

遠赤外線-テラヘルツ波 での近傍銀河サイエンス

江草芙実 (東京大学)

SPICAサイエンス検討会「近傍銀河・銀河系」班

Outline

- SPICAでの検討活動の概要
 - SPICA white papers in PASA
 - SPICAサイエンス検討会（報告書、月報記事）
- SPICAと南極望遠鏡の比較
- 南極望遠鏡での実現可能性について

“Exploring Astronomical Evolution with SPICA”

- 10 articles in the collection
- 5 of them have “galaxy” (or “galaxies”) in their titles
 - “SPICA and the Chemical Evolution of Galaxies: The Rise of Metals and Dust” Fernández-Ontiveros+17
 - “Feedback and Feeding in the Context of Galaxy Evolution with SPICA: Direct Characterisation of Molecular Outflows and Inflows” González-Alfonso+17
 - “Galaxy Evolution Studies with the SPace IR Telescope for Cosmology and Astrophysics (SPICA): The Power of IR Spectroscopy” Spinoglio+17
 - “Unbiased Large Spectroscopic Surveys of Galaxies Selected by SPICA Using Dust Bands” Kaneda+17
 - “Probing the Baryon Cycle of Galaxies with SPICA Mid- and Far-Infrared Observations” van der Tak+18

<https://www.cambridge.org/core/journals/publications-of-the-astronomical-society-of-australia/collections/exploring-astronomical-evolution-with-spica>

天文月報「SPICA特集」



• 2020年11月号&12月号

- 「巻頭言 SPICAが切り拓くサイエンス」長尾透・尾中敬
- 「次世代赤外線天文衛星SPICAの概要」山村一誠・金田英宏・尾中敬
- 「SPICAが革新する銀河・ブラックホール進化サイエンス」泉拓磨
- 「SPICAで見る近傍銀河と銀河系」江草芙実 ほか
- 「SPICAで探る星形成・星間媒質」井上剛志 ほか
- 「SPICAで探る惑星形成過程の物質進化」本田充彦 ほか
- 「SPICAが切り拓くサイエンス：「太陽系・系外惑星」」平野照幸 ほか

<https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/2020/entry629.html>

<https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/2020/entry639.html>

サイエンス検討会 「近傍銀河・銀河系」班

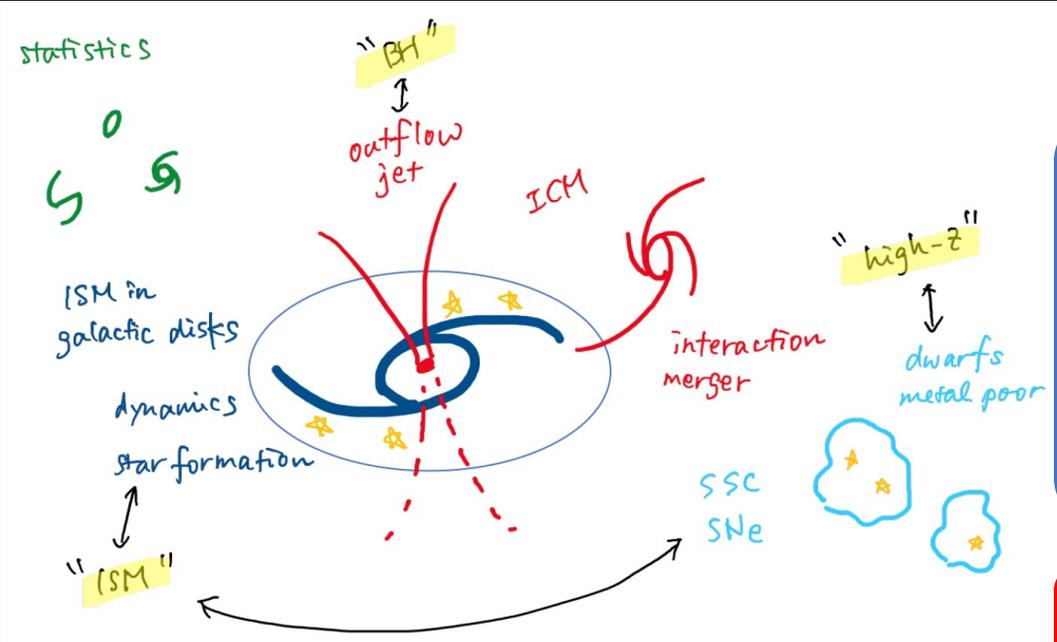
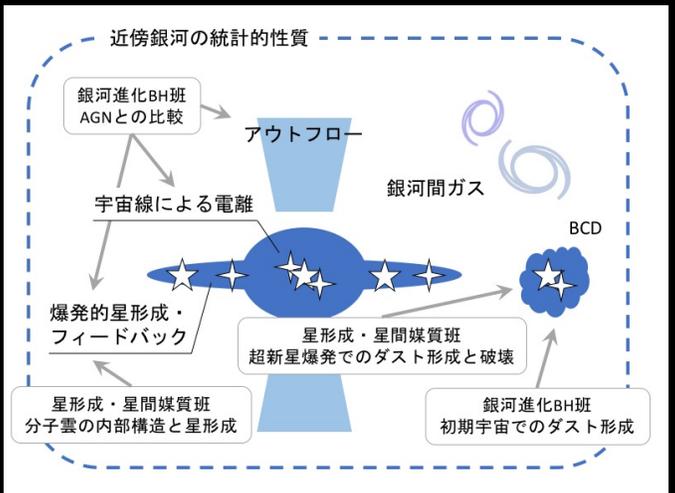


