

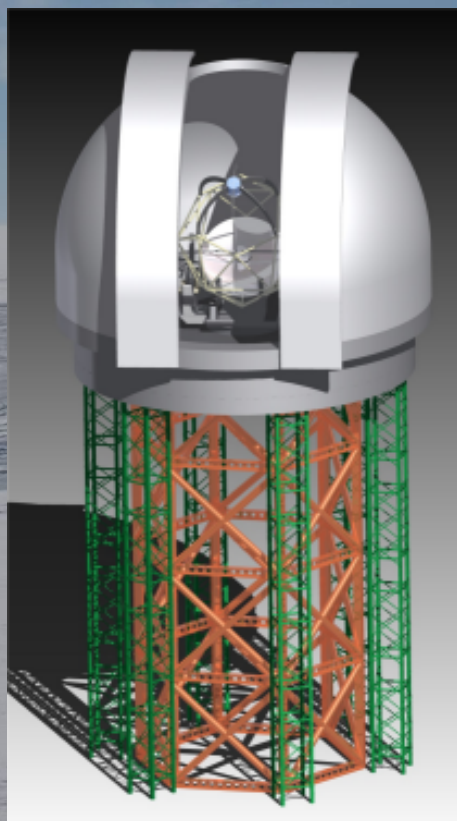
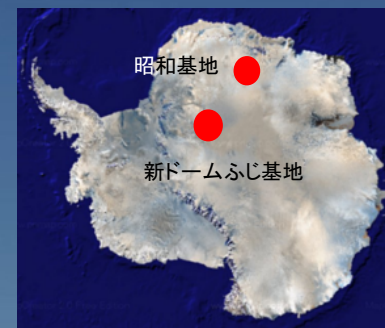


南極中口径赤外線望遠鏡  
**Antarctic Infrared Telescope (AIRT)**

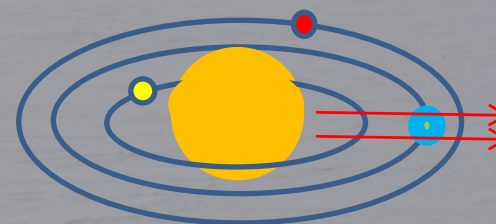
市川隆

東北大学理学研究科天文学専攻

南極の卓越した天文環境を生かし、大学間連携、国立天文台、国立極地研究所の協力を得て以下の研究を行う



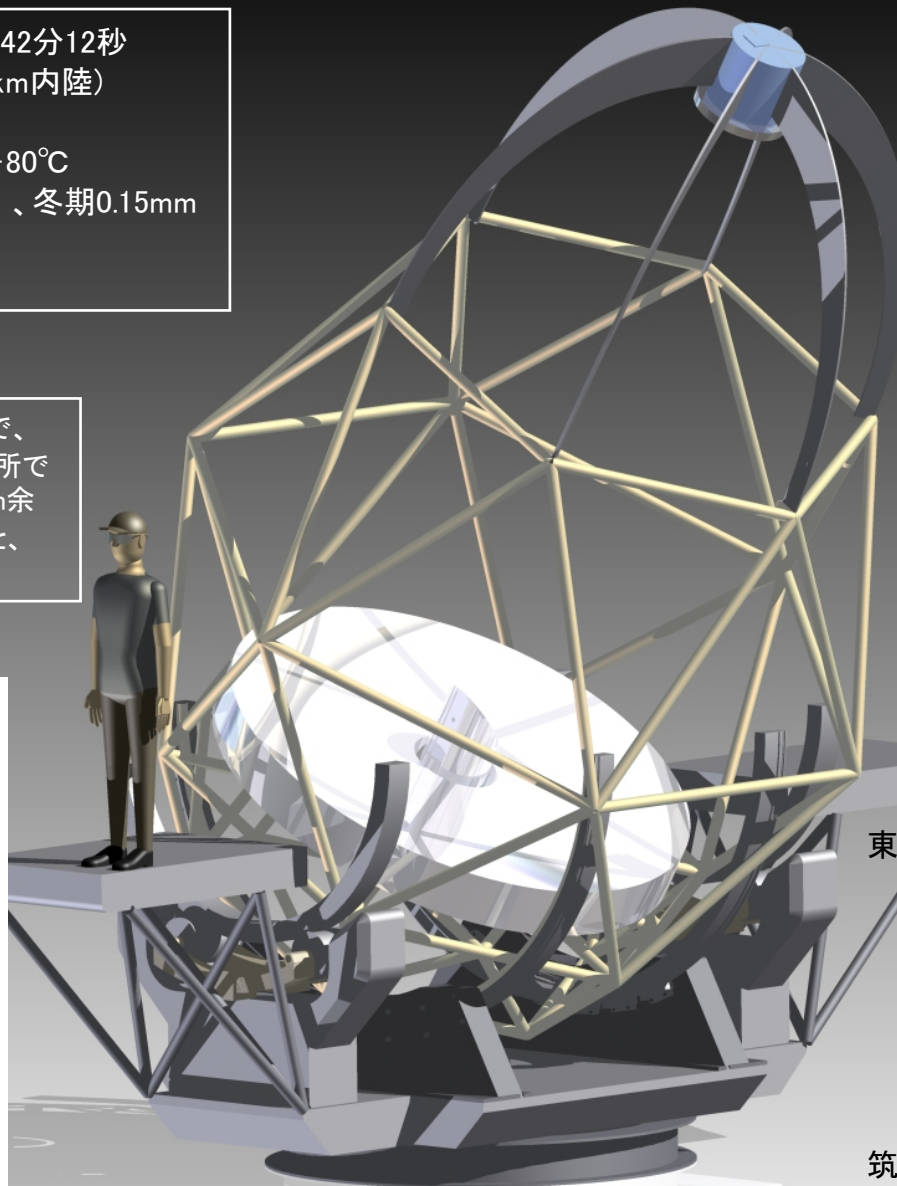
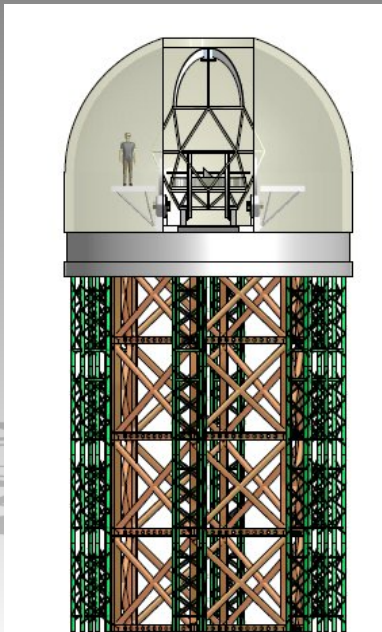
- スーパーアースを持つ多惑星系のトランジット連続観測による系外惑星の大気構造の研究
- テラヘルツ望遠鏡と共同観測によるダストに覆われたhigh-zスターバースト銀河の広域探査と星生成活動の研究
- ヘテロダイン赤外線分光器による惑星の大気循環構造の研究



## ドームふじ基地の環境

南緯77度19分01秒 東経39度42分12秒  
(昭和基地から約1000km内陸)  
標高 3810m、気圧0.6  
年平均気温 $-54^{\circ}\text{C}$ 、最低気温 $-80^{\circ}\text{C}$   
年平均水蒸気量 $0.25\text{mm PWV}$ 、冬期 $0.15\text{mm}$   
晴天率 85%、快晴率68%  
平均風速 $5.8\text{m}$

高さ11mに設置した小型望遠鏡で、  
世界で最も星の瞬きが少ない場所  
であることが判明しました。高さ10m余  
りのタワーの上に望遠鏡を作ると、  
世界最高性能が得られます



雪面の上に立てるため、極地工  
学研究者と共同で開発します

## 望遠鏡と観測装置

口径2.5m望遠鏡  
超軽量新技術架台、軽量ドーム  
極寒に耐える仕様  
赤外線ヘテロダイン分光器  
波長 $10\mu\text{m}$ 超高分解能 $10^{7-8}$   
赤外線広域撮像分光装置  
7分角 $\times$ 7分角 $\times$ 3色+低分散  
波長 $1\mu\text{m}-5\mu\text{m}$   
中間赤外線撮像装置

極限環境での安全安心ロボティクス  
技術を使って日本からリモートで制  
御・観測を行います

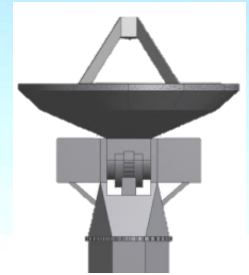
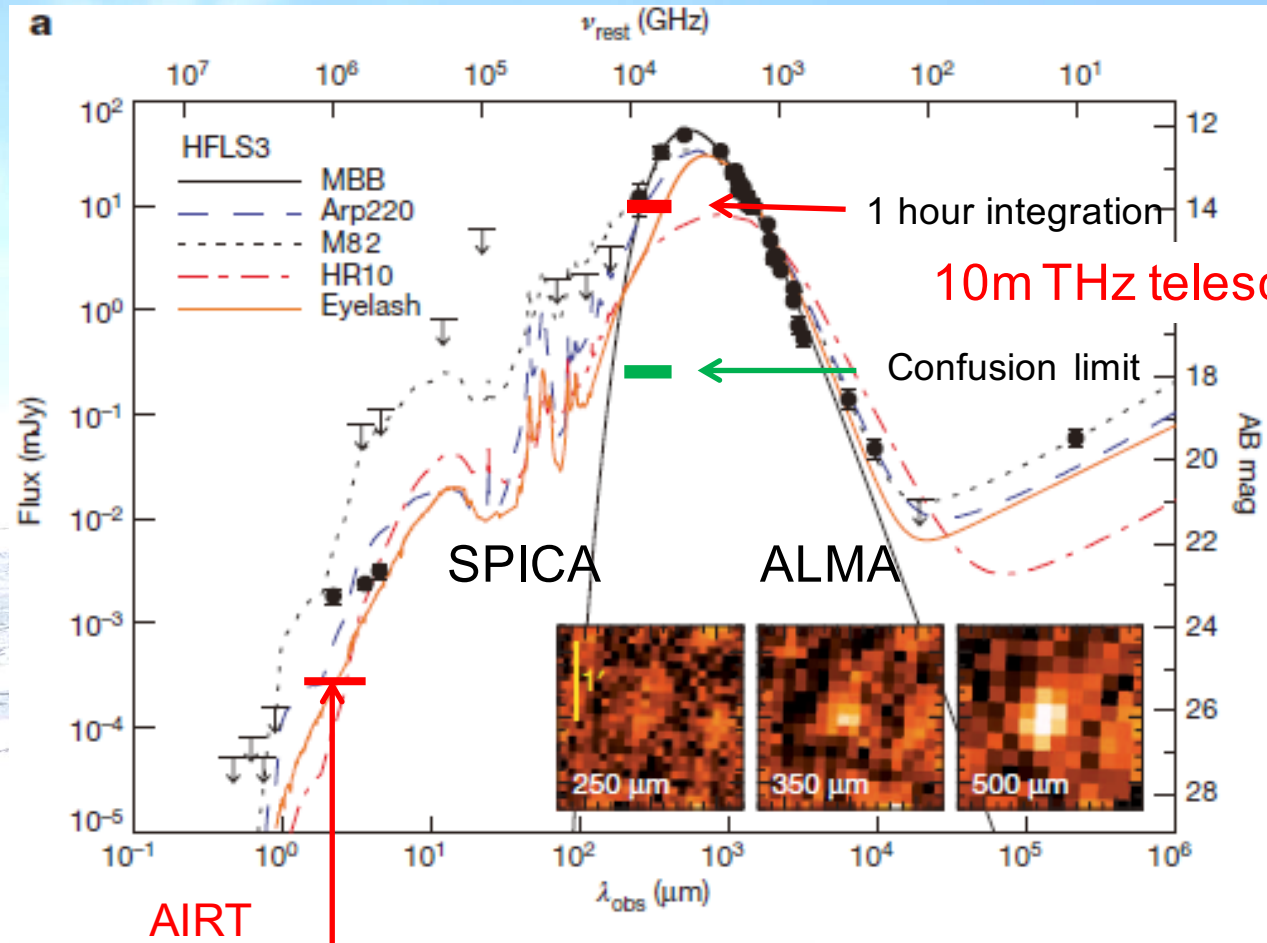
独創的なサイエンスを開拓するため、  
干渉計など新技術の装置が開発され  
ます

東北大学  
理学研究科  
天文学専攻  
惑星プラズマ・大気研究センター  
地球物理学専攻・惑星大気物理学分野  
工学研究科  
航空宇宙工学専攻・宇宙探査工学分野  
都市・建築学専攻・地域環境計画分野  
筑波大学  
国立天文台  
国立極地研究所  
南極天文コンソーシアム

# ➤ Dusty Star Burst Galaxies

Herschel galaxy at  $z=6.5$

Riechers+ 2013



## ➤ 太陽系惑星の大気構造

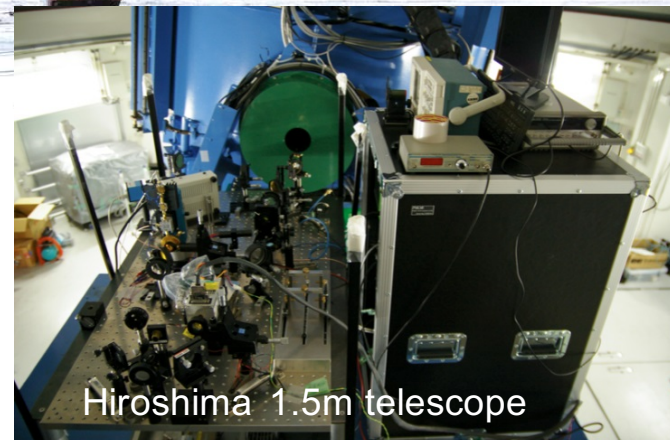
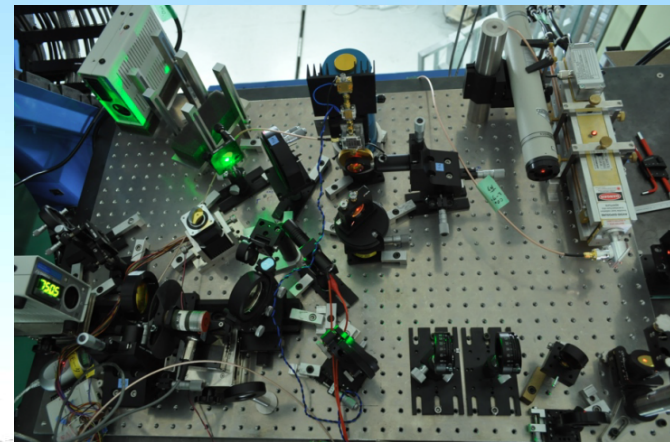
### • 中間赤外線ヘテロダイン分光

- $\lambda = 7\text{-}13\mu\text{m}, (17\mu\text{m})$
- $R = 10^{6-7}$
- Band Width 1GHz

mixing ratio, velocity, pressure, excitation condition, temperature, and the vertical information of  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HO}_2$ , ...

