

Ultra-high resolution spectroscopy using Mid-Infrared Laser Heterodyne Instrument (MILAHI)

- 中間赤外域で波長分解能100万以上（速度分解能10m/s以上）を達成する超高分解能赤外ヘテロダイン分光器を東北大学で開発した。本発表では、その現状と性能についてご報告をする。

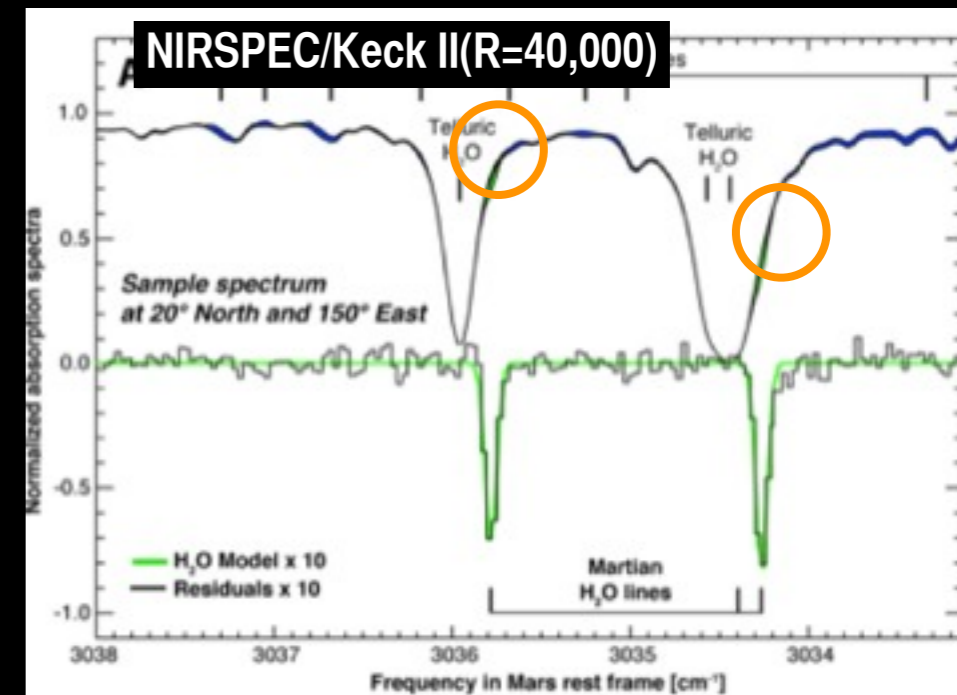
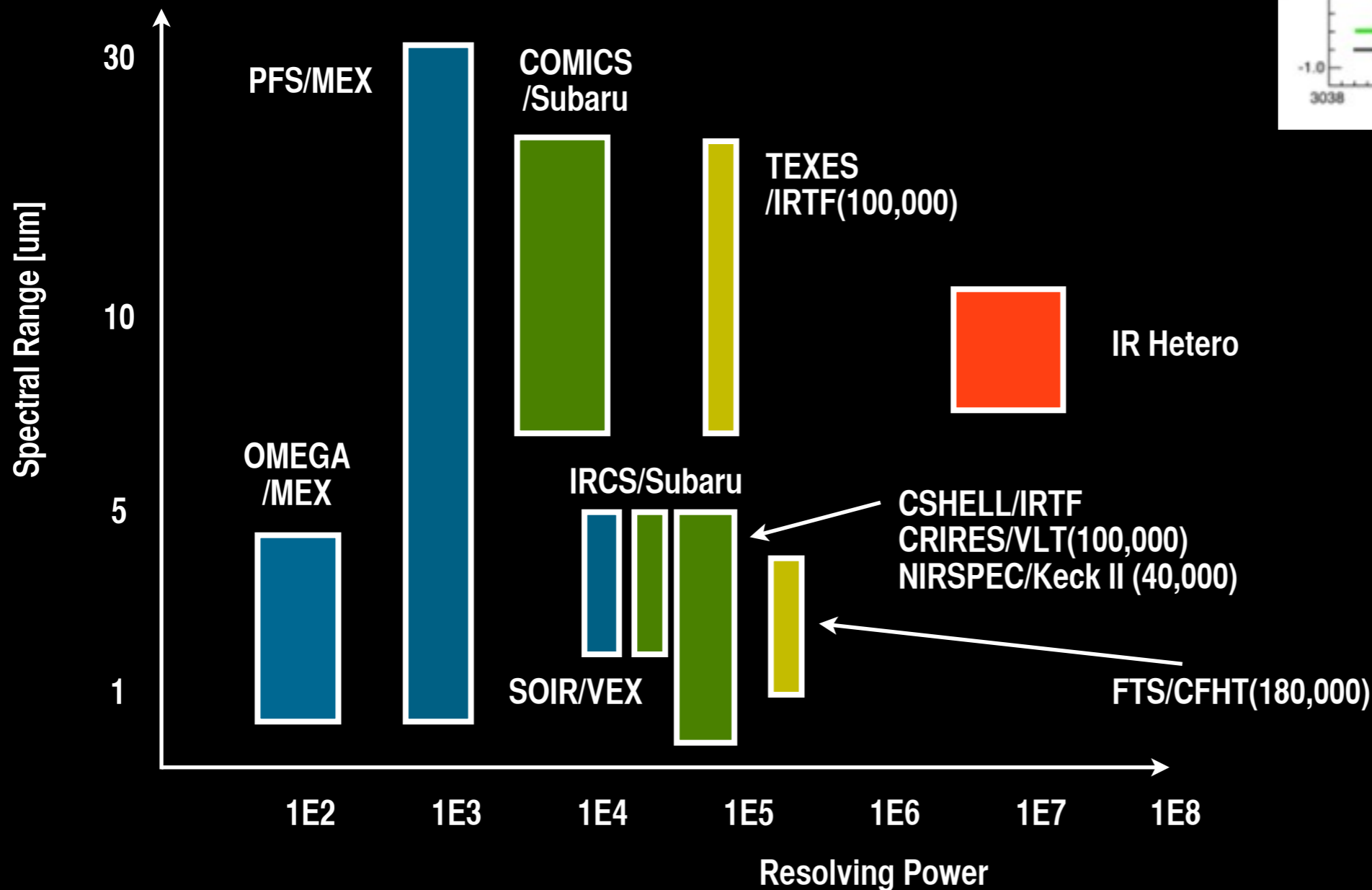
中川広務¹, 青木翔平¹, 笠羽康正¹, 村田功¹, 市川隆¹, 岡野章一², G. Sonnabend³

