

# 光天連SPICAタスクフォース報告 系外銀河サイエンス

竹内 努  
名古屋大学素粒子宇宙物理学専攻  
銀河進化学研究室( $\Omega$ 研)

with 小山祐世, 松田有一

第2回銀河進化研究会, 名古屋大, 2015年6月5日

# SPICAの掲げる科学目標

1. 銀河成長・物質進化過程の解明
  - ・ ダストに隠された銀河成長最盛期
  - ・ 星生成と物質進化の相互作用
2. 惑星系形成過程の解明
  - ・ ガスの精密定量による惑星形成シナリオの検証
  - ・ 惑星形成における水と氷の役割
  - ・ 惑星系外縁天体の起源
3. 最高感度の宇宙赤外線天文台の実現

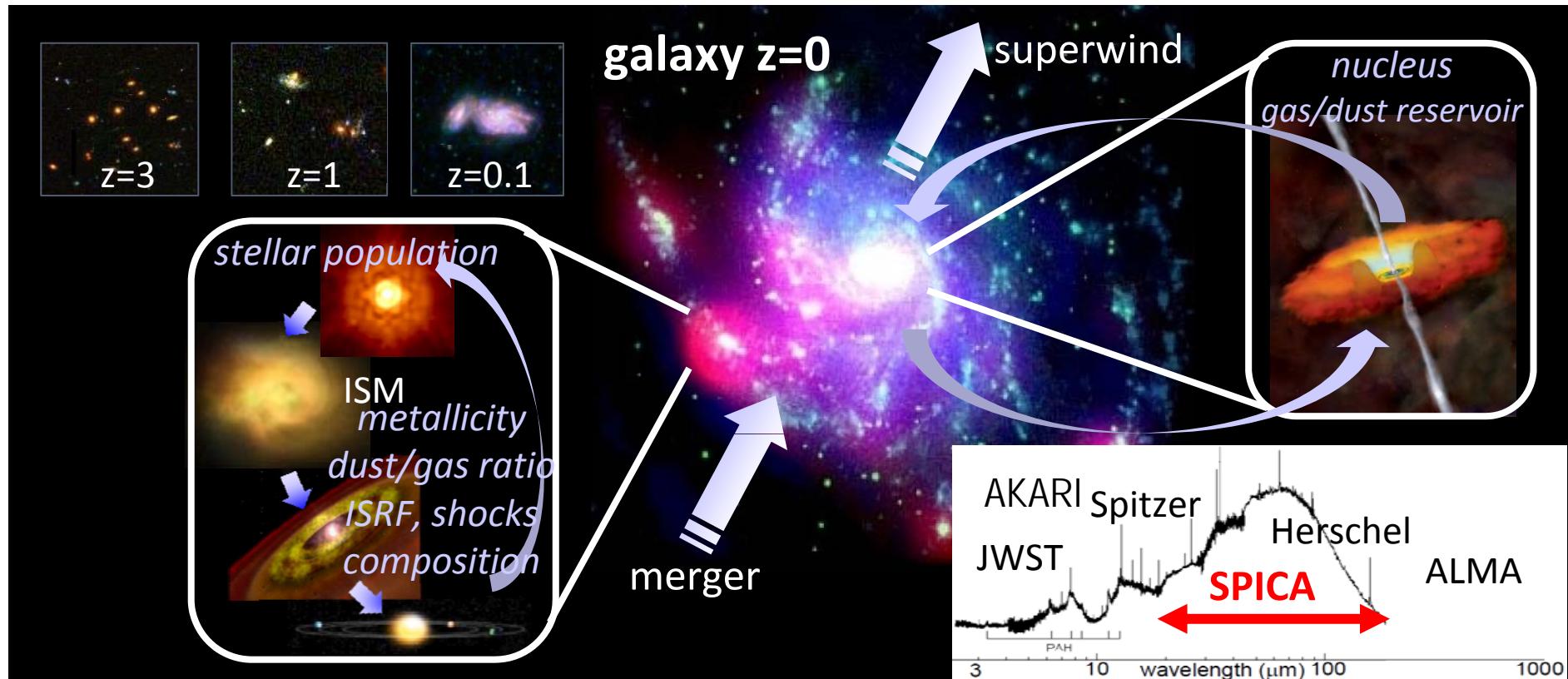
# SPICAの掲げる科学目標

1. 銀河成長・物質進化過程の解明
  - ・ ダストに隠された銀河成長最盛期
  - ・ 星生成と物質進化の相互作用
2. 惑星系形成過程の解明
  - ・ ガスの精密定量による惑星形成シナリオの検証
  - ・ 惑星形成における水と氷の役割
  - ・ 惑星系外縁天体の起源
3. 最高感度の宇宙赤外線天文台の実現

# 星生成と物質進化の相互作用

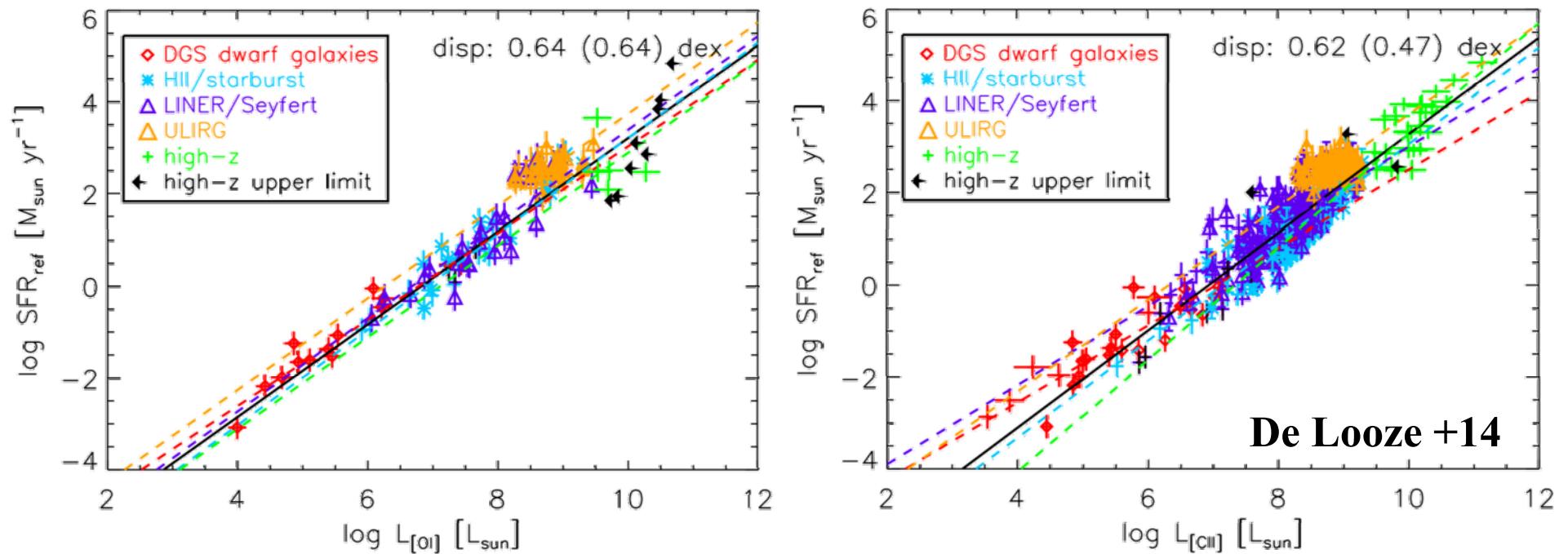
近傍銀河(距離 < 100Mpc)を対象

1. 空間分解した銀河の各部分での物理過程
2. 暗い銀河まで含めた無バイアスな金属量-ダスト量関係の検証



# 近傍銀河の遠赤外分光

Spectroscopy with Herschel: **only bright** regions (giant HII regions, nucleus, etc) and **only a few** bright gas lines ([OI], [OIII], [CII], etc).



(Left) SFR vs [OI] luminosity. (Right) SFR vs [CII] luminosity.