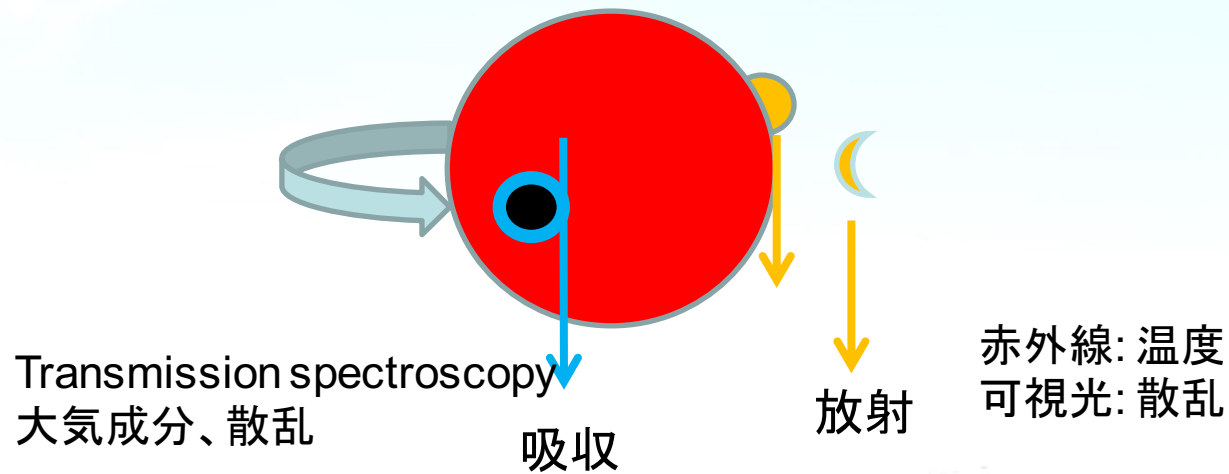


Nakagawa+ 2013



Hiroshima 1.5m telescope

## ➤ トランジット観測によるTransmission Spectroscopy



大気を持つスーパーアースについての観測例はごくわずか(1~3例)

Kepler衛星などで、地球に近い質量のsuper Earthが多数発見されているが、そのほとんどは主星に近いrocky惑星。しかし大気を持つと思われるものがある。低質量星の惑星ではトランジット観測などで、大気モデルや成分を観測する試みが始まった。

Table 4  
Properties of Transiting Planets from 1.4–3.0  $R_{\oplus}$  with Dynamically-Measured Masses

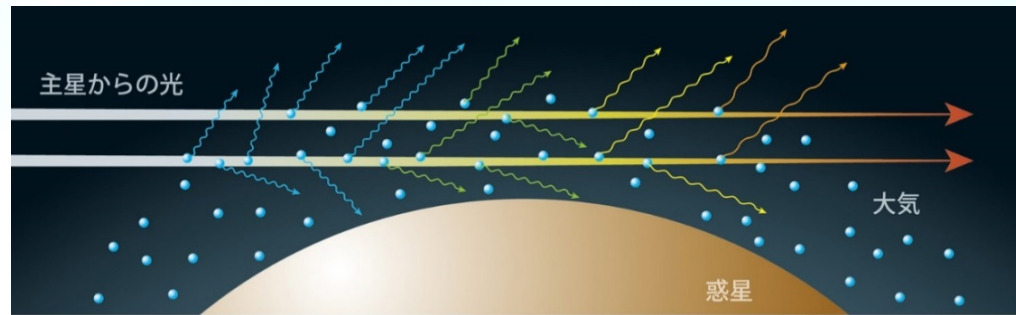
Name	Radius [ $R_{\oplus}$ ]	Mass [ $M_{\oplus}$ ]	Mean Density [ $\text{g cm}^{-3}$ ]	Reference
Kepler-68c	$0.953^{+0.037}_{-0.049}$	$4.8^{+2.5}_{-3.6}$	$28^{+13}_{-22}$	<a href="#">Gilliland et al. (2013)</a>
Kepler-10b	$1.416^{+0.033}_{-0.036}$	$4.56^{+1.17}_{-1.29}$	$8.8^{+2.1}_{-2.9}$	<a href="#">Batalha et al. (2011)</a>
Kepler-36b	$1.486 \pm 0.035$	$4.45^{+0.33}_{-0.27}$	$7.46^{+0.74}_{-0.59}$	<a href="#">Carter et al. (2012)</a>
CoRoT-7b	$1.58 \pm 0.10$	$7.42 \pm 1.21$	$10.4 \pm 1.8^a$	<a href="#">Bruntt et al. (2010)</a> , <a href="#">Hatzes et al. (2011)</a>
Kepler-20b	$1.91^{+0.19}_{-0.21}$	$8.7 \pm 2.2$	$6.9^{+1.3}_{-2.6}$	<a href="#">Gautier et al. (2012)</a>
Kepler-11b	$1.97 \pm 0.19$	$4.3^{+2.2}_{-2.0}$	$3.1^{+0.1}_{-1.1}$	<a href="#">Lissauer et al. (2011)</a>
Kepler-18b	$2.00 \pm 0.10$	$6.9 \pm 3.4$	$4.9 \pm 2.4$	<a href="#">Cochran et al. (2011)</a>
55 Cnc e	$2.00 \pm 0.14$	$8.63 \pm 0.35$	$5.9^{+1.1}_{-1.1}$	<a href="#">Winn et al. (2011)</a>
Kepler-68b	$2.31 \pm 0.07$	$8.3 \pm 2.3$	$3.32 \pm 0.92$	<a href="#">Gilliland et al. (2013)</a>
Kepler-11f	$2.61 \pm 0.25$	$2.3^{+2.2}_{-1.2}$	$0.7^{+0.7}_{-0.4}$	<a href="#">Lissauer et al. (2011)</a>
GJ 1214b	$2.678 \pm 0.13$	$6.55 \pm 0.98$	$1.87 \pm 0.4$	<a href="#">Charbonneau et al. (2009)</a>

<sup>a</sup> Differing mass measurements of CoRoT-7b ([Queloz et al. 2009](#); [Pont et al. 2011](#)) furnish different mean densities; we have stated the most recently published values.

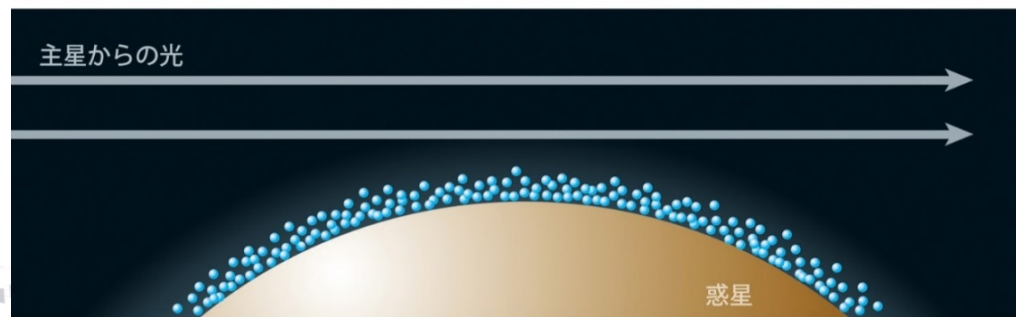
<sup>b</sup> Mean density calculated from stated  $1\sigma$  limits in radius and mass.

# スーパーアースGJ 1214bの大気構造

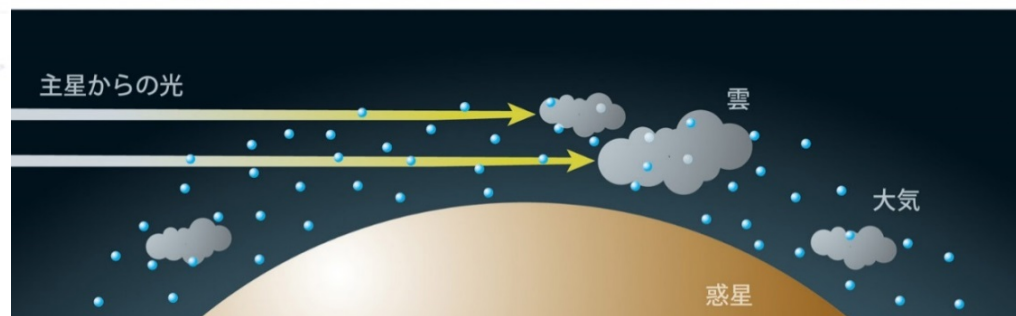
成田 2013



Light gas  
(large scale high)



Heavy gas  
(small scale high)



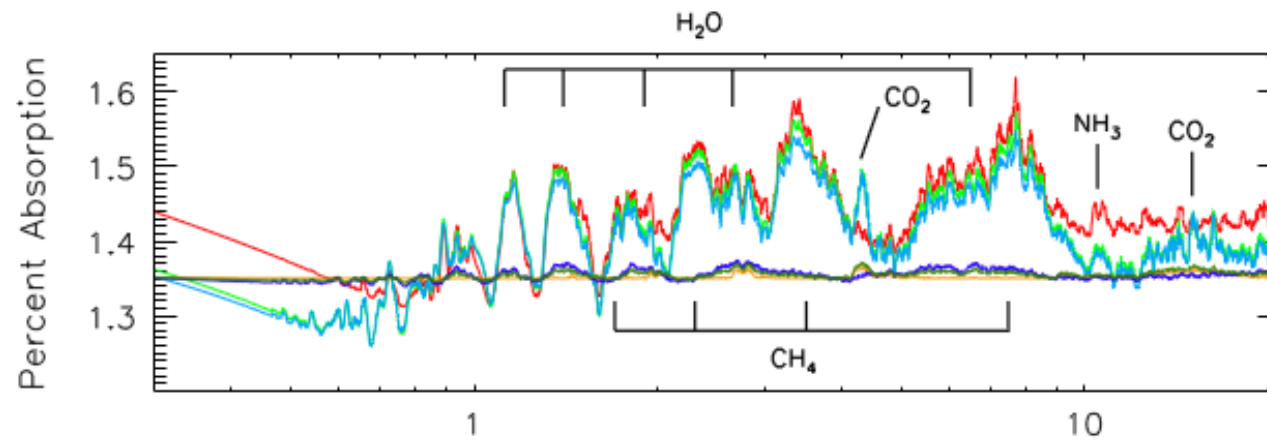
Patchy distribution  
(clouds)



