

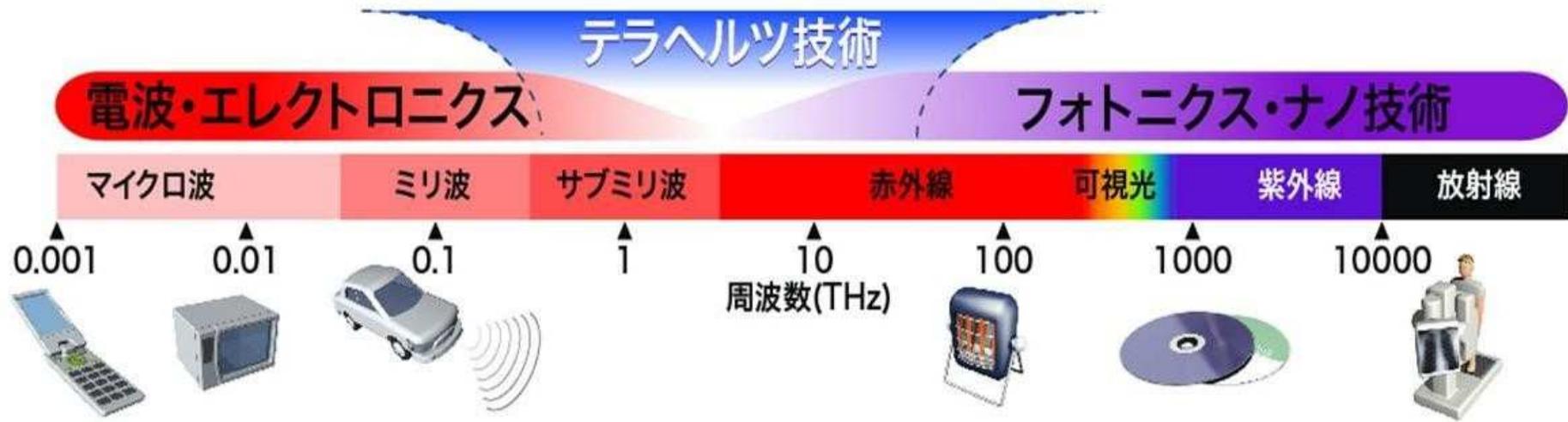
テラヘルツリモートセンシングによる大気の観測

落合 啓

情報通信研究機構 電磁波計測研究所

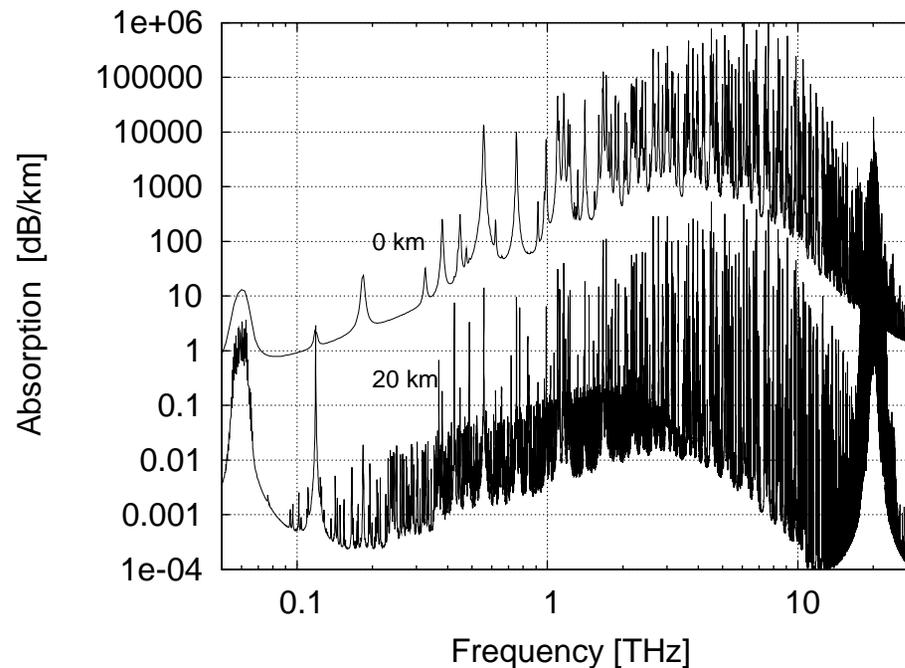
テラヘルツ波

電波と光の間に位置する電磁波で、0.1 THz から 10 THz の周波数範囲を指すことが多い。
ミリ波の一部、サブミリ波、遠赤外の一部を含む。



水蒸気による吸収が大きく、地上での伝搬距離は短い。
2~6 THz 帯では、1 m あたり 1 dB 以上の減衰がある。

通信では、近距離または宇宙で広帯域の利用が可能。



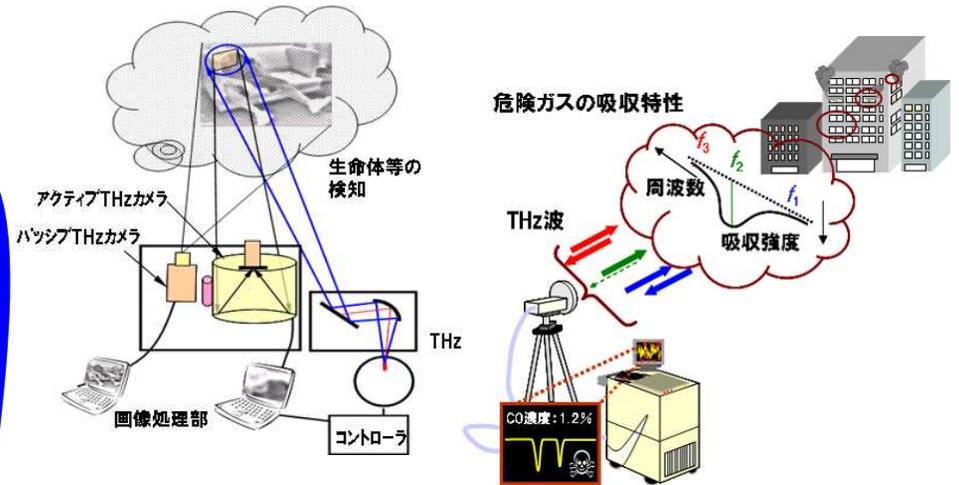
リモートセンシング

アクティブ

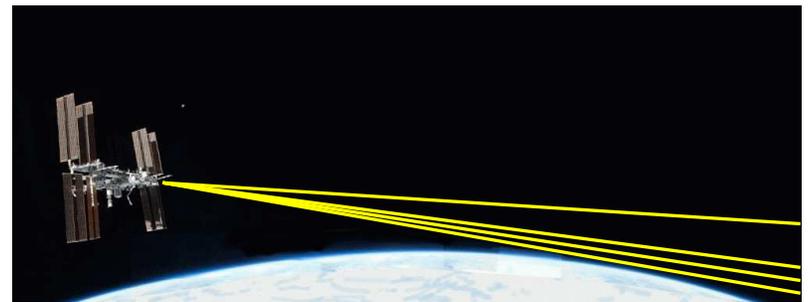
- レーダー
- 光源を使用したイメージング、分光

パッシブ

- × 分光 ↔ 少数チャンネル
- × 単一視野 ↔ マルチビーム
- × 単一開口 ↔ 干渉計
- × 大気放射 ↔ 大気吸収
- × 鉛直または斜め観測 ↔ リム観測



