

南極テラヘルツ望遠鏡計画

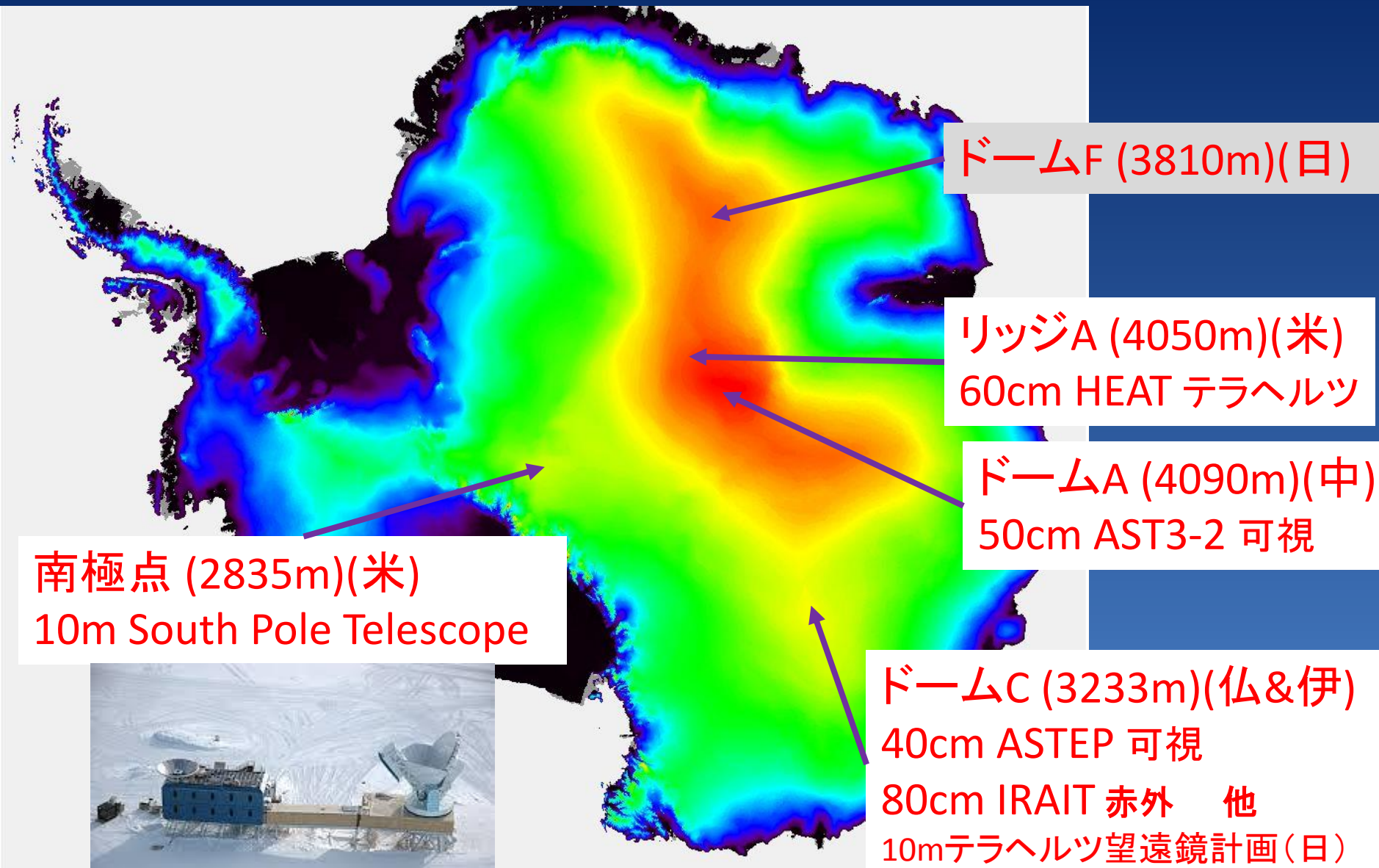
久野成夫(筑波大学)

