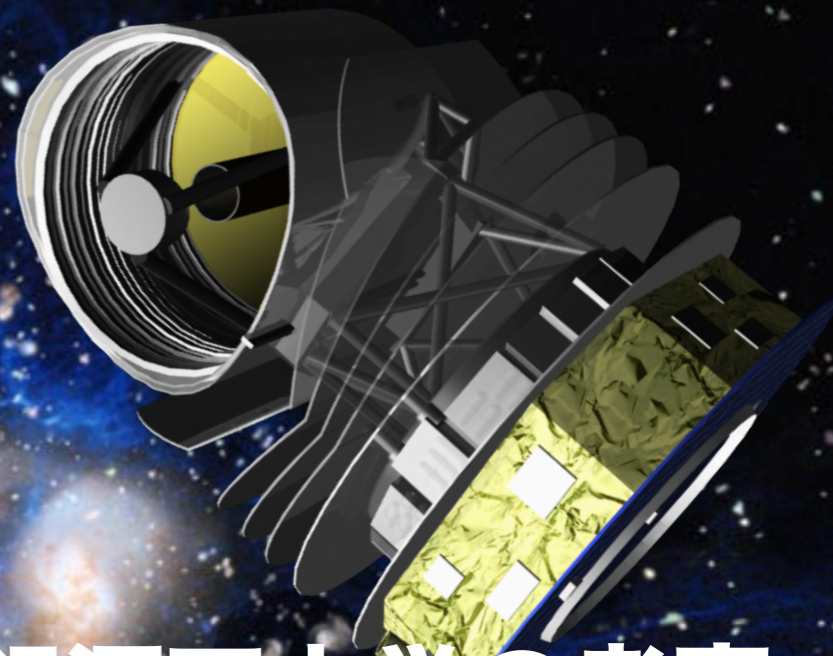
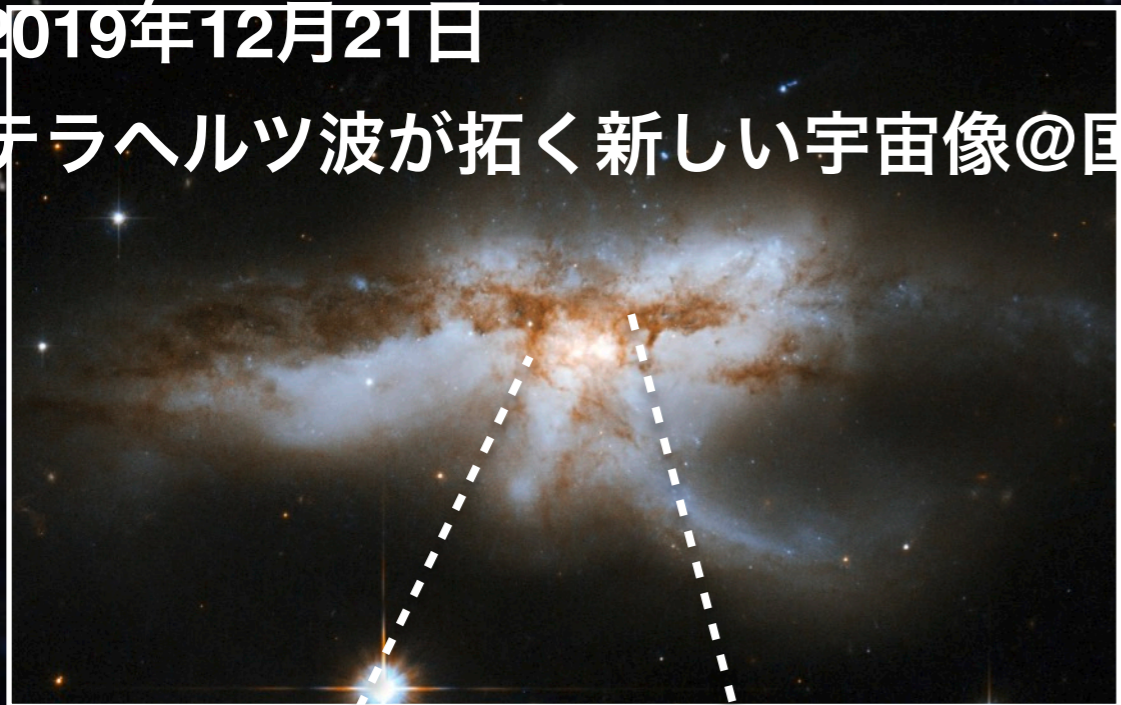
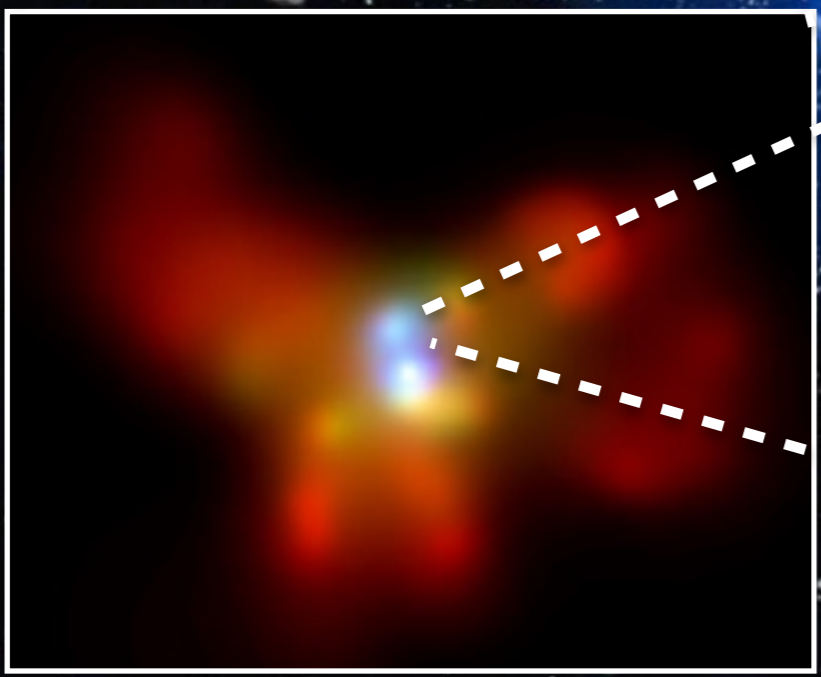


2019年12月21日

テラヘルツ波が拓く新しい宇宙像@国立極地研究所

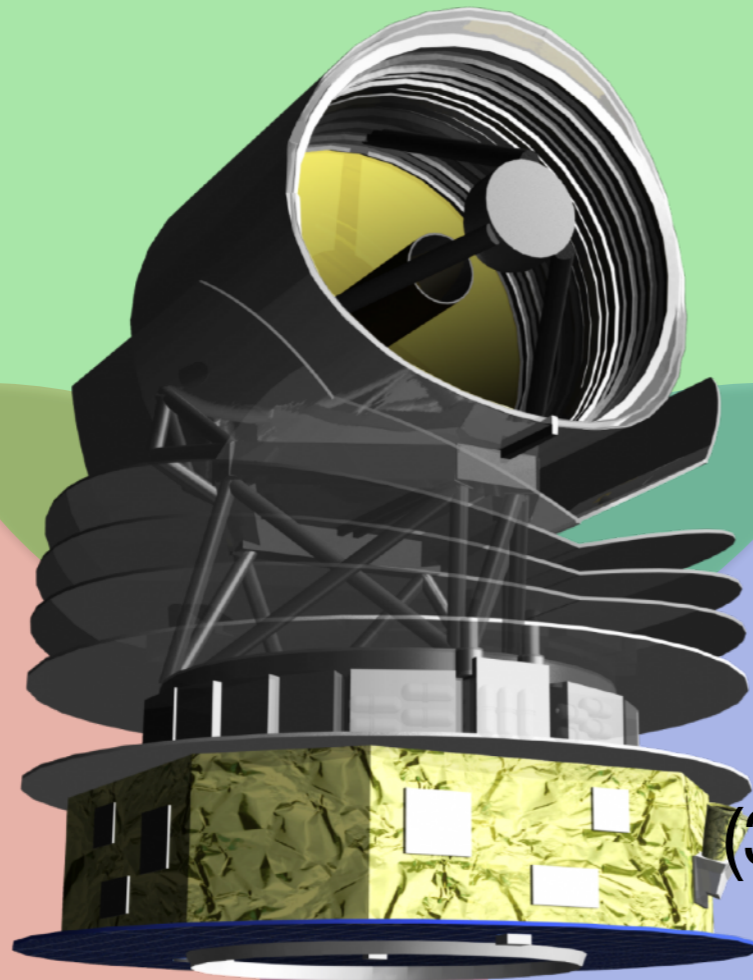


SPICAとTHz観測の協同で挑む銀河天文学の考察



泉 拓磨 (NAOJ)
& SPICAサイエンス検討会

(1) 150万km彼方の
宇宙天文台 (@L2)



(2) 大口径冷却望遠鏡
(2.5m, < 8K)

(3) 高感度MIR
・ FIR装置群
(SMI・SAFARI)

JAXA / SPICA Team

SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics)

— 宇宙が重元素と星間塵により多様で豊かな世界になり、生命居住可能な惑星世界をもたらした過程を解明する —

- JAXA + ESA
- $\lambda = 12 - 230 \mu\text{m}$
- 2027-2028年の打ち上げを目指す。

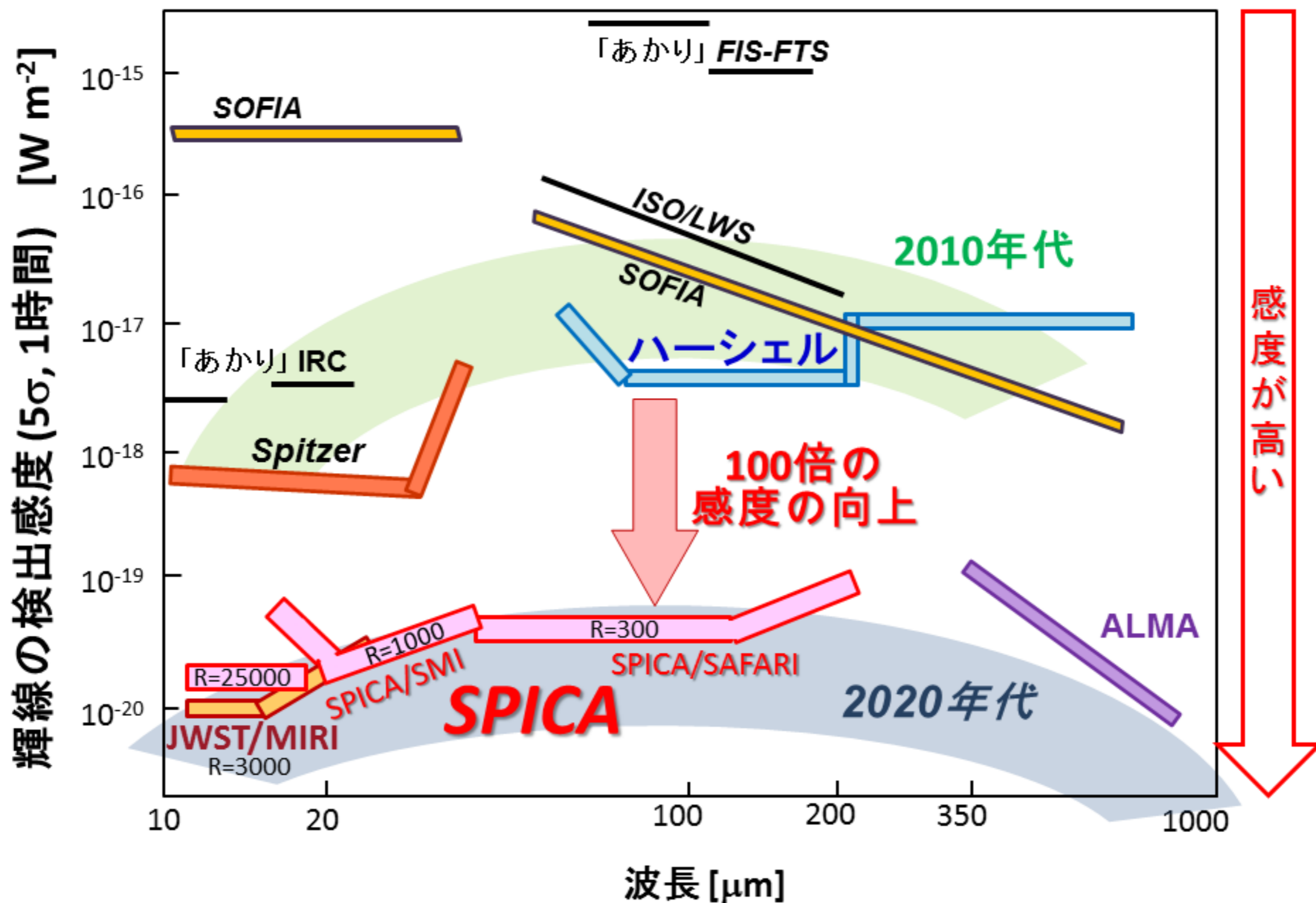


観測装置のまとめ

▶ SPICAの観測装置

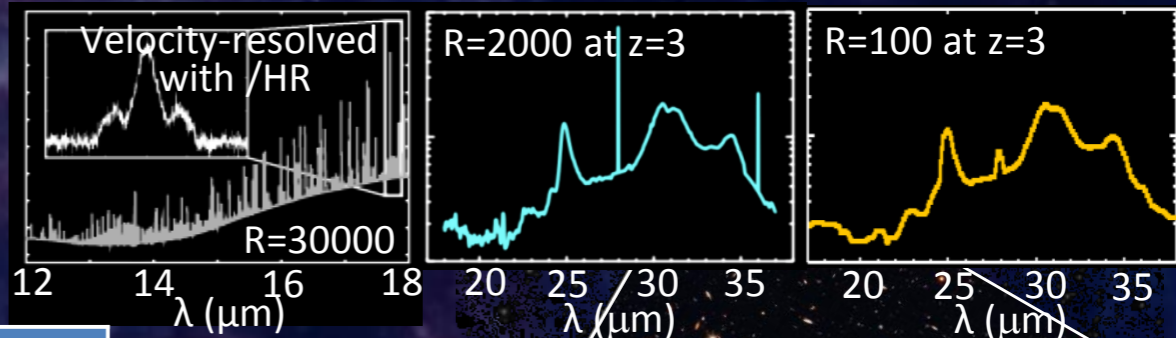
遠赤外線観測装置 Spica FAR-infrared Instrument (SAFARI)	中間赤外線観測装置 SPICA Mid-Infrared Instrument (SMI)	遠外線偏光観測装置 Magnetic field explorer with Bolometric Polarimeter (B-BOP)
SRON(オランダ) を中心とした 欧州チーム	名古屋大学・宇宙科学研究所 を 中心とした国際チーム	CEA(フランス) を中心とした 欧州チーム
SAFARI ホームページ	SMI ホームページ 	
SAFARI ファクトシート PDF file (v0.9, 2016/4/8) 	SMI ファクトシート PDF file (v12, 2019/5/16) 	B-BOP(旧POL) ファクトシート PDF file 
代表的な文献 "Safari: instrument design of the far-infrared imaging spectrometer for spica" W. Jellema et al, ICSO, 105631K (2017)	代表的な文献 "SPICA mid-infrared instrument (SMI): conceptual design and feasibility studies" Kaneda et al. SPIE, 106980C (2018)	代表的な文献 "Probing the cold magnetized Universe with SPICA-POL (B-BOP)" Ph. André et al. PASA (2019) To be published.

次世代赤外線天文衛星 SPICA

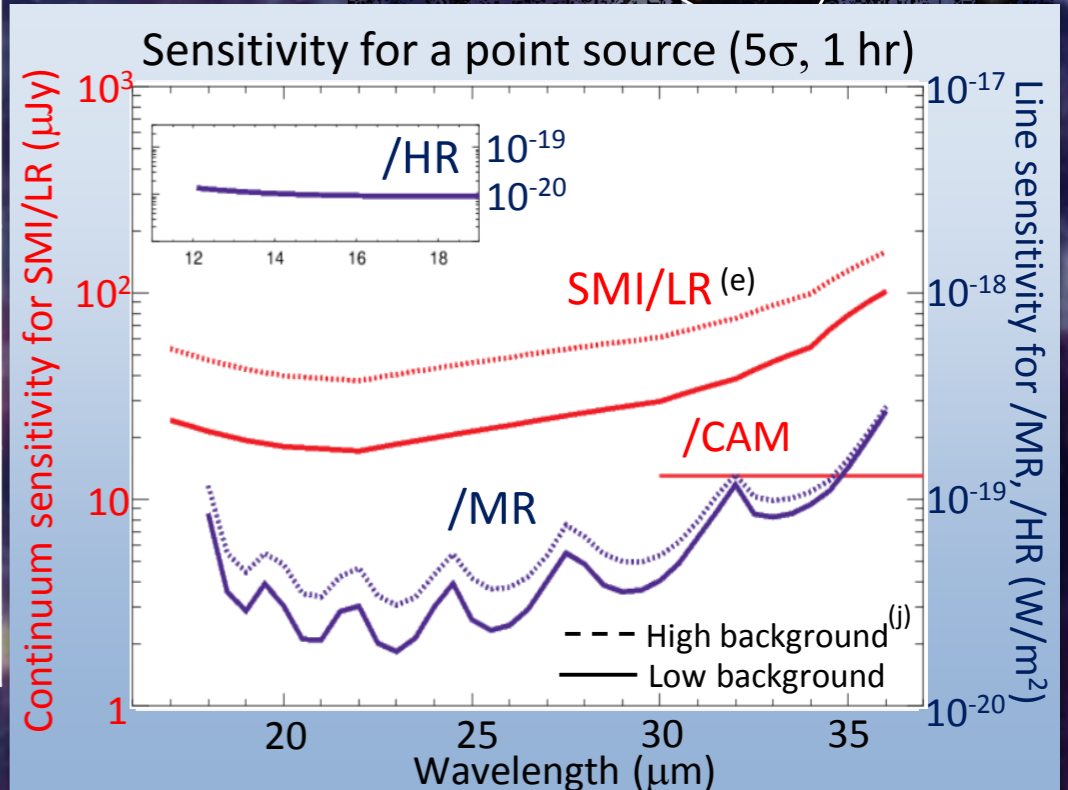
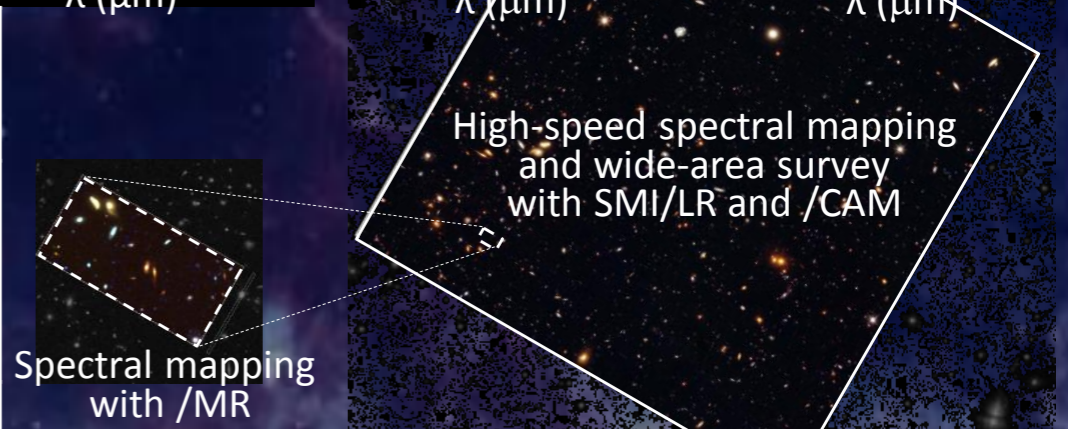


SPICA / SMI Fact Sheet

SPICA Mid-infrared Instrument (SMI) covers the wavelength range of 12–36 μm with four channels: spectroscopy (SMI/LR, /MR, /HR) and imaging (/CAM).