¹東北大学, ²ハワイ大学, ³ケルン大学,

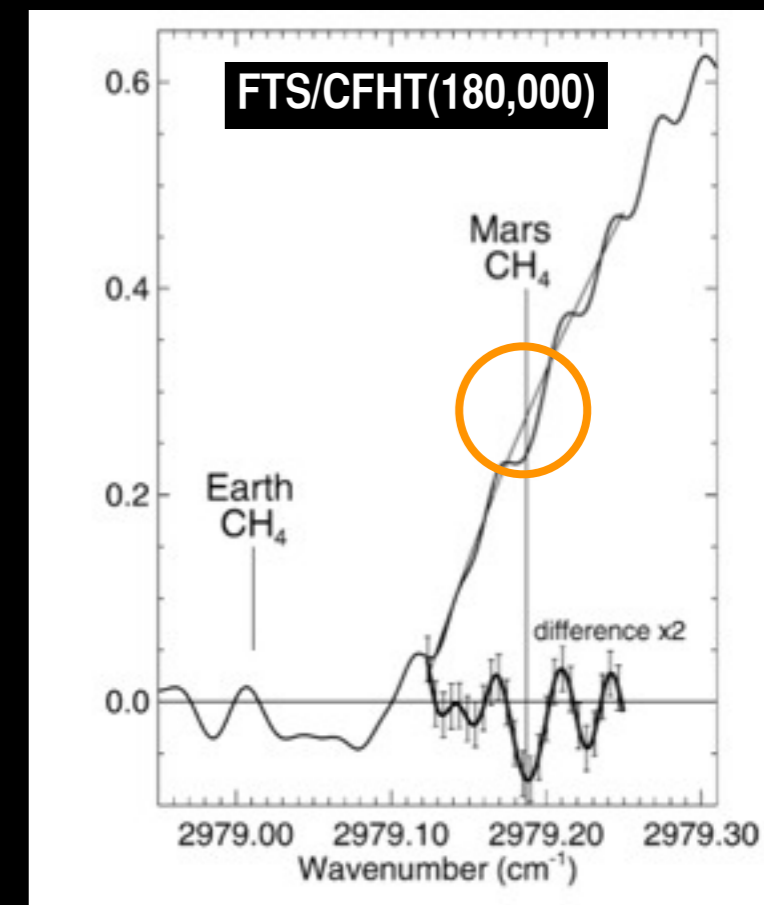
南極赤外線望遠鏡ワークショップ, 東北大学, 9月, 2013年.

1. 既存測器の波長分解能比較

- 既存の直接分光測器は非常に巨大, かつ波長分解能10万が限界
- H₂OやCH₄などの高精度検出に不十分



[Villanueva et al., 2009]



[Krasnopolsky et al., 2004]

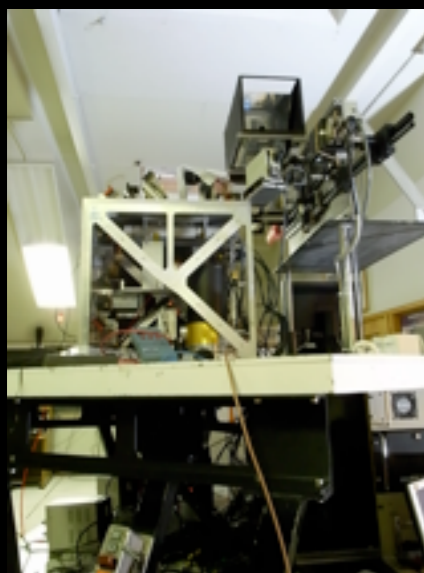
Fig. Spectral resolution of the current equipments onboard ground-based telescopes and spacecrafts.

2. 赤外ヘテロダイン分光 これまでの成果

- ・超高分解能による地球大気との完全分離→高確度な観測
- ・ラインプロファイルを完全に分解→微量成分検出・微小ドップラー検出・細かいnon-LTE検出・リトリバル高度分布導出が得意
- ・タイタンのスーパーローテーションの発見 [Kostuik et al., 1996]
- ・地上から火星オゾンの初検出 [e.g., Fast et al., 2009]
- ・火星/金星の中間圏CO₂ non-LTE emissionから10m/s精度の風速場擾乱検出 [Sornig et al., 2012; Nakagawa et al., 2013]



HIPWAC at IRTF



THIS at McMath Pierce

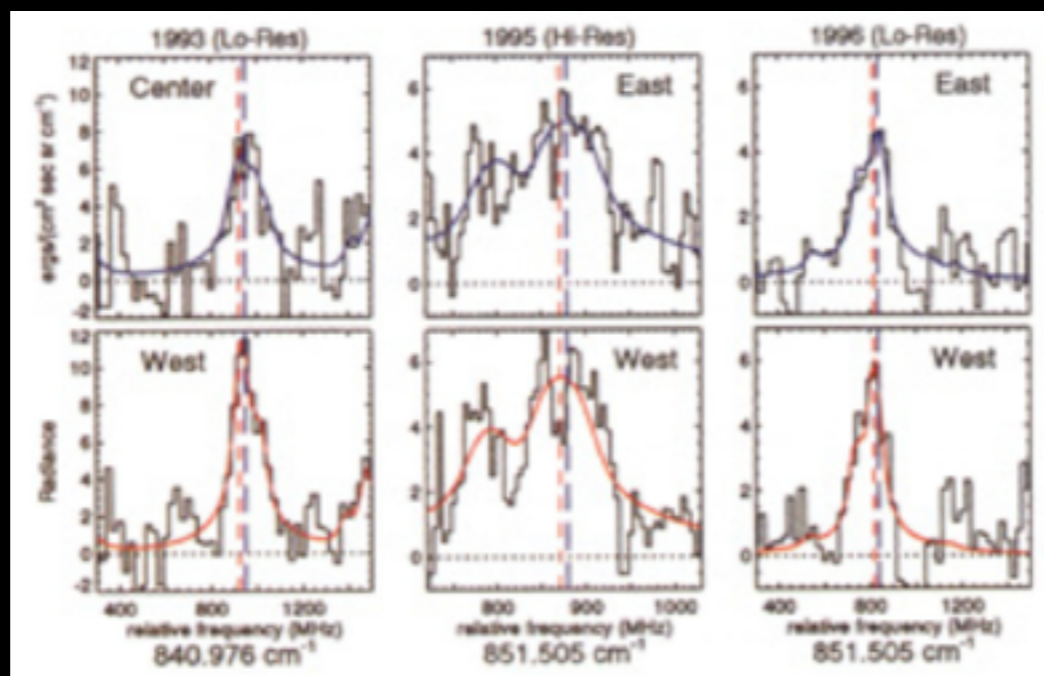


Fig. Titan's spectra obtained from HIPWAC [Kostuik et al., 1996].

