

第5回

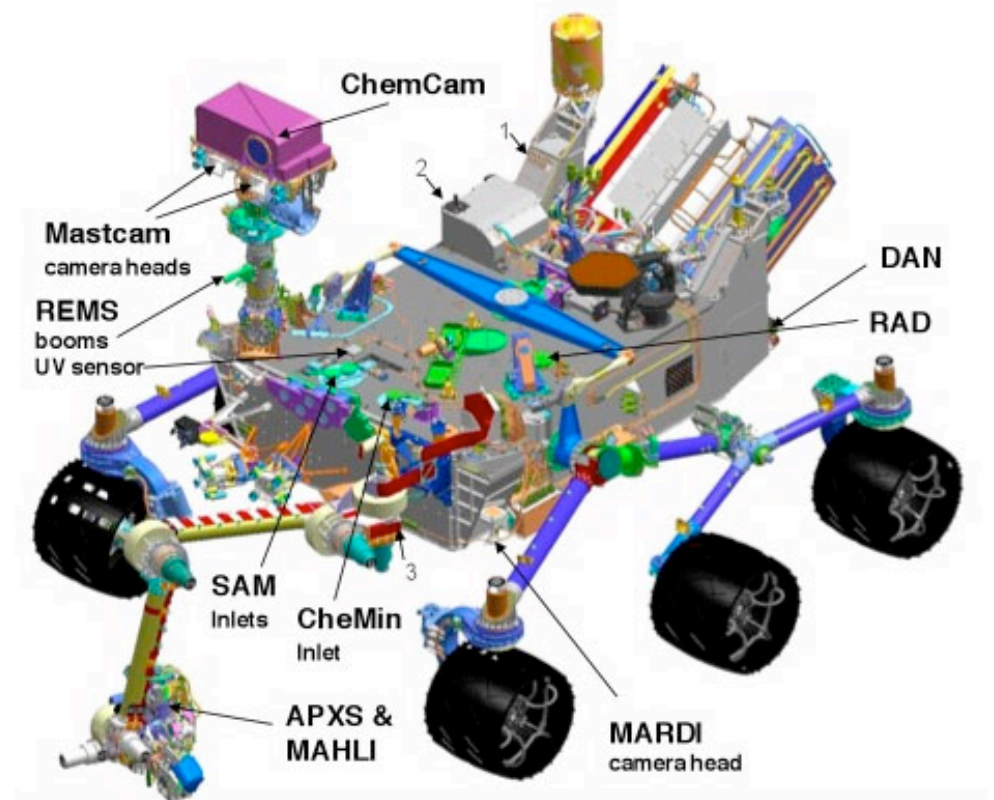
惑星大気の観測

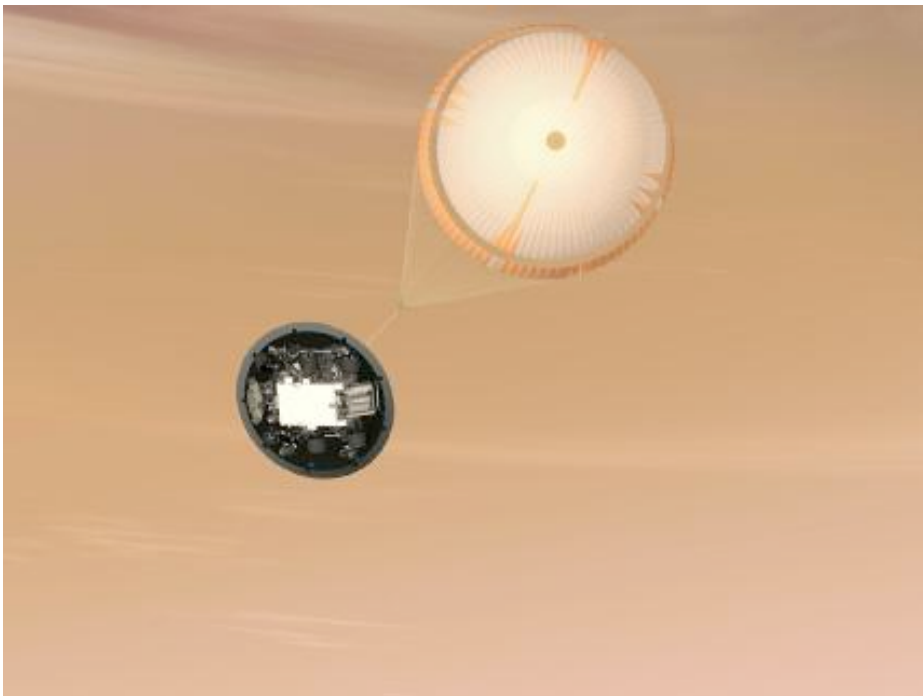
- 様々なアプローチ
- 直接観測
- リモートセンシングの方法
- 光による観測
- 電波による観測
- 「あかつき」

Mars Science Laboratory ('Curiosity')

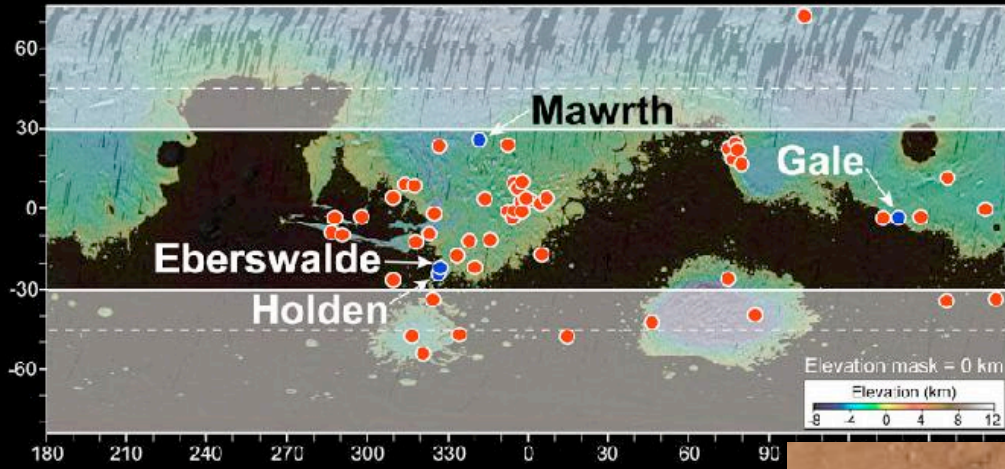


- NASAの大型探査車
- 2011年11月26日に打ち上げられた

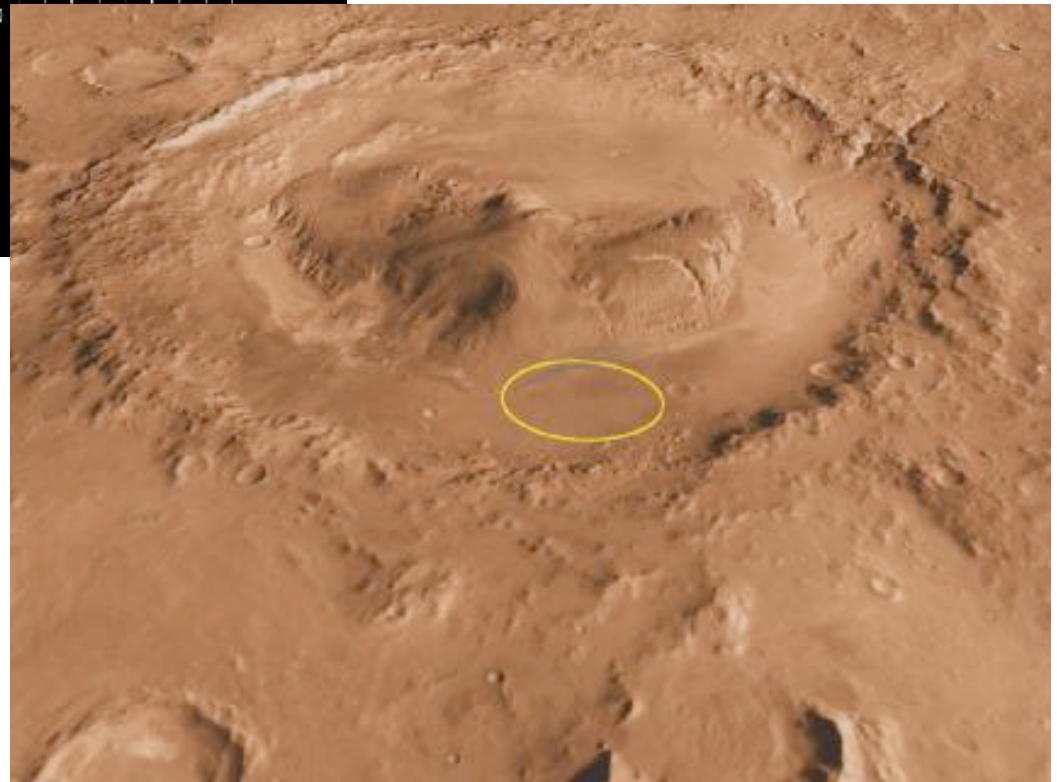




● Proposed Curiosity Landing Sites



● Final Curiosity Candidate Sites



搭載観測機器

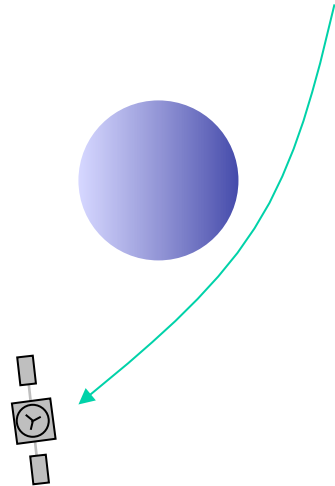
- Mast Camera (Mastcam)
- Chemistry & Camera (ChemCam)
- Alpha Particle X-ray Spectrometer (APXS)
- Mars Hand Lens Imager (MAHLI)
- Chemistry & Mineralogy (CheMin)
- Sample Analysis at Mars (SAM) 微量気体の質量分析、ガスクロマトグラフィーなど
- Radiation Assessment Detector (RAD)
- Rover Environmental Monitoring Station (REMS) 風向・風速、気温、気圧、湿度
- Dynamic Albedo of Neutrons (DAN)
- Mars Descent Imager (MARDI)
- MSL EDL Instrument (MEDLI) Suite

惑星の観測

それぞれメリットとデメリットがある

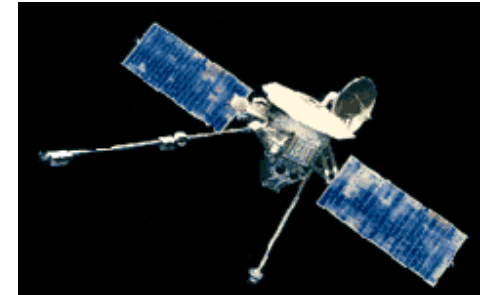
	直接探査	周回衛星	地上観測
探査領域	限定された地域	惑星の全域	惑星の全域
継続時間	多くの場合短い	長期かつ連続的	繰り返し何度でも
観測物理量	リソース次第でかなり広範	電磁波で遠隔測定できるもの	電磁波で遠隔測定できるもの 観測装置の重量制限が緩い

惑星探査の方法(1)

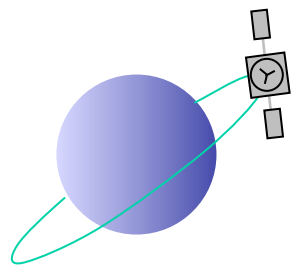


フライバイ

- 光や電波による遠隔測定 & 磁場やプラズマの直接測定



Mariner 9
(Mercury, Venus)



オービター(軌道船)