Parameter	SMI /LR	/CAM Slit viewer for SMI /LR	/MR	/HR
Band centre - μm	27	34	27	15
Wavelength - μm	17 – 36	34	18 – 36	12 – 18 (a)
Spectral resolution R (diffuse source)	50 – 150 (b) (20 – 110)	5	1300 – 2300 (b) (1100-1400)	33000 (c)
Field of view	600" x 3.7" 4 slits	600" x 720"	60" x 3.7" 1 slit	4" x 1.7" 1 slit
Band centre FWHM	2.7"	3.5"	2.7"	2"
Pixel scale	0.7" x 0.7"	0.7" x 0.7"	0.7"	0.7"
Detector 1K x 1K	Si:Sb	Si:Sb	Si:Sb	Si:As
Point source sensitivity ($5\sigma/1\text{ hr}$) ^(d)				
Continuum - μJy	25 (e)	13	280 (e)	1400 (e)
Line - 10^{-20} W/m^2 (f)	5		2.8	1.0
Survey speed - arcmin ² /hr (g)	~28	~4500	~1.8	
Diffuse source sensitivity ($5\sigma/1\text{ hr}$) ^{(d)(h)}				
Continuum - MJy/sr	0.04	0.05		
Line - $10^{-10}\text{ W/m}^2/\text{sr}$			0.6	1.5
Saturation limit – Jy	~20	~1	~1000	~20000



(a) continuous coverage up to 18.1 μm + partial coverage for H₂O 18.66 μm .

(b) $\lambda/\delta\lambda = 150$ (SMI/LR) and 1300 (/MR) at $\lambda = 36\ \mu\text{m}$.

(c) designed for $\lambda 20\ \mu\text{m}$ diffraction limited PSF.

(d) sensitivity estimated with Fowler-16 sampling for SMI/LR and /CAM (0.5 Hz), and with ramp curve sampling for /MR (0.5 Hz) and /HR (1 Hz sampling).

(e) continuum sensitivity rescaled with $R = 50$, $R = 1300$, and $R = 25000$ for SMI/LR, /MR and /HR, respectively.

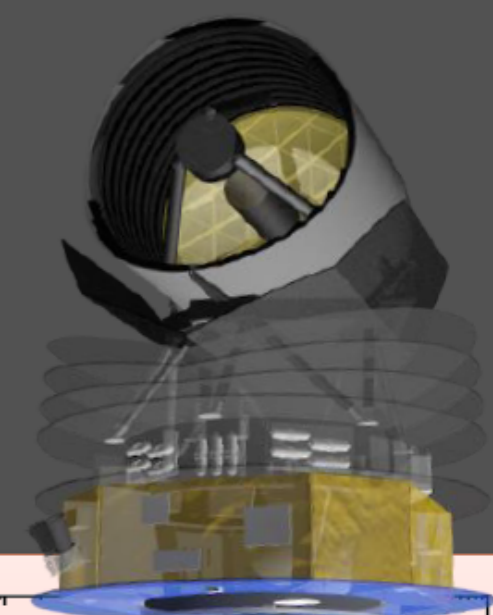
(f) sensitivity for an unresolved line.

(g) survey speed for the 5σ detection of a point source with the continuum flux of 100 μJy for SMI/LR at $\lambda = 30\ \mu\text{m}$ (/CAM at 34 μm) and the line flux of $3 \times 10^{-19}\text{ W/m}^2$ for /MR at $\lambda = 28\ \mu\text{m}$, both in the low background case with overheads of readout time included (32 sec/frame for SMI/LR and /CAM due to Fowler-16 sampling).

(h) sensitivity for a diffuse source in a 4" x 4" (SMI/LR, /MR) or 2" x 2" area (/HR).

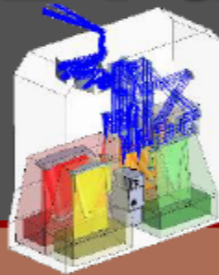
(i) background levels are assumed to be 80 MJy/sr (High) and 15 MJy/sr (Low) at 25 μm .

SPICA/SAFARI Fact Sheet



SAFARI Overview

- Four band *grating spectrometer*
- Continuous spectroscopic capability from 34-230 μm



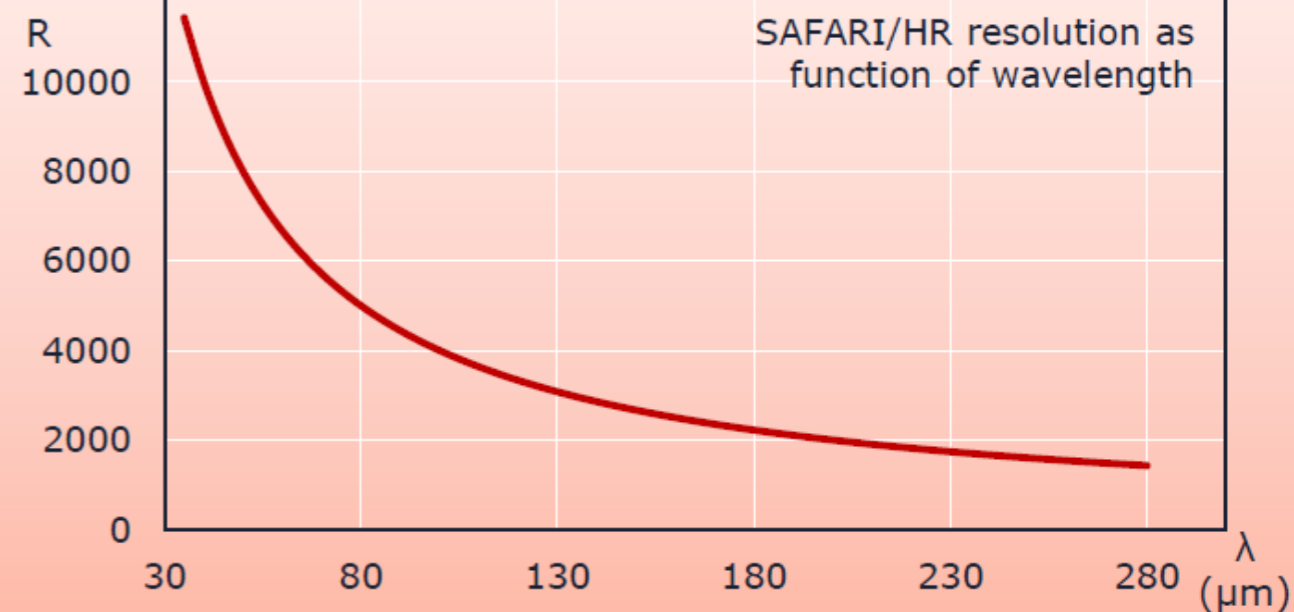
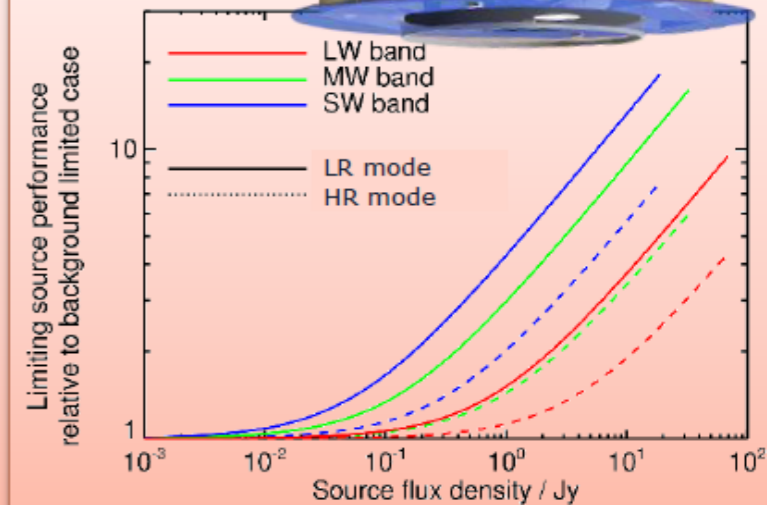
Parameter	Waveband				
	SW	MW	LW	LLW	
Band centre / μm	45	72	115	185	
Wavelength range / μm	34-56	54-89	87-143	140-230	
Band centre beam FWHM	4.5"	7.2"	12"	19"	
Point source spectroscopy (5σ-1hr)					
LR	Limiting flux / $\times 10^{-20} \text{ Wm}^{-2}$	7.2	6.6	6.6	8.2
	Limiting flux density / mJy	0.31	0.45	0.72	1.44
HR	Limiting flux / $\times 10^{-20} \text{ Wm}^{-2}$	13	13	13	15
	Limiting flux density / mJy	18	17	17	19
Mapping spectroscopy* (5σ-1hr)					
LR	Limiting flux / $\times 10^{-20} \text{ Wm}^{-2}$	84	49	30	23
	Limiting flux density / mJy	3.6	3.3	3.3	4.1
HR	Limiting flux / $\times 10^{-20} \text{ Wm}^{-2}$	189	113	73	51
	Limiting flux density / mJy	253	151	97	67
Photometric mapping* (5σ-1hr)					
Limiting flux density / μJy	209	192	194	239	
Confusion limit (5σ)	15 μJy	200 μJy	2 mJy	10 mJy	

SPICA Mission

- ESA/JAXA collaboration
- Telescope effective area 4.6 m^2
- Primary mirror temperature 8K
- Goal mission lifetime – 5 years

System performance v.s. target flux density, relative to the background limited case

- The sensitivity decrease is due to the increased photon noise from the target source
- Data given up to the instrument saturation limits for each band (31, 51 and 87 Jy for the SW, MW and LW bands respectively).



Sensitivities based on detector NEP $2 \times 10^{-19} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$
 * Mapping performance is for a reference area of 1 arcmin^2

CRON

SAFARI

SAFARI GS Factsheet V1.0 – 30th September 2016

- $R \approx 300$ for LR case
- See for more details: Explanatory Note to SAFARI Fact Sheet on <https://spica-mission.org/instruments.html#safari>

Sky Visibility Contours (days per year)

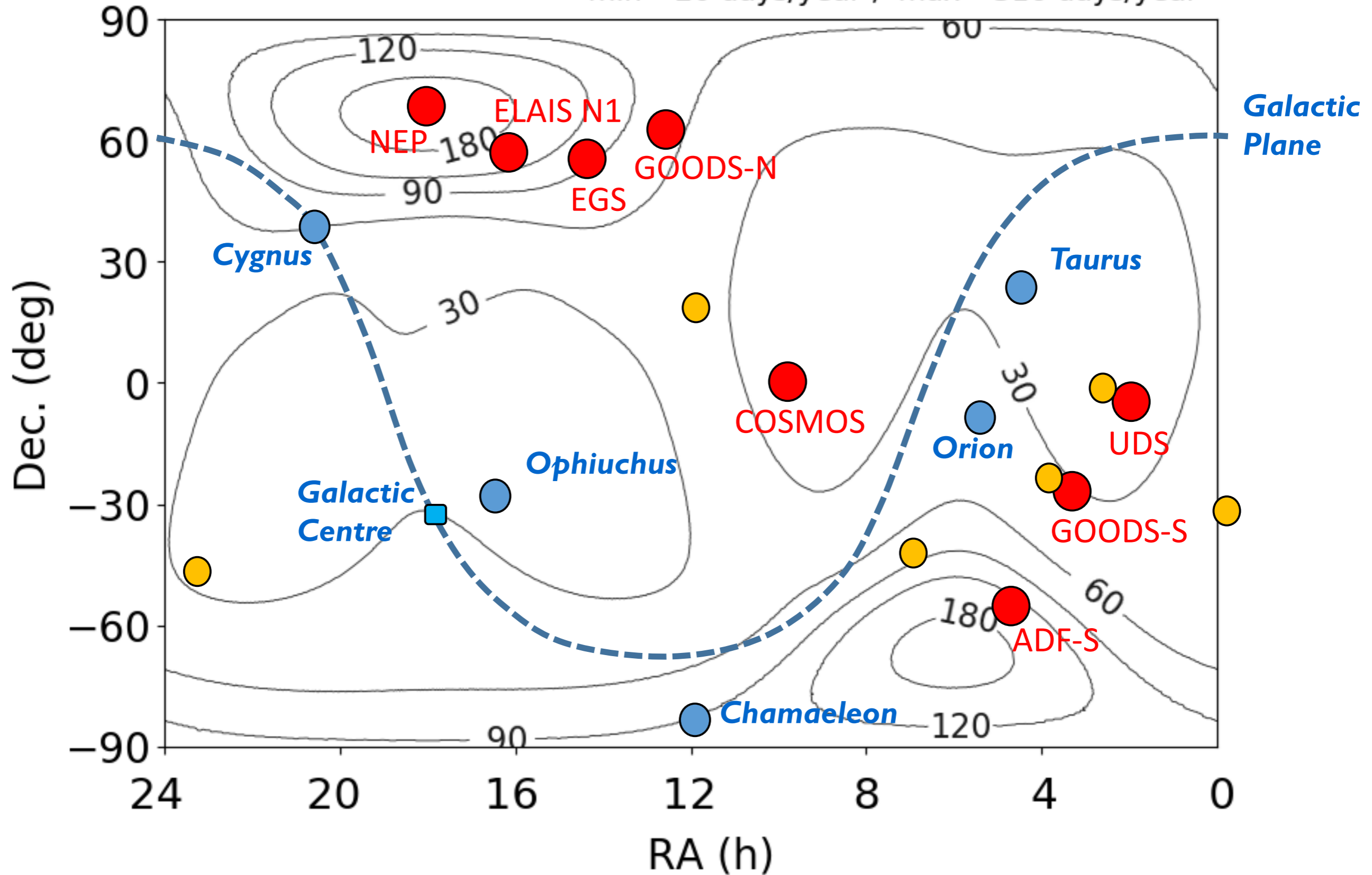
based on the Observation Angle Constraint

Roll +10 deg. -10 deg

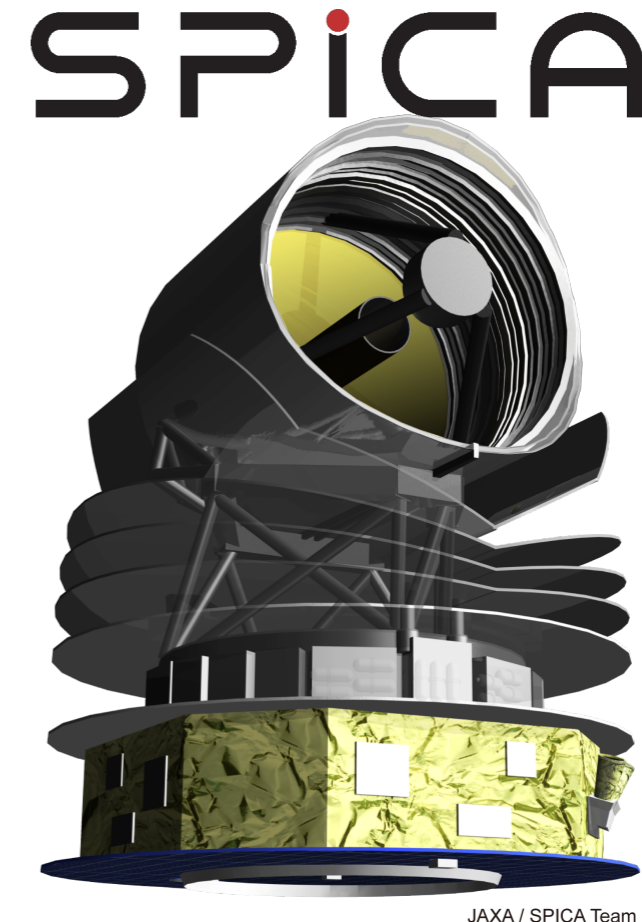
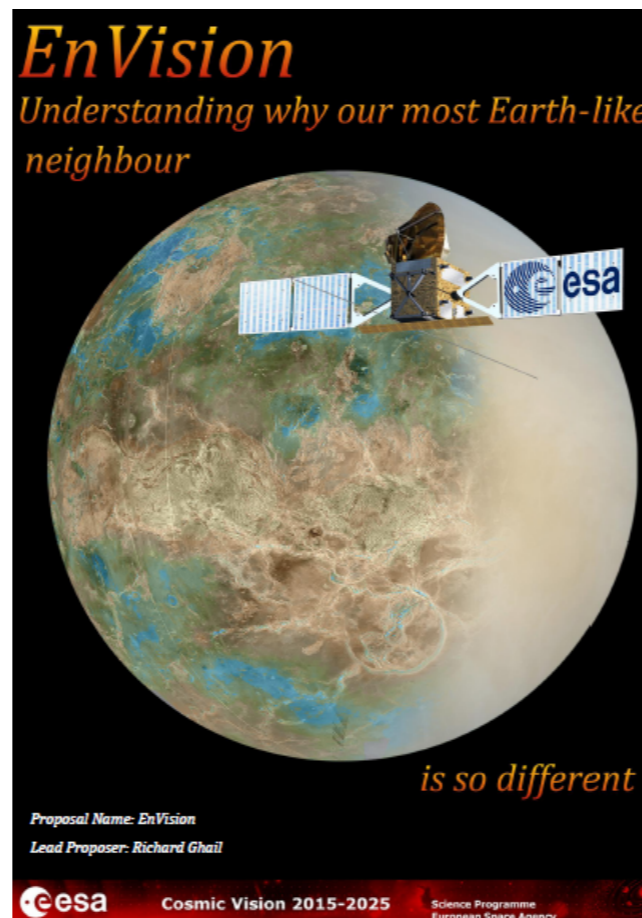
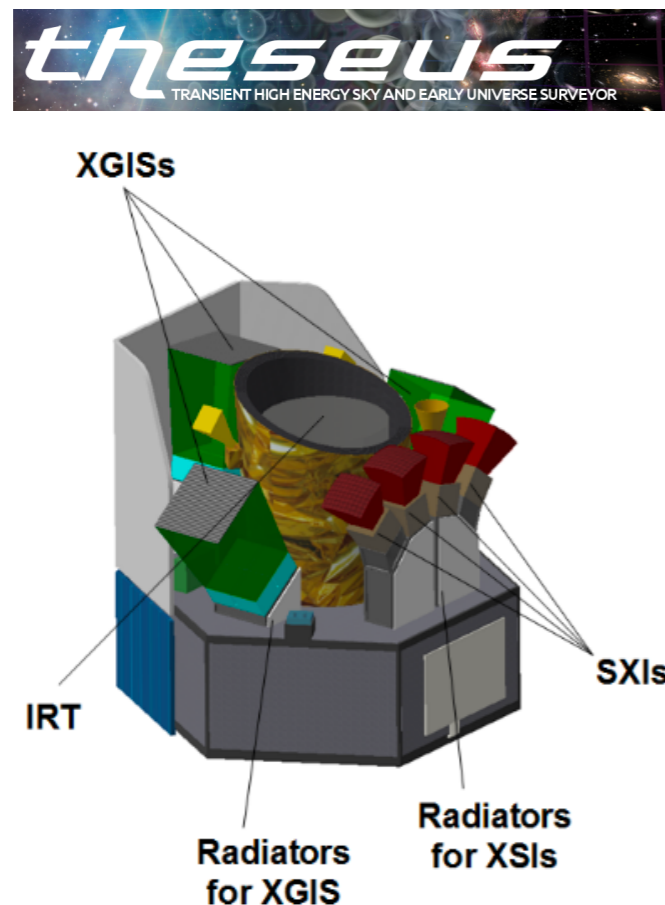
new shadow cone with $\theta_{sc} = 13$ deg

Ecliptic poles have the highest visibility, while the ecliptic plane has the lowest visibility (~16 days/year). ● HST Frontier Fields

min = 20 days/year , max = 316 days/year



- SPICA実現のためには、ESAの宇宙科学プログラムであるCosmic Visionの中型ミッション5号機（M5）として採択されることが必須。
- M5に応募のあった25計画に対する一次審査の結果、**SPICAを含む3つの計画が2018年5月に採択。**
- M5の最終候補3計画から、**2021年の夏頃に1計画が採択予定。**



- そのM5に勝ち抜くための様々な活動が、日欧の双方で強く要求されている段階にある。
- ESA側ではSPICA Science Study Team (SST)が設置され、その下に Science Working Groupが発足。2020年に”**Yellow Book**”を編纂予定（各界への宣伝）。
- 日本では、宇宙研所長の諮問機関として、SPICA研究推進委員会が2018年8月に発足。その下に、「**SPICAサイエンス検討会**」を設置。国内研究者にSPICAへの理解を深めてもらい、多くの重要サイエンスを洗い出してまとめることで、Yellow Book作成に貢献する。



班員体制 (ver.191104)

とりまとめ: **長尾透**(愛媛大), **野村英子**(NAOJ) (敬称略)

銀河BH進化
泉拓磨(NAOJ)

