

日本学術会議シンポジウム  
平成30年9月13日  
於・東京大学

LST  
LARGE SUBMILLIMETER TELESCOPE

# 大型サブミリ波望遠鏡

川邊良平(国立天文台)  
田村陽一(名古屋大学)  
河野孝太郎(東京大学)  
他 LST working group

広視野広帯域大口径ミリ波サブミリ波単一望遠鏡

# Large Submillimeter Telescope (LST)

- 口径: 50m (鏡面精度  $45\mu\text{m rms.}$ ) @アタカマ・チリ
  - 広視野:  $0.5\text{ deg } \Phi$  (up to  $1\text{ deg } \Phi$ ) → 高いサーベイ能力
  - 周波数(波長): 70 GHz (4 mm) – 420 GHz (0.8 mm)  
+ up to 1 THz (0.3 mm), 鏡面の一部のみを使用
  - 基幹装置: 超広視野多色連続波カメラ、多画素超広帯域低分散分光装置 (“ミリ波サブミリ波版 HSC + PFS or MUSE/VLT”)、  
+ 多画素広帯域高分散(ヘテロダイン)受信機
- 超伝導検出器(特に直接検出器)・デジタル技術の劇的な発展 → 迅速に天文学へ(単一型望遠鏡の強み)
  - ALMAと相補的なディスカバリー・スペースの開拓
  - NRO45m鏡、ASTE10m鏡の後継機として、我が国( + 東アジア)における電波天文学コミュニティの基盤装置