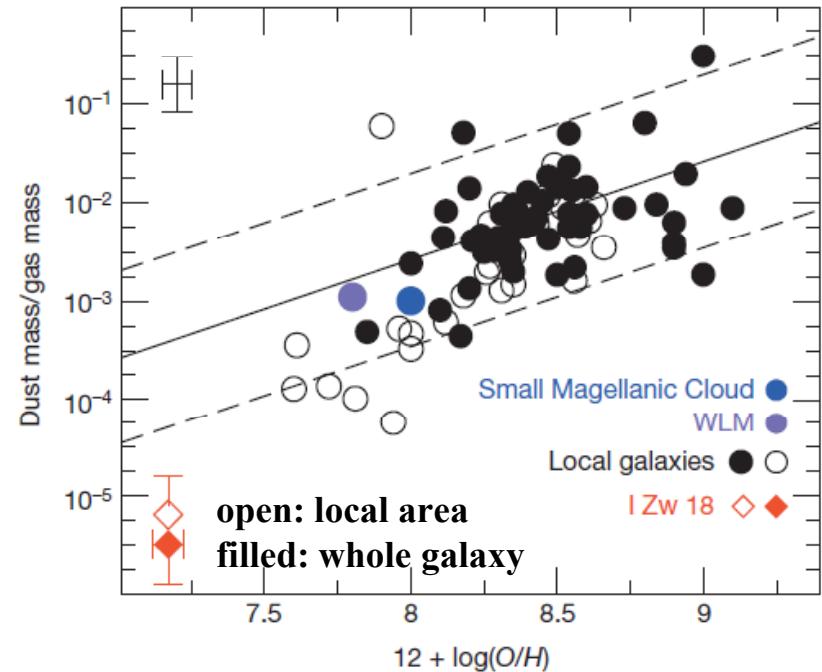
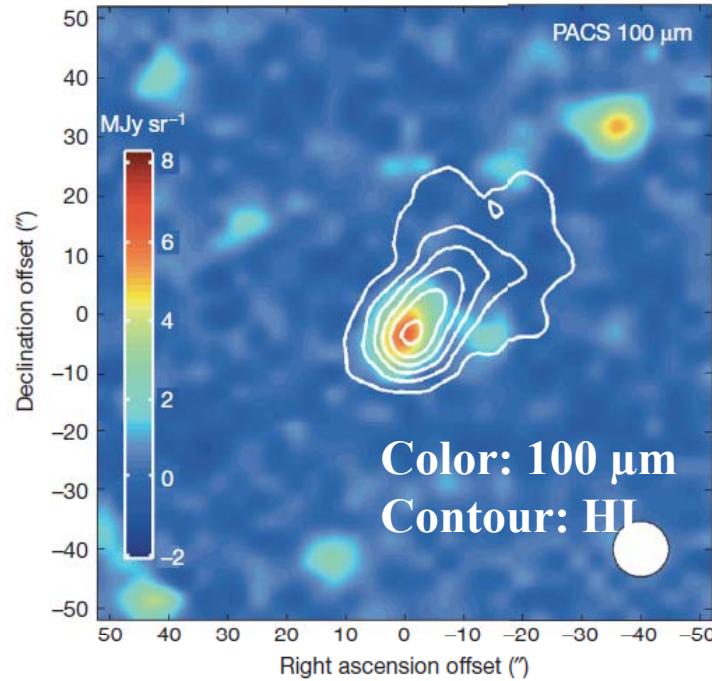
SFRs estimated from FUV and 24  $\mu\text{m}$  fluxes.

Very tight correlation between [OI] and SFR over 8 orders of magnitude!  
Gas line diagnostics using **10-20 lines** to understand underlying physics.

# 矮小銀河の金属量-ダスト量関係

Low-metallicity dwarf galaxy IZw18 ( $Z = 1/30 Z_{\text{Solar}}$ ) with Herschel

Fisher et al. 2014, Nature 505, 186



Analogues of galaxies in the early universe. D-to-G ratio~**1/200 times lower than expected**! Already SF-active. Is dust formation just started? Different star formation mechanism from that in local universe (i.e. inefficient dust cooling).

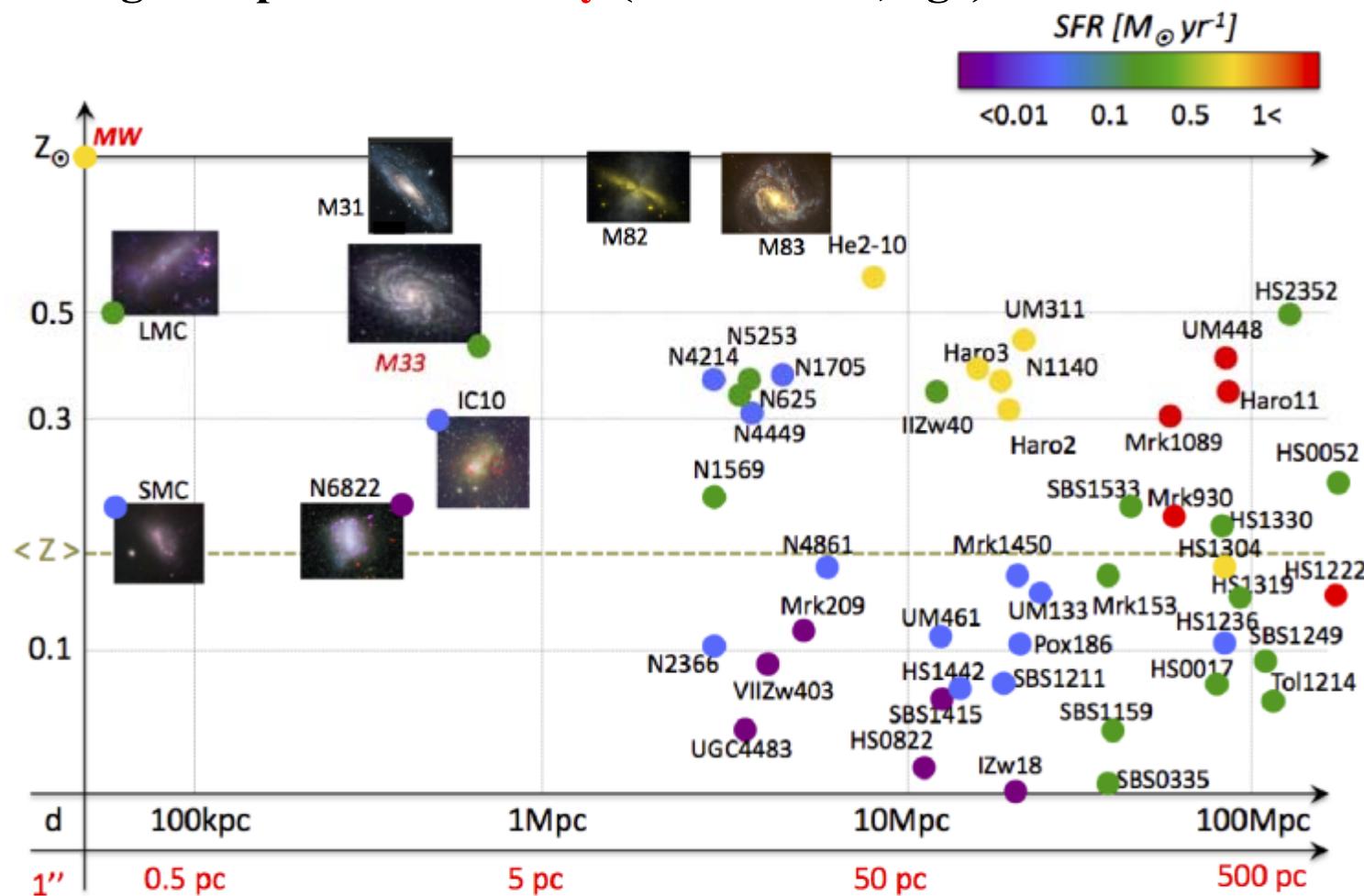
↔ low-Z dwarfs SBS0335-052: D-to-G **4 times higher than expected!**

Hunt+14

What determines the relation between D-to-G, metallicity and SFR?

# 銀河サンプル

- “Unbiased view”  $\Rightarrow$  volume-limited sample
- Fill the parameter space of **SFR** vs **metallicity**  $\Rightarrow D = 100 \text{ Mpc}$  needed.
- Cover every **morphology** (spirals, ellipticals, lenticulars, dwarf/irregular/others). and a wide range of optical **luminosity** (stellar mass, age)



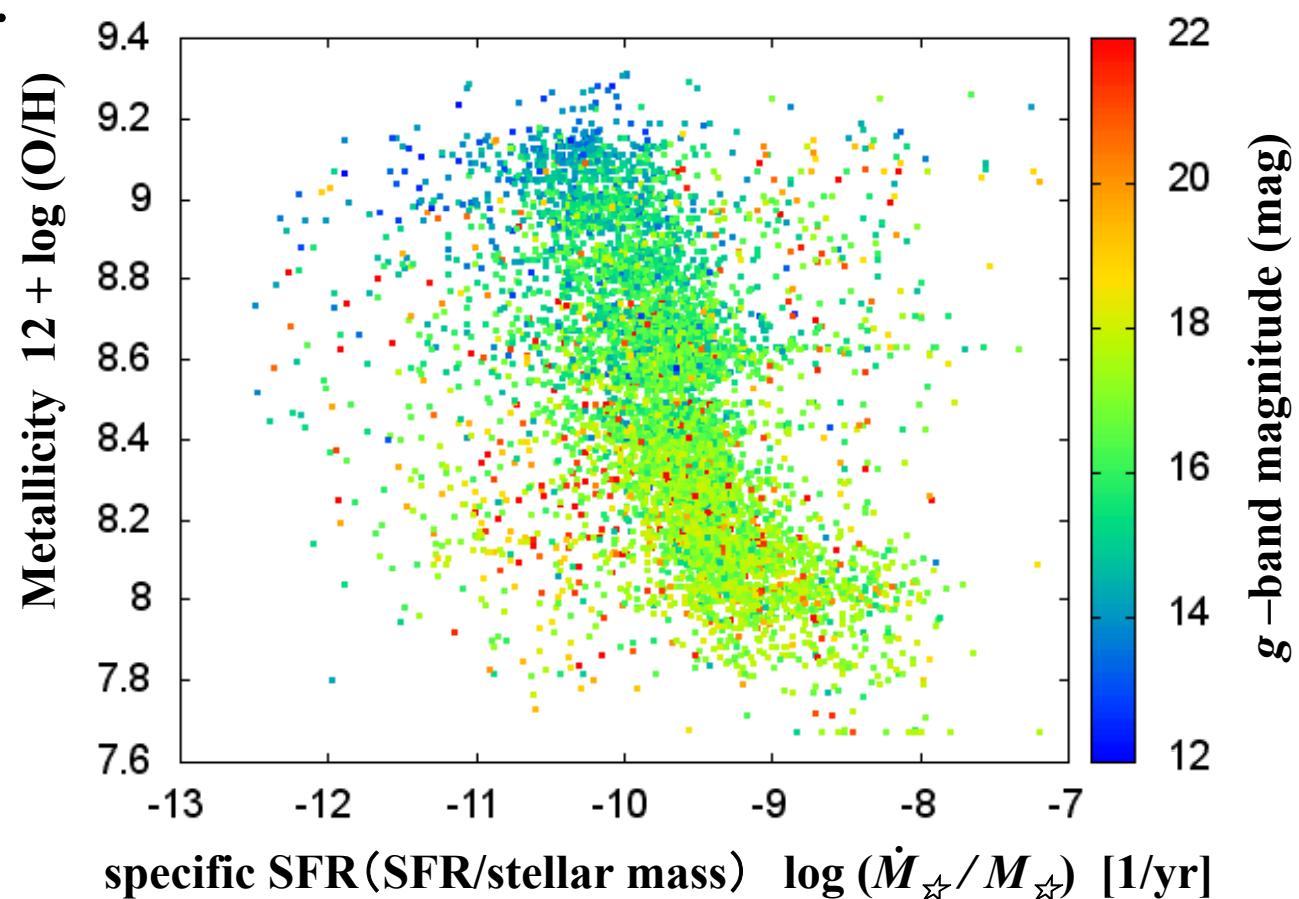
# 銀河サンプル

- Before SPICA, **Euclid** will detect a huge number of low-Z dwarf galaxies. To study dependence on each parameter of **SFR** (10 grids), **metallicity** (10), optical **luminosity** (10) and **morphology** (4), we assign one galaxy to one cell in the 4-D parameter space.  $\Rightarrow \sim 4000$  galaxies needed. They are also needed for multivariate analyses.