市川幸平(東北大)
今西昌俊(NAOJ)
梅畑豪紀(理研)
久保真理子(NAOJ)
竹内努(名大)
田村陽一(名大)
鳥羽儀樹(京大)
長峯健太郎(阪大)
橋本拓也(早稲田大)
播金優一(NAOJ)
馬場俊介(NAOJ)
山下拓時(NAOJ)
和田武彦(ISAS)

近傍銀河・銀河系
江草芙実(東大)

稲見華恵(広島大)
金子紘之(NAOJ)
左近樹(東大)
竹内努(名大)
田村陽一(名大)
中西康一郎(NAOJ)
馬場淳一(NAOJ)
本原顕太郎(東大)
渡邊祥正(日大)

星形成・星間媒質
井上剛志(名大)

相川祐理(東大)
岩崎一成(NAOJ)
大屋瑤子(東大)
神鳥亮(ABC)
坂井南美(理研)
島尻芳人(鹿児島大)
下西隆(東北大)
立原研悟(名大)
野沢貴也(NAOJ)
日高宏(北大)
古家健次(筑波大)
古屋玲(徳島大)
守屋堯(NAOJ)
山本智(東大)

惑星形成
本田充彦(岡山理大)

相川祐理(東大)
荒川創太(東工大)
石原大助(ISAS)
田崎亮(東北大)
橘省吾(東大)
茅原弘毅(大産大)
中川貴雄(ISAS)
野津翔太(Leiden)
野村英子(NAOJ)
藤井悠里(名大)
藤原英明(NAOJ)
松本侑士(ASIAA)
武藤恭之(工学院大)
百瀬宗武(茨城大)
森昇志(東大)

太陽系・系外惑星
平野照幸(東工大)

臼井寛裕(ISAS)
大坪貴文(ISAS)
大野和正(東工大)
奥住聡(東工大)
奥谷彩香(東工大)
笠羽康正(東北大)
川内紀代恵(東大)
川島由依(SRON)
癸生川陽子(横国大)
小林仁美(LLP)
小林浩(名大)
佐川英夫(京産大)
関根康人(東工大)
空華智子(NAOJ)
高橋葵(ABC)
藤井友香(東工大)
前澤裕之(大阪府大)
松尾太郎(大阪大)
水木敏幸(ISAS)
藪田ひかる(広島大)

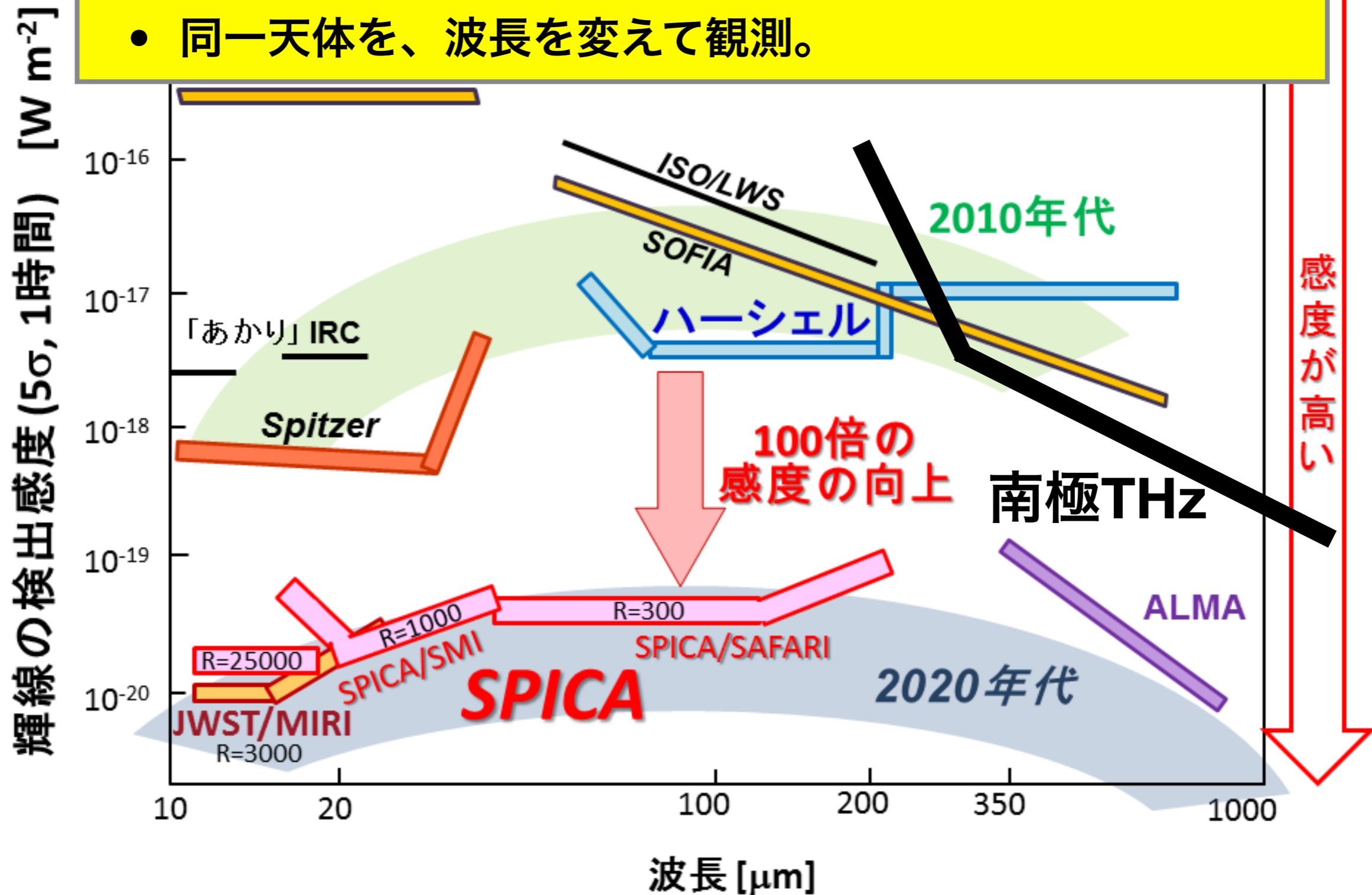
- ・現時点で28機関から計73名(内、班長5名)が参加
 - 赤字で示した方は ESA SST の Science WG にも参加
- ・各班のメーリングリスト

- 銀河BH進化
- 近傍銀河・銀河系
- 星形成・星間媒質
- 惑星形成
- 太陽系・系外惑星

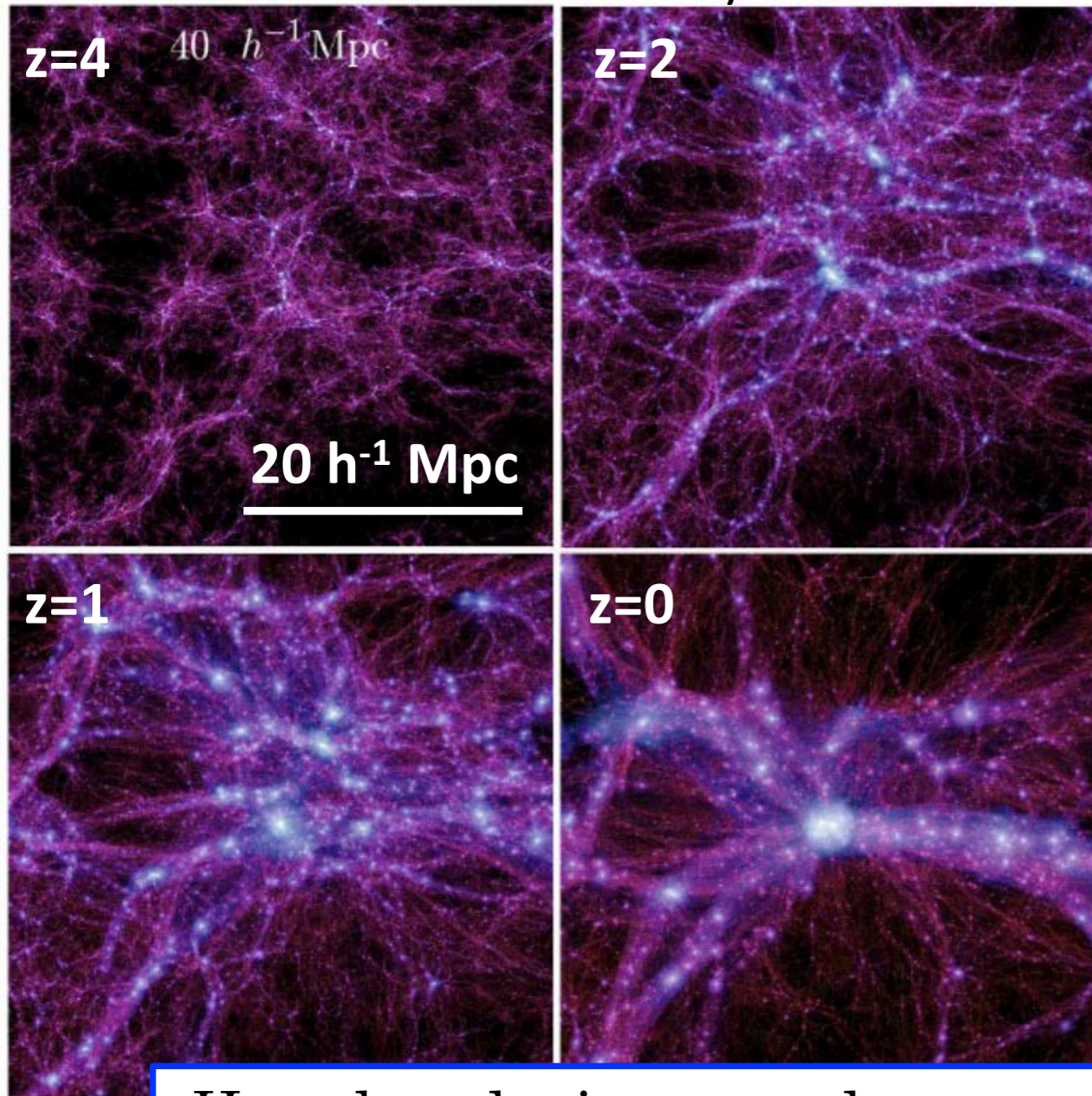
spica_swg_highz@googlegroups.com
 spica_swg_nbg@ioa.s.u-tokyo.ac.jp
 spica-starformation-ism@astro-th.phys.nagoya-u.ac.jp
 spica-planetformation@googlegroups.com
 spica_planets@eps.sci.titech.ac.jp

SPICA vs 南極THz望遠鏡 (30m)

- 同種族の天体？を、redshiftを変えて同様の手法で観測。
- 同一天体を、波長を変えて観測。

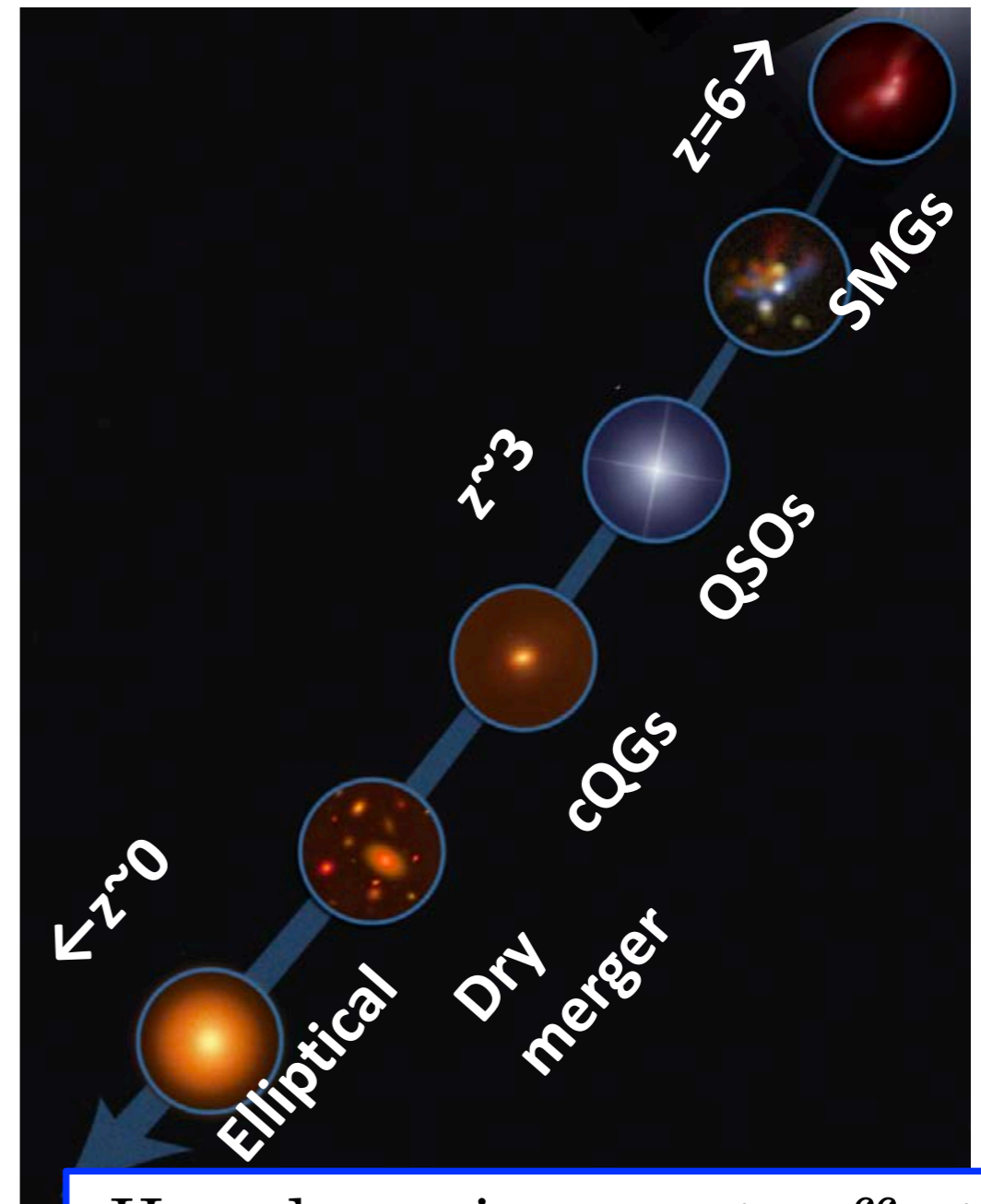


Boylan-Kolchin+09

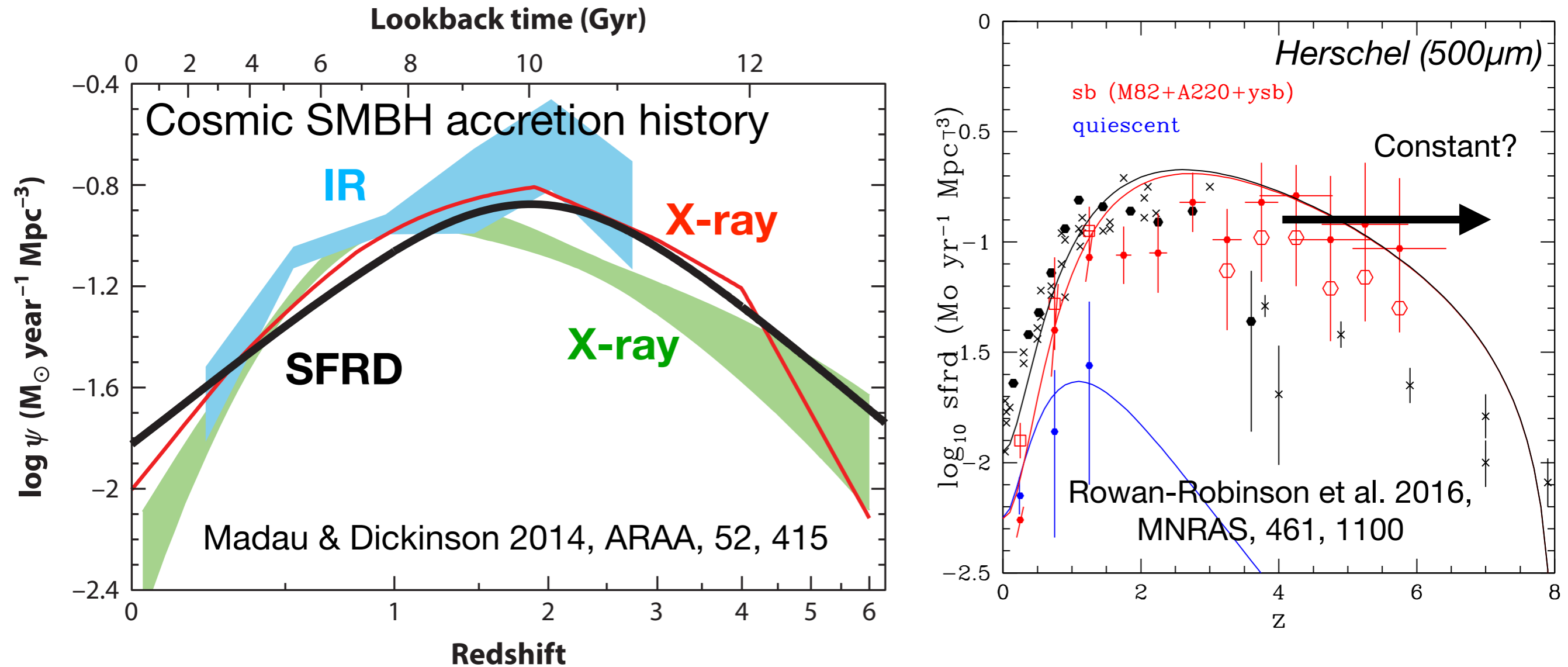


How do galaxies co-evolve with cosmic structures?

Toft+14



How do environments affect the galaxy evolution?