南極天文コンソーシアム

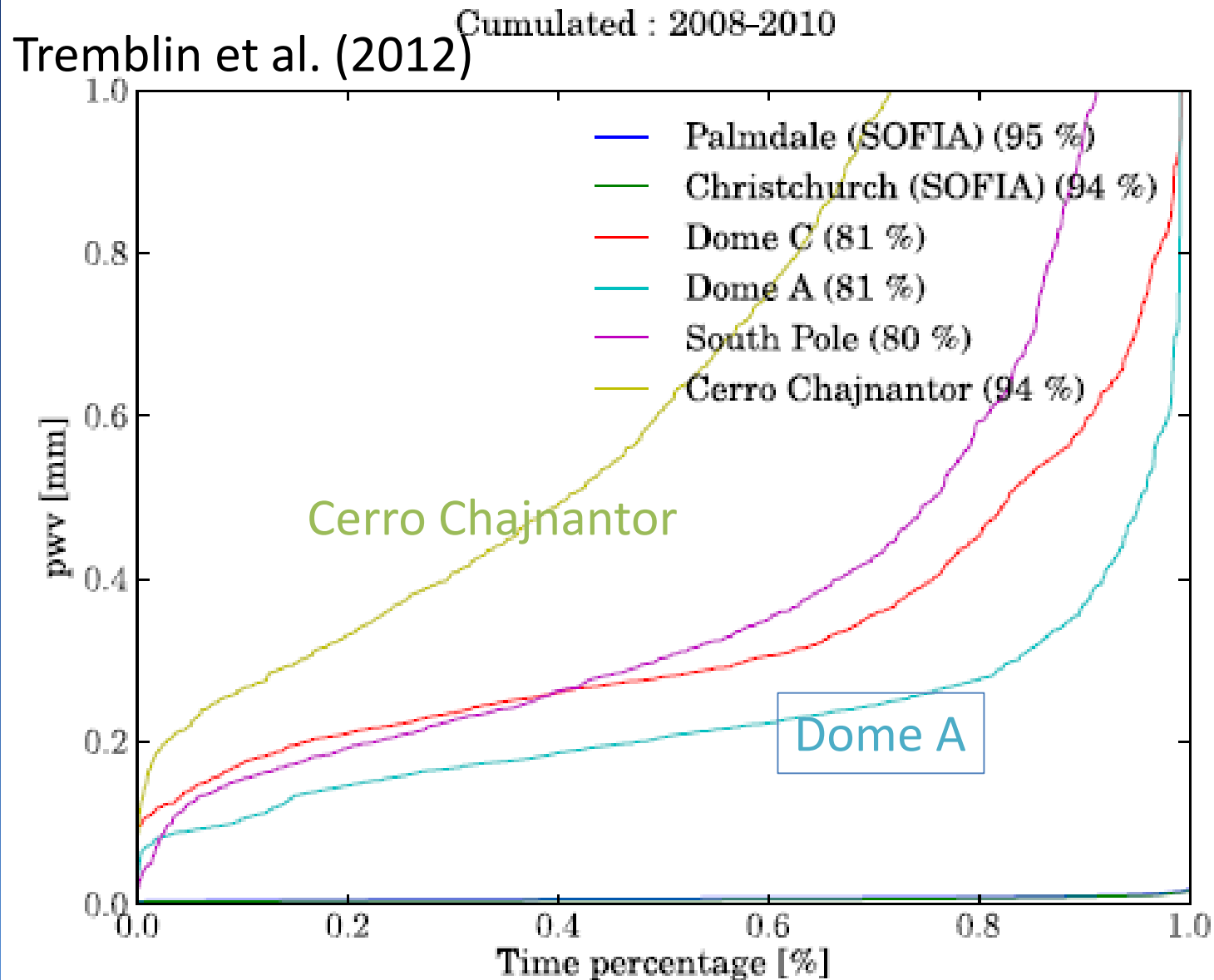
(1) 天文観測サイトとしての南極

(2) 南極30m級テラヘルツ望遠鏡計画

(1) 天文観測サイトとしての南極

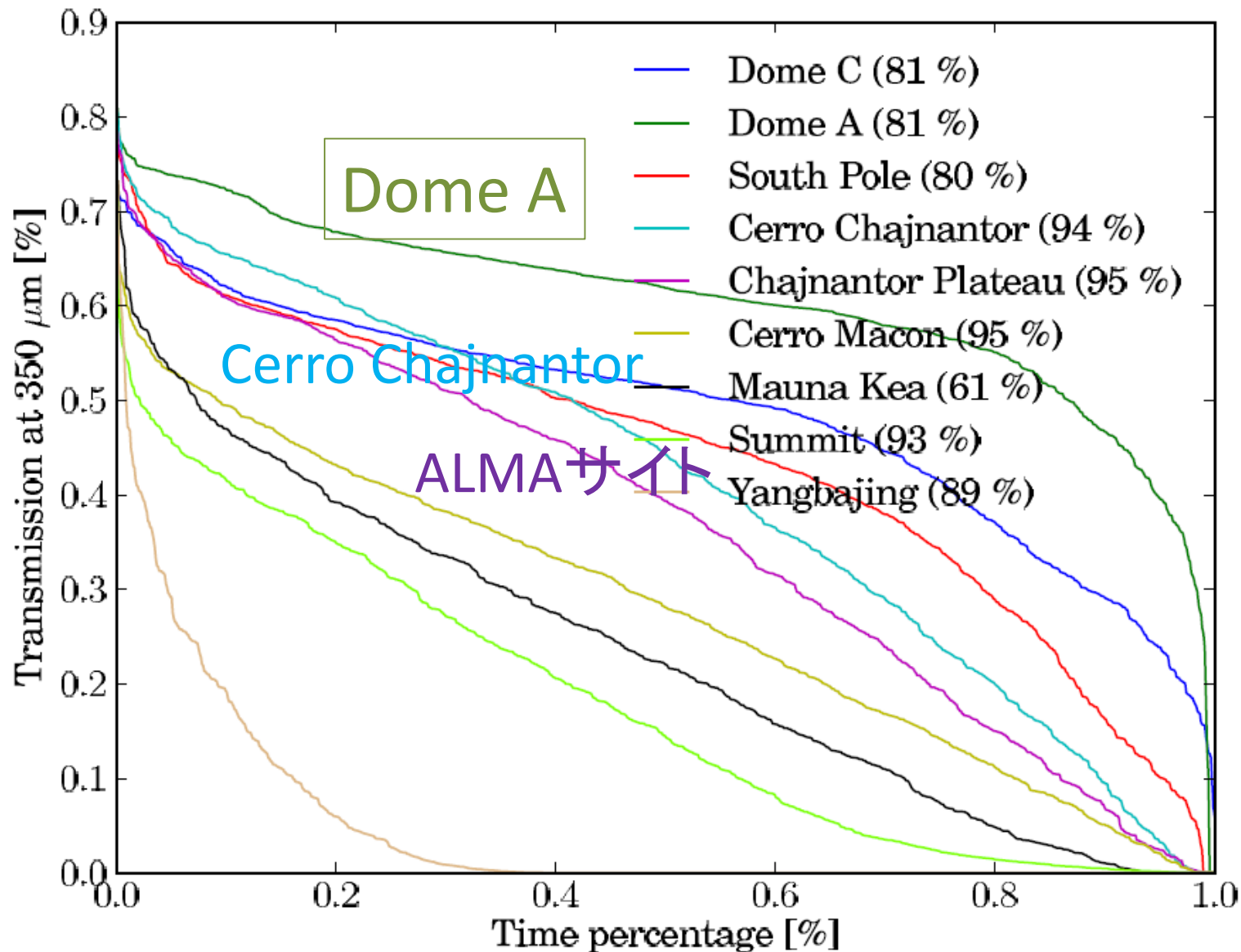


可降水量 (PWV)