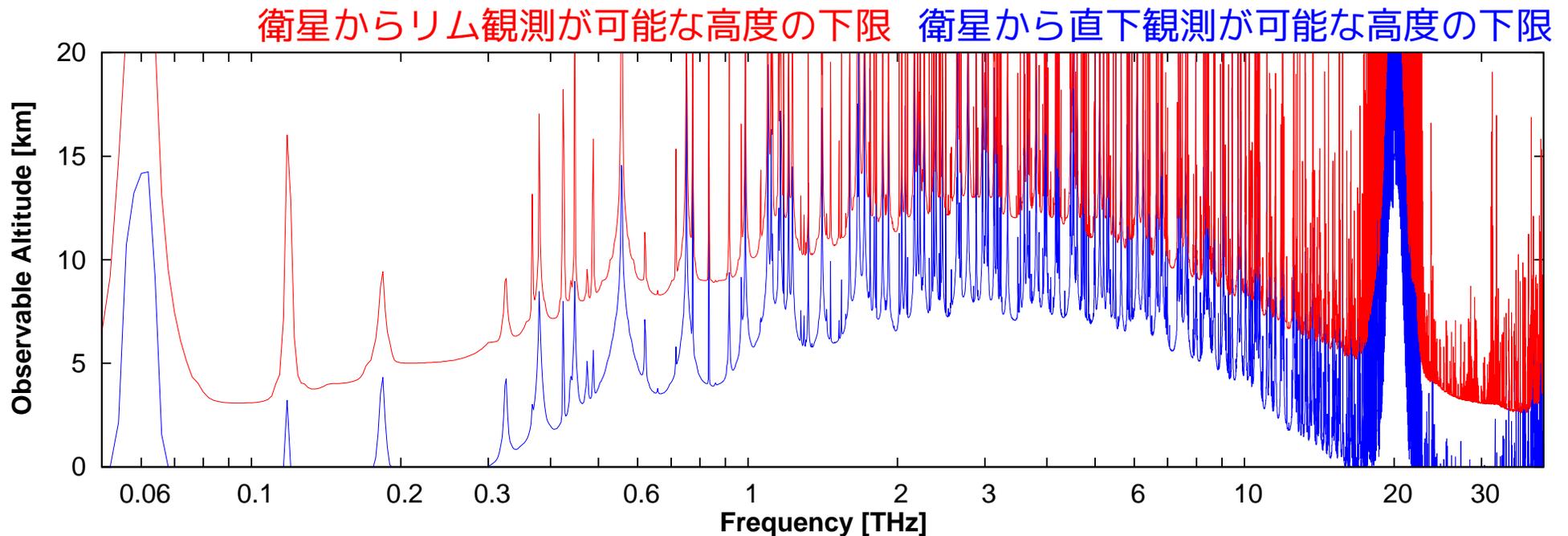
テラヘルツ波による 大気観測への応用



大気の何がテラヘルツ波で測れるのか

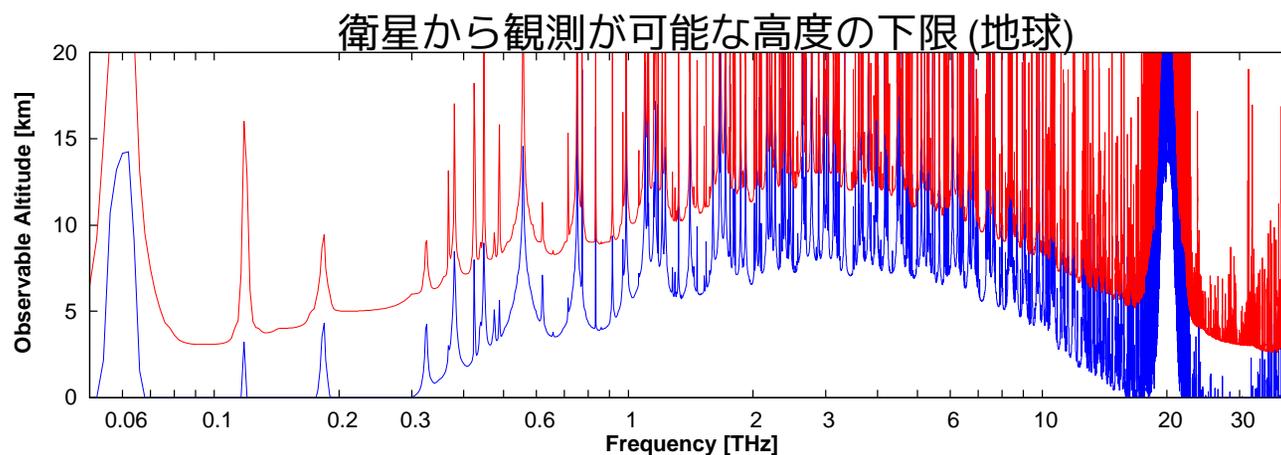
テラヘルツ波の特徴

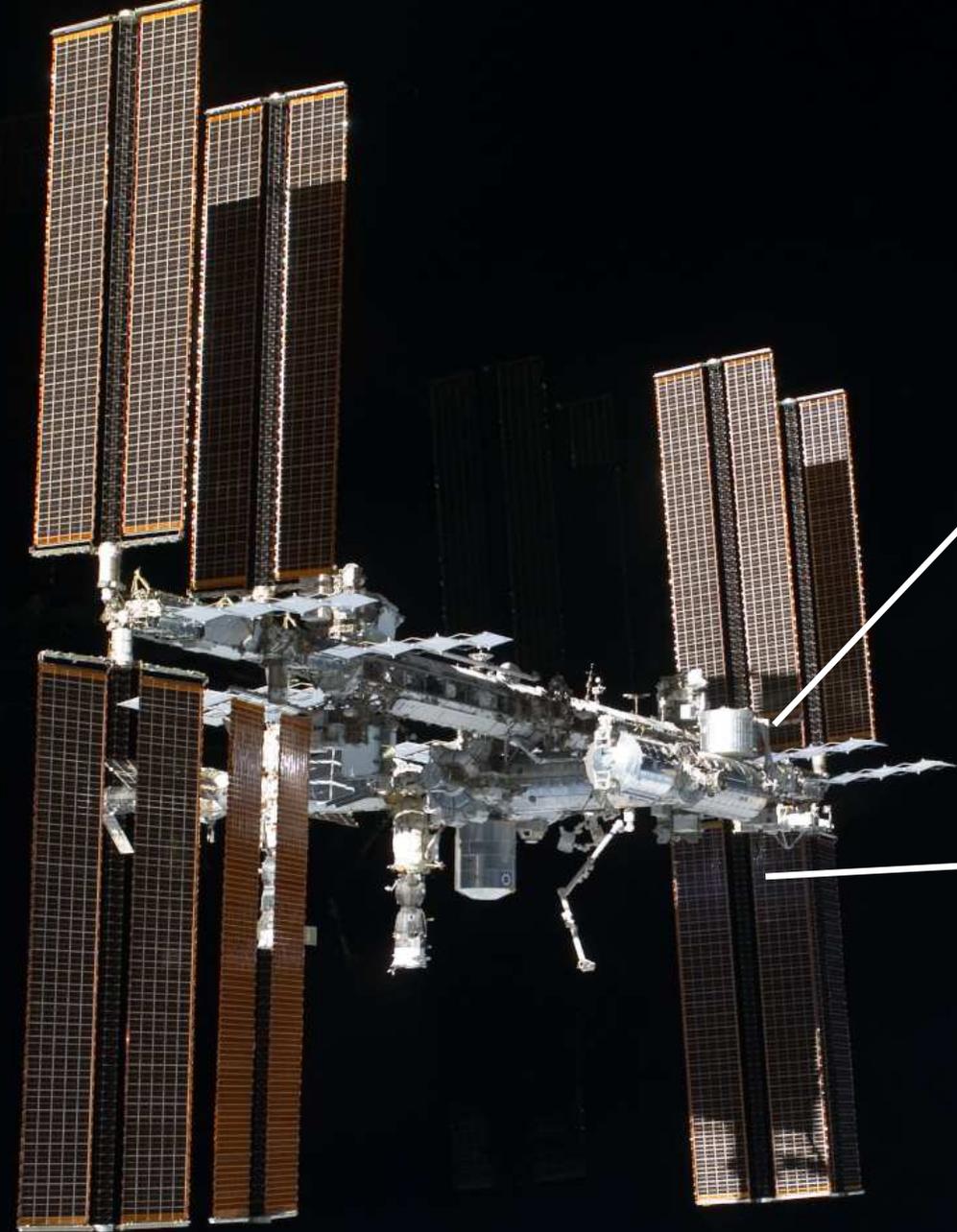
- 対流圏はほとんど伝搬しない。
→ 近距離のセンシングか、成層圏等の薄い大気での応用に限られる。
- 大気中分子の回転遷移の吸収線が多数観測できる。
→ 大気分子を分けて観測することに向いている。
- マイクロ波より波長が短い。(小さいアンテナですむ)
→ 雲の観測。装置の小型化。