- 爆発的星形成活動もSMBH降着も同様の赤方偏移進化を示す。
 - ただし、 $z > 4$ のIR luminosity function (SF) には大きな不定性がある。
 - 暗い天体も含めた、dusty star-forming (+ AGN) activityの全貌を理解したい。
- **銀河が先か？BHが先か？**

Obscured AGNs in (U)LIRGs

3-4 μm

$z < 0.15$ ULIRG

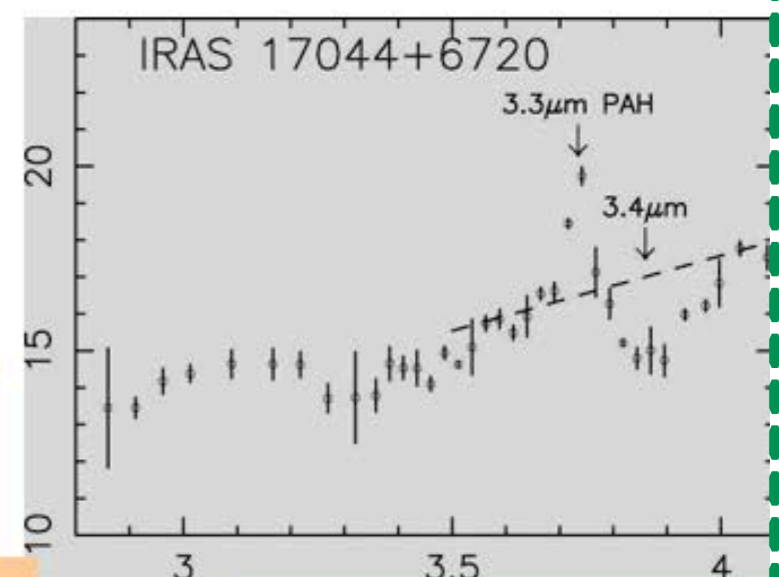
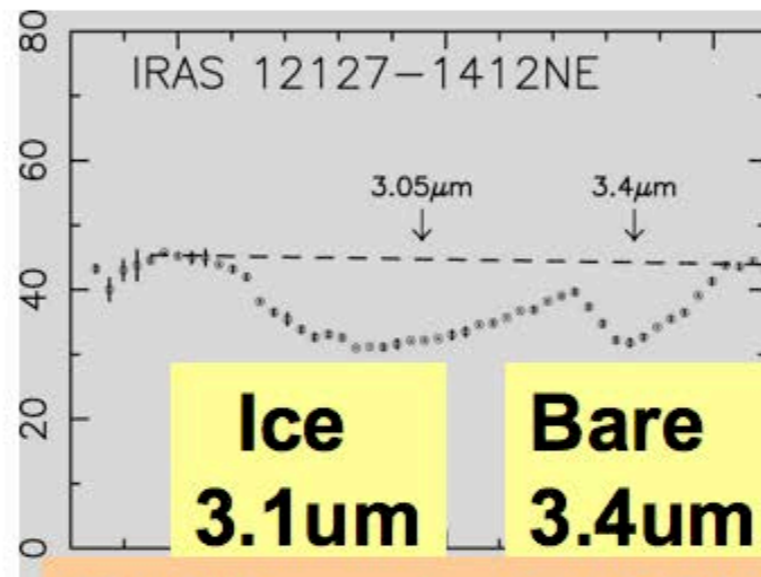
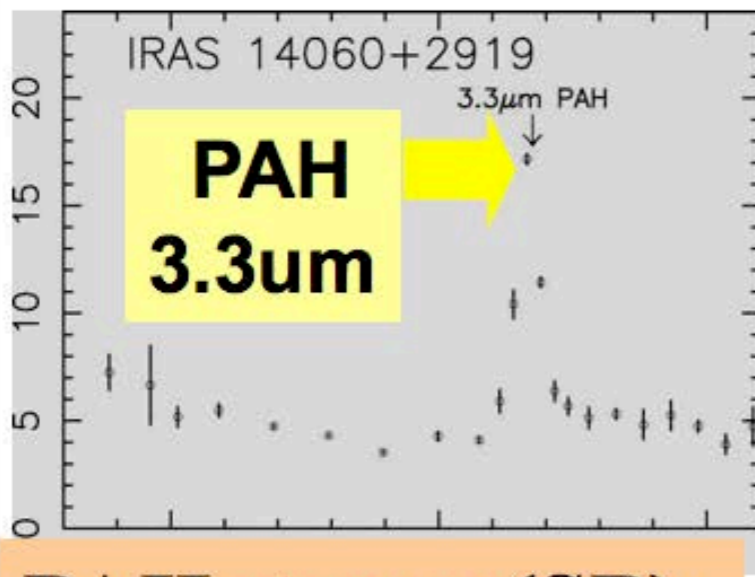
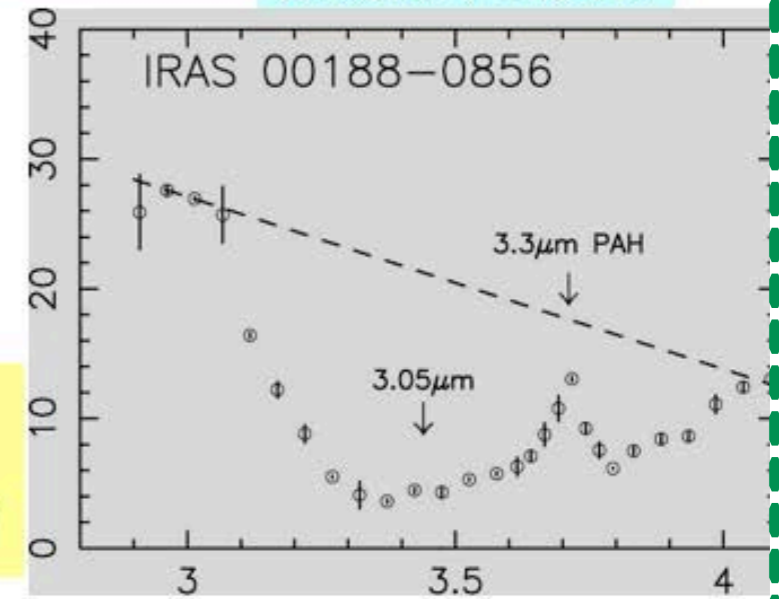
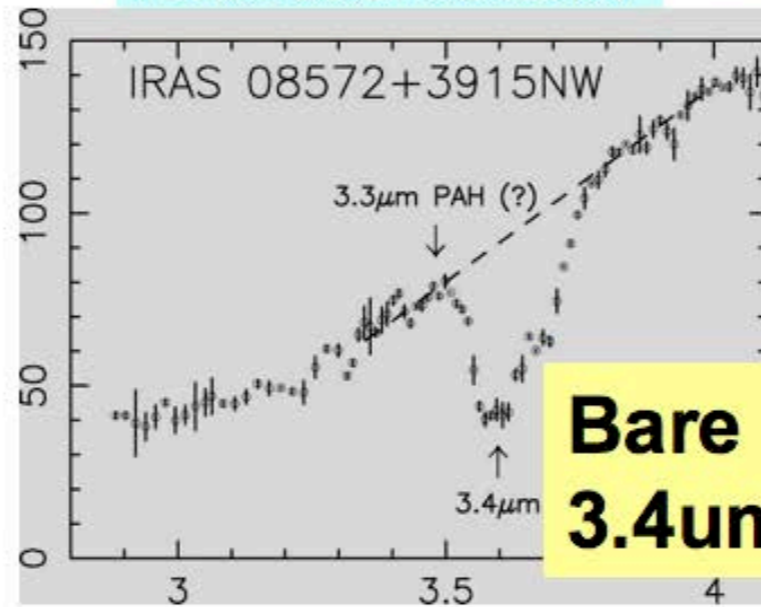
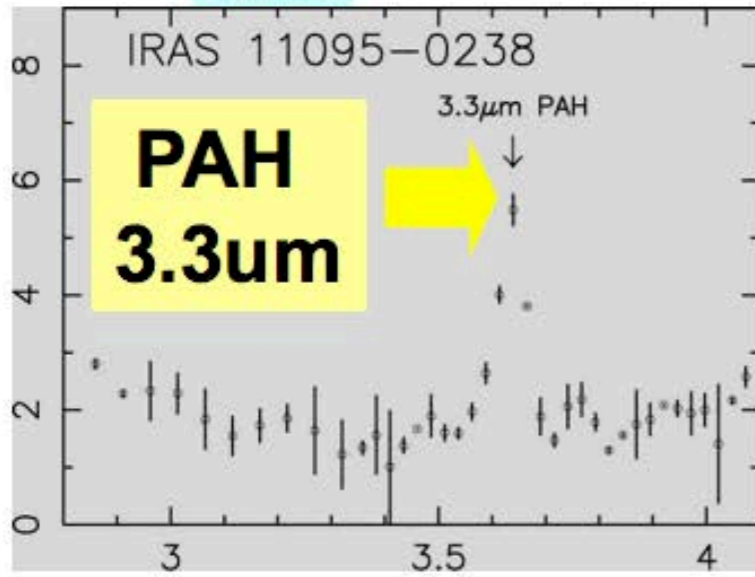


Subaru

SB

Buried AGN

AGN+SB



**PAH strong (SB):
Dust abs. weak**

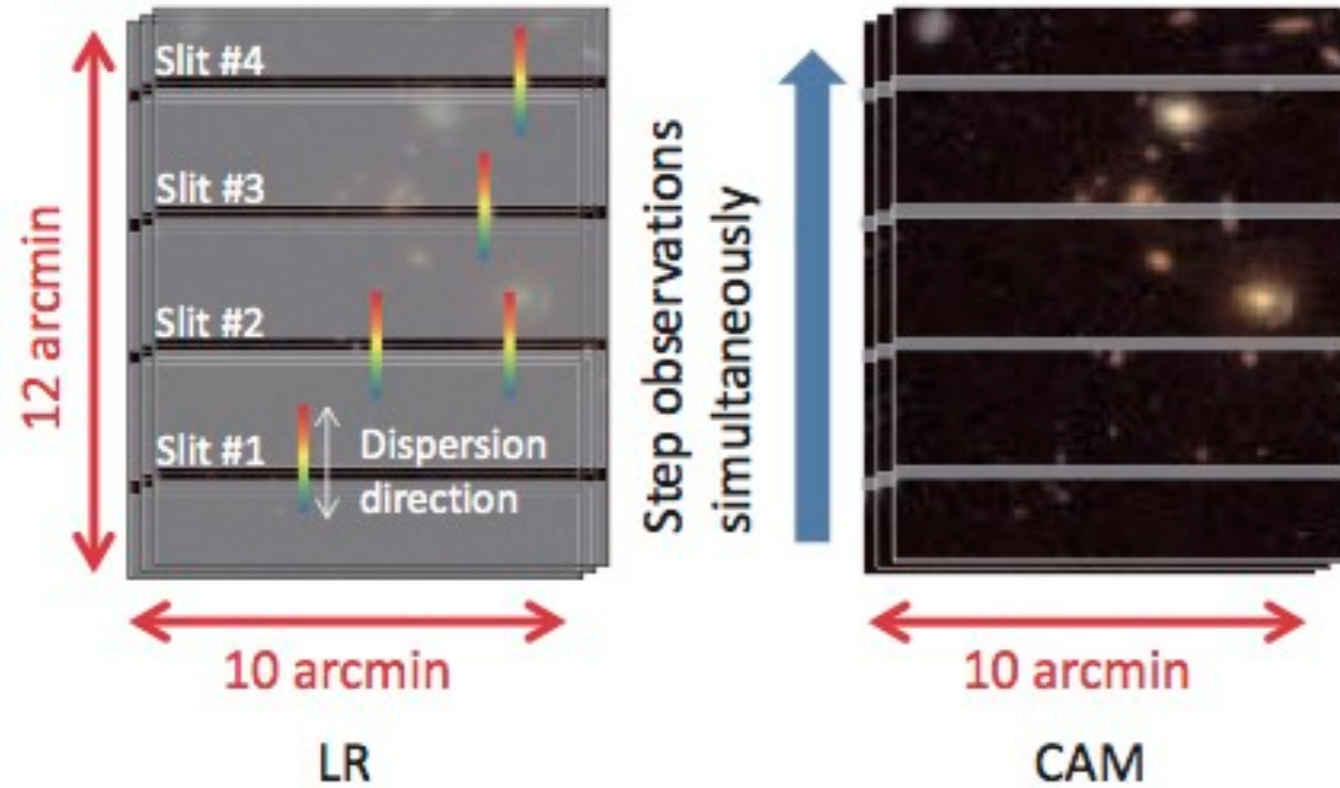
**PAH weak (AGN):
Dust abs. strong**

wavelength

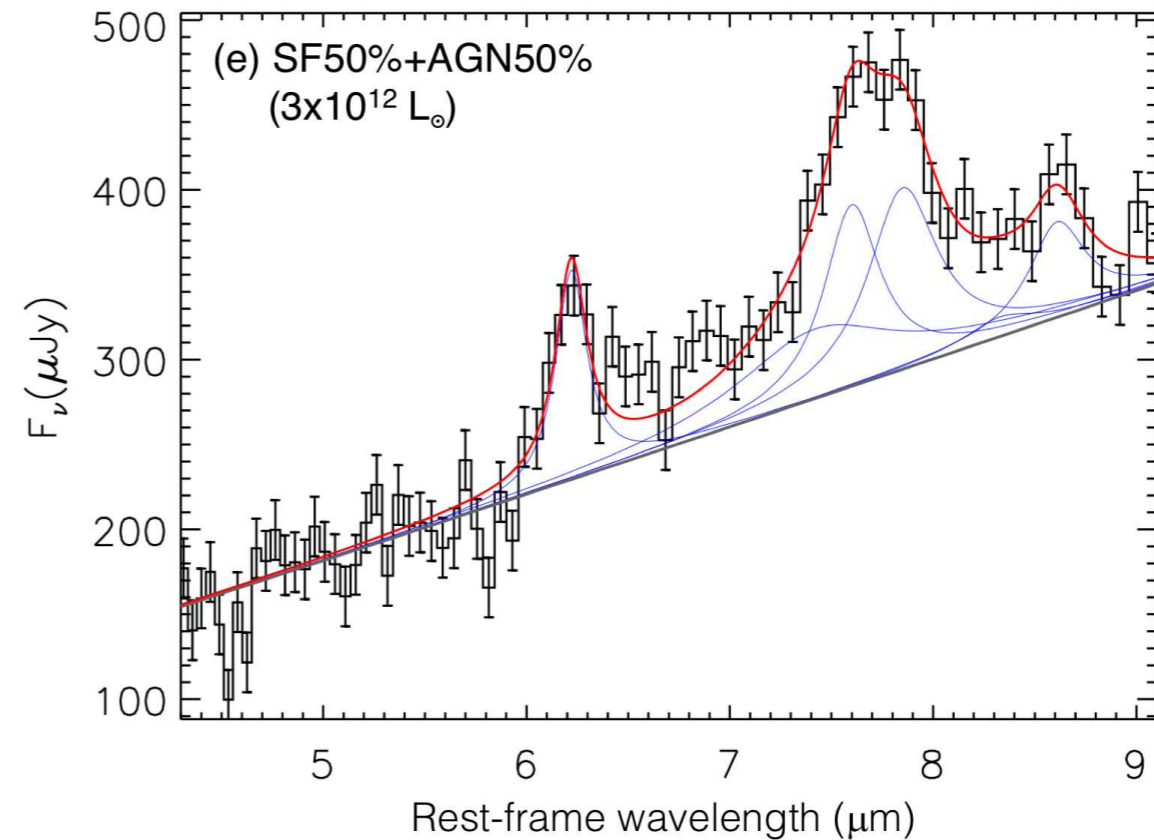
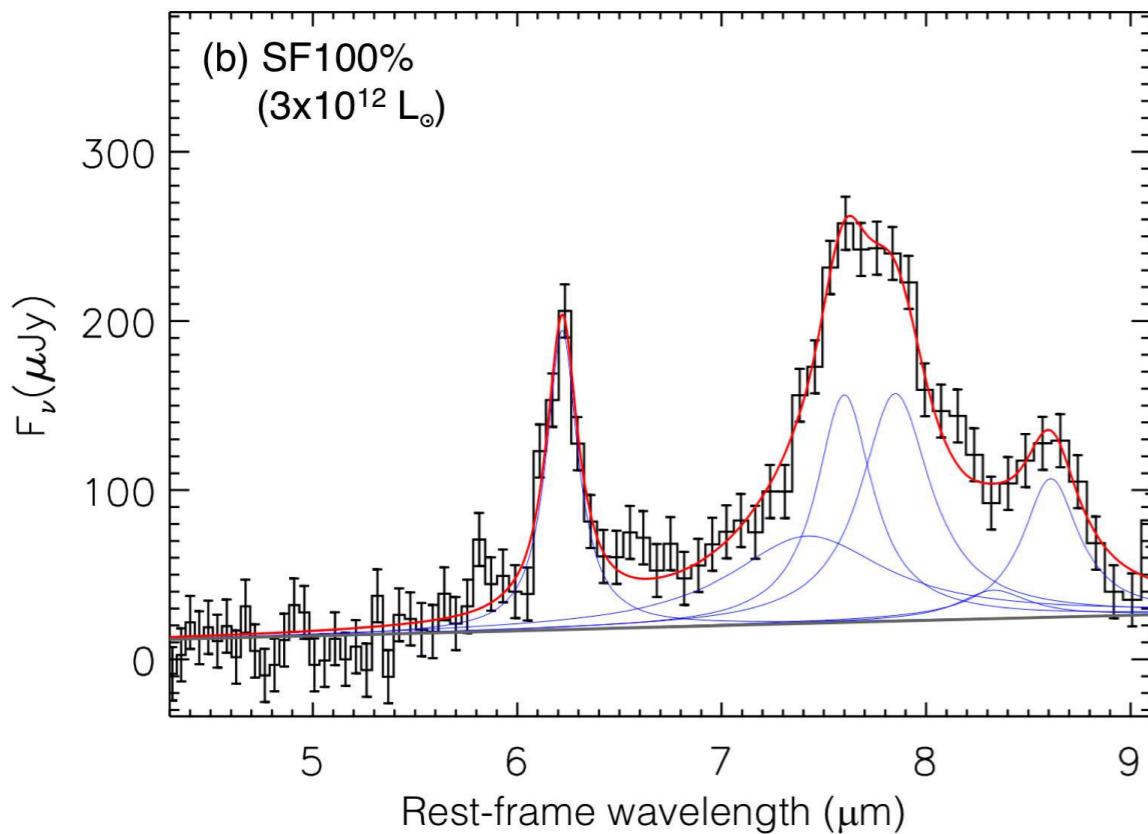
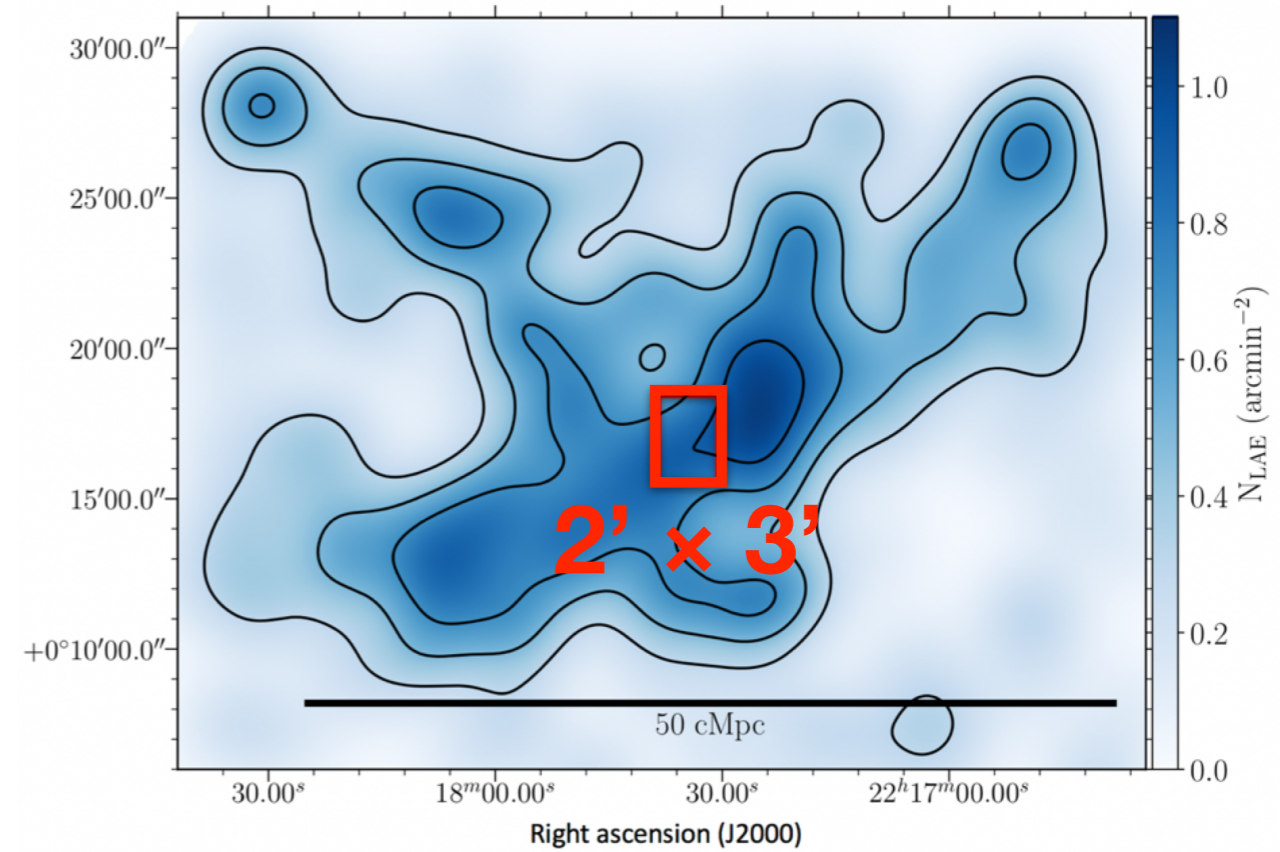
Imanishi+06

SPICA SMI Deep Survey?