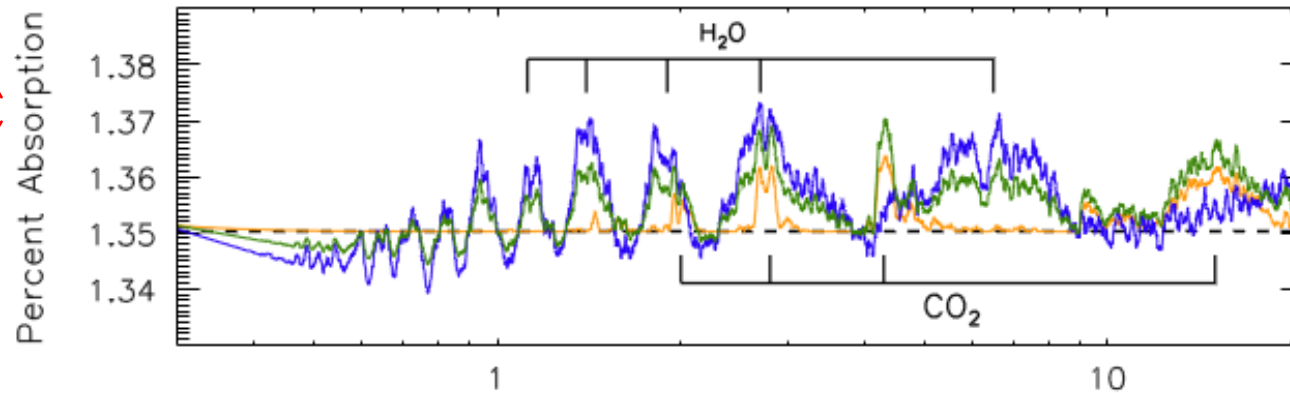
# Model prediction

Depth  $\sim 0.01 - 0.1 \%$

0.1 %  $\updownarrow$



0.01%  $\updownarrow$



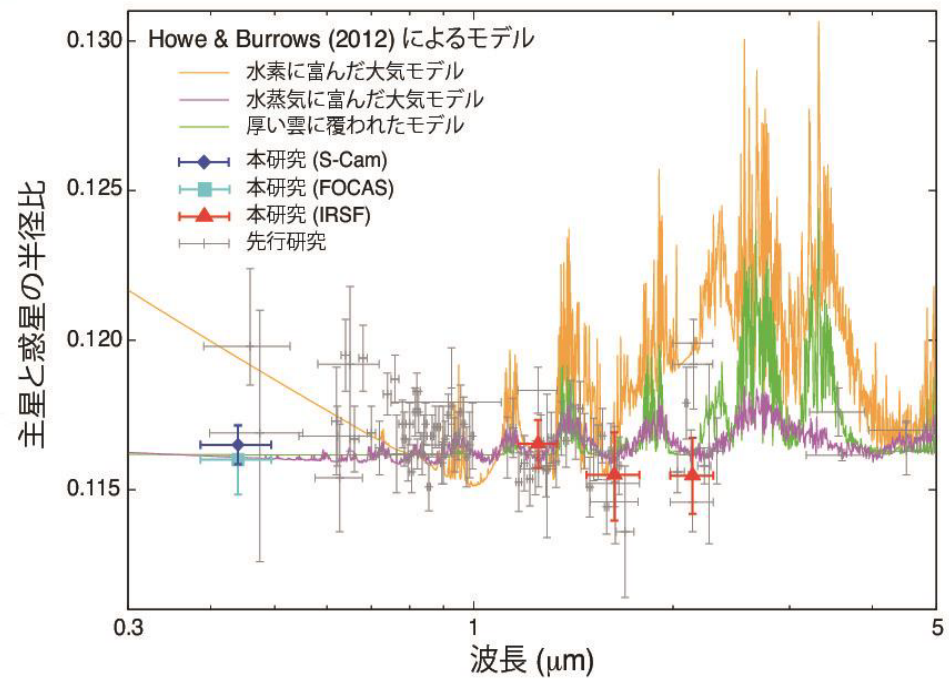
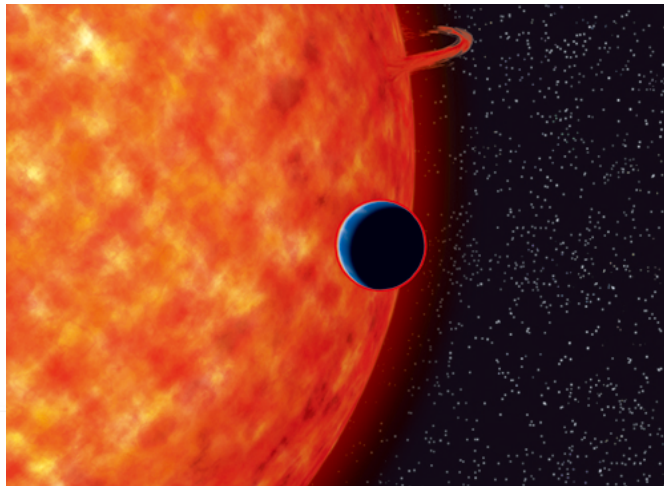
Benneke & Seager 2013)

# GJ 1214b

## 水蒸気大気?

低分散分光、測光トランジット

Narita+ 2013

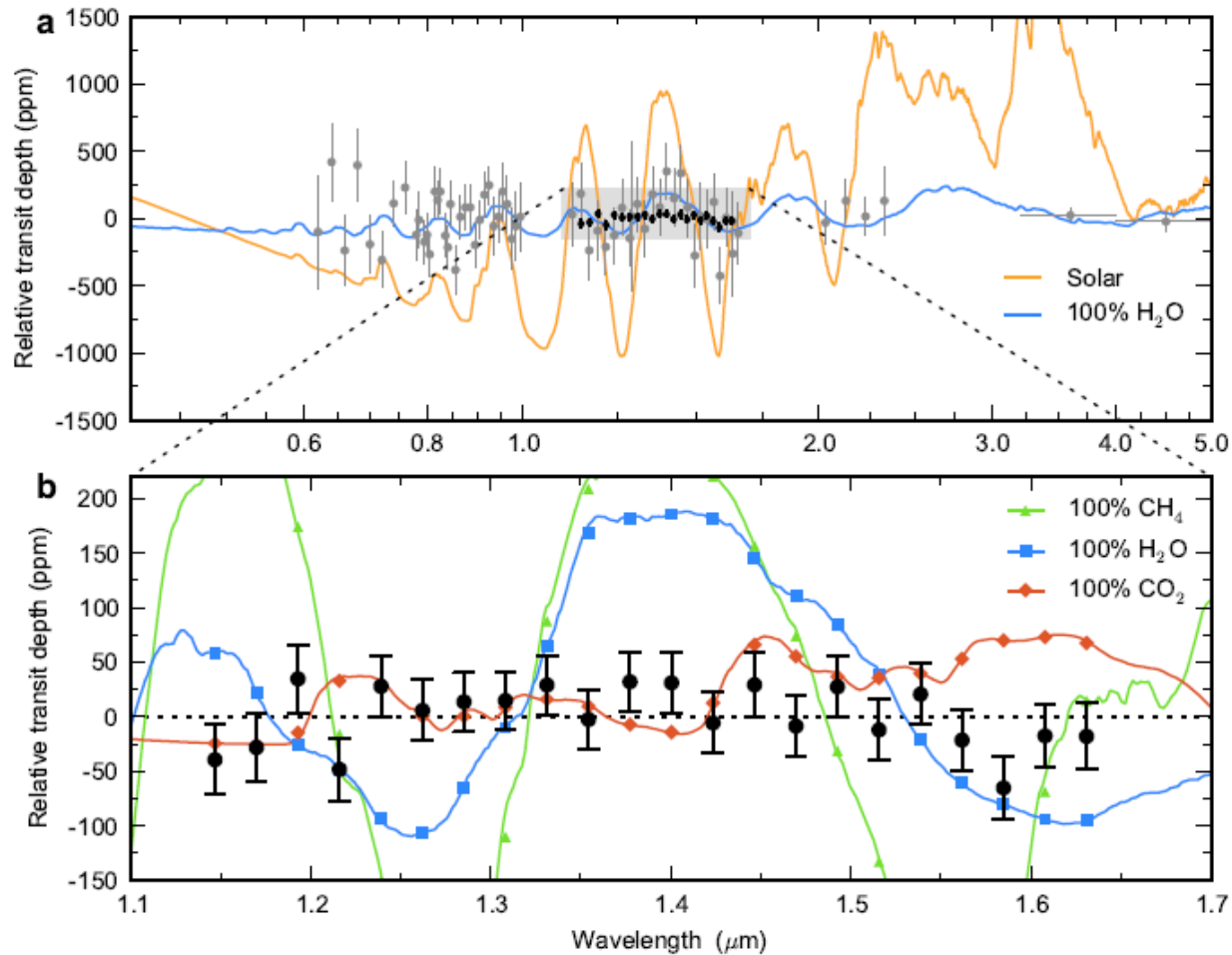


近赤外線には多くの分子 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ...) 吸収

# Hubble望遠鏡による最近の高精度観測

## 雲の大気

Kreidberg+ (2014)



分光分解能~70  
12 transits  
の重ね合わせ

誤差  
30ppm

唯一、衛星での分光トランジット

# EChO

~~Cosmic Vision 2015-2025 Plan M3 candidate~~

近・中間赤外線分光トランジット観測衛星

~~2022-24?~~

0.55-11.0 $\mu\text{m}$ 、 $10^{-4}$ の精度

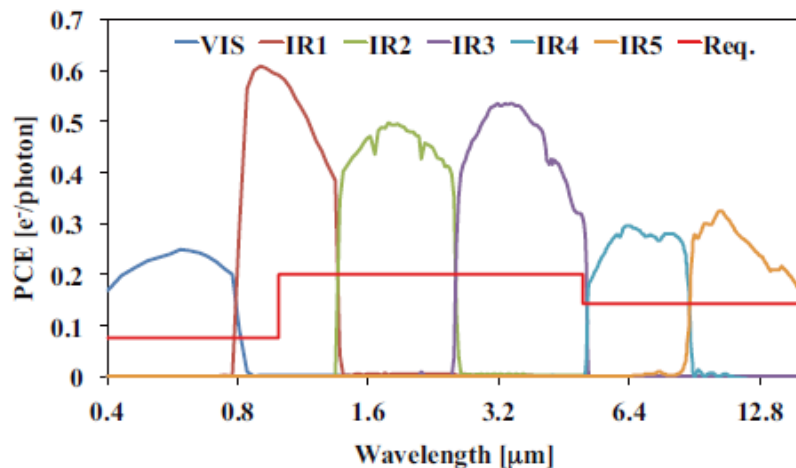
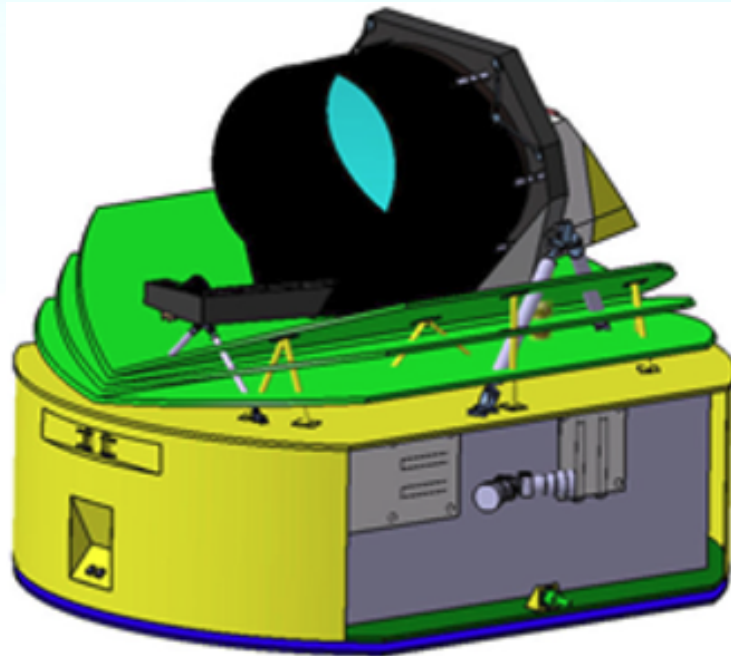
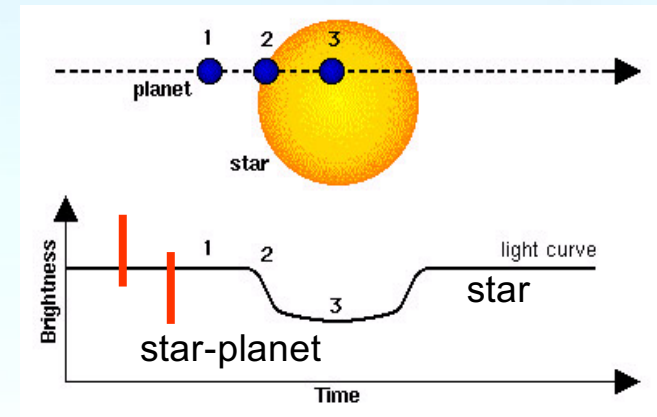


Table 2. Key figures of the EChO instrument

Parameter	Performance
Wavelength coverage:	400 nm – 16 $\mu\text{m}$ , separated in 6 channels
Spectrometer channels:	VIS (0.40 – 0.80 $\mu\text{m}$ ), IR1 (0.70 – 1.40 $\mu\text{m}$ ), IR2 (1.32 – 2.64 $\mu\text{m}$ ), IR3 (2.58 – 5.16 $\mu\text{m}$ ), IR4 (5.00 – 9.00 $\mu\text{m}$ ), IR5 (8.60 – 16.0 $\mu\text{m}$ )
Spectral Resolution:	300 – 600 for VIS, IR1, IR2, IR3 100 – 180 for IR4, IR5
FoV:	30 arcsec in spatial, 13 arcsec in spectral direction
Pixel plate scale:	385 mas / pixel for VIS, IR1, IR2, IR3 802 mas / pixel for IR4, IR5
Detectors:	MCT (H2RG) for VIS, IR1, IR2, IR3 Si:As for IR4, IR5
Cooling:	55 K passive – instrument base temperature 15 K / 7 K active with cryocoolers for IR4, IR5
Total Mass:	97 kg for cold instrument unit 67 kg for warm electronics and cooler compressors
Electrical Consumption:	34.2 W + 133 W for Cooler Electronics