大気の何がテラヘルツ波で測れるのか

- 成層圏の微量成分 (O_3 , ClO , HCl , BrO , HO_2 , HNO_3 , OH , N_2O , SO_2 , ...)
 オゾン層関連化学物質や、中間圏の観測ができることが特徴
- 成層圏の水平風
 成層圏の風を 5 m/s 以下の精度で測る唯一の方法
- 対流圏上部の氷雲
 雲氷のカラム量を求めるのに最適な観測方法
- 水蒸気、温度 (対流圏はミリ波の場合)
 マイクロ波サウンダの高周波への拡張
- 惑星等の大気、惑星等の地表面
 分光による大気組成、風、地表温度・組成等の観測
- 地上で近距離の気体成分
 広帯域の分光





the International Space Station (ISS)



Photo courtesy of NASA

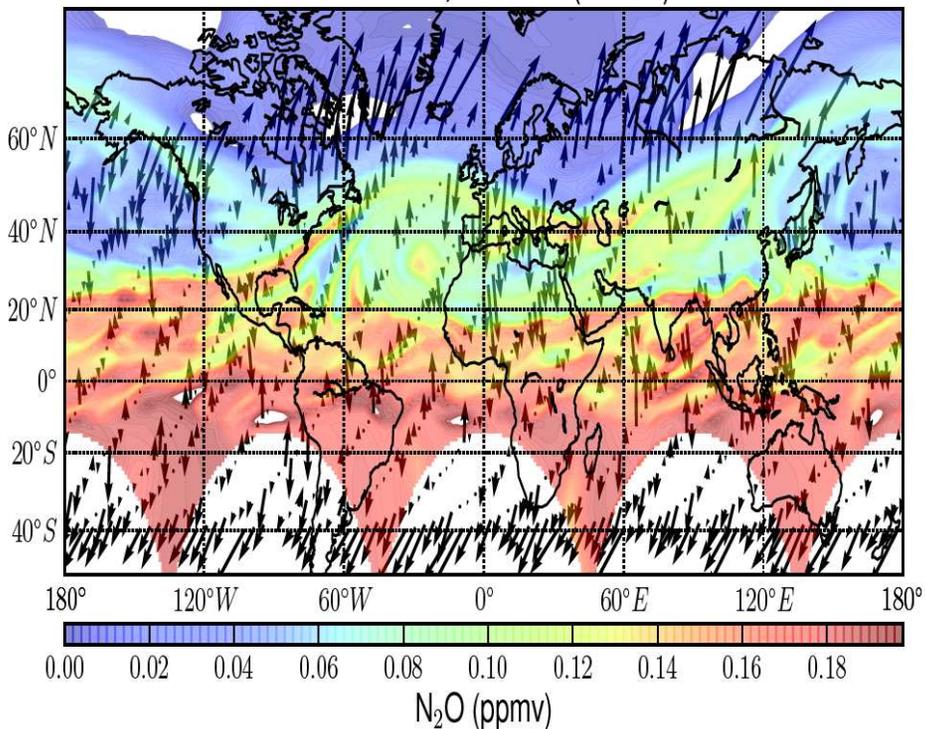


1 m (H)
0.8 m (W)
1.8 m(L)
476 kg

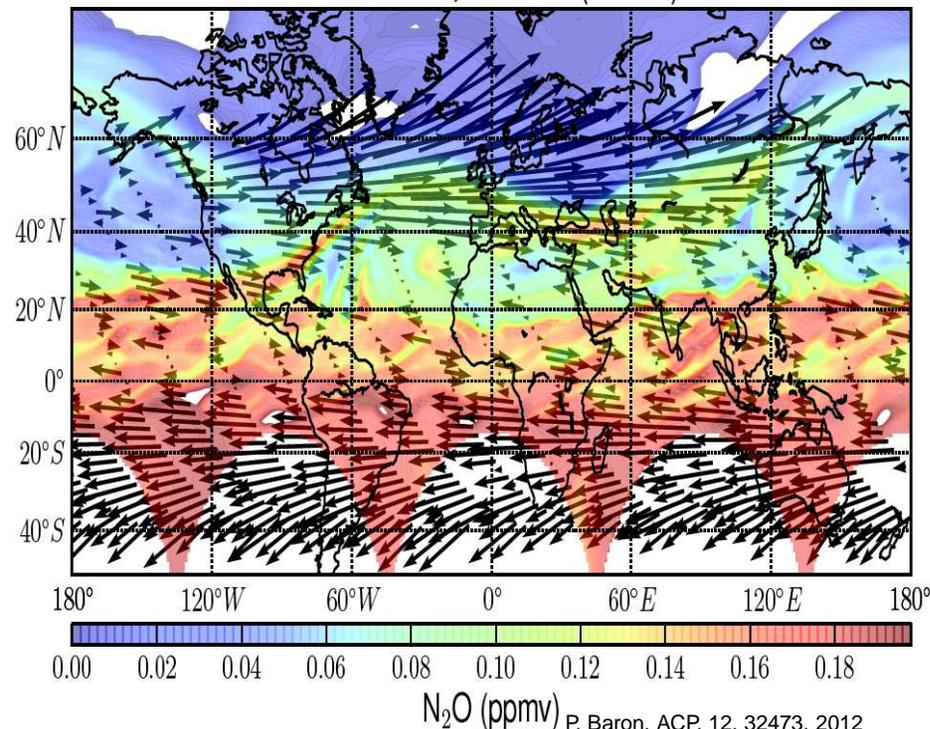
the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES)

