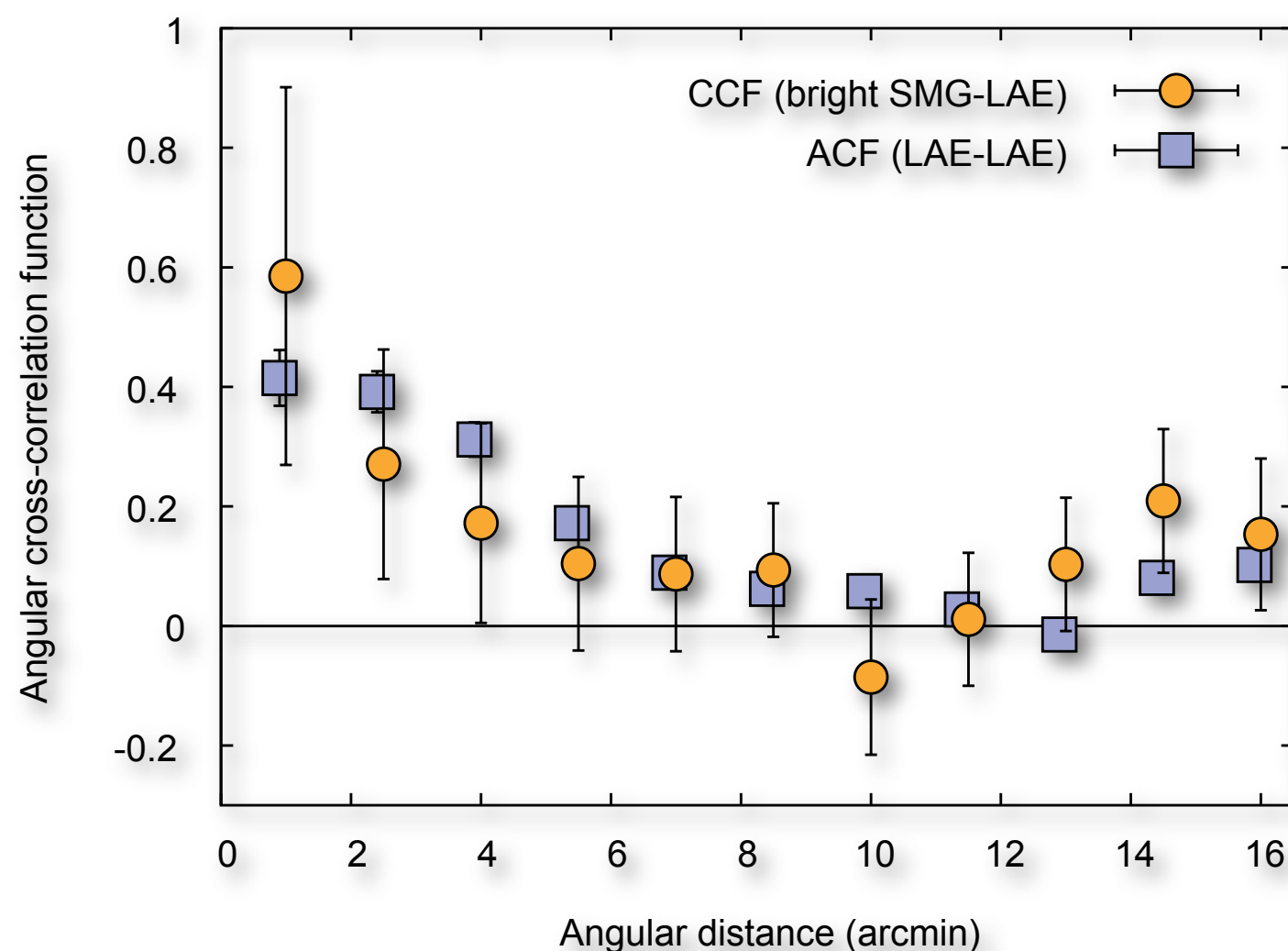




SSA22: a proto-cluster at $z = 3.1$



1.1mm S/Nマップ



Right Ascension (J2000)

- * 30天体を検出
 - * $L_{\text{FIR}} > 4 \times 10^{12} L_{\odot}$
 - * $\text{SFR} = \text{数百-数千 } M_{\odot}/\text{yr}$
- * SMG-LAE の相関を検出
 - * 大規模構造中に選択的に SMGが生じることを示唆
 - * 田村+09, Nature, 459, 61

SSA22原始銀河団

・ $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河 (LAEs) でトレースされる $z = 3.1$ の密度超過領域