圧倒的に深く、高解像度で

時間軸天文学

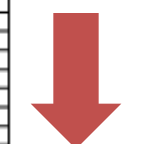
深い



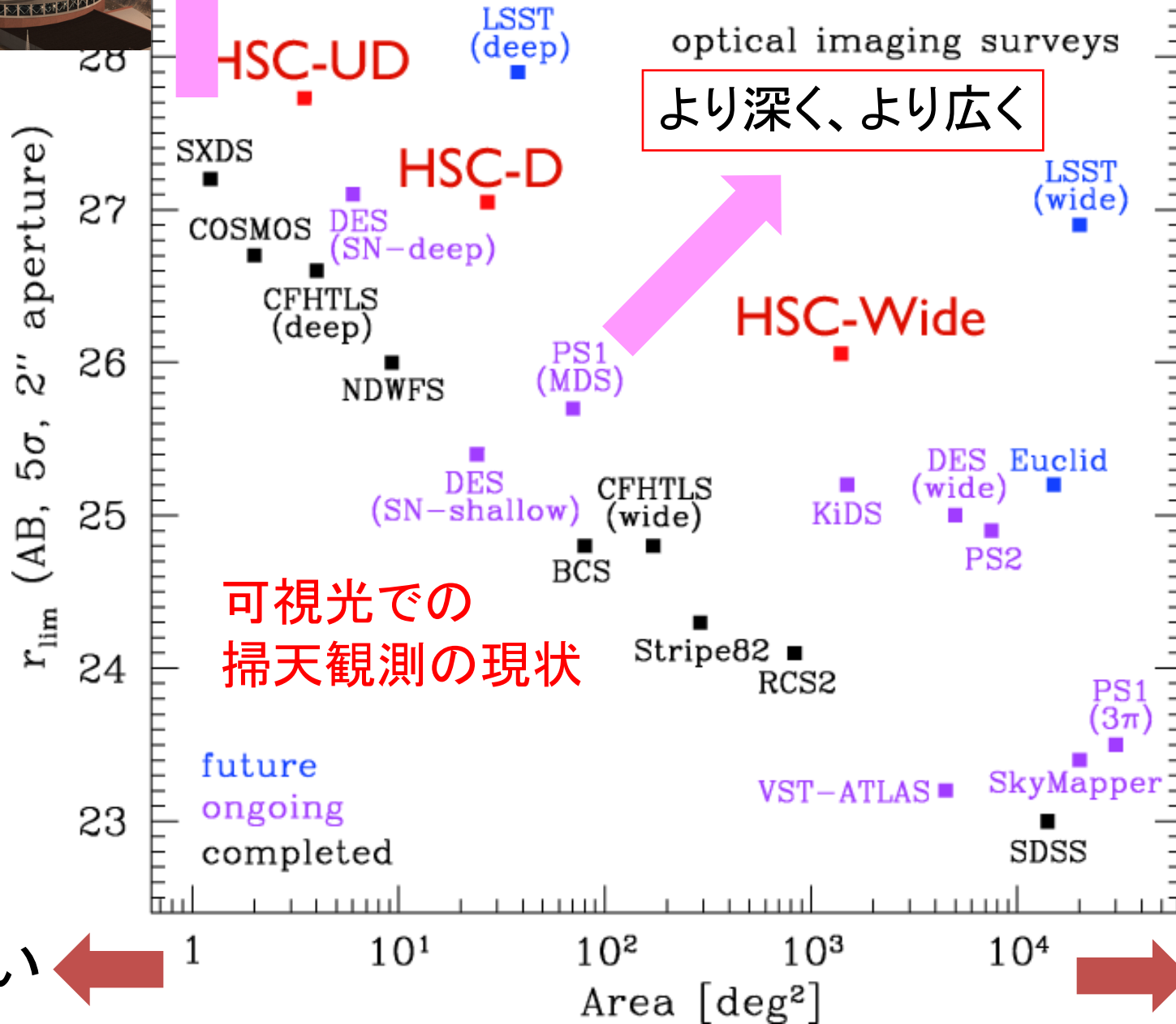
HSC



By Oguri & Takada



浅い



狭い



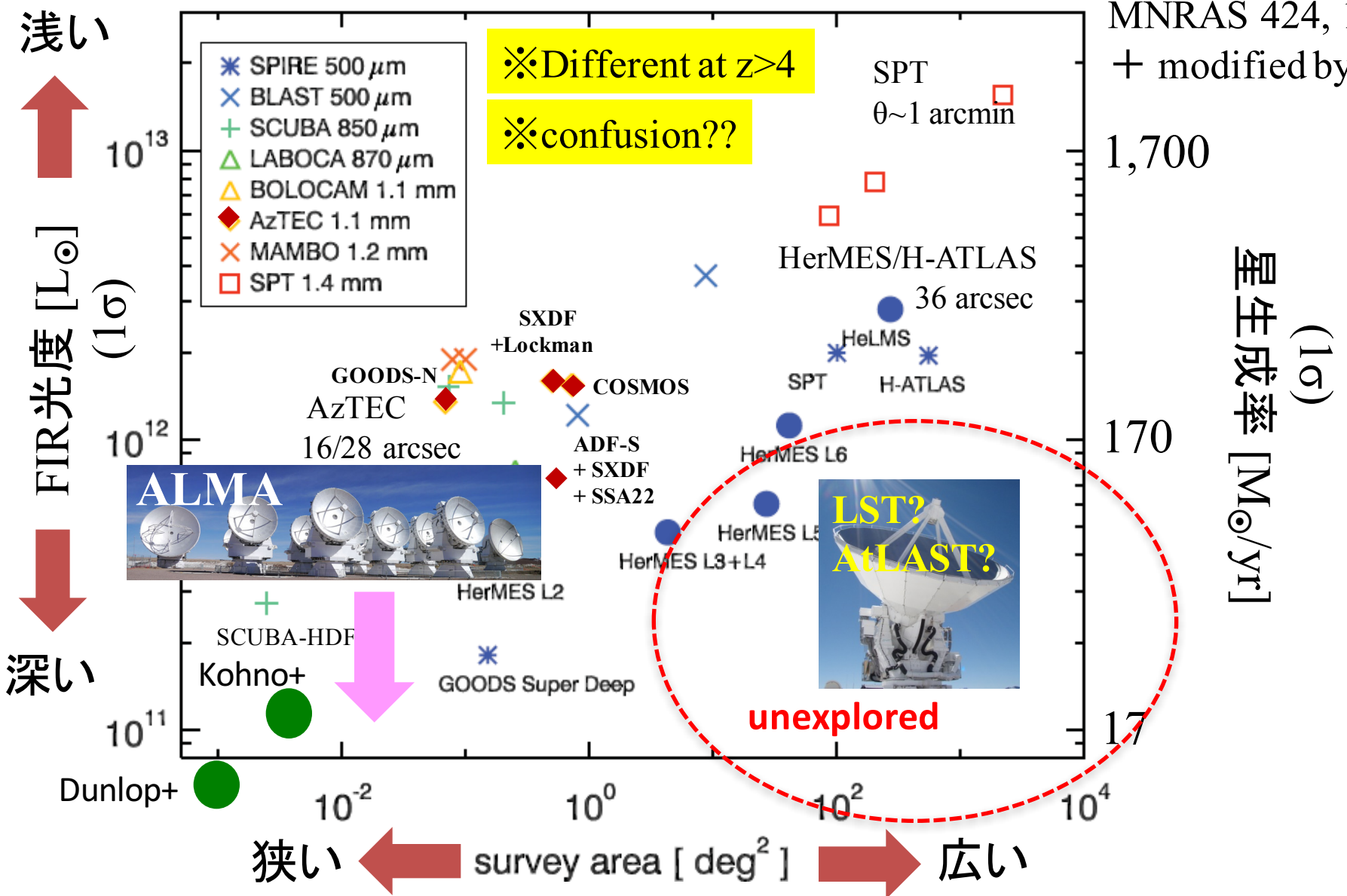
広い



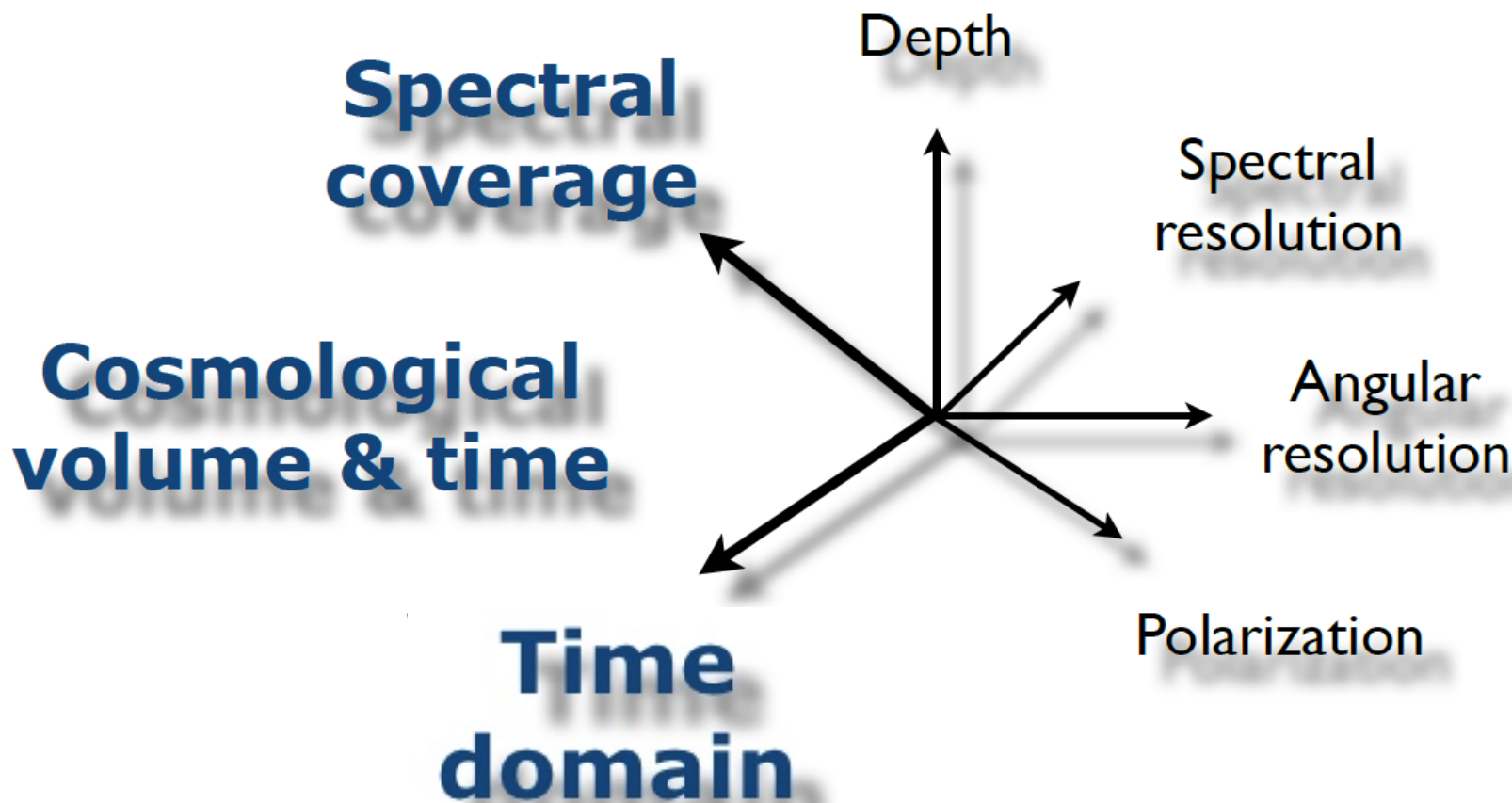
# ミリ波サブミリ波撮像サーベイ

@ $z=2$ ,  $T_{\text{dust}}=35\text{K}$ ,  $\theta < 1$  arcmin

Oliver et al. 2012,  
MNRAS 424, 1614  
+ modified by KK



# LSTが目指すディスカバリー・スペース： ミリ波サブミリ波での“4D探査”



# LSTが切り開くサイエンス



# LSTの2大科学目標

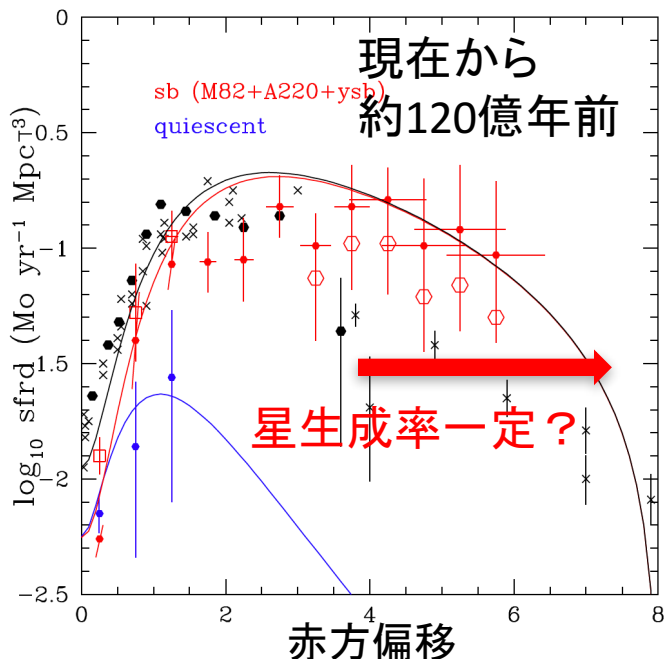
## (1) 宇宙再電離期に至る宇宙史の中での 銀河の形成と進化過程の解明

- [a] 従来のミリ波サブミリ波検出器の常識を覆す超広帯域分光撮像観測装置を駆使し、数平方度～100平方度規模の天域での無バイアスな輝線銀河探査(CO/[CII]/[OIII]トモグラフィ)を行い、宇宙再電離期に至るダストに隠された銀河の探査とその光度関数の測定、また構造形成成長速度の測定を行う。さらに
- [b] 既存の望遠鏡では実現が難しい高頻度での広視野連続波撮像サーベイにより、ミリ波サブミリ波に放射のピークを示すリバーズ・ショックをプローブとした宇宙再電離期にあるガンマ線バーストを探索・発見する。

# 重要な未解明課題: 赤方偏移4~8の時代に、 ダストに隠された星生成活動はあるか?

Rowan-Robinson et al. 2016,  
MNRAS, 461, 1100

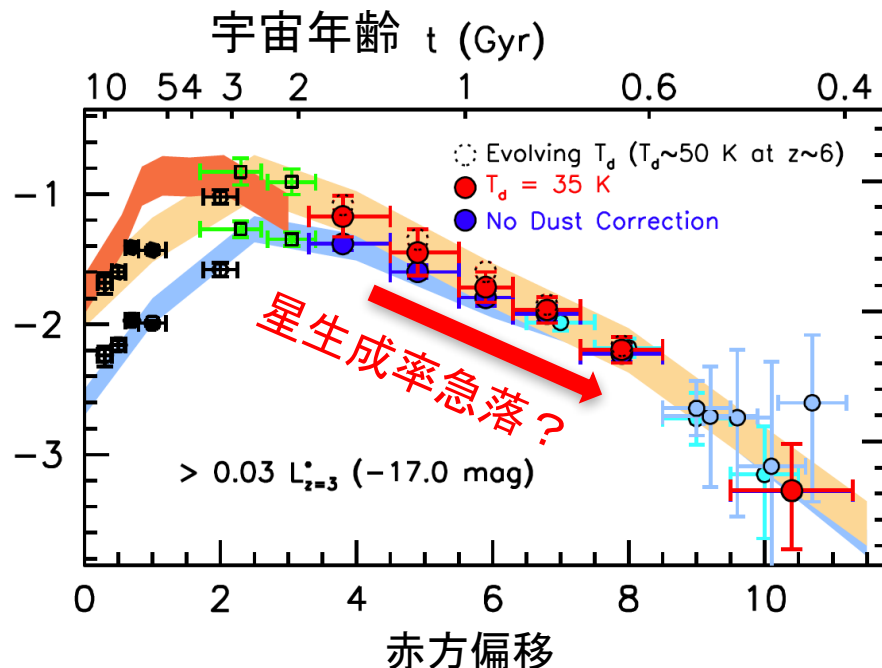
単位体積あたりの星生成率



単位体積あたりの星生成率

$\log \rho_{\text{SFR}} (\text{M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3})$

Bouwens et al. 2016, ApJ, 833, id. 72

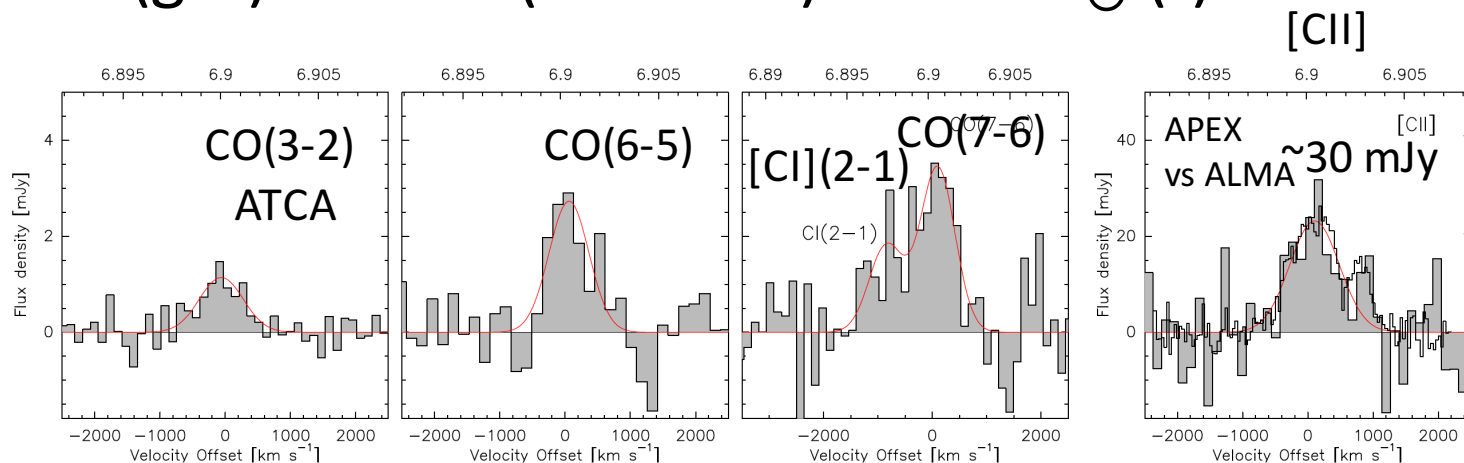
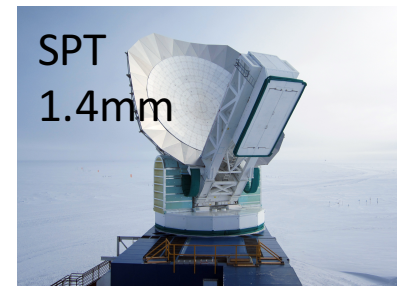


- 2つの対立する最新の観測結果 (ハーシェル望遠鏡・ハubble宇宙望遠鏡等)
- 問題点
  - 遠赤外線衛星での研究: 連続波観測で発見した天体の距離測定に大きな不定性。分光赤方偏移の測定は長時間必要 → 解決策: 最初から分光により天体を探索。
  - 静止系紫外線で選択された銀河のALMAによる観測: 宇宙のごく一部 (~1平方分角) にある、一部の銀河種族しか観測していない。 → 解決策: ALMAより広い範囲 (天球面および奥行き方向) を、無バイアスに (網羅的に) 観測できるように。



# 宇宙再電離期のダストに覆われた銀河

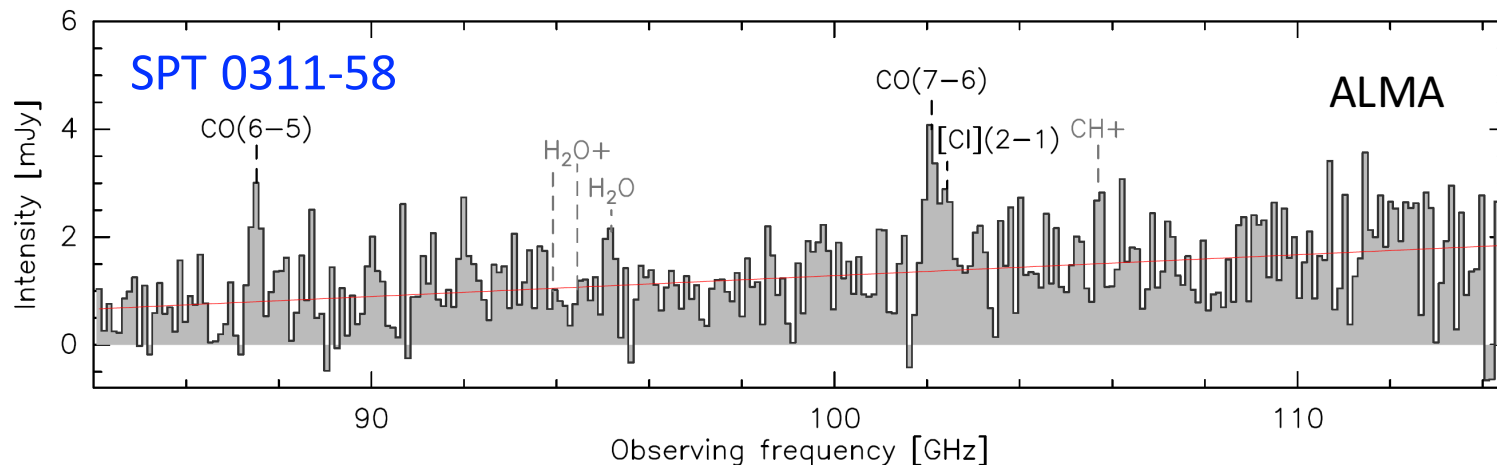
- 赤方偏移  $z = 6.900 \pm 0.002$
- $M(\text{dust})^{\text{intrinsic}} = (3.0 \pm 0.4) \times 10^9 M_{\odot}$
- $M(\text{gas})^{\text{intrinsic}} = (3.3 \pm 1.9) \times 10^{11} M_{\odot}$  (!)