4年の運用

地上で  
10<sup>-4</sup>のコントラストを達成できるか

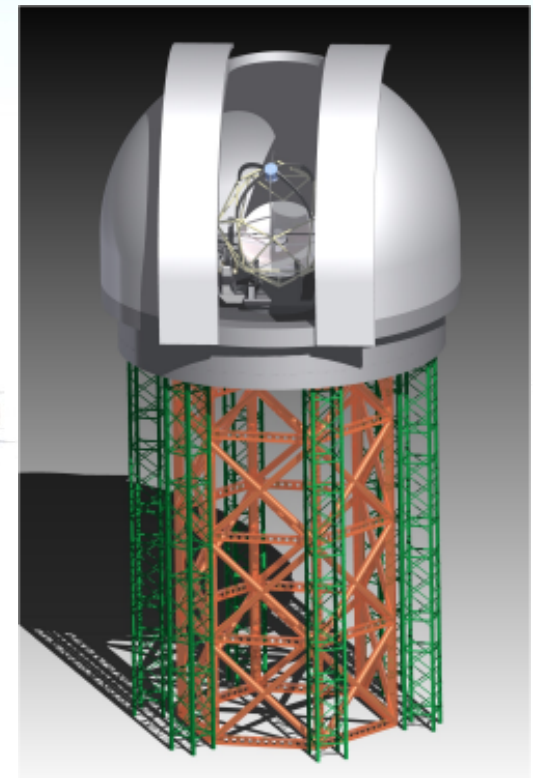
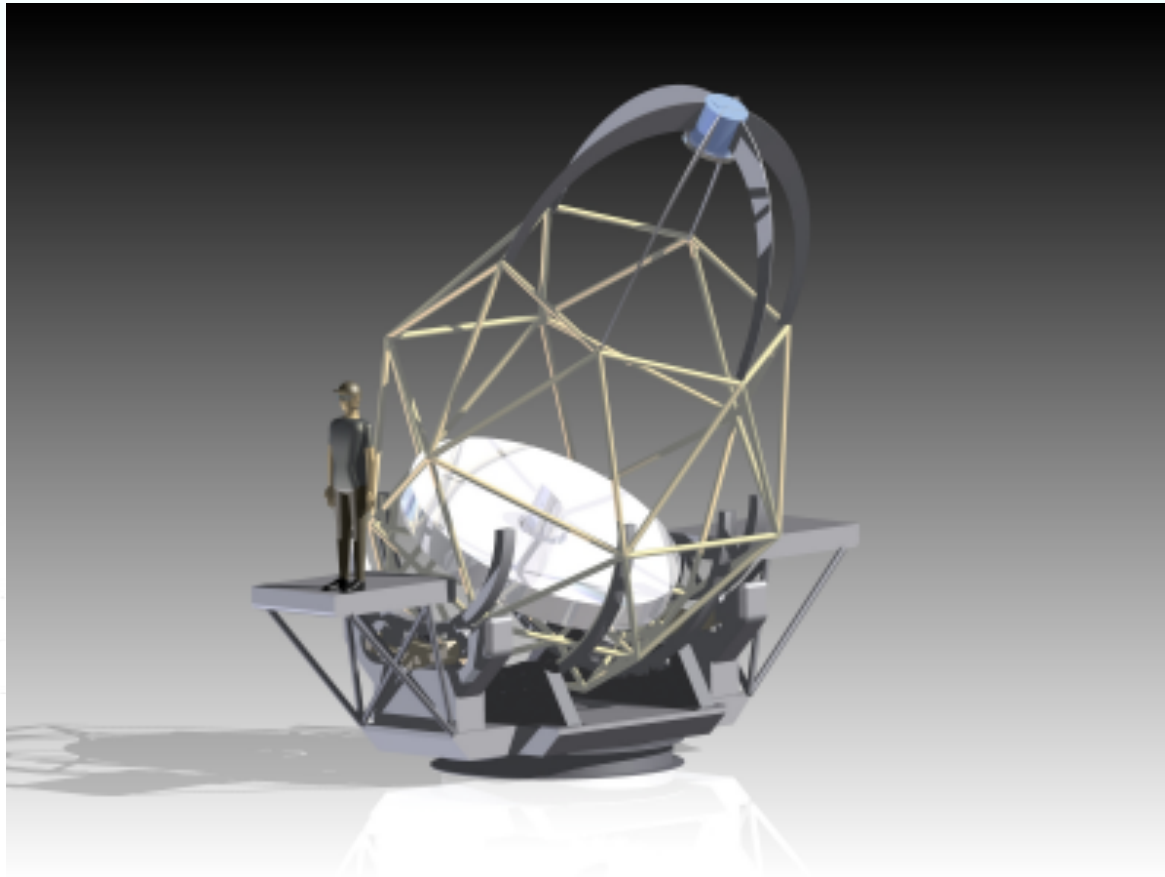


Deeg (2013)

分光トランジット観測に必要な要素

- 高いS/N (Sが大きい and/or Nが小さい)
- 高い透明度
- 安定した大気
- 長期間連続観測
- 専用望遠鏡
- 高精度の望遠鏡・観測装置

## ➤ 2.5m 赤外線望遠鏡

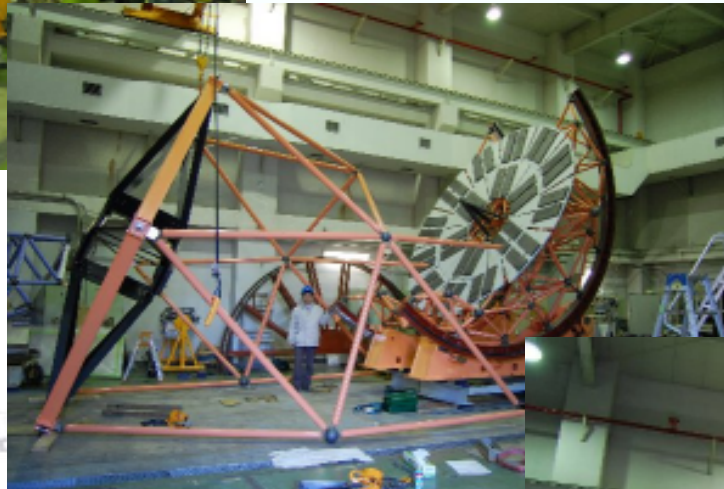


京都大学の岡山3.8mの技術

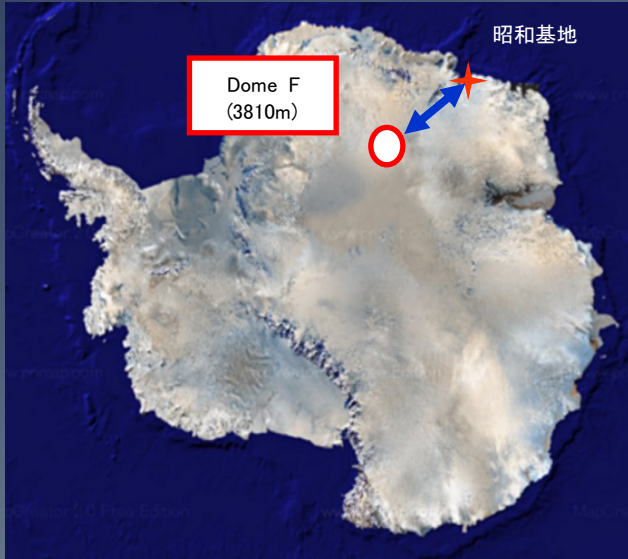
約5億円

# Okayama 3.8m telescope

New technology of telescope mount  
Kurita+ (2009)