Kaneda et al. 2017

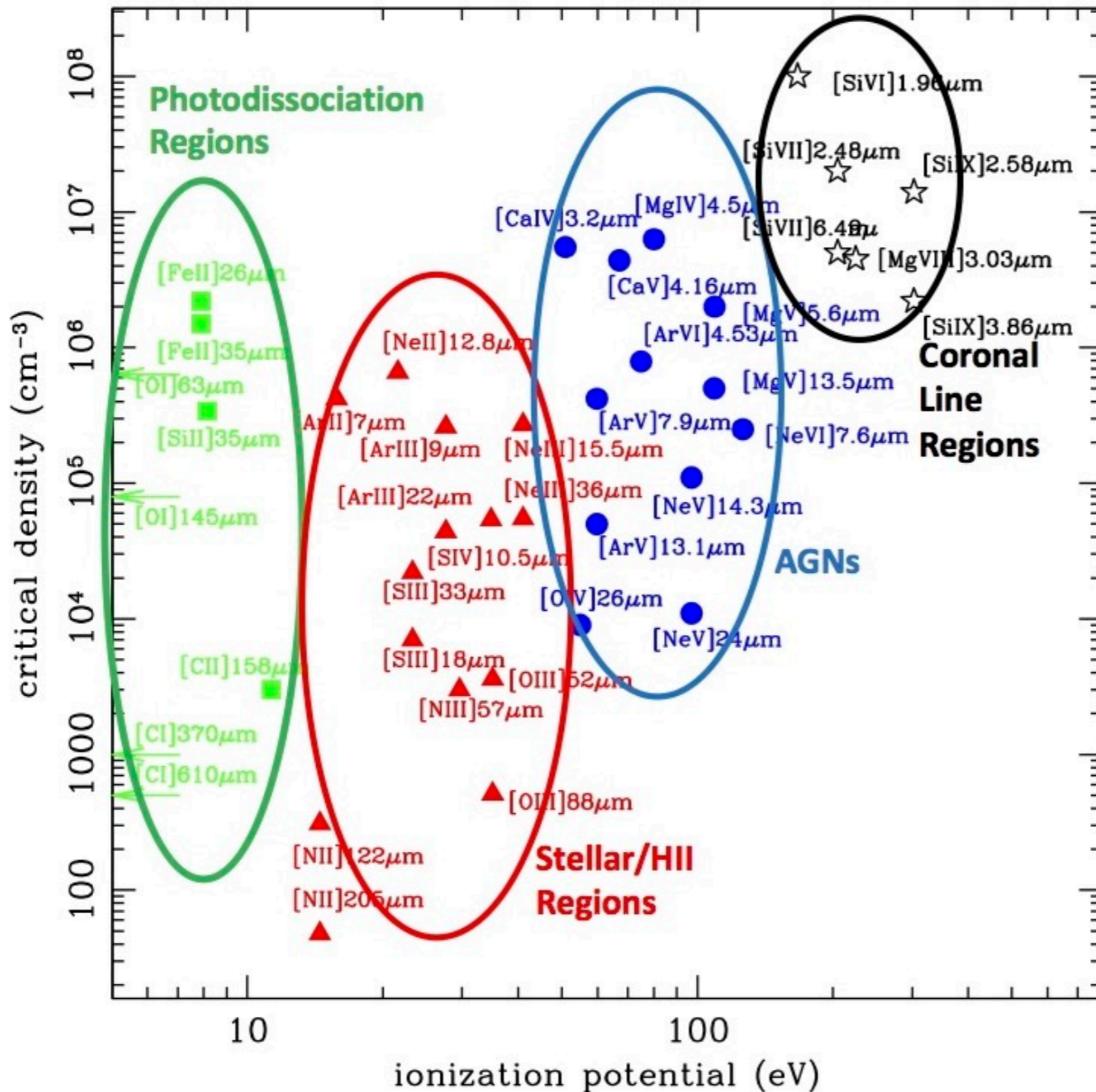


Umehata et al. 2019



(メモ) SPICAによる熱源診断

Spinoglio & Malkan 92, Spinoglio+17



- 多様なIR微細構造線を用いた熱源診断も可能。
- ただし、AGNの場合だと Narrow Line Region が形成されている必要あり = 「埋もれた AGN」とは言い難い天体のみに適用可能。

SPICA SMI Deep PAH Survey?

サーベイ計画案

Parameters	Wide	Deep
Survey area (deg ²)	10	1
Number of fields (10' × 12' as a unit)	300	30
Time per field w/o overheads (hours)	1.45	18.85
Total time incl. overheads (hours)	600	600
On-source time (sec)	90	1170

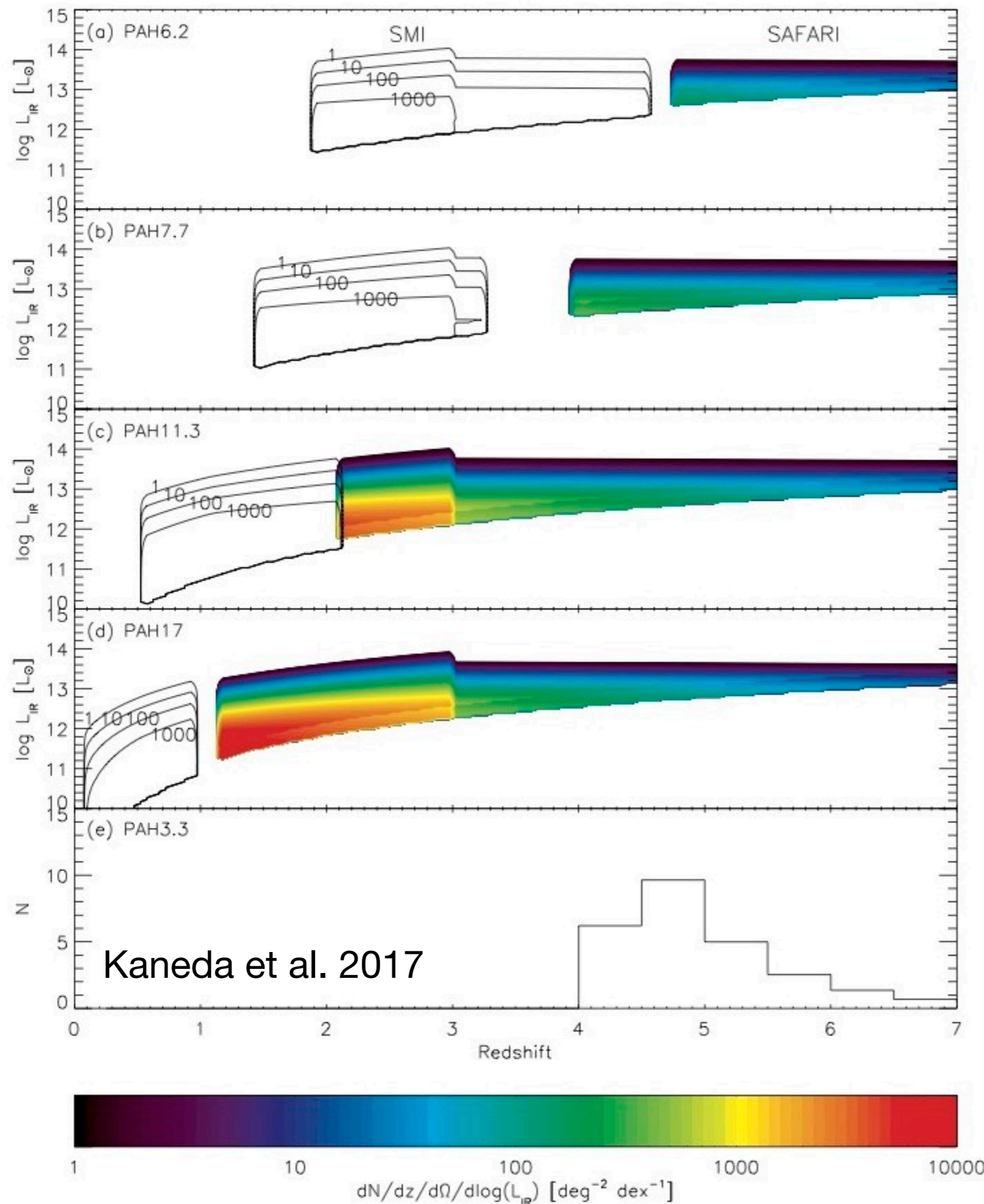
Kaneda et al. 2017

↓
Deep

- 非常に大量の銀河がPAH分光で z ~ 2-4に発見されると期待。
- AGNもあって興味深い。
- ただし1 fieldでの話。
→ vs. protoclusterの統計 (久保さん)

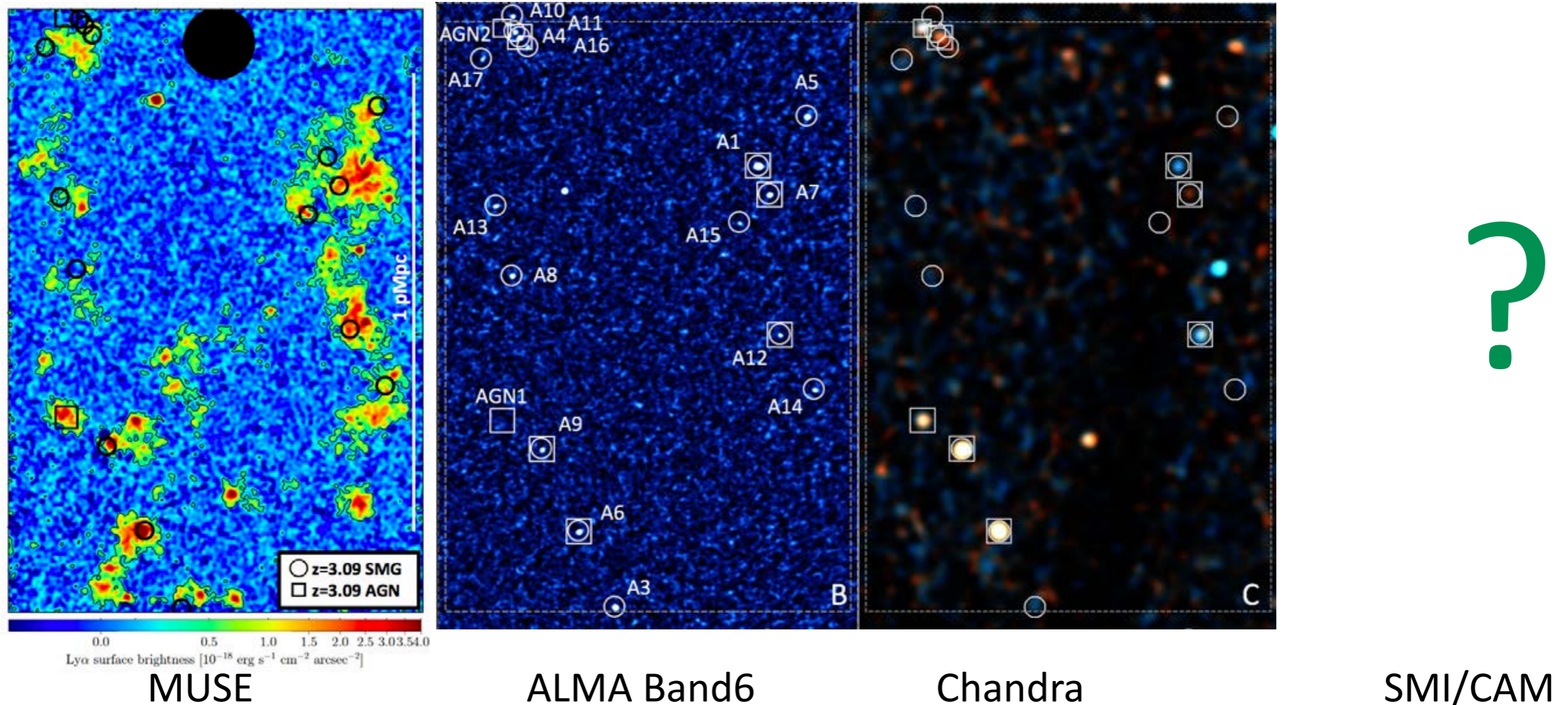
PAHで検出される銀河数の期待値 (括弧内はAGN有の銀河)

log(L _{IR} /L _⊙)	Redshift						
	0.5-1	1-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-4.0	> 4.0
13.00-	0 (0)	2 (1)	9 (4)	25 (10)	46 (19)	23 (10)	52 (18)
12.50-13.00	7 (3)	65 (23)	159 (58)	250 (93)	308 (122)	165 (70)	73 (25)
12.25-12.50	32 (11)	182 (63)	301 (107)	351 (131)	356 (144)	150 (42)	46 (0)
12.00-12.25	114 (39)	445 (153)	552 (196)	540 (204)	457 (167)	106 (10)	1 (0)
11.75-12.00	297 (101)	819 (281)	813 (290)	614 (182)	338 (10)	24 (0)	0 (0)
11.50-11.75	606 (205)	1225 (420)	933 (269)	422 (6)	49 (0)	0 (0)	0 (0)
11.00-11.50	2592 (874)	2754 (567)	826 (27)	48 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
10.50-11.00	3574 (804)	466 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
-10.50	1031 (20)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Total	8254 (2057)	5957 (1507)	3593 (951)	2249 (627)	1554 (462)	467 (133)	172 (44)



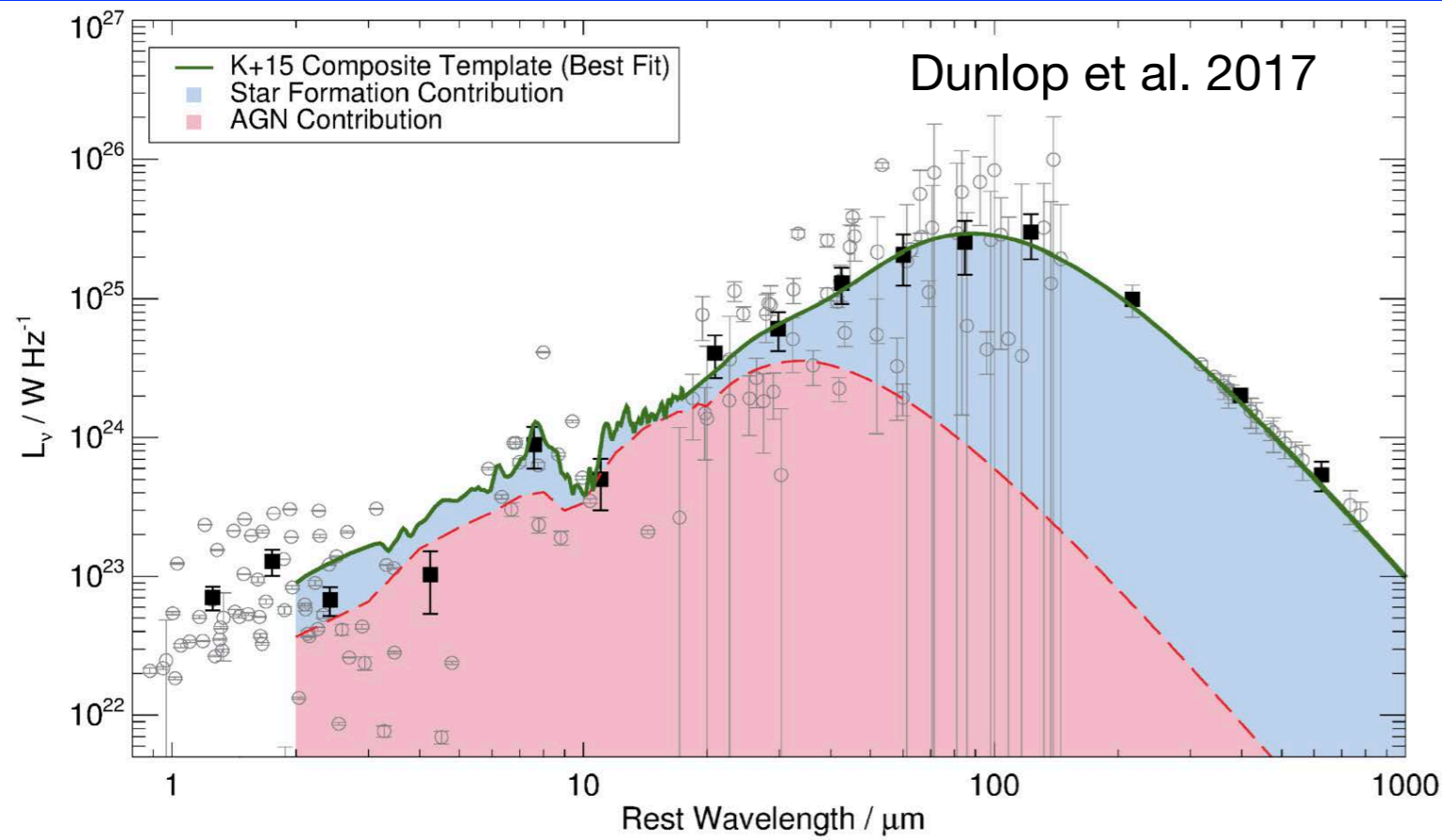
- 各PAH featureについて、SMIの波長域を外れても、SAFARIで十分にカバーできている。
 - $z > 4$ でも十分な数の星形成銀河が検出される（各光度binで >100 個くらい...?）。
- Dust-obscured activity at $z > 4$

MIRで見えてくる世界...?

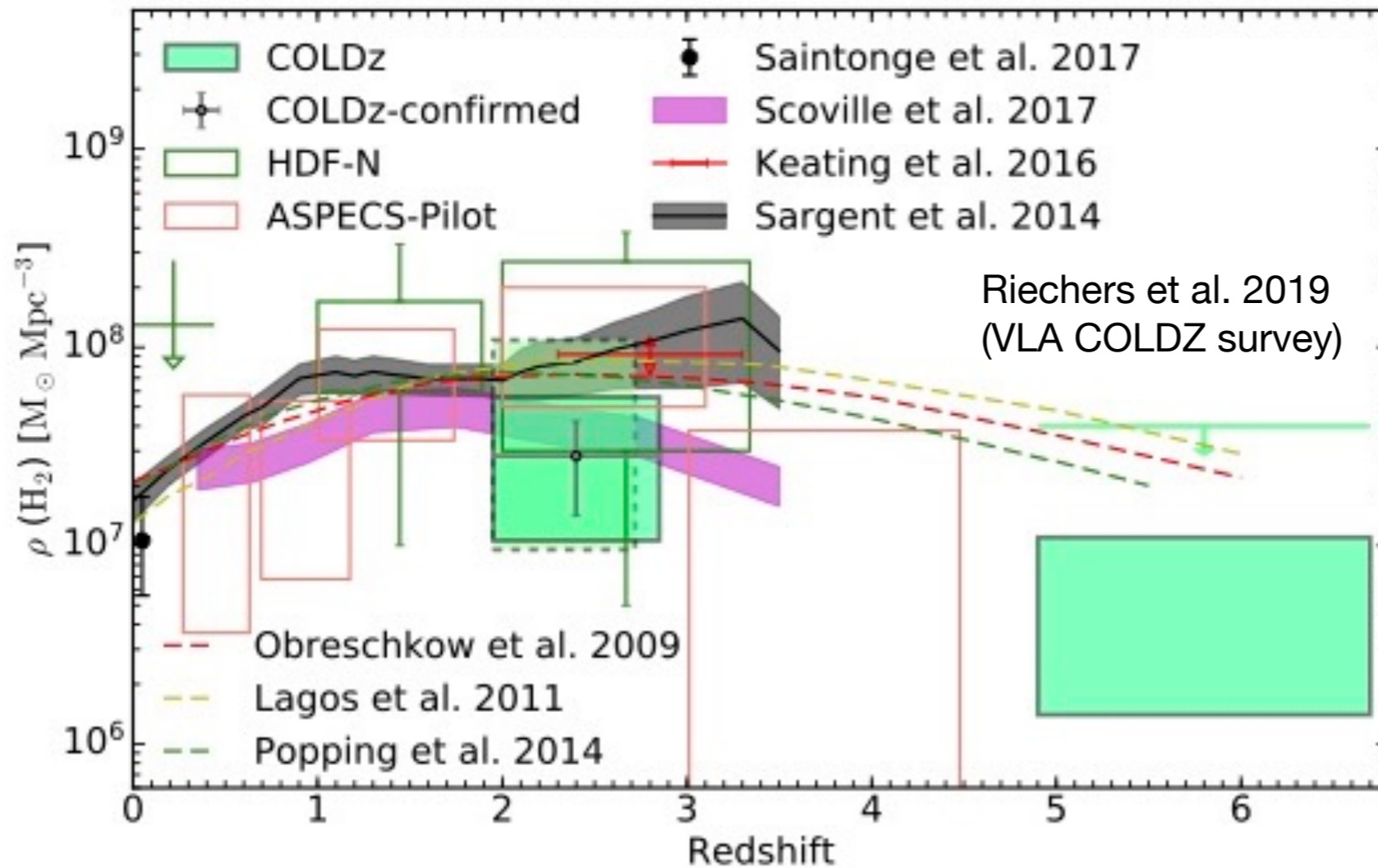


- ダストに埋もれて、かつ、活動的な現象が効率よく発見される。
- 若いphaseのAGN、爆発的星形成活動の現場、...