- 光や電波による遠隔測定 & 磁場やプラズマの直接測定
- 惑星全域をカバー
- 長期モニター可能

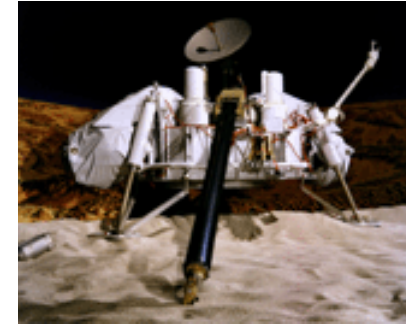


Mars Global
Surveyor

惑星探査の方法(2)

ランダー(着陸機)

- 直接測定
- サンプルは一箇所



Viking 1,2
(Mars)



ローバー

- ある狭い範囲でサンプル



Sojourner Rover (Mars)

気球、飛行機

- 直接測定、遠隔測定
- ある程度広い範囲



Vega Venus balloon

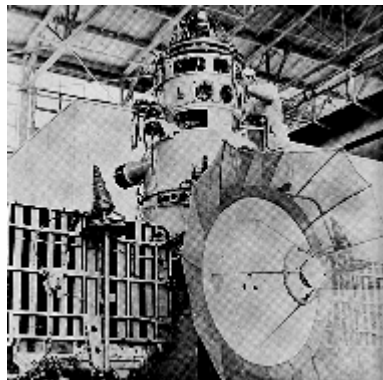
これまでの金星探査

マリナー2・5・10号



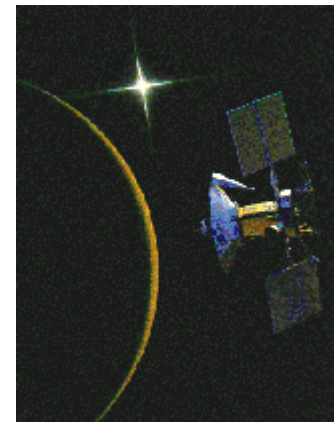
打上げ国: アメリカ
打上げ年: 1962~1973年

ベネラ1~16号



打上げ国: 旧ソビエト連邦
打上げ年: 1961~1983年

マゼラン



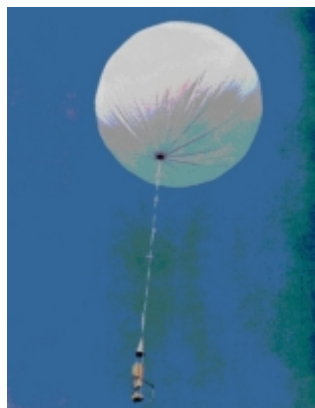
打上げ国: アメリカ
打上げ年: 1989年

パイオニア・ビーナス



打上げ国: アメリカ
打上げ年: 1978年

ベガ1・2号



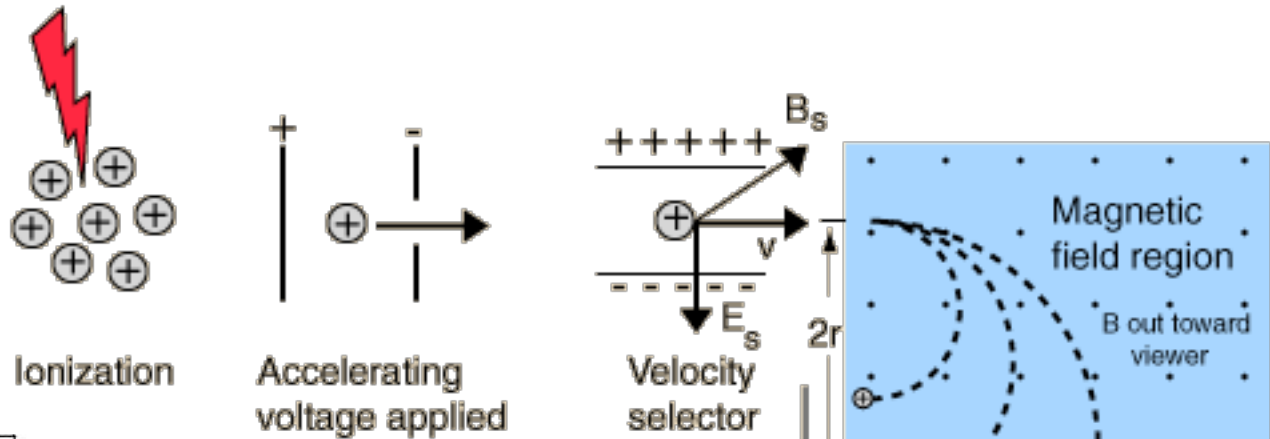
打上げ国: 旧ソ連・フランス
打上げ年: 1984年

ビーナスエクスプレス



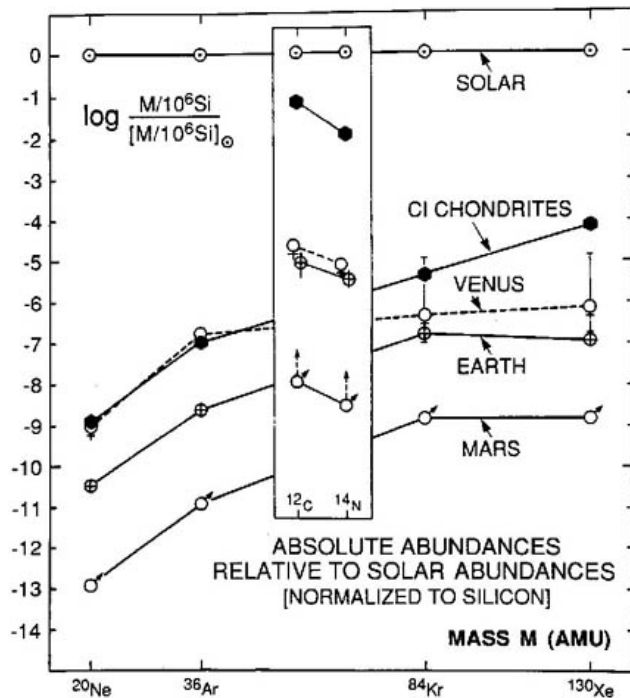
打上げ国: 欧州宇宙機関
打上げ年: 2003年

直接観測の例：質量分析



After ionization, acceleration, and selection of single velocity particles, the ions move into a mass spectrometer region where the radius of the path and thus the position on the detector is a function of the mass.

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{mE_s}{qBB_s}$$



直接観測の例：エアロゾル粒径分布

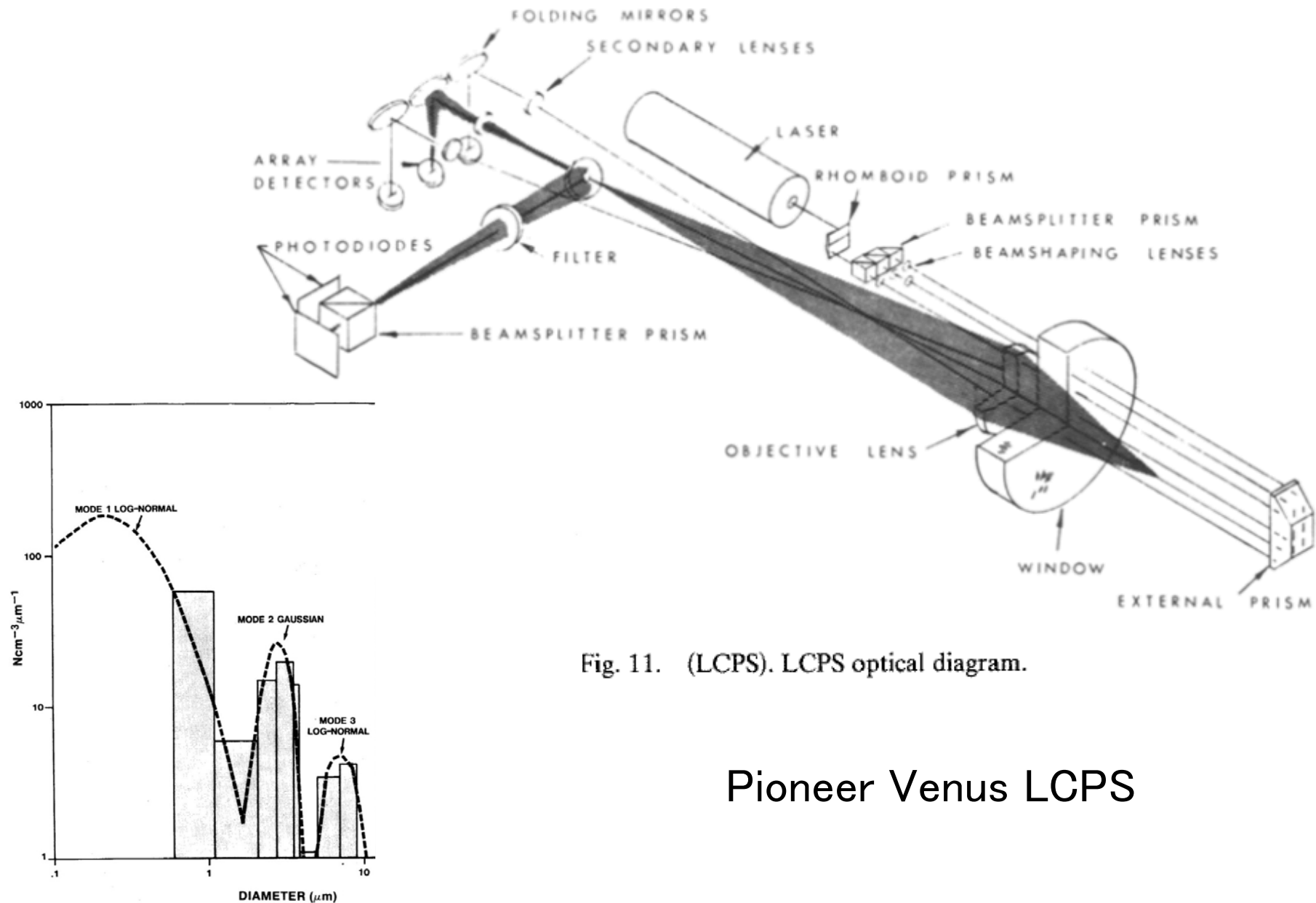


Fig. 11. (LCPS). LCPS optical diagram.