SMILES による成層圏の風の測定

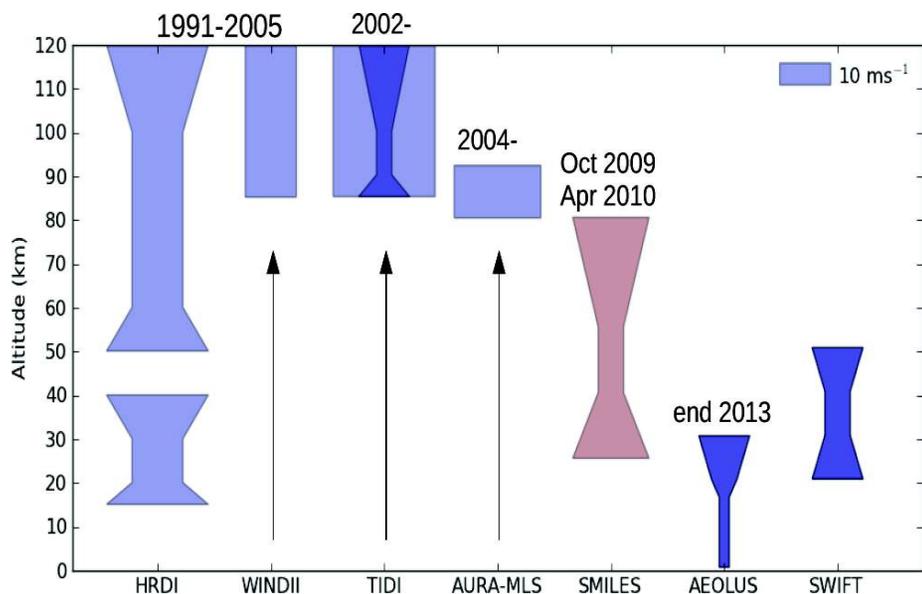
→ 50 m/s 2010/01/02, 4.9 hPa (36 km)



→ 50 m/s 2010/01/02, 4.9 hPa (36 km)



