

# 中間赤外レーザーヘテロダイン分光器 MILAH Iを用いた系内惑星大気観測

<sup>1</sup>中川広務, <sup>1,2</sup>青木翔平, <sup>1</sup>笠羽康正, <sup>3</sup>佐川英夫, <sup>1</sup>村田功, <sup>1</sup>高見康介, <sup>4</sup>G. SONNABEND, <sup>5</sup>M. SORNIG, <sup>1</sup>鍵谷将人, <sup>1</sup>坂野井健, <sup>6</sup>J. KUHN, <sup>1</sup>岡野章一, <sup>7</sup>田口真, [1]東北大学, [2]IASP-INAF(伊), [3]京都産業大学, [4]RADIOMETER(独), [5]ケルン大学(独), [6]ハワイ大学(米), [7]立教大学



INAF



ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA  
NATIONAL INSTITUTE FOR ASTROPHYSICS



# 発表の流れ

---

- 序論

  - 赤外レーザーヘテロダイン分光

- MILAHI (中間赤外7-12 $\mu\text{m}$ で波長分解能 $10^{6-7}$ )

  - 東北大学の地上望遠鏡搭載機

  - (NASA・ケルン大含めて世界で3グループのみ;絶滅危惧)

  - 技術課題

- M-DLS (近赤外1.5 $\mu\text{m}$ で波長分解能 $10^8$ )

  - 欧州火星探査Trace Gas Orbiter着陸機搭載(2018年)



# 赤外ヘテロダイン分光

$$R_{TOA} = \varepsilon B(T_{surf})e^{-\tau} + R_{UW}$$

$$I_{het} = R_{TOA} \otimes R_{LO}$$

$$I_{het} = I_{DC} + I_{IF}$$

$$= P_S + P_L + 2\sqrt{P_S P_L} \cos(2\pi\gamma_{IF}t - \varphi)$$

惑星からの赤外信号に局発光源 (赤外レーザ)を混合, ビート信号を高速検出. 数十THzの赤外情報が数GHzの電波領域にダウンコンバートされる.

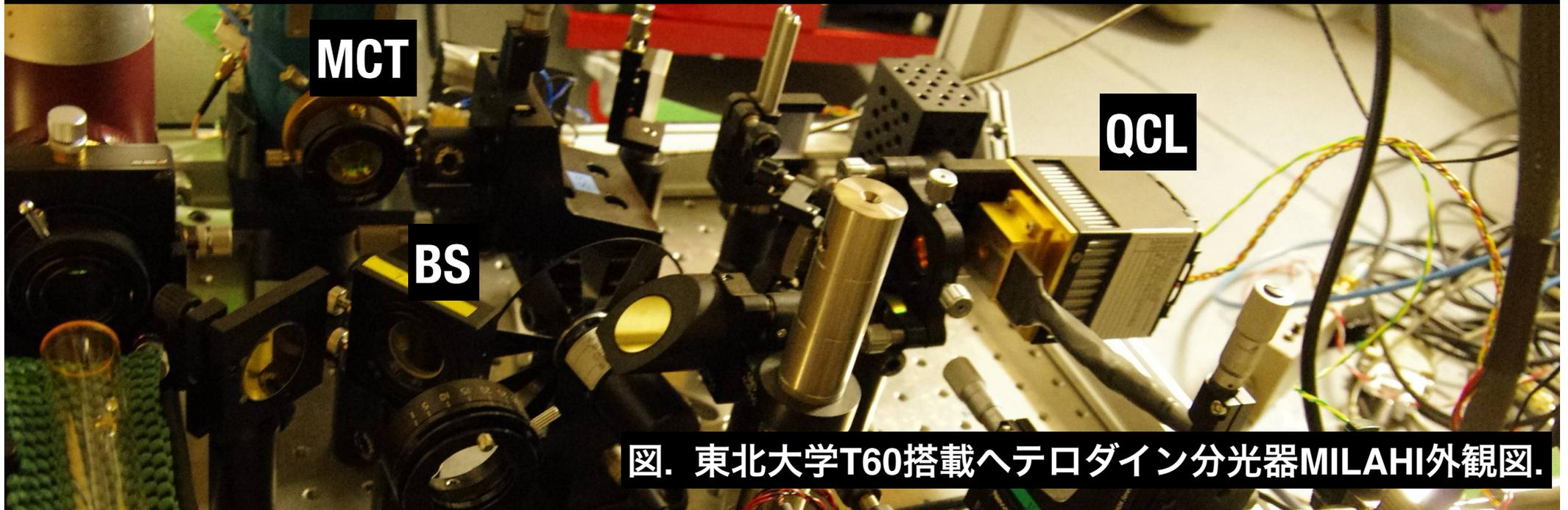
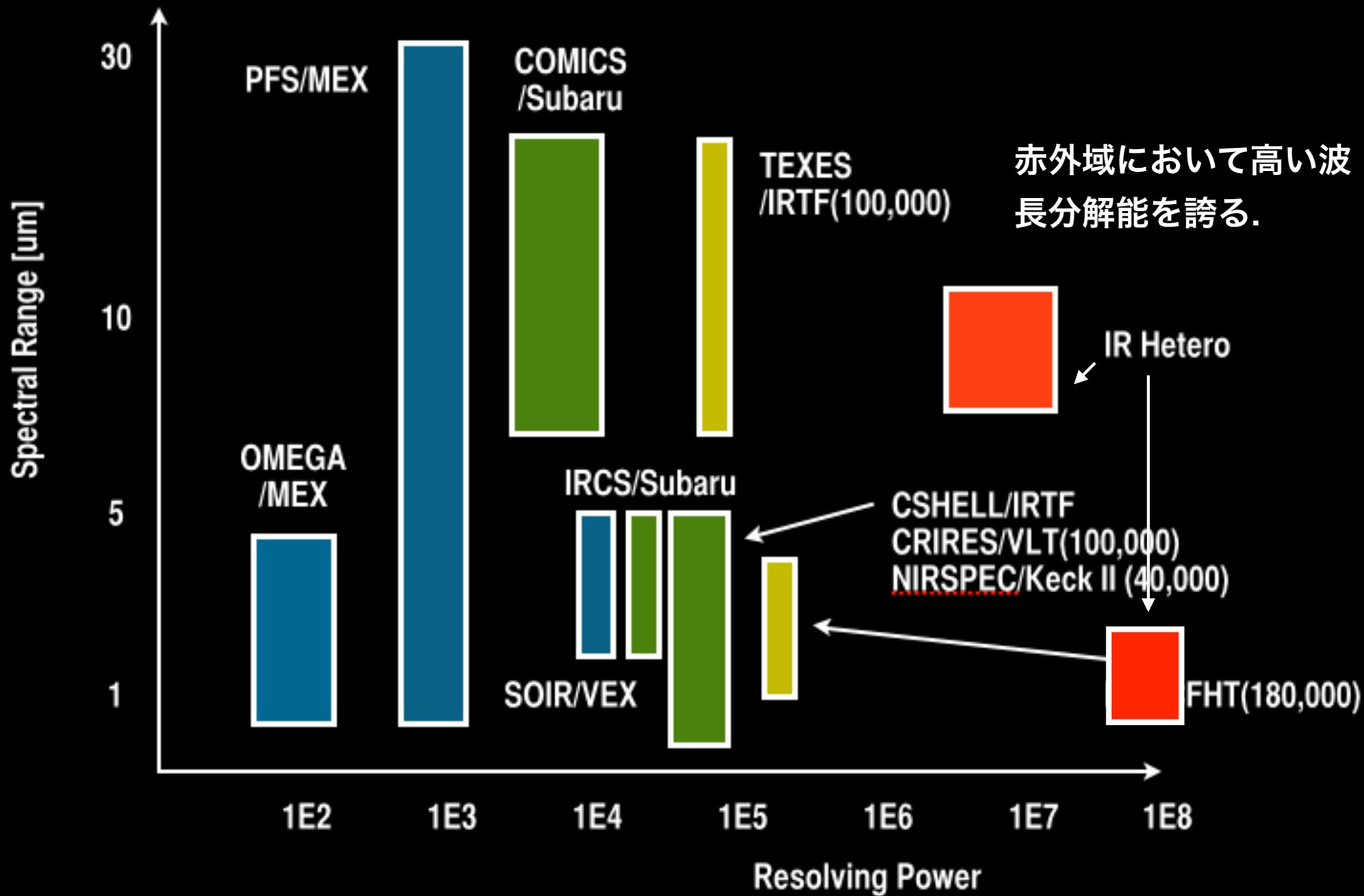