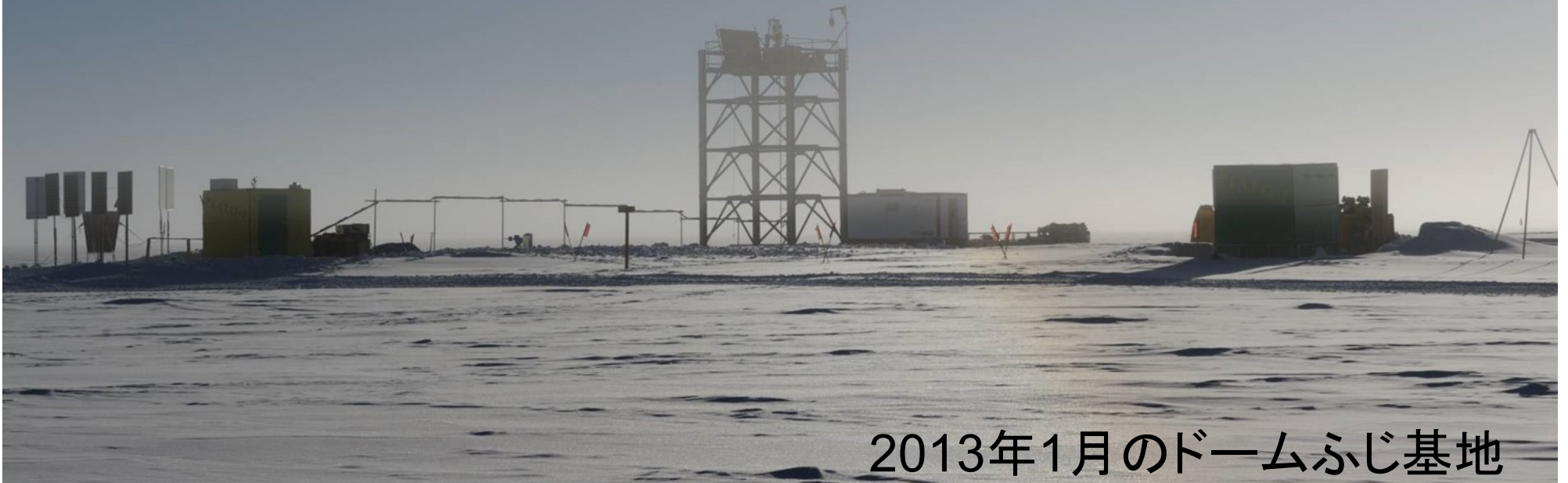


- Light weight
- Easy to assemble



# なぜ南極で赤外線観測

既存の技術で、南極の好環境を生かす



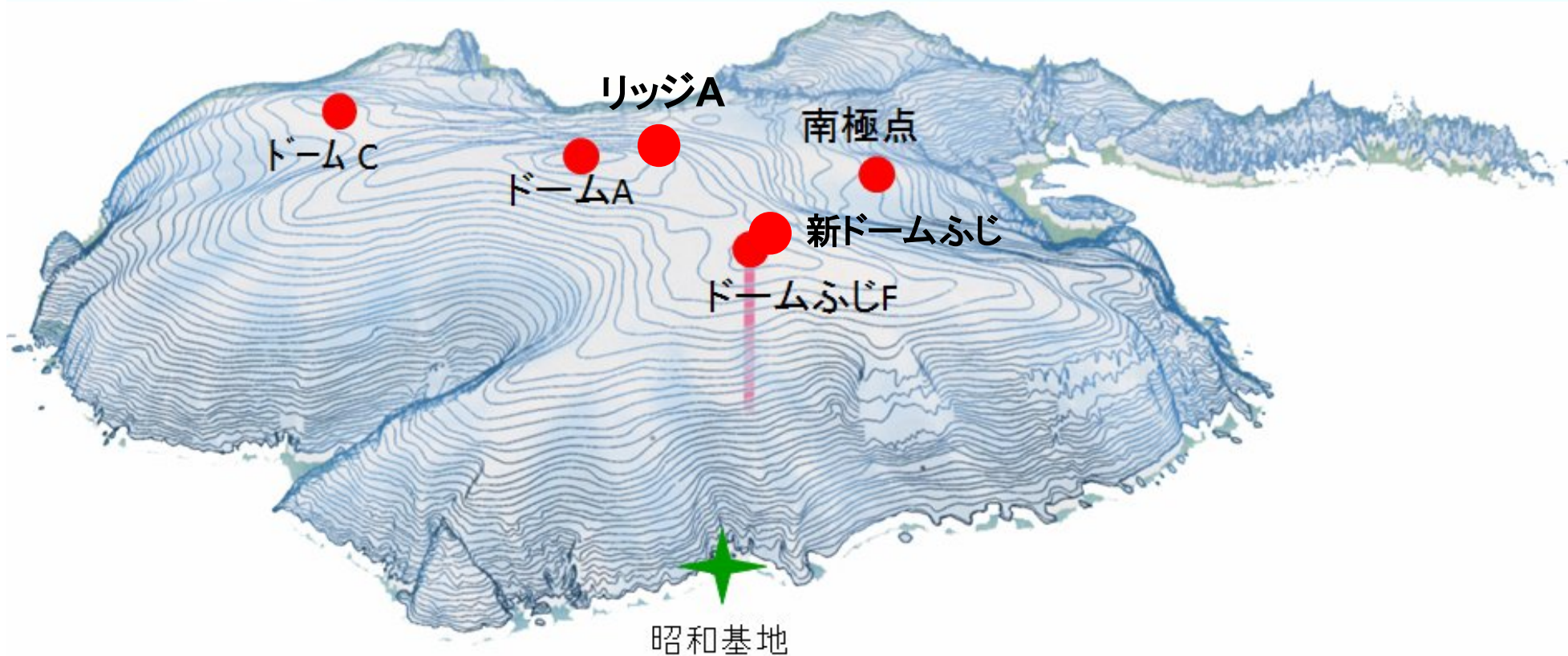
2013年1月のドームふじ基地



# 極地研南極ドームふじ基地の天文観測所



ドームは常に高気圧帯で大気が安定



# ➤ サイト調査 2006-2013

## 大気擾乱

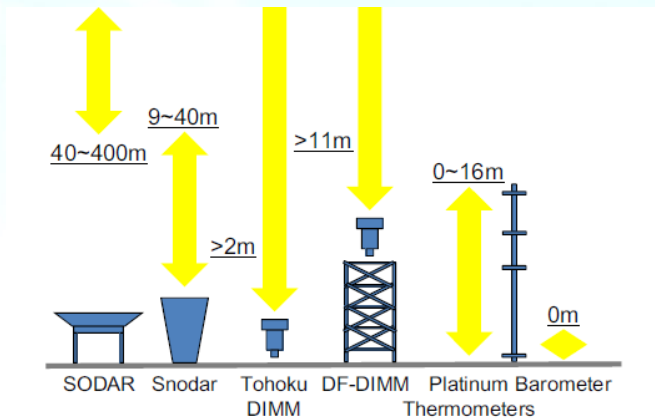
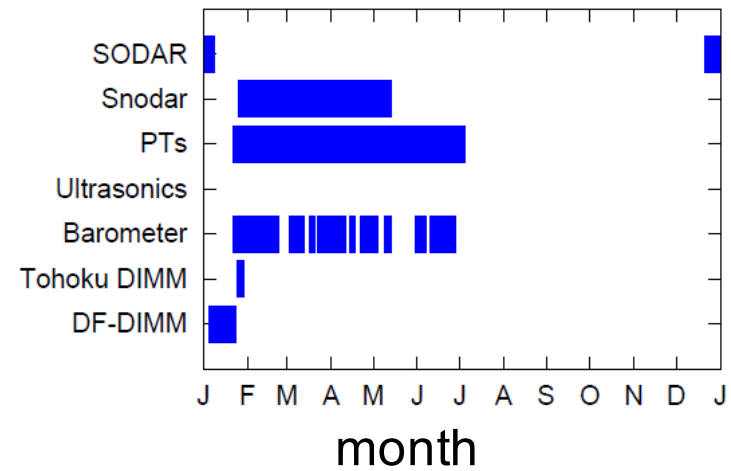
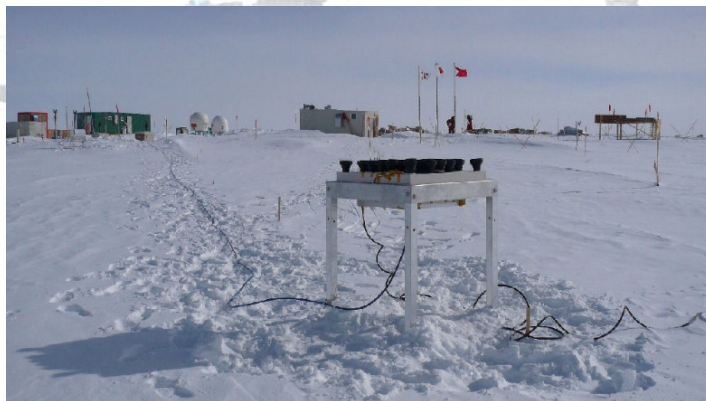


Figure 5.1: Measurement ranges of the height for each instrument.

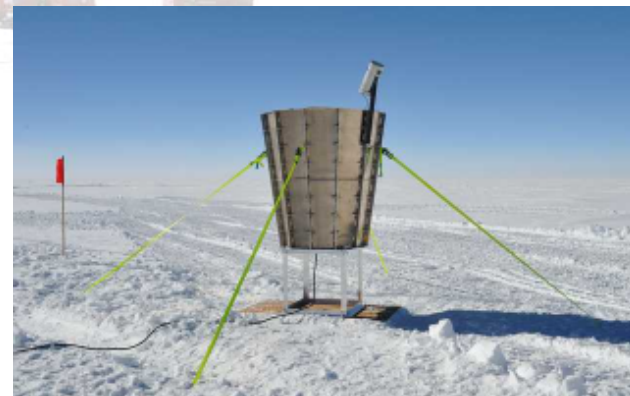


### SODAR (NOAJ)

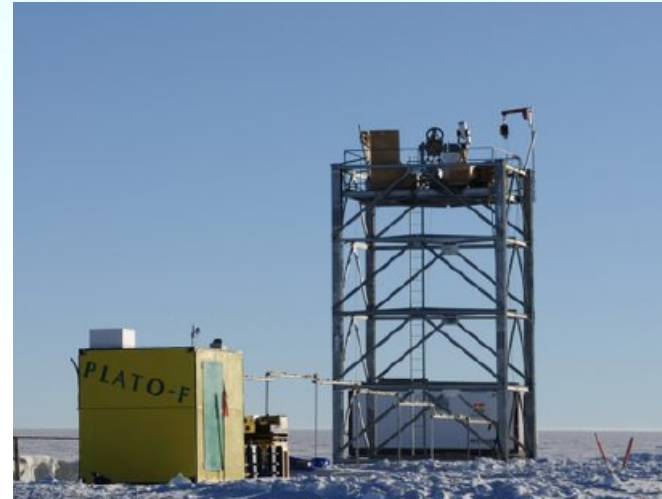
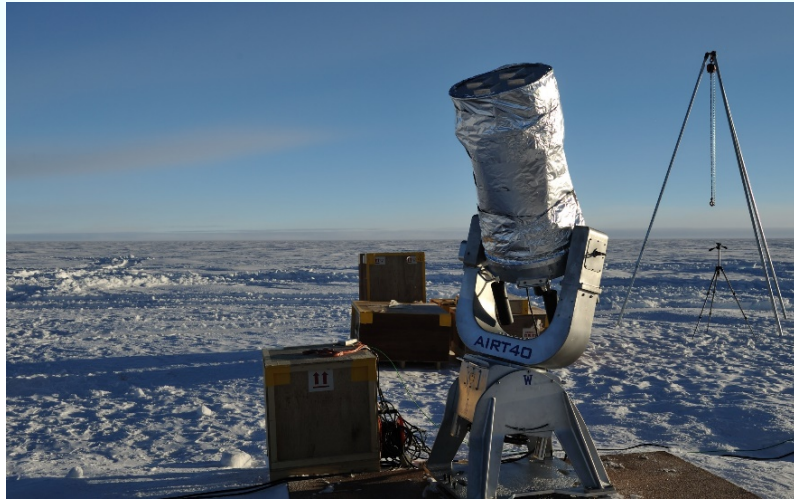


Takato (2006)

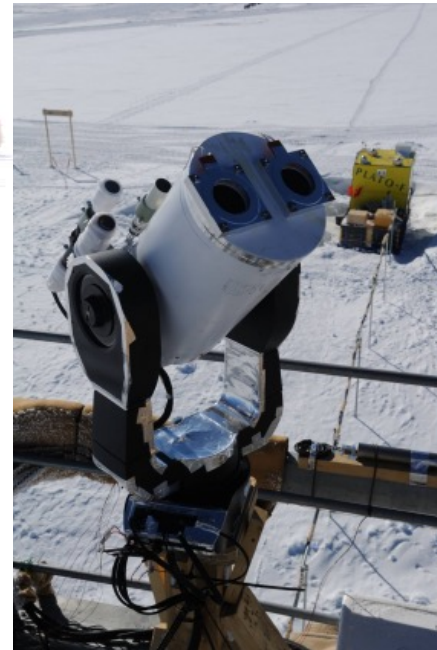
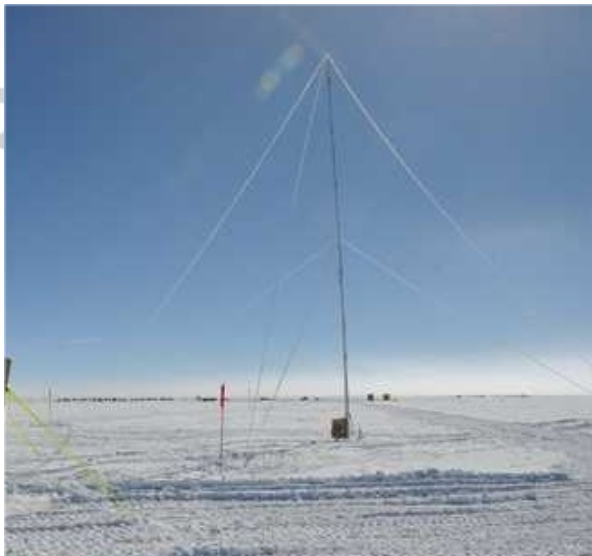
### SNODAR (UNSW)



# シーイング観測



# 温度勾配



# ➤ 高い大気安定性

大気の擾乱

Okita+ 2014

ドームふじの夏

ドームふじの冬

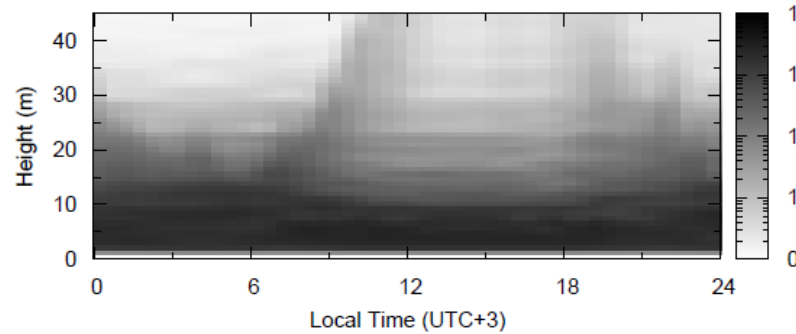


Figure 7.6: Same as Fig. 7.5, but for the Antarctic summer from February 24:00 (UTC+3), 2011.

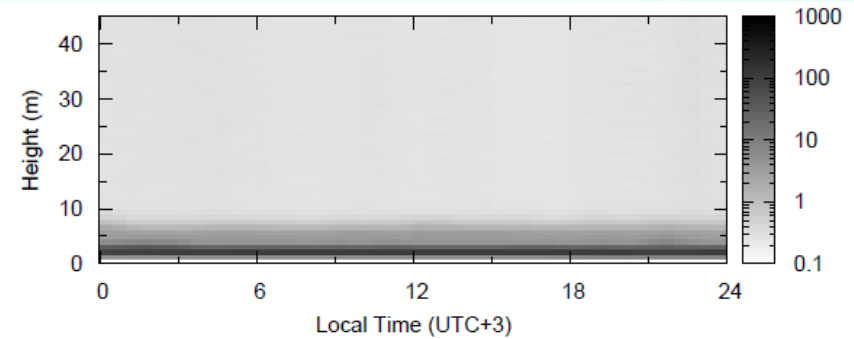
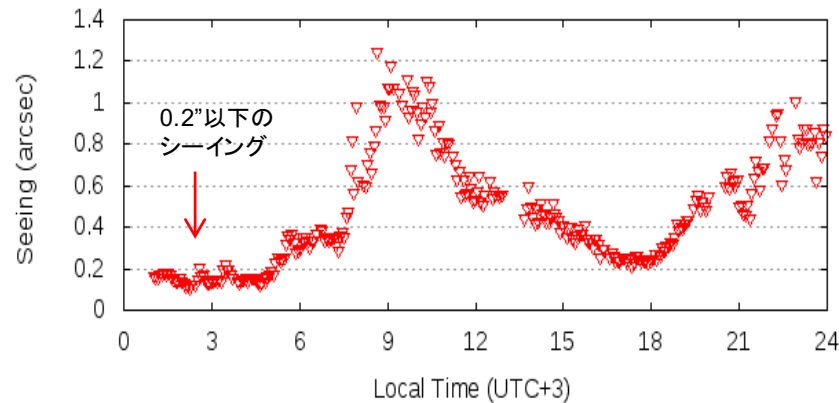


Figure 7.8: Same as Fig. 7.5, but for the Antarctic winter from May 3 00:00 to 24:00 (UTC+3), 2011.