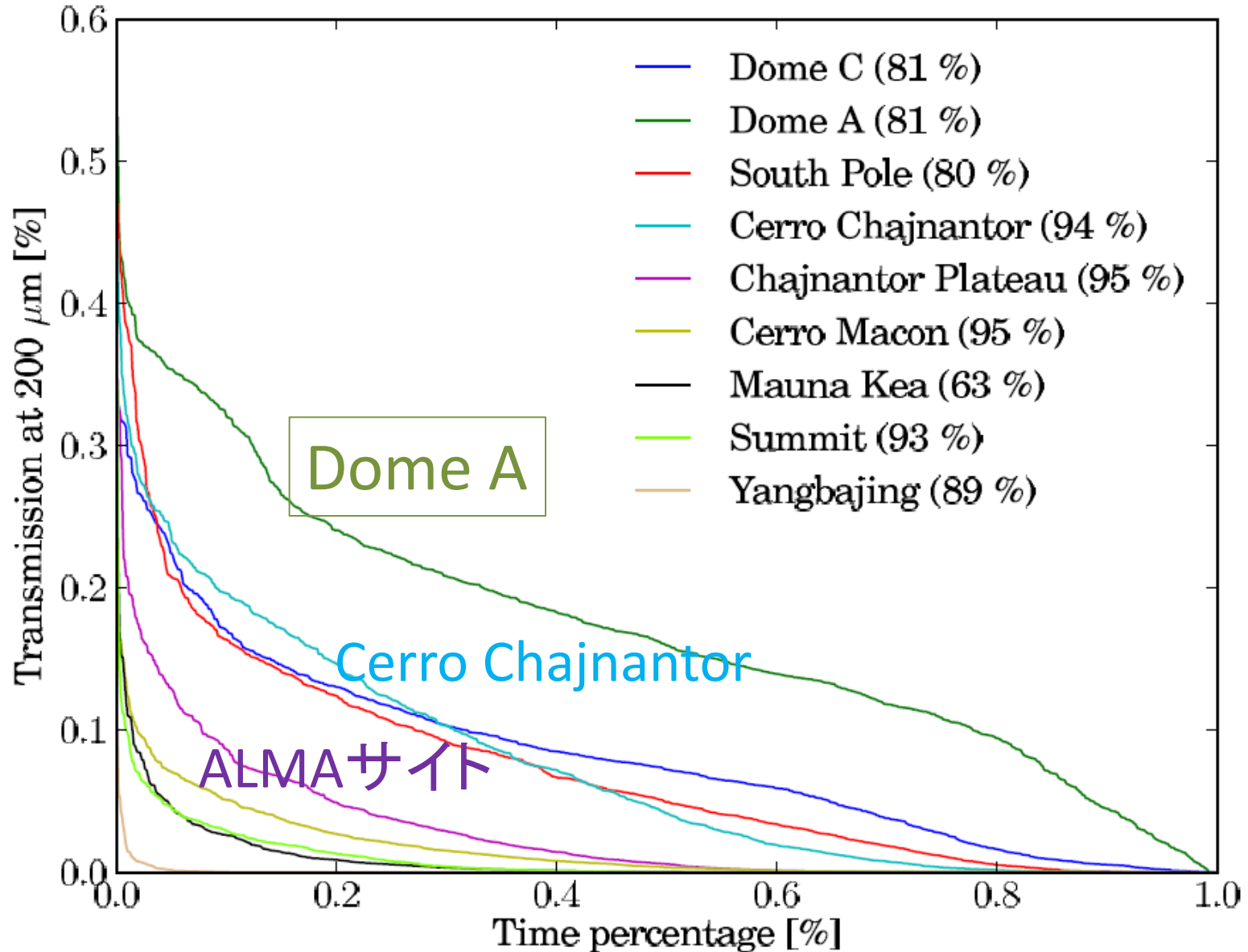
大気透過率@350 μm

Tremblin et al. (2012) Cumulated : 2008-2010

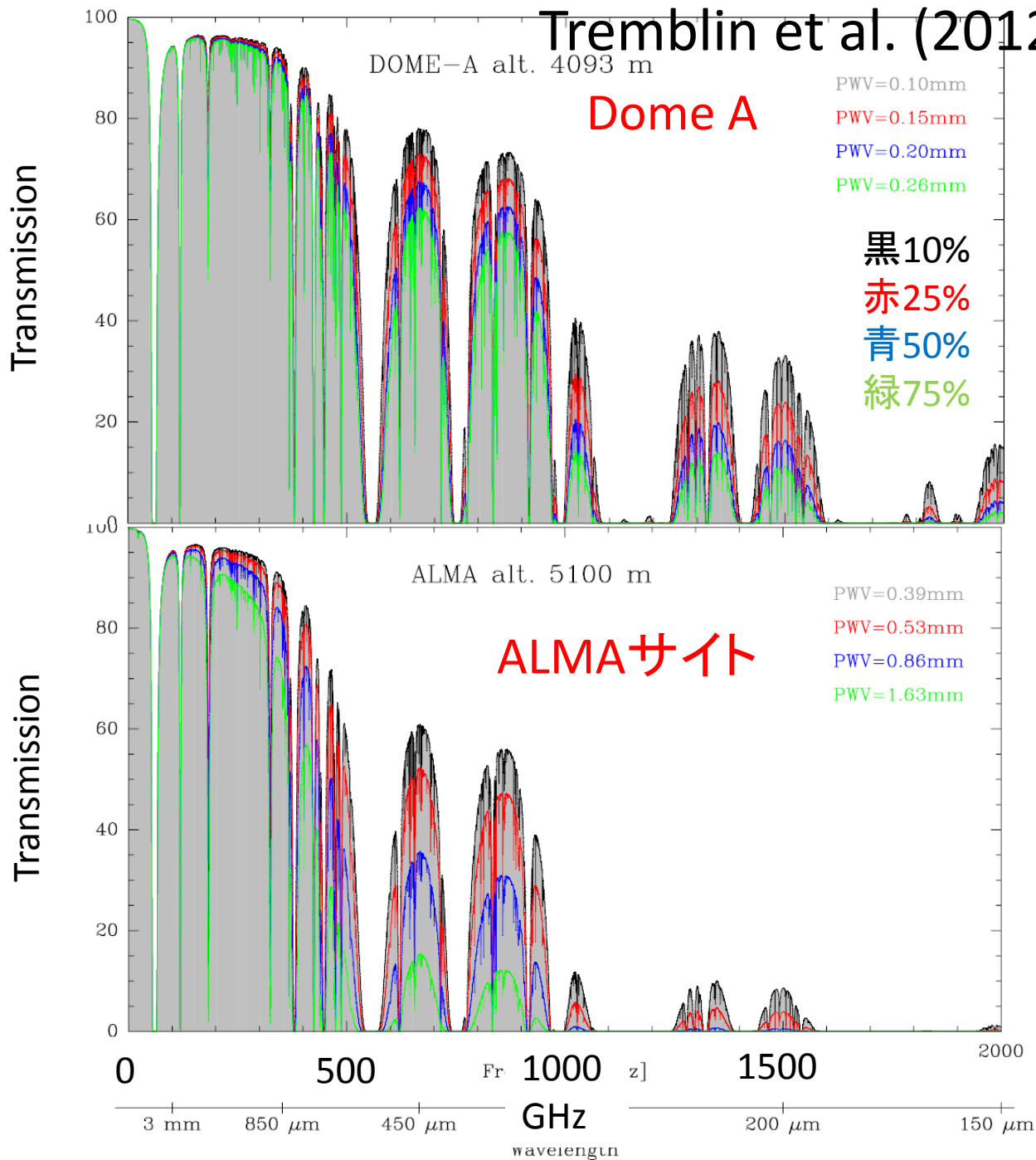


大気透過率@200 μm

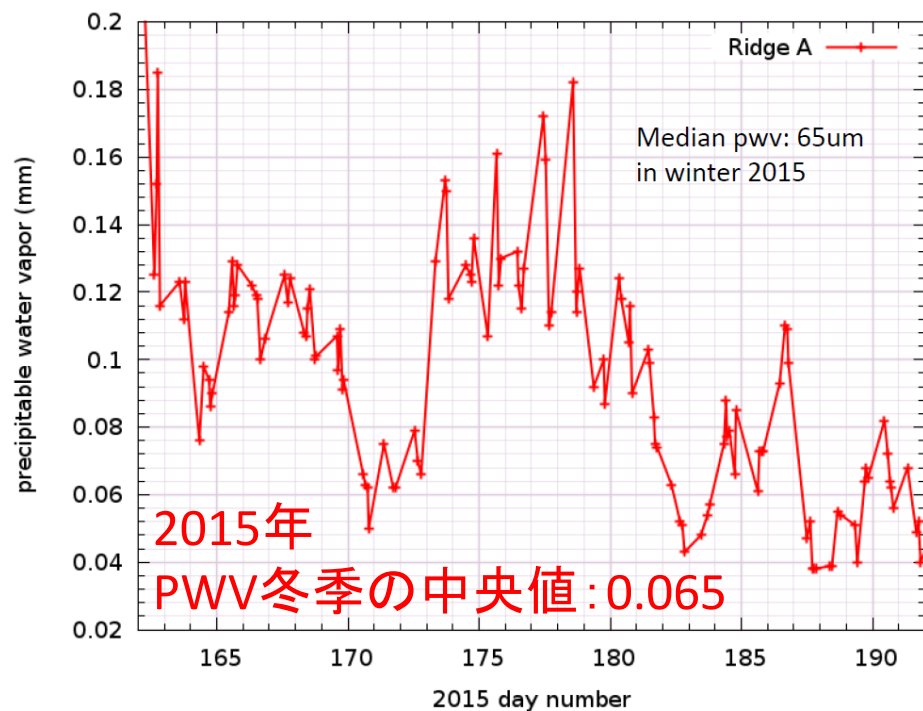
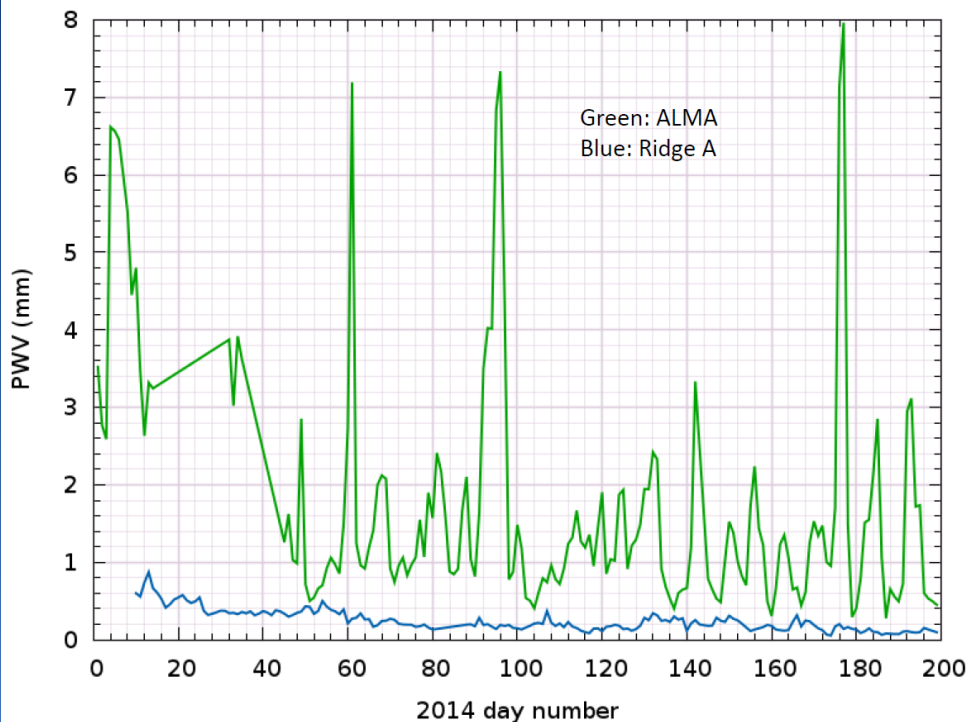
Tremblin et al. (2012) Cumulated : 2008-2010



Tremblin et al. (2012)

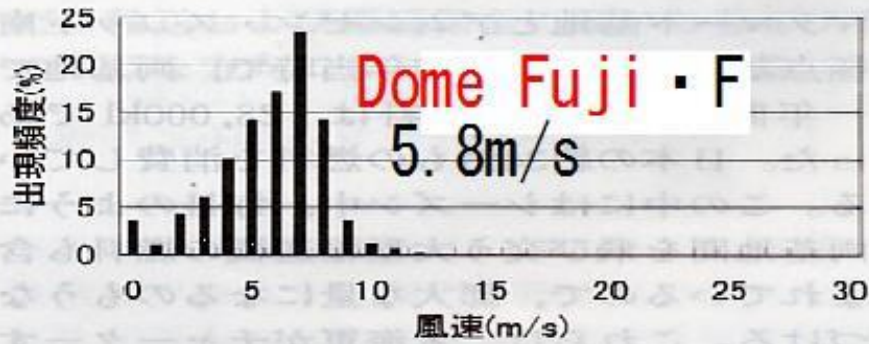


大気の安定度(PWV)



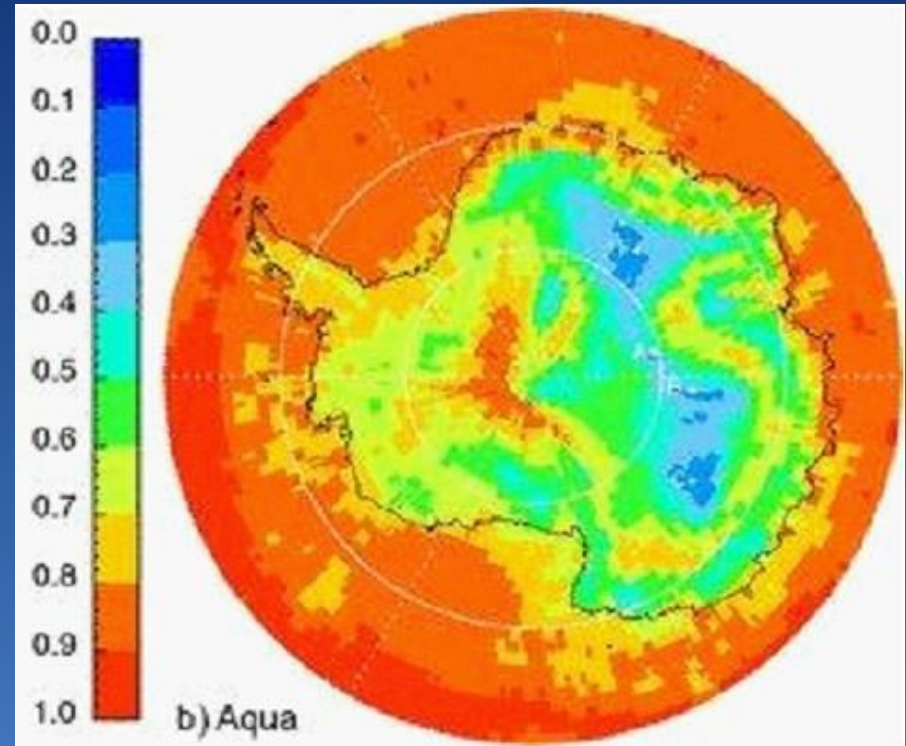
Kulesa (4th SCAR AAA Workshop 2017)

風速

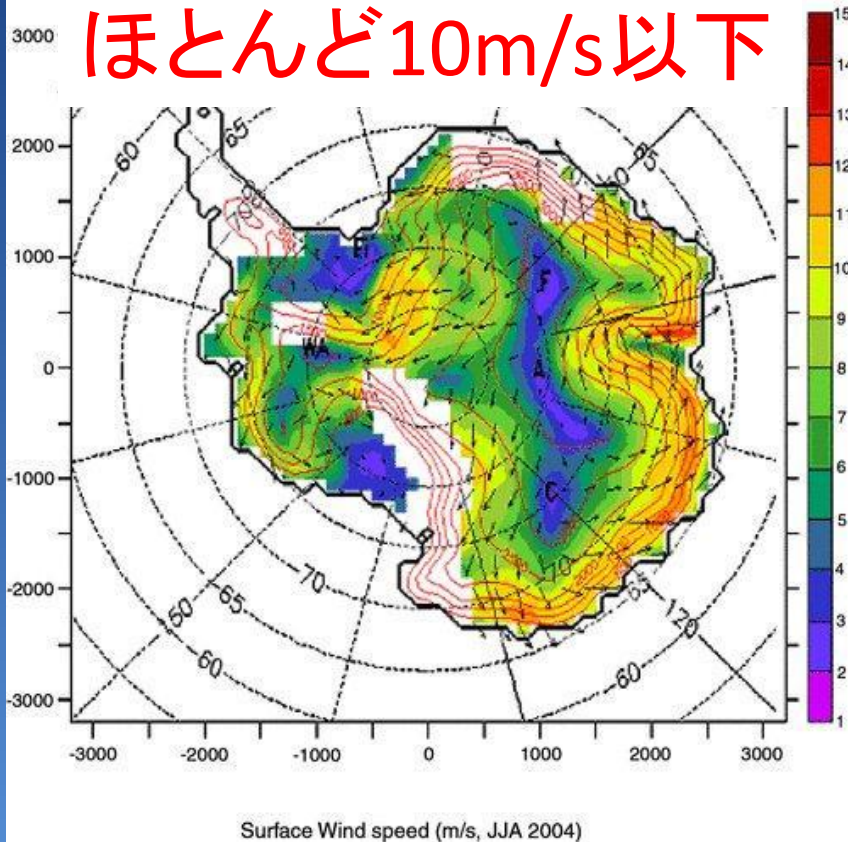


晴天率

雲の量(夜間)