図. 東北大学T60搭載ヘテロダイン分光器MILAHI外観図.



赤外域において高い波長分解能を誇る.

図. 既存測器の赤外域における波長分解能.

# 観測波長の拡張

- LOを追加して7-8 $\mu\text{m}$ に拡張.
- $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{HDO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$  が新たに観測可能に

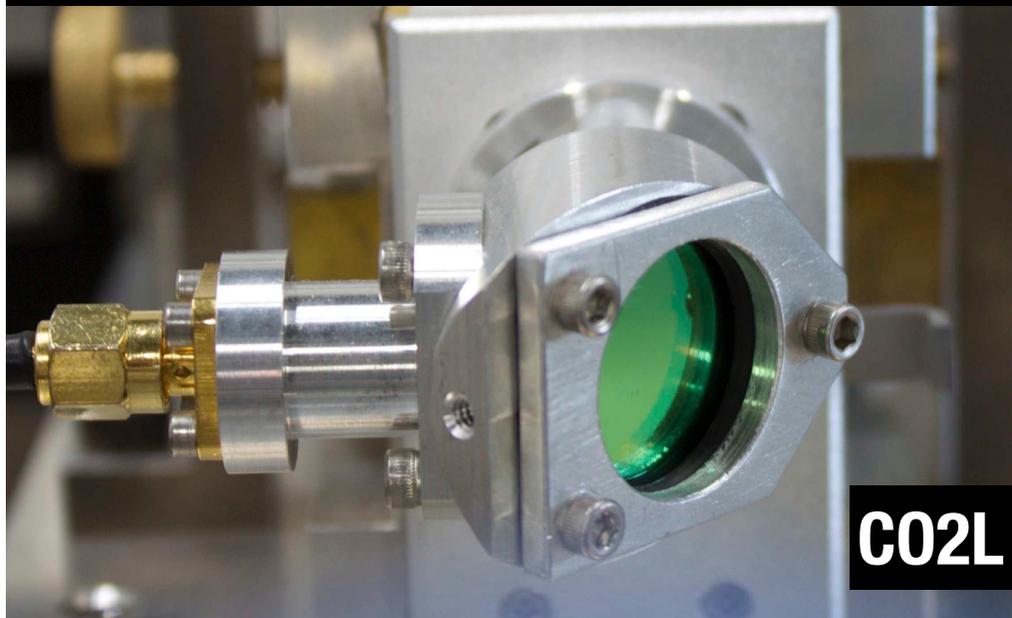
0968-0973 $\text{cm}^{-1}$   
(10.28-10.33 $\mu\text{m}$ )  
1043-1048 $\text{cm}^{-1}$   
(9.54-9.59 $\mu\text{m}$ )