P. Baron, ACP, 12, 32473, 2012



オゾンのラインの Doppler シフトから、成層圏の風速を 5 m/s 程度の誤差で測定

5 m/s : Doppler shift 10 kHz

適切な周波数での観測ができれば 2 m/s の誤差での測定も可能。

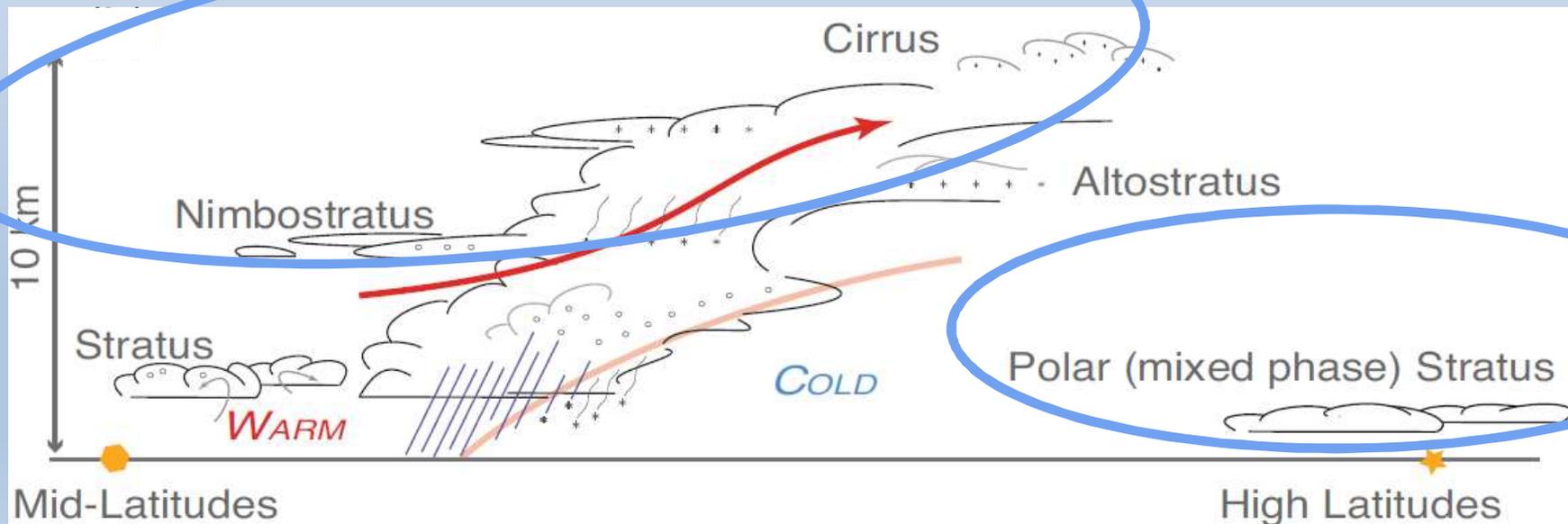
氷雲の観測

可視・赤外では、薄い雲でなければ雲頂だけの観測

ミリ波・サブミリ波は、雲の中まで透過

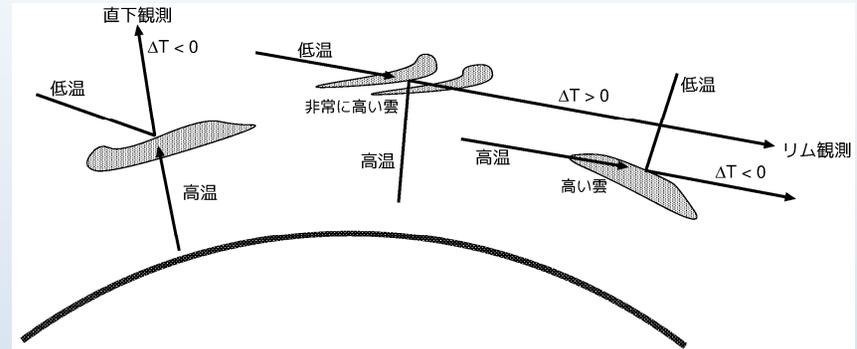
183 GHzは氷雲と水雲に感度、
325 GHzは氷雲のみに感度がある

氷雲

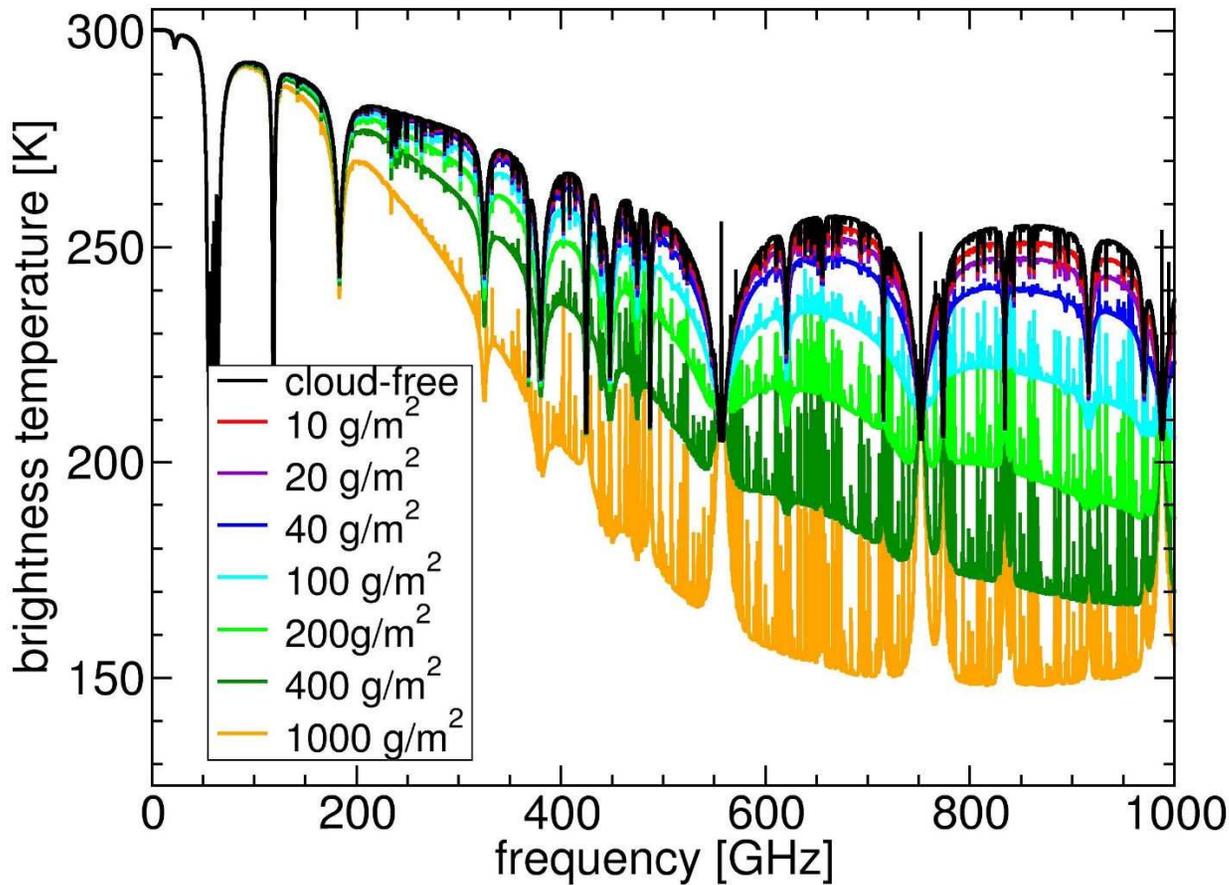


氷雲と観測輝度温度

325 GHz帯 $\Delta T=1$ Kならば、
IWP=4 g/m²の観測も可能(粒径による)

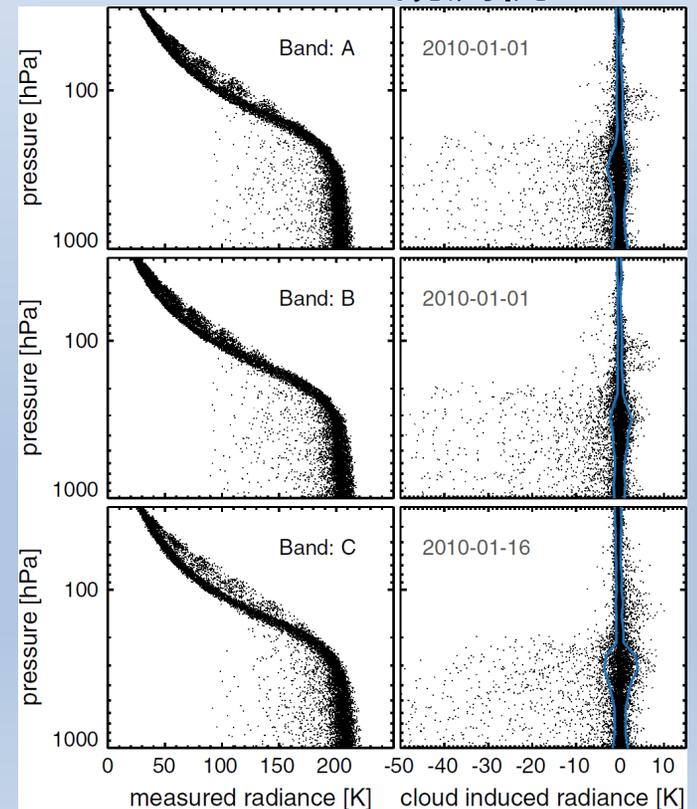


650 GHz帯受信機などがあれば、なお良い。



Courtesy of Jana Mendrok

SMILES観測例