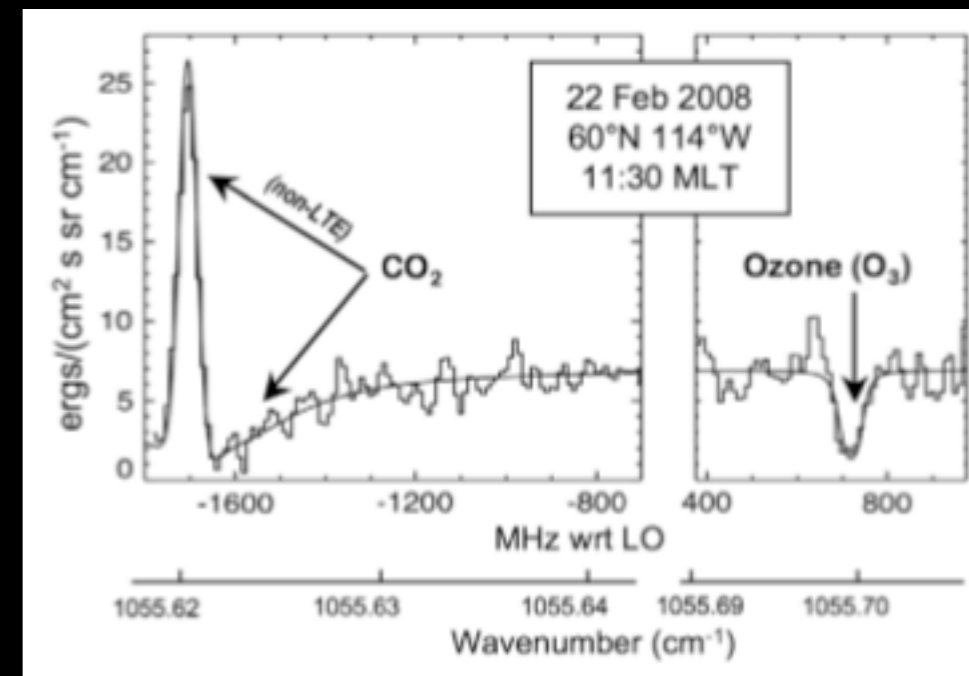


Fig. Martian spectra obtained from HIPWAC [Fast et al., 2009].

3. 装置の原理

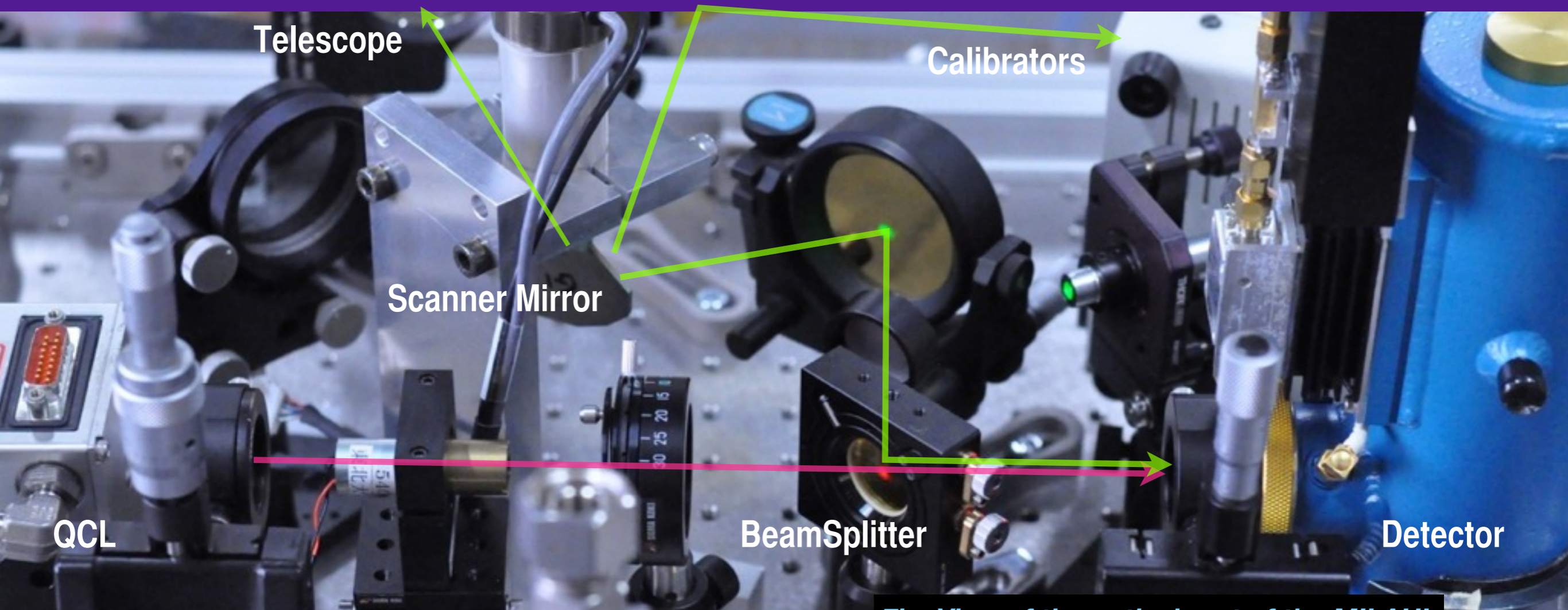


Fig. View of the optical part of the MILAHI.

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

Thermal radiance of the planet travels through its atmosphere.

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

The celestial signal radiance combined with local oscillator (laser)

$$I_{het} = I_{DC} + I_{IF} = P_S + P_L + 2\sqrt{P_S P_L} \cos(2\pi\gamma I F t - \varphi)$$

A heterodyne spectrometer converts an IR spectrum into a radio frequency spectrum.

4. 装置の諸元

Size	600 mm x 600 mm x 600 mm
Weight	~ 80 kg
Wavelength	7 - 13 micron
Resolving power	> 1,500,000 (0.00066 cm⁻¹)
Operating range	7.7 (1293-1297 cm ⁻¹), 8.0 (1230-1245 cm ⁻¹), 9.6 (1043-1048 cm ⁻¹), and 10.3 (968-973 cm ⁻¹) micron
Sensitivity	< 3,000 K at 9.6 micron
Detector	MCT photo diode
- Bandwidth	3,000 MHz
Back End	Digital FFT spectrometer
- Bandwidth	L 1,000 MHz (0.033 cm ⁻¹) H 500 MHz (0.016 cm ⁻¹)
- Channels	L 61 kHz resolution (=0.000002 cm ⁻¹ sampling) H 31 kHz resolution (16,384 sampling)
Configuration	Nasmyth, Cude, Cassegrain
Field of View (Beam size)	0.85" (2.5 m telescope) at 10.3 micron