- Spectral map for every galaxy  $\Rightarrow$  templates for **studies of distant galaxies**

- Full detailed maps for sub-sample of 100 galaxies with  $D \sim 10$  Mpc

$\sim 7500$  galaxies at  $z < 0.02$  from SDSS catalog



# 口径2 mのインパクト

## Sensitivity

**IZw18 (lowest metallicity, faintest) => [CII]  $6 \times 10^{-18} \text{ W/m}^2$  (Herschel)**  
=>  $x1/10 \Rightarrow 6 \times 10^{-19} \text{ W/m}^2 \Rightarrow$  OK for SMI, but not for SAFARI ( $9 \times 10^{-19} \text{ W/m}^2$ ).  
**0.5 MJy/sr @ 20 mm, 10 MJy/sr @ 100 mm => OK.**

## Spatial resolution

**100 pc @ 10 Mpc (10 mrad)  $\sim 20 \text{ mm} / 2 \text{ m}$  (10 mrad), => barely OK.**

## Spectral resolution

**$R \geq 1000 \Rightarrow$  OK for SAFARI, but not for SMI**

## FoV size

**$\geq 2' \times 2'$  => OK.**

## Observation time

<b>SAFARI</b>	<b>3900 galaxies x 1 pointing x 0.4 hrs (average) <math>\sim 1600</math> hrs</b>
	<b>10 Mpc sub-sample: 100 galaxies x 9 pointing x 0.3 hrs (average) <math>\sim 300</math> hrs</b>
<b>SMI Cam:</b>	<b>4000 galaxies x 1 pointing x (0.05 hrs x 2 filters) <math>\sim 400</math> hrs</b>
	<b>Spec: 4000 galaxies x 3 pointing x 0.1 hrs (average) <math>\sim 1200</math> hrs</b>
<b>Total:</b>	<b><math>1900 + 1600 = 3500</math> hrs</b>

# まとめ

## 期待できる点

- 近傍銀河の**物質循環**は重要なテーマ。
- このために近傍銀河の空間分解した観測、および矮小銀河まで含めた無バイアスなサンプルを遠赤外線分光。
- 実現すれば2 mの口径でも十分なサイエンスのレベルを達成できることはよく検討されている。

## 今後も検証すべき点

- 口径が小さくなる⇒ **観測時間、コンフュージョンリミットの増大**  
⇒ 他のテーマと共存してサンプル数は保てるか?
- **現時点で**人気のサイエンスである  
⇒ SPICA以前の装置、データでかなりのところまで検証されてしまう恐れは?