THz - submmの重要性

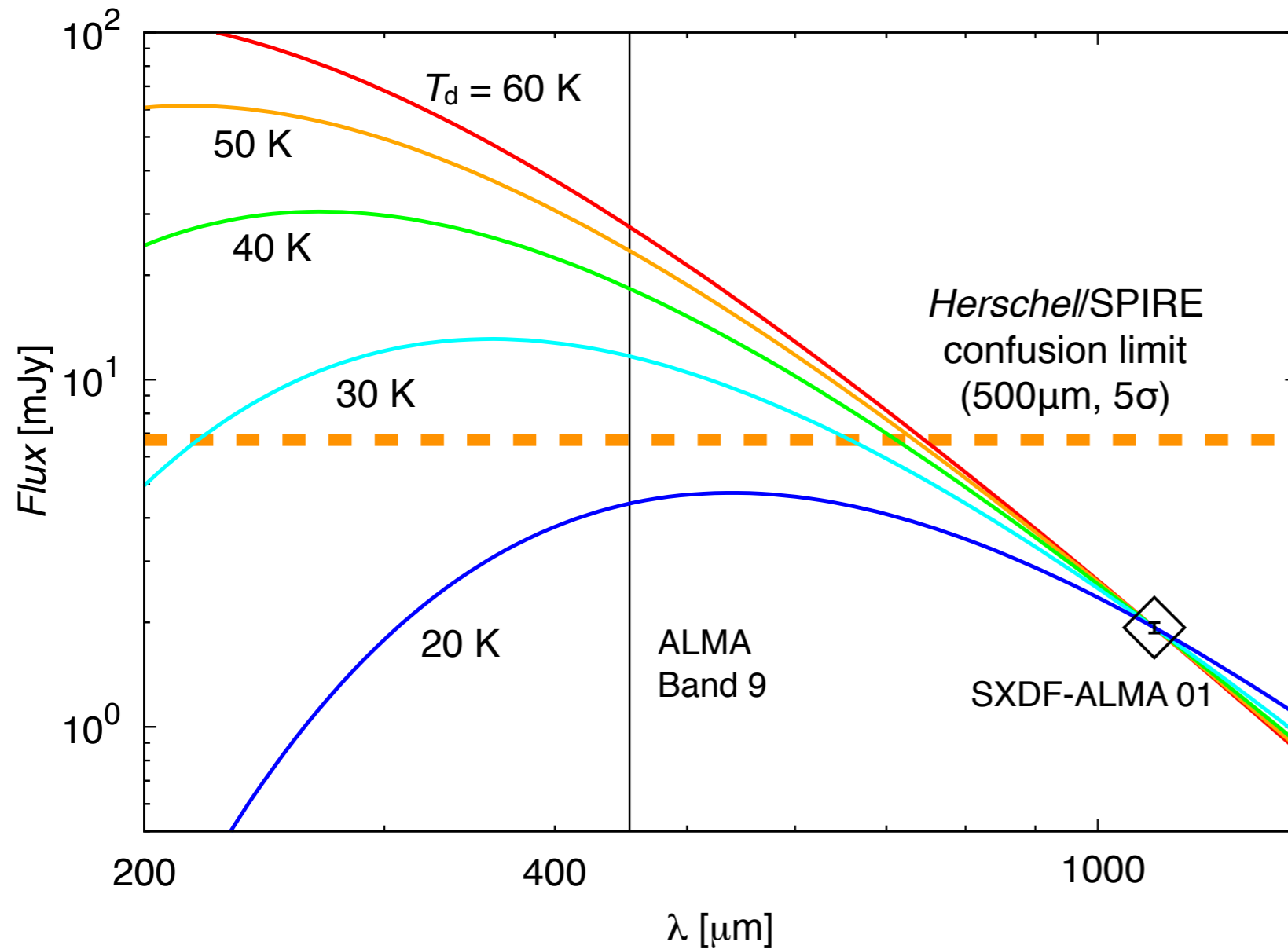


- Cold dust SEDのpeakやRJ tail側を、まんべんないredshift範囲で抑えることはダスト質量・温度の制限、ISM進化の理解において重要。



- SFR(D)の赤方偏移進化を、ガス量の観点から理解したい。
→ ダスト連続波、CO・[CI] 輝線等を用いた広域サーベイ??

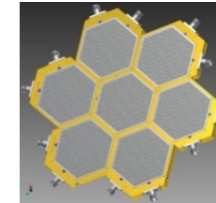
とあるSMGのSED例 (真喜屋さん作)



- 高周波数帯は南極の方が大気条件が有利。
→ PWV \sim 0.2mm (!?; アタカマのbest値)
- **Herschelのconfusion limit以下なことが重要!**
- 高周波観測で T_{dust} に制限をつけることが可能
→ より正確なダスト量の推定へ。

連続波電波カメラ(NKID)(案)

$$\text{NEP} = 6 \times 10^{-18} \text{ W Hz}^{-1/2} \rightarrow T_{\text{RX}} = 1.5 \text{ K for } B=40\text{GHz}$$

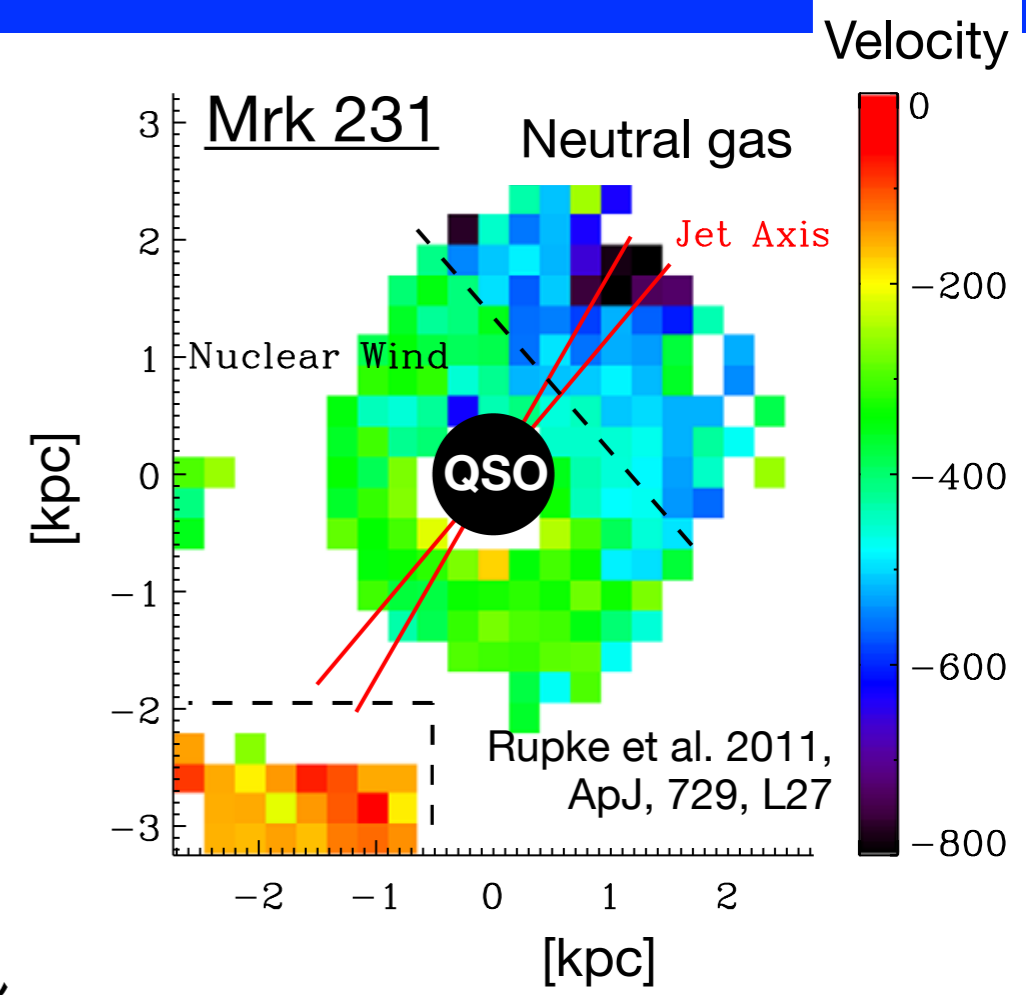
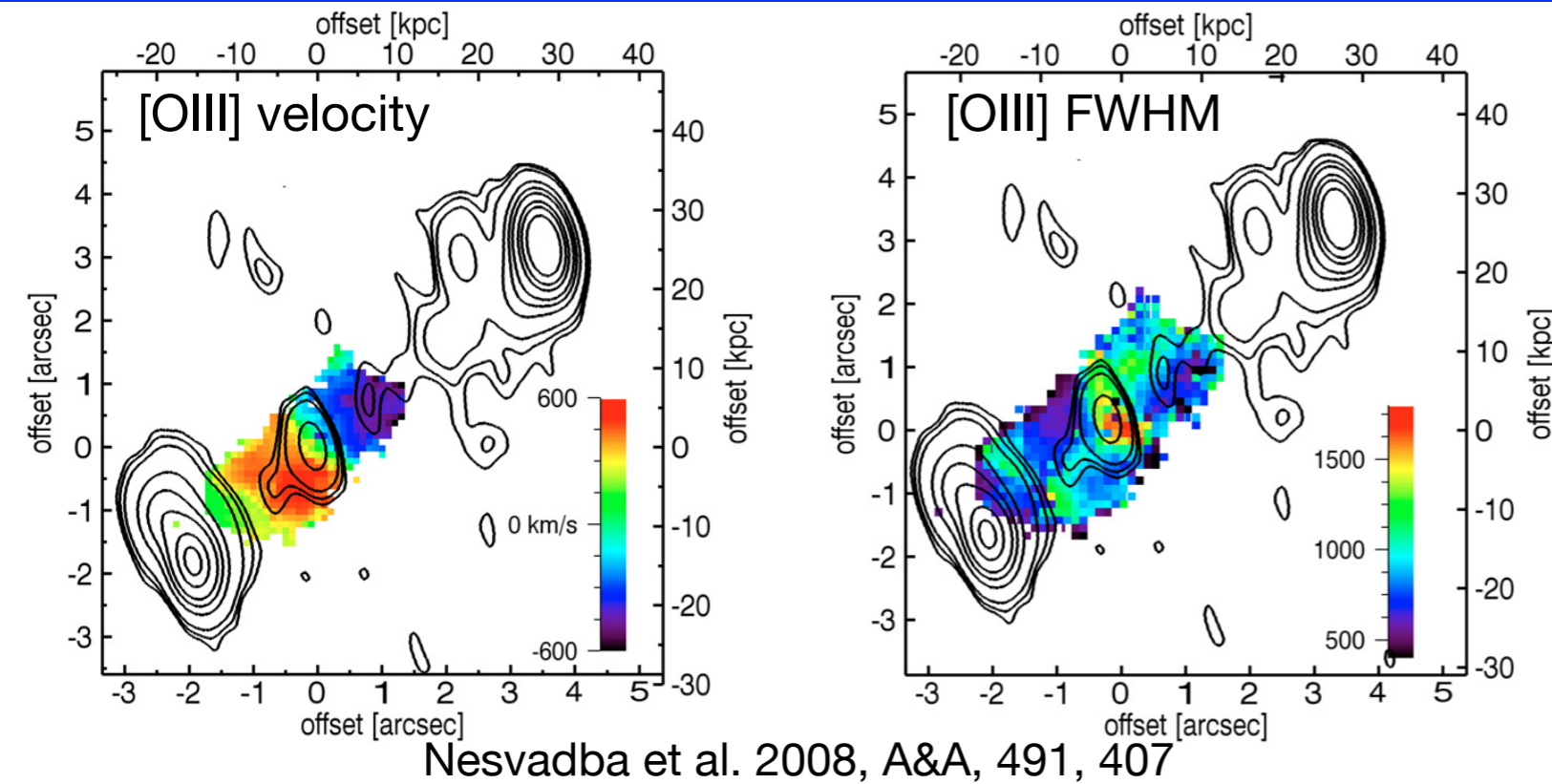


周波数帯 GHz	感 度 (5σrms) (τ=積分時間)				角分 解能	素子数 N	Mapping speed [deg ² hr ⁻¹ mJy ⁻²]		
	τ=60 sec	1 hour	10 hours	Confu sion					
ポ ー ト 1	230	0.67 mJy	0.087 mJy	0.027 mJy	0.19 mJy	11"	4000 × 2	128 × 2	レンズ
	400	1.12	0.15	0.046	0.22	6.2"	6300 × 2	22 × 2	レンズ
	650	1.68	0.22	0.069	0.052	3.8"	16600 × 3	9.8 × 3	レンズ
ポ ー ト 2	850	2.45	0.32	0.10	0.011	2.9"	27000 × 2	4.4 × 2	レンズ
	1300	13.6	1.76	0.48	0.00035	1.9"	10800 × 2	0.024 × 2	ホーン
	1500	46.4	6.00	1.89	0.00009	1.7"	14400 × 3	0.0022 × 3	ホーン

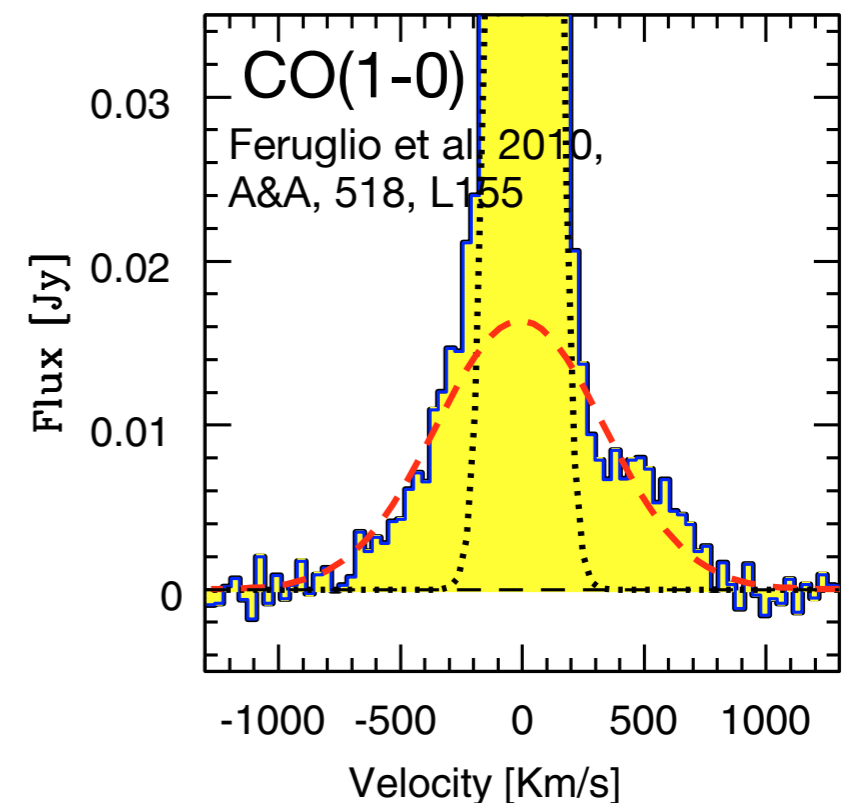
$$\text{Mapping speed (MS)} = \frac{N\Omega}{NEFD^2}$$

Total 7.2万素子+11.9万素子

- 基本的に高周波はconfusion limitの影響なし。10h積分で、sub-mJy source@submmのdust放射peak (数百μm) は十分おさえられるだろう。
- (サブミリ波帯がconfusion limitに達しがちなのは気になるところ)
- [CI]輝線の話はこの後の保田さんtalk参照。

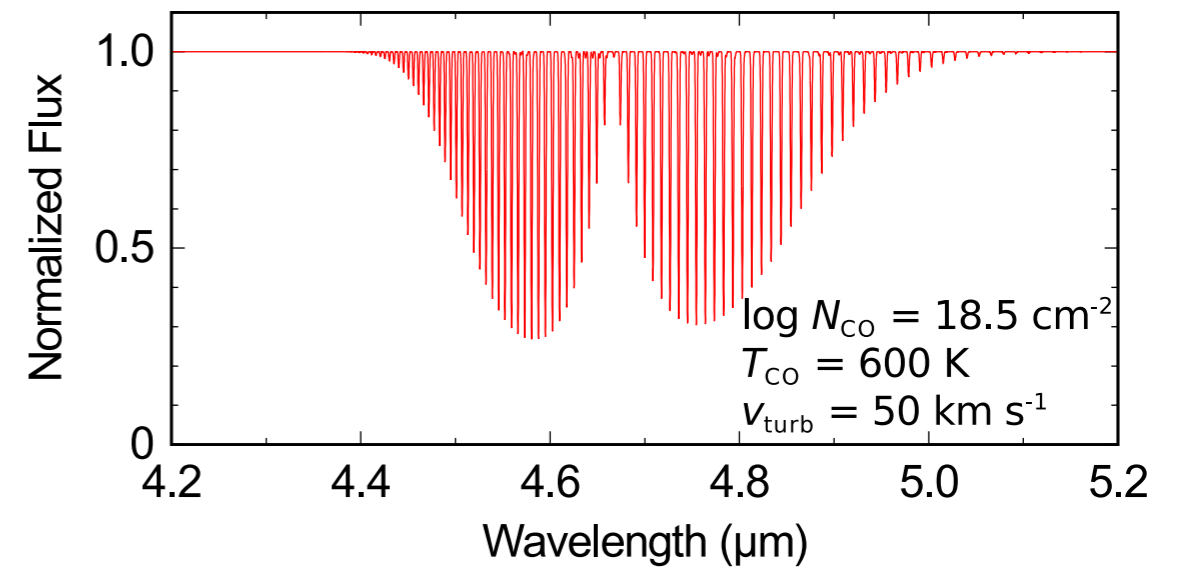
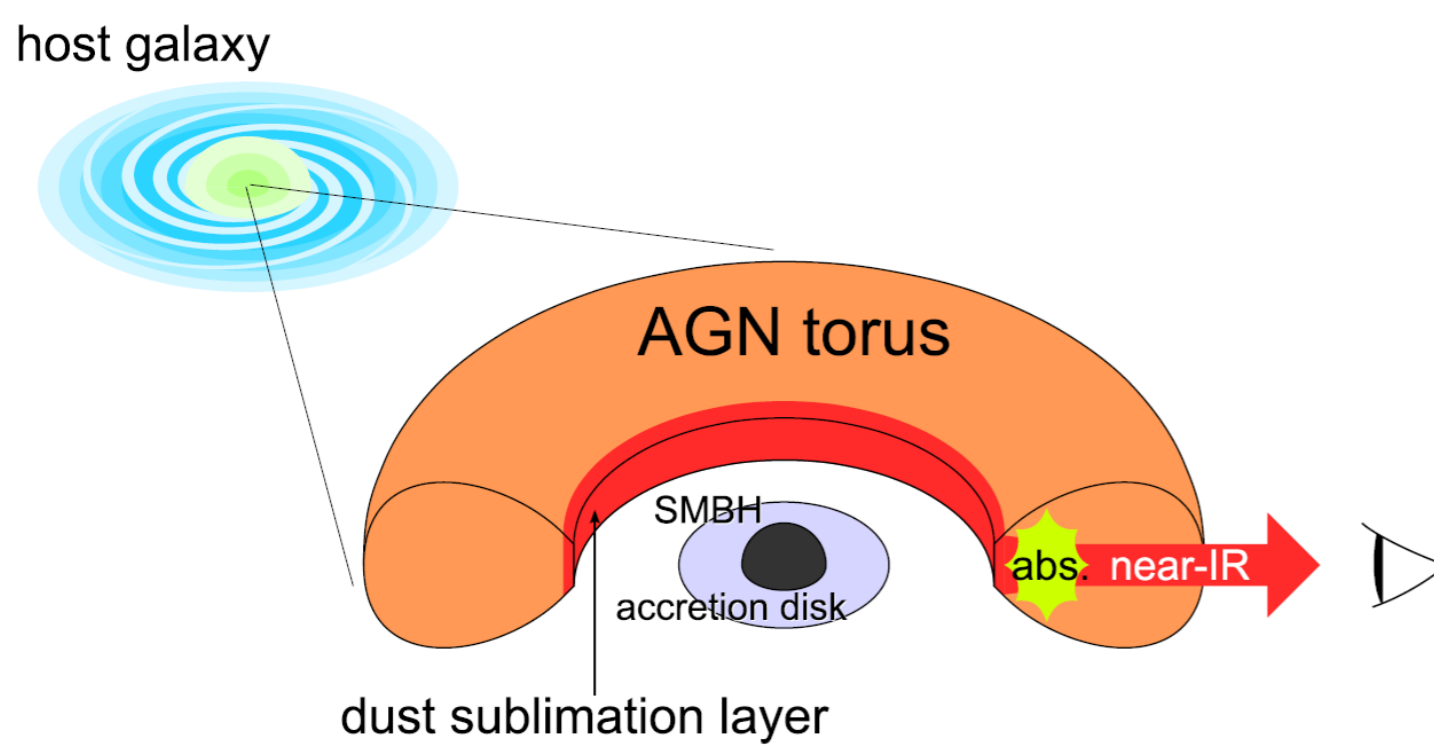
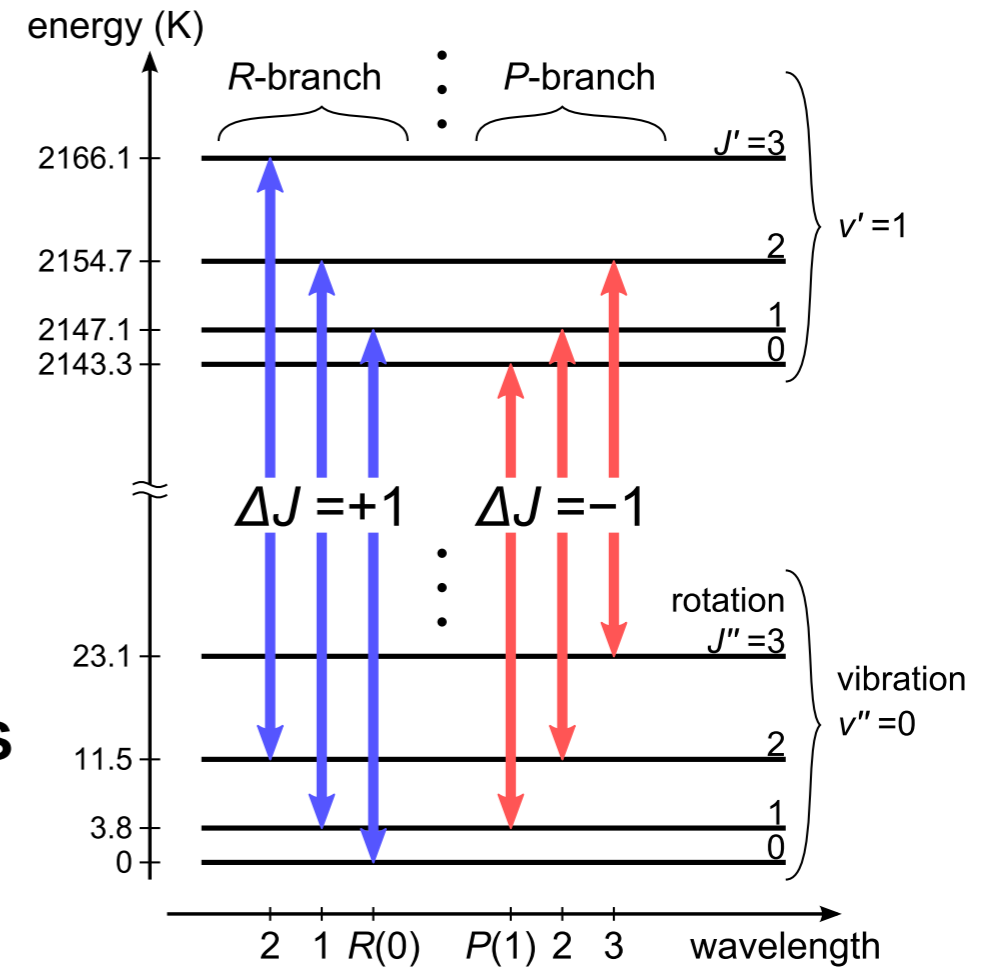