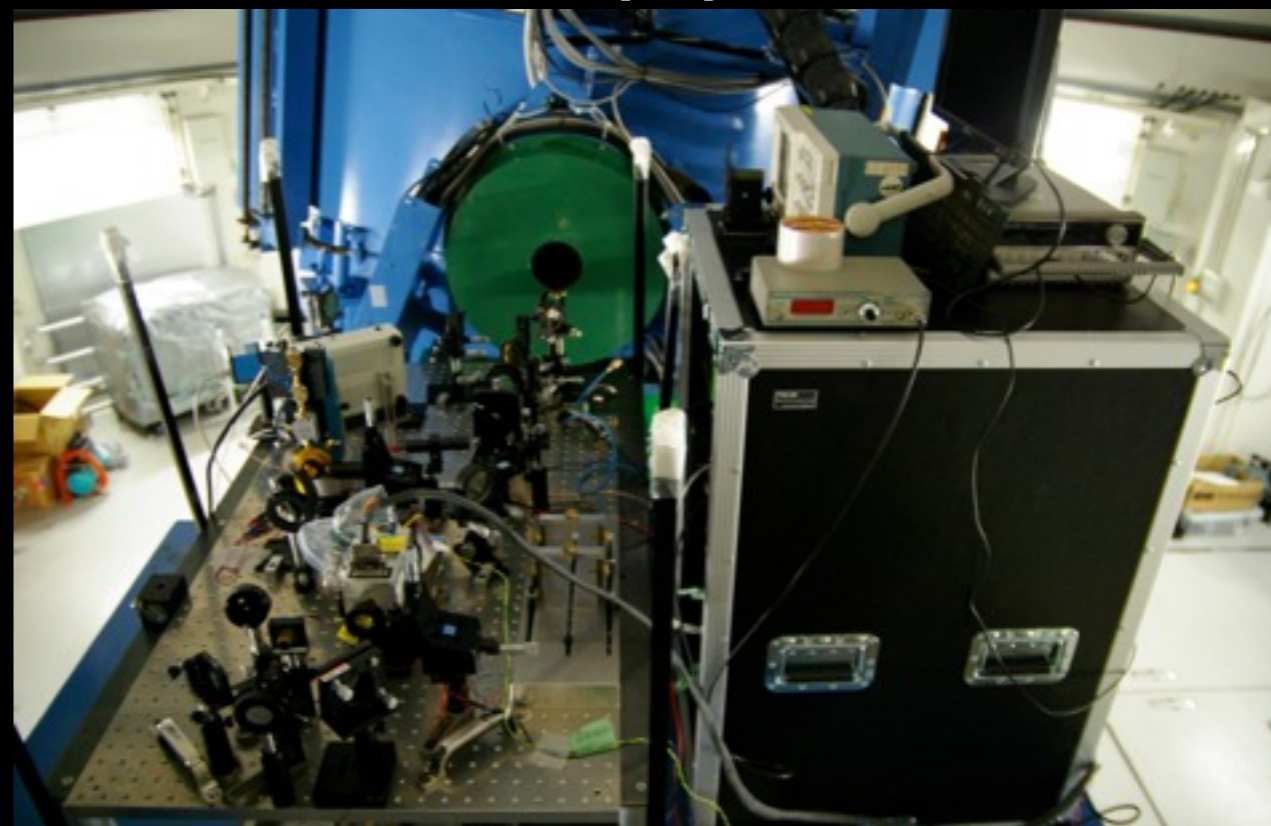
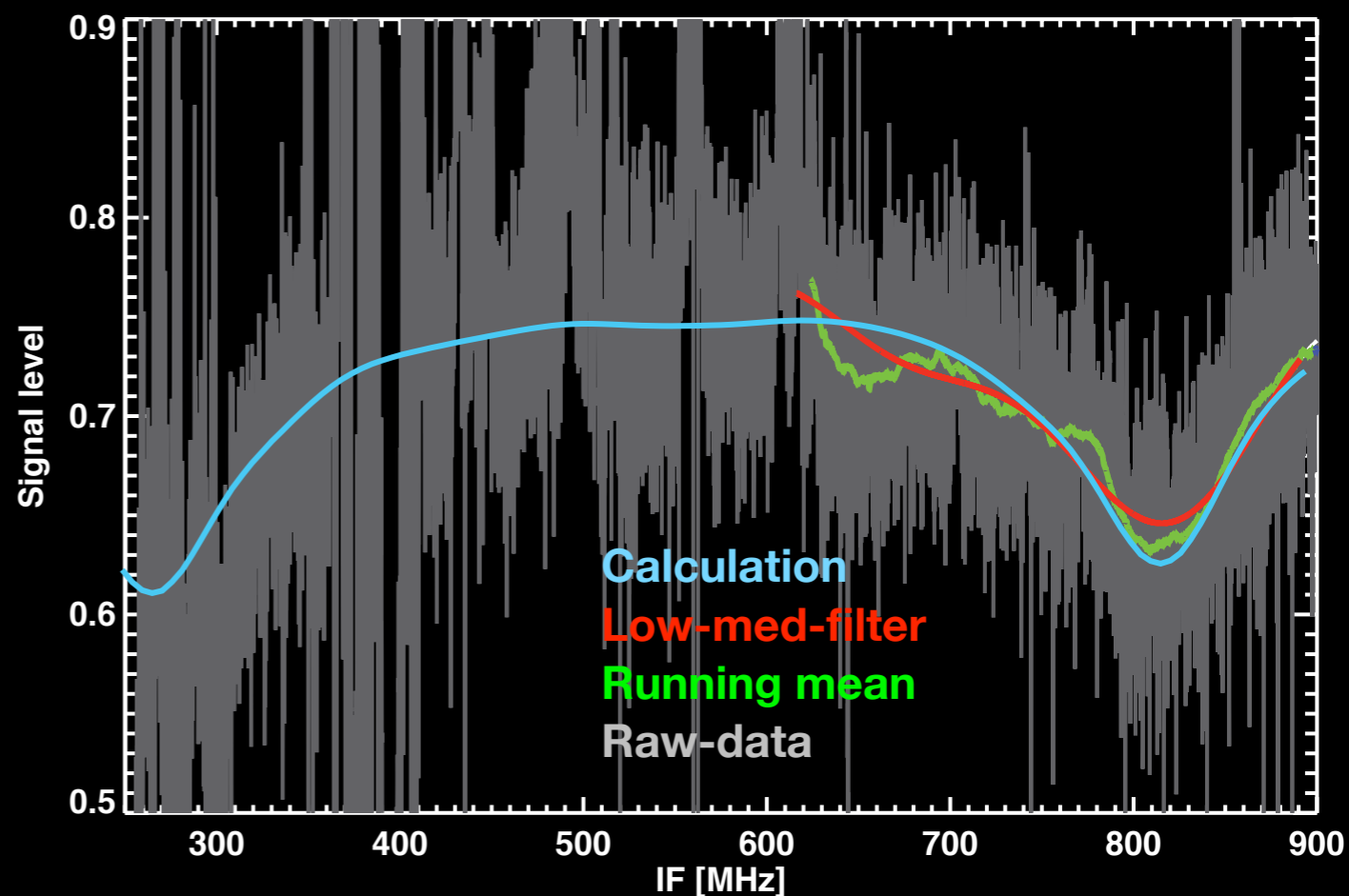