表 4.1 「近傍銀河・銀河系」班での検討項目一覧

テーマ	対象天体	空間分解能	分光対象輝線 or 波長帯域	波長分解能	撮像波長 帯域	目標感度	観測時間	担当
星形成フィードバック	近傍 ($D \lesssim 10$ Mpc) 渦巻銀河	1) ~ 1 kpc (23")						
		2) ~ 200 pc (5")						
宇宙線による分子雲の電離	近傍銀河の中心核	~ 100 pc						
星形成主系列銀河の進化過程に直結する星間ガスとダストの物理化学状態	高光度赤外線	$\lesssim 1$ kpc						
銀河面外の温かい分子ガス	銀河群、銀河団	$\lesssim 1$ kpc						
活動銀河の偏光観測	近傍活動銀河	150 pc \sim						
赤外線銀河進化	近傍赤外線銀河	~ 100 pc						
低金属量銀河	(1) 系内、LMC、超近傍銀河内の超新星、WR、LBV; (2) 近傍 Blue Compact Dwarf 銀河	2-4"						

4.1.1 班員構成、担当

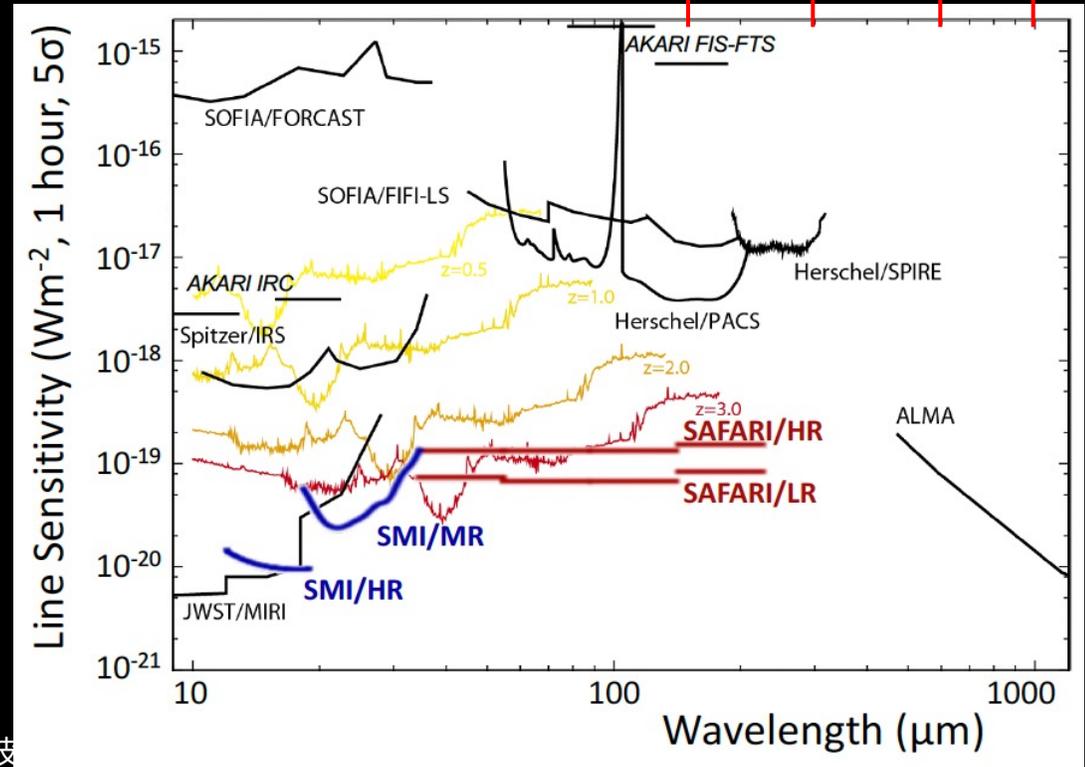
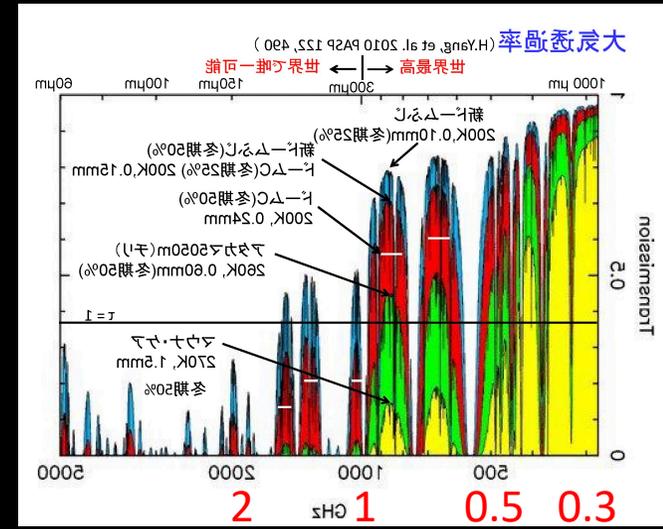
氏名	所属
江草 芙実	東京大学
馬場 淳一	国立天文台
渡邊 祥正	芝浦工業大学
稲見 華恵	広島大学
金子 紘之	上越教育大学/国立天文台
本原 顕太郎	国立天文台
中西 康一郎	国立天文台
竹内 努	名古屋大学
左近 樹	東京大学
田村 陽一	名古屋大学



https://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/SPICA_HP/suishin/docs/SPICA_final_report_20201201.pdf

SPICAと南極望遠鏡

- 南極で観測可能な帯域と、SPICAで検討されていた帯域の重複は少ない！
- SPICAでの検討項目に加えて...
 - Herschel/SPIREでの結果や
 - 遠方銀河を含むALMAでの結果
 - との比較が重要になるかも？
 - (輝線だけでなく連続波のサイエンスも??)