Pioneer Venus LCPS

大気のリモートセンシング

電磁波の吸収と放出

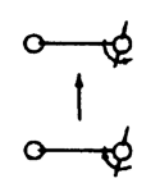
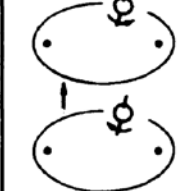
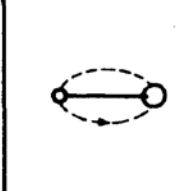
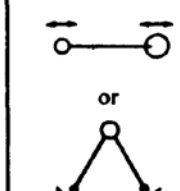
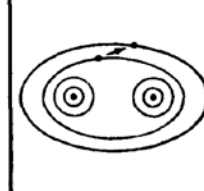
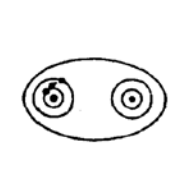
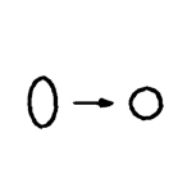
スピンの変化		姿勢の変化		原子配置の変化		電子分布の変化		核配置の変化	
核磁気共鳴	電子スピン共鳴	マイクロ波	赤外	紫外・可視	X-線	γ-線			
									
10^{-2}	1	100	10^4	10^6	10^8	10^9			
cm ⁻¹	波数								
10 m	100 cm	1 cm	100 μm	1 μm	10 nm	波長			
3 × 10 ⁸	3 × 10 ⁹	3 × 10 ¹⁰	3 × 10 ¹²	3 × 10 ¹⁴	Hz	3 × 10 ¹⁶	周波数		3 × 10 ¹⁸
10 ⁻³	10 ⁻¹	10	10 ³	10 ⁵	joules/mole	10 ⁷	エネルギー-10 ⁹		

図 5.1 電磁波のスペクトルと電磁波-分子(原子)の相互作用のメカニズム (Banwell and McCash, 1994)²⁶⁾

柴田(1999)

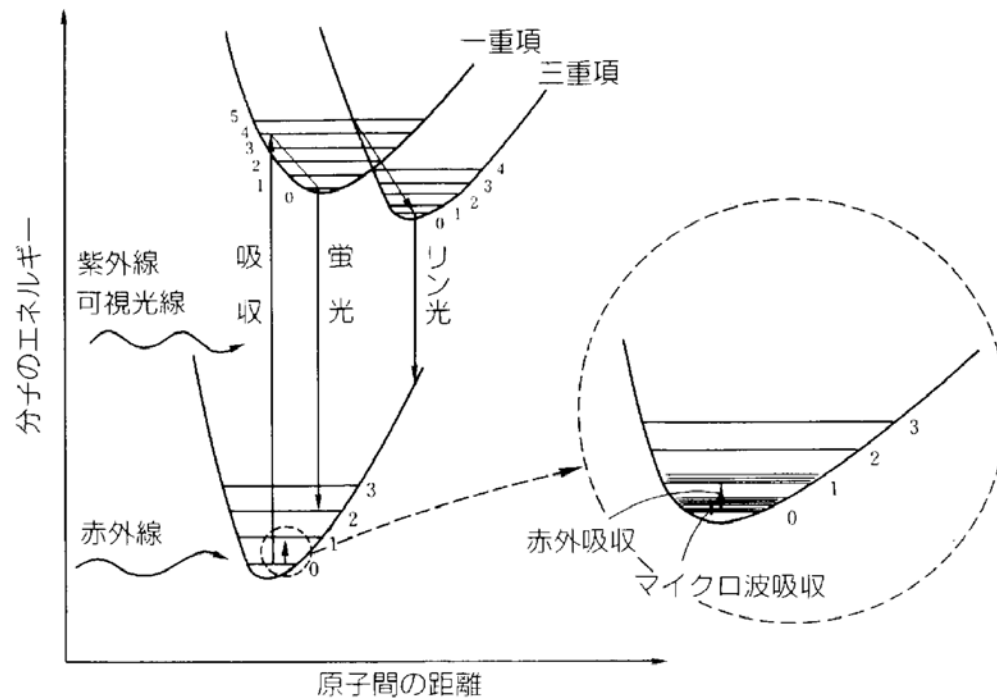
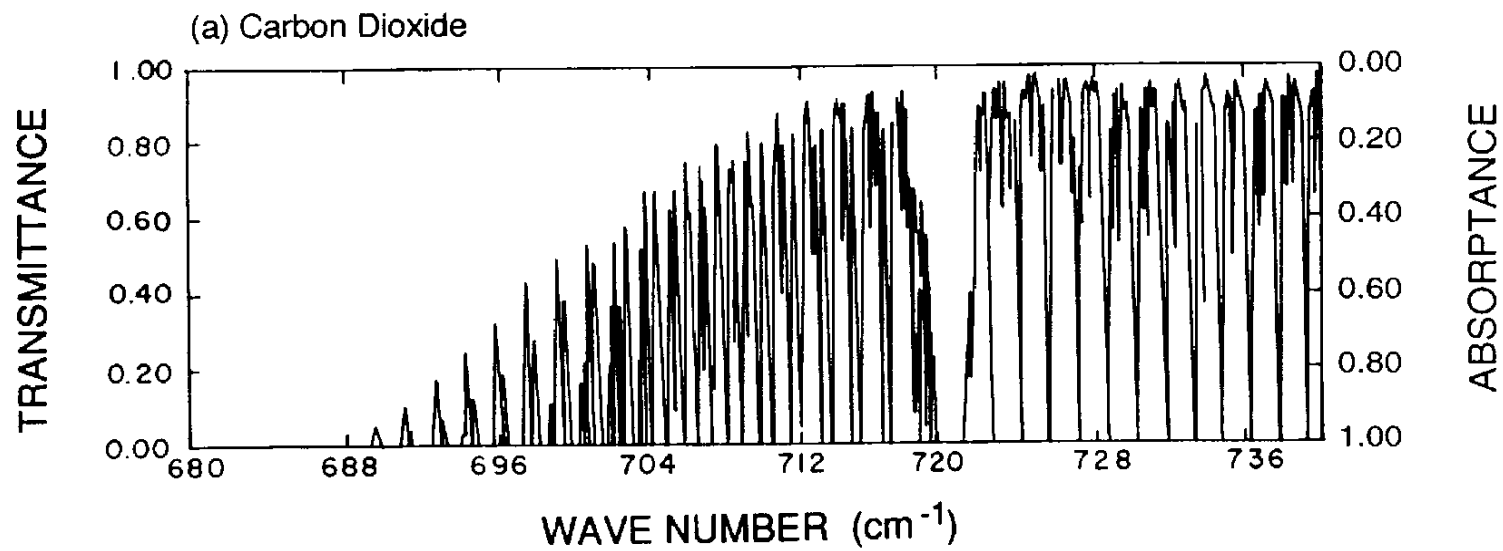


図1-3 分子のエネルギーレベルと光の吸収



大気のリモートセンシング

下方視観測 (nadir sounding)

大気からの熱放射を観測
波長: 赤外



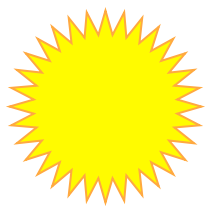
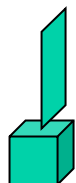
周縁観測 (limb sounding)

大気の熱放射を観測
波長: 赤外～マイクロ波



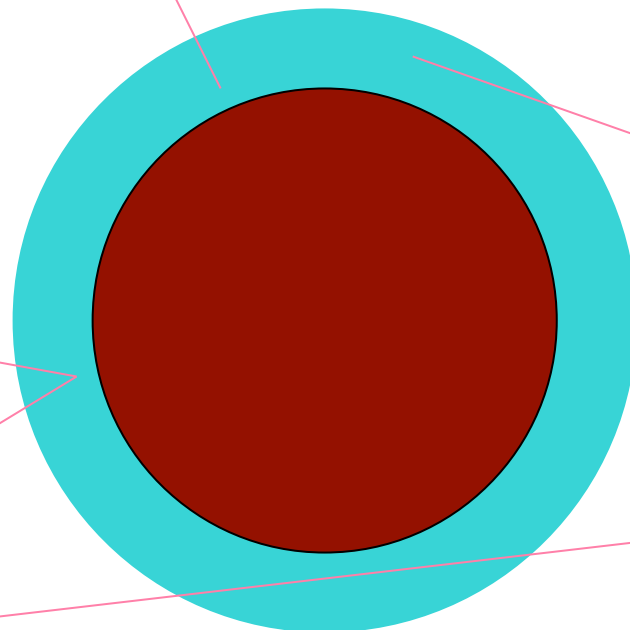
下方視観測 (nadir sounding)

太陽散乱光を観測
波長: 近赤外～紫外



周縁観測 (limb sounding)

太陽や恒星を光源とする
波長: 近赤外～紫外



直下視の赤外スペクトル

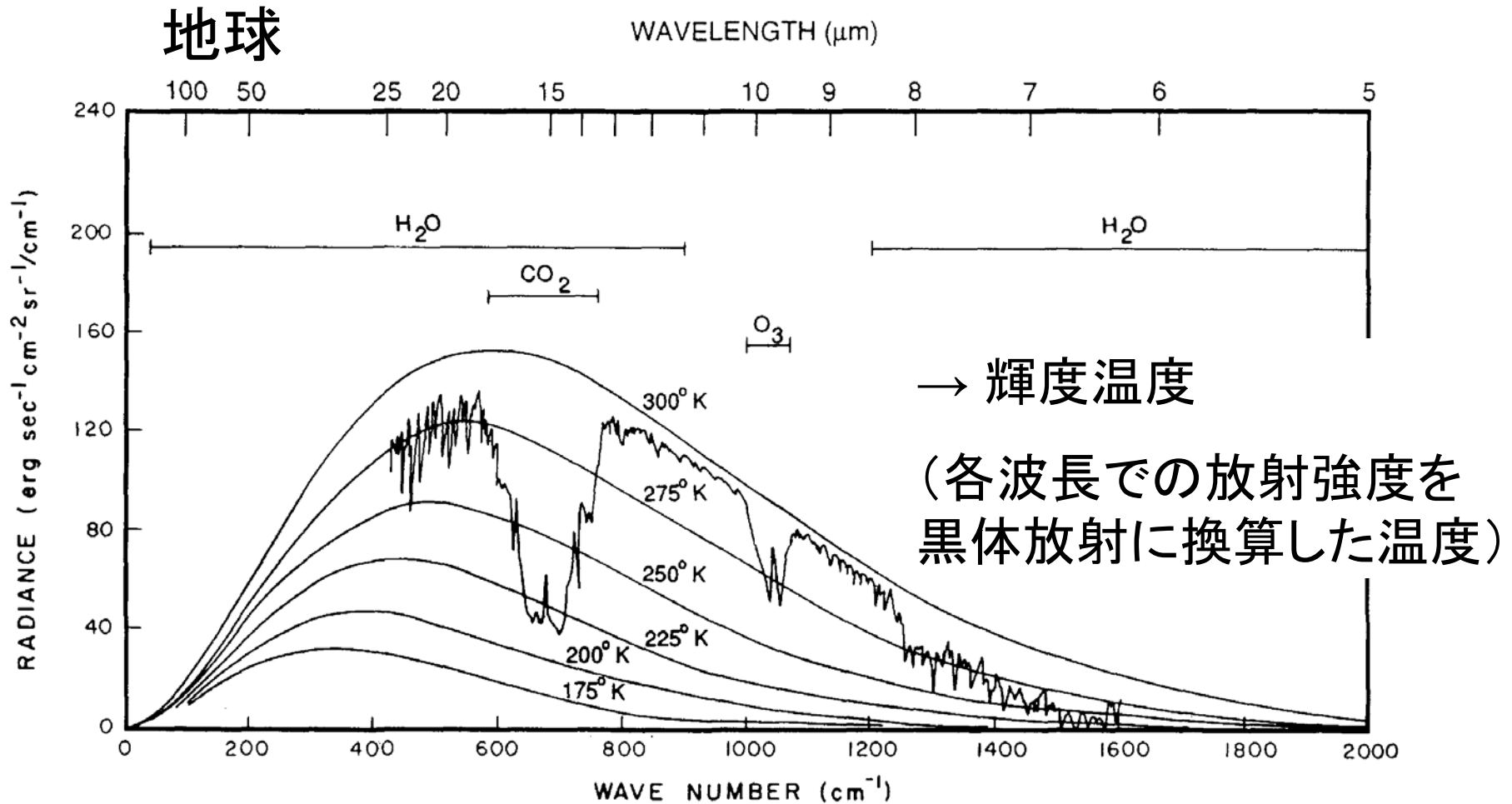
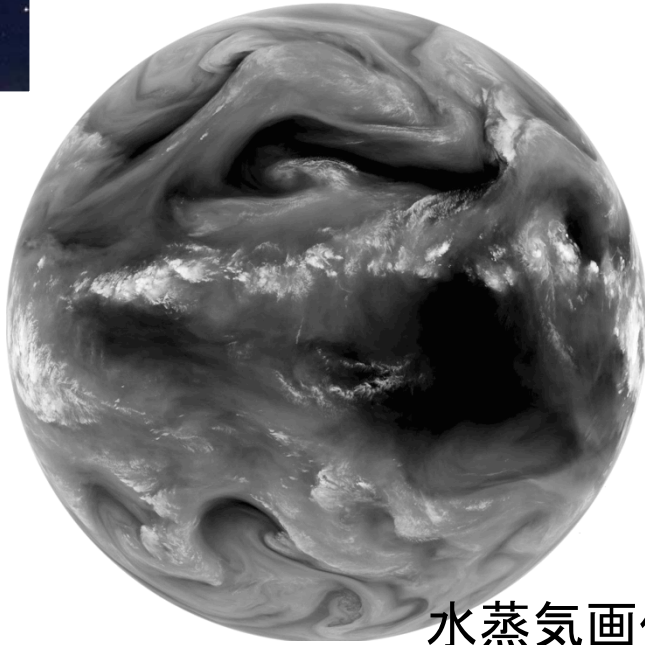


Figure 8.5 Spectrum of outgoing LW radiation over (215° W, 15° N) observed by Nimbus-4 IRIS, as a function of wavenumber λ^{-1} . Blackbody spectra for different temperatures and individual absorbing species indicated. Adapted from Liou (1980).