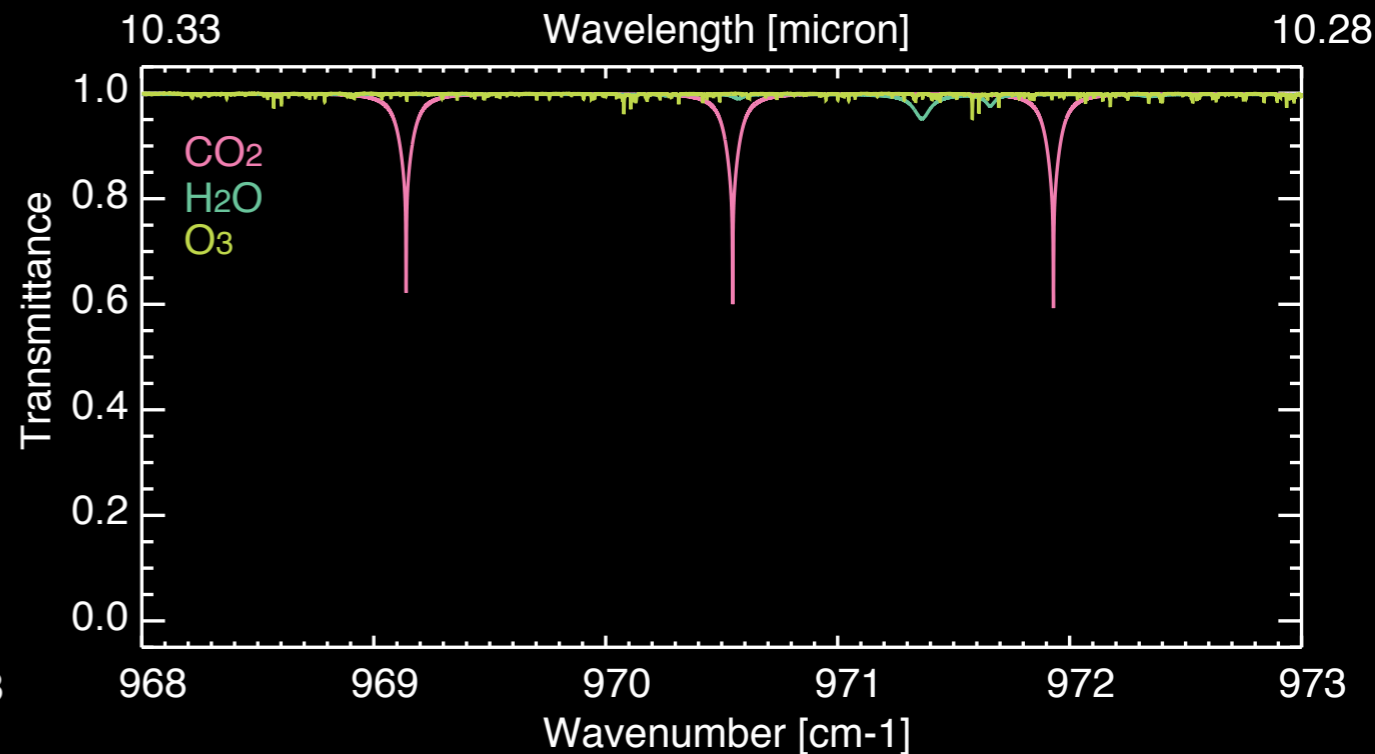
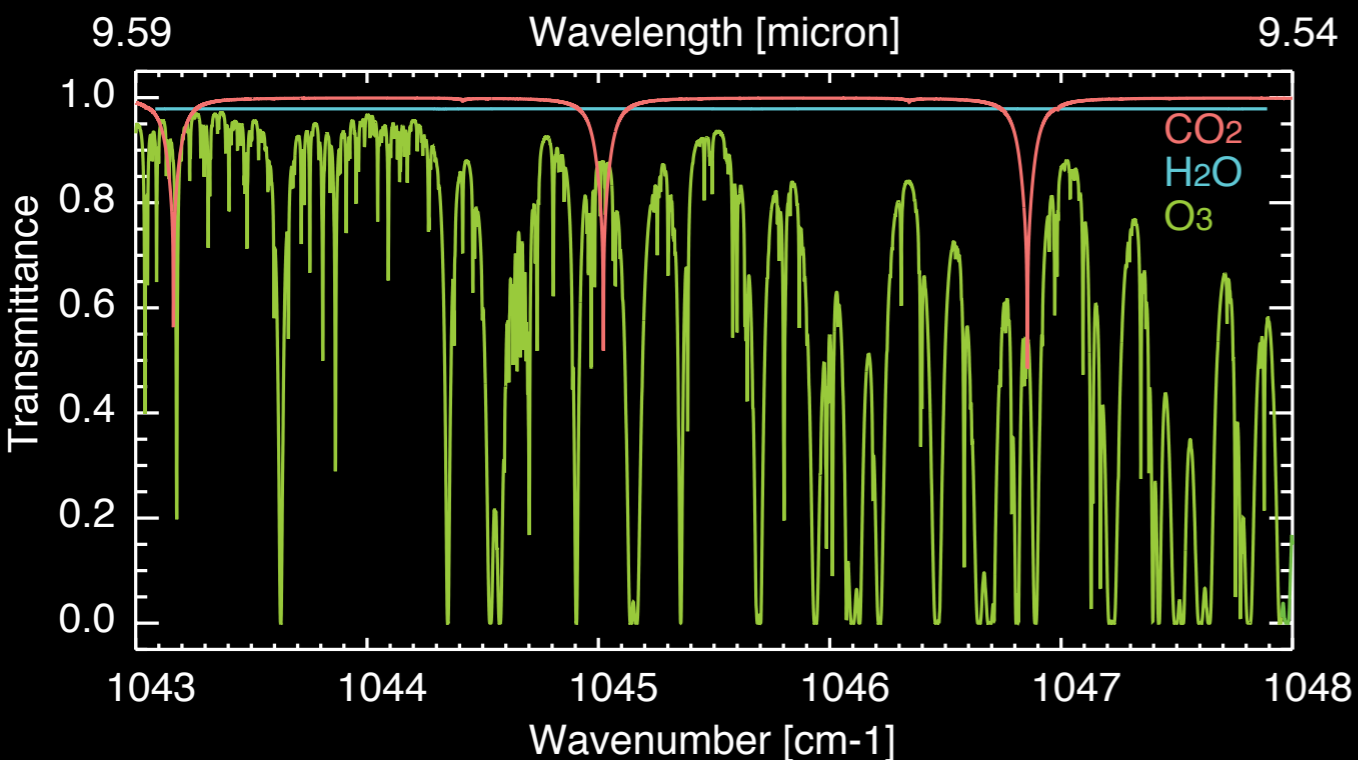