SPICAと南極望遠鏡

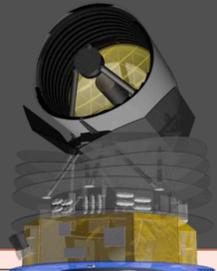
SPICA/SAFARI Fact Sheet

SAFARI Overview

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

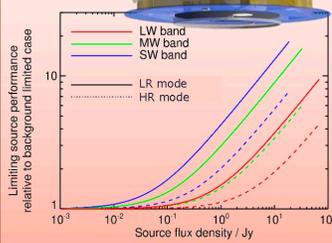
SPICA Mission

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

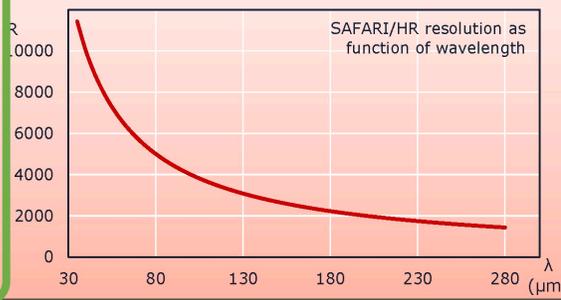


Parameter	Waveband				
	SW	MW	LW	LLW	
Band centre / μm	45	72	115	185	
Wavelength range / μm	34-56	54-89	87-140	140-230	
Band centre beam FWHM	4.5"	7.2"	12"	19"	
Point source spectroscopy (5σ-1hr)					
LR	Limiting flux / $\times 10^{-20} \text{Wm}^{-2}$	7.2	6.6	6.6	8.2
	Limiting flux density / mJy	0.31	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 (5 σ)	15 μJy	200 μJy	2 mJy	10 mJy	

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).



SAFARI/HR resolution as function of wavelength.



Sensitivities based on detector NEP $2 \times 10^{-19} \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$
* Mapping performance is for a reference area of 1 arcmin²

SAFARI GS Factsheet V1.0 - 30th September 2016

ATT12 スペクトル線観測 感度(1)

Trx=4*quantum noise (<1THz), 7* quantum noise (>1THz)
D=12m, PWV=0.14mm (winter 50%), rms=20 μm , $\Delta V=1 \text{ km/s}$ (100km/sのときは下の1/10)
1hr (10hr)=only on-source

Freq (GHz)	HPBW (")	η_A	Tsys (K)	Sensitivity (5rms)		
				ΔT (K)/1hr	ΔS (Jy)/1hr	ΔS (Jy)/10hr
230	26.9	0.674	68	0.0091	0.329	0.104
300	20.6	0.657	81	0.0095	0.354	0.112
350	17.7	0.642	99	0.0108	0.409	0.129
400	15.5	0.626	124	0.0126	0.493	0.156
460	13.4	0.603	167	0.0159	0.643	0.203
500	12.4	0.587	217	0.0198	0.824	0.261
650	9.5	0.521	257	0.0205	0.963	0.305
850	7.3	0.422	341	0.0239	1.382	0.437
1000	6.2	0.347	1608	0.1038	7.302	2.309
1300	4.8	0.306	1970	0.1115	8.896	2.813
1500	4.1	0.144	2428	0.1279	21.688	6.858
2000	3.1	0.06	8069	0.3682	149.822	47.378

SPICAと南極望遠鏡

	lambda [um]	frequency [GHz]	df [GHz]	dV [km/s]	PSF [arcsec]	sensitivity [Jy]
SAFARI/LLW (HR)	185	1620	0.749	140	19	67e-3
ATT12		1500		100	4.1	2.2
		1500		1	4.1	22