Millan, et.al., JGR, 118, 6468, 2013

雲氷量の日変化

雲氷量の日変化は、これまで観測が少ない。
多くの衛星は太陽同期軌道。

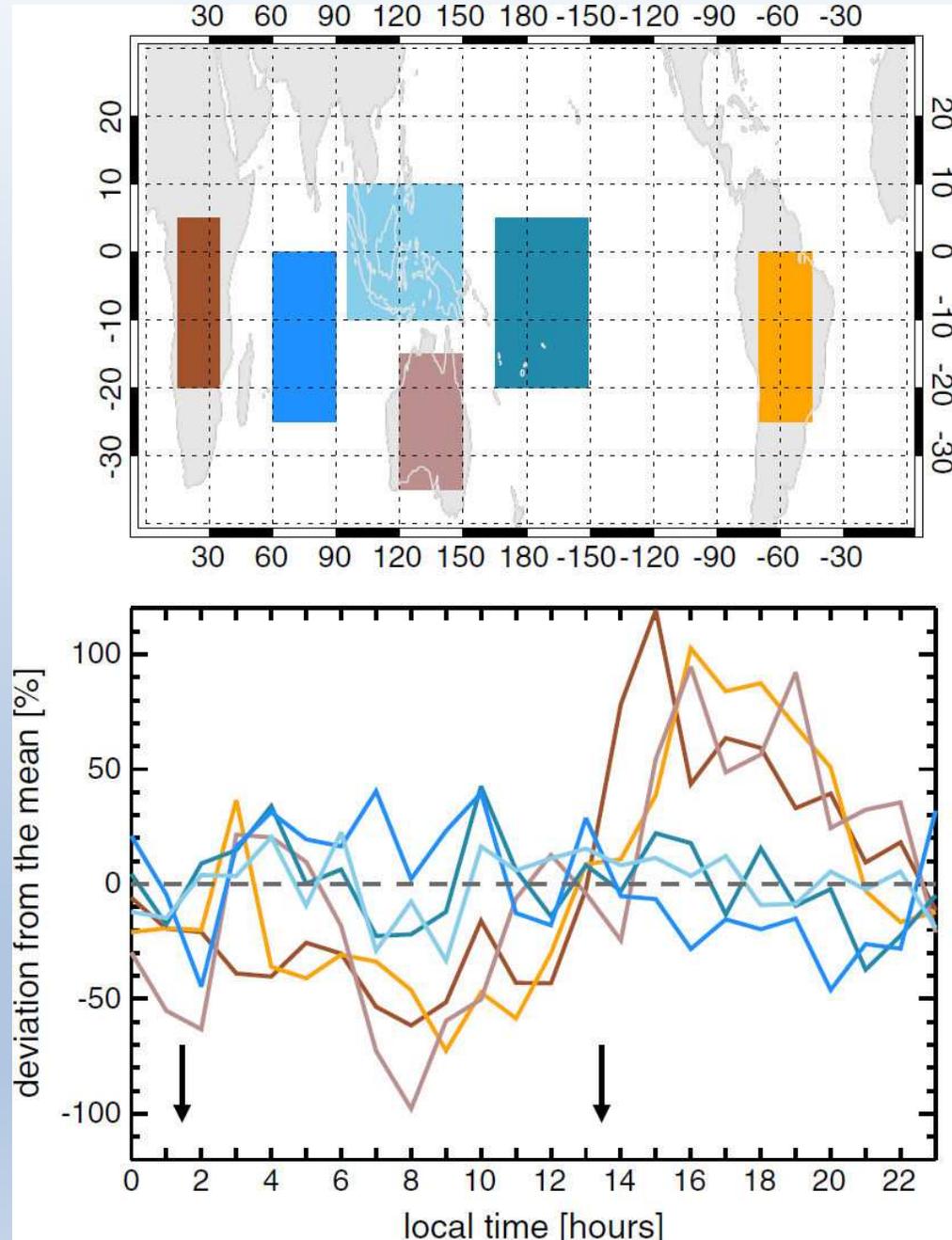
→ 太陽非同期のISSからの観測で
日変化観測が可能。

2ヶ月の観測の集積で日変化が求まるので、
季節変化との分離も可能

SMILESで観測した雲氷量の日変化。

線の色は、上図の観測地域を示す。

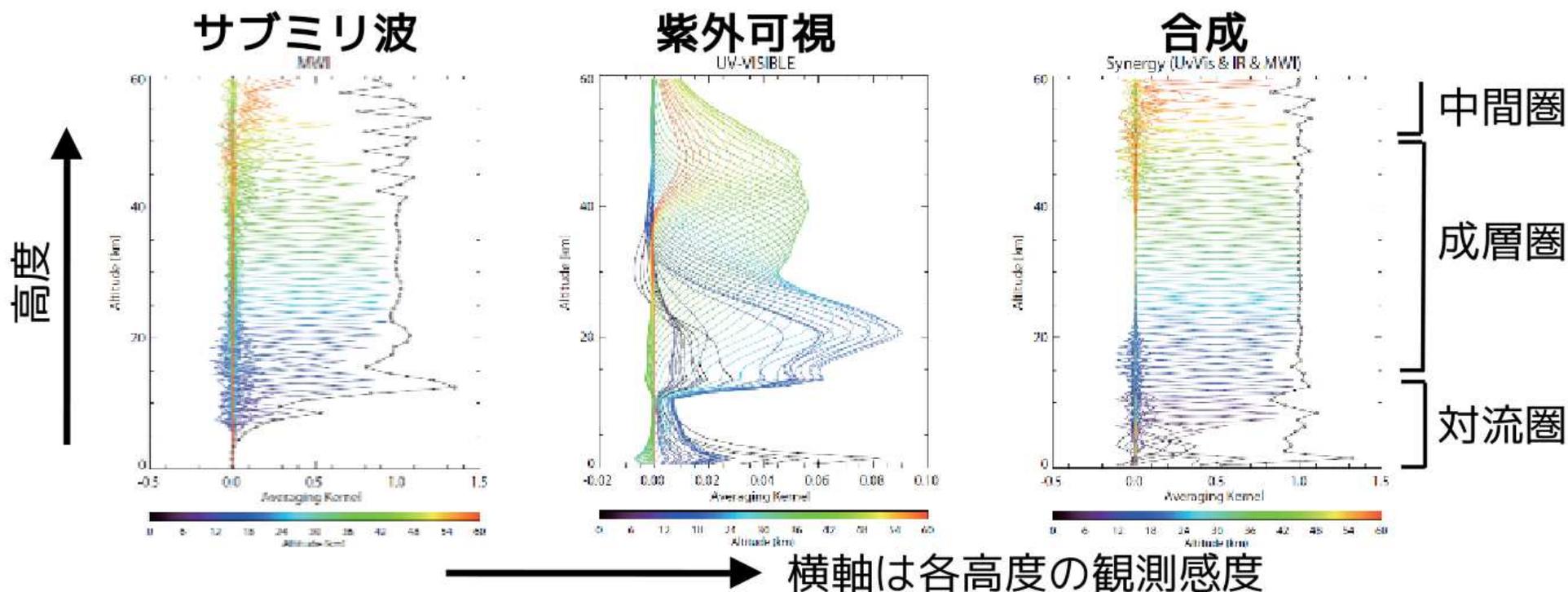
下向き矢印はA-trainの観測ローカルタイム



Millan, et.al., JGR, 118, 6468, 2013

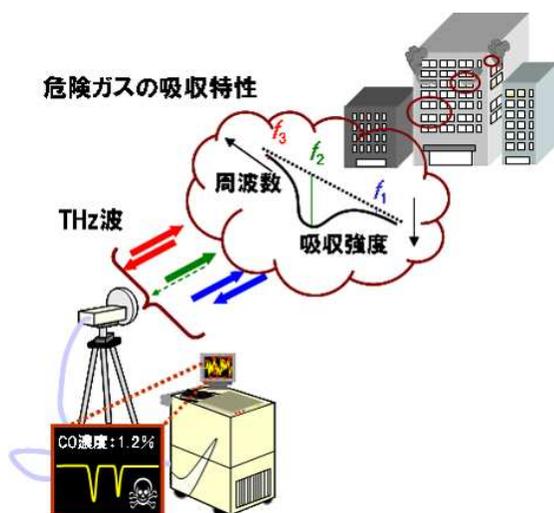
可視紫外との同時観測による対流圏観測

可視紫外の観測とサブミリ波観測を組み合わせることで、対流圏のオゾンの高度分布を導出することができる。



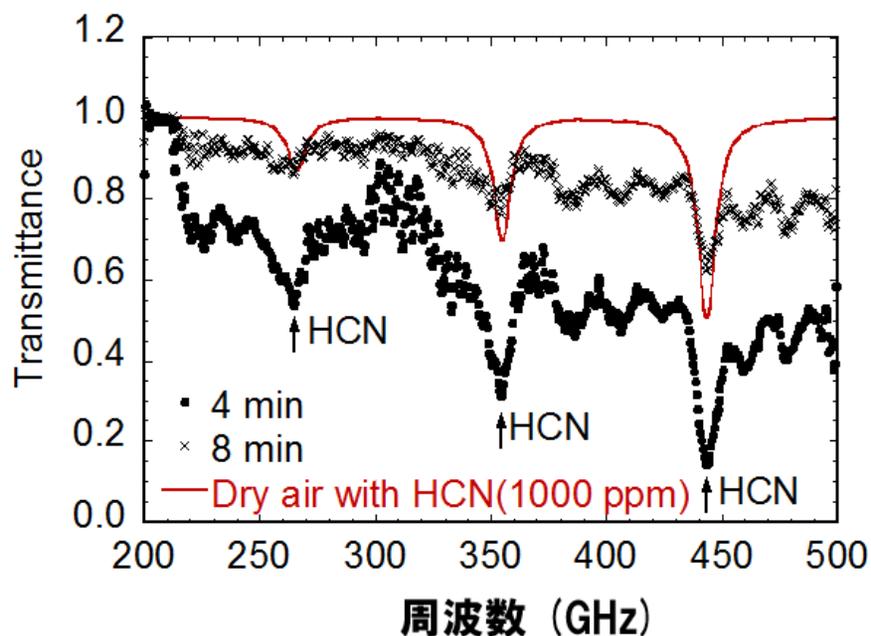
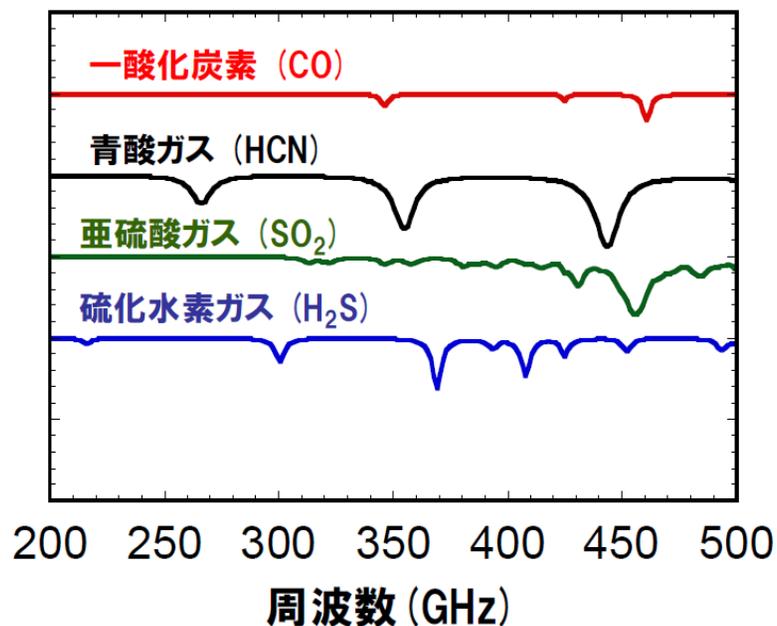
近距離のリモートガスセンシング