# SPICAの掲げる科学目標

## 1. 銀河成長・物質進化過程の解明

- ・ **ダストに隠された銀河成長最盛期**
- ・ 星生成と物質進化の相互作用

## 2. 惑星系形成過程の解明

- ・ ガスの精密定量による惑星形成シナリオの検証
- ・ 惑星形成における水と氷の役割
- ・ 惑星系外縁天体の起源

## 3. 最高感度の宇宙赤外線天文台の実現

# SPICAの掲げる科学目標

SPICAチームから提示されたサーベイ案

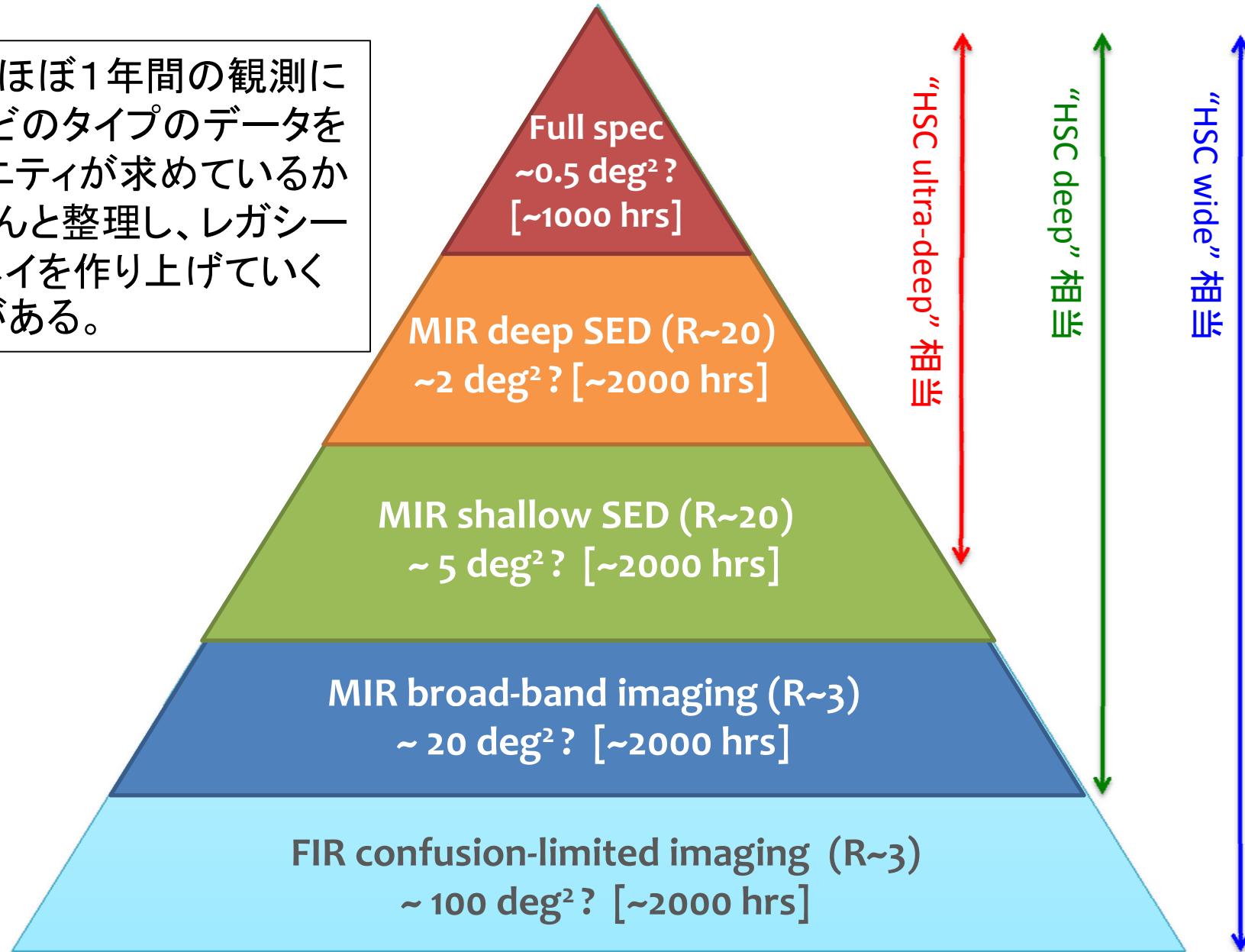
MIR:  $R = 50$ で10平方度

FIR: ターゲット型のグリズム分光

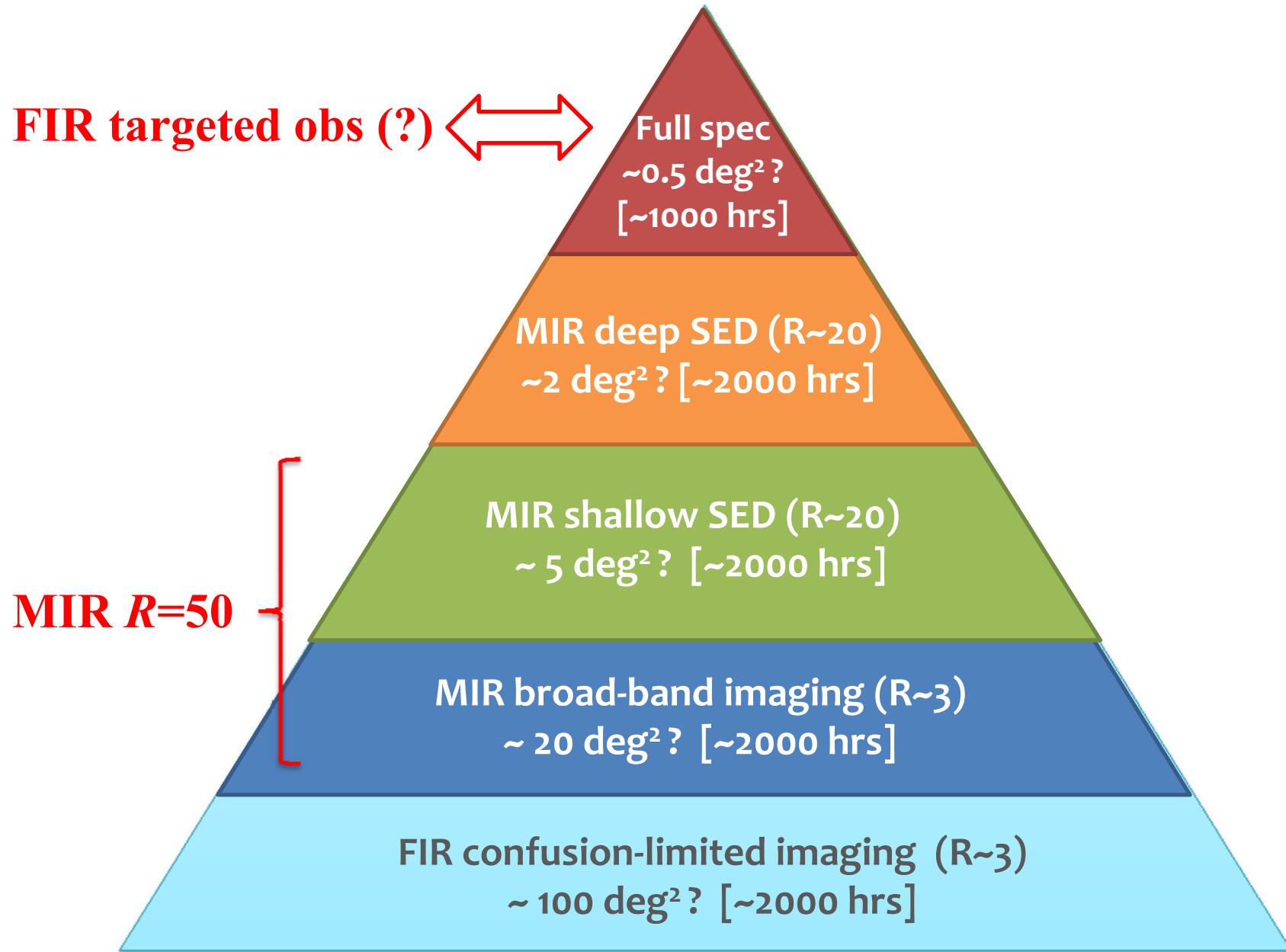
今後はこれを念頭に置いて考える必要がある。

# レガシーサーベイの一例

これでほぼ1年間の観測になる。どのタイプのデータをコミュニティが求めているかをきちんと整理し、レガシーサーベイを作り上げていく必要がある。



# レガシーサーベイの一例

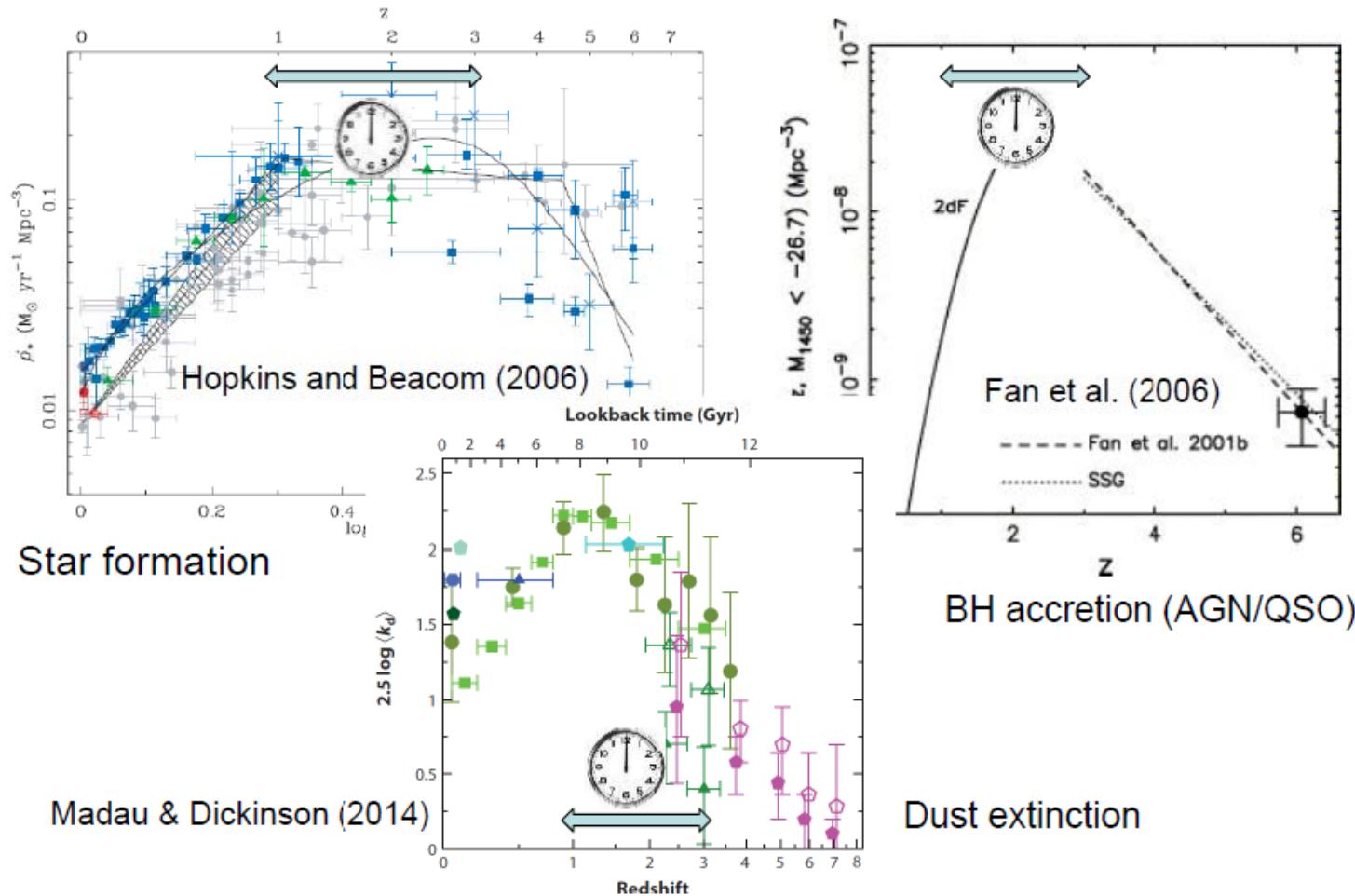


# サイエンススター<sup>ゲット</sup>

## 1. 星形成バースト銀河出現の「時間」と「環境」と「原因」

### “COSMIC HIGH NOON”

The peak epoch of galaxy/SMBH formation/dust extinction:  $1 < z < 3$  ( $6 > T_{\text{cos}}(\text{Gyr}) > 2$ )



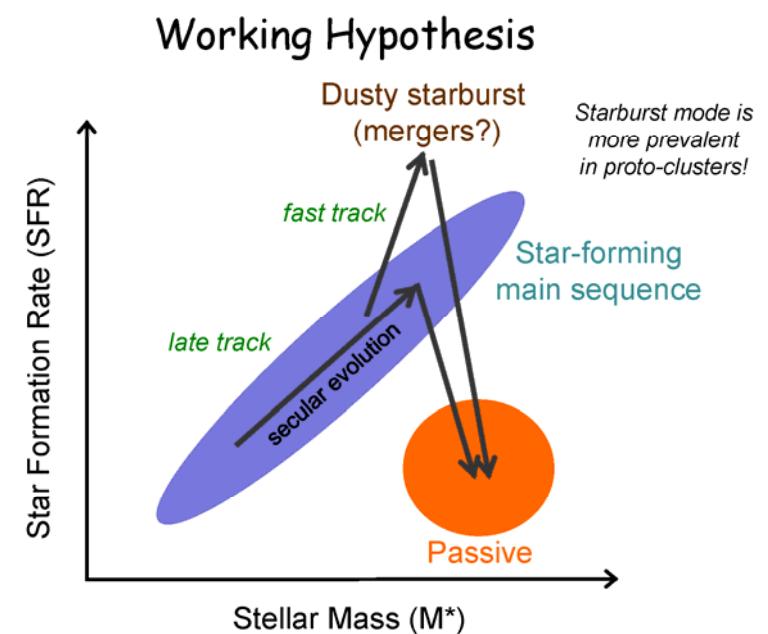
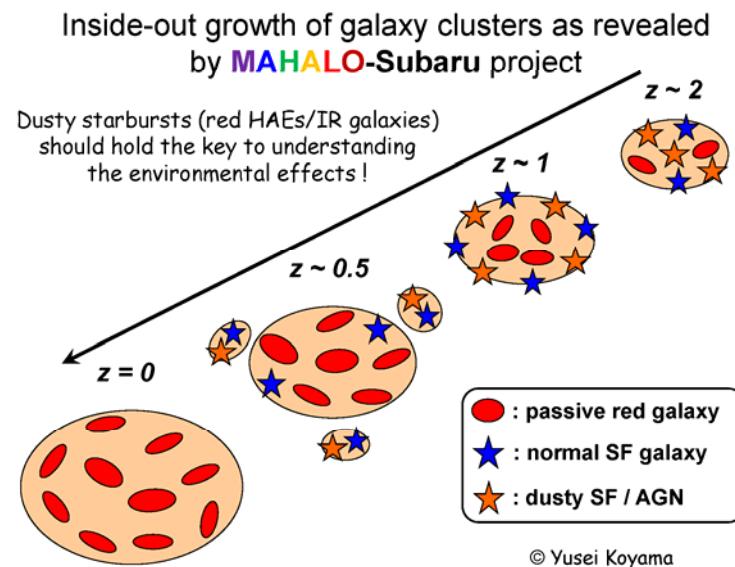
# サイエンスターゲット

## 1. 星形成バースト銀河出現の「時間」と「環境」と「原因」

$z > 2$ における星形成密度へのDSBの寄与の変遷？

DSBの出現環境は？原始銀河団での超過？(楕円銀河の形成現場)

DSBの原因是？銀河の合体またはガスリッチバースト？  
AGN活発化との関係は？



# サイエンススターgett

## 1. 星形成バースト銀河出現の「時間」と「環境」と「原因」

SPICA (2m) sensitivity to dusty star forming galaxies  
(PAH rest-7 $\mu$ m feature)

1hour integration, 5 $\sigma$  limit

Chary&Elbaz (2001) template SED is used.