地球の気象衛星



水蒸気画像

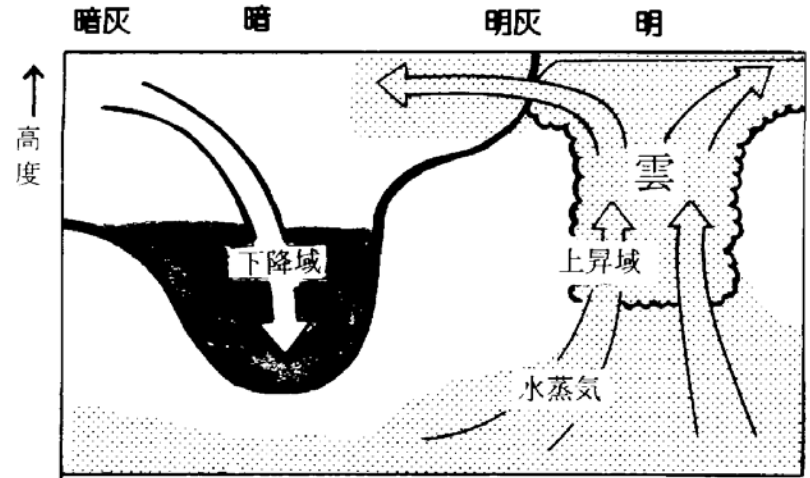
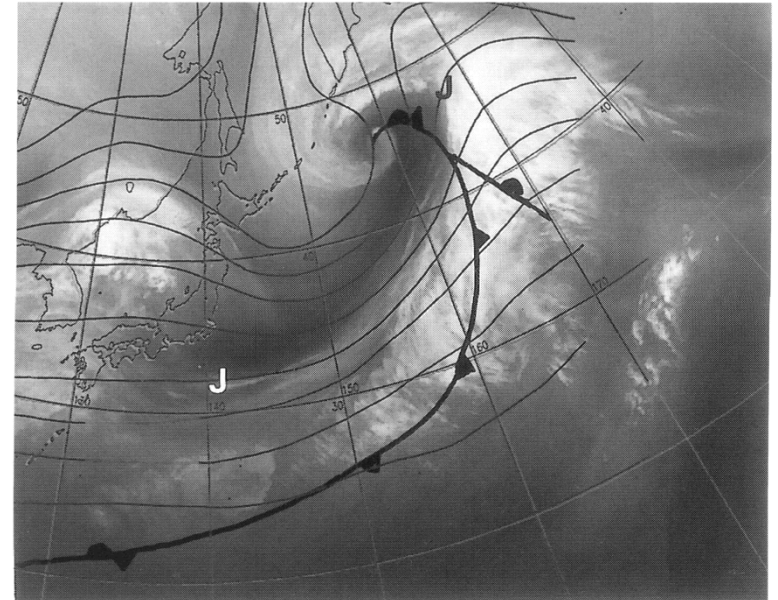
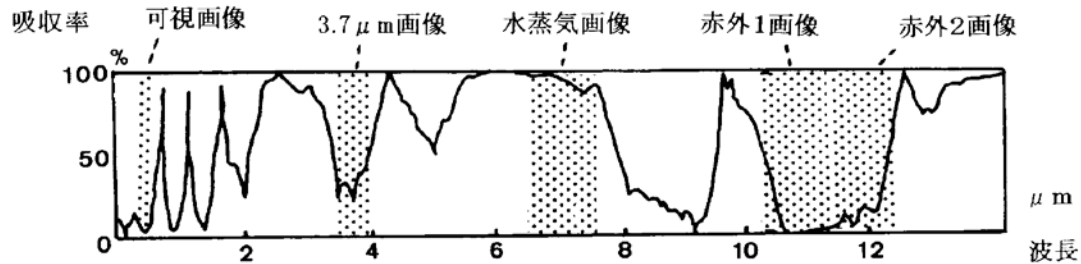