SSA22-AzTEC1 : 原始QSO候補天体

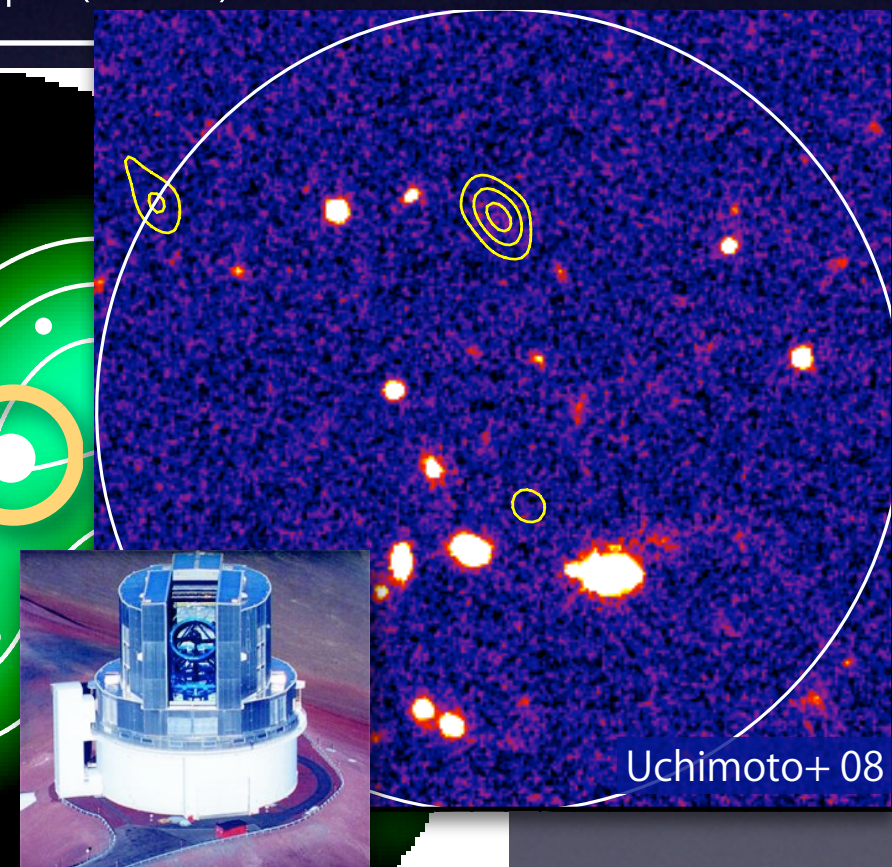
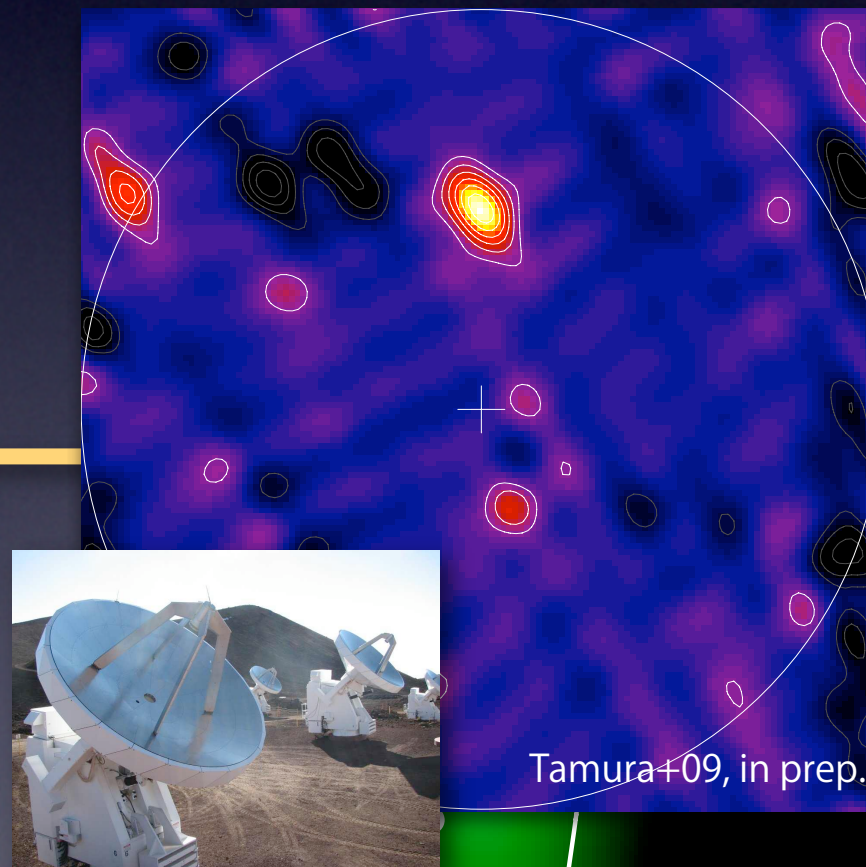


SSA22-AzTEC1: 原始銀河団の原始クエーサー！？

- * AzTEC1は 中間赤外線で「赤く」、近赤外線(Ks)でドロップアウト
- * $\lambda > 10 \mu\text{m}$ では、 $z = 3.1$ のSEDとconsistent. → 大規模構造に付随
- * “硬い” X線源 = 埋もれたSMBHの発見 ($N_{\text{H}} \sim 1\text{e}24 \text{ cm}^{-2}$, $L_{\text{x}} \sim 3\text{e}44 \text{ erg/s}$)
- * 銀河団環境において SMBH 形成が促進されている (Lehmer+09)

30 arcsec

20' ~ 35/h70 Mpc ($z=3.1$)



背景 : Spitzer/IRAC
コントラスト : VLA 20cm

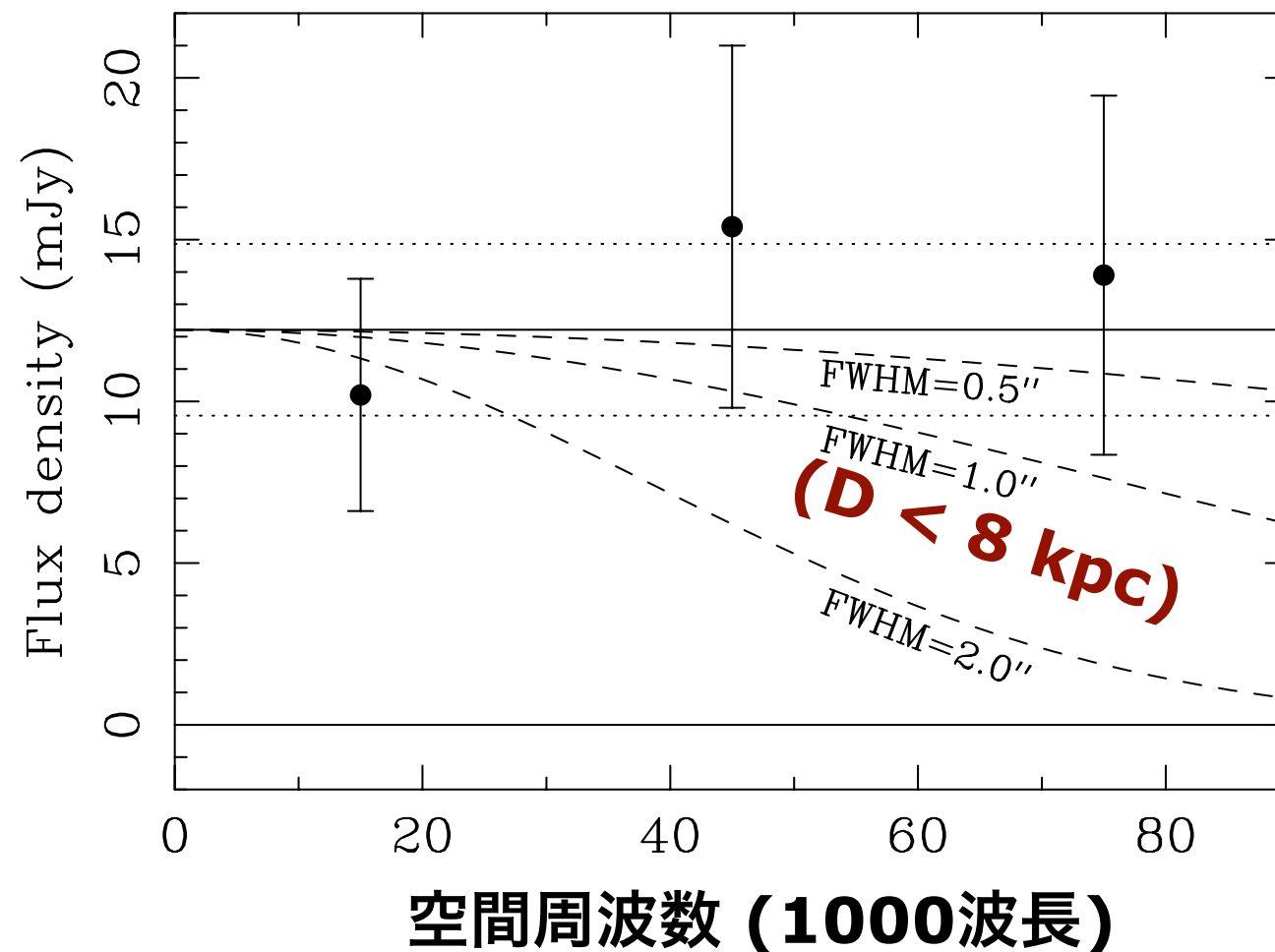
SMA 860 micron

背景 : Spitzer/IRAC
コントラスト : VLA 20cm
Ksで未検出 ($K_{\text{s}} > 24.9$, AB)