Astronomical Seeing at Dome Fuji on January 6, 2013

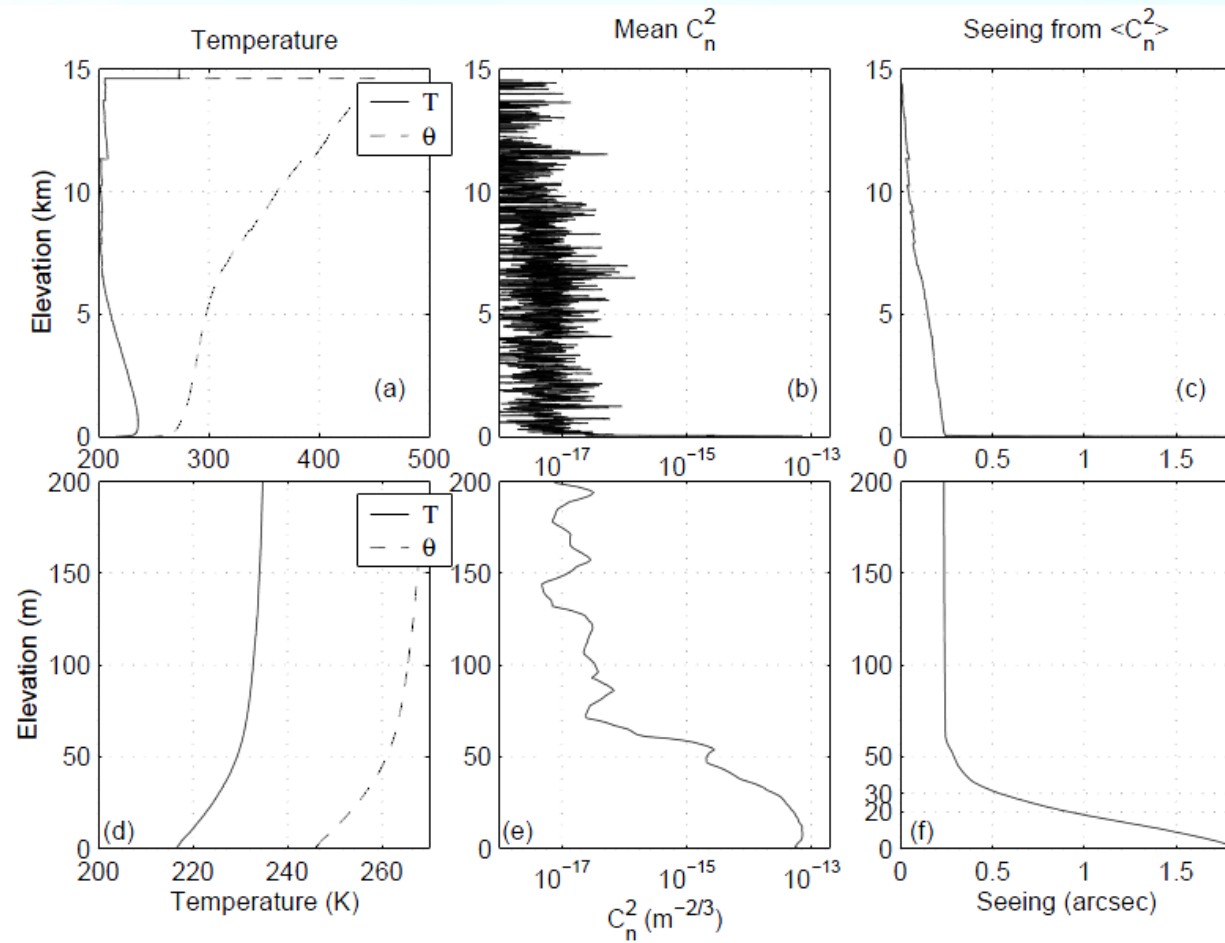


冬は0.25”(可視光)のシーイング

1.25 $\mu$ m以上では回折限界

# 上空大気の安定性

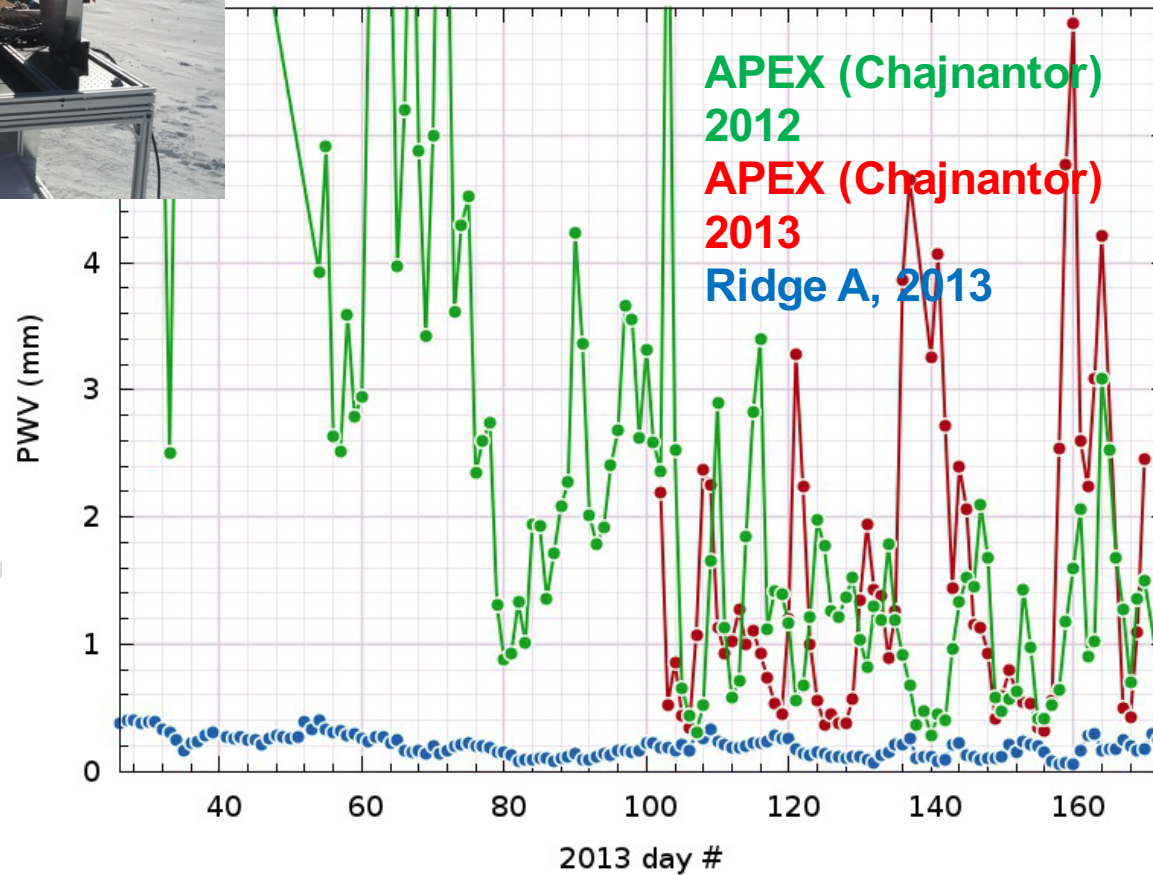
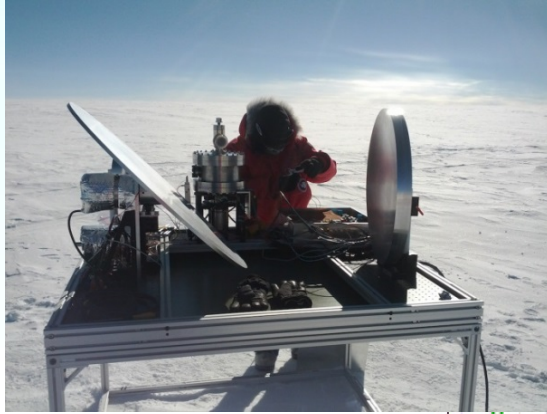
冬のドームC Agabi+2005



大気の擾乱は大半が接地境界層の中で起きている

# 大気の水蒸気量の変化

## Ridge Aでの最近の810GHz観測

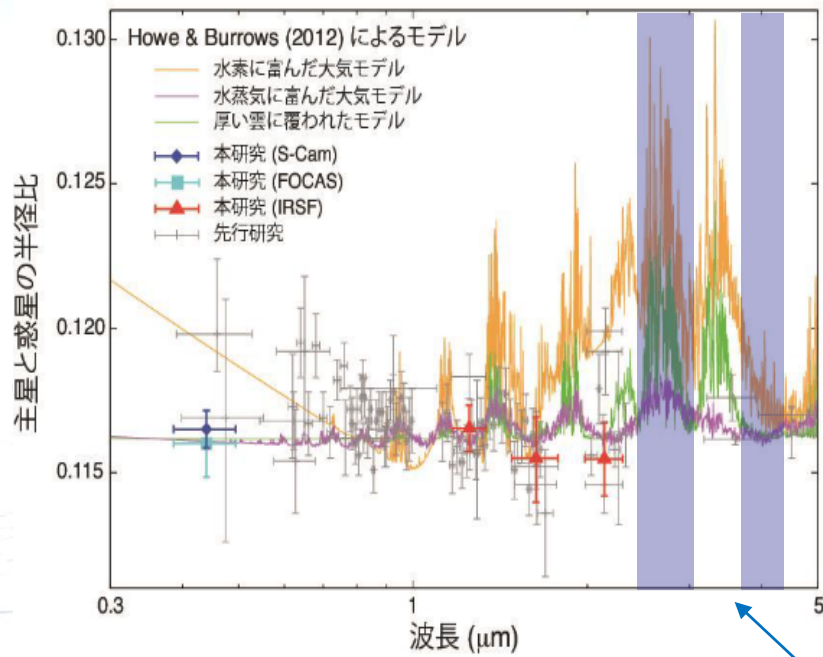


冬のmeidan 0.13mm  
30%は0.1mm以下

Kulesa (2013)

# ➤ 高い透明度

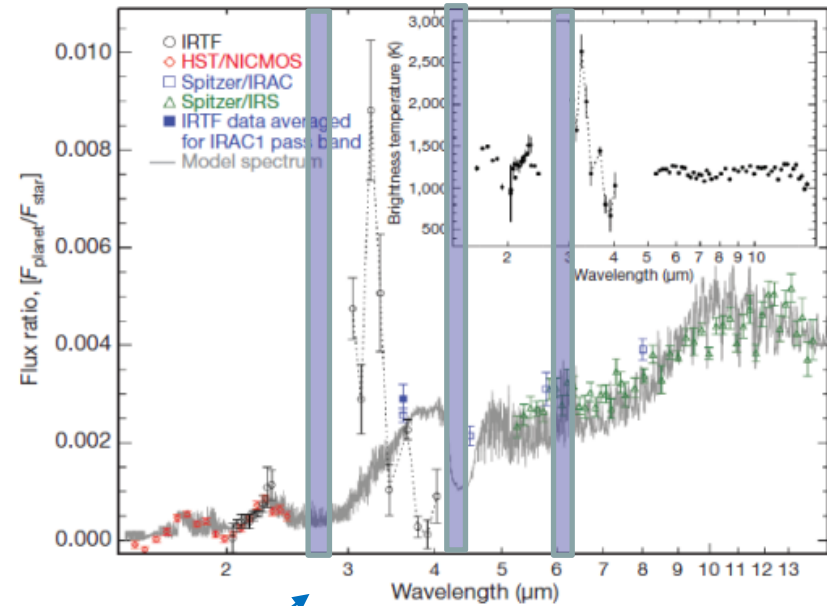
## 第1食トランジット



SuperEarth

南極でも不透明な波長

## 第2食による大気温度

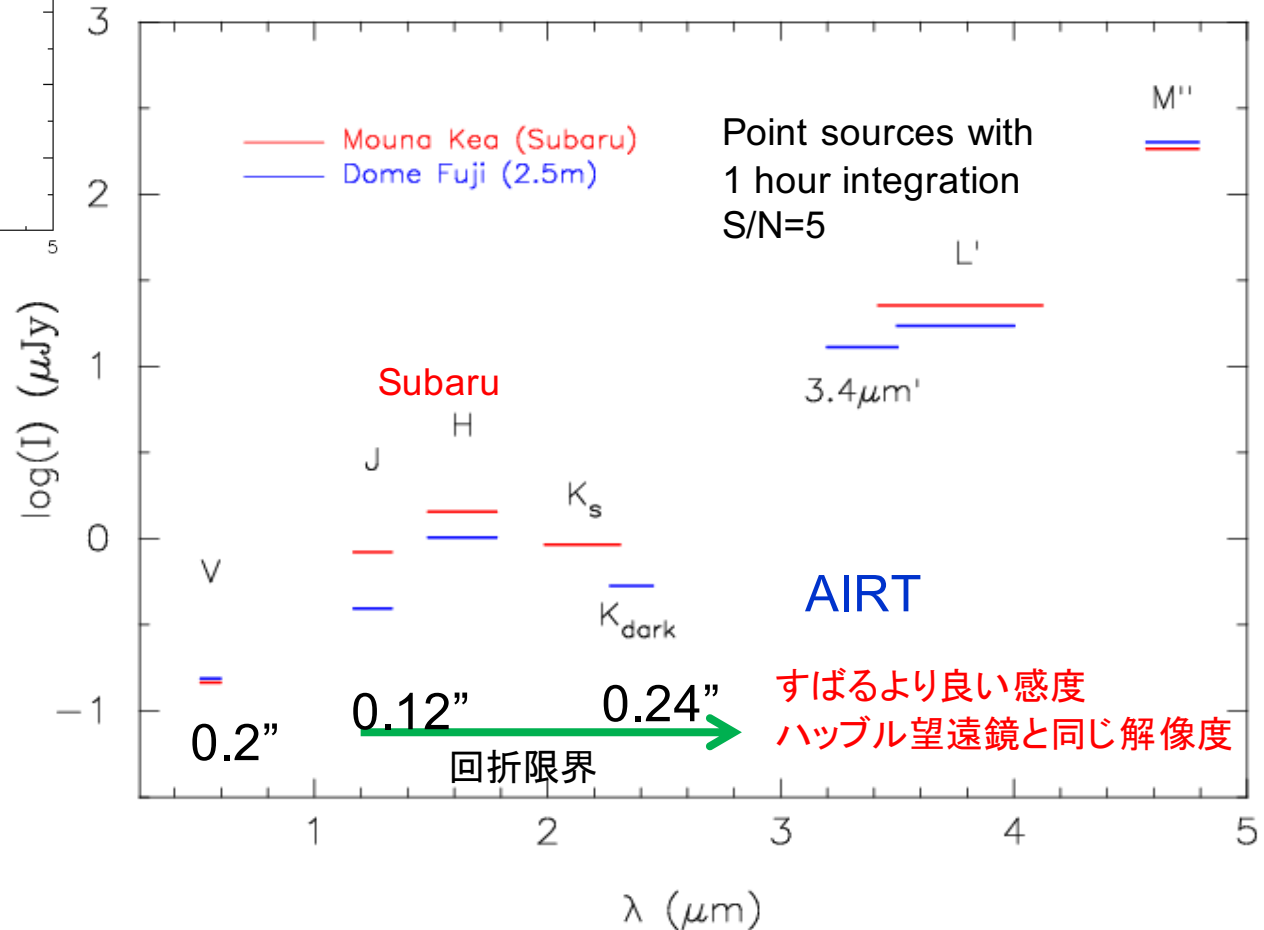
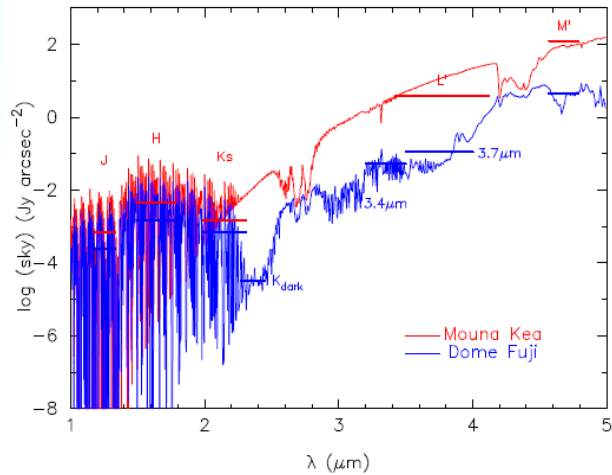