図 1-3-2 水蒸気画像と大気現象との関係の概念図
 ドット領域：水蒸気が多く含まれる領域
 太線：平均射出高度（画像上の色を決定する高度）

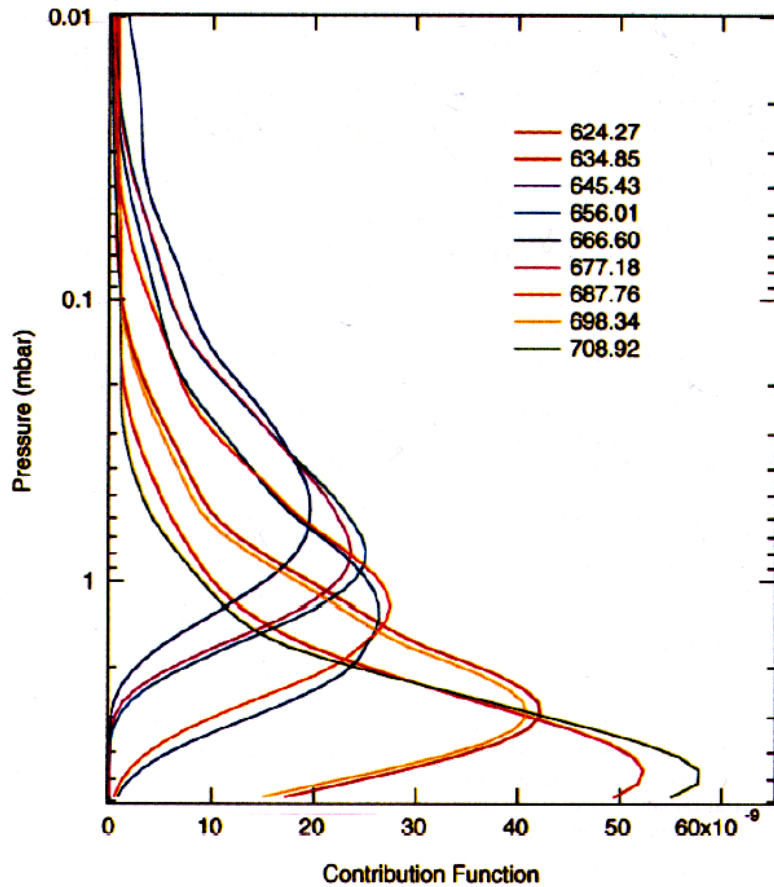


直下視での熱放射分光

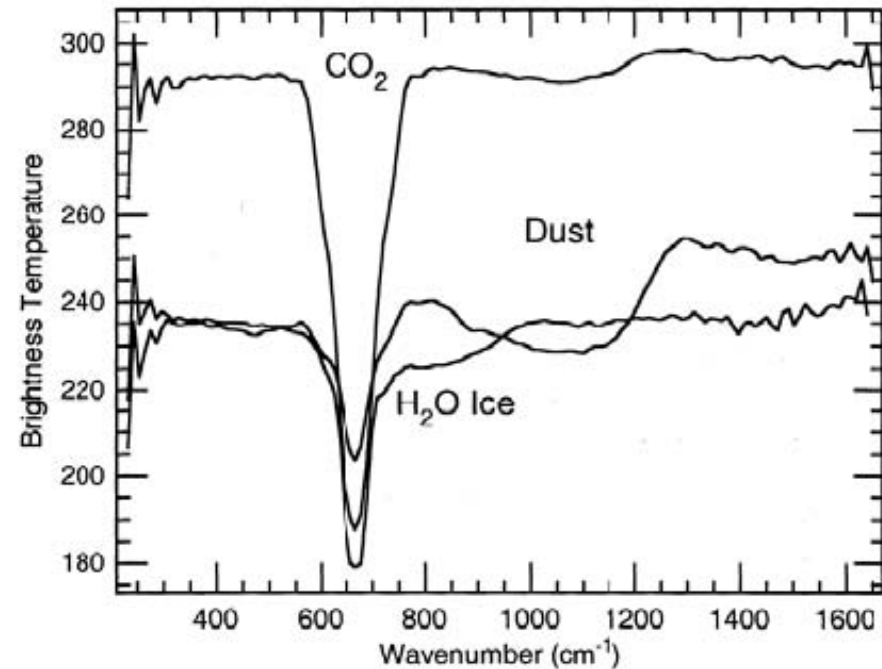
大気上端での上向き熱放射

$$I = B(T_s) \exp(-\tau_s) + \int_0^{\tau_s} B(T(\tau)) \exp(-\tau) d\tau$$

$$= B(T_s) \exp(-\tau_s) + \int_0^{\infty} B(T(z)) k_a(z) \exp(-\tau(z)) dz$$



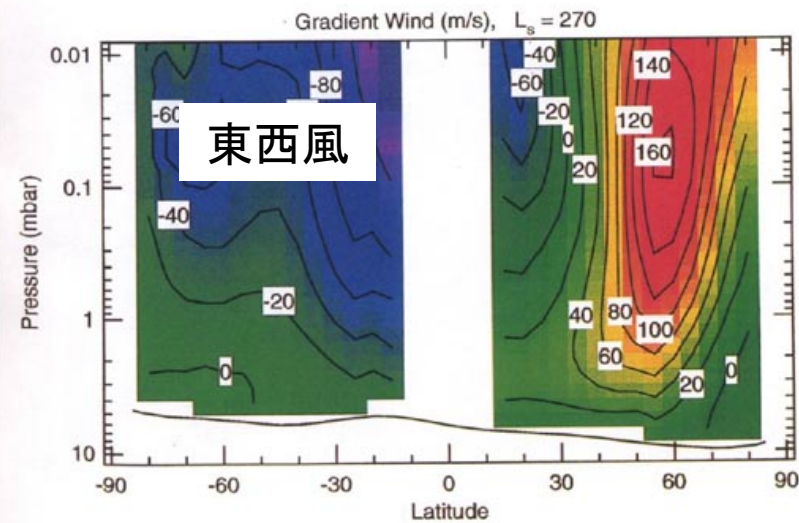
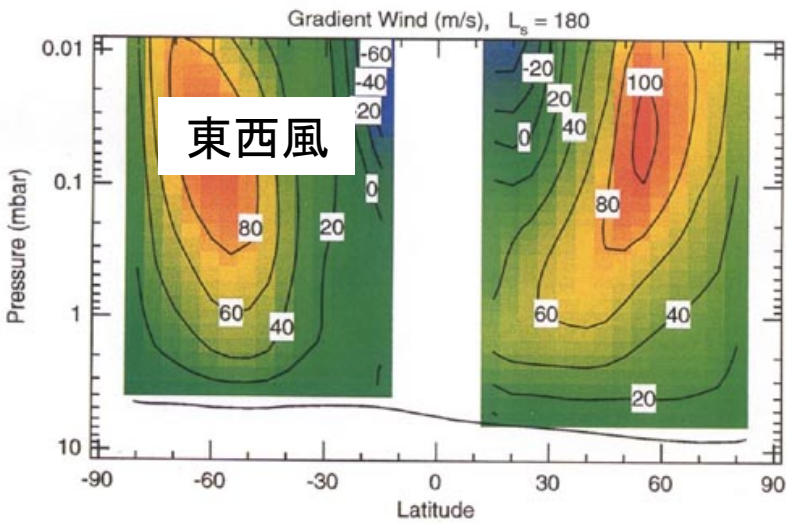
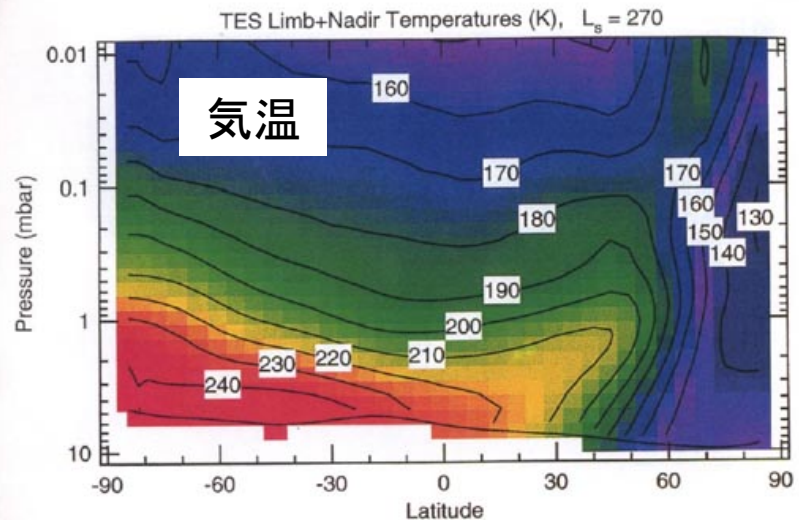
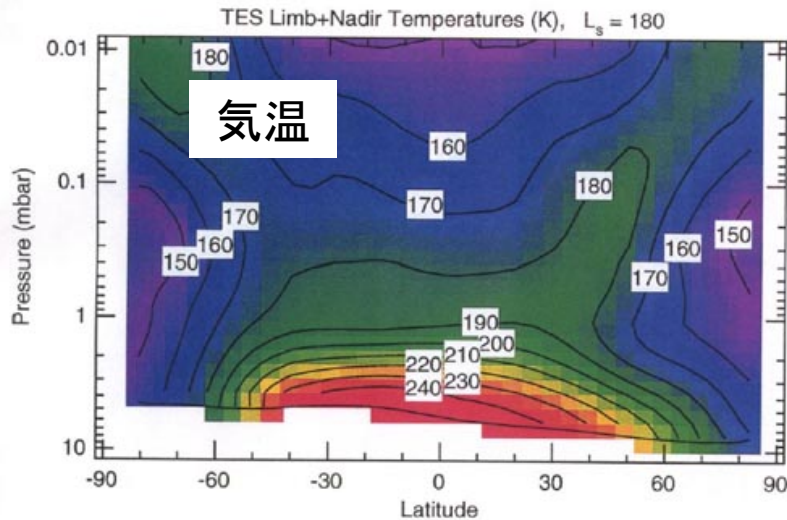
火星の標準的な大気における、
CO₂ 15μm吸収帯の幾つかの
波長での荷重関数



温度風: $\frac{\partial u_g}{\partial p} = \frac{R}{f p} \frac{\partial T}{\partial y}$

北半球の秋

北半球の冬



地球の対流圏と成層圏の性質を併せ持つ大気構造

Venera 15搭載FTSによる金星大気の赤外スペクトルからの気温導出 (Zasova et al., 1999)

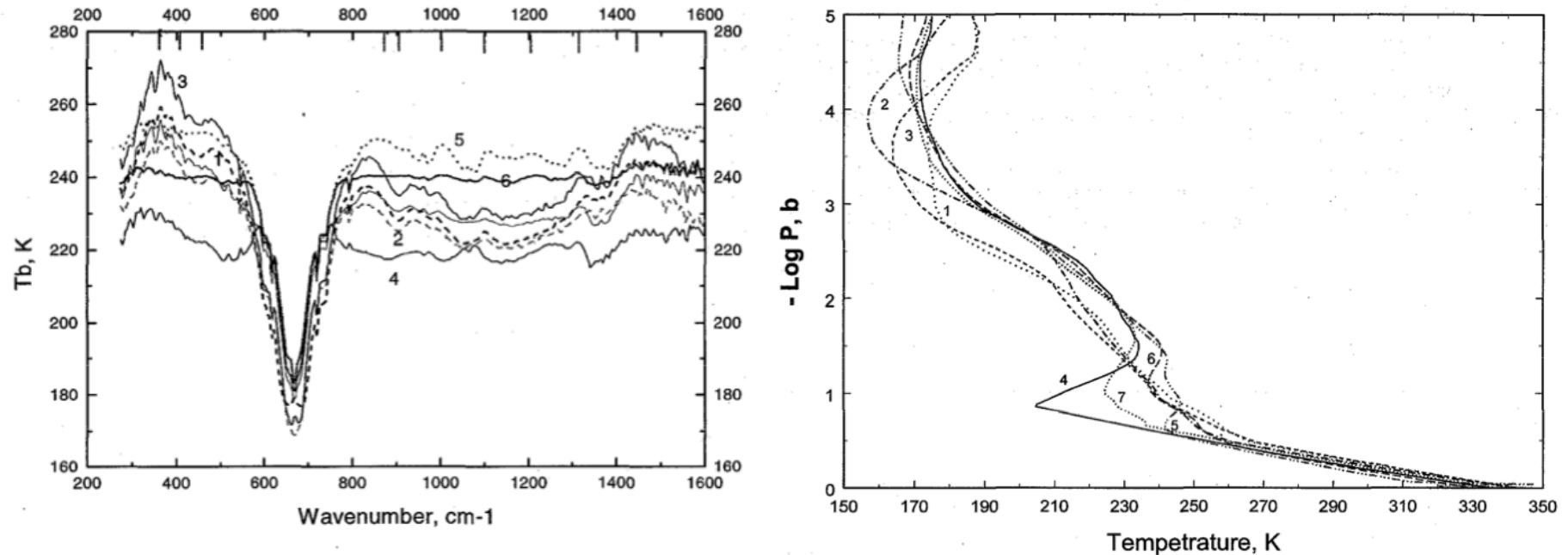
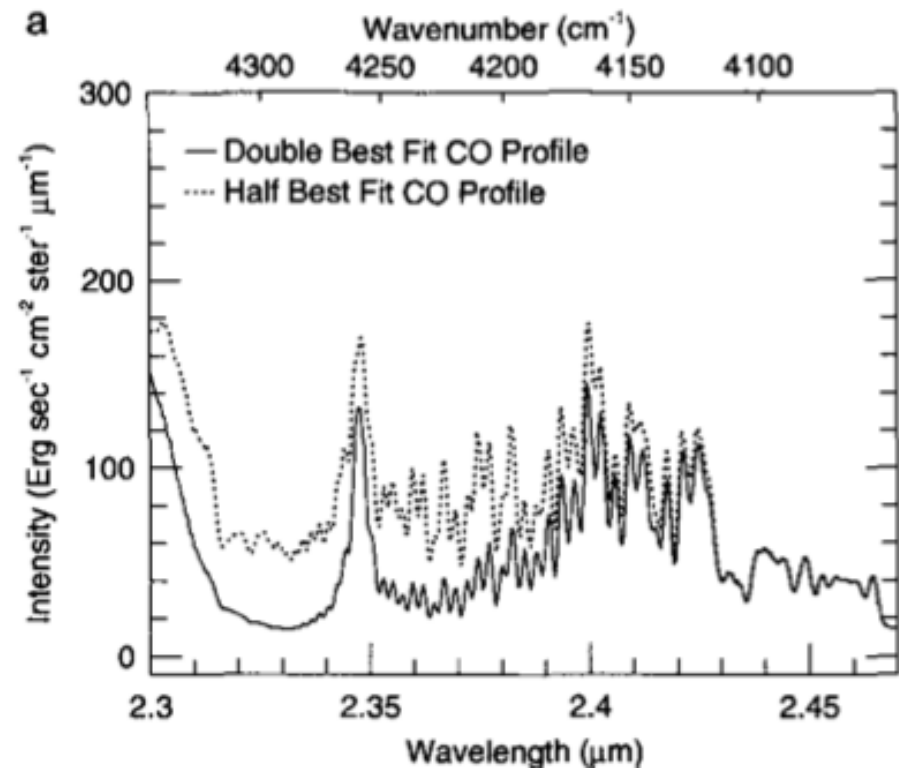
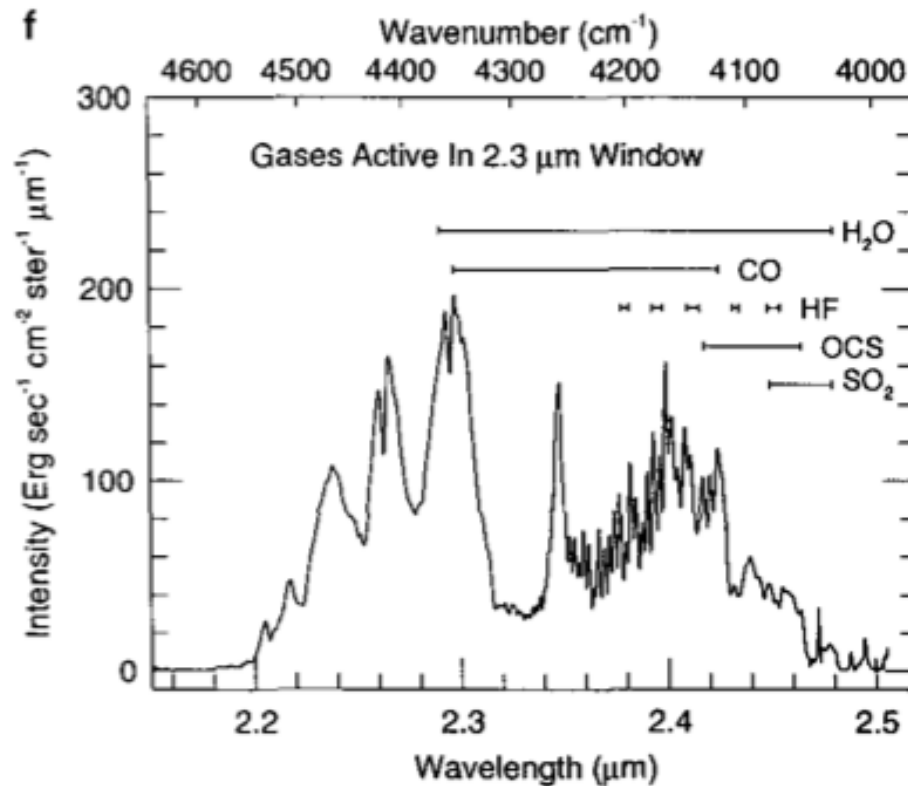