光度, 質量, ソースサイズ

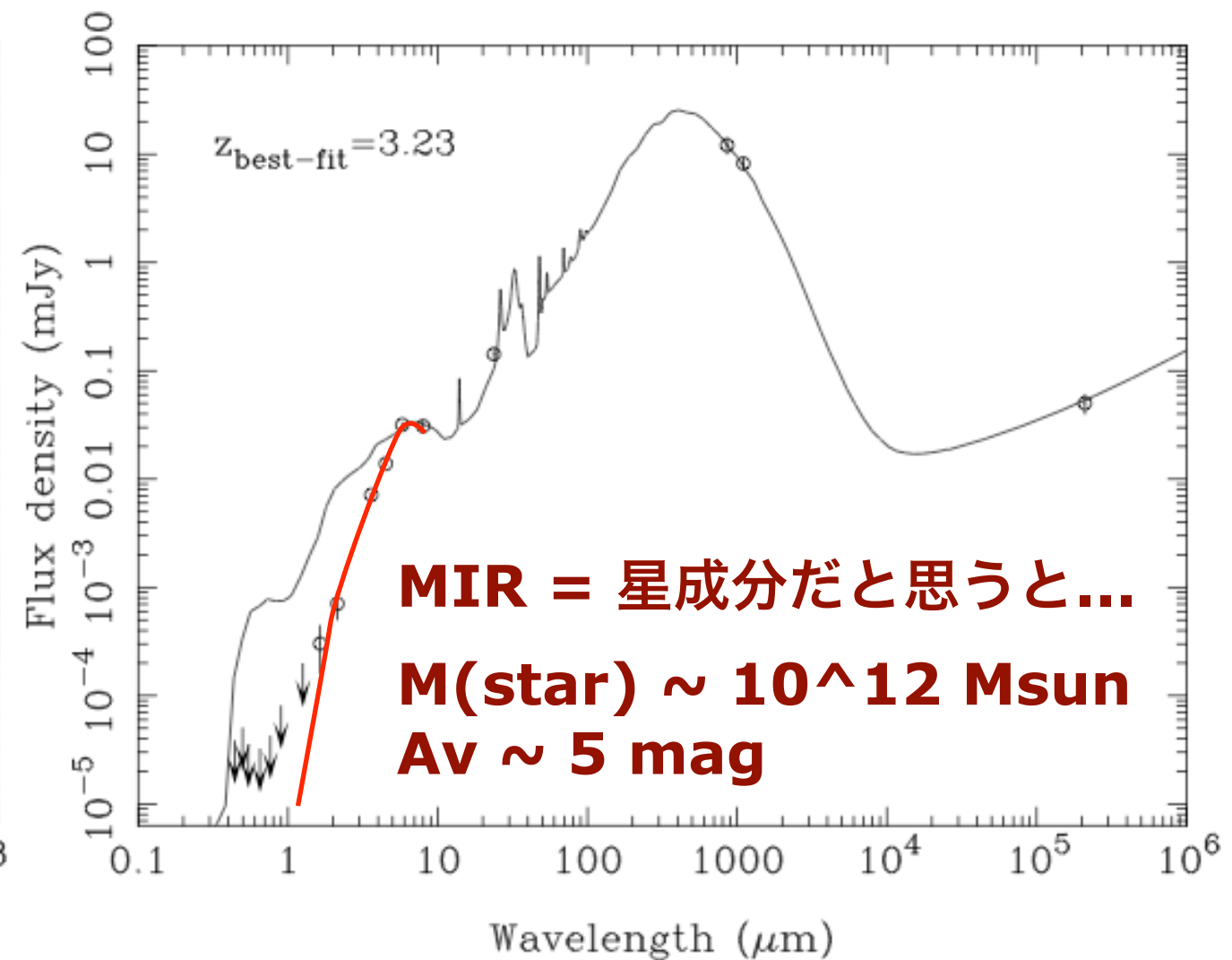
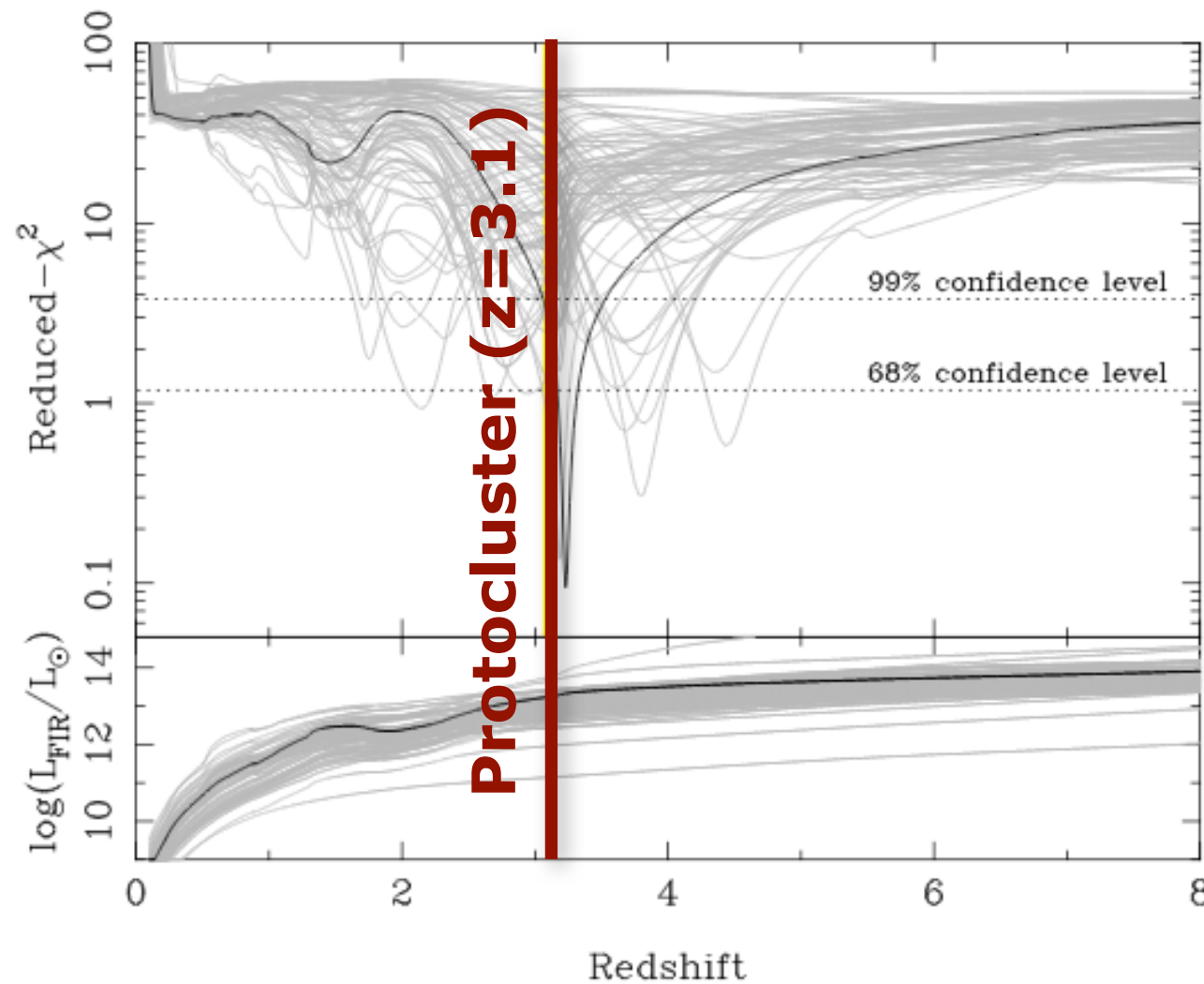
- * $L(\text{FIR}) = 2e13 L_{\text{sun}} \rightarrow \text{SFR} \sim 4000 M_{\text{sun}}/\text{yr}$
- * $M(\text{dust}) = 1e9 M_{\text{sun}}, M(\text{H}_2) = 8e10 M_{\text{sun}}$
- * $z = 3, T(\text{dust}) = 40 \text{ K}, \text{dust-gas ratio} = 54 \text{ (Kovacs+06)}$
- * $\theta < 1.0 \text{ arcsec} (D < 8 \text{ kpc @ } z = 3) \rightarrow \text{点源と矛盾しない}$