$z$	$\lambda$	$L(\text{IR})/L_{\odot}$	SFR(IR) [ $M_{\odot}/\text{yr}$ ]	
2.0	22 $\mu$ m	$2.9 \times 10^{10}$	5.0	
2.5	27 $\mu$ m	$6.6 \times 10^{10}$	11.4	
3.0	27 $\mu$ m	$2.4 \times 10^{11}$	40.9	© Y. Koyama
3.5	34 $\mu$ m	$9.9 \times 10^{11}$	171.4	
4.0	34 $\mu$ m	$3.1 \times 10^{12}$	537.1	

LIRGs to  $z \sim 2.7$ , ULIRGs to  $z \sim 3.6$

- $\sim 10 \times$  deeper than AKARI, Spitzer at 20 $\mu$ m
- $\sim 2 \times$  deeper than SCUBA-2 (8hrs) at  $z \sim 3.5$  in SFR
- ALMA is deeper at  $z > 2.5$  with 30 times better resolution, but with 600 times wider field of view
- 30-40 $\mu$ m band is unique to SPICA (over Spitzer/Herschel)

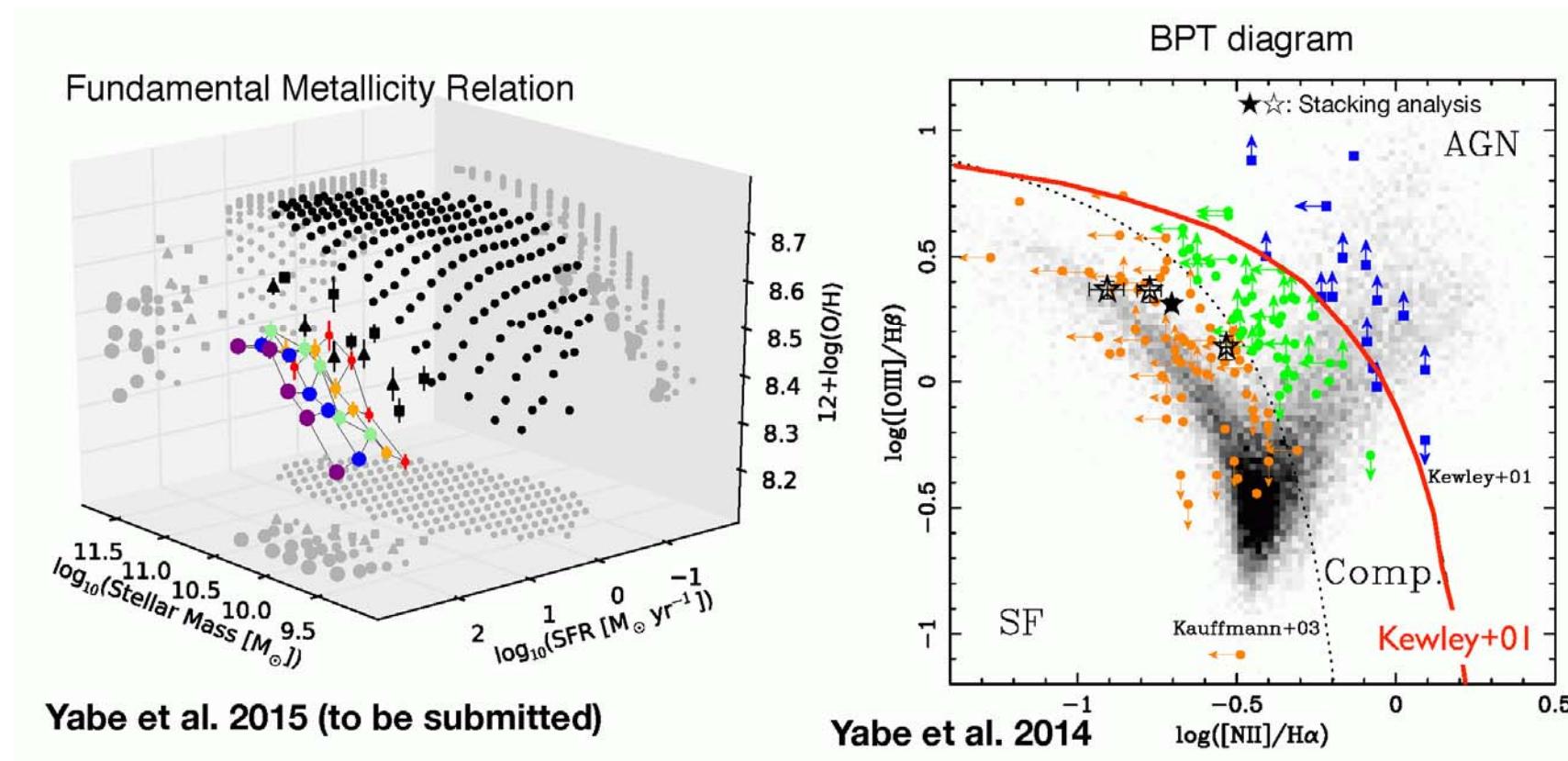
→ Best suited to wide-field search for dusty starbursts to  $z \sim 3.6$