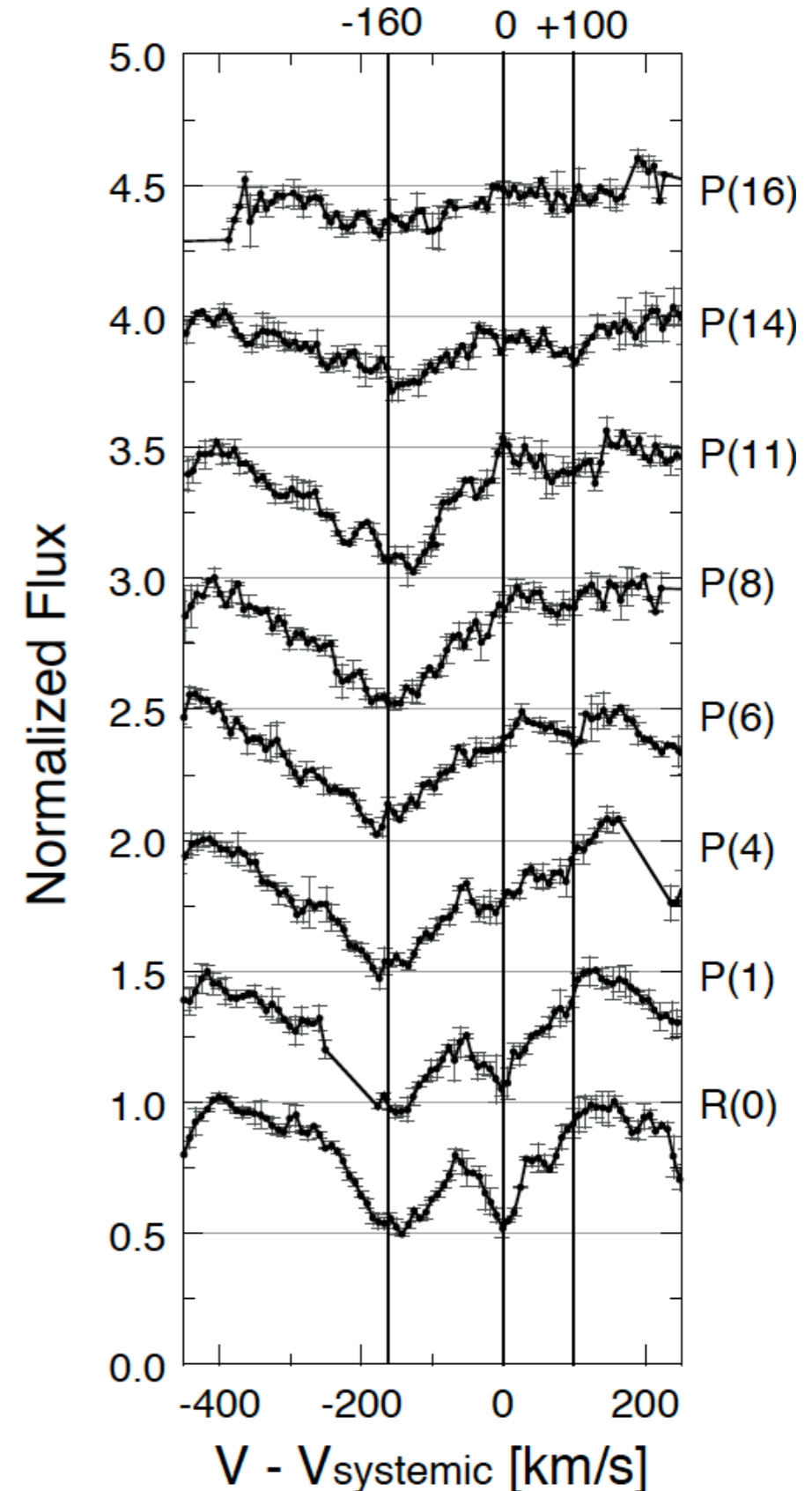
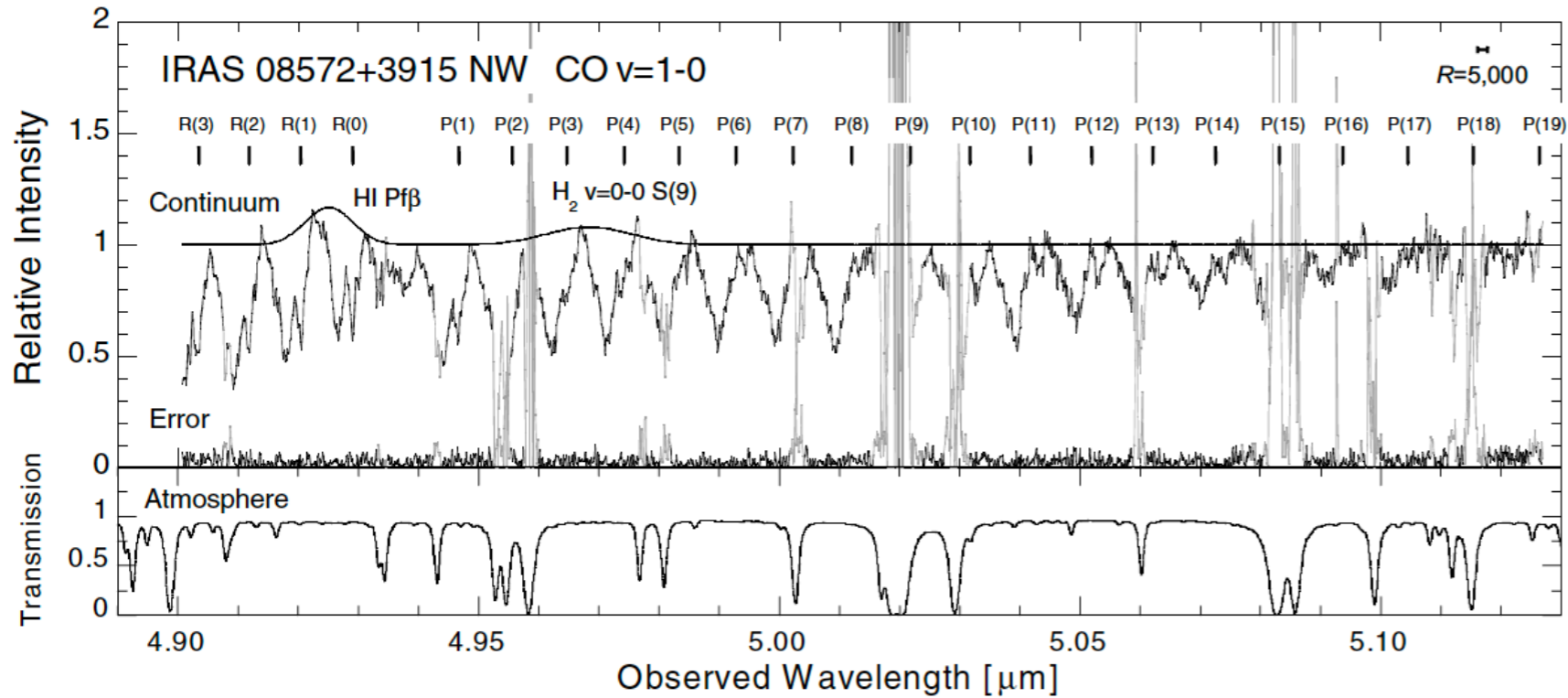
- AGN駆動された高速outflowは頻繁に観測されている。銀河を超える広がり。(see for a recent review in King & Pounds 2015, ARA&A, 53, 115)
- Molecular outflowsも多数発見されてきている。各種outflowのうち、質量の大部分を担い、星形成の抑制に寄与。(e.g., Feruglio et al. 2010, A&A, 518, L155, Cicone et al. 2014, A&A, 562, 21)



馬場くん@天文台's slide

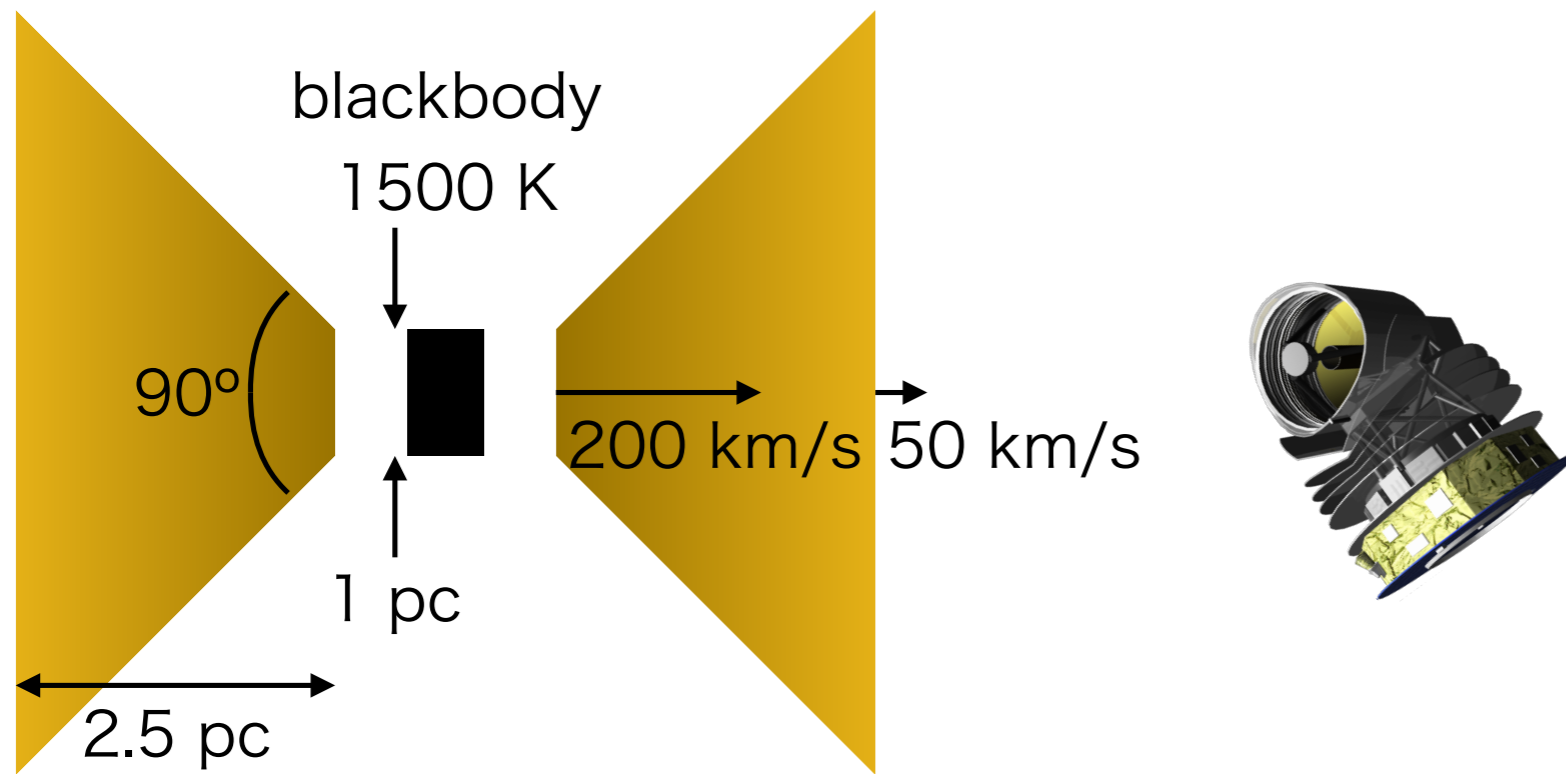
- vibration: $v=1-0$
- rotation: $\Delta J=\pm 1$
- simultaneous observation of multiple J
- basically observed in **absorption**
- **can effectively probe the vicinity of AGNs**





- CO振動回転遷移線の高速分解能観測は、すでに近傍ULIRGに対してSubaruで実例あり (Shirahata et al. 2013)。
- 多遷移輝線解析から、温度・体積密度・柱密度の制限が可能。

SPICAで調べるAGN outflow (中心核編)



馬場くん@天文台's slide

$$v = 200 \rightarrow 50 \text{ km s}^{-1}$$

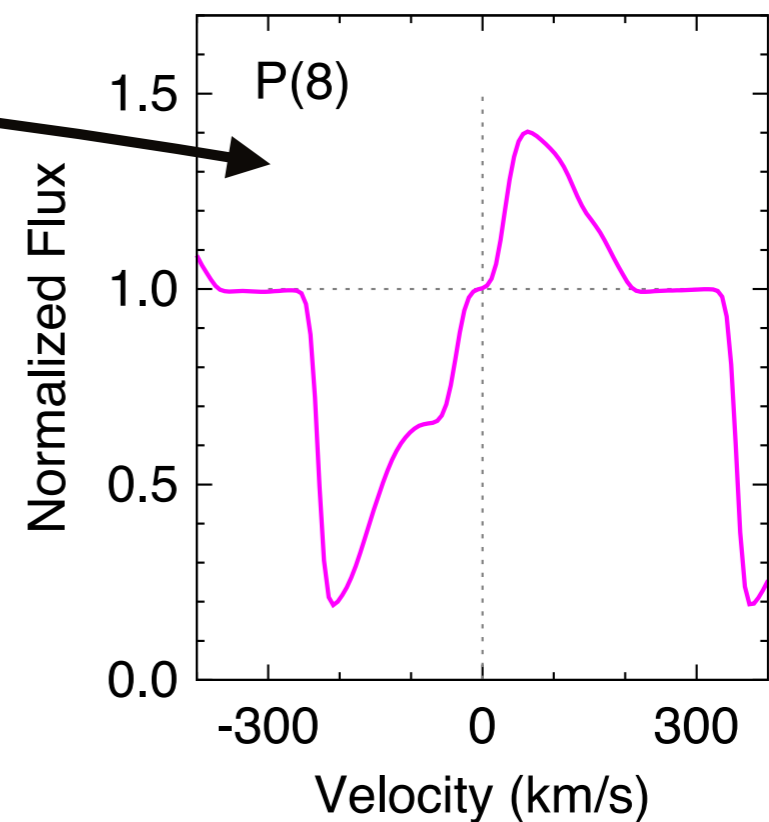
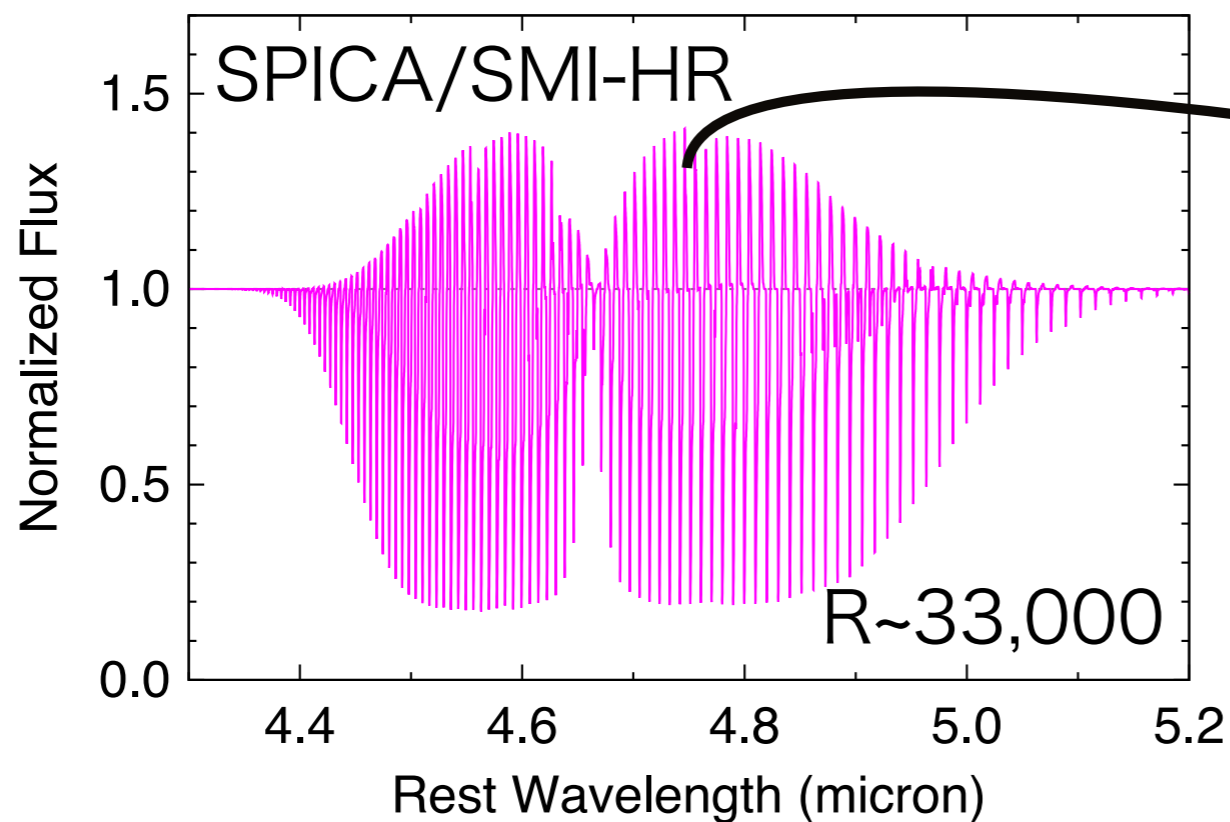
$$T = 800 \rightarrow 600 \text{ K}$$