Hot Jupiter



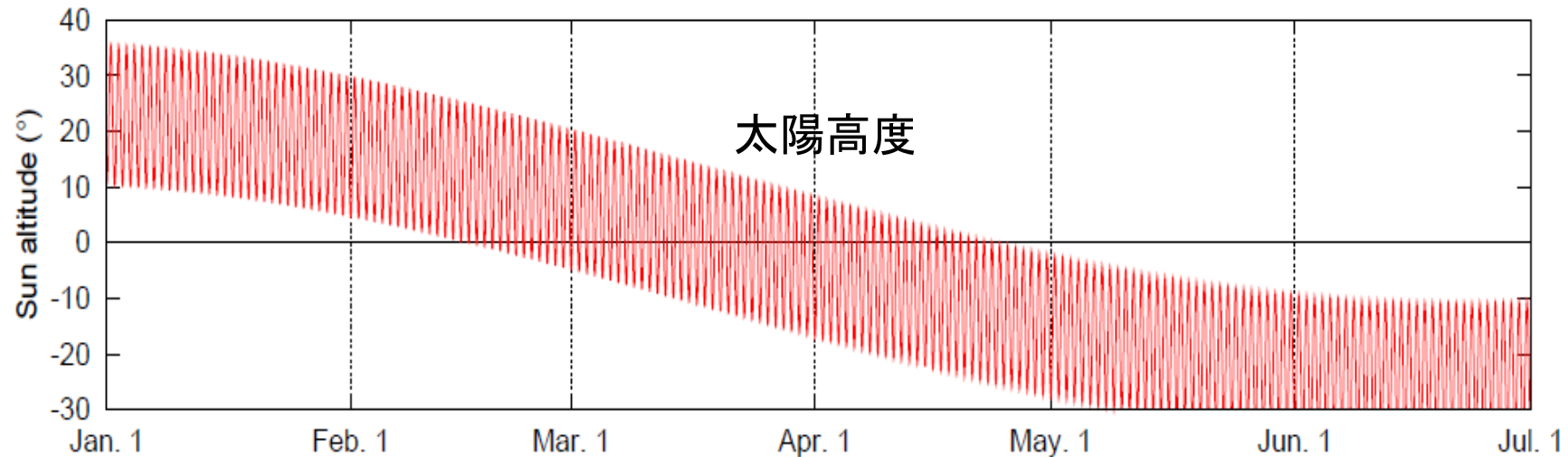
# ➤ 低い大気赤外線放射

## すばる望遠鏡との感度比較



## ➤ 6ヶ月間連続観測

長周期惑星と繰り返し観測



10 $\mu$ m可

>2.5 $\mu$ m可  
(6ヶ月)

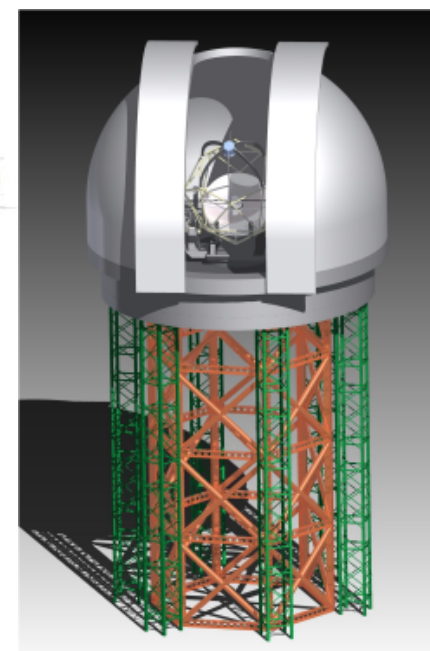
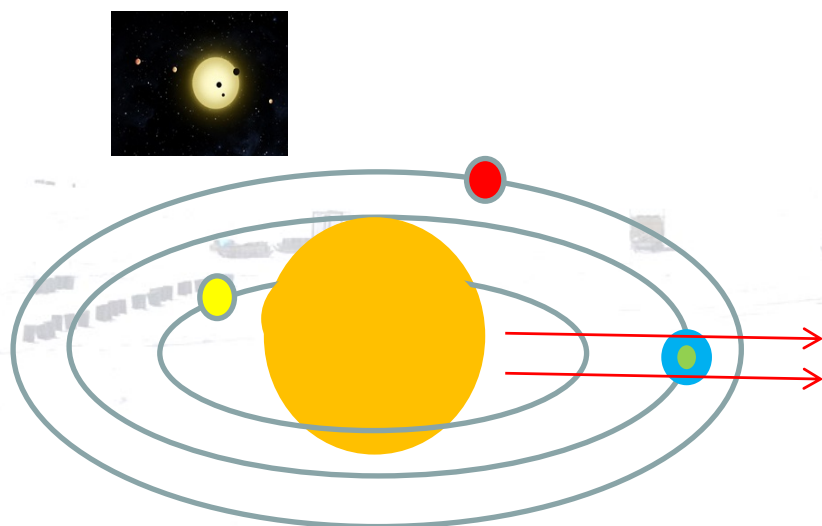
極夜 (4ヶ月)

望遠鏡は夏期も運用可

# 南極2.5m望遠鏡の目的

多数の多惑星系の連続観測による、特に地球型惑星の大気構造の研究

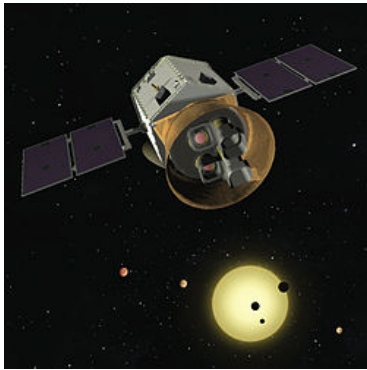
複数の天体を準備し、次々に観測を続ける



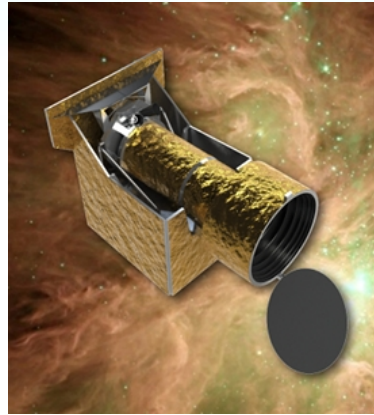
# 多惑星系の候補(南天)

## TESS (2017)

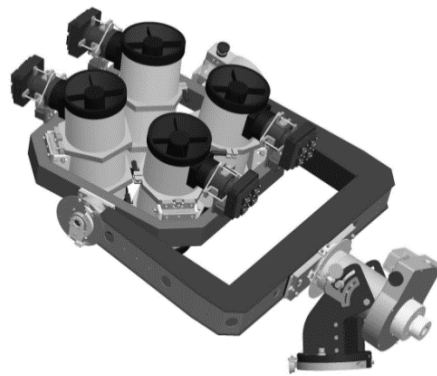
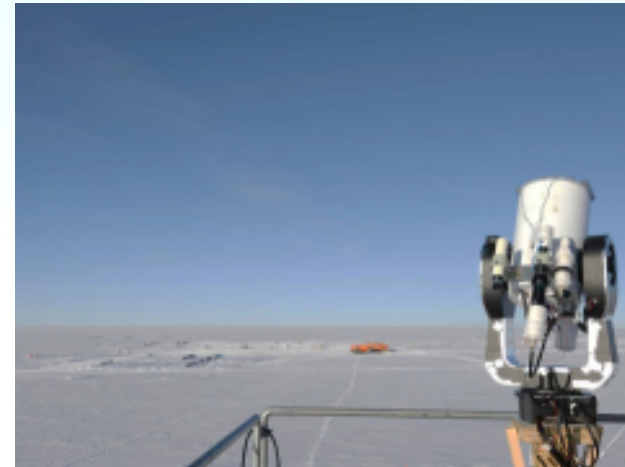
明るいG、K、M型星の地球サイズ惑星の全天トランジット探査



## Cheops(2017?)



## CCD カメラ (Dome-F)



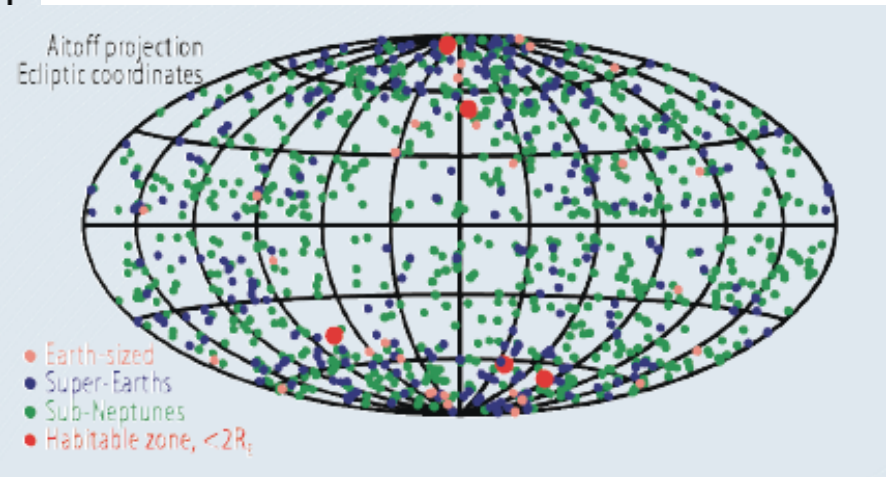
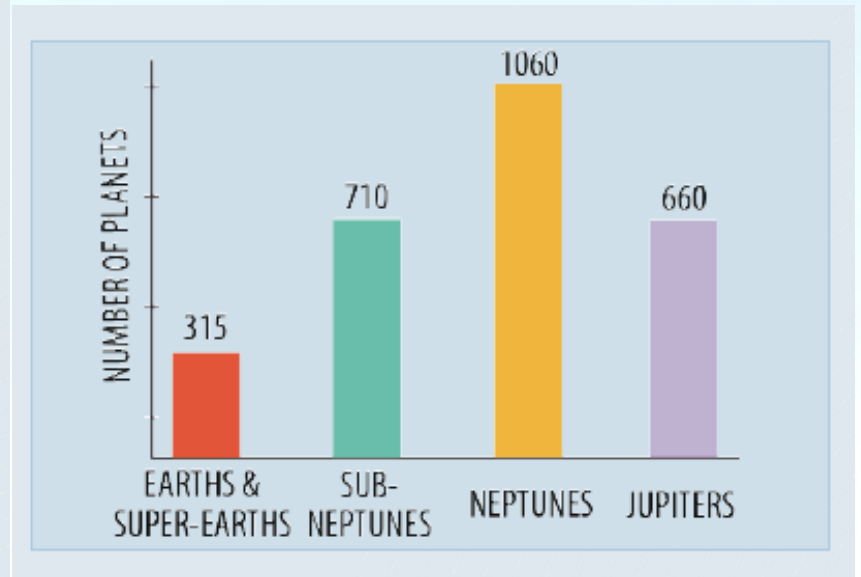
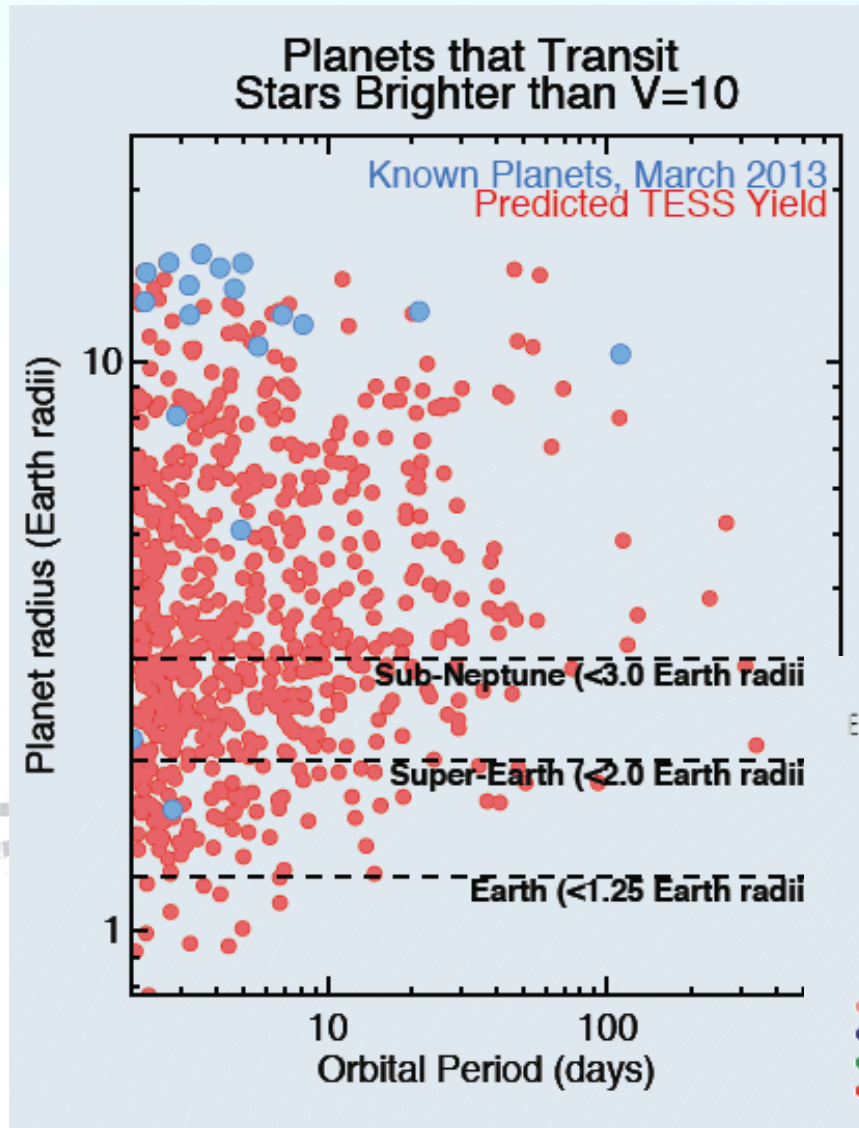
HATSouth