Mar. 2015



Sep. 2015

0934-0955 $\text{cm}^{-1}$  (10.47-10.71 $\mu\text{m}$ )  
0968-0973 $\text{cm}^{-1}$  (10.28-10.33 $\mu\text{m}$ )  
0967-0985 $\text{cm}^{-1}$  (10.15-10.34 $\mu\text{m}$ )  
1032-1058 $\text{cm}^{-1}$  (9.45-9.69 $\mu\text{m}$ )  
1043-1048 $\text{cm}^{-1}$  (9.54-9.59 $\mu\text{m}$ )  
1071-1087 $\text{cm}^{-1}$  (9.20-9.34 $\mu\text{m}$ )  
1293-1297 $\text{cm}^{-1}$  (07.71-07.73 $\mu\text{m}$ )



# 発振波長域・可変波長域の拡充

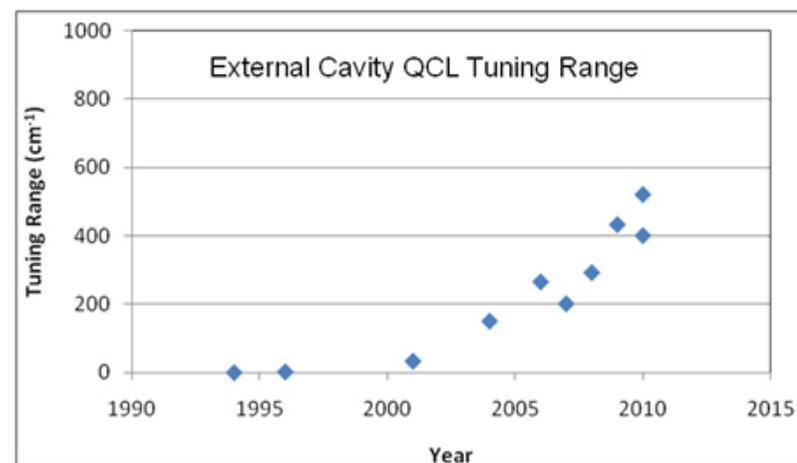
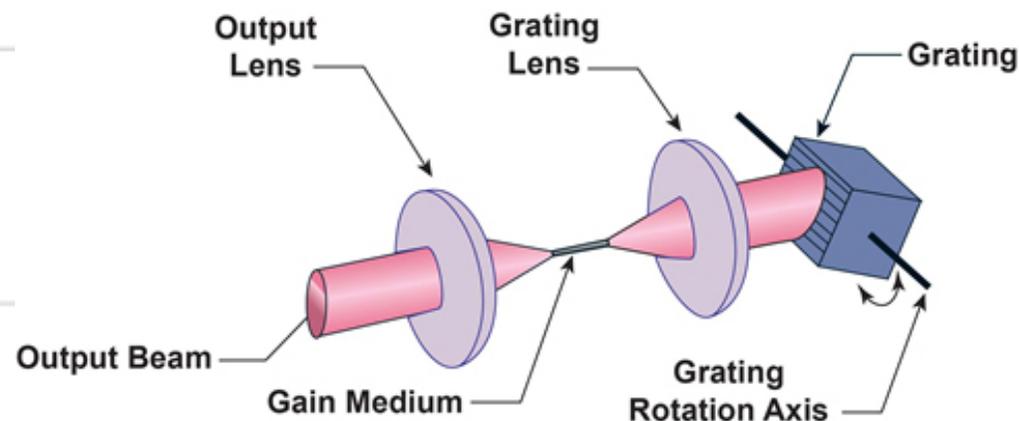
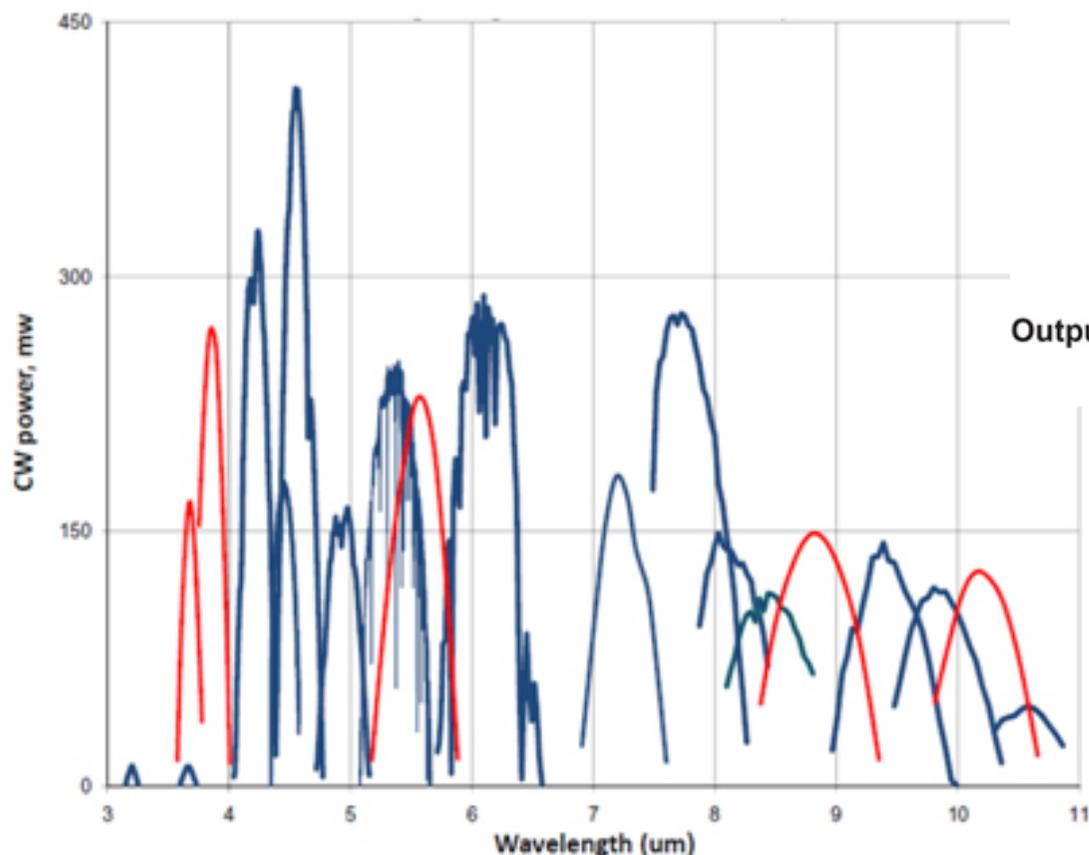
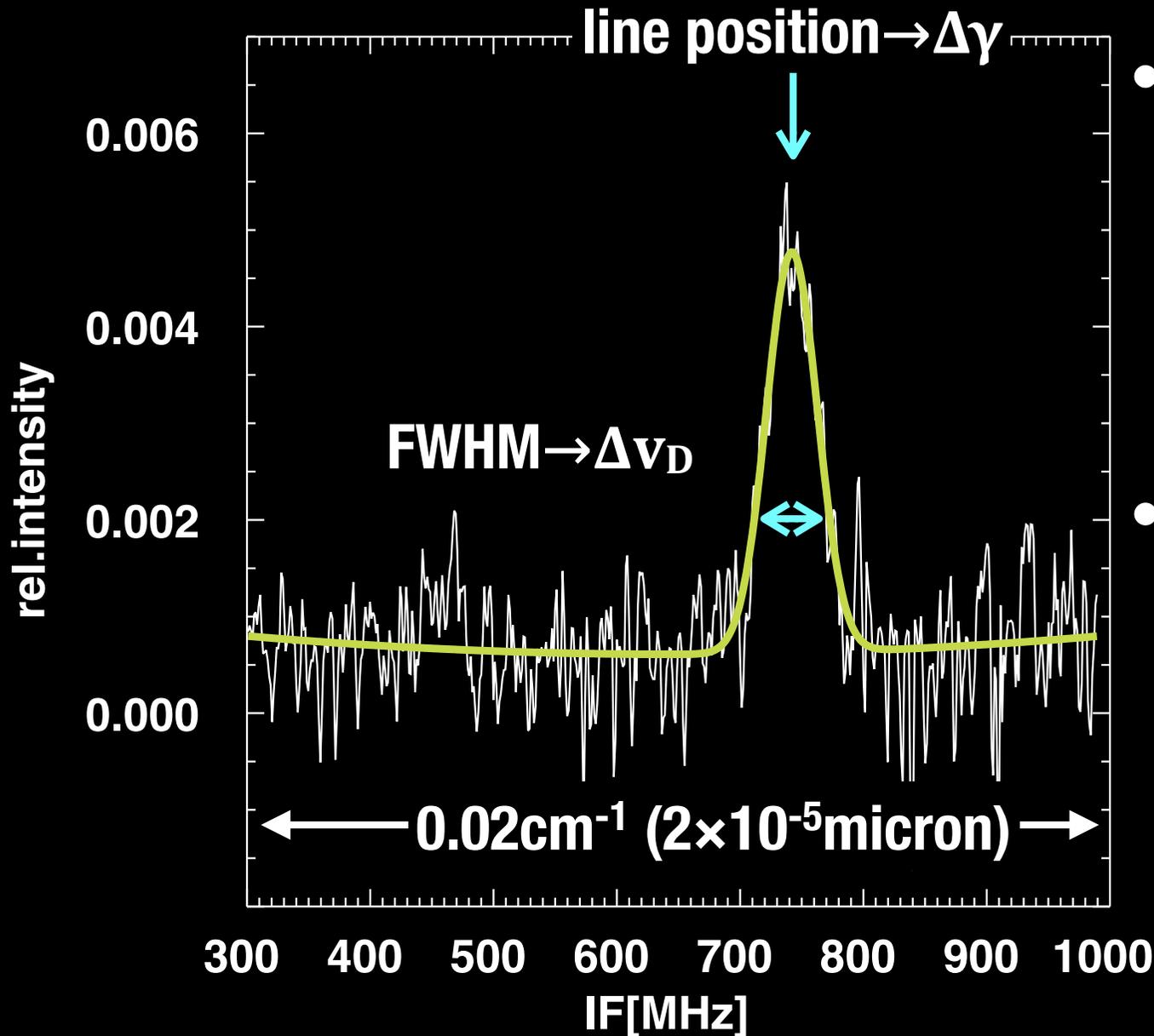


図. QCLの発振波長域(左). 可変波長域の推移(右下). EC-QCL外観 (Daylight solutionsより)

- 近年QCLの発振波長域・可変波長域が急激に発展.
- CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, COS, N<sub>2</sub>O, NO, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, SF<sub>6</sub>, O<sub>3</sub>, ethylene, acetone, CO, NO, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>など様々な分子が観測可能に.

# 観測事例(金星CO<sub>2</sub>発光スペクトル)



- T60望遠鏡搭載  
MILAHlが2015年9月  
5日40min積分で取  
得した例.
- Emissionスペクト  
ルから高度110km  
における風速・温  
度を数10m/s数10K  
の精度で導出可能.

図. T60搭載器で観測された金星non-LTE emissionスペクトル (Nakagawa+,submitted).

# 観測事例(タイタンC<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/火星O<sub>3</sub>)

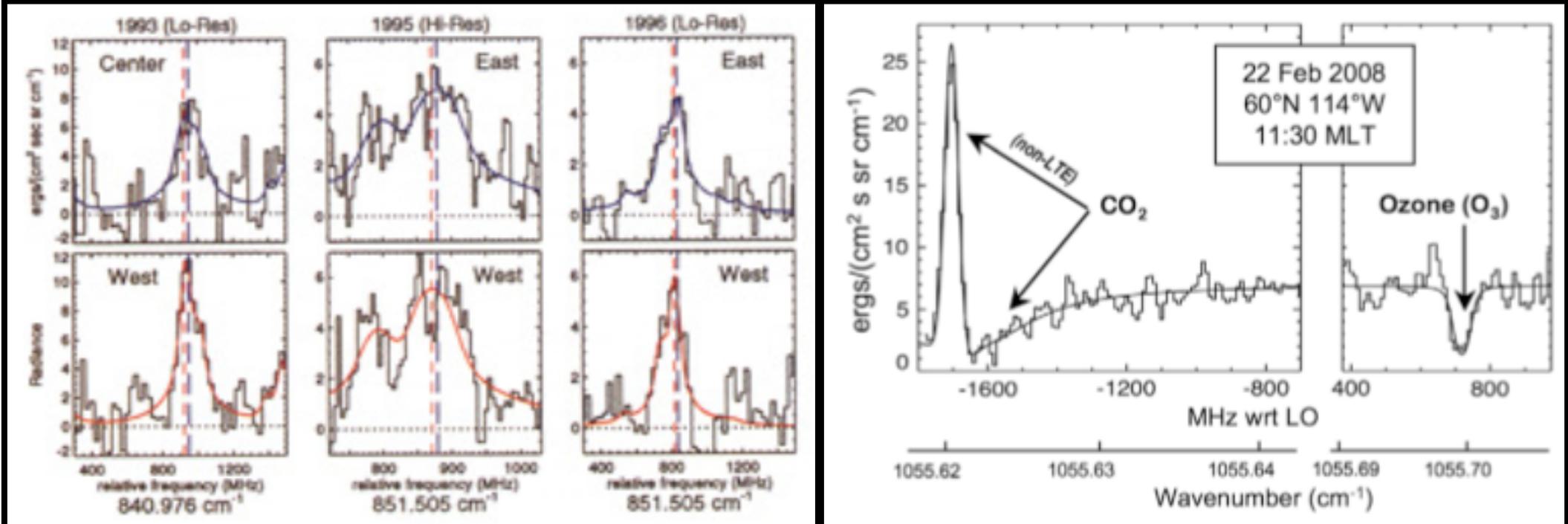
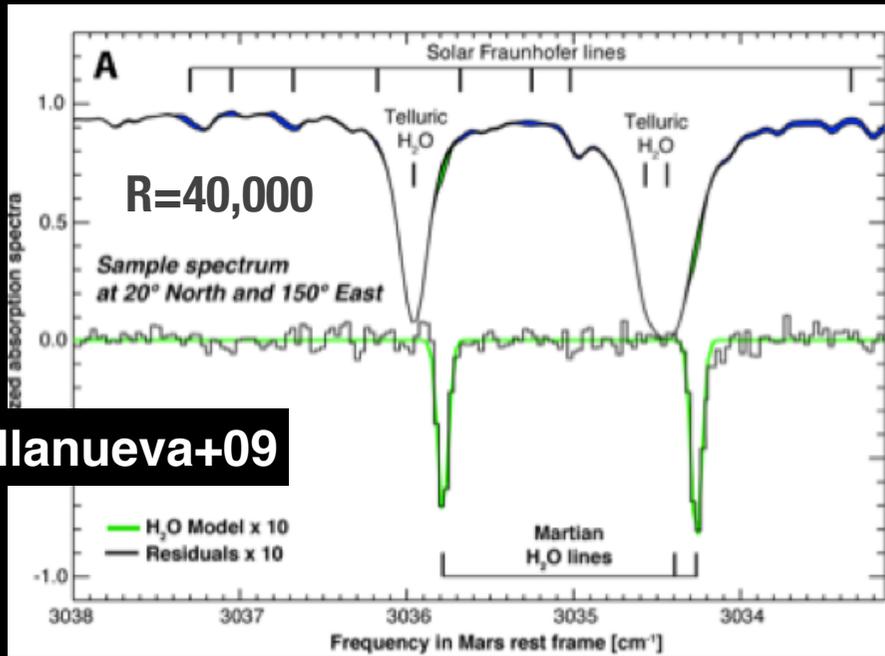
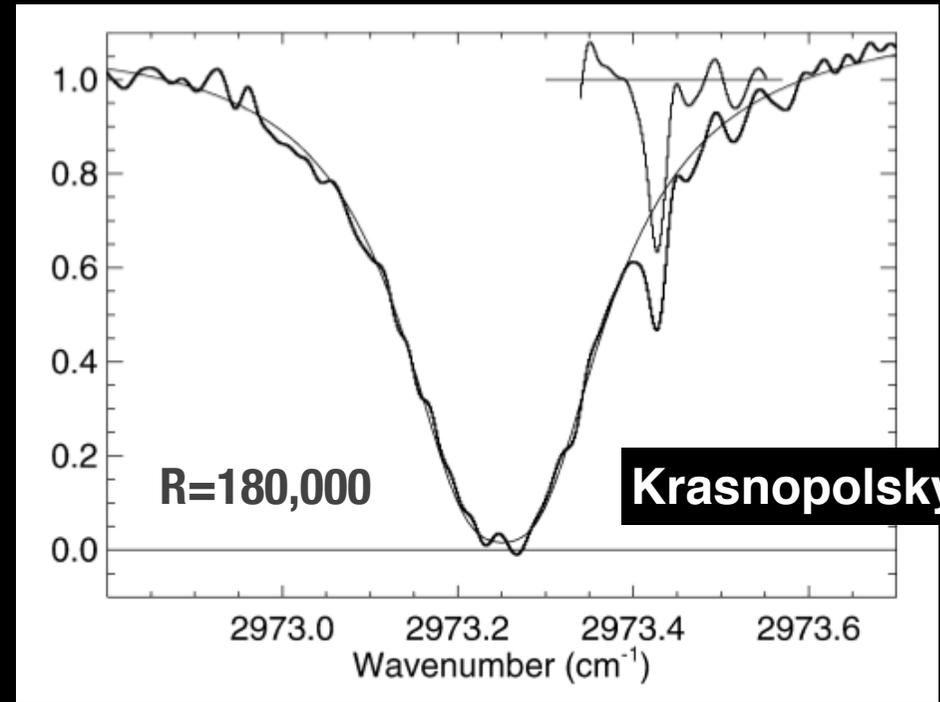


図. (左) SUBARU搭載HIPWAC(NASA)が捉えたタイタンC<sub>2</sub>H<sub>4</sub>発光 (Kostuik+96).  
(右) IRTF搭載HIPWAC(NASA)が捉えた火星O<sub>3</sub>吸収 (Fast+09)

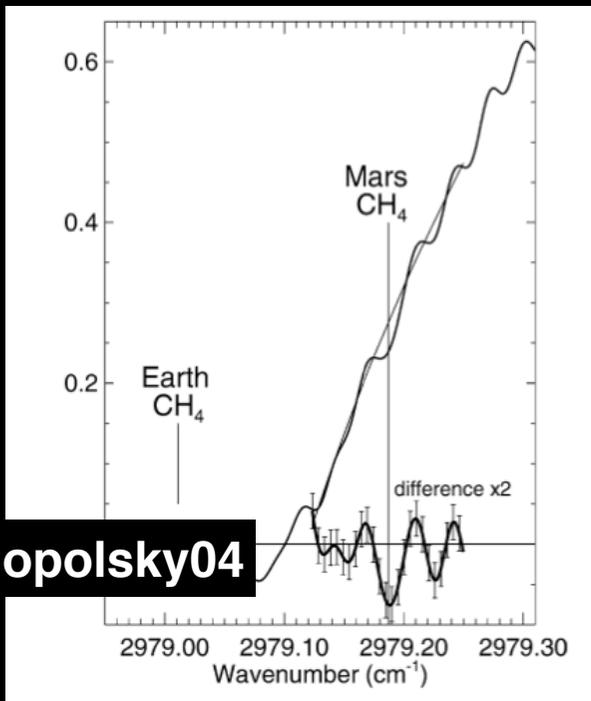
- タイタンのスーパーローテーションを予測(Kostuik+96).
- 地上から火星オゾン吸収を検出(Espenak+91など).



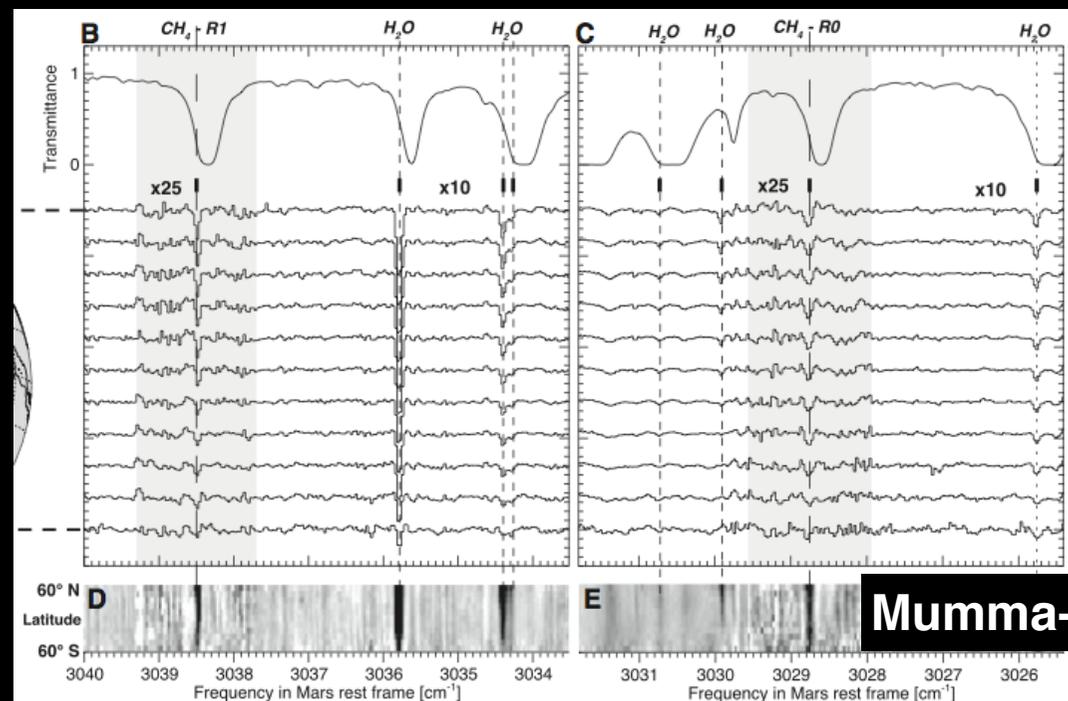
Villanueva+09



Krasnopolsky04



Krasnopolsky04



Mumma+09

図. 他既存高分解能分光器で得られた火星H<sub>2</sub>O/CH<sub>4</sub>スペクトル例 (Mumma+09他).

# MILAHによる火星微量大気検出

- 地球大気吸収との完全分離(高確度で検出可能)
- 数時間で**2-VSMOW HDO**, 数十時間で**10ppb-CH<sub>4</sub>**を検出

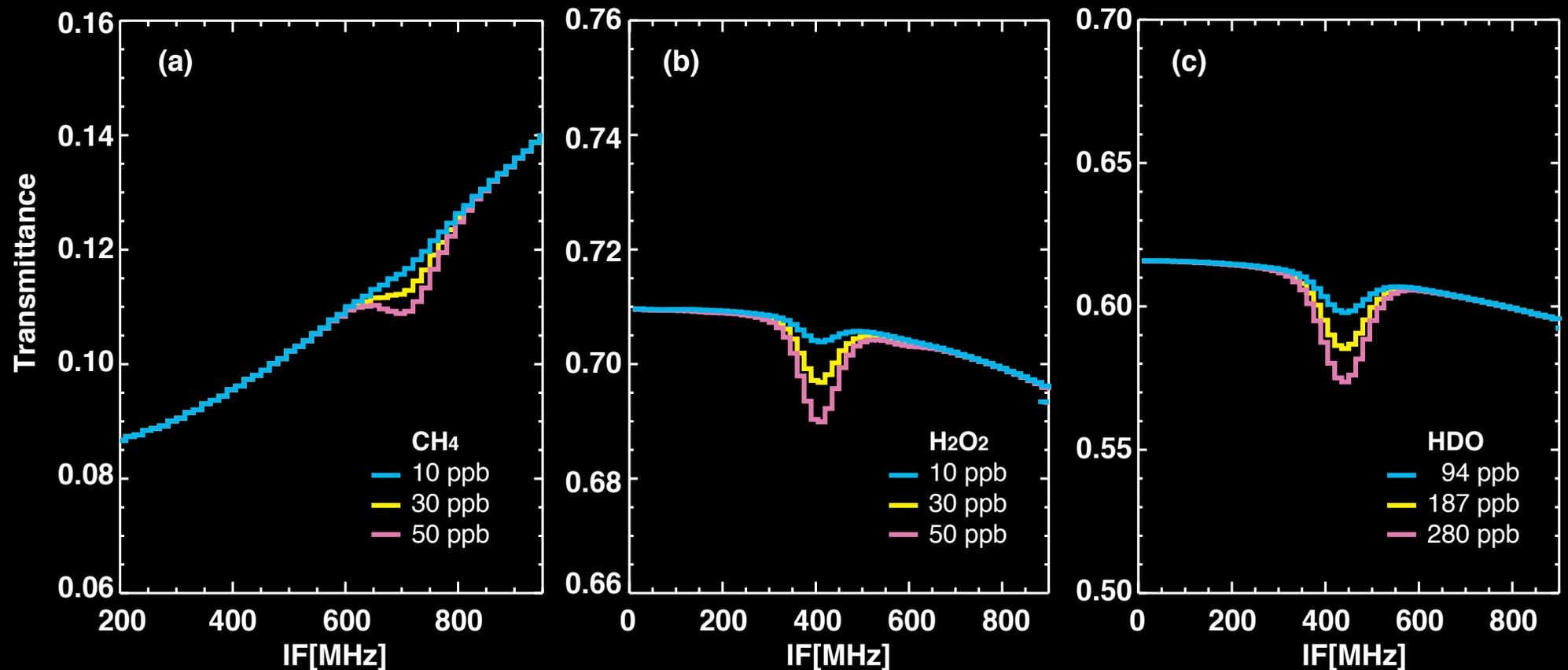
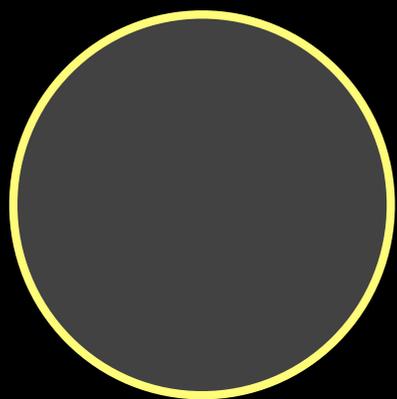
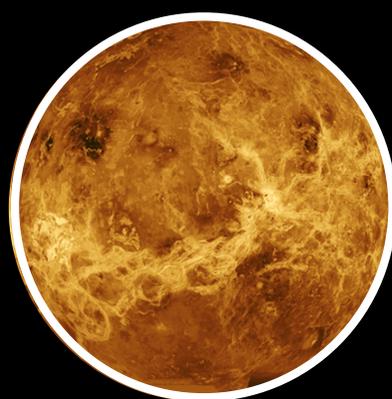


図. 期待される火星CH<sub>4</sub>(左)・H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(中)・HDO(右)吸収スペクトル. SN向上のため33MHz-binning. 観測波長は, 7 $\mu$ m帯 (1295cm<sup>-1</sup>) (Nakagawa,submitted).

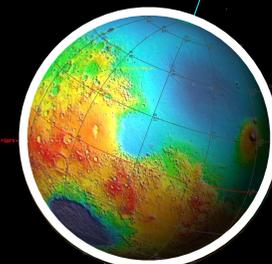
# 比較の高い空間分解能(VS 電波分光)



30m radio beam  
345GHz (12")



Mars/Venus (Feb 2016)  
Diam. = 7.6"/12.0"



0.6m beam  
10 $\mu$ m (3")

1.8m beam  
10 $\mu$ m (1")



# サイト・スケジュール

---

2014/09 ハワイ・ハレアカラ山頂(h=3,055m)T60移設完了

(坂野井他参照)

MILAHl実装

2015/09 初年度試験観測了.

2016/01 火星観測開始

2016-2017 液体窒素冷却から冷凍機に移行

連続観測へ(年間1000hr以上)

2018- 同サイトに1.8m-PLANETS望遠鏡完成. 2号機実装.

---

<b>Size</b>	<b>600 mm x 600 mm x 400 mm</b>
<b>Weight</b>	~ 80 kg
<b>Wavelength</b>	<b>7 - 12 micron</b>
<b>Resolving power</b>	<b>&gt; 1,500,000 (0.00066 cm<sup>-1</sup>)</b>
<b>Operating range</b>	7.7 (1293-1297 cm <sup>-1</sup> ), 8.0 (1230-1245 cm <sup>-1</sup> ), 9.6 (1043-1048 cm <sup>-1</sup> ), and 10.3 (968-973 cm <sup>-1</sup> )
<b>Sensitivity</b>	<b>2,400 K at 9.6 micron (200% of quantum limit)</b>
<b>Detector</b>	MCT photo diode (77K LN2 cooling)
- <b>Bandwidth</b>	3,000 MHz (0.1 cm <sup>-1</sup> )
<b>Back End</b>	<b>Digital FFT spectrometer</b>
- <b>Bandwidth</b>	L 1,000 MHz (0.033 cm <sup>-1</sup> ) → <b>2,500 MHz</b> H 500 MHz (0.016 cm <sup>-1</sup> )
- <b>Channels</b>	L 61 kHz resolution (= <b>0.000002 cm<sup>-1</sup></b> sampling)
<b>Configuration</b>	Cude for 60cm telescope
<b>Field of View</b>	<b>3.0" with 60cm and 1.1" with 1.8m at 10 micron</b>

---

# 中間赤外の技術課題・将来計画

---

- 2次元化

現状は1-pixel

- 中間赤外域における広帯域検出器

3GHz-BW MCTは, Raytheonのみ

InAs/GaSb Type II超格子赤外検出器の発展に期待

(笠羽他参照)

- 長波長への応用

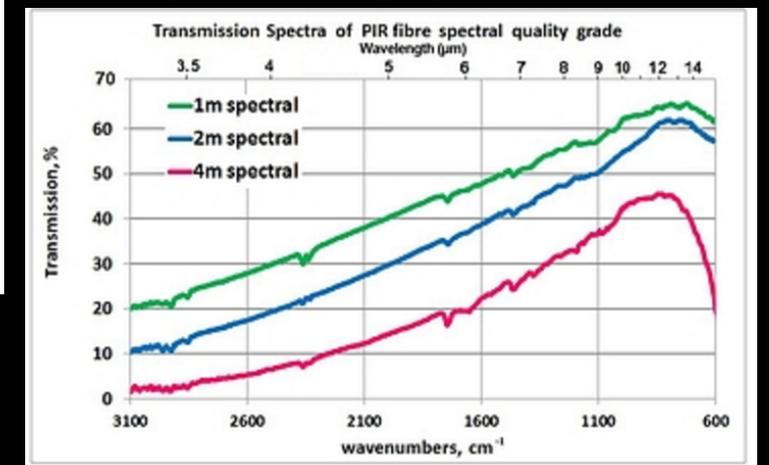
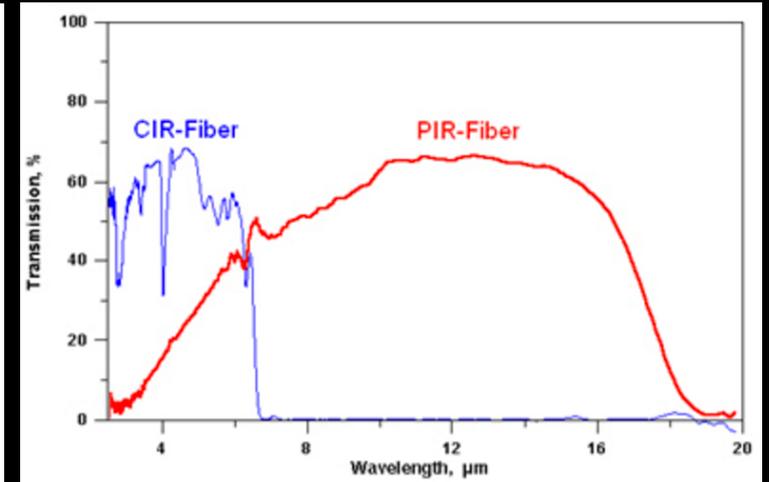
17 $\mu$ m for H<sub>2</sub> (現状は13 $\mu$ mが上限)

- ファイバ化

小型化・汎用化

# 中間・遠赤外ファイバ

	中赤外用CIRファイバー	遠赤外用PIRファイバー
透過波長帯域	1.5~6 $\mu\text{m}$	4~18 $\mu\text{m}$
コア材質/クラッド材質	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /As-S *PTFE/PVCの2層保護コート付	AgCl <sub>0.25</sub> Br <sub>0.75</sub> /AgCl <sub>0.50</sub> Br <sub>0.50</sub>
保護チューブ	PEEK	
コア屈折率	2.4	2.15
有効NA	0.25~0.28	0.25~0.31
使用温度範囲	-200°C~+100°C	-270°C~+150°C
最大透過パワー	1W (CW)	50W (CW)
減衰率	0.2dB/m (2~4 $\mu\text{m}$ )	0.1~0.5dB/m (10.6 $\mu\text{m}$ )



- ART photonics (独) IRファイバ活用を検討
- 但し, 減衰率が大きい

# まとめ

---

- 赤外レーザヘテロダイン分光は、赤外域において高波長分解能が必要な観測に有用なツールの一つ。
- 近年のQCLの発展に伴い、適用波長が劇的に拡大。
- 東北大開発機MILAH1がハワイ・ハレアカラで本格運用開始。
- 中間赤外域における技術課題は、検出器とファイバ化
- ロシア開発機M-DLSが欧州火星探査着陸機へ搭載
- 天文分野への援用に関心のある方は、おしらせください。