テラヘルツ波を照射し、建物などで反射したものを分光することで危険なガスを検知する。



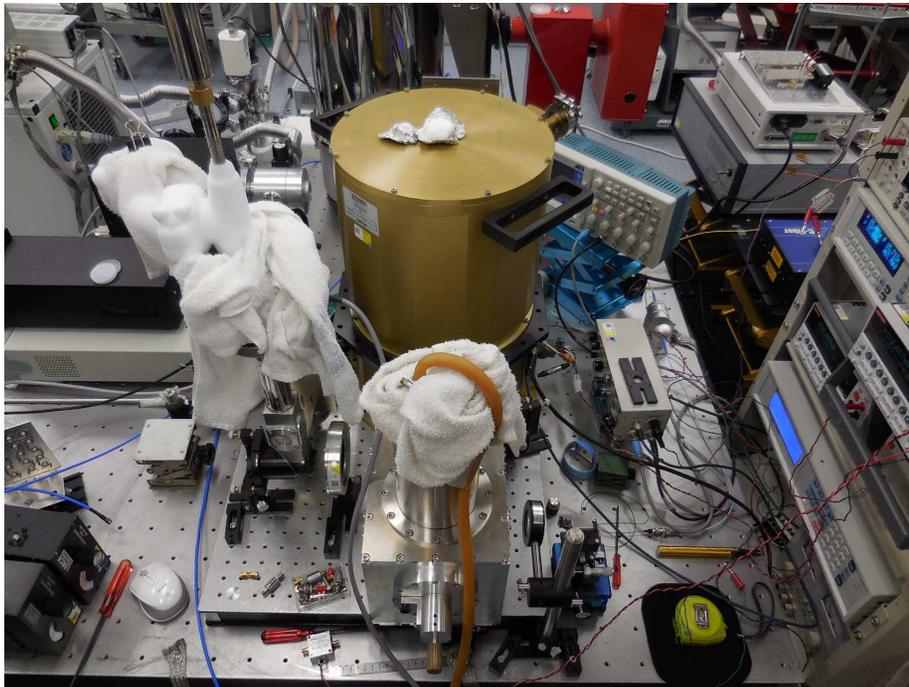
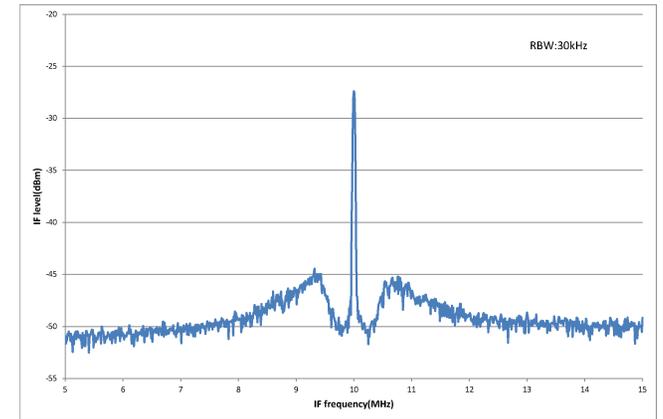
煙の充満した約 10 m のガスセルの中のシアン化水素を検出。

吸収スペクトル (計算)

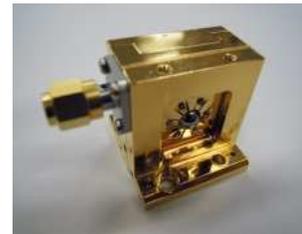


テラヘルツ高感度ヘテロダイン受信機の開発

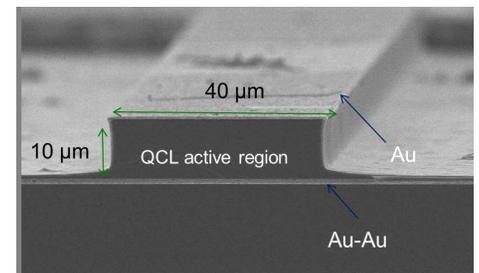
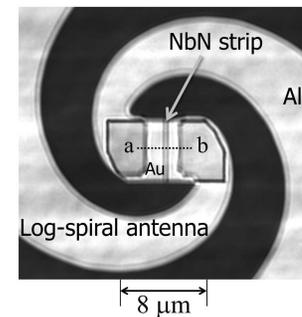
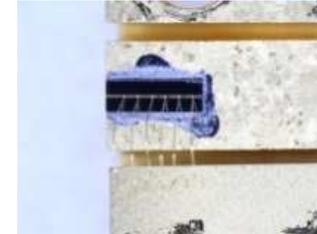
超伝導素子 (HEBM) によるテラヘルツ高感度受信機を開発。
3 THz 発振器 (QCL) のフェーズロックにも成功。