A dusty massive starburst in the protocluster?

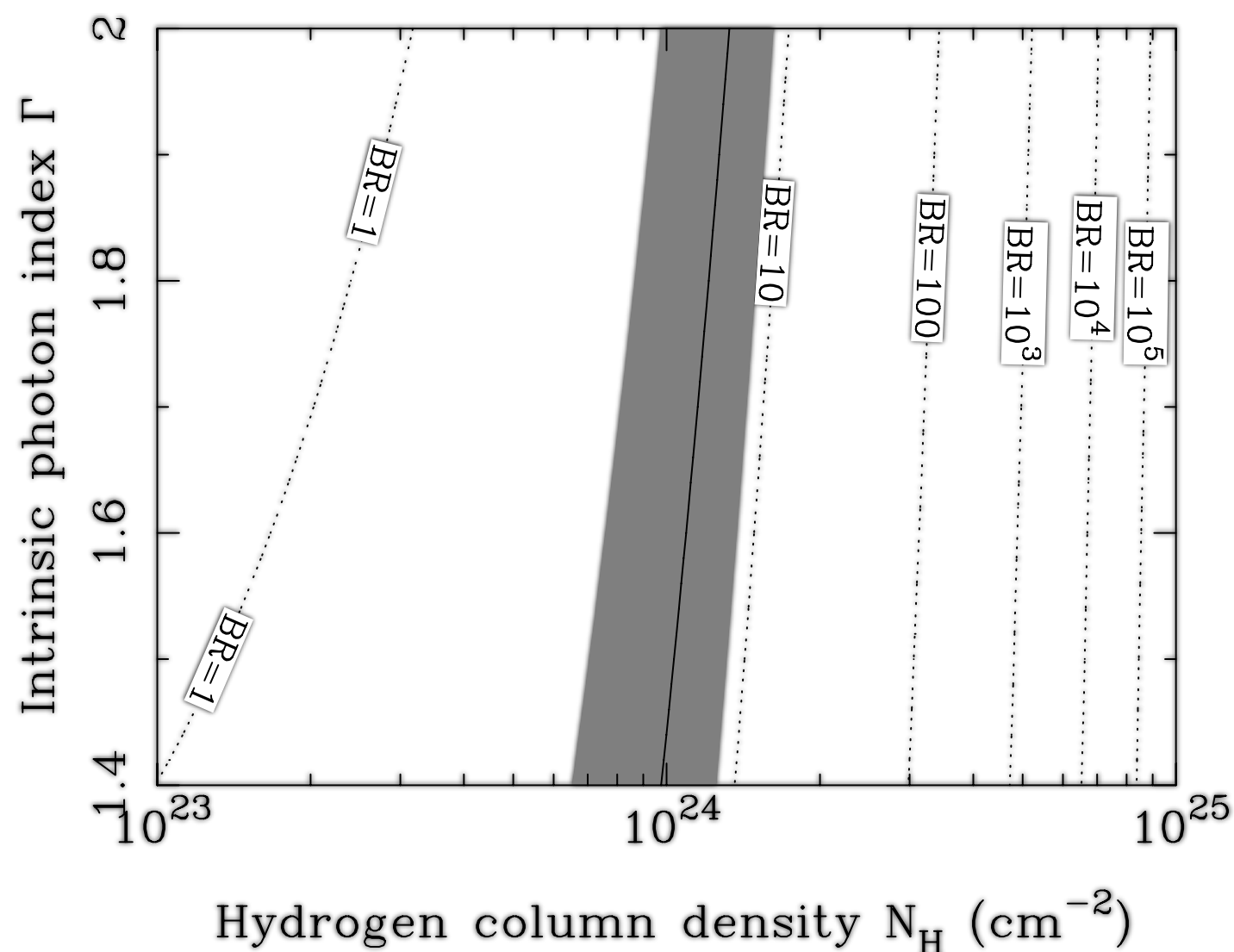
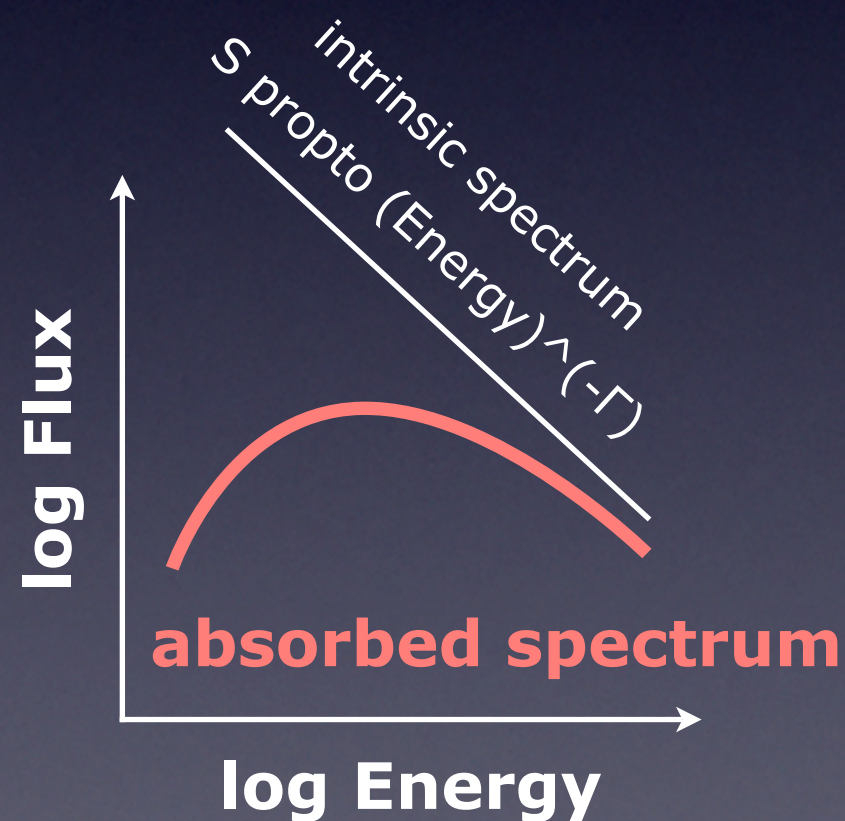
- * SED library (Michalowsky+09), photometry at $\lambda_{\text{obs}} > 8 \mu\text{m}$
- * $L(\text{FIR}) = 2 * 10^{13} L_{\text{sun}}, z = 3.23 (+0.30/-0.17)$