Fig. Breadboard-type MILAHI onboard Higashi-Hiroshima telescope, and obtained moon tiny radiance.

5. 観測波長域 (中間赤外)



複数のQCLを用いることで、生命環境に重要な様々な分子が観測可能に

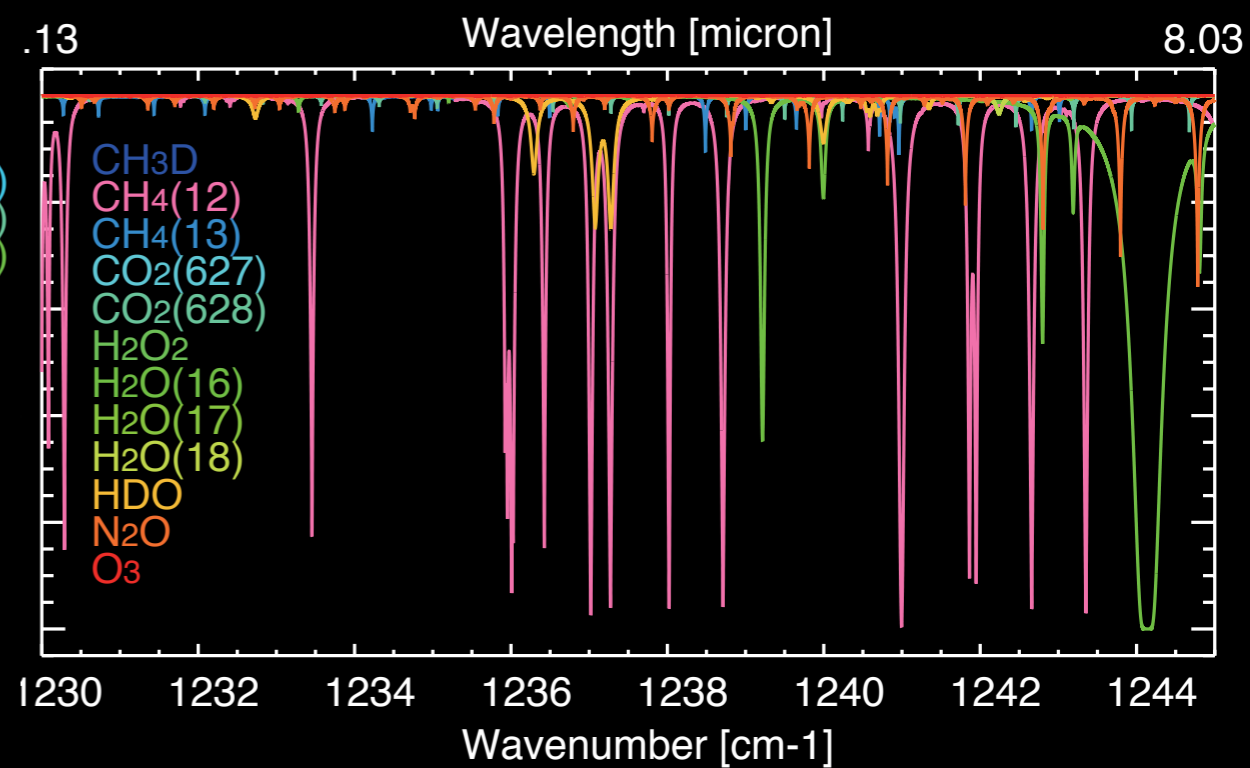
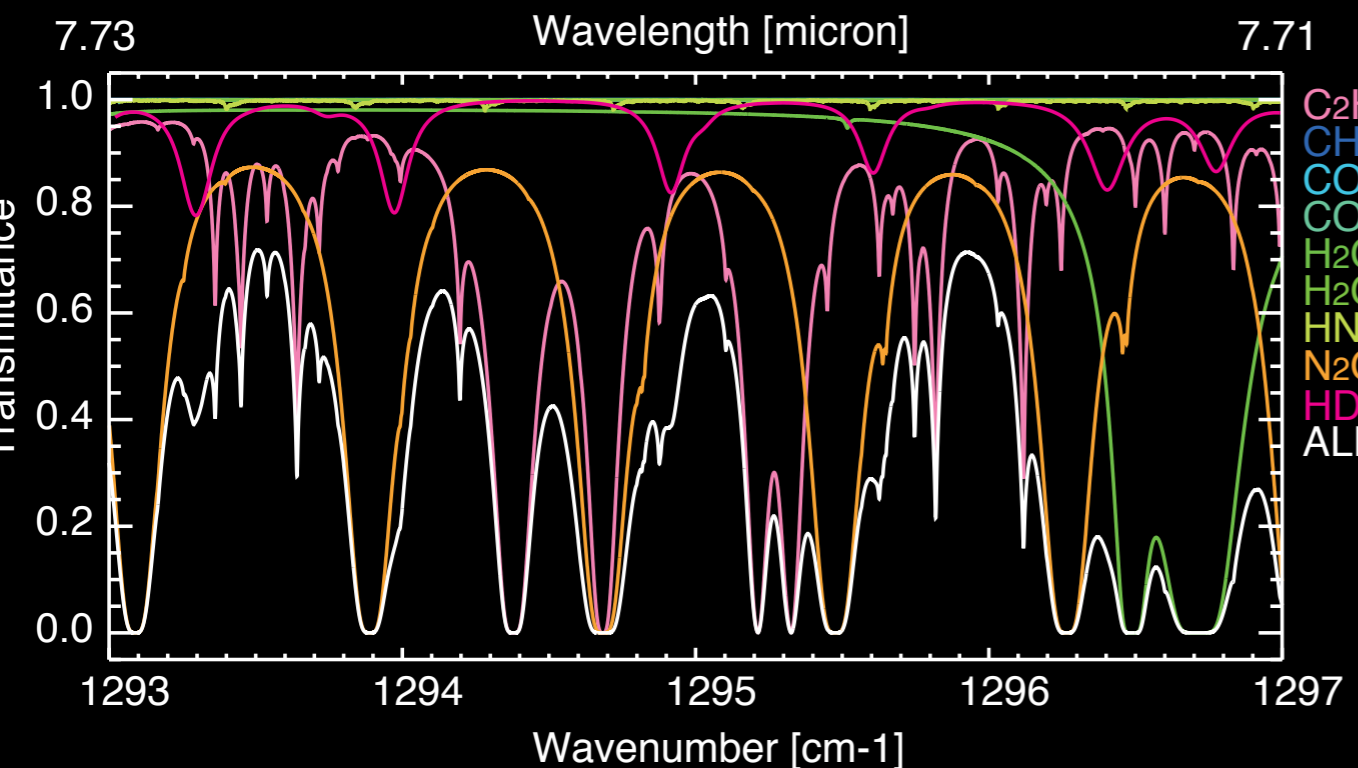


Fig. Tuneable wavelength range, including O₃, CO₂ and its isotopes, H₂O and HDO, H₂O₂, N₂O, CH₄, C₂H₂ etc.

6. 観測スペクトル例 (地球オゾン吸収)