$$L(\text{IR}) \cdot \mu = (4.1 \pm 0.7) \times 10^{13} L_{\odot}$$

$$\mu = 1.9$$

$$T_{\text{dust}} = 36 \pm 7 \text{ K}$$



Strandet et al.  
2017, ApJ,  
842, L15

# LST-“3D”分光によるサブミリ波輝線銀河探査

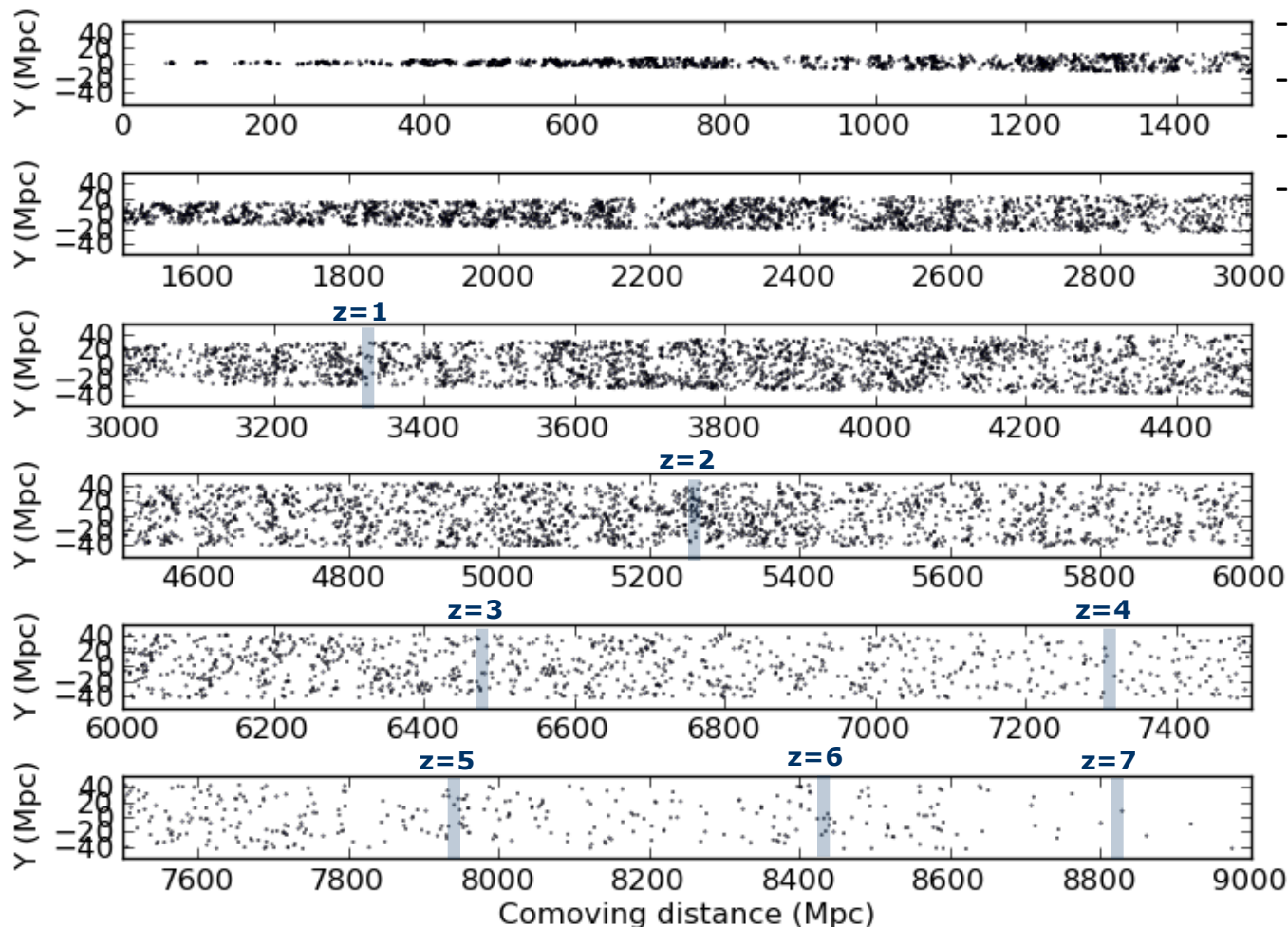
## 2 deg<sup>2</sup> Light cone

~100,000 CO輝線銀河      ~1,000 [CII]輝線銀河 ( $z > 6$ )

“observations” of  
mock galaxies from S<sup>3</sup>-SAX

想定する分光撮像装置:

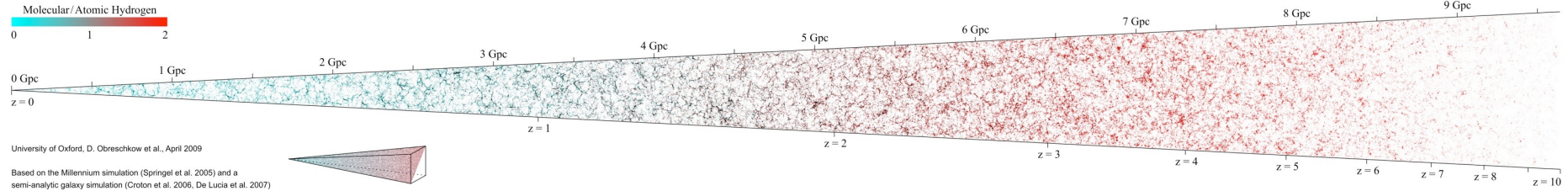
- 100 pixels
- 70 – 370 GHz coverage
- 2 deg<sup>2</sup> area
- 1,000 hours (on-source)



Tamura, Y., +  
in prep.

Kawabe+  
2016, SPIE

# SKA Design Studies – Virtual Hydrogen Cone



## CO/[CII] Tomography

### RSD 赤方偏移空間歪み

構造形成成長速度の推定により重力理論を検証, ダークエネルギー問題

### LSS 宇宙大規模構造

クラスタリング解析によりダークハロー - バリオン関係を調査, ダークマター問題

### CSFH 宇宙星形成史

分子ガス光度関数・質量関数の進化を調査, “隠された” バリオン進化史

### EoR 宇宙再電離期

最遠方の“隠された” 銀河を探索, 初代天体の形成

### Galaxies 銀河進化

分子ガス・原子ガスの物理状態や力学的構造を調査, 銀河進化史

### ... and serendipitous discoveries

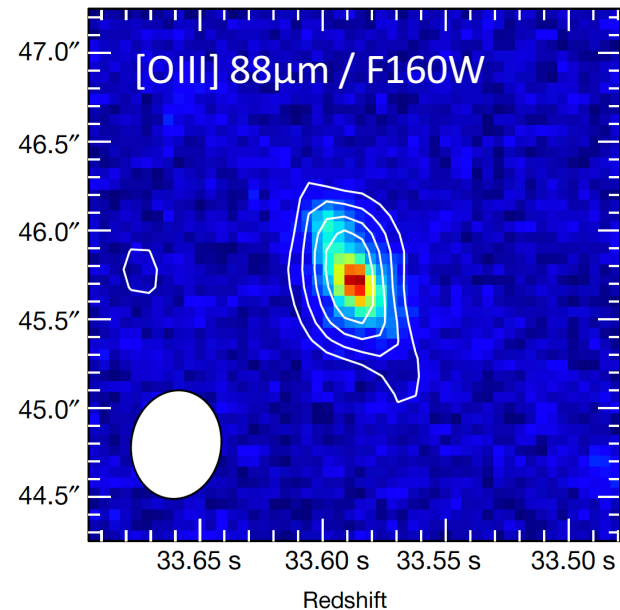
予想外の発見は、いつも無バイアスサーベイから

# 宇宙再電離期の銀河を探る新しいプローブ: [OIII] 88 $\mu\text{m}$ 輝線

最も大きい分光赤方偏移 ( $z=9.110$ )

LETTER

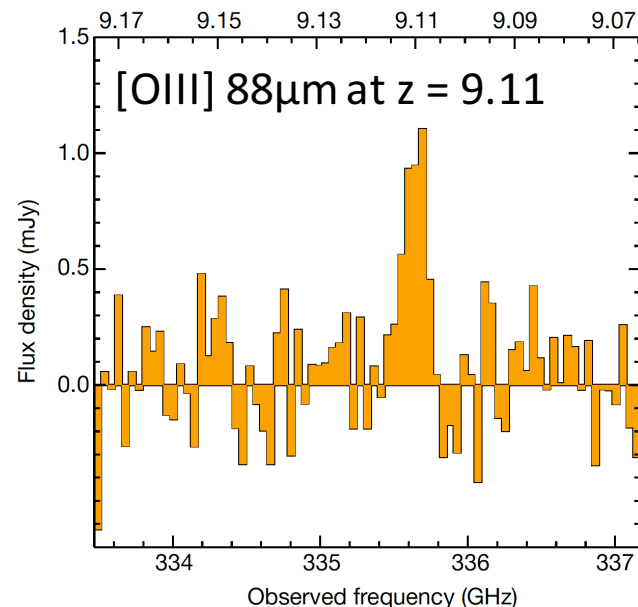
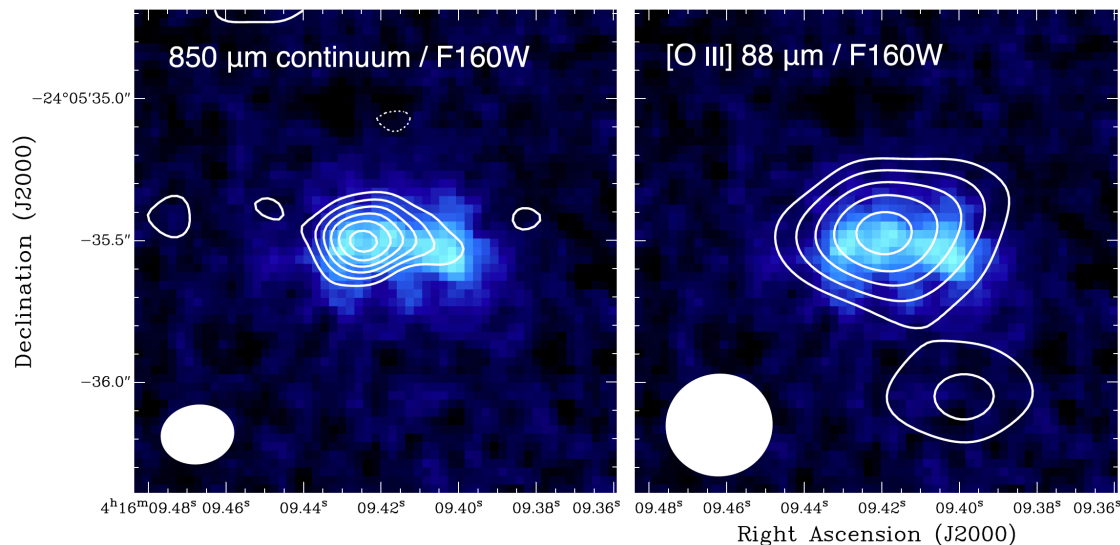
<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0117-z>