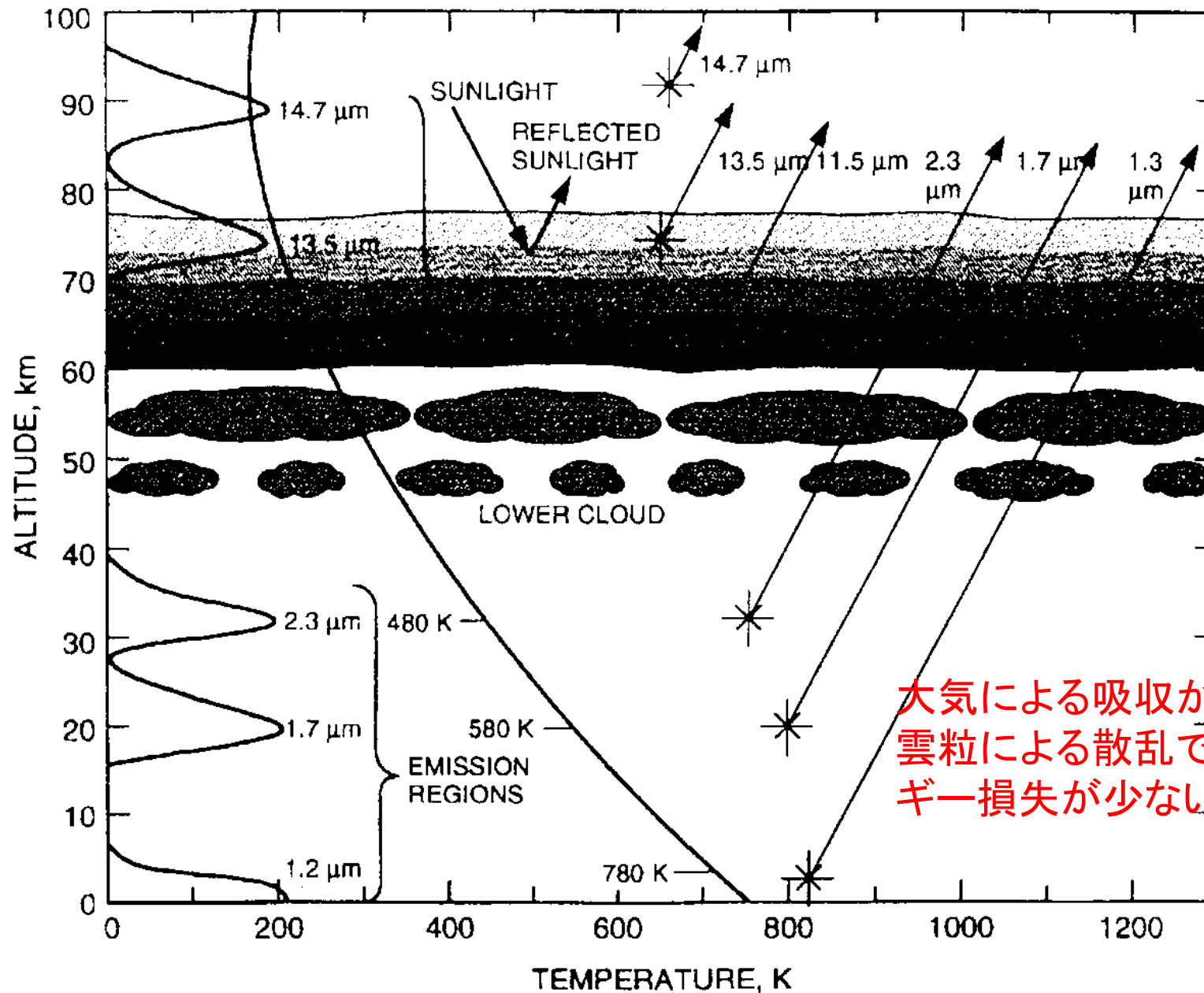
Fig. 2a. The spectra, averaged over typical regions: 1 - $\varphi < 35^\circ$, $L_S = 20 - 90^\circ$; 2 - $\varphi < 35^\circ$, $L_S = 270 - 310^\circ$; 3 - $10^\circ < \varphi < +10^\circ$, $L_S = 75^\circ$; 4 - 'cold collar', $\varphi = 60 - 80^\circ$; 5 - N-pole, $\varphi > 85^\circ$; 6 - 'hot dipole', $\varphi = 75 - 85^\circ$, 7 - warm areas, $\varphi = 60 - 80^\circ$. The vertical lines at the top show the position of the spectral channels, which were chosen for aerosol retrieval.

地上からの観測：金星近赤外放射



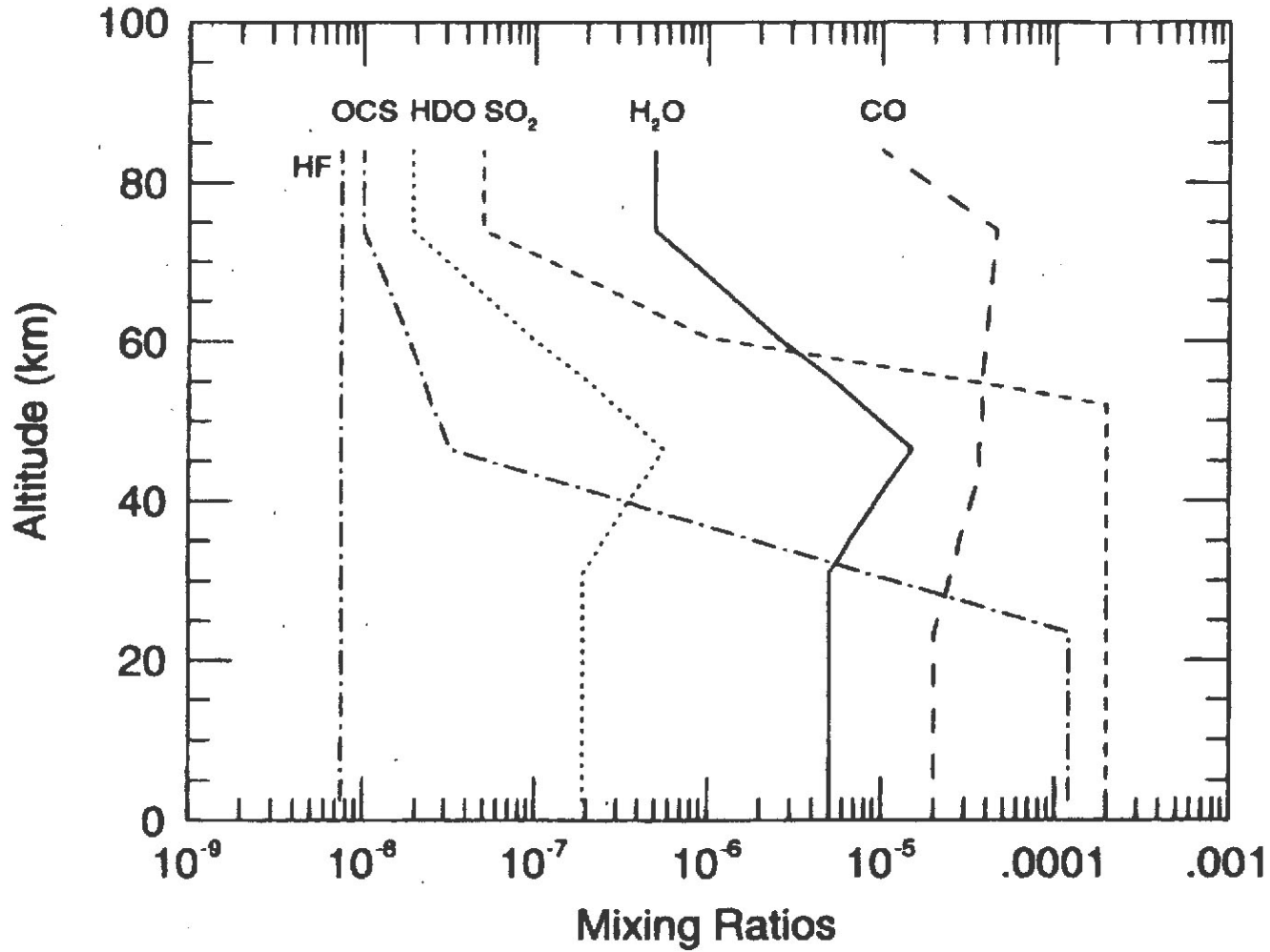
Pollack et al., Icarus 103, 1, 1993

‘近赤外の窓’



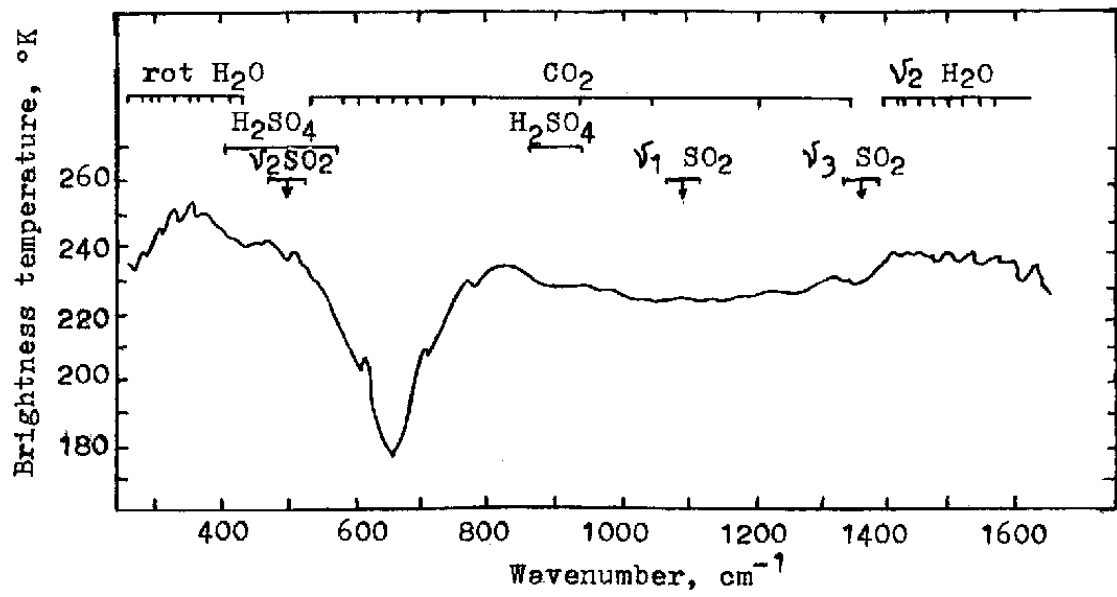
大気による吸収が弱い
雲粒による散乱ではエネルギー損失が少ない(多重散乱)

得られた金星の微量気体分布

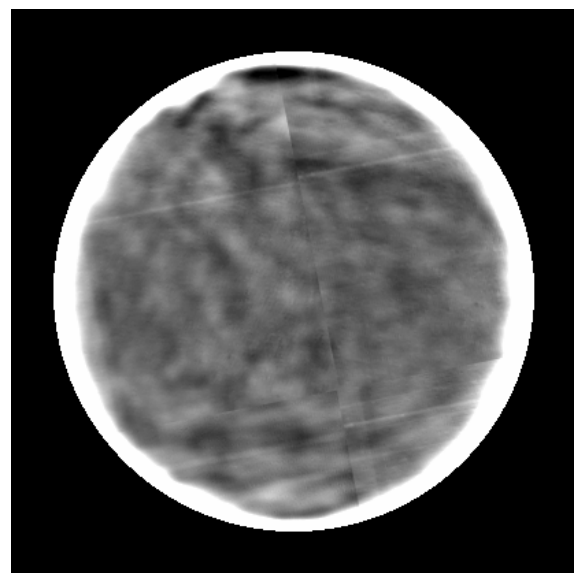
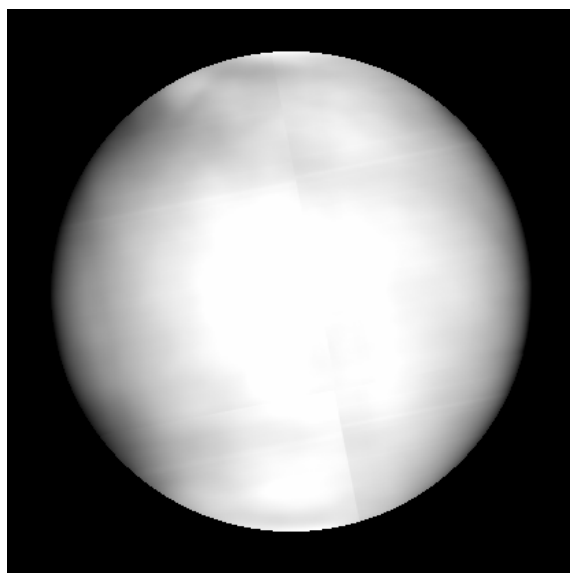