 x 30

面輝度の感度はSAFARIの方が高いが、
空間分解能と速度分解能はATT12の方が高い

淡く広がった構造より、明るく細かい構造を
見るのに向いている

サイエンス検討会 「近傍銀河・銀河系」 班

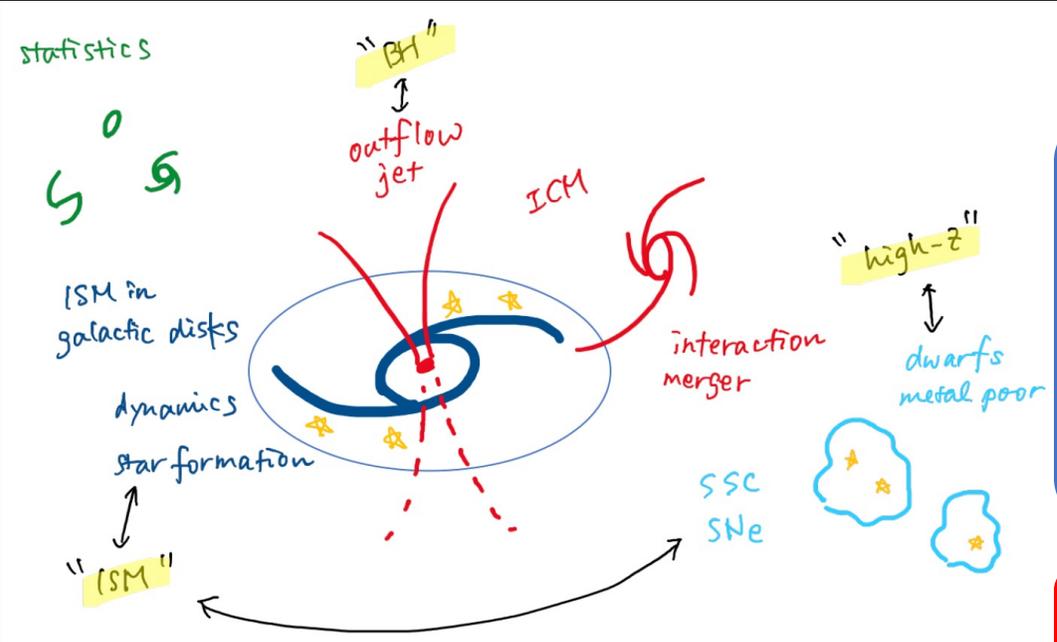
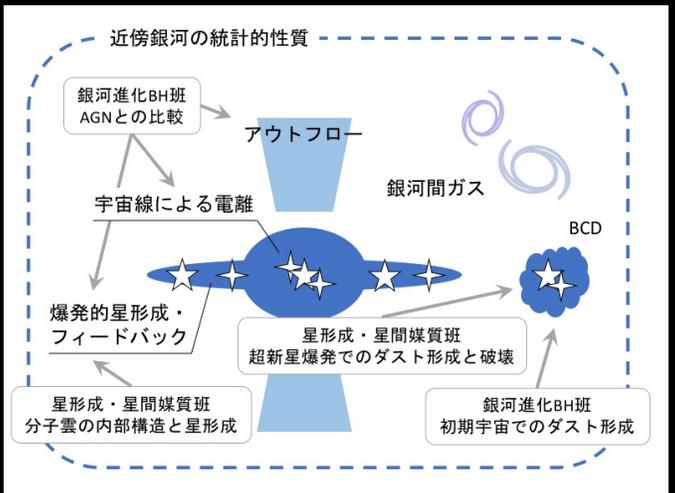