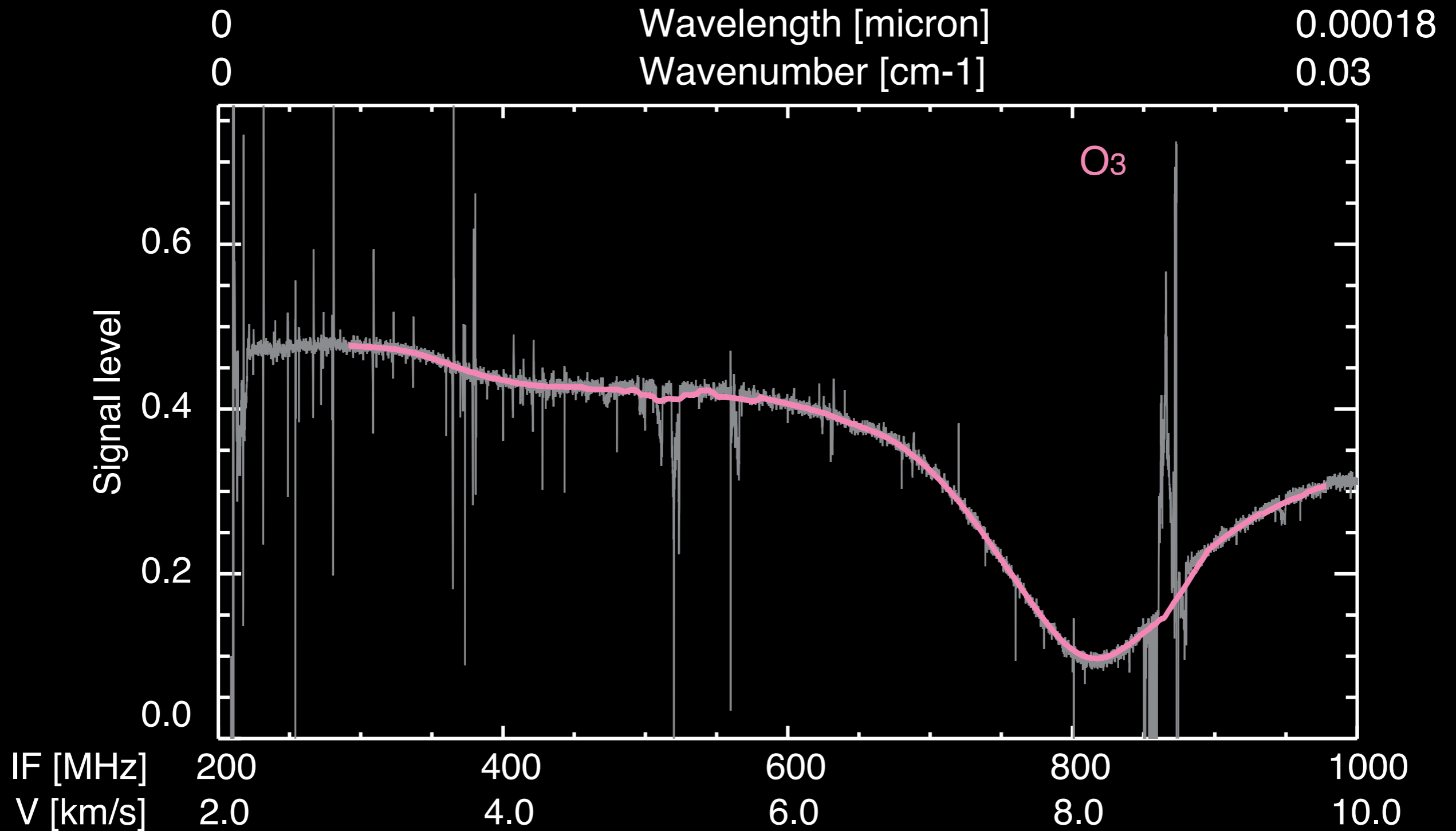


Fig. Observed spectrum of the terrestrial ozone at Sendai, Tohoku University, in 2012. Integration time is ~ 10 min. The background is the solar radiance.

7. 検出限界

- 量子雑音限界の2倍程度という非常に優秀なノイズレベル
- 綺麗なベースライン
- ポイントソースに対して、1h積分で検出限界輝度温度20mK = フラックスで約14JyをS/N=1で検出可能

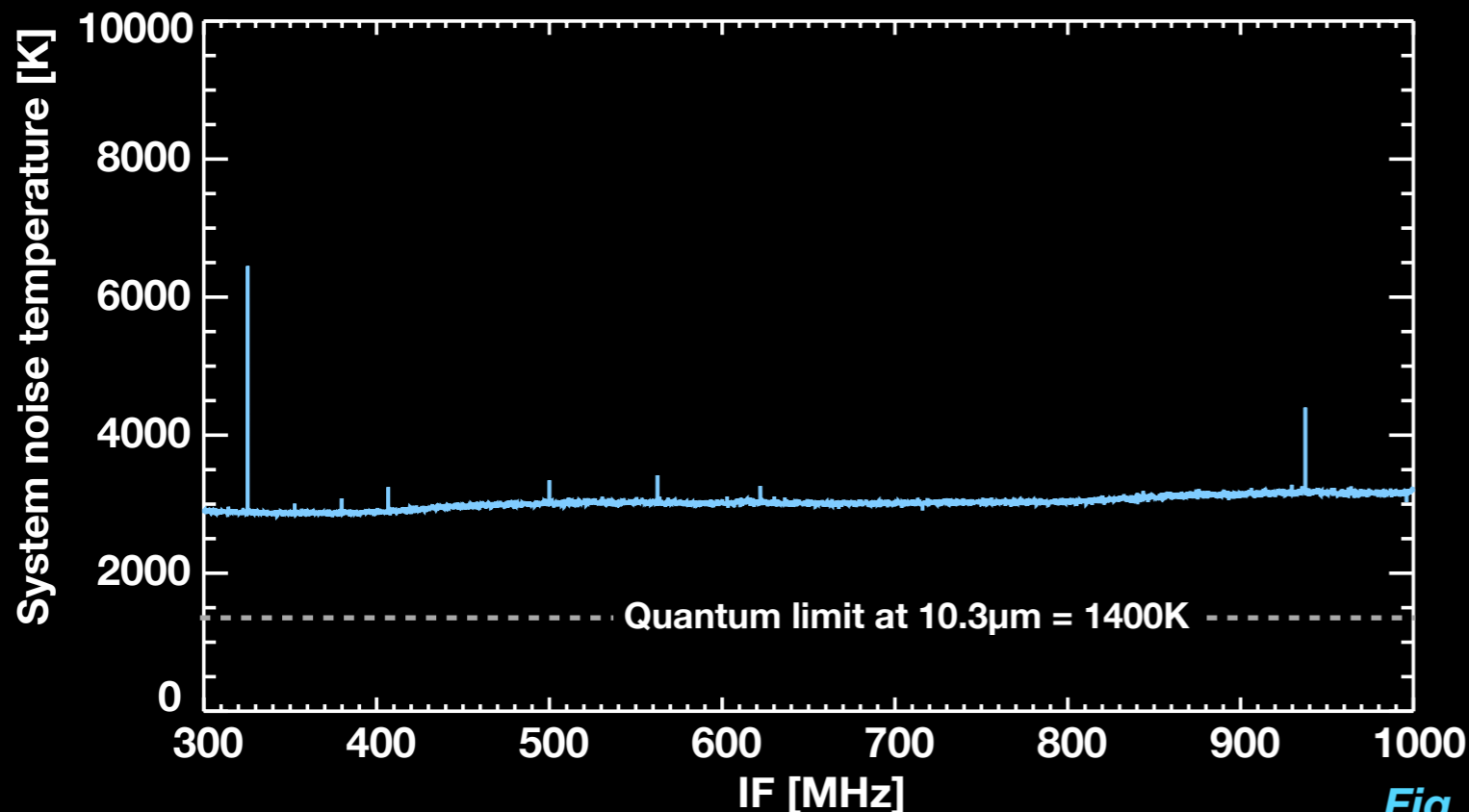


Fig. System noise temperature of MILAHI at 10.3 micron.