ほとんど10m/s以下



南極内陸部

- テラヘルツ波：地上唯一の窓、大気の安定度
- サブミリ波：大気の透過率、大気の安定度
- ミリ波：大気の安定度
- 赤外線：地上唯一の窓、大気の安定度、
弱い背景光、高いシーイング

- 気球観測：周極風、長期間フライト
- 時間変動：冬季の連続観測

⇒ 地上最高の天文観測サイト

2. 南極30m級テラヘルツ望遠鏡計画

観測可能天域

EL	Decl.
$> 5^\circ$	$< +8^\circ$
$> 10^\circ$	$< +3^\circ$
$> 20^\circ$	$< -7^\circ$

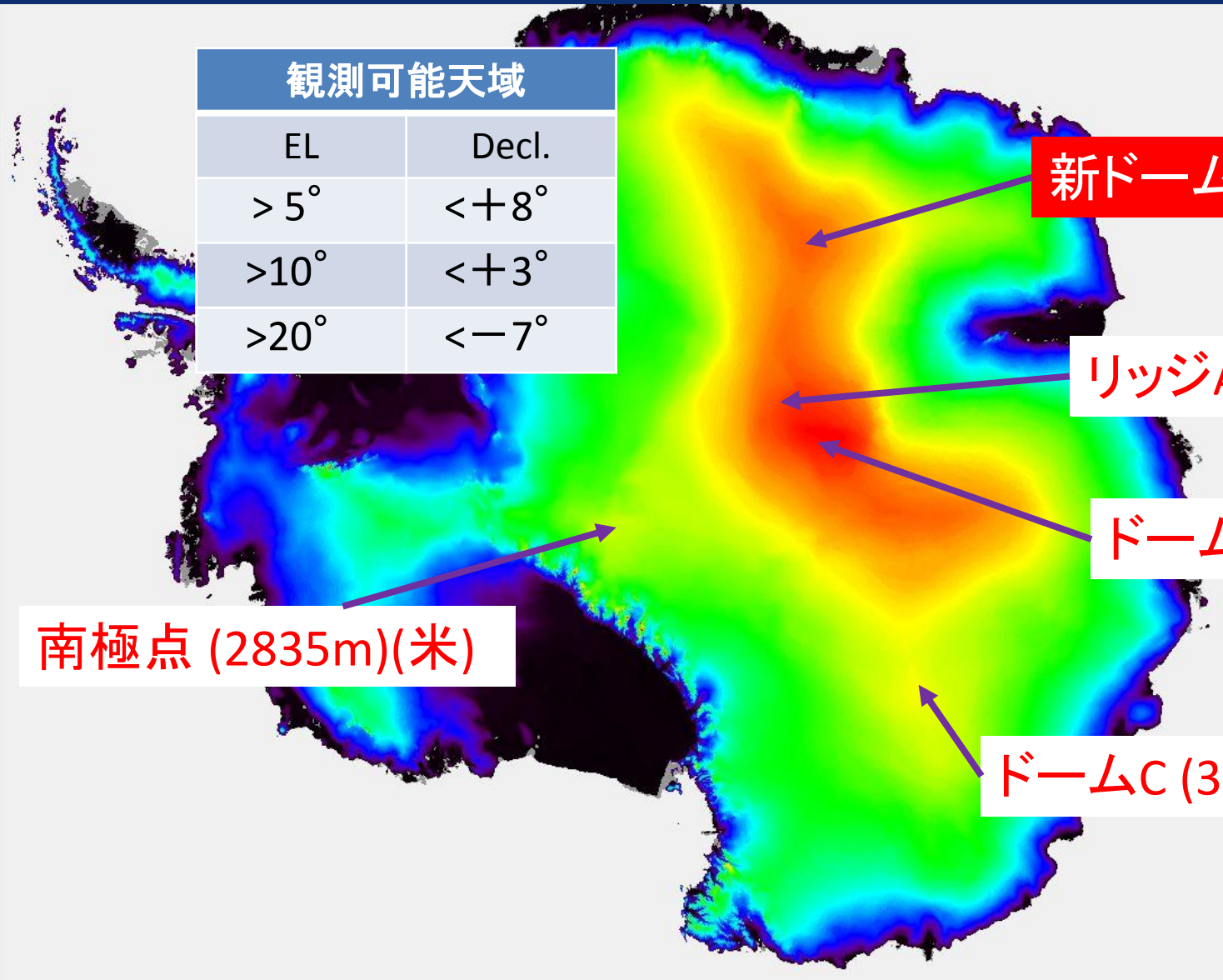
南極点 (2835m)(米)

新ドームF (日)

リッジA (4050m)(米)

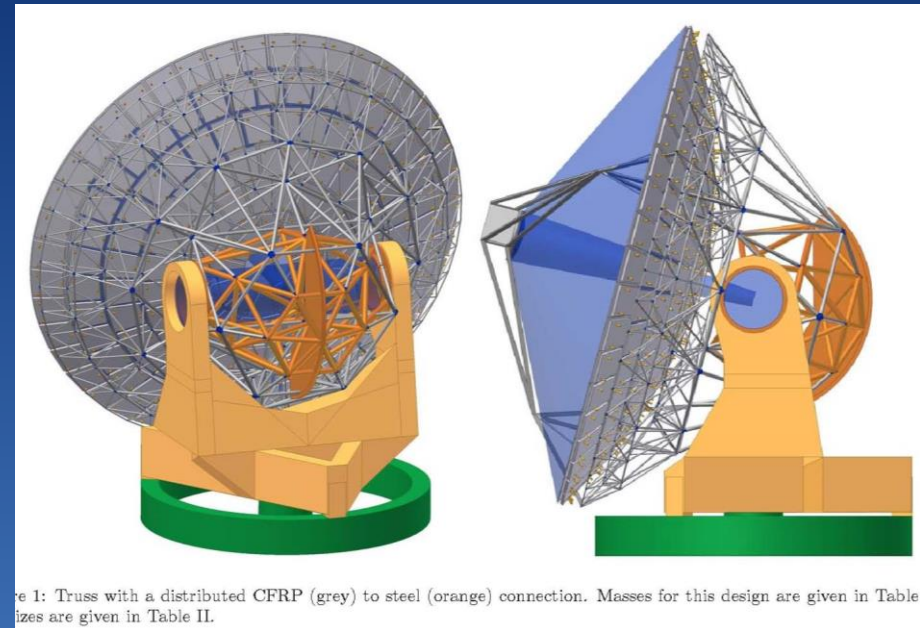
ドームA (4090m)(中)

ドームC (3233m)(仏&伊)



南極30m級テラヘルツ望遠鏡

- ・口径 ~ 30 m
- ・重量 ~ 1000 t?
- ・電力 ~ 600 kVA?
- ・周波数 200~1500GHz
- ・視野 $\sim 1^\circ$
- ・角分解能 $12'' \sim 1.7''$
- ・越冬隊 ~ 5 人/冬
- ・建設地 新ドームふじ基地
- ・国際協力 アジア(台湾、タイ他),
(豪, 米, 欧)
- ・国立天文台+国立極地研
- ・運用期間 ~ 30 年以上



CCAT (25m Φ)



南極 30mTHz望遠鏡

超広視野の実現性

- リッチー・クレチアン

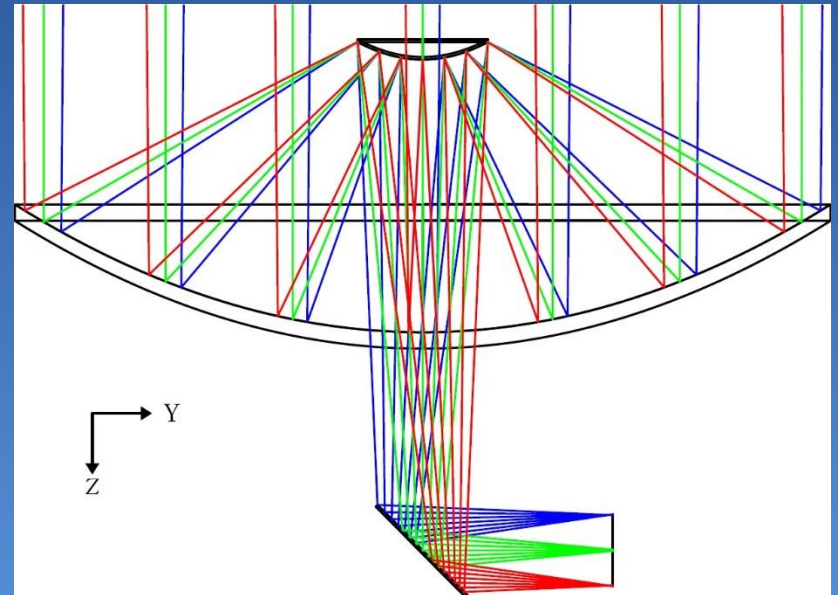
- 非点収差 \Rightarrow 電波カメラのセグメントの位置調整

- 幾何光学 + 波動光学 \Rightarrow 最適解

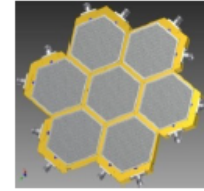
- 視野周辺での周波数無依存の条件

- \Rightarrow 視野 1° を実現する光学系の解

- (今田D論 2015年)



連続波電波カメラ (MKID) (案)



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

周波数帯 GHz	感 度 (5 σ rms) (τ =積分時間)				角分 解能	素子数 N	Mapping speed [deg ² hr ⁻¹ mJy ⁻²]	
	$\tau=60$ sec	1 hour	10 hours	Confu sion				
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
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