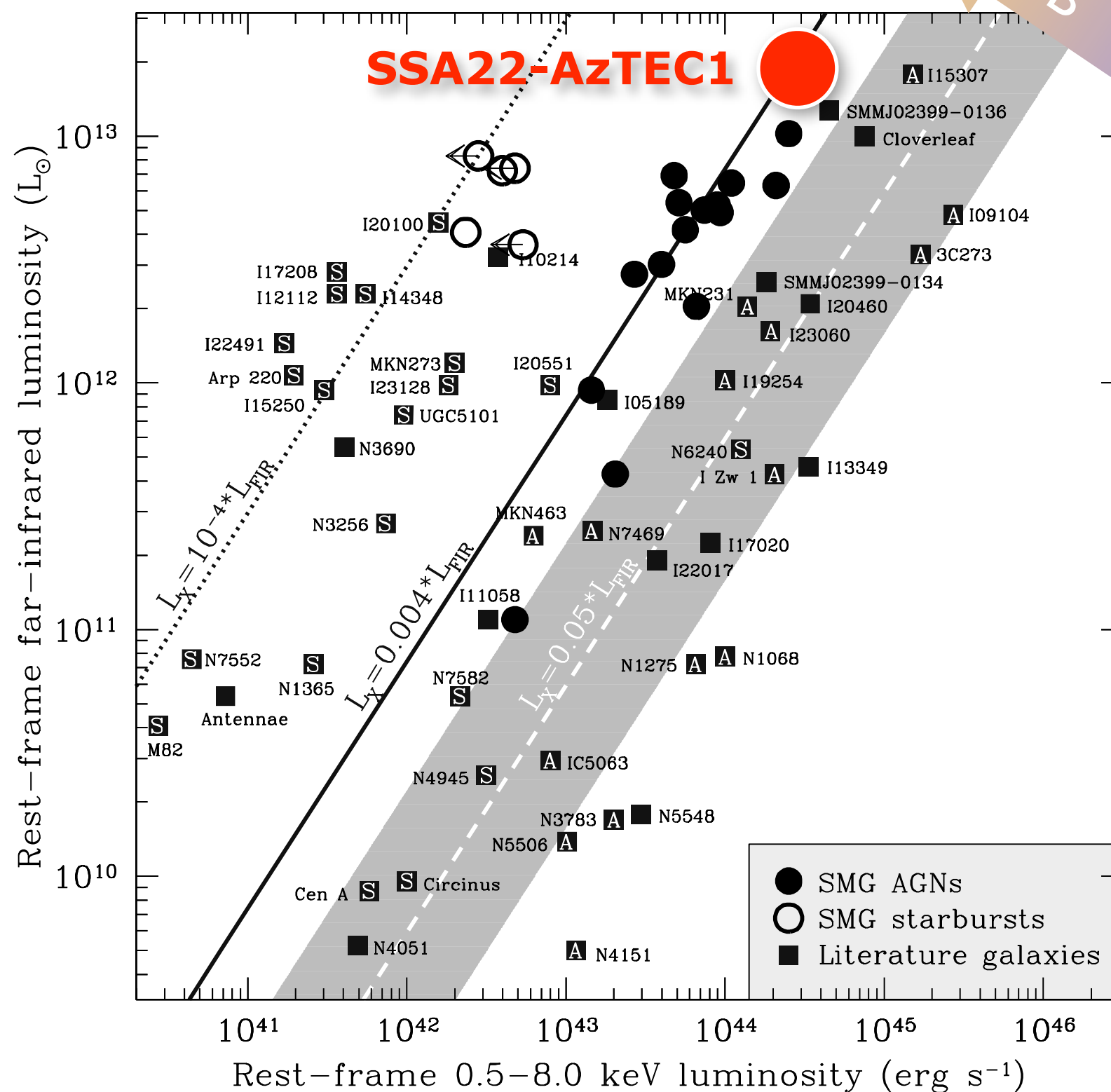
Luminous “buried” AGN

- * 大きいバンド比 ($BR \equiv HB/SB = 5.5$) $\rightarrow N_H = 1 * 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ で説明可能。
- * cf.) Compton-thick (水素柱密度 $N_H > 1.5 * 10^{24} \text{ cm}^{-2}$)
- * 吸収補正+静止波長 X線光度 $L_x = 3 * 10^{44} \text{ erg/s}$
- * ($\sim 10\%$ の反射, 散乱成分を考慮 $\rightarrow$ 結果はおおきく変わらず)





Luminous “buried” AGN



* Alexander + 2005



Summary

* サブミリ波による遠方宇宙探査

- * 宇宙星形成史の Complete な描像
- * 負のK補正による遠方宇宙への窓

* AzTEC/ASTE 「**SMG discovery から SMG study へ**」

- * 大規模なサーベイを完了、膨大なサンプル：数平方度, 1000個のSMG
- * SMGの統計的・集団的性質の理解へ大きく前進
- * これまで理解されてこなかった特殊なSMG (proto-QSO?) も続々発見