## The onset of star formation 250 million years after the Big Bang

Takuya Hashimoto<sup>1,2\*</sup>, Nicolas Laporte<sup>3,4</sup>, Ken Mawatari<sup>1</sup>, Richard S. Ellis<sup>3</sup>, Akio K. Inoue<sup>1</sup>, Erik Zackrisson<sup>5</sup>, Guido Roberts-Borsani<sup>3</sup>, Wei Zheng<sup>6</sup>, Yoichi Tamura<sup>7</sup>, Franz E. Bauer<sup>8,9,10</sup>, Thomas Fletcher<sup>3</sup>, Yuichi Harikane<sup>11,12</sup>, Bunyo Hatsukade<sup>13</sup>, Natsuki H. Hayatsu<sup>12,14</sup>, Yuichi Matsuda<sup>2,15</sup>, Hiroshi Matsuo<sup>2,15</sup>, Takashi Okamoto<sup>16</sup>, Masami Ouchi<sup>11,17</sup>, Roser Pelló<sup>4</sup>, Claes-Erik Rydberg<sup>18</sup>, Ikkoh Shimizu<sup>19</sup>, Yoshiaki Taniguchi<sup>20</sup>, Hideki Umehata<sup>13,20,21</sup> & Naoki Yoshida<sup>12,17</sup>

## [OIII]/dust detected at a $z = 8.3$ galaxy



Hashimoto+ 2018

Tamura+ 2018

# LST

## LARGE SUBMILLIMETER TELESCOPE

- ☼ LARGE APERTURE ( $D = 50\text{ m}$ )
- ☼ WIDE FIELD OF VIEW ( $\Phi > 0.5\text{ deg}$ )
- ☼ LONG-SUBMM/MM FREQUENCY BAND
- ☼ SURVEY-ORIENTED

ミリ波サブミリ波版  
超広帯域分光器

### DESHIMA

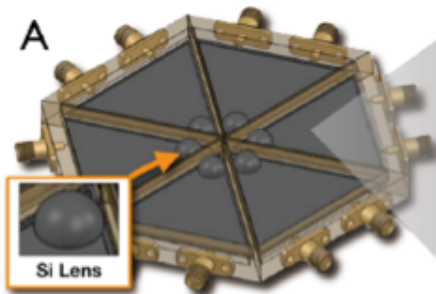
Deep Spectroscopic High-z Mapper

(Endo et al. 2011)

325 – 905 GHz

6 beams

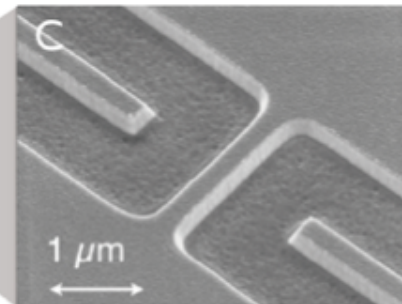
ミリ波サブミリ波版  
多天体分光器  
MOSAIC



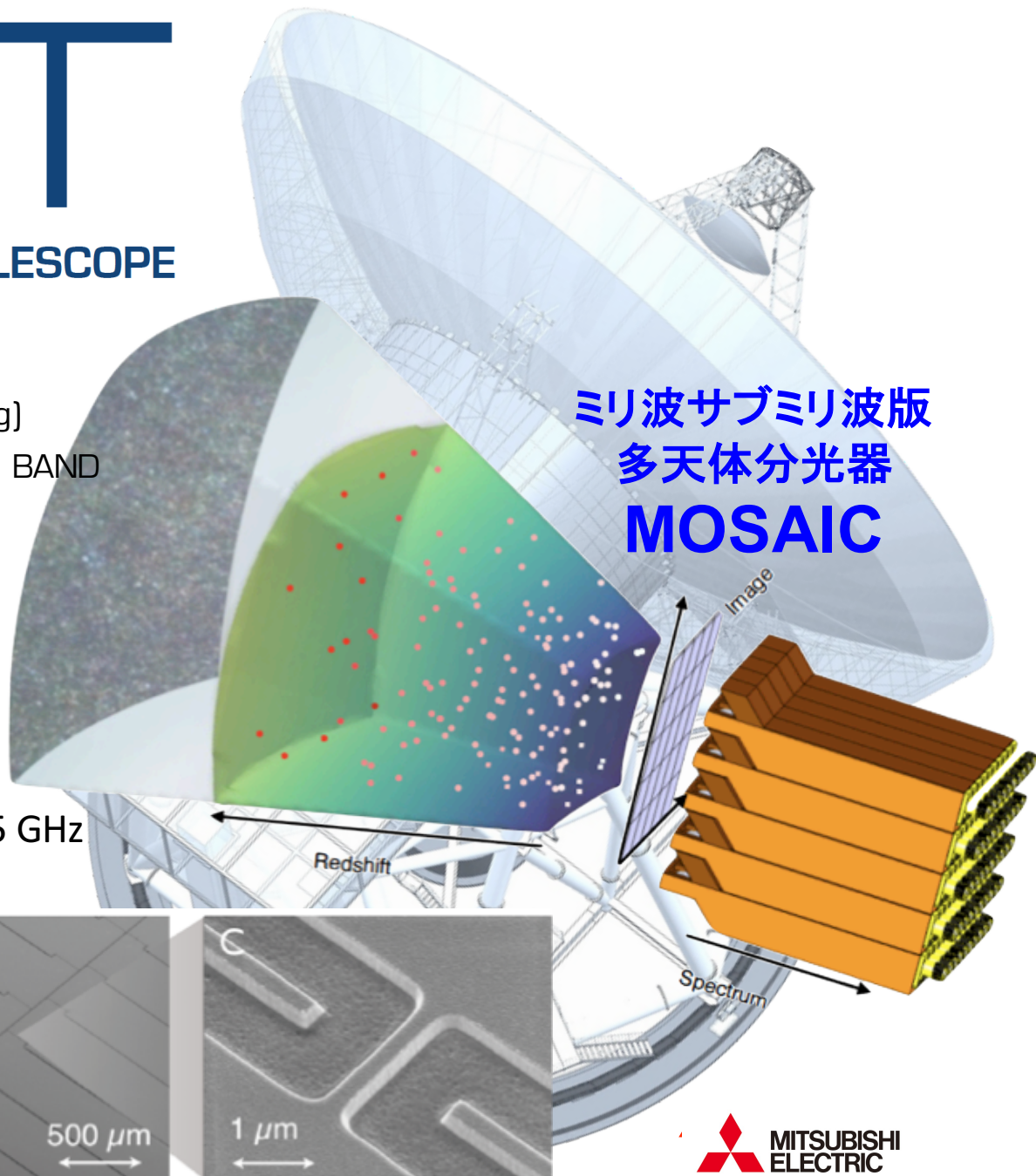
←  $\phi 4\text{-inch holder}$  →



Filterbank



Microwave Coupler



# LST

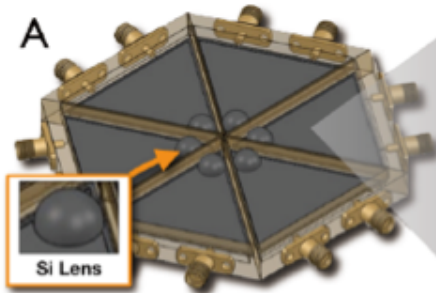
LARGE SUBMILLIMETER TELESCOPE

電波の伝統的な強みであるヘテロダイン(高分散分光)に加えて低・中分散・超広帯域分光能力(多天体分光・面分光能力)を劇的に向上させるアストロ・フォトニクス技術

ミリ波サブミリ波版  
超広帯域分光器 “X-shooter”

## DESHIMA

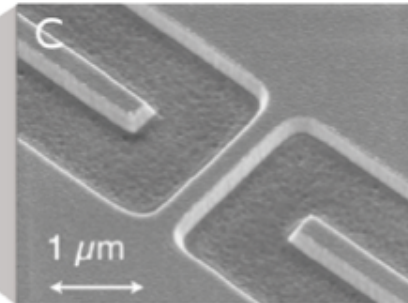
Deep Spectroscopic High-z Mapper  
(Endo et al. 2011)