# サイエンススター<sup>ゲット</sup>

## 2. 銀河進化の激動期( $z \sim 2$ )の解明

FMOSによる大規模な近赤外分光サンプルの構築

- 星質量-金属量-星形成率関係
- 輝線比診断によるAGNの活動性/銀河の物理状態

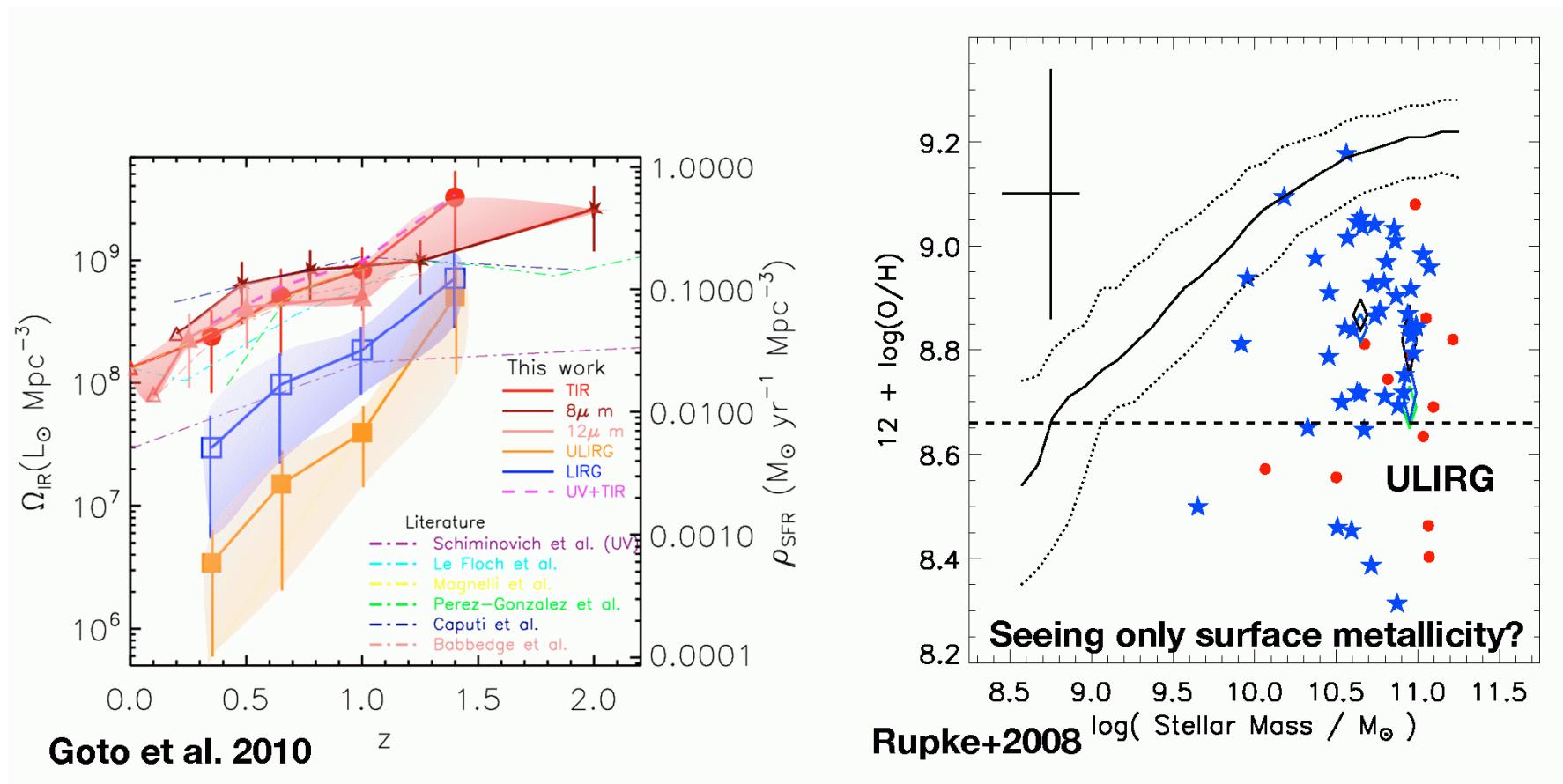


# サイエンススター<sup>ゲット</sup>

## 2. 銀河進化の激動期( $z \sim 2$ )の解明

### ダストに隠された星形成

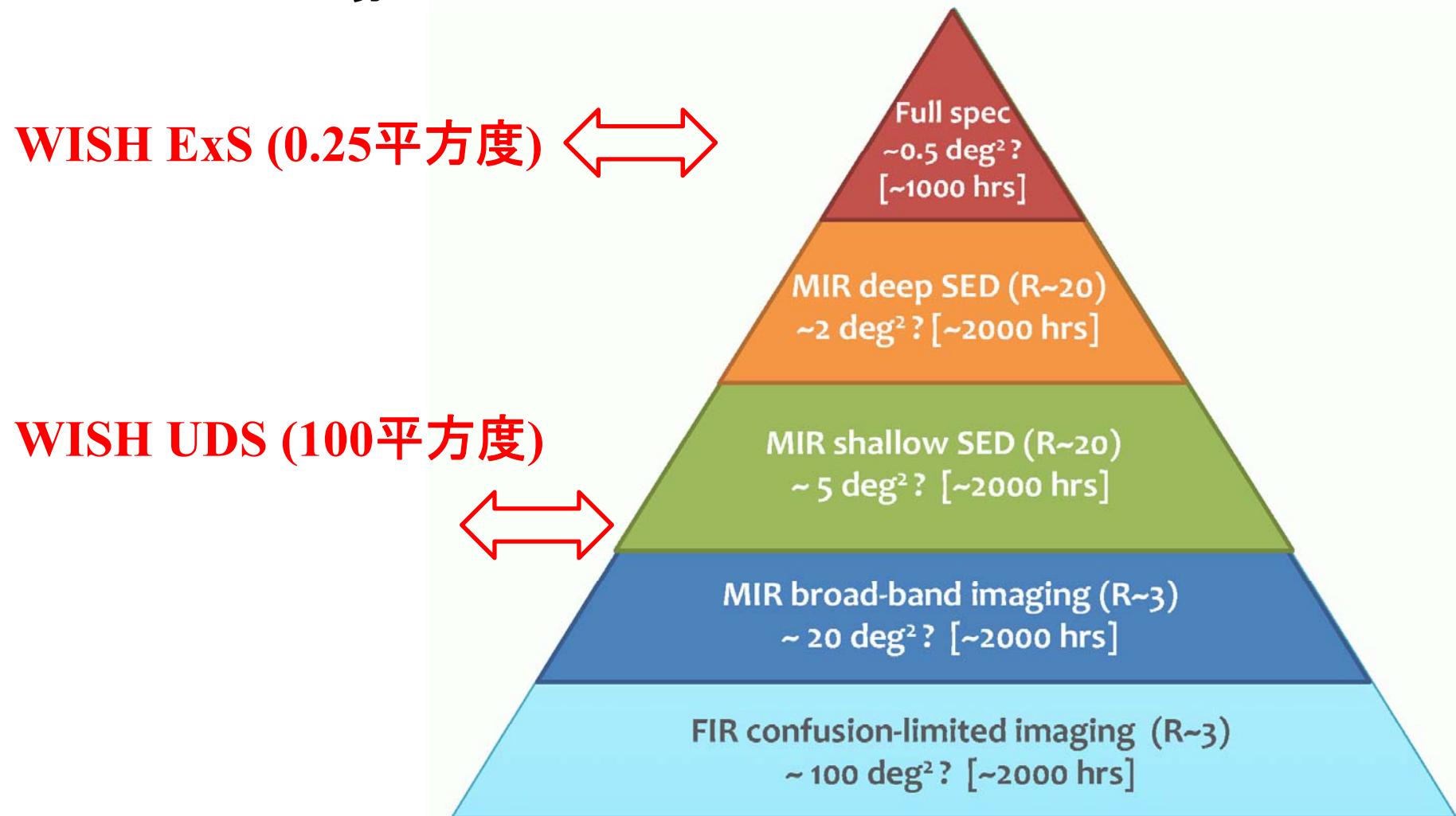
- FMOSでは減光された天体は厳しい
- ダストの影響を受けない方法での銀河の物理性質の解明



# サイエンススター・ゲット

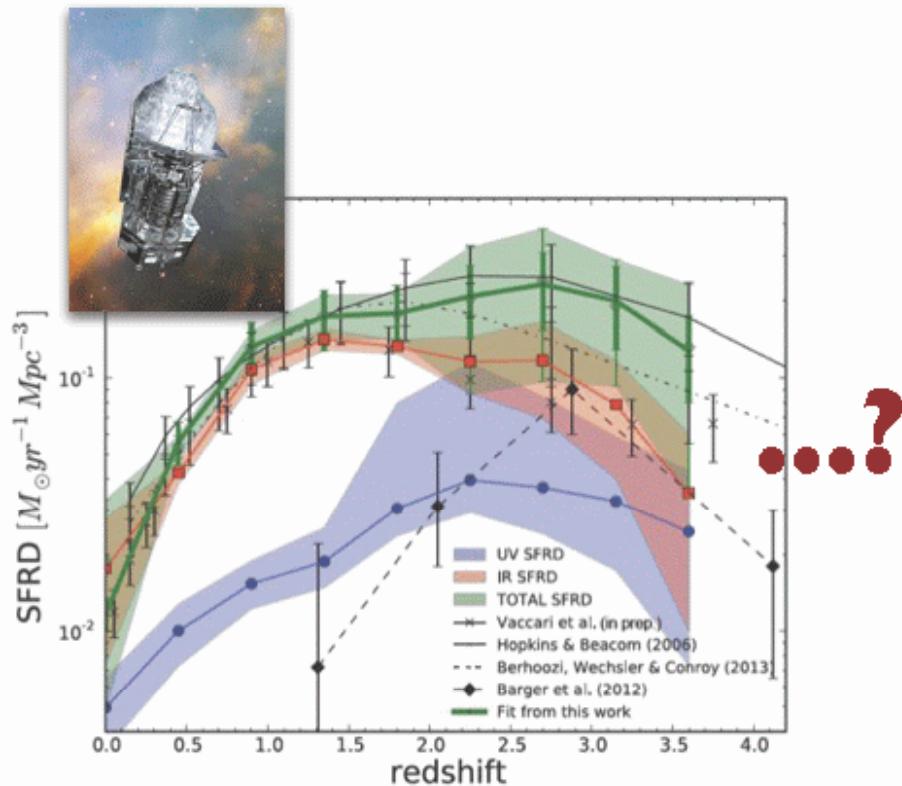
## 2. 銀河進化の激動期( $z \sim 2$ )の解明

WISHの立場から

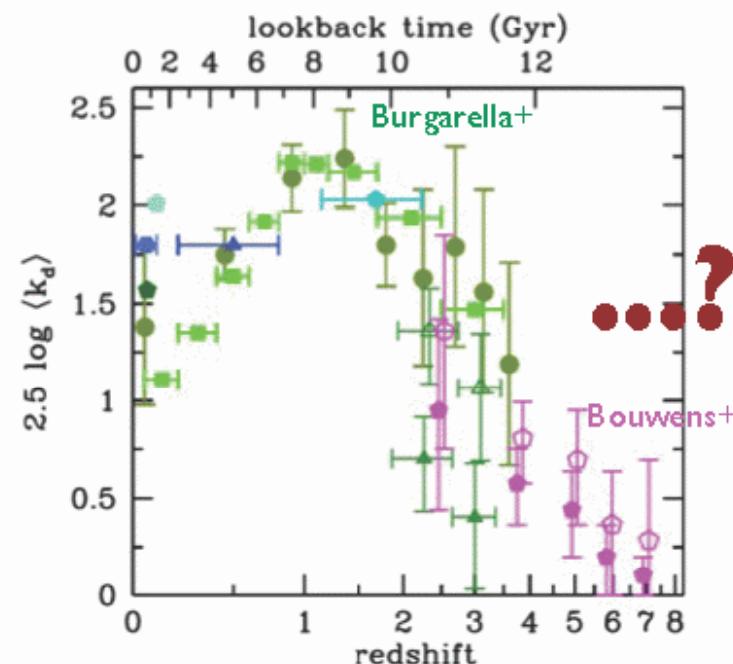


# サイエンスターゲット

## 3. サブ/ミリ波輝線銀河探査 (CO/[CII] Tomography)とSPICA Cosmic star formation history: ダusty銀河の役割は?



Burgarella et al. 2013



Madau & Dickinson 2014

- ❖ Cosmic SFR density (SFRD) peaks at  $z = 1-3$ .
- ❖ What is the role of dusty galaxies at  $z > 4$ ?
- ❖ Cosmic evolution of extinction.
- ❖ What is the role of dust in  $z > 4$  galaxies?