* ASTE搭載用 超伝導転移端センサ型 3色カメラの開発

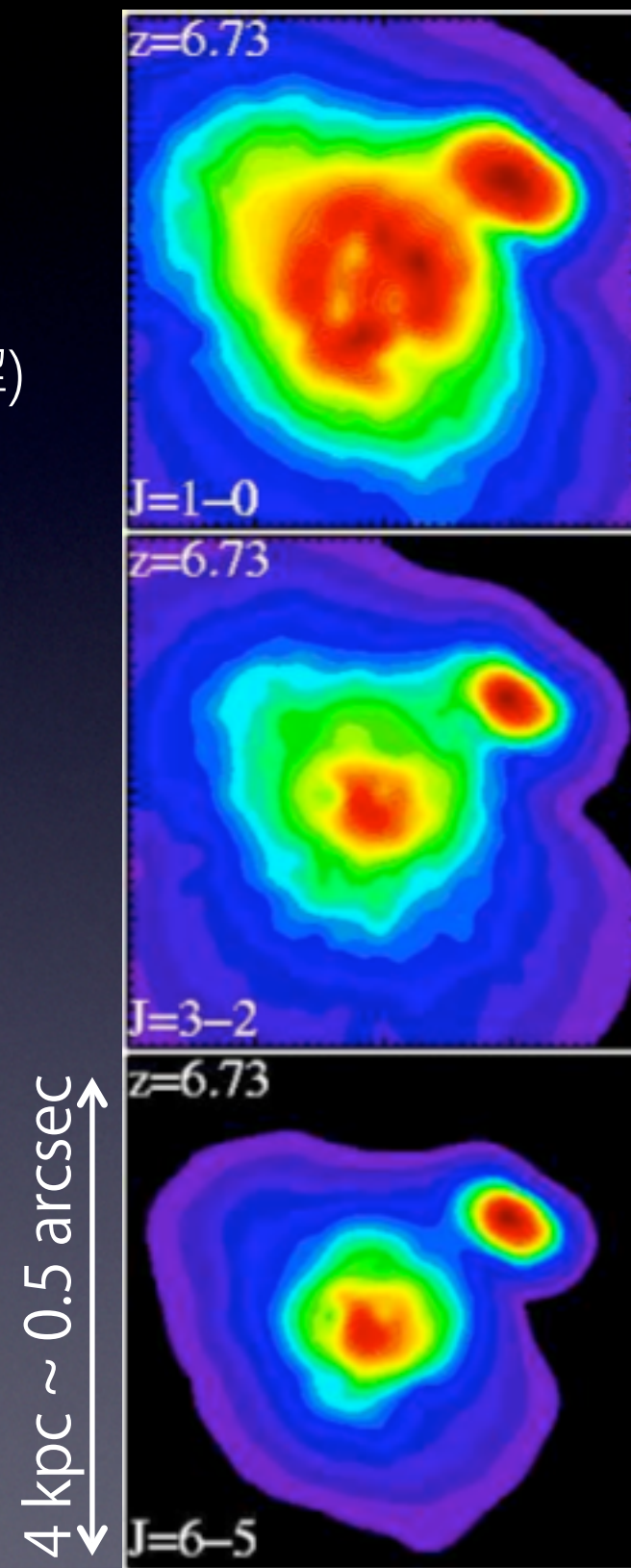
- * SMG のSEDを同時に取得し、赤方偏移を推定
- * AGNや母銀河のサブミリ波多色撮像が可能に



SWANS への期待

- * SWANS とサブミリ波観測 (ALMA / 連続波カメラ)
 - * 興味深いQSO --> ALMAでフォローアップ (CNDを分解)
 - * 無バイアスの広域な (> 1 平方度) 埋もれたAGNの探査
--> ASTE用新カメラ
- * **SWANS ultra-deep** (SXDS/UKIDSS-UDS) に期待大！！
 - * ASTE/AzTEC にて1000平方分程度のデータ有り
 - * ALMA Deep Survey 候補領域 (~100平方分)

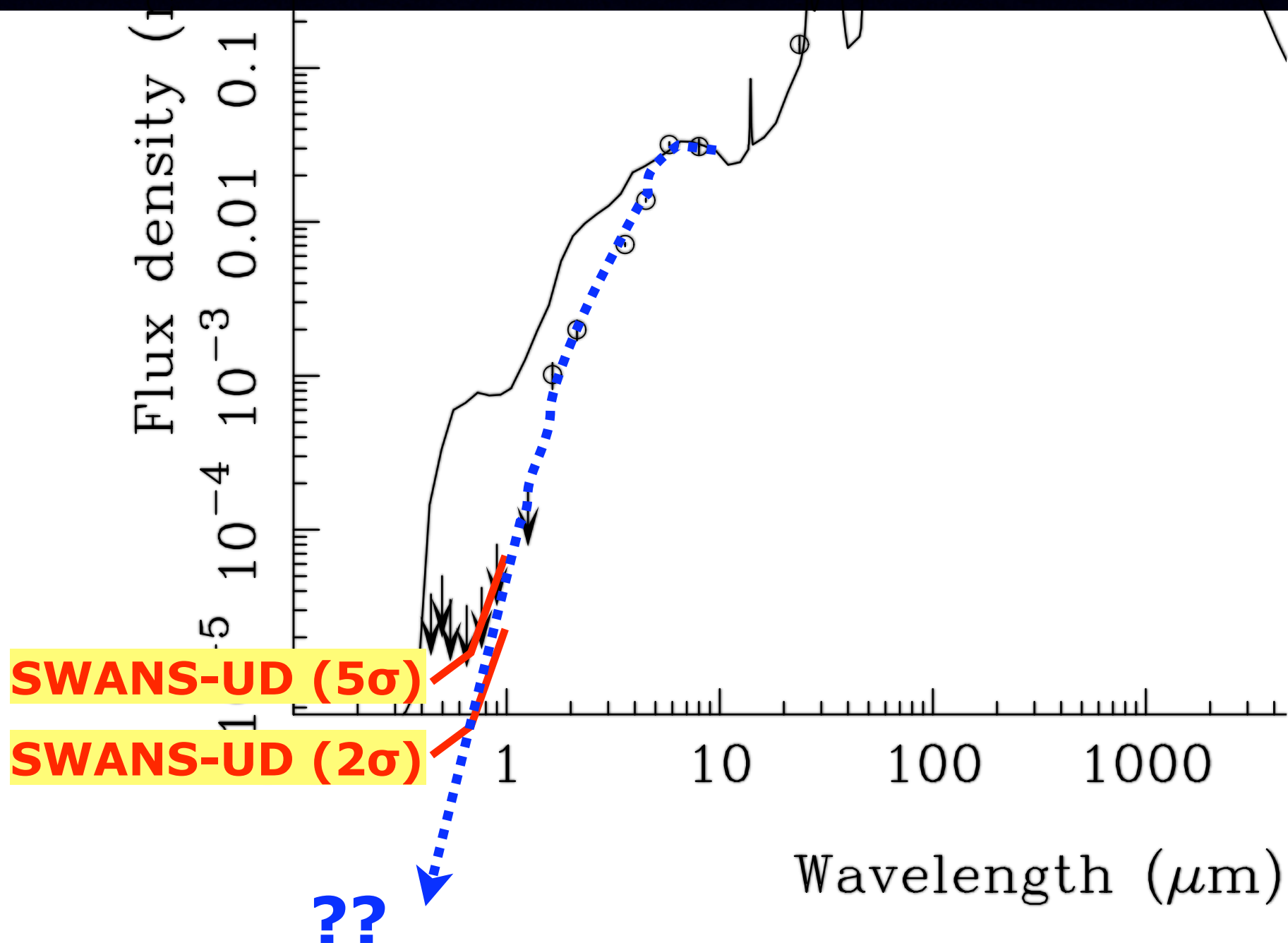
* CO distribution modeling
(Narayanan+07)