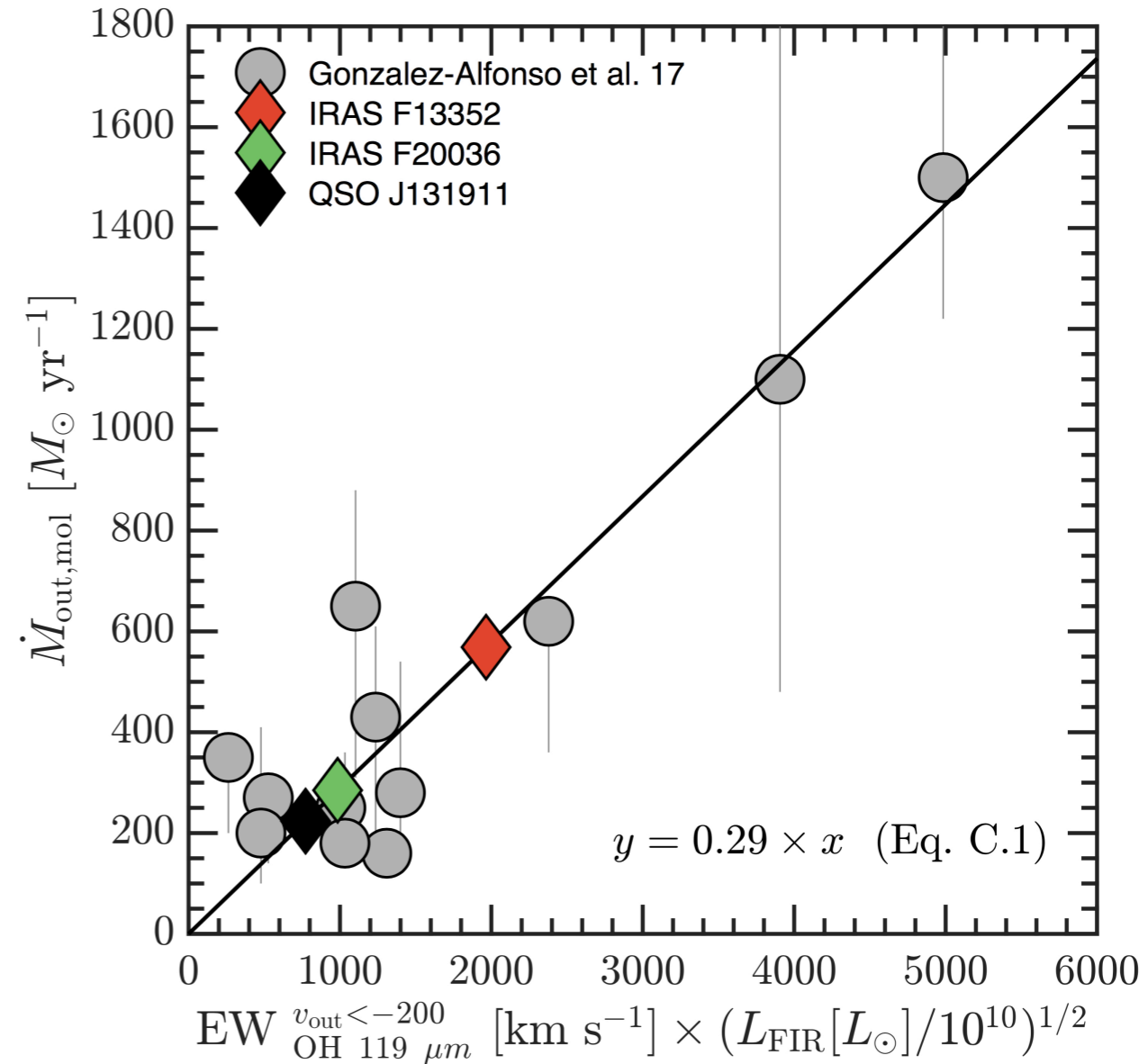
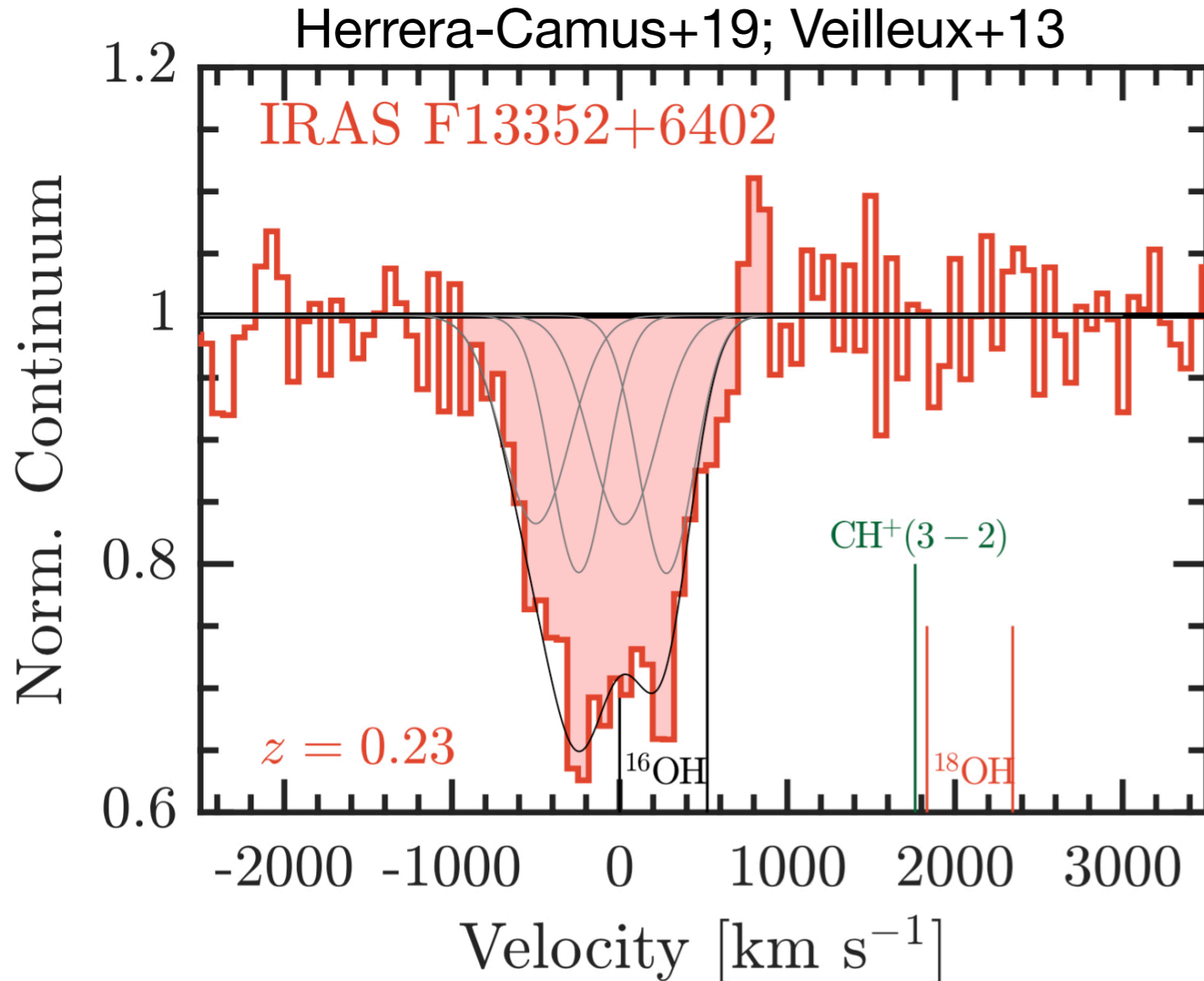
$$n_{\text{H}}(\text{initial}) = 1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

$$nr^2v = \text{const.}$$

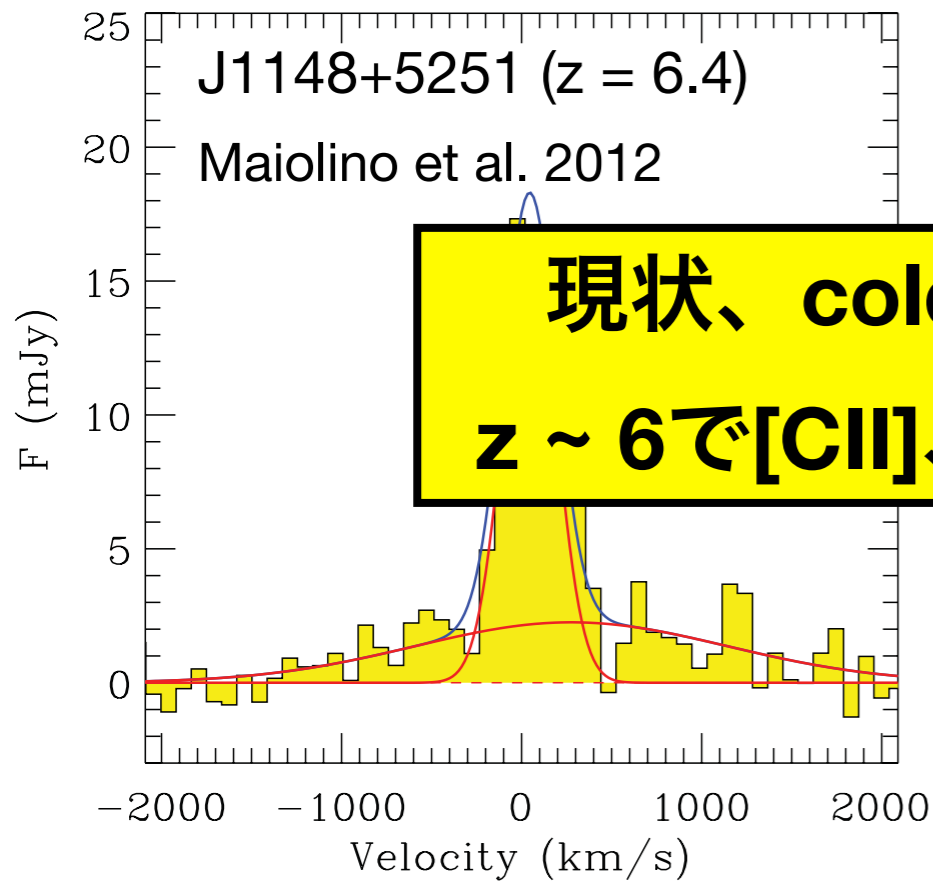
$$[\text{CO}]/[\text{H}] = 10^{-5}$$

$$\dot{M}_{\text{OF}} \sim 30 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$



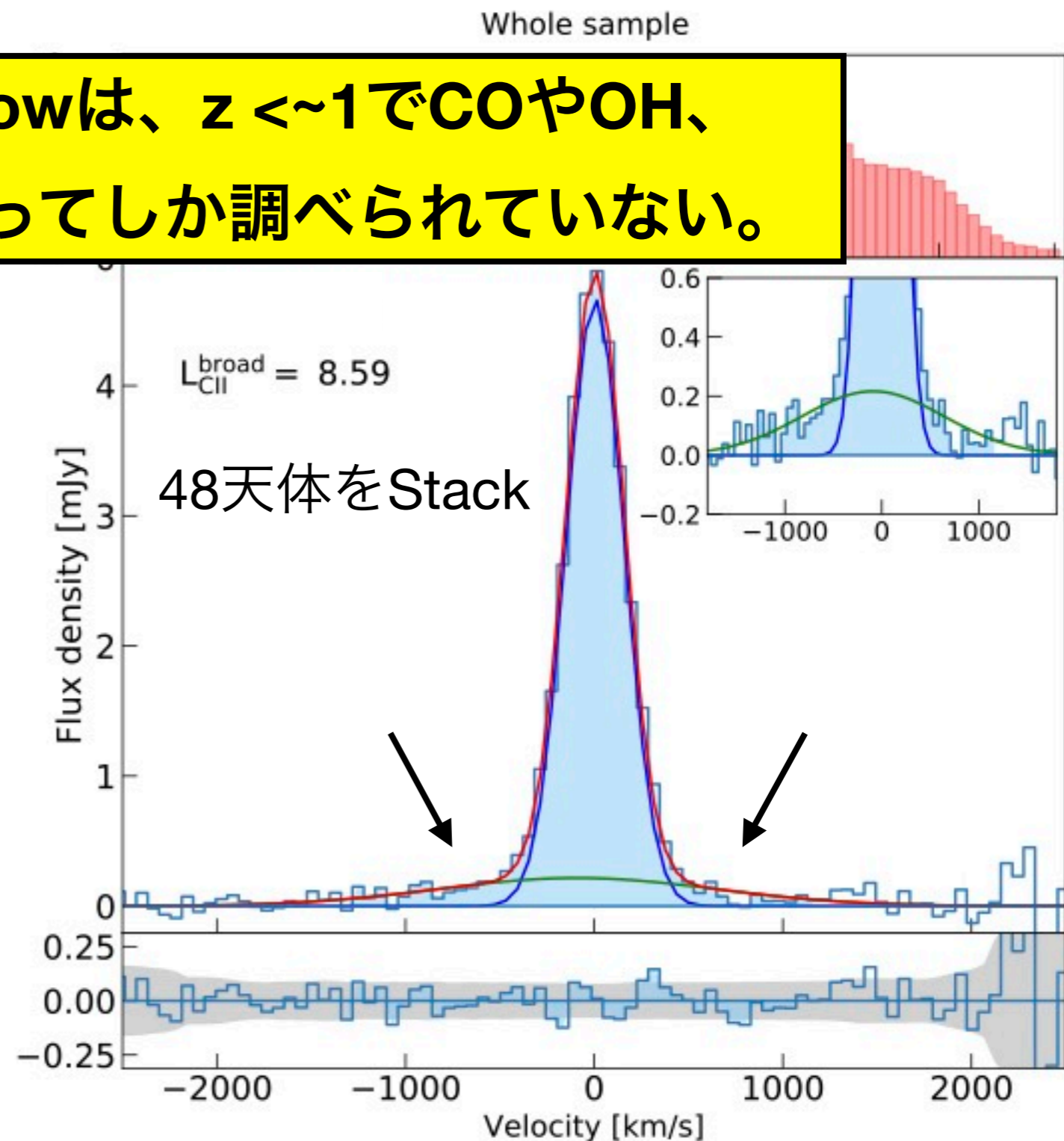


- 基本的にはOH absorptionを使って、blueshift成分をfitし、outflowに言及。
- OH 119 μm がメイン。その他、65, 79, 84, 119 μm (more is better!)
- SPICA/SAFARIの波長範囲 (~230 μm)の制限 → $z \sim 1$ くらいまで観測可能。



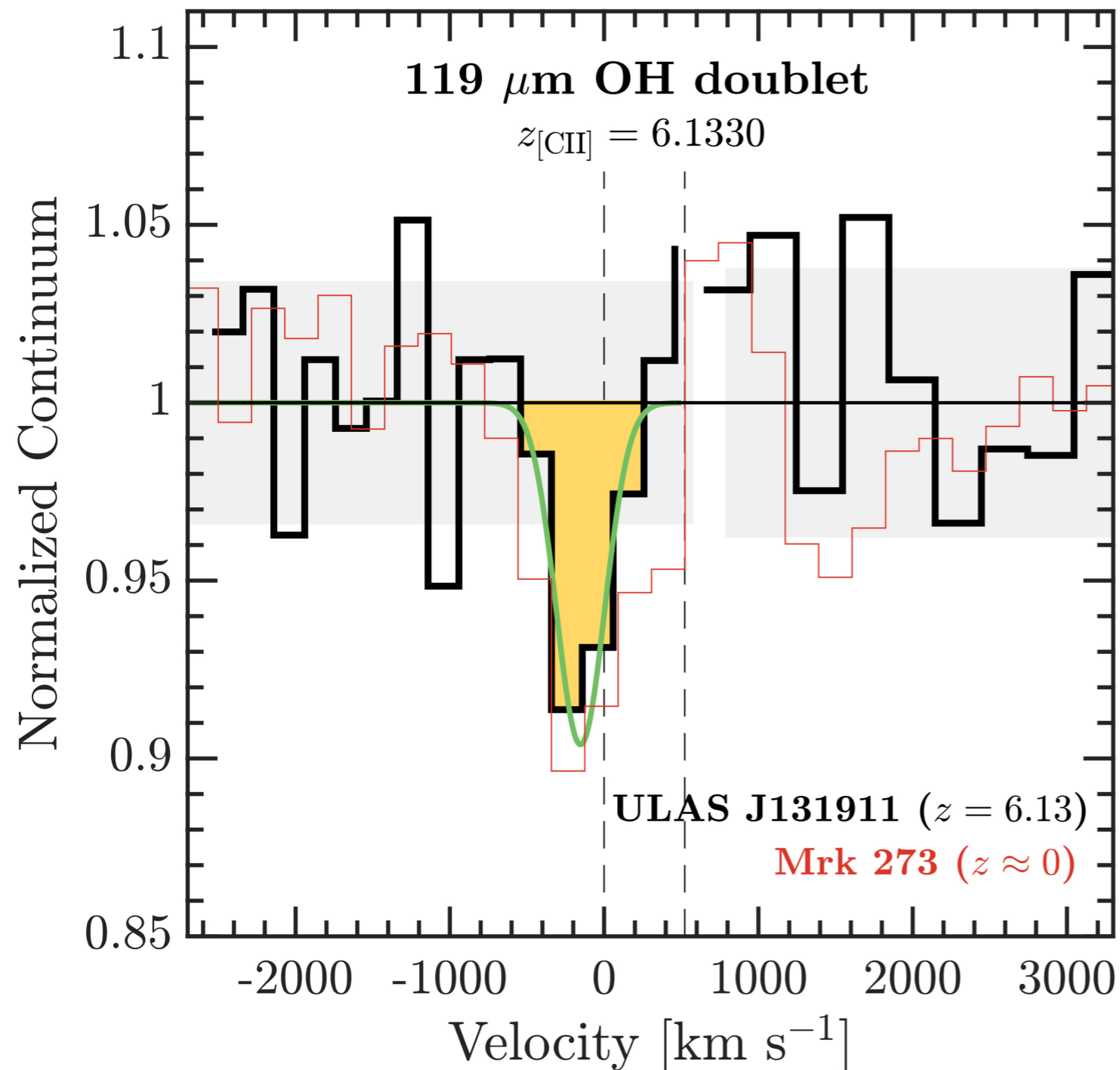
現状、cold outflowは、 $z < \sim 1$ でCOやOH、 $z \sim 6$ で[CII]、を使ってしか調べられていない。

Bischetti et al. 2018



- [CII] outflow@J1148+5251
- $M_{\text{out}} > 3500 M_{\text{sun}}/\text{yr}$
- 実は $z > 6$ QSOでは[CII] outflowの個別検出はこれしかない。
- [CII] stacking解析の結果、かなり低いoutflow rateが平均的描像。
→ $\sim 100 M_{\text{sun}}/\text{yr}$ (Bischetti+18)

Herrera-Camus et al. 2019



- $z = 6.13$ QSOでのtentative detection (ALMA Band 7)
- 吸収線なので、背景光源が明るければfeasible... ?
- $z > 1$ の宇宙で、「OH absorption \rightarrow outflowの定量化」の流れを確立する。
 $\rightarrow z = 1 - 3$ のcosmic noonがちょうど観測できる。

- ダストに埋もれた宇宙の活動性を理解するため、従来の同波長帯装置を凌駕する圧倒的感度をもつSPICA計画が進行中。
- 多くの若手を中心に、サイエンス検討会も発足（天文学会企画セッション）。研究者向けdocumentの編纂に向けて活動中。
- SPICA自身が作るdeep fieldで、大量のdusty galaxyが発見される。ただし、それらのcold componentはやはりTHz - submmで抑えるべき。
→ ISM量の定量評価。ISM進化と紐づけたSFRD進化の理解。
- AGN-drivenのアウトフローもSPICAで中心核から母銀河に至るまで観測可能。...ただし！赤方偏移の範囲が狭めな気がする。
- THz - submm観測では、OH吸収線の高感度観測を広い赤方偏移範囲で実施。最も活動性が高くなる $z = 1 - 3$ でのcold outflowの定量評価を確立。