Pollack et al., Icarus 103, 1, 1993

中間赤外での金星観測



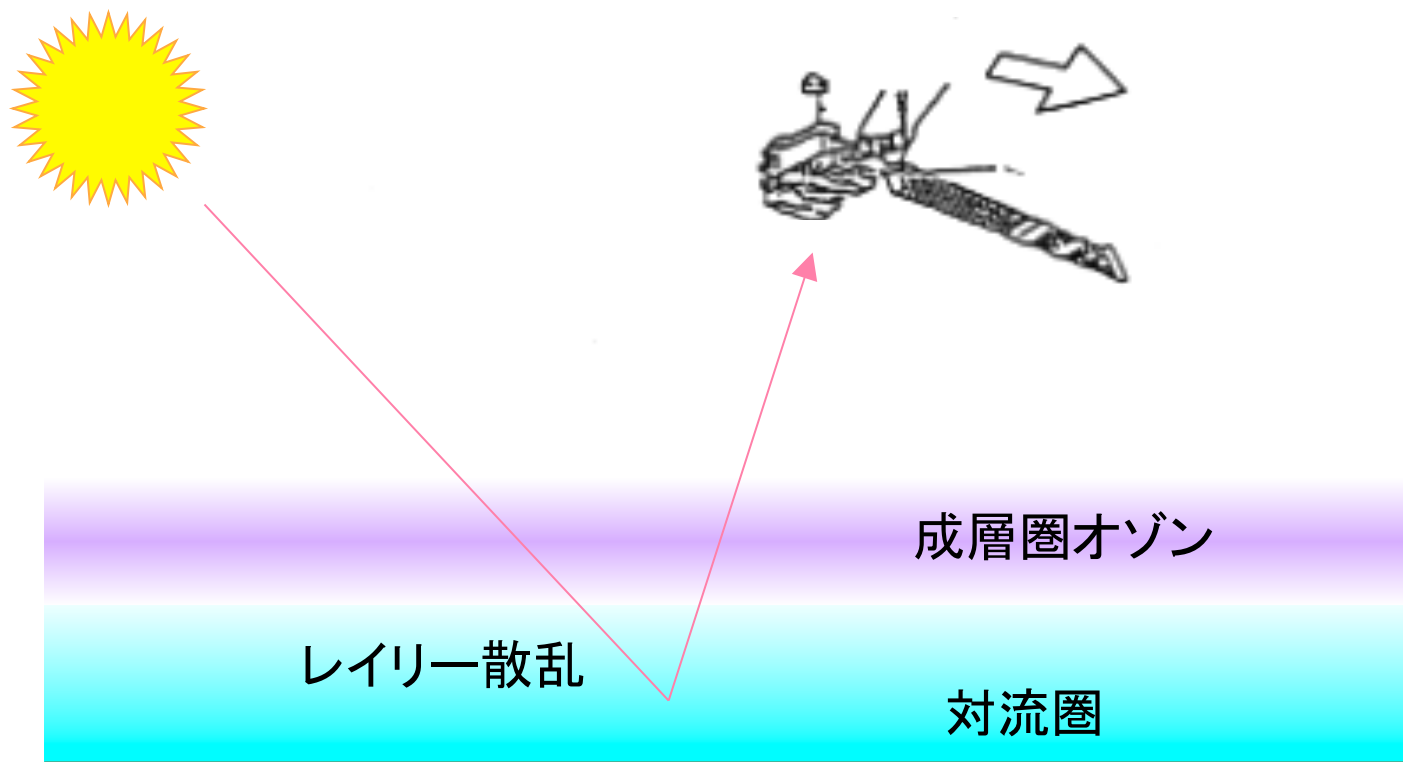
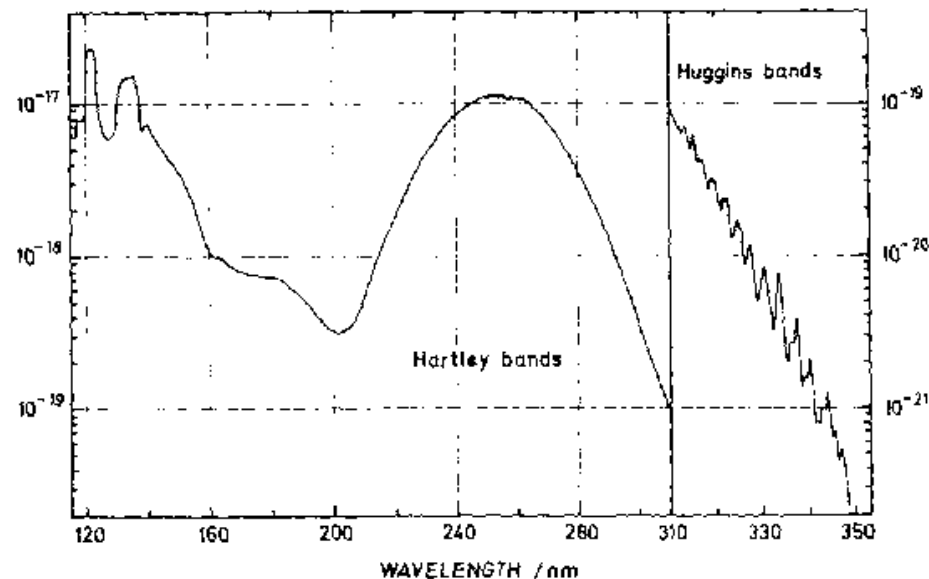
すばる望遠鏡
8.6um



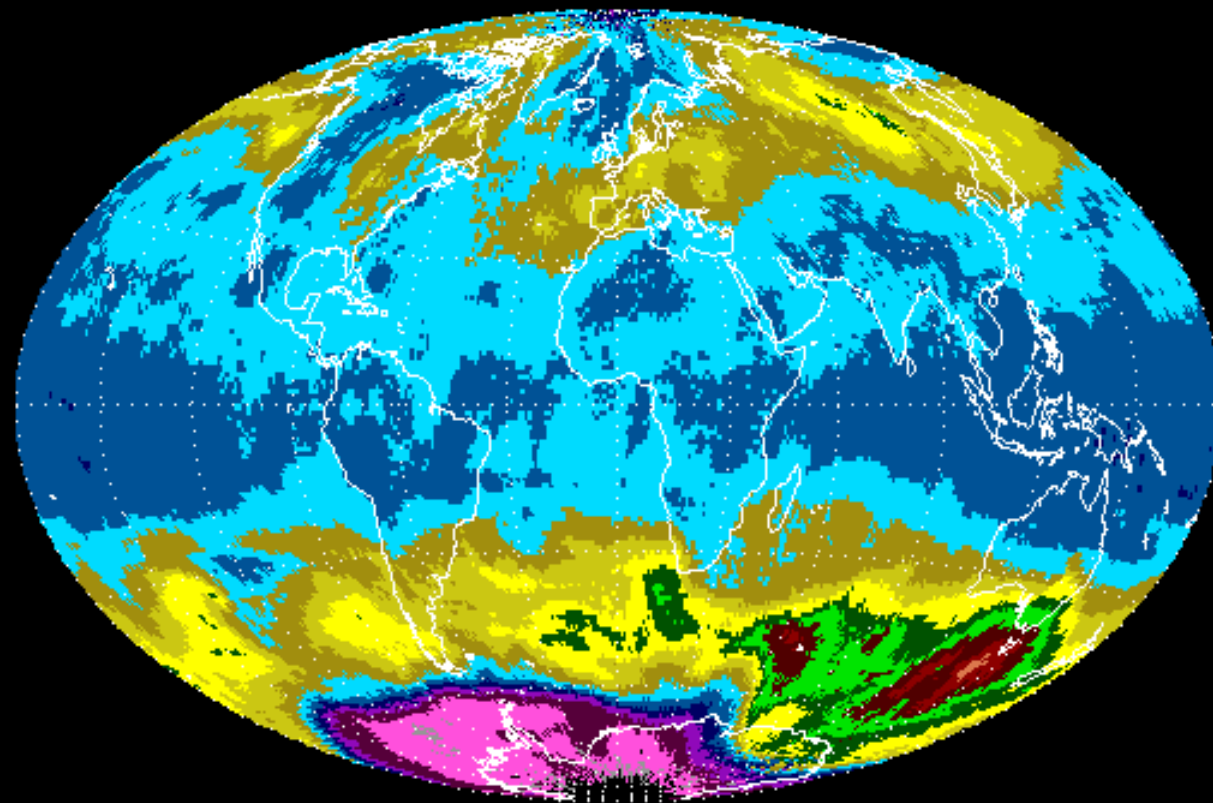
ハイパス後

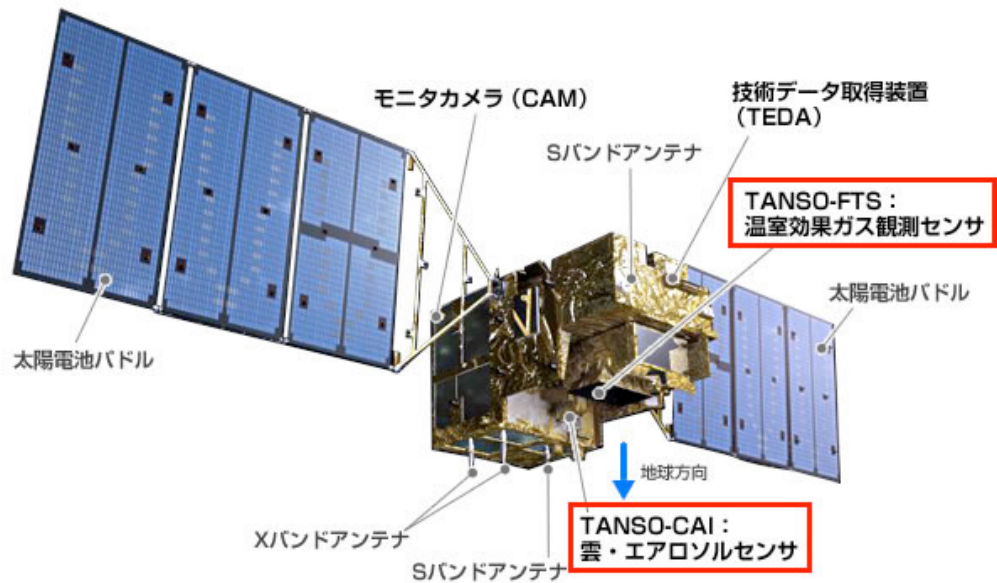
太陽散乱光の分光: オゾン全量分光計 (TOMS)