SWANS への期待

- * SSA22-AzTEC1 のような “埋もれた” AGN も検出可能か？





今後のサブミリ波遠方宇宙観測

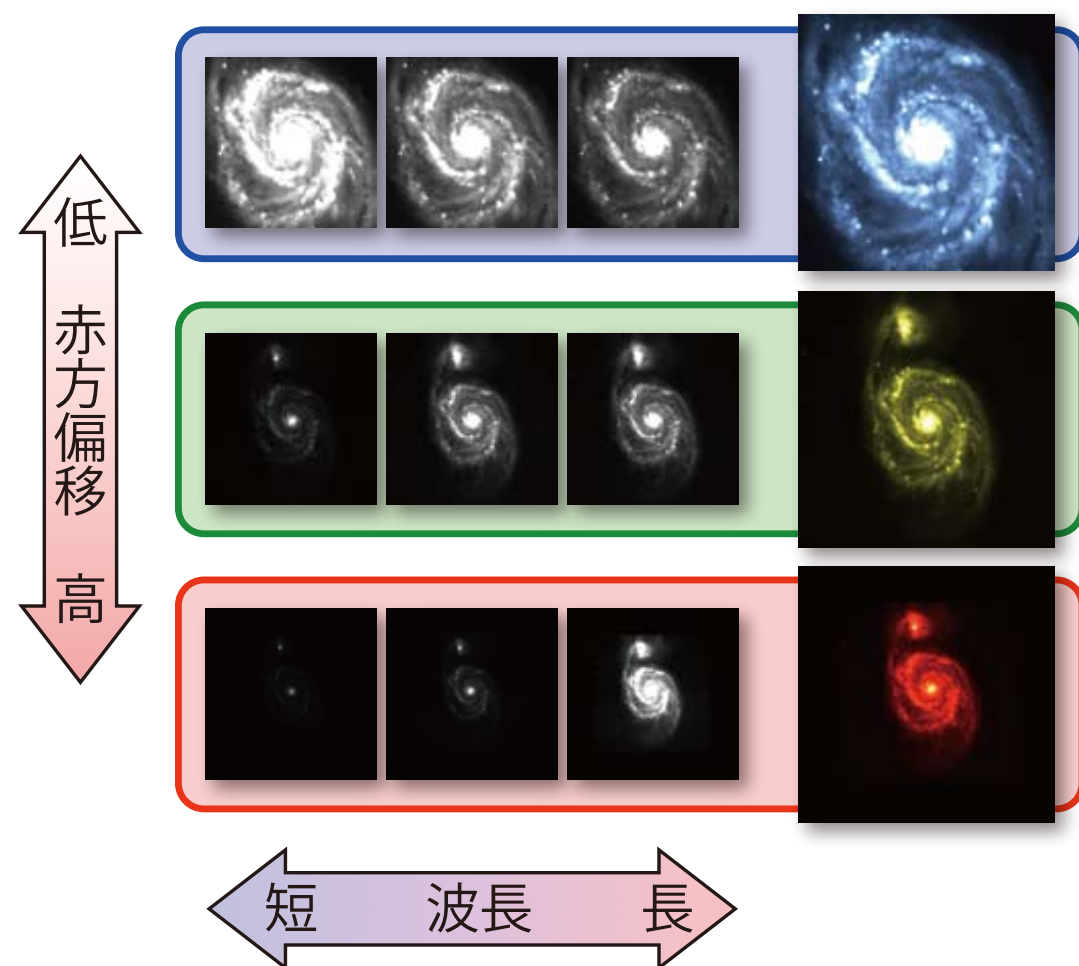
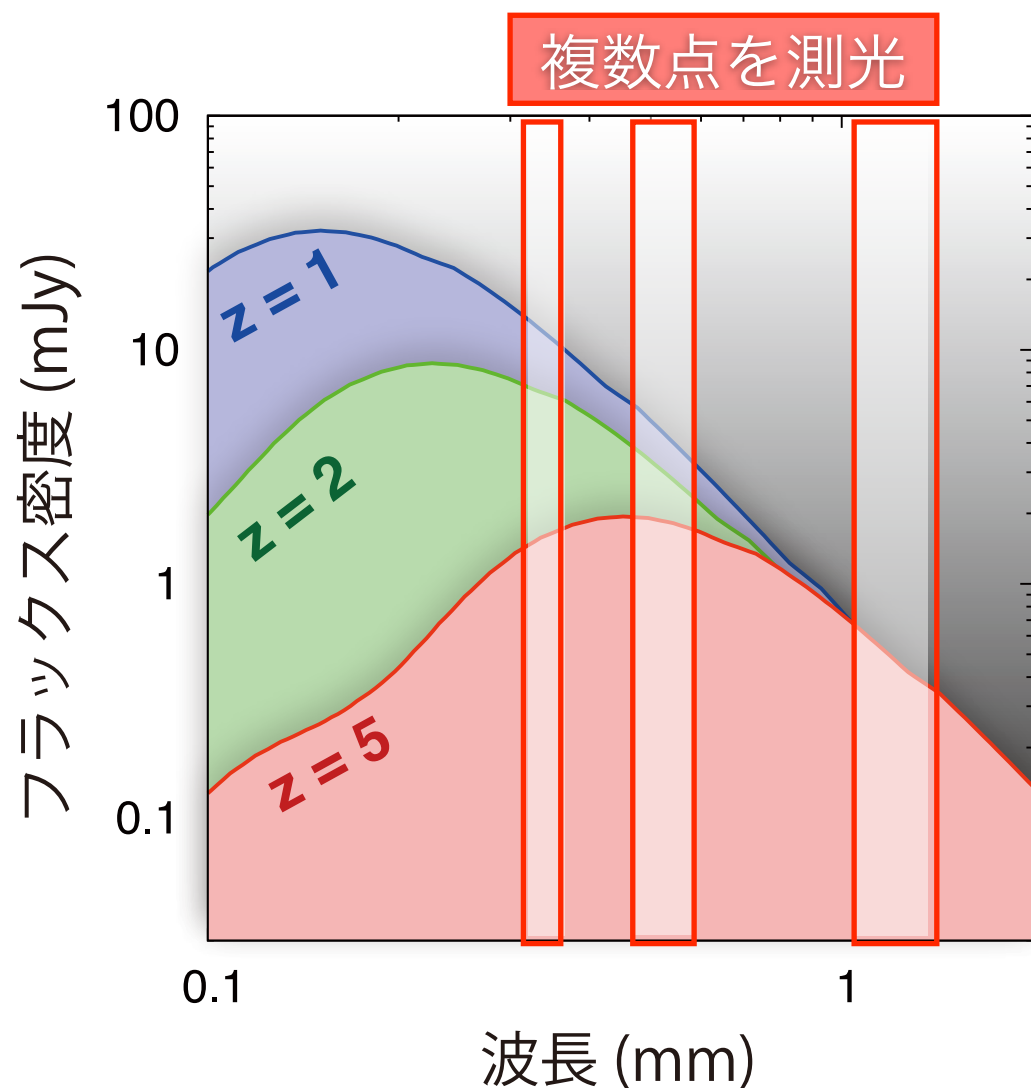
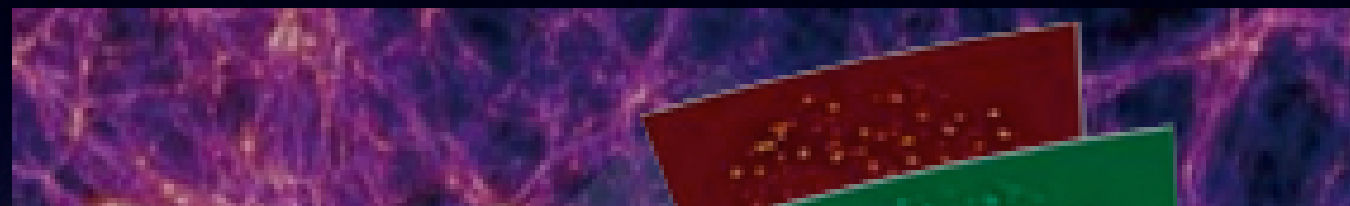