# サイエンススター<sup>ゲット</sup>

## 3. サブ/ミリ波輝線銀河探査 (CO/[CII] Tomography)とSPICA

### SIXER (SCUBA-2 Imaging Exploration of the Epoch of Reionization)

- 850μmでの広域(33平方度), medium-deep ( $\sigma = 3$  mJy/B)サーベイ
- 発見からコンプリートなフォローアップへ
- 4つの有名深探査領域: XMM-LSS, ECDF-S, E-COSMOS, ELAIS-N1

# サイエンススター<sup>ゲット</sup>

## 3. サブ/ミリ波輝線銀河探査 (CO/[CII] Tomography)とSPICA SIXER: サイエンス

- Herschel (HerMES)が探査できなかつた  $z \sim 7$ までのSMG探査
- ダストで隠されたSFH, 金属量進化、銀河計数
- $z \sim 7$ までのダスト減光則
- SMBHと銀河の共進化
- Low- $z$ の低温度ダスト
- VIPERSの $z \sim 1$ 銀河サンプル(~ cosmic high noon)  
etc.

# サイエンススター<sup>ゲット</sup>

## 3. サブ/ミリ波輝線銀河探査 (CO/[CII] Tomography)とSPICA Continuum 撮像

- 低resolving power ( $R \sim 50$ ) での中間赤外線高感度撮像 / 低分散分光 (SMI)
- PAH/silicate による SIXER SMG の redshift 推定/決定
- AGN 診断 (PAH vs power law)

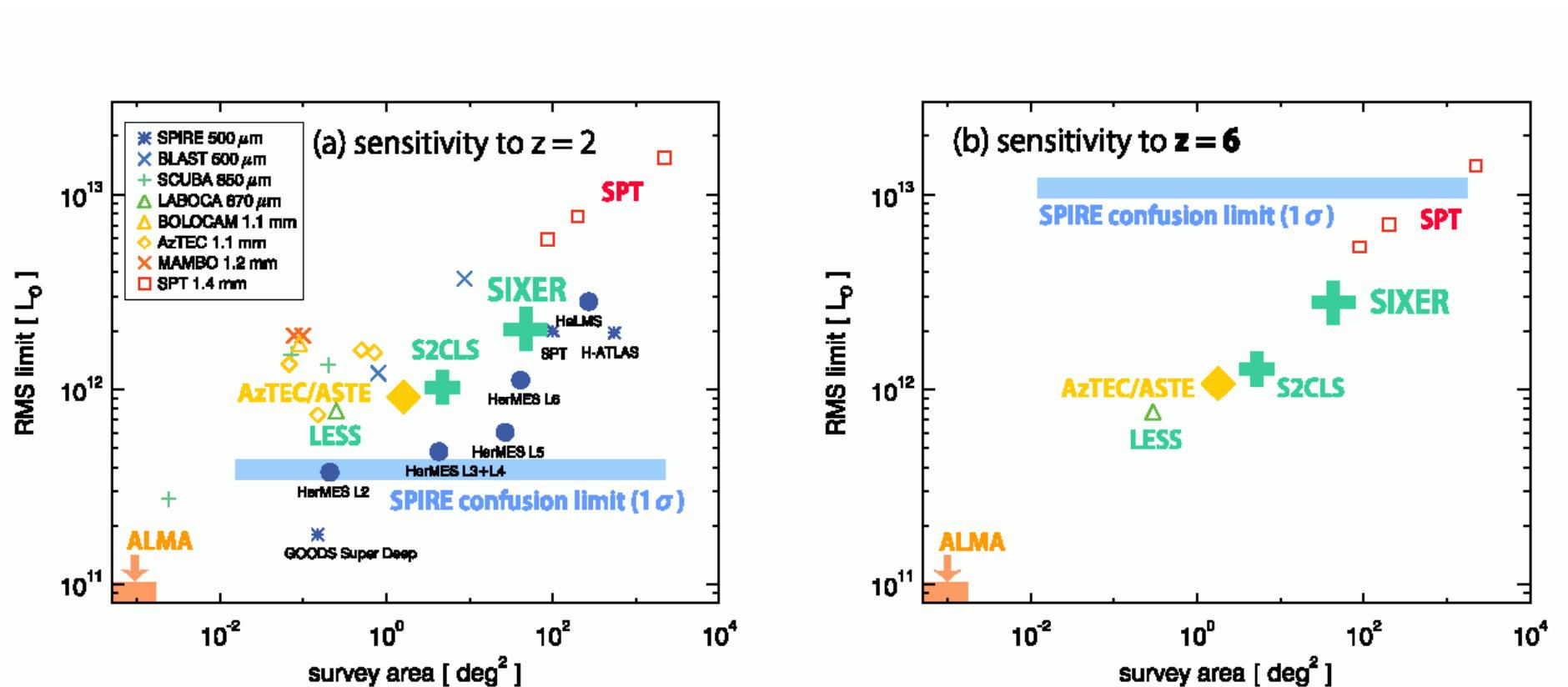
### 分光: 中間/遠赤外線の分光 (SMI, SAFARI)

- Spitzer/IRS は感度に限りがあり、PACS 分光はあまりに波長範囲がせまかった。ほぼ未開拓の中間(遠)赤外線広帯域分光は、サブ/ミリ波から魅力的
- SIXER SMG (そこそこ明るく、そこそこ沢山ある) に対する、輝線診断 (metallicity, UV hardness,  $e^-/H$  density)

# サイエンススターべット

## 3. サブ/ミリ波輝線銀河探査 (CO/[CII] Tomography)とSPICA

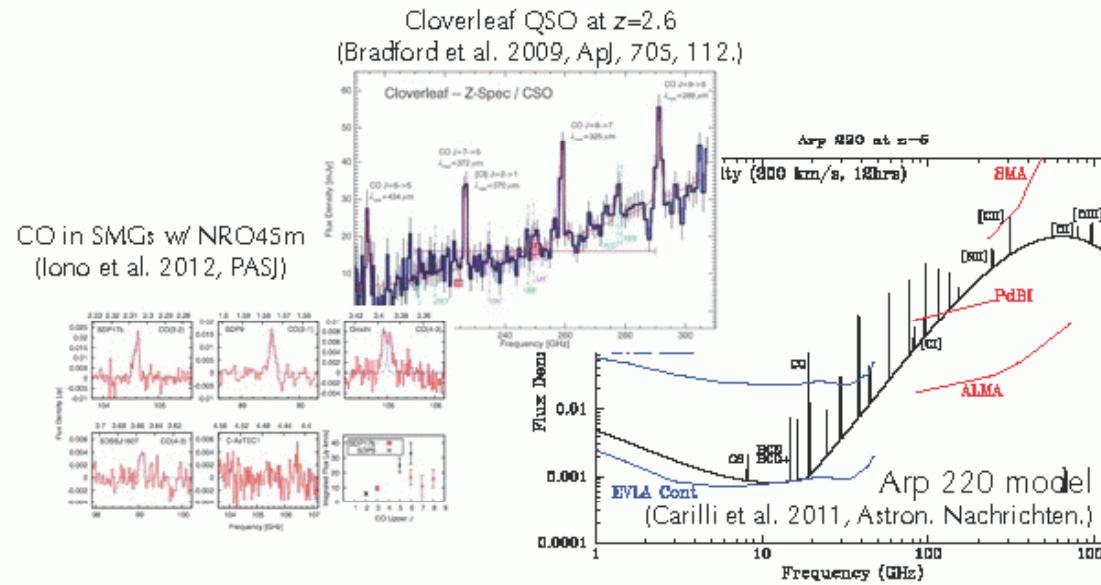
### Powerful wide ( $>10\text{-deg}^2$ ) survey for high- $z$ sources