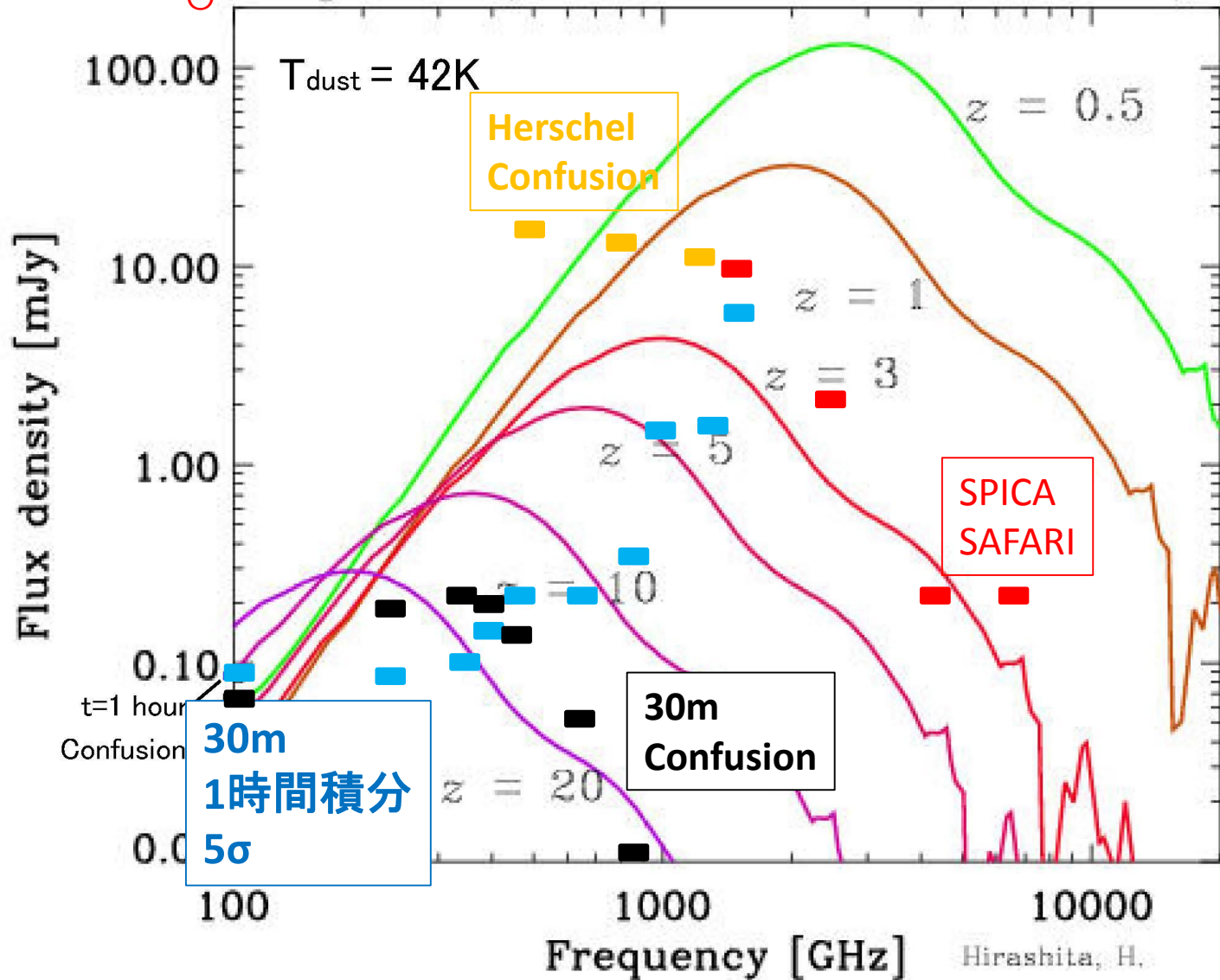
$$\text{Mapping speed (MS)} = \frac{N\Omega}{NEFD^2}$$

Total 7.2万素子 + 11.9万素子

連続波観測感度

$L \sim 10^{12} L_{\odot}$

Arp 220 (Totani & Takeuchi 2002)

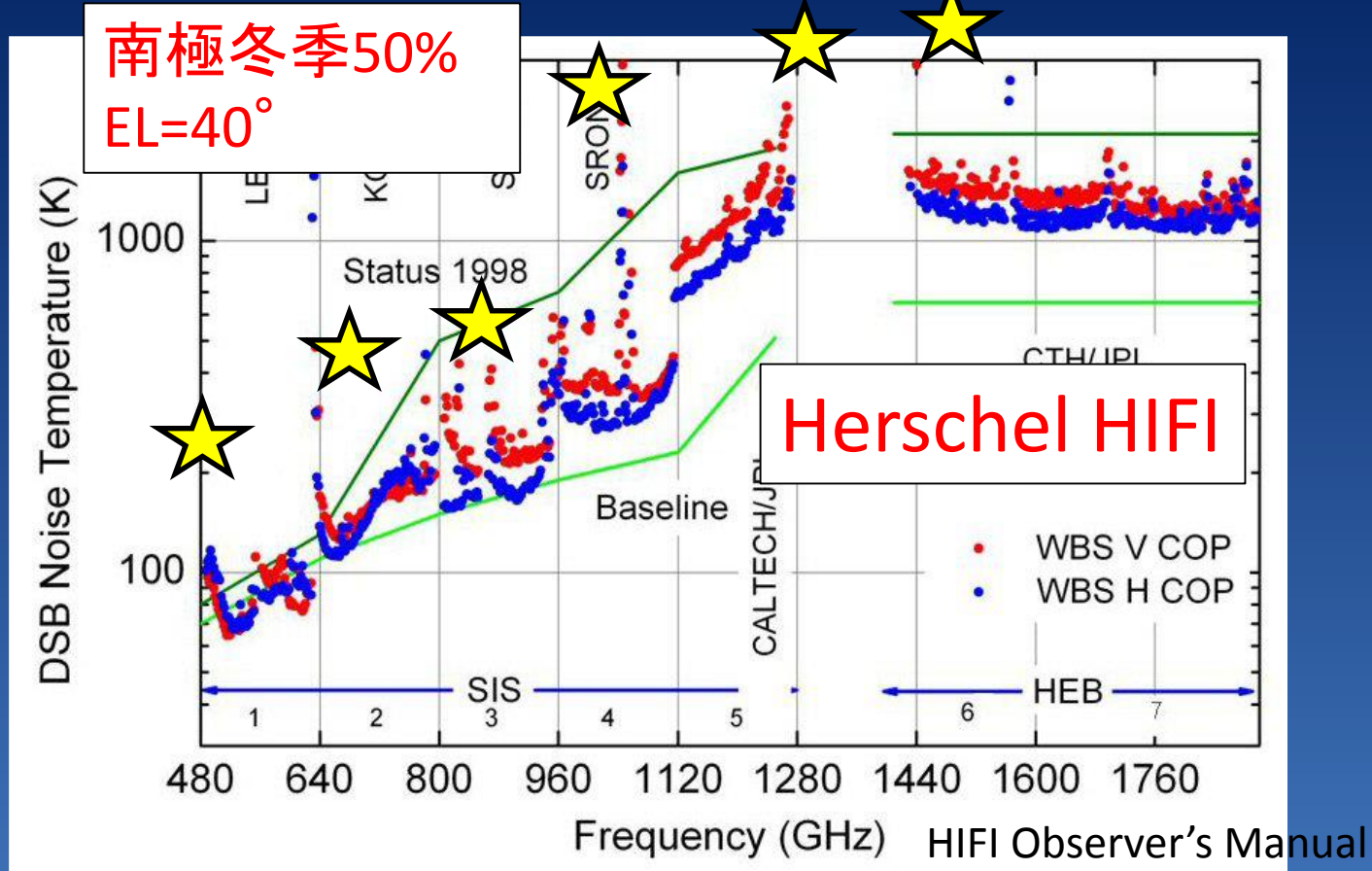


ヘテロダイン受信機(案) (冬季 50%レベル@新ドームふじ)

周波数帯	周波数範囲	Beam数	感度(5 σ rms for $\Delta V=1\text{km/s}$ or 100km/s) *					角分解能
			$\tau=1\text{min}$	1 hour		10 hours		
220 GHz	210-275 GHz	250	0.098 K (1km/s)	0.013 K (1km/s)	7.5 (mJy) (100km/s)	0.0040 K (1km/s)	2.4 (mJy) (100km/s)	11.3"
350	275-373	250	0.086	0.011	6.7	0.0035	2.1	7.1"
460	385-540	250	0.17	0.021	14	0.0067	4.4	5.5"
650	575-735	250	0.29	0.037	28	0.012	8.9	3.8"
850	775-965	250	0.46	0.060	55	0.019	17	2.9"
1000	1000-1060	100	1.1	0.14	157	0.045	50	2.5"
1300	1250-1380	100	1.5	0.19	242	0.060	77	1.9"
1500	1450-1550	100	2.4	0.31	840	0.096	266	1.7"

マルチビーム (* ON点積分時間。感度はON+OFF観測時)

分光観測(システム雑音温度)



Herschel HIFI	南極30m
Beam size 13"-39"	高角分解能(1.7"-12")
Single beam	多素子化が可能(>100?)
DSB	2SB

サイエンスの検討

- ワークショップ(国立天文台研究集会)
 - 2015年11月18日-19日@国立天文台(64名)
“南極で切り開くテラヘルツ天文学”
 - 2017年3月2日-3日@国立極地研(47名)
“南極30m級テラヘルツ望遠鏡によるサイエンス”
 - 2018年3月27日@筑波大学
“南極30m級テラヘルツ望遠鏡によるAGNと爆発的星形成 銀河のサイエンス”
講演者:
泉 拓磨(NAOJ)、平下博之(ASIAA)、
井上昭雄(大阪産業大)、川口俊宏(尾道市立大)、
川勝 望(呉高専)、梅村雅之(筑波大)、中川貴雄(ISAS)

広域銀河探査

(河野さん@“南極30m級テラヘルツ望遠鏡によるサイエンス”)