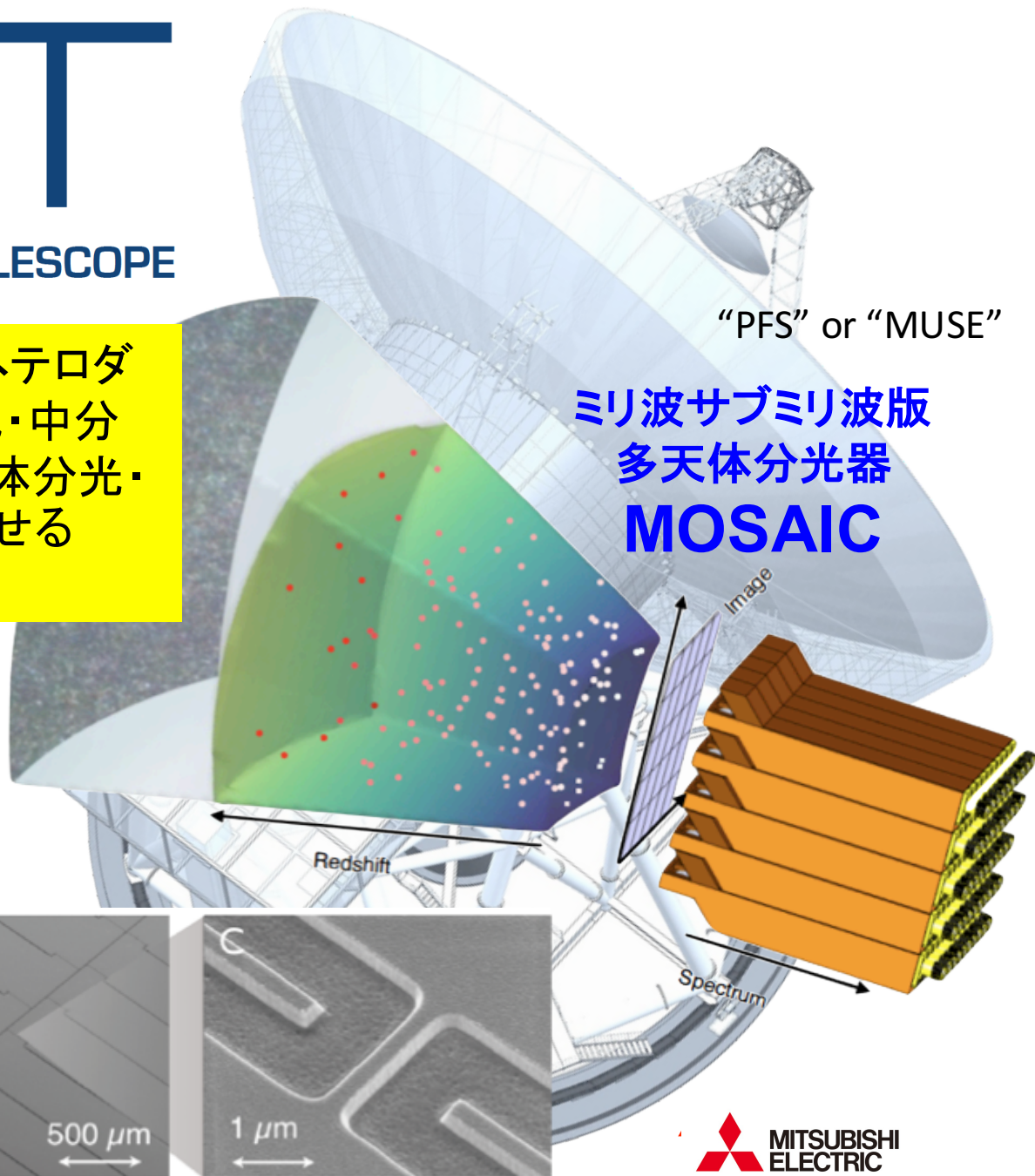
← φ4-inch holder →



Filterbank



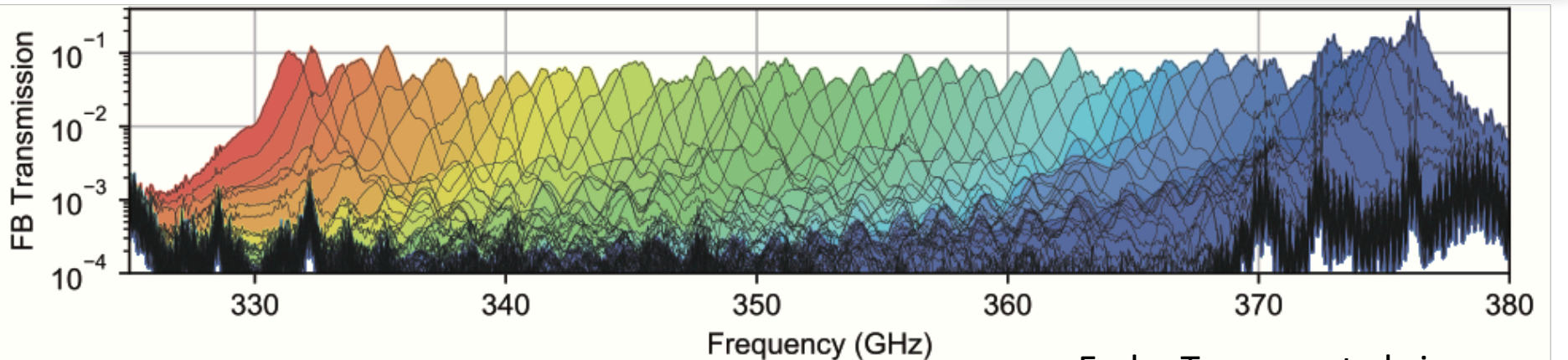
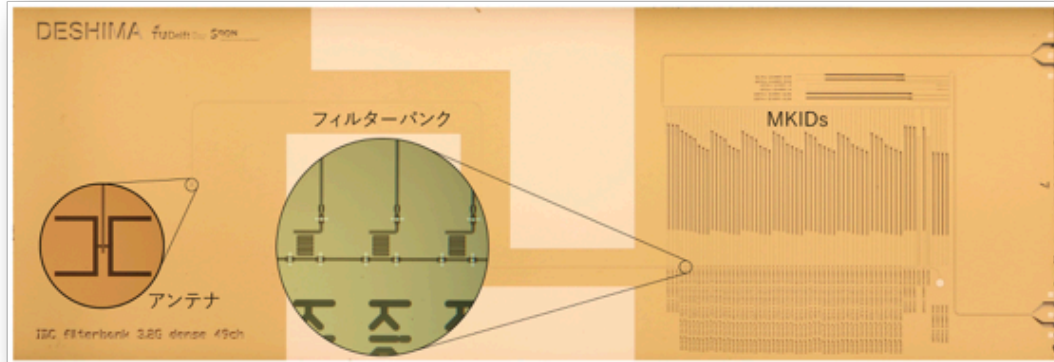
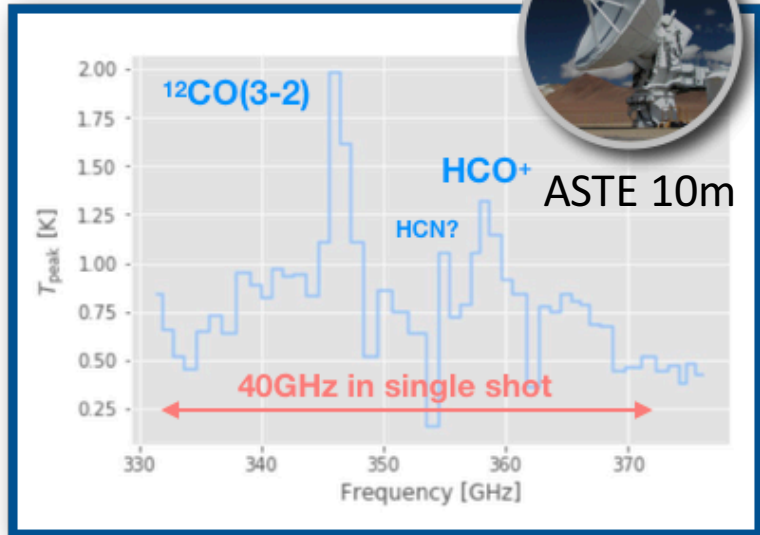
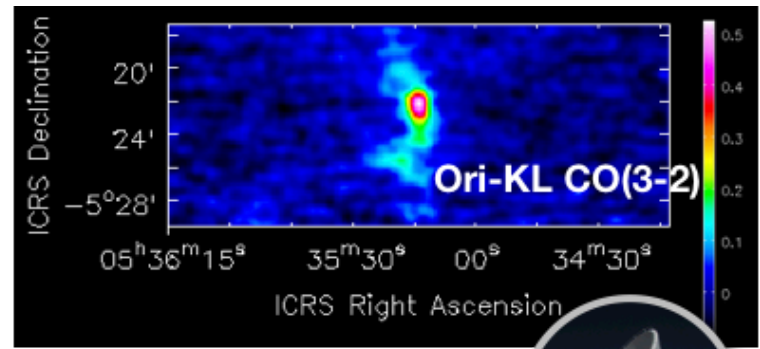
Microwave Coupler



MITSUBISHI  
ELECTRIC

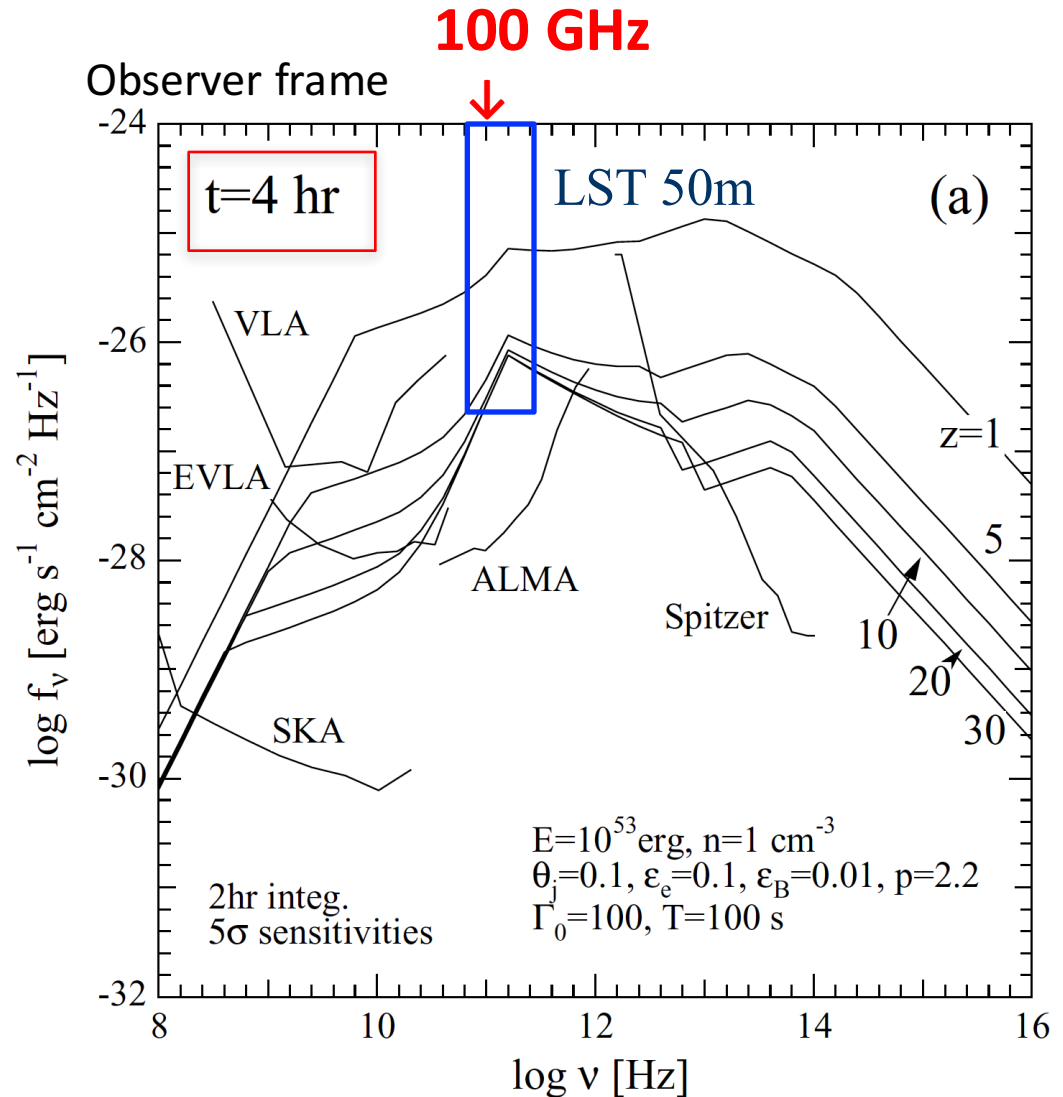
# オンチップ型超伝導分光器の天体信号による初の技術実証

LSTのコア・サイエンスを牽引する先進的な焦点面装置  
その基盤となる超広帯域分光撮像技術DESHIMAを  
世界に先駆けてASTEで実証装置(2017年11月)