近紫外線域6バンド(308.6、312.5、
317.5、322.3、331.2、360.0nm)を使用
し、オゾン総量の分布を推定



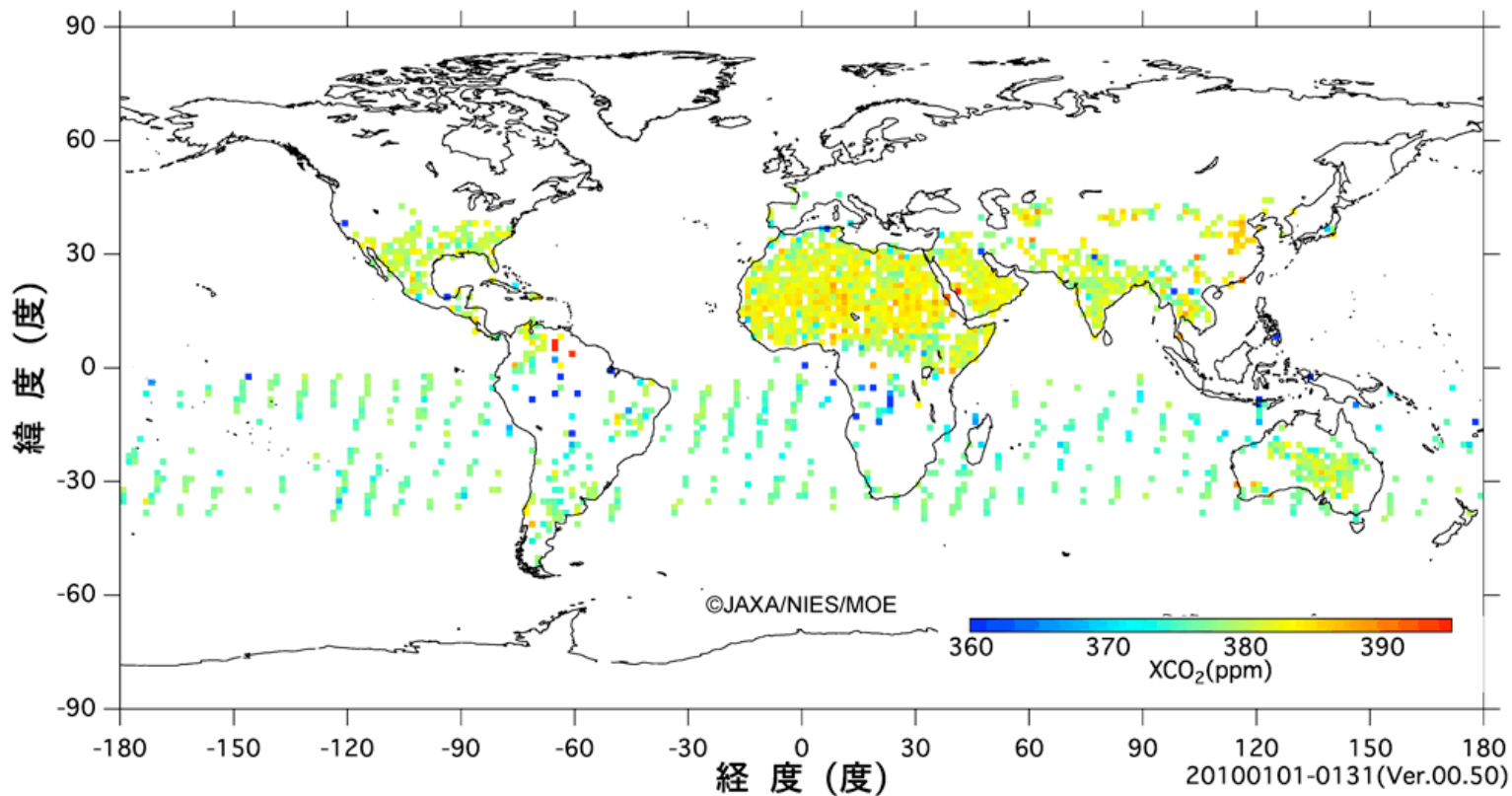
ADEOS TOMS Total Ozone for September 12, 1996



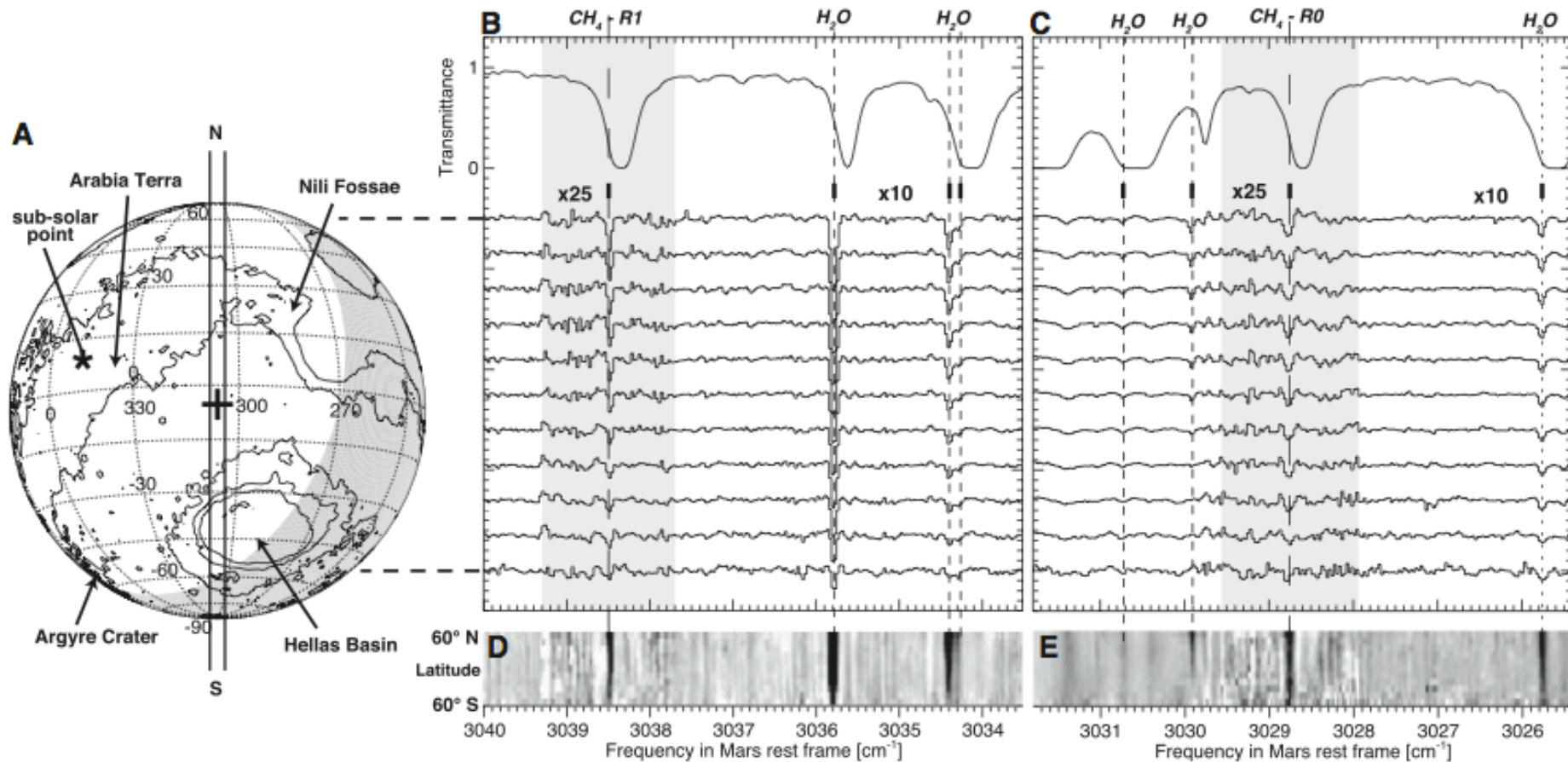


温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)

CO₂量の計測



地上からの観測：火星メタン (Mumma et al. 2009)



* 太陽散乱光の観測

地上からの観測：火星メタン (Mumma et al. 2009)

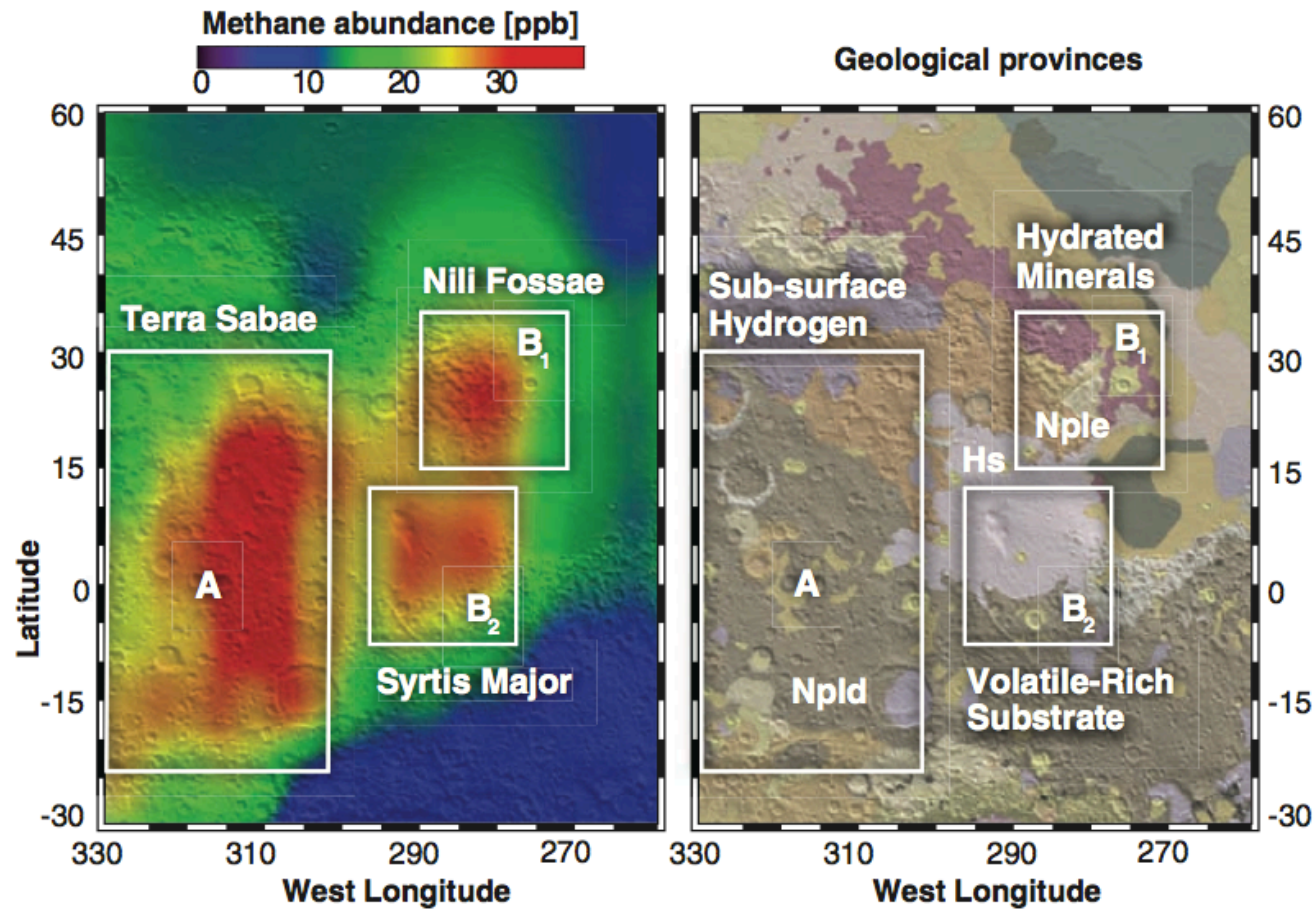