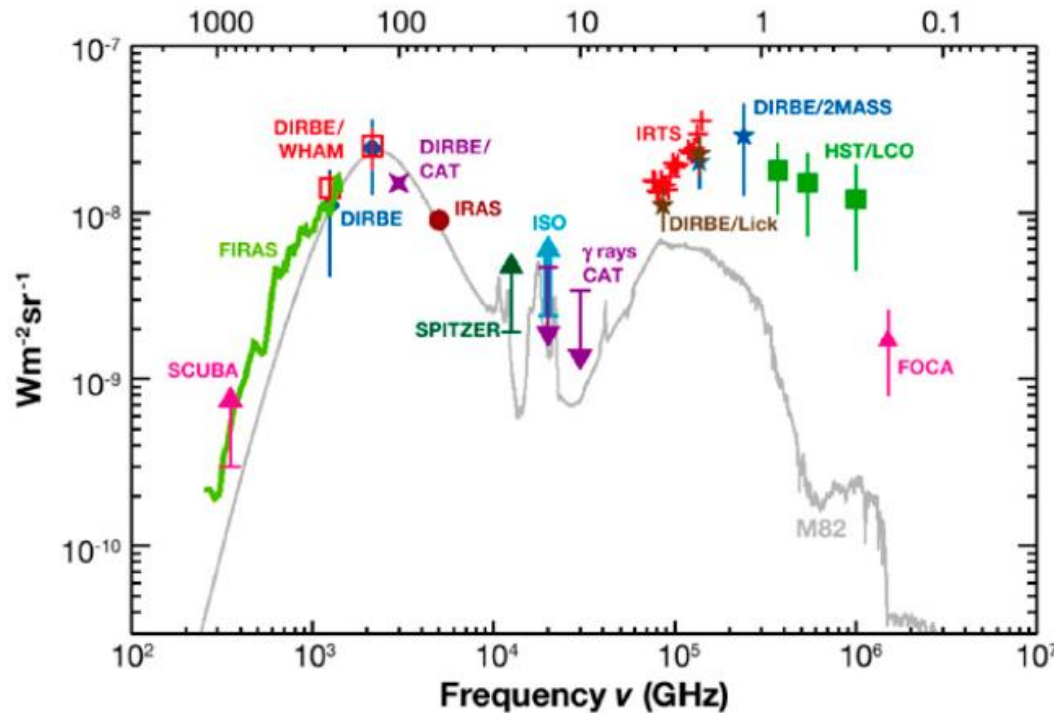
CIB: what is the origin?

In contrast, the infrared output of galaxies at $z=0$ is only 1/3 of the optical output.

→ infrared galaxies grow more luminous with increasing z faster than optical galaxies

The cosmic infrared background (CIB) Comparable !!! The cosmic optical background (COB)

← Wavelength λ (μm) →



<http://ned.ipac.caltech.edu/level5/March05/Lagache/Lagache3.html>

confusion limits (5σ) → fraction of CIB resolved

Unit: mJy

(河野さん@“南極30m級テラヘルツ望遠鏡によるサイエンス”)

	LMT, LST	NRO	IRAM, SST, 南極	CCAT	JCMT	APEX	CSO, ASTE, GLT, Tsukuba	SPT 1.2'@2m m, 1.0'@1.4 mm	Herschel
Dish D	50m	45m	30m	25m	15m	12m	10m	10m*	3.5m
3.3mm	19.3%		10.5%	8.4%	4.4%	3.3%	2.6%		0.7%
2.0mm	34.3%		19.6%	15.8%	8.4%	6.3%	4.9%	1.4?	1.2%
1.3mm	51.1%		30.7%					2 – 4?	2.0%
1.1mm	58.3%		36.0%						2.4%
860 μ m	70.2%		45.3%						3.2%
750 μ m	75.5%		49.7%	41.1%	15.5%	17.9%	14.3%		3.5%
500 μ m									
450 μ m	95.4%		73.8%	64.1%	39.2%	30.6%	24.7%		6.4%
350 μ m	99.2%		86.3%	77.6%	50.9%	40.6%	33.3%		9.3%
200 μ m	99.9%		99.6%	98.2%	83.0%	72.6%	63.6%		24.1%

350 μ m band: dramatic improvement by Antarctic 30-m telescope!

Bold font: based on the measured number counts

#: Oliver et al. 2012, MNRAS, 424, 1614

Adopted number counts: Bethermin et al. (2012); definition of confusion: 30 beams per source

500 deg² deep survey plan

5 σ 1 mJy@850 μ m

→ L(IR) = 5x10¹¹L_⊙@z=5 (T_{dust} = 30K)

→ L(IR) = 2x10¹²L_⊙@z=5 (T_{dust} = 50K)

- 850 μ m: 44 deg²/hr/mJy² x 1 unit

→ 0.2 mJy (1 σ) in 280 hrs – confusion limited

- 460 μ m: 9.8 deg²/hr/mJy² x 1 unit

- → 0.3 mJy (1 σ) in 1260 hrs – confusion limited

- 350 μ m: 4.4 deg²/hr/mJy² x 1 unit

→ 0.2 mJy (1 σ) in 2840 hrs – confusion limited

- 230 μ m: 0.024 deg²/hr/mJy² x 4 unit

→ 1.2 mJy (1 σ) in 2890 hrs

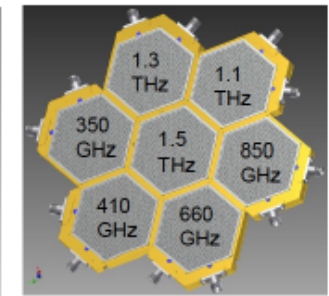
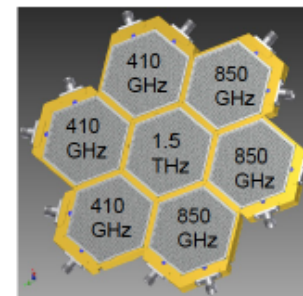
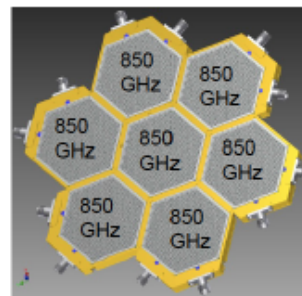
– Not confusion limited, but ~50% (?) of the CIB will be resolved

~30x deeper
than Herschel
surveys

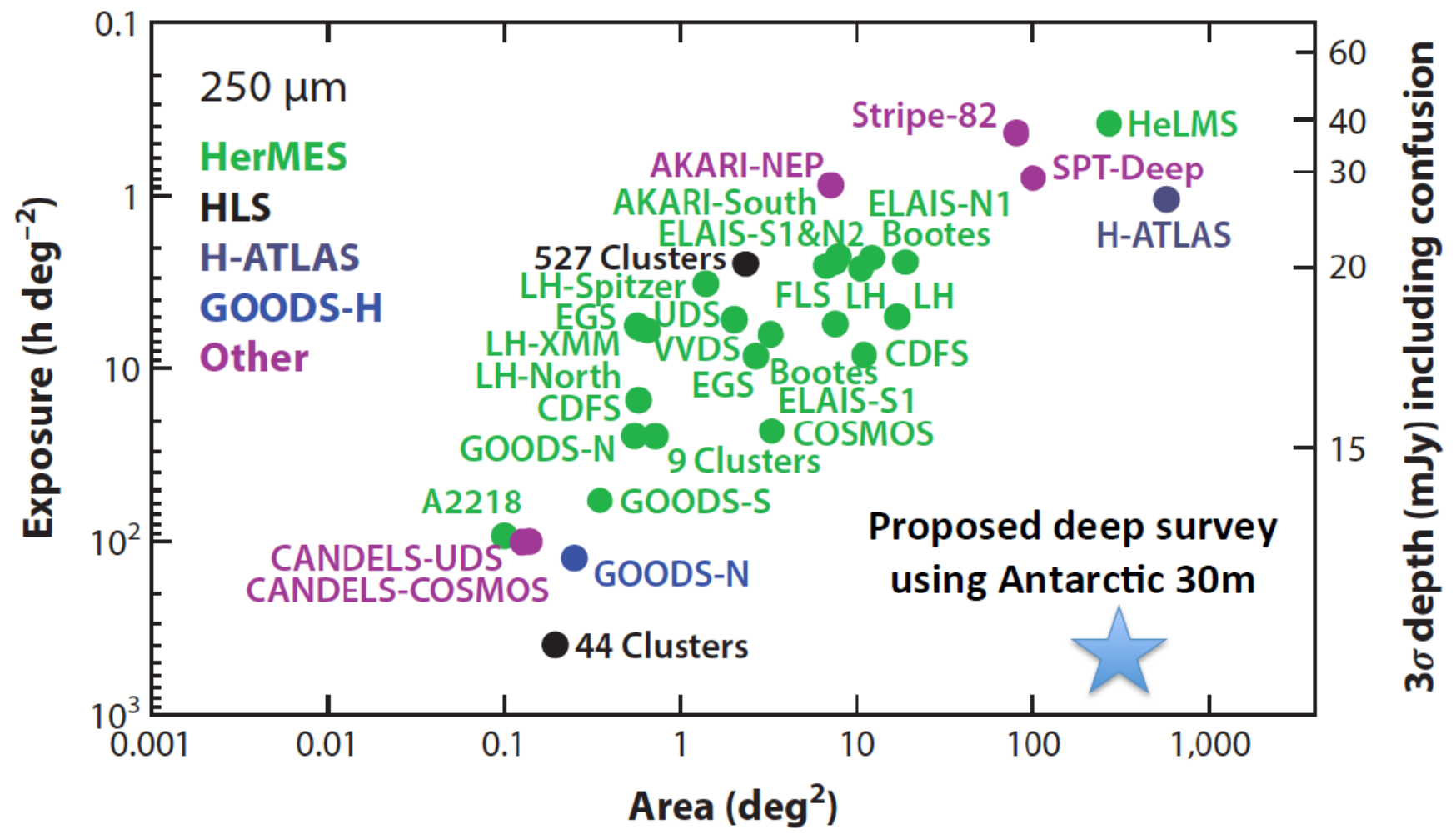
More allocation of 1.3 THz pixels
may be considered to equalize
mapping speeds among 4 bands