表 4.1 「近傍銀河・銀河系」班での検討項目一覧

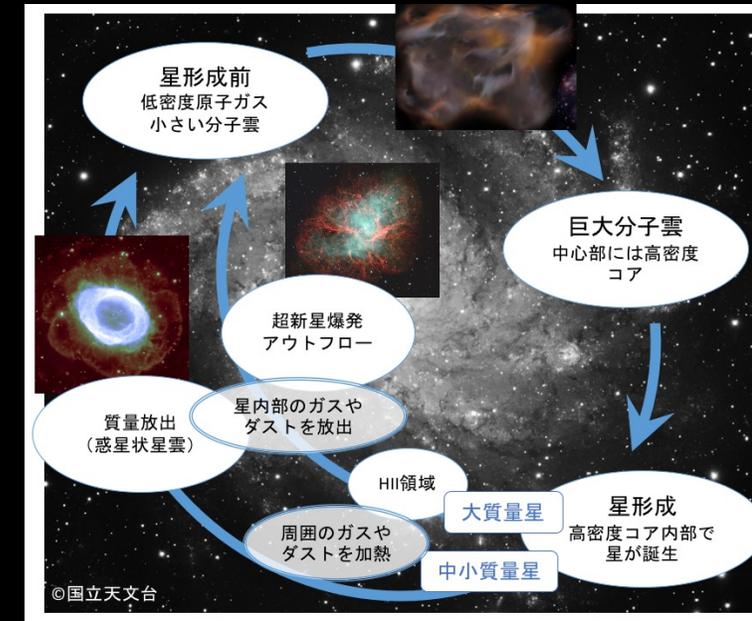
テーマ	対象天体	空間分解能	分光対象輝線 or 波長帯域	波長分解能	撮像波長帯域	目標感度	観測時間	担当
星形成フィードバック	近傍 ($D \lesssim 10$ Mpc) 渦巻銀河	1) ~ 1 kpc (23'')	18-230 μm	≥ 1000	NA	$\sim 1e-9$ [$\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$]	10' \times 10' を 12 時間 (SMI/MR) or 100 時間 (SAFARI)	江草馬場
		2) ~ 200 pc (5'')	18-50 μm				1' \times 1' を 20 分 (SMI/MR) or 25 時間 (SAFARI)	
宇宙線による分子雲の電離	近傍銀河の中心核	~ 100 pc	OH^+ , H_2O^+ , H_3O^+	≥ 2000	60-180 μm	~ 20 mJy	約 30 時間 (約 1 時間/天体 \times 30 天体程度, オンソース)	渡邊
星形成主系列銀河の進化過程に直結する星間ガスとダストの物理化学状態	高光度赤外線	$\lesssim 1$ kpc	PAH, [NeIII]16 μm , [NeII]13 μm , [OI]63 μm , [OIII]88 μm , [CII]158 μm	≥ 100 (PAH), ≥ 1000 (微細構造線)	N/A	$\sim 10^{-9}$ $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$	1' \times 1' のサーベイにつき MR: ~ 30 mins, SAFARI: ターゲット輝線次第で数時間から数 10 時間	稲見
銀河面外の温かい分子ガス	銀河群、銀河団	$\lesssim 1$ kpc	$\text{H}_2(0-0)$ 回転遷移	~ 100	18-36 μm	$1e-19$ [W/m^2]	10' \times 12' を 9 時間 (SMI/LR)	金子本原
活動銀河の偏光観測	近傍活動銀河	150 pc \sim	N/A	N/A	100 μm	0.03 MJy/sr	20' \times 20' を 1 時間 (オンソース)	中西
赤外線銀河進化	近傍赤外線銀河	~ 100 pc	(可能な全ての輝線)	N/A	N/A	N/A	N/A	竹内
低金属量銀河	(1) 系内、LMC、超近傍銀河内の超新星、WR、LBV; (2) 近傍 Blue Compact Dwarf 銀河	2-4''	18-60 μm	>600 (ダストフィーチャー部分は $R \sim 50$ 程度に de-grade)	18-200 μm	$1e-19$ [W/m^2] (18-36 μm), $5e-19$ [W/m^2] (36-60 μm)	(1) 超新星 10 個: 各 4h (SMI) + 4h (SAFARI) & WR, LBV 20 個: 各 4h (SMI) + 4h (SAFARI); (2) BCD 20 個: 各 4h (SMI) + 4h (SAFARI)	左近田村



https://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/SPICA_HP/suishin/docs/SPICA_final_report_20201201.pdf