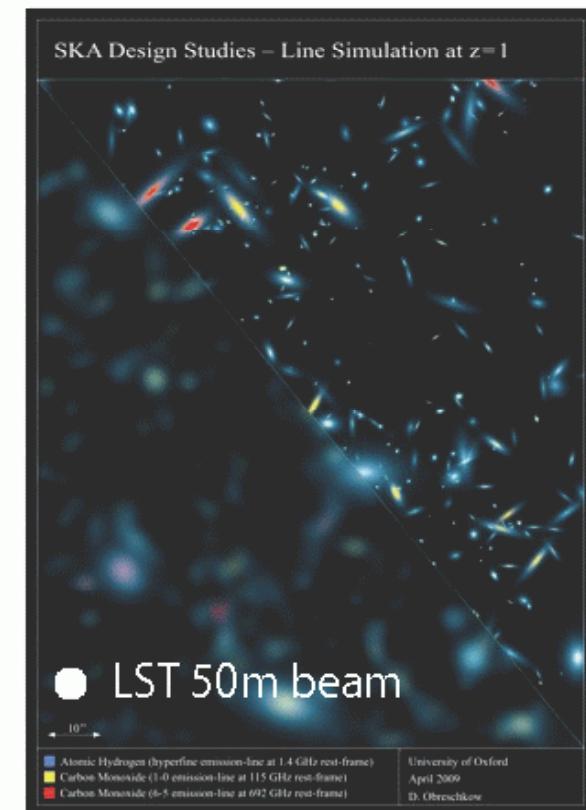
# サイエンスターゲット

## 3. サブ/ミリ波輝線銀河探査 (CO/[CII] Tomography)とSPICA LST

### CO/[CII] Tomography



CO/[CII]: mm-FIR 代表的な輝線  
コンフュージョン限界を突破  
負のK補正の恩恵を享受



# サイエンススター<sup>ゲット</sup>

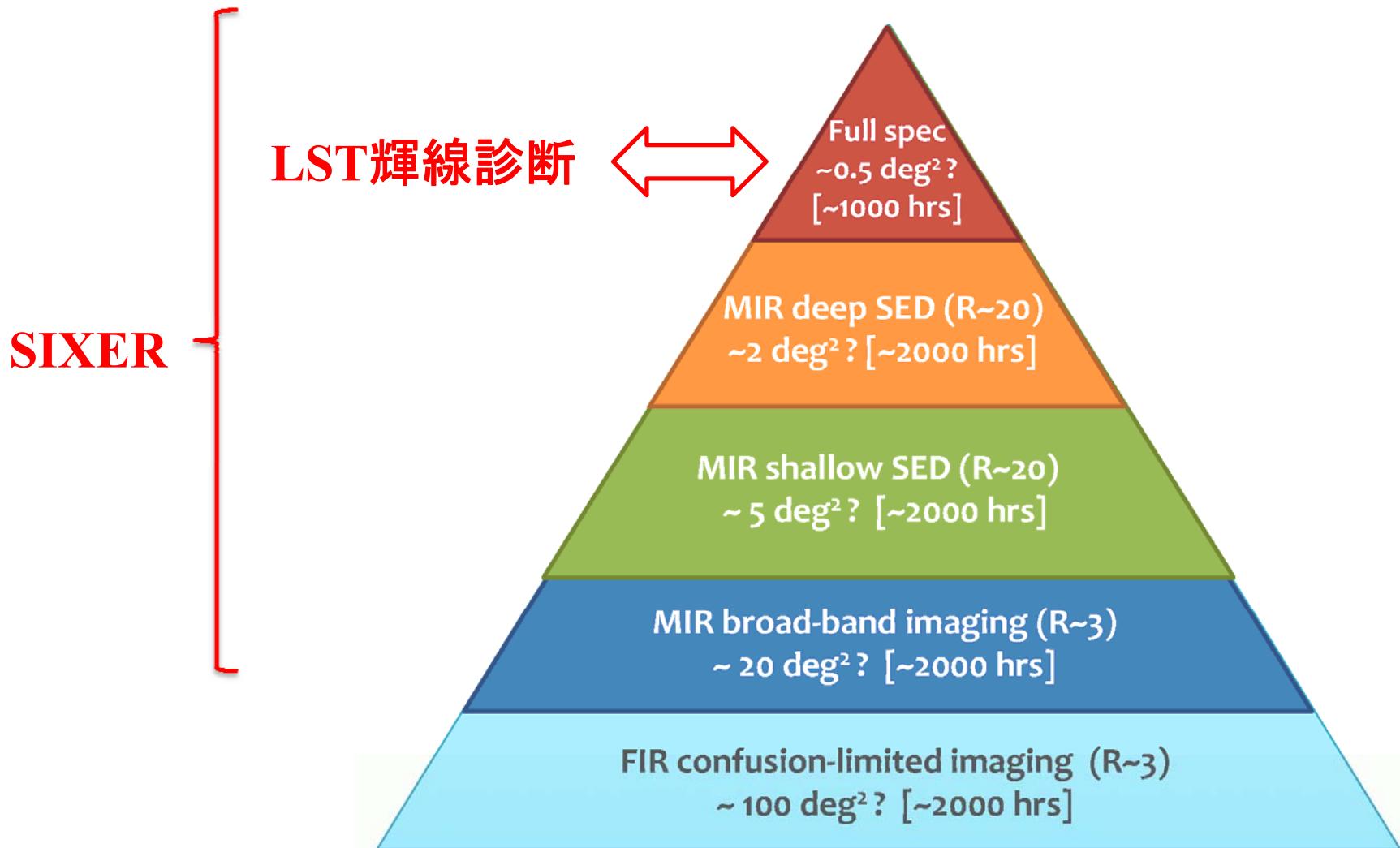
## 3. サブ/ミリ波輝線銀河探査 (CO/[CII] Tomography)とSPICA LST

### 分光: 中間/遠赤外線の分光 (SMI, SAFARI)

- LST CO/[CII] 輝線銀河に対する、輝線診断 (metallicity, UV hardness,  $e^-/H$  density)
- Spitzer/IRS は感度に限りがあり、PACS 分光はあまりに波長範囲がせまかった。ほぼ未開拓の中間(遠)赤外線広帯域分光は、サブ/ミリ波 (CO, 遠方[CII] etc) から魅力的
- 中間赤外からミリ波に至るまでの (所々サブ/ミリ波に大気吸収があるものの) 連続的なスペクトルを高波長分解能 ( $R \sim 10^2 - 10^3$ ) でcompleteできる。星間物質由来の主要輝線を全て検出し、電離領域 ~ PDR ~ 分子雲に至るまでの物理診断を行う点は重要

# サイエンススターべット

## 3. サブ/ミリ波輝線銀河探査 (CO/[CII] Tomography)とSPICA

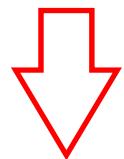


# サイエンス targeting

## 4. サマリー

塵に埋もれた銀河種族が、いつ、どこで、どのように現れるのかというテーマは共通。

特に星形成/AGNのエネルギー 源の切り分けという点には高い関心がある。



その意味で  $R=50$  の MIR 分光は魅力的。

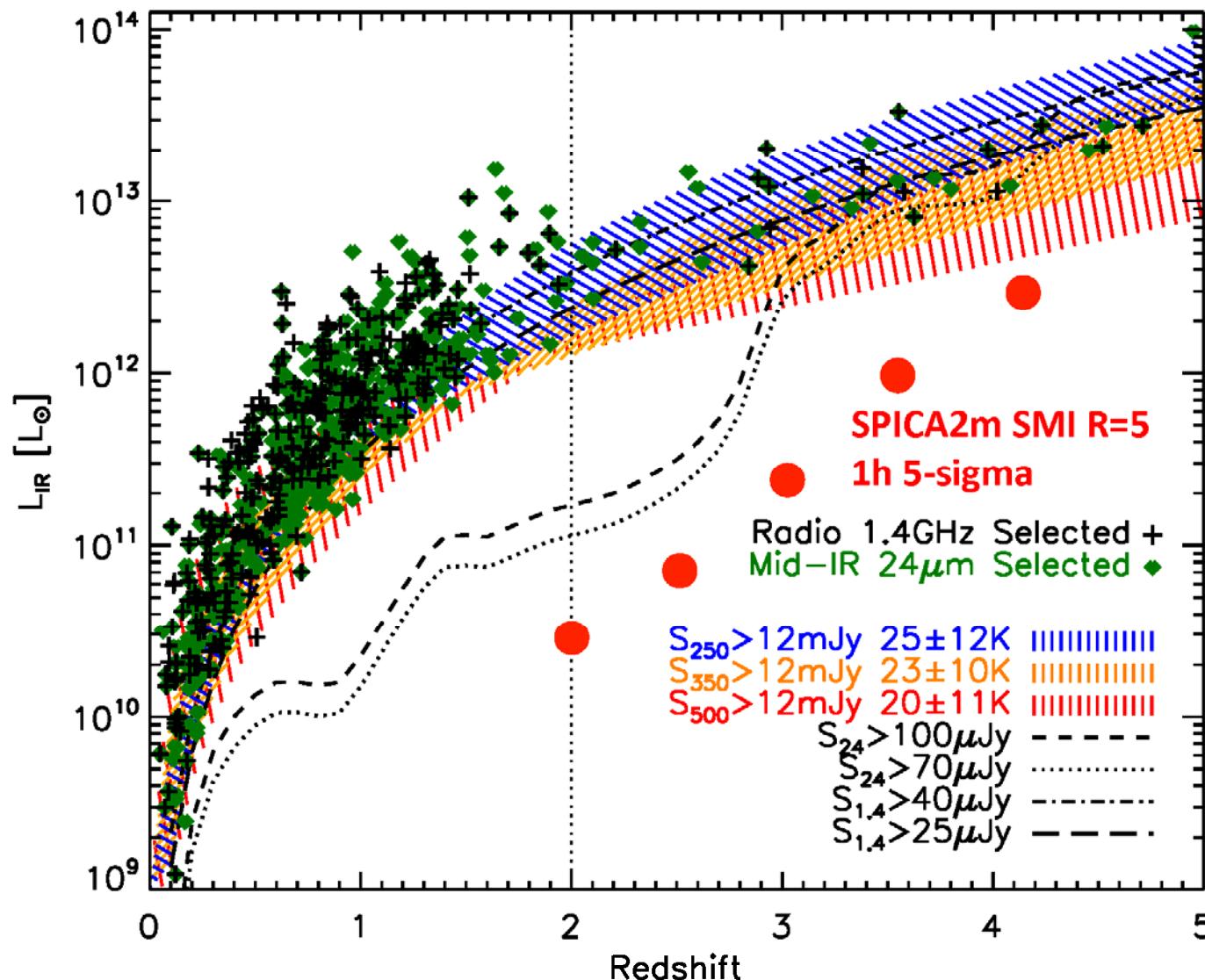
FIRがターゲット型のグリズム分光になり、興味深い天体を SPICA で徹底的に調べるというイメージが持ちやすくなつた。

## SPICA広視野サーベイへの戦略

SPICAでの広視野サーベイは、様々なサーベイとのシナジーという点で一定の需要はあるが、それだとやや自明すぎ。

MIR広視野サーベイ“だからこそ” 見つかるような種族が宇宙にどのくらい存在するのか、それは果たして面白いのか？

# SPICA広域サーベイへの戦略

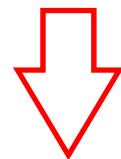


松田さん作成(比較: Casey et al. 2012)

## SPICA広視野サーベイへの戦略

SPICAでの広視野サーベイは、様々なサーベイとのシナジーという点で一定の需要はあるが、それだとやや自明すぎ。

MIR広視野サーベイ“だからこそ” 見つかるような種族が宇宙にどのくらい存在するのか、それは果たして面白いのか？



そのような天体は相当数宇宙に存在し、LFのluminous end のような種族には限らない。

# SPICA広視野サーベイへの戦略