3000 hrs deep survey plan:

- High cadence 850 μ m survey
(10 confusion-limited maps will
be obtained after the survey) →
search for time variable sources



Comparison with previous surveys



銀河の星形成史・AGN形成史

(Leipski+2014)

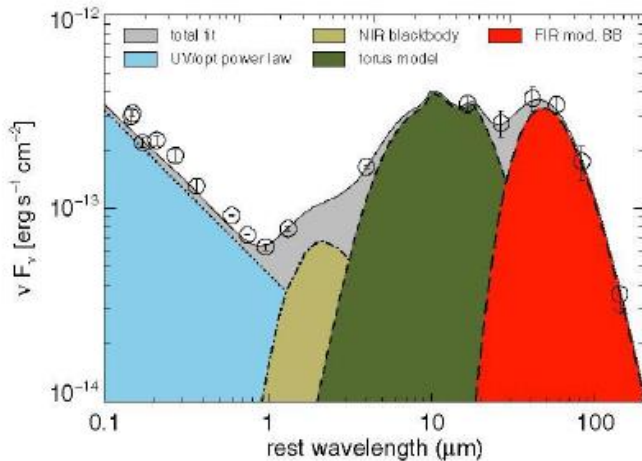
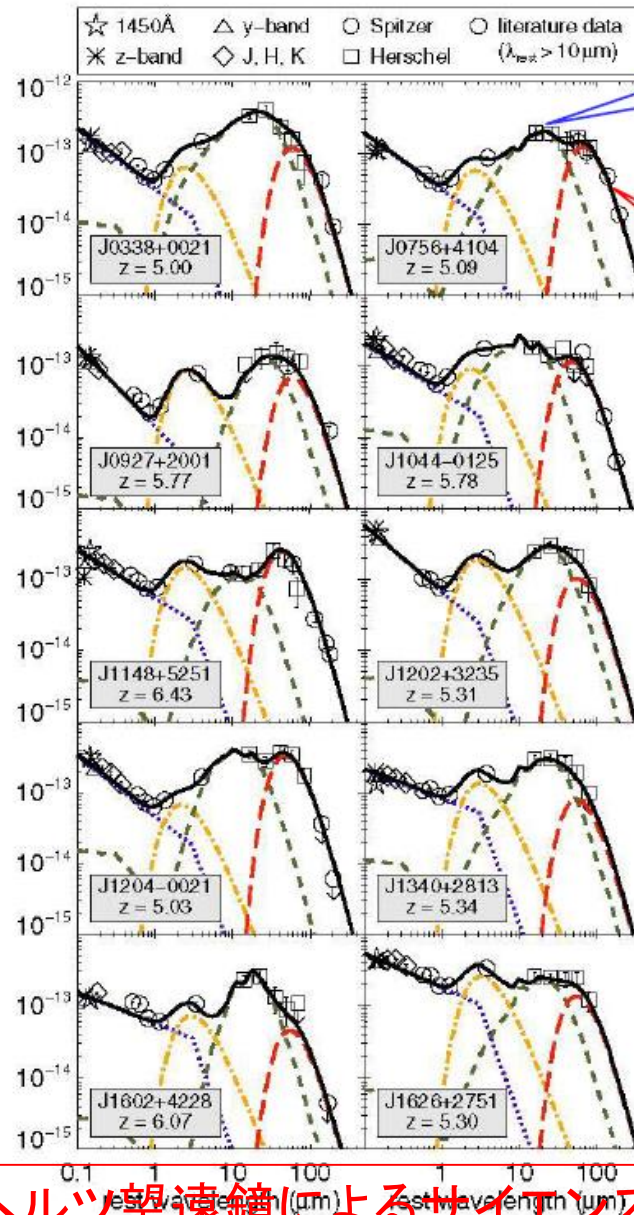


Figure 2. Schematic representation of the components used for SED fitting. As an example, we use the observed photometry of the $z = 5.03$ QSO J1204-0021. (A color version of this figure is available in the online journal.)



高温ダスト

Td > 150 K

AGN-torus

低温ダスト

Td ~ 30-50 K

Star burst

(中井さん@“南極30m級テラヘルツ望遠鏡によるサイエンス”)

Figure 3. SEDs of the 10 quasars detected in at least four *Herschel* bands. The

(Leipski+2014)

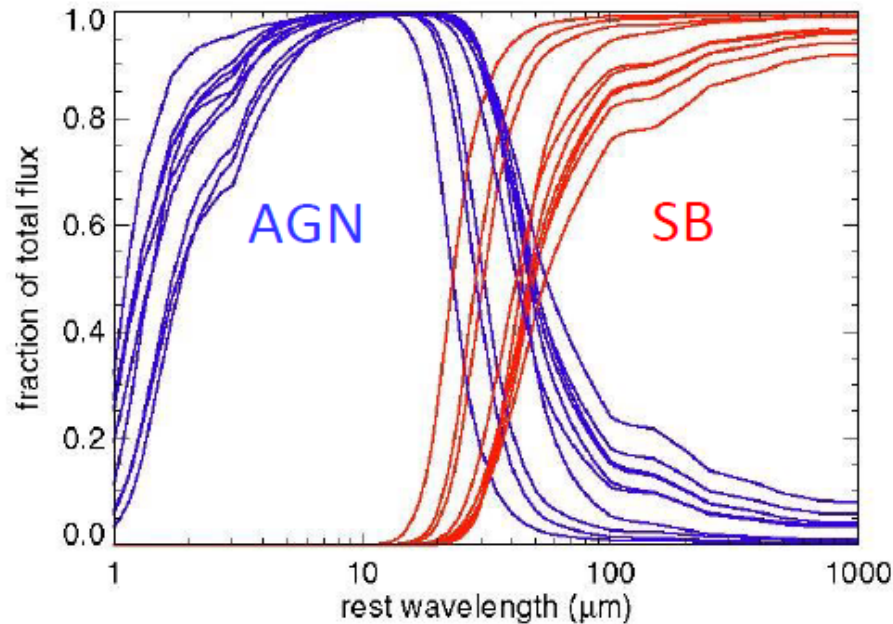


Figure 4. For the 10 objects where the FIR component could be well constrained due to additional millimeter data (see Figure 3) we here show its relative contributions (red) compared to the presumably AGN-heated dust (NIR blackbody plus torus model; blue) as a function of wavelength. For these FIR-bright sources, the FIR component dominates the total infrared emission at $\lambda_{\text{rest}} \gtrsim 50 \mu\text{m}$.

$$F(\text{AGN}) \sim F(\text{SB})$$

$$\text{rest } \lambda \sim 20\text{-}60 \mu\text{m}$$



z	obs λ
1	40-120 μm
2	60-180
5	120-360
7	160-480
10	220-660
15	320-960

AGNとSBの輻射成分の分離



テラヘルツ～サブミリ波が必要

($z < \sim 5$ では、TAO(東大)、SPICAと協力)

(中井さん@“南極30m級テラヘルツ望遠鏡によるサイエンス”)

Mrk231

ハーシェル衛星(van der Werf+ 2010)

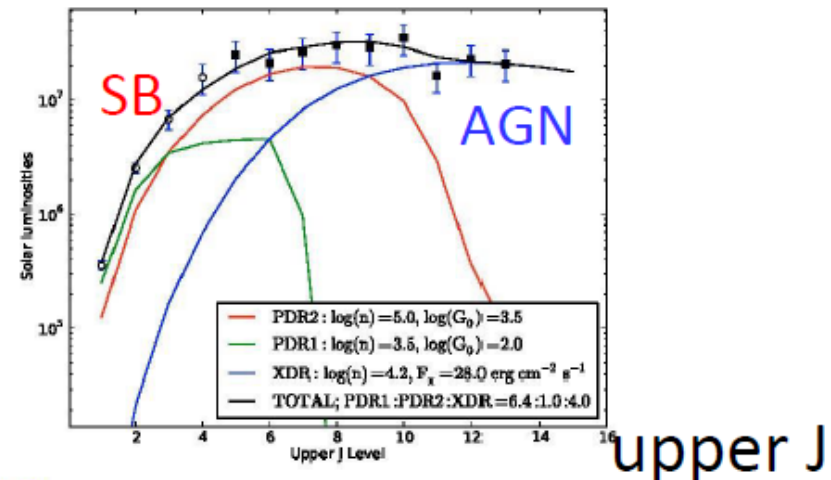
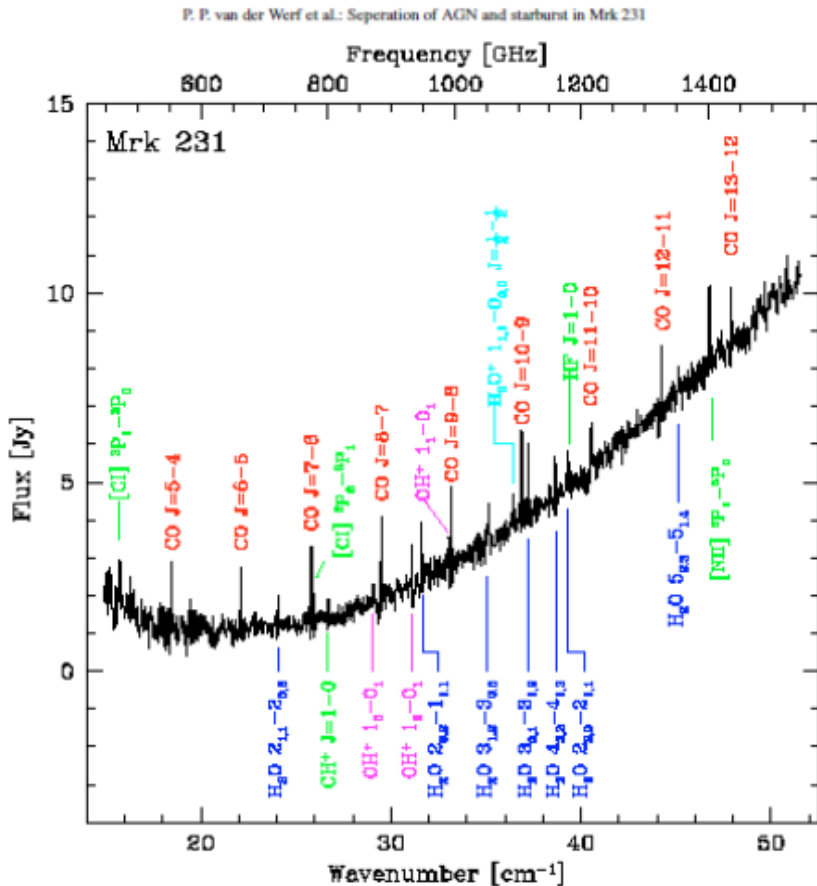