# ミリ波サブミリ波帯時間域天文学の開拓： L-GRB@z=5-30からのリバーシブルショック

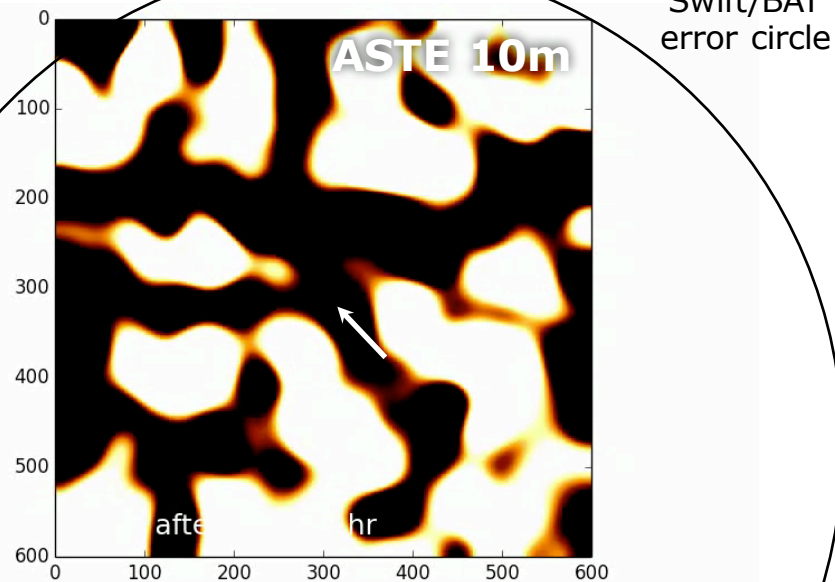
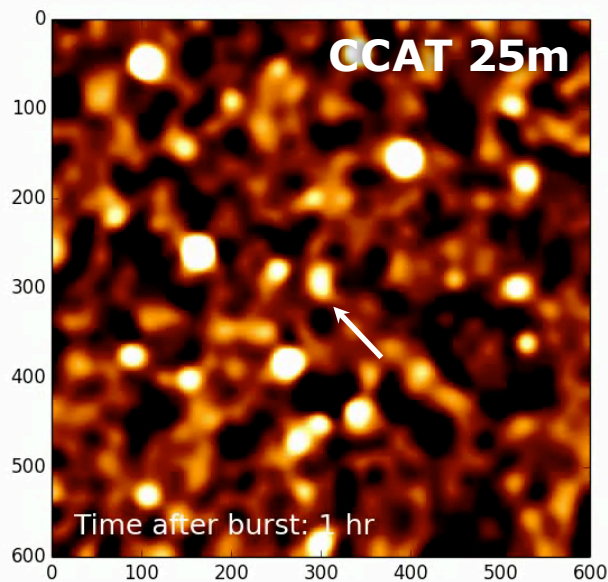
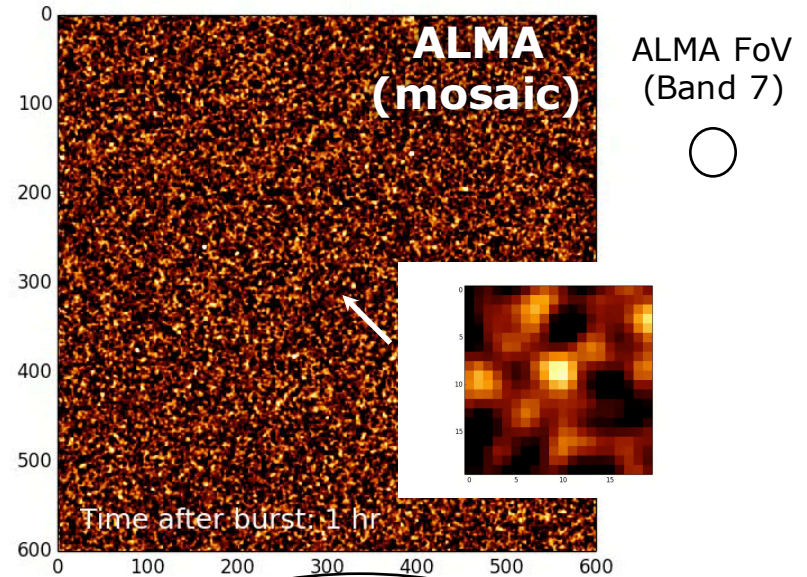
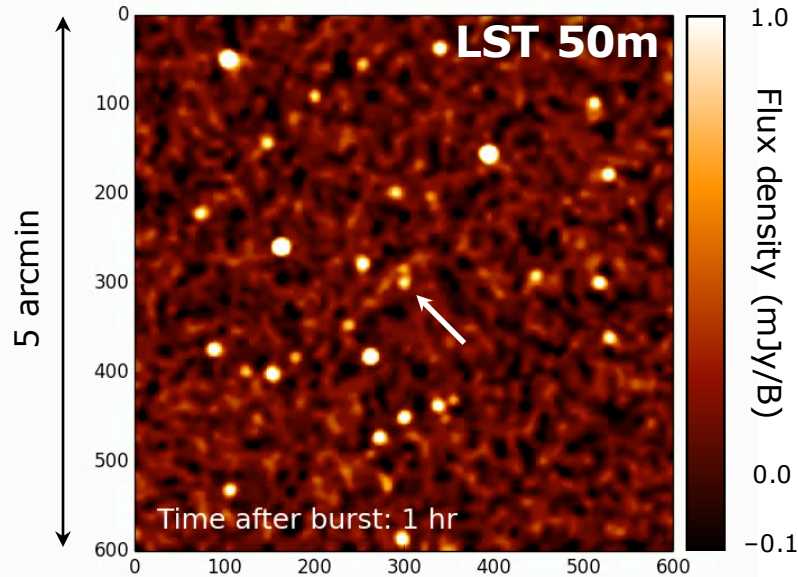
- high-z long-GRBs
- バーストから数時間～1日以内にみられる  
リバーシブルショック：ミリ波から遠赤外線域にSEDのピーク
- mJyオーダーの明るさ



Inoue et al., 2007,  
MNRAS, 380, 1715



# $z = 30$ GRB afterglow (1-12hr, 300GHz)



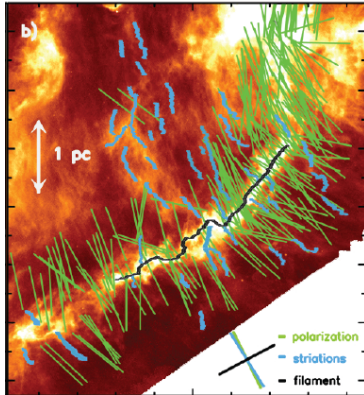
# LSTの2大科学目標

## (2) 星形成初期段階の多様性と普遍性の解明

- [c] 星形成で重要な役割を担うと考えられる分子雲フィラメントの3次元構造の観測と星形成初期段階にある分子雲コアの大統計サンプルに基づく質量関数を測定する。その中でも非常に希な“ファースト・コア”の発見・統計的研究を行う。また、
- [d] 星なしコアから原始惑星系円盤まで数多くの天体でミリ波サブミリ波帯スペクトル線分光イメージング・サーベイを行い、分子雲から惑星形成までの化学進化の多様性と普遍性の研究を行う。

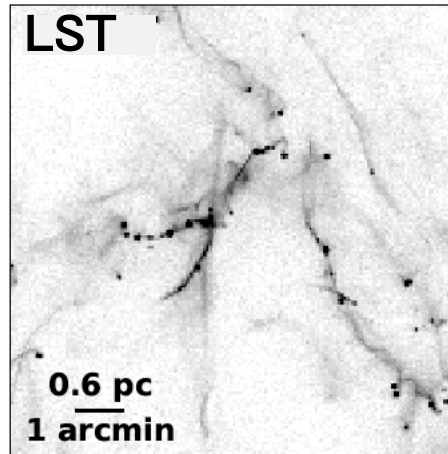
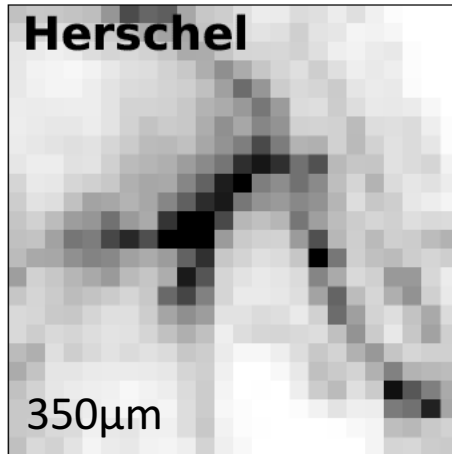
# 大統計に基づくフィラメントの役割と 分子雲コアの質量関数

磁場の役割？

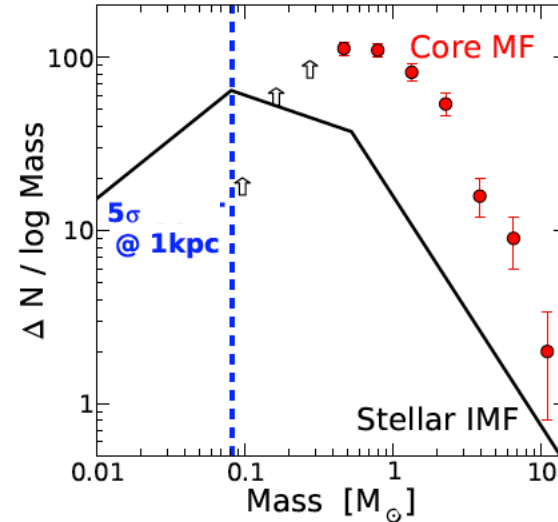


High resolution (<math><6''</math>) and fast mapping capability @350 $\mu\text{m}$

← Spitzer/Herschel  
8 $\mu\text{m}$ , 24 $\mu\text{m}$ , 70 $\mu\text{m}$   
3-color composite



D=25m case



1pcスケールの高密度分子コアを銀河系全域に渡り解像 → 大統計サンプル → 寿命の短い進化段階まで調査 → 多様性と普遍性の解明

輝線によるフィラメントの3D(空間・速度)構造 → フィラメントの分裂 → 分子雲コア形成

1 deg<sup>2</sup>, d=1kpc  
20 hours

Herschel衛星による  
Aquila分子雲  
(距離140pc)

# 星形成最初期での化学的多様性

- 同じような進化段階に見えるコアでも顕著な化学的多様性 (Sakai & Yamamoto 2013, Chem. Rev., 113, 8981)
  - さらにその前段階 = 星なしコアで、化学的多様性は既に発現？
  - しかも大型有機分子の分布は空間的に広がっている
- 大規模マッピング・サンプルに基づく統計的な研究が次のブレークスルー

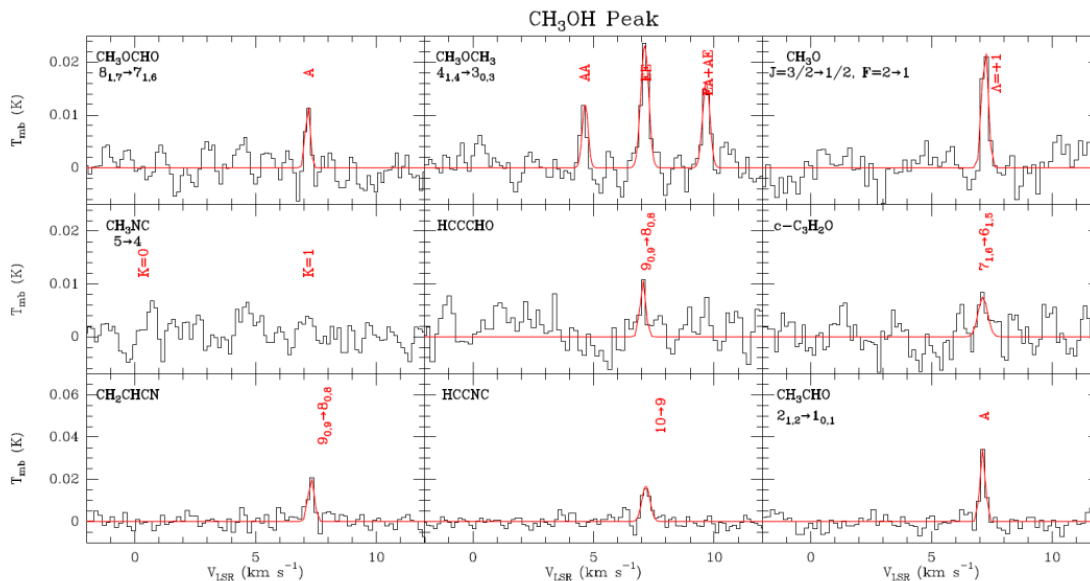
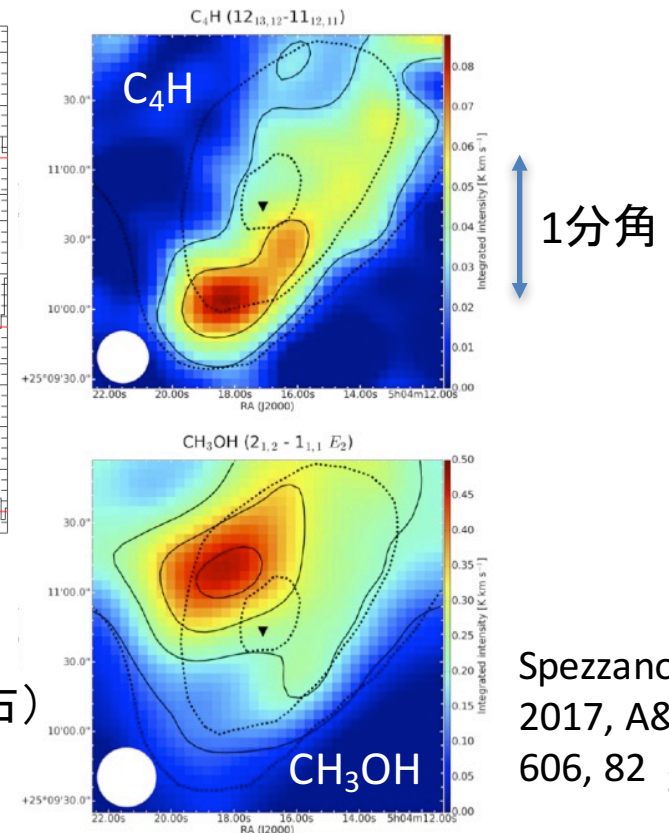


Figure 2. As in Figure 1, but for the position of the  $\text{CH}_3\text{OH}$  peak.