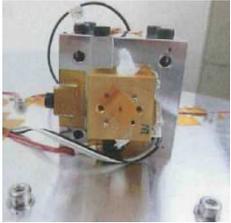
HEBM



QCL



受信機系の開発



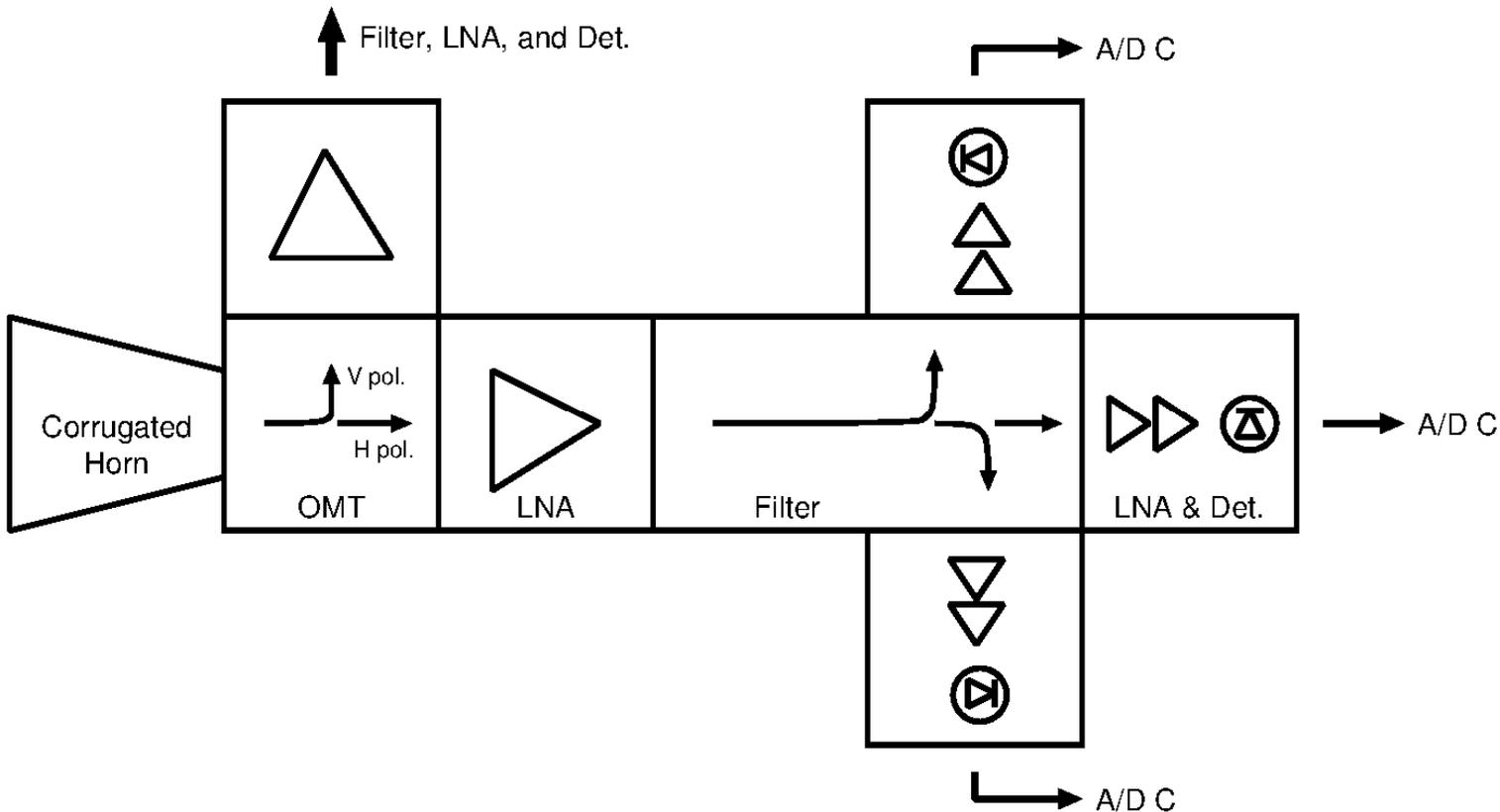
LNA, LNA & Det の開発



OMT, Filter の開発

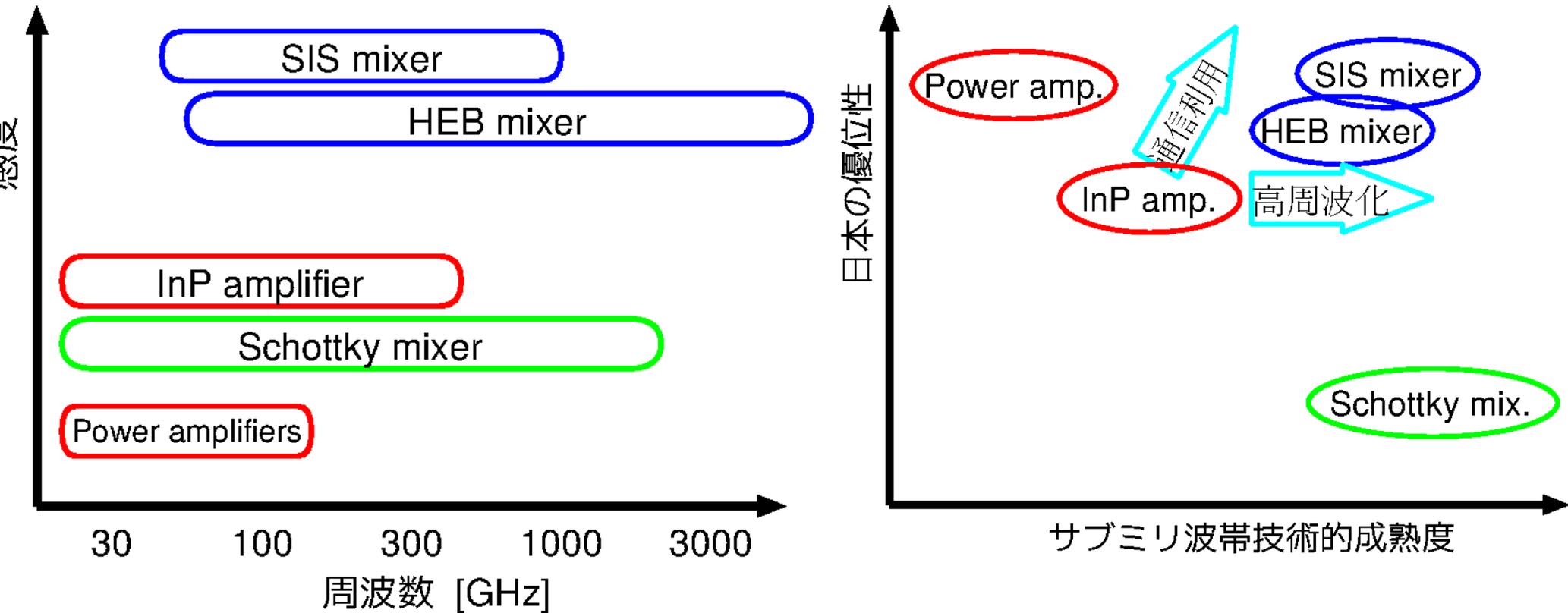
受信機系

- コルゲートホーン
- 偏波分離器
- 低雑音増幅器
- 周波数分離器
- 検波器付増幅器



低雑音増幅器 開発の必要性について

ラジオメータ用低雑音増幅器には InP を利用予定。
宇宙利用では、米国、欧州が先行しているが、300 GHz帯の実績はまだないようである。



まとめ

- テラヘルツ波 (0.1–10 THz) による地球大気のリモートセンシングでは、次の量を観測対象としている。
 - 成層圏の微量成分 (O_3 , ClO, HCl, BrO, HO_2 , HNO_3 , OH, N_2O , SO_2 , …)
 - 成層圏の水平風
 - 対流圏上部の氷雲
 - その他、水蒸気や温度、また、近距離の危険な気体
- 木星圏等の惑星大気観測にむけた開発が進みつつある。
- テラヘルツリモートセンシングに利用できるデバイスとして国内では次の開発が進められている。
 - 高感度受信機、計測機に使用する超伝導デバイス
 - テラヘルツ帯の、高周波数安定の発振器
 - ミリ波からサブミリ波帯の低雑音増幅器
(衛星搭載、地上設置ラジオメータでの利用を想定)