Fig. 2. Luminosities of CO lines from Mrk 231. Filled symbols represent measurements from the SPIRE FTS spectrum, while ground-based measurements are denoted with open symbols. Coloured lines indicate two model PDR components (red and green lines) and an XDR component (blue line). The sum of these three components is indicated by the black line and fits the CO measurements. In the legend, n denotes the number density of hydrogen nuclei ($n = n_{\text{H}} + 2n_{\text{H}_2}$) in cm^{-3} , G_0 denotes the incident UV flux in units of $1.6 \times 10^{-3} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ for the PDRs, and F_x the incident X-ray flux for the XDR. The legend also indicates the relative emitting areas of the three components.

CO

up to J=8

by UV radiation from star formation

J>8

X-ray heating by the accreting SMBH

(中井さん@“南極30m級テラヘルツ望遠鏡によるサイエンス”)

30mテラヘルツ望遠鏡によるサイエンス

- 星惑星系形成
 - コア構造を分解しながら磁場の高感度な広域観測
⇒星・円盤形成時の磁場の役割
- 星間化学
 - 基本的な軽い分子の基底状態の遷移観測 (H_2D^+) ⇒重水素濃縮
- 銀河面サーベイ
 - [C I] (492GHz, 809GHz) + CO (4-3, 7-6) 同時観測
⇒分子雲形成・進化
 - 高速度・高励起ガスの探査
⇒中質量ブラックホール、野良ブラックホール
- 近傍銀河
 - [C I]輝線の狭帯域撮像、ダスト連続波によるサーベイ
⇒分子ガス量の正確な測定
 - CO多輝線、[C I]、[N II]マッピング ⇒分子ガスの物理状態 vs. 星形成率
- 銀河形成・進化
 - [O III]、[C II]、[N II]サーベイ ⇒銀河の星形成史、金属量進化史
 - 原始銀河の H_2 直接検出

など

南極天文サイエンス・ワーキンググループ

- 惑星大気・地球大気
前澤(府大)、笠井(NICT)、新田(筑波大)
- 星間化学
酒井(電通大)、渡邊(東大)、永井(NAOJ)
- 星・惑星系形成
百瀬(茨城大)、石井(NAOJ)、齋藤(筑波大)、(齋藤NAOJ)
- 銀河面サーベイ
瀬田(関学)、岡(慶応大)
- 近傍銀河
徂徠(北大)、久野(筑波大)、高野(日大)
- AGN
土居(ISAS)、川口(札幌医大)、和田(ISAS)、中井(筑波大)
- 銀河形成・進化
河野(東大)、森(筑波大)、竹内(名大)
- 時間変動天体
坪井(ISAS)、井上(ISAS)

プロジェクトブック作成中

「南極30m級テラヘルツ望遠鏡」に向けての課題

(観測装置)

- 大口径アンテナ
 - 超広視野($\sim 1^\circ$)
 - 高精度の鏡面(20 μm)
 - 鏡面測定法の開発
 - リッチー・クレチアン光学系での近傍界Phase Retrieval Holography (周)
 - 点回折干渉計による波面測定 (永井、奥村)
 - ポインティング(0.2"?)
 - ドーム、霜対策、極寒でのメンテナンス
- 電波カメラ(新田さん講演)
 - 45m電波望遠鏡用109素子MKIDカメラの開発
 - 大規模化(数万素子)
 - DESHIMAタイプ
- ヘテロダイン受信機
 - 大規模マルチビーム(>100素子)
- IF系+分光計
 - 広帯域+マルチビーム対応

10mテラヘルツ望遠鏡での経験

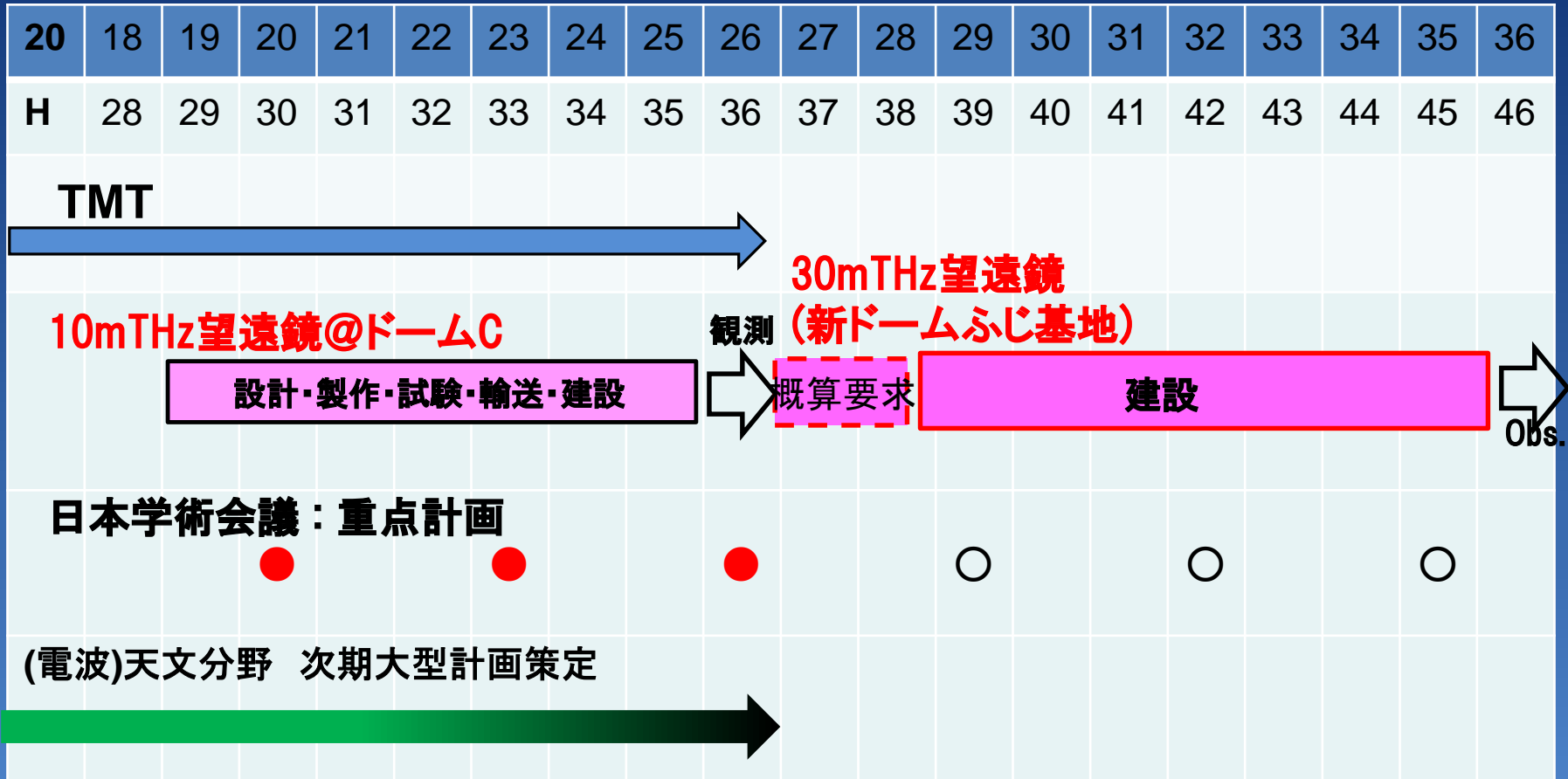
「南極30m級テラヘルツ望遠鏡」に向けての課題

(基地・設備・輸送)

- 新ドームふじ基地の気象測定
高さ40～50m鉄塔建設
 - ・風速の高度分布：望遠鏡の指向性、「風よけ」の必要性
 - ・温度の高度分布：望遠鏡の熱変形による鏡面誤差、指向性誤差
- 地盤(雪面下)調査+アンテナ基礎設置法の開発
重量1000トン以上を水平に設置
- 輸送方法の検討
- 夏季建設期間の最大化の検討
40日→>100日(11月～2月)：建設は昼夜2交代
- 電力供給法の検討・開発(～600kVA)

国立極地研との連携

スケジュール



将来への発展

- 南極望遠鏡のアイデア
 - 可視-赤外: 2.5m (KDUST) \Rightarrow 6-8m 望遠鏡 (中国)、大型望遠鏡、干渉計
 - テラヘルツ: 5m (DATE5) \Rightarrow 15m THz 望遠鏡 (中国)、干渉計 (アリゾナ大)、強度干渉計 (松尾)
 - サブミリ: 気球 VLBI (土居)
 - etc.

\Rightarrow 次世代の天文観測拠点

Hawaii
Mauna Kea
@4200m



Chile @5000m