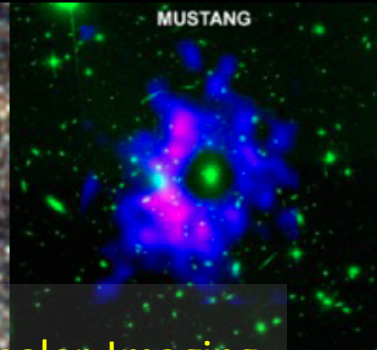
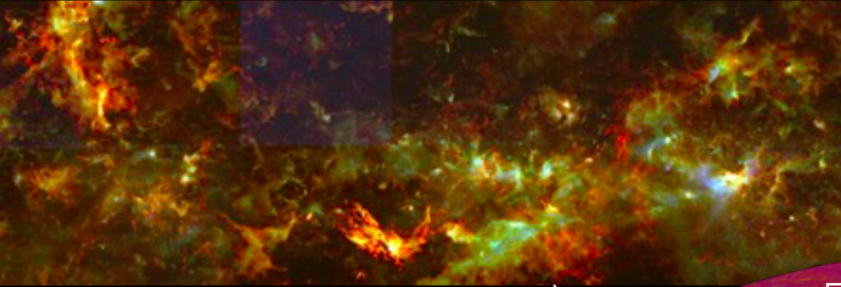
星なしコア L1544 での IRAM30m 鏡による観測  
大型有機分子の検出(上)とメタノールの空間分布(右)

Jimenez-Serra et al. 2016, ApJ, 830, L6



Spezzano et al.  
2017, A&A,  
606, 82 20

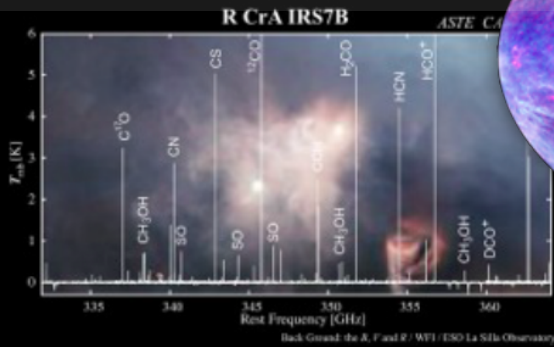
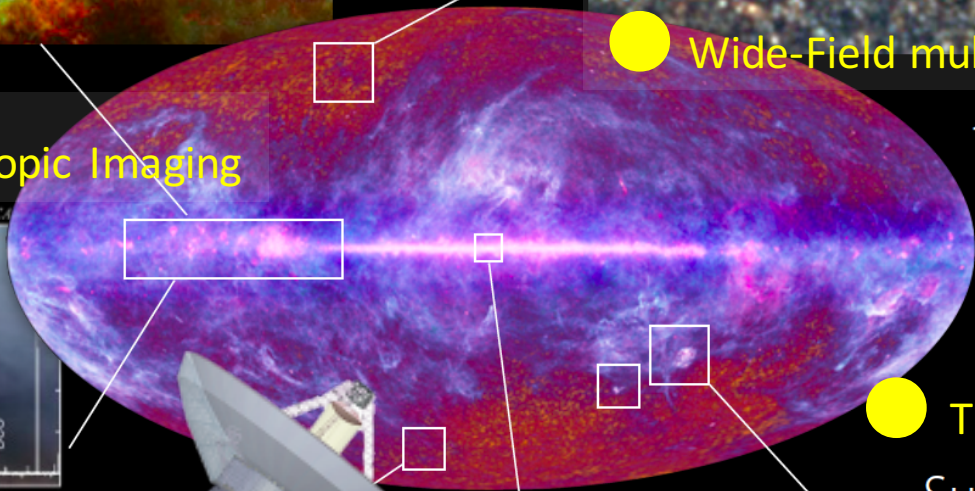
## Distant Galaxies and Clusters



● Wide-Field multi-color Imaging

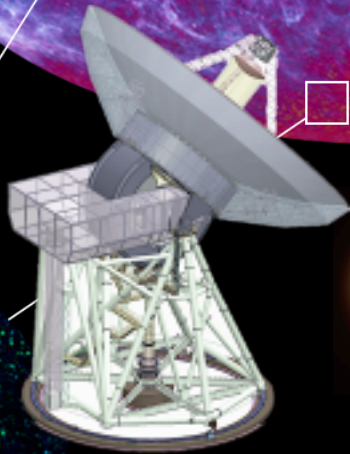
Galactic Plane

● Wide-Field Spectroscopic Imaging

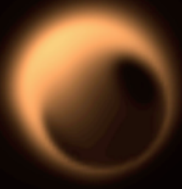


Astrochemistry

● Spectral-line mapping survey



Nearby Galaxies



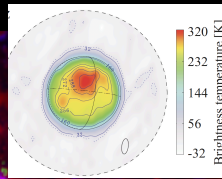
VLBI

● high cadence submm VLBI

● Time-domain Science

Submm Transients

Planetary atmospheres



Magellanic Clouds

### 高頻度な撮像サーベイや長時間モニター観測による

- “みなしご残光”の検出によるガンマ線バーストのジェット構造の研究
- 母銀河中を彷徨う中質量ブラックホールの探査
- 発見時に位置不定性の大きい高速電波バースト天体や重力波源のミリ波サブミリ波即時追求観測
- 太陽系惑星の大気中微量分子モニターによる突発的/長期的気候環境変動の観測的解明
- VLBIの1ステーションとして行うブラックホール近傍のダイナミックな活動現象の解明と強重力場における一般相対性理論の観測的検証

# 技術的検討状況



# Large Submillimeter Telescope

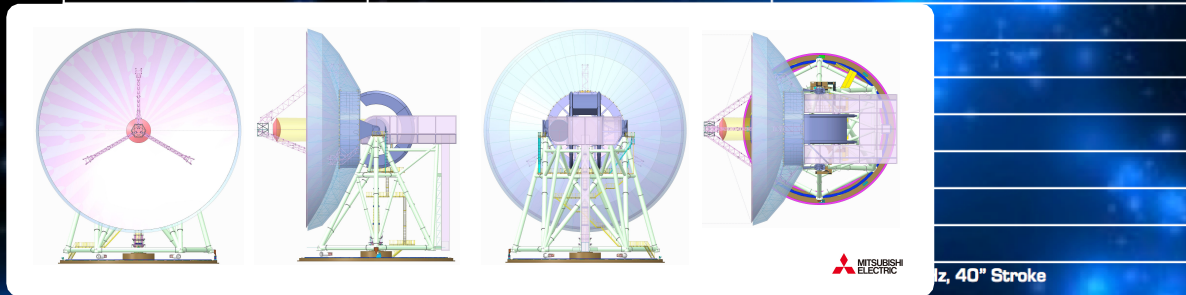
## Basic specifications

Item	Requirement	Goal
Diameter (D)	50 m	-
Frequency (f)	70-420 GHz, 420-950 GHz*1	70-420 GHz, 420-1200 GHz*1
Wavelength ( $\lambda$ )	4.3-0.71 mm, 0.71-0.35 mm*1	4.3-0.71 mm, 0.71-0.25 mm*1
Spatial Resolution ( $\theta$ )	22-3.6 arcsec	22-3.6 arcsec
Field of View ( $\Phi$ )	0.5 deg	1.0 deg
Operation Period	30 yr	-
Candidate Site	Chile	-
Radome?	None	-

\*1) Illumination on inner 30m, under the 0th operation condition.

## Telescope

Item	Requirement	Goal
Azimuth Range	-270 to + 270 deg	-
Elevation Range	0-92 deg	-
Zenith Blind Spot ( $Z_{blind}$ )*1	< 5 deg	-



SUB-REFLECTOR

MAIN REFLECTOR

TERTIARY MIRROR

FOURTH MIRROR

COLLIMATOR TOWER

\*1) Limited by AZ scan velocity.

\*2) Around AZ or EL axis only.

\*3) Actual velocity on the sky with keeping the tracking accuracy and pointing knowledge, over all EL range eliminating  $Z_{blind}$ .

\*4) Actual acceleration on the sky with keeping the tracking accuracy and pointing knowledge, over all EL range eliminating  $Z_{blind}$ .

\*5) Difference the commanded coordinate (PROG) and actual coordinate (REAL). Defined as 1/2 HPBW. Depending on operation conditions.

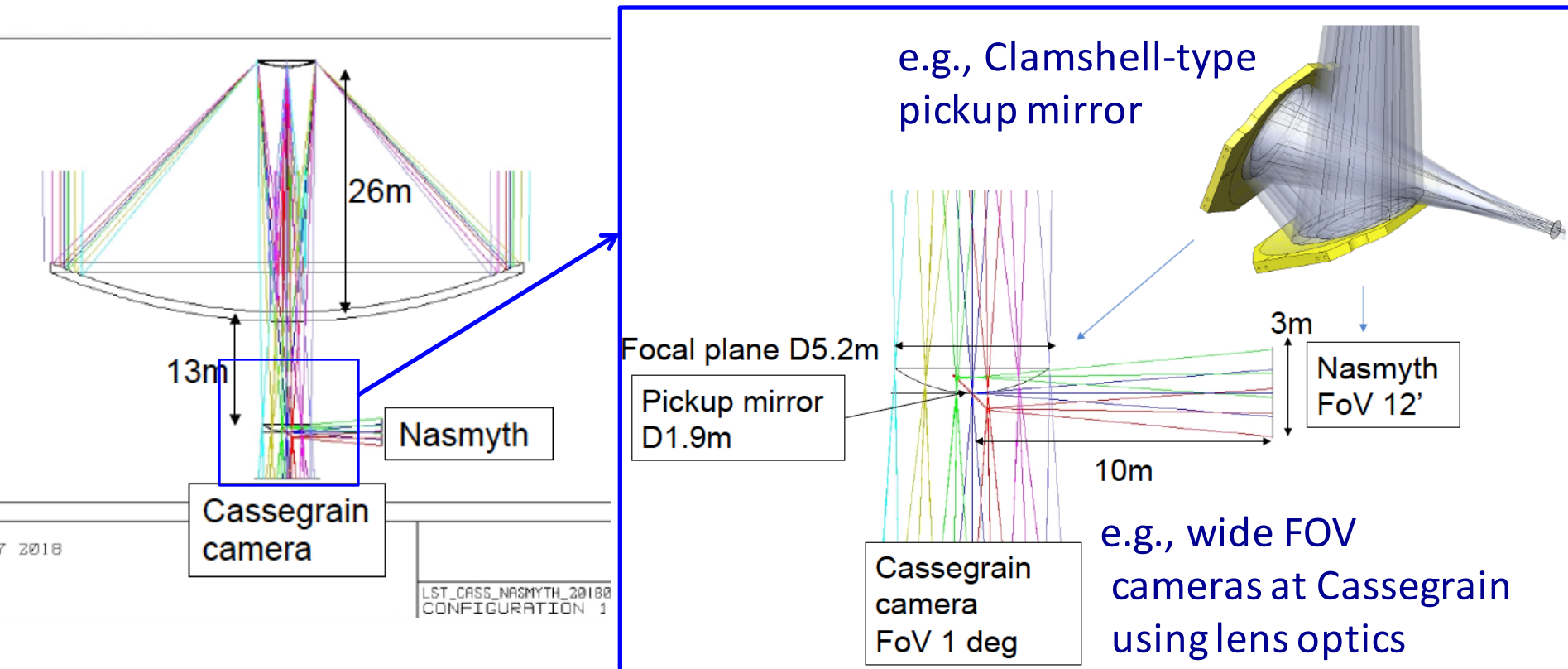
\*6) Defined as 1/10 HPBW. Depending on operation conditions

\*7) Elapsed time for which the boresight goes across the FoV and then settles.