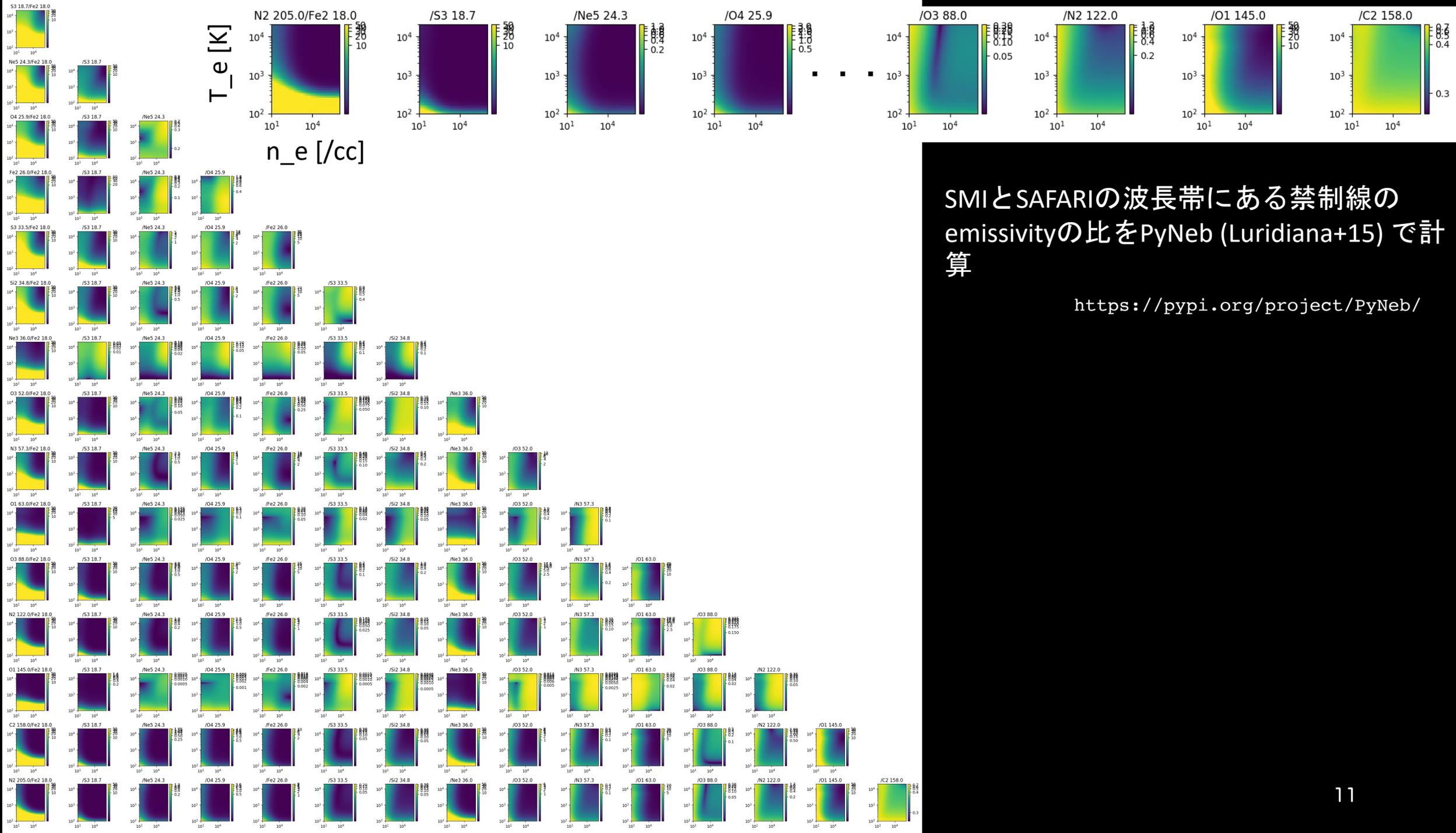
星形成フィードバック

- Question: 星形成フィードバックがISMに及ぼす影響は？
 - 星の材料である「低温ISM」ではなく、星形成フィードバックを受けた後の「暖かいISM」の状態を知りたい
- Target: 近傍渦巻銀河の円盤部
- Method:
 - 多輝線観測の輝線強度比から、ガスの物理状態を導出する
 - 星形成フィードバックの影響を受けていそうなガス（HII領域や若い星団、超新星残骸の周囲にあるガス）とそれ以外のガスの物理状態を比較する



“self-regulated star formation”

“diffuse ionized gas (DIG)”



SMIとSAFARIの波長帯にある禁制線の emissivityの比をPyNeb (Luridiana+15) で計算

<https://pypi.org/project/PyNeb/>

高光度赤外線銀河

- Question: LIRGでのISMの状態は？
 - LIRG as an analog of high-z SFMS
 - 空間的に分解して、高い星形成率をどう説明できるかを知りたい
- Target: 近傍LIRG
- Method:
 - 多輝線観測の輝線強度比から、ガスの物理状態を導出する
 - その空間分布を銀河進化モデルと比較する