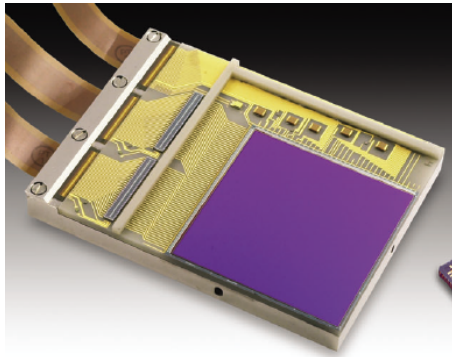
中国 Dome A

50cm Schmidt x3

# TESSによる観測天体数の予測

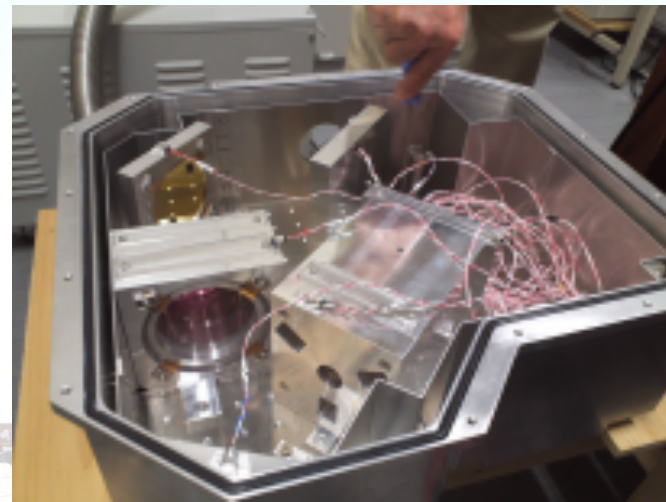


- 三色赤外線カメラ・低分散多天体分光モード付き



InSb 2Kx2K

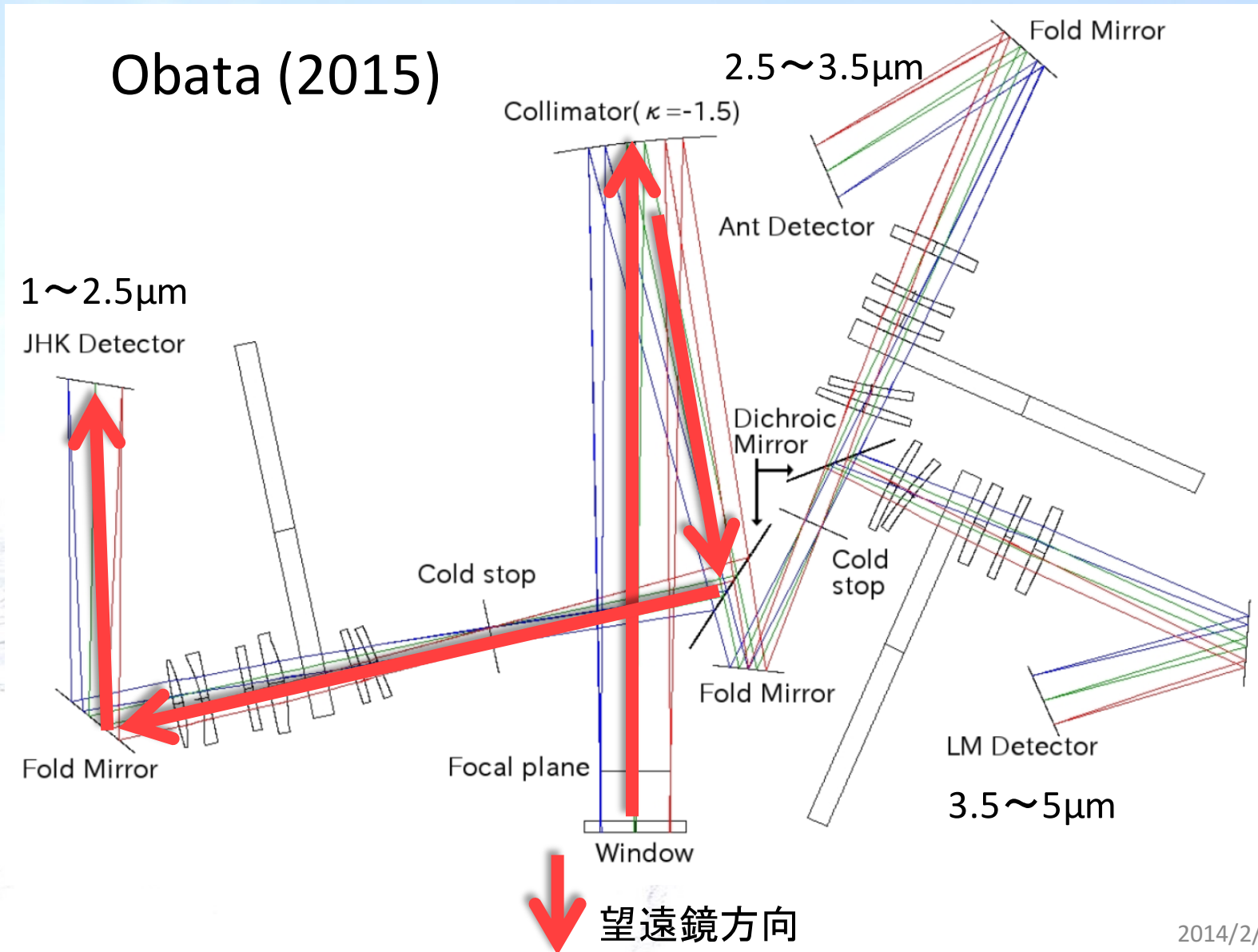
Proto model



Under assembling

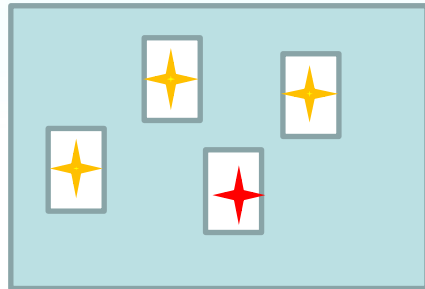
2Kx2K VIRGO (1~2.5 $\mu$ m)  
256x256x2 InSb (2.5~5 $\mu$ m)

# 光学系全体図



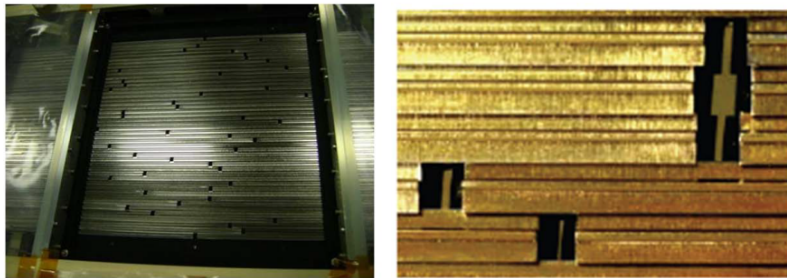
# 系外惑星に特化した多天体分光機能

簡単な多天体用スリットマスク



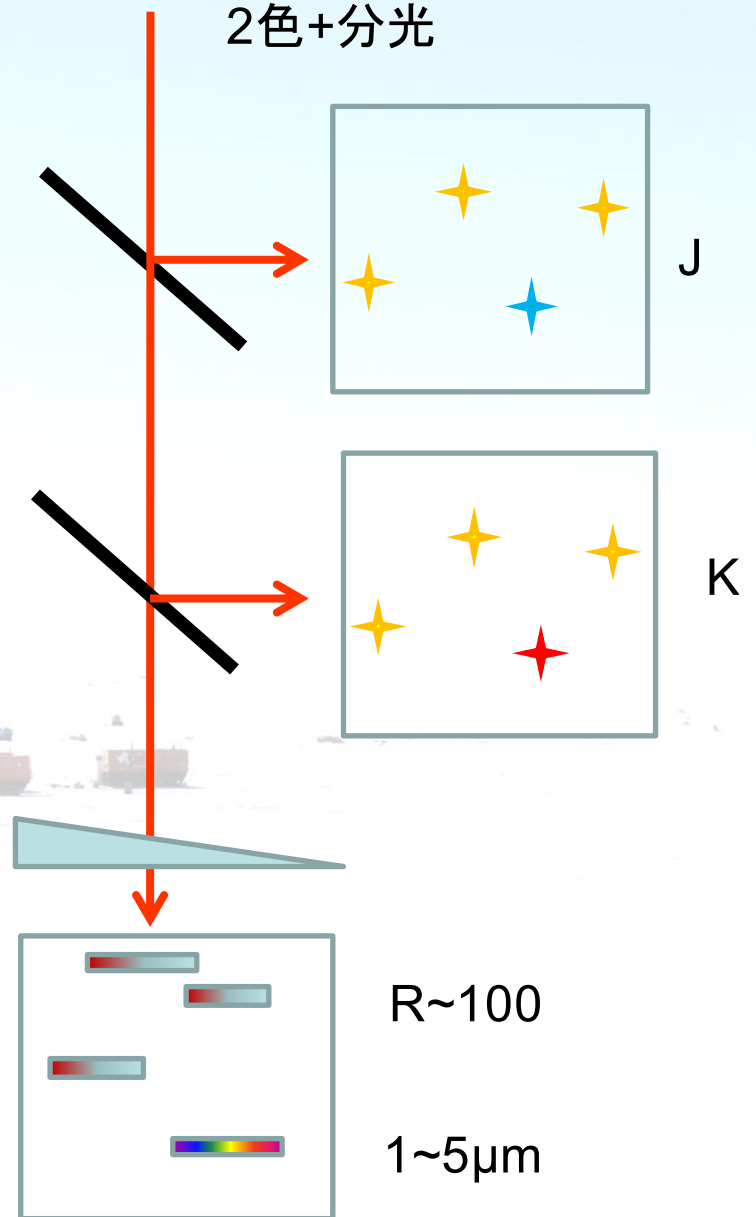
~10 参照星

KECK MOSFIREの例



McLean+ 2010

2色+分光





# まとめ

地上で最もすぐれた天文サイトである南極ドームふじ基地で、2.5m赤外線望遠鏡を用いて、多惑星系のなかでの地球型惑星を含む多様な惑星の大気構造を理解する