超伝導転移端センサ(TES)型 3 色カメラ

＊ 特別推進 多色サブミリ波カメラ (河野, 大島他)

＊ 天体を探索しながら、SEDの**複数点を同時測光**

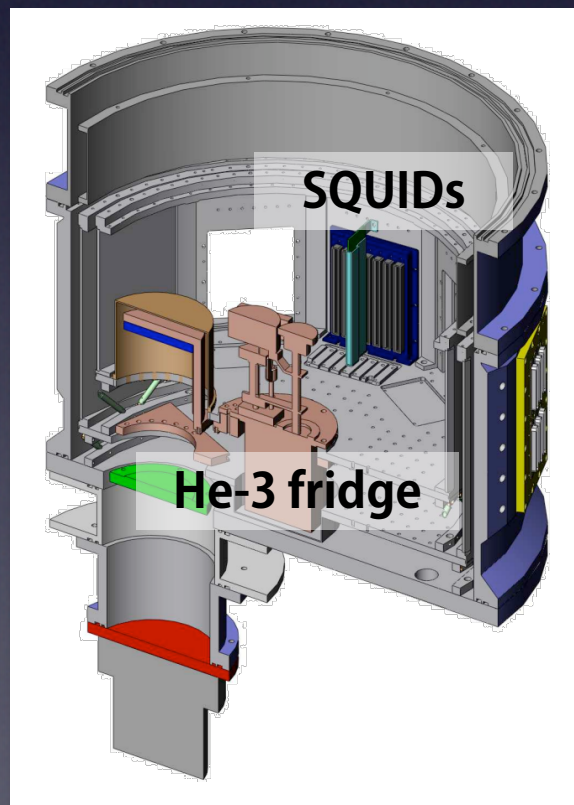
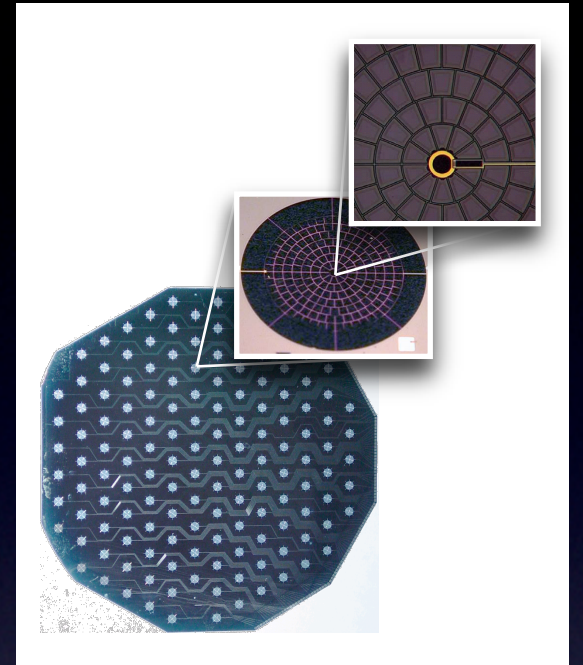
＊ SMG 赤方偏移推定の効率が高い



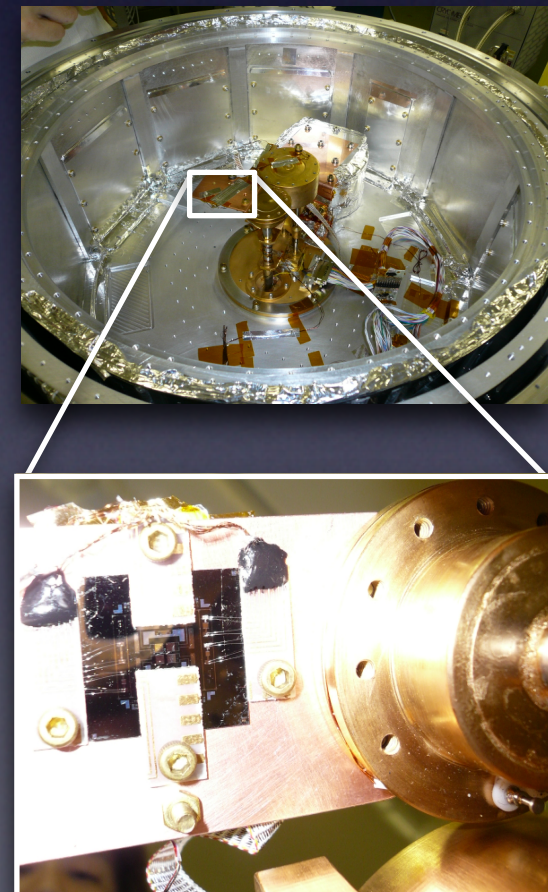


ASTE/TES Camera -- Current status

- * 東大, NAOJ, 北大, UC Berkley, KEK, Cardiff U.
- * 2009/10 現在
 - * 発注・試験：冷却系, readout
 - * 設計・試作：光学系, アレイ, システム, 解析系
- * 2010/12: ASTE搭載・試験 (2色 = 1.1 mm, 850 μ m)
- * 将来 (-2012) **7色**への拡張も検討中



デュワ実物とその内部



試験用 TES チップ