宇宙線による分子雲の電離

- Question: 分子雲内部の電離度は？
- Target: 近傍のスターバースト銀河の中心部、AGN
- Method: OH^+ 、 H_2O^+ 、 H_3O^+ の吸収線測定

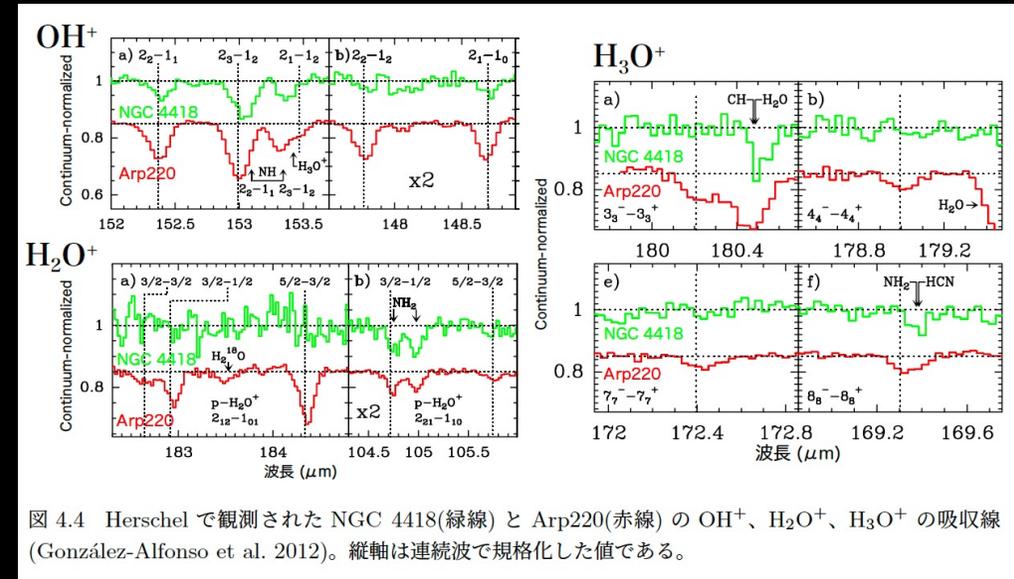


図 4.4 Herschel で観測された NGC 4418(緑線) と Arp220(赤線) の OH^+ 、 H_2O^+ 、 H_3O^+ の吸収線 (González-Alfonso et al. 2012)。縦軸は連続波で規格化した値である。

Spectral Lines

Name	lambda [um]	frequency [GHz]	SPICA topics	ATT sensitivity in log(L _{IR} [L _{sun}])
OH+	152	1972	CR電離	
[C II]	158	1897	ISM	11.4
OH	163	1839	(outflow?)	
H3O+	172	1743	CR電離	
H2O+	183	1638	CR電離	
CO(13--12)	200	1499	(AGN?)	13.6
[N II]	205	1462	ISM	11.2
CO(12--11)	217	1382	(AGN?)	12.8
[C I]	370	810	x	11.0

recombination lines?

CR電離

速度分解能上がるのは嬉しいが、感度的には厳しくなる？
吸収線観測なので、高空間分解能の恩恵は受けない

ISM

高分解能は重要な利点
「多輝線」が重要だったので、[C II] [N II] COだけではわかることが限られる（が、[C I]が増えるのは嬉しいかも）
対象天体としては、普通の渦巻銀河より LIRGの方が適している

大気の窓を通らない輝線もあるかも？

まとめ

- 「SPICAで検討されていたテーマをそのままATTに」というのは難しい
 - Herschel, SOFIA, ASTE, ALMA
 - 遠方銀河
 - 大気の窓に注意
- 連続波データを使ったサイエンスも
 - 偏光観測？