# 広視野を確保するサブミリ波光学系

- Hybrid of Nasmyth and Cassegrain
- $D_1=50\text{m}$ ,  $D_2=6.6\text{m}$ , &  $F/6$ , but  $M=15 \rightarrow 10$
- FoV = 0.76 deg @850 micron; a little improved
- Primary focal ratio=0.6



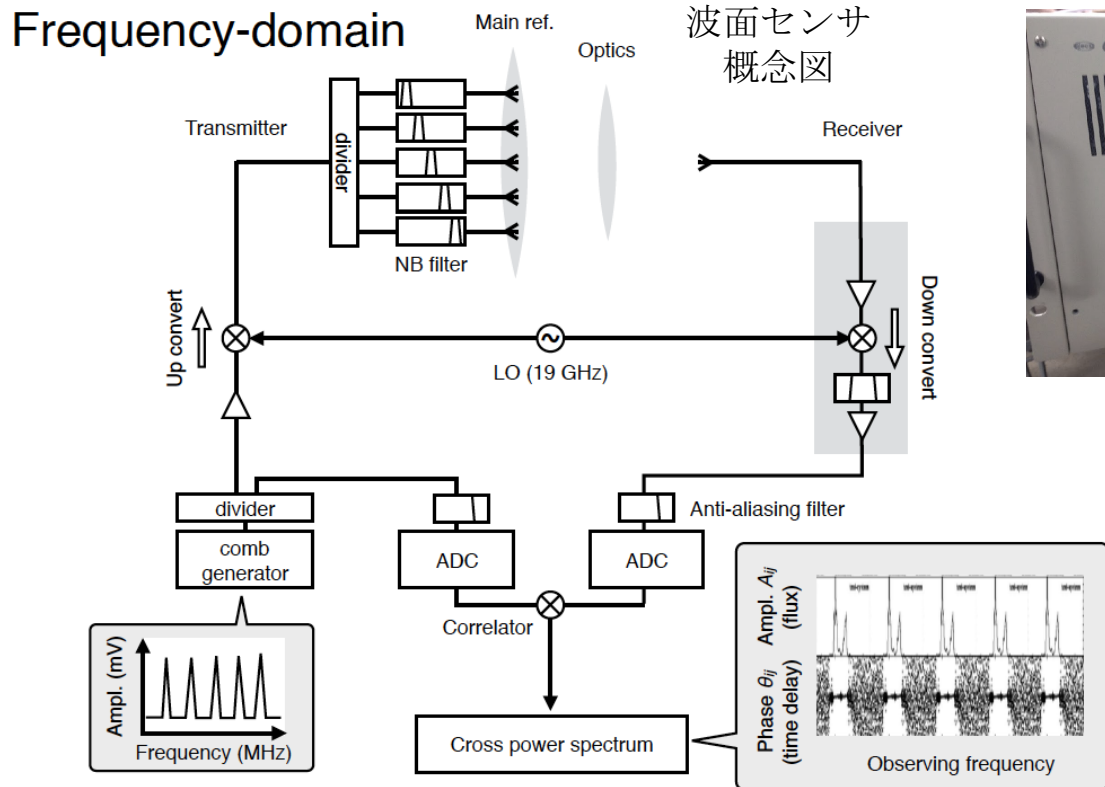
# ミリ波補償光学の提唱

問題点：

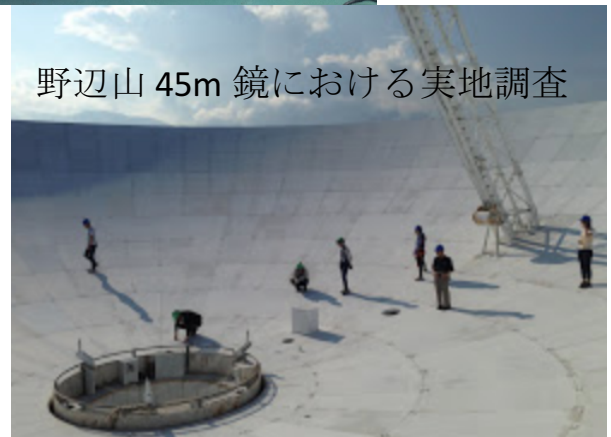
- ・ (サブ)ミリ波では、主鏡変形による波面劣化が顕著
- ・ 波面計測方法が確立されていない

ミリ波補償光学 (田村, 川邊 他)：

- ・ 主鏡面上の参照信号＋開口面干渉法による主鏡変形の実時間計測
- ・ 副鏡あるいは他の光学素子での能動的波面補償を実現



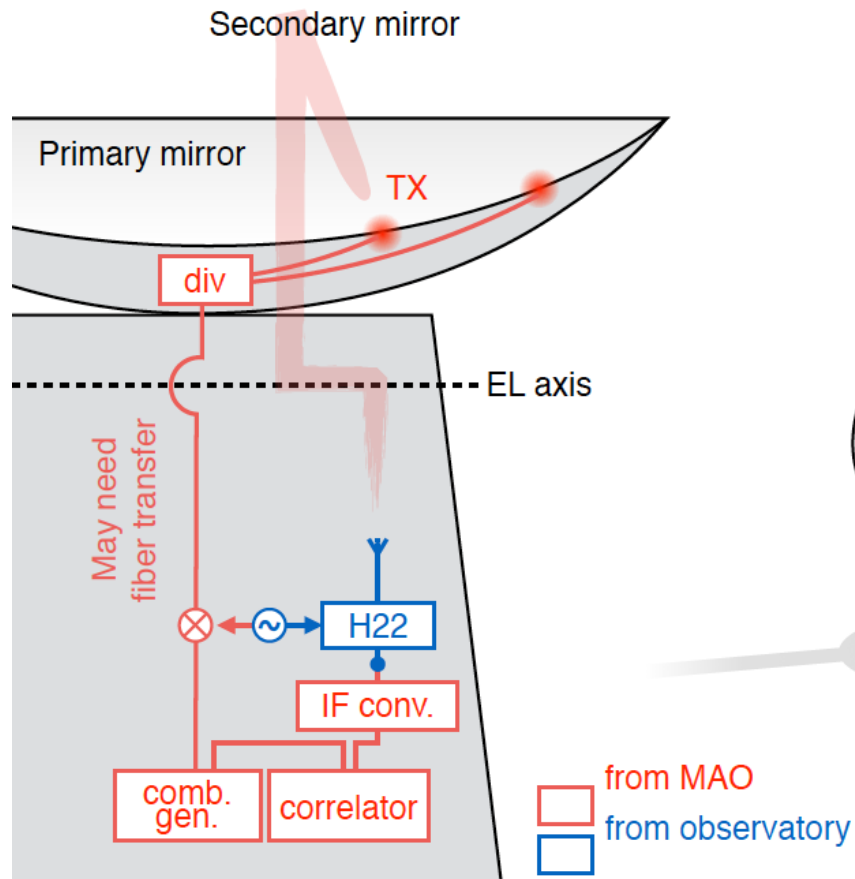
波面センサ  
用  
相関器



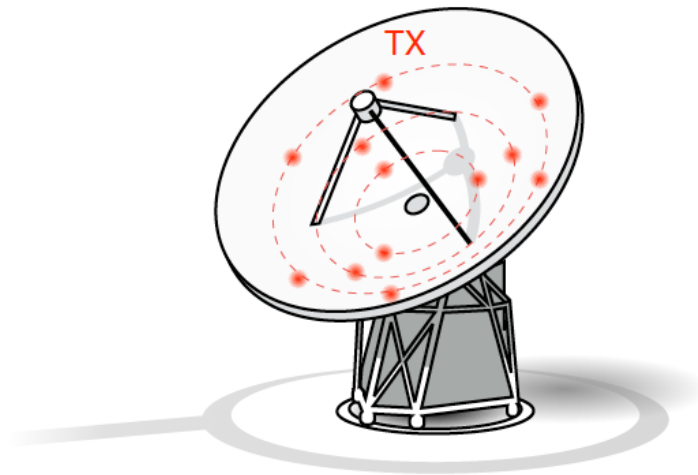
# ミリ波補償光学の技術実証試験

## 野辺山 45m 鏡を使った技術実証試験

- 競争的資金（挑戦的研究（開拓）2017-2020）による開発を開始
- 加速度計による主鏡構造変形量の測定も実施中
- LMT 50m鏡（能動的な鏡面制御が可能）での試験構想も



## Configuration



野辺山 45m 鏡における  
技術実証試験の模式図

# 国際協力(欧州): AtLAST

- ESO「2020年代におけるサブミリ波単一鏡のサイエンス」検討WG設置 → WG report: 2015年11月
  - LST計画からもインプット: “LST workshop 2015” @東京、2015年3月
- → Atacama Large-Aperture Submm/mm Telescope
- 第1回 AtLAST workshop: @ESO (Garching), 17-19 Jan., 2018
  - 科学目標、望遠鏡の仕様、焦点面装置、設置場所の検討
  - <http://www.eso.org/sci/publications/announcements/sciann17125.html>
- 第2回 AtLAST workshop: 10-13 Sep., 2018 @Edinburgh/UK
  - サイエンス・ケース、望遠鏡設置場所の選択、望遠鏡の設計、焦点面装置計画をまとめたホワイトペーパーを2019年前半までに
- 2つのコンセプト
  - (a)  $D = 40\text{-}50\text{m}$ 、波長 $850\ \mu\text{m}$ 付近での大集光力に力点
  - (b)  $D = 25\text{-}35\text{m}$ 、波長 $350\ \mu\text{m}$ 付近での観測能力に力点
    - quick and cheap?? requirements for site becomes more demanding?
  - 現在、日欧で合意形成を進めている段階
  - (a)案の方向に向かいつつある (= LST当初から目指している方向)

# 大型サブミリ波望遠鏡 LST まとめ

- ミリ波サブミリ波帯において、広い視野・広い波長域を一挙に観測可能な大口径(50m級)単一鏡を南米チリに建設し、ALMAと相補的なディスカバリー・スペースを開拓。
- 超伝導(直接)検出器等の劇的な進展を活用した本計画の広域掃天探索能力とALMAの高解像度撮像能力 → 太陽系内天体や星・惑星系形成から宇宙再電離期の銀河まで多様な研究を格段に進展させる。サブミリ波帯時間領域天文学の本格的開拓。
- 大口径高精度アンテナの実現性を高めるための新しい技術開発(ミリ波補償光学の提唱、技術実証)の推進
- 国際協力、特に欧州(ESO)が検討を進めるAtLAST計画との一体化 → より実現性を高める努力を継続中