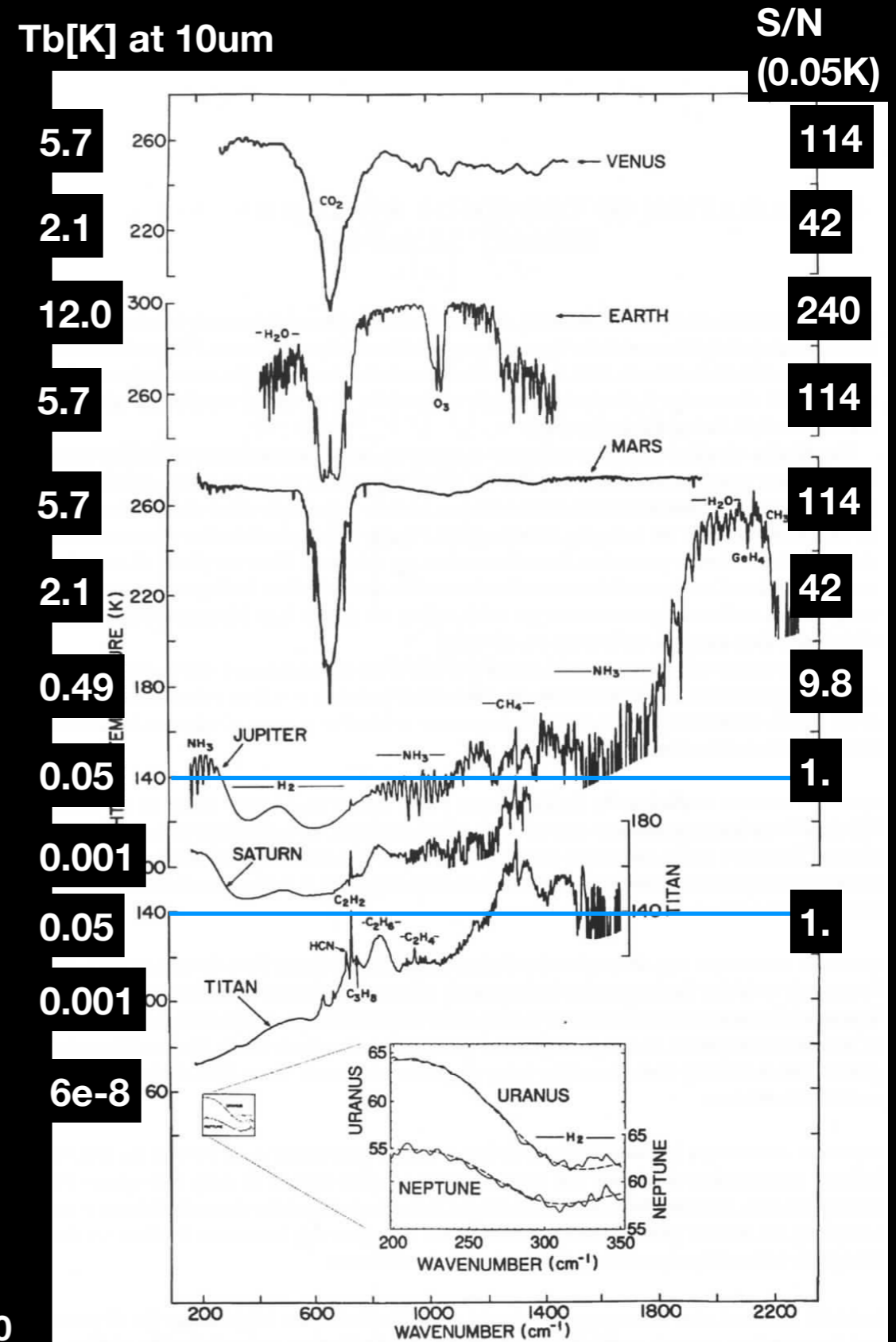


Fig. IR spectra of planets [Hanel et al., Exploration of the Solar System by Infrared Remote Sensing, 2003]

8. Astrophysical applications

- H₂、宇宙で一番多い分子、星生成の基本成分であるにも関わらず直接観測が難しい
- 先行研究では電波CO観測で、CO/H₂を仮定して、H₂を間接的に求める
- 但し、その比は宇宙の場所によって同じである理由はない
- 28ミクロンは、まさに星が生成されている現場をみることができる
- 17ミクロンは、比較的温度の高い領域からの輝線で、少し星生成が進んだ領域をみることができる
- 超高分解能の赤外ヘテロダインと、大気輻射・水蒸気量が少ない南極望遠鏡はH₂観測に最適。現況7-13ミクロンと限られるが、より長波長レーザーと検出器が成されれば、将来における観測可能性が期待
- レーザは米Maxion、検出器はスウェーデンのメーカーが17ミクロンに達するものを既に実現可能と主張

9. 南極観測の利点、ヘテロダインの利点

Table. Comparison between the expected signal level and the background radiation level.

2m鏡で表面温度5000Kの星を受信するエネルギー	1.1 x 1E-23 W/Hz
大気輻射の入力エネルギー (T=288K, 15°C)	2.7 x 1E-22 W/Hz
大気輻射の入力エネルギー (T=200K, -73°C)	3.0 x 1E-23 W/Hz

*ヘテロダイン受信の場合、 $A\Omega \sim \lambda^2$

南極の利点

- 低い大気輻射温度、少ない水蒸気量
- 天の南極から南緯13°の天体は24時間観測できる

南極の欠点

- 黄道面に近い太陽系内惑星の観測は天頂角が大きい
- それ故に、大気吸収・シーイングの点で不利 (#単一鏡)

南極の低温の大気輻射の利点と量子雑音限界が達成できる赤外レーザヘテロダイン分光の利点を活かせば、系外天体の微量大気検出も夢ではない

11. ハワイ山頂専用望遠鏡群での常設運用



- ハレアカラ山頂専用望遠鏡での常設運用を2014年5月に開始
- 2014年は65cm鏡、2015年以降に1.8m鏡で系内惑星連続観測
- 主に火星・金星の微量大気と循環、温度分布やそれらの鉛直分布を研究
- 様々な時間スケールの時空間変動を捉える唯一の観測拠点として

12. まとめ

- 中間赤外域では圧倒的な波長分解能を誇る赤外ヘテロダイン分光器を開発
- 観測波長域は7-13ミクロン帯、帯域1GHzにおいて100万以上の波長分解能（速度分解能10m/s以上）を達成（レーザ安定化で更なる向上可）
- 複数QCLにより赤外域の生命環境に重要な分子種を高分散観測可能に
- デジタル分光器を世界で初めて導入し、システムを簡略化・小型化
- 2014年5月からハワイ・ハレアカラ山頂にて、世界初となる太陽系内惑星連続観測を赤外ヘテロダインで実現、様々な時空間変動を明らかにする
- レーザ／検出器が用意できれば、南極での17ミクロンH₂観測も実現か
- 南極での低温の大気輻射の利点と量子雑音限界が達成できる赤外ヘテロダインの分光の利点を活かせば、系外天体の微量大気検出は夢ではない
- その他、様々なアプリケーションの提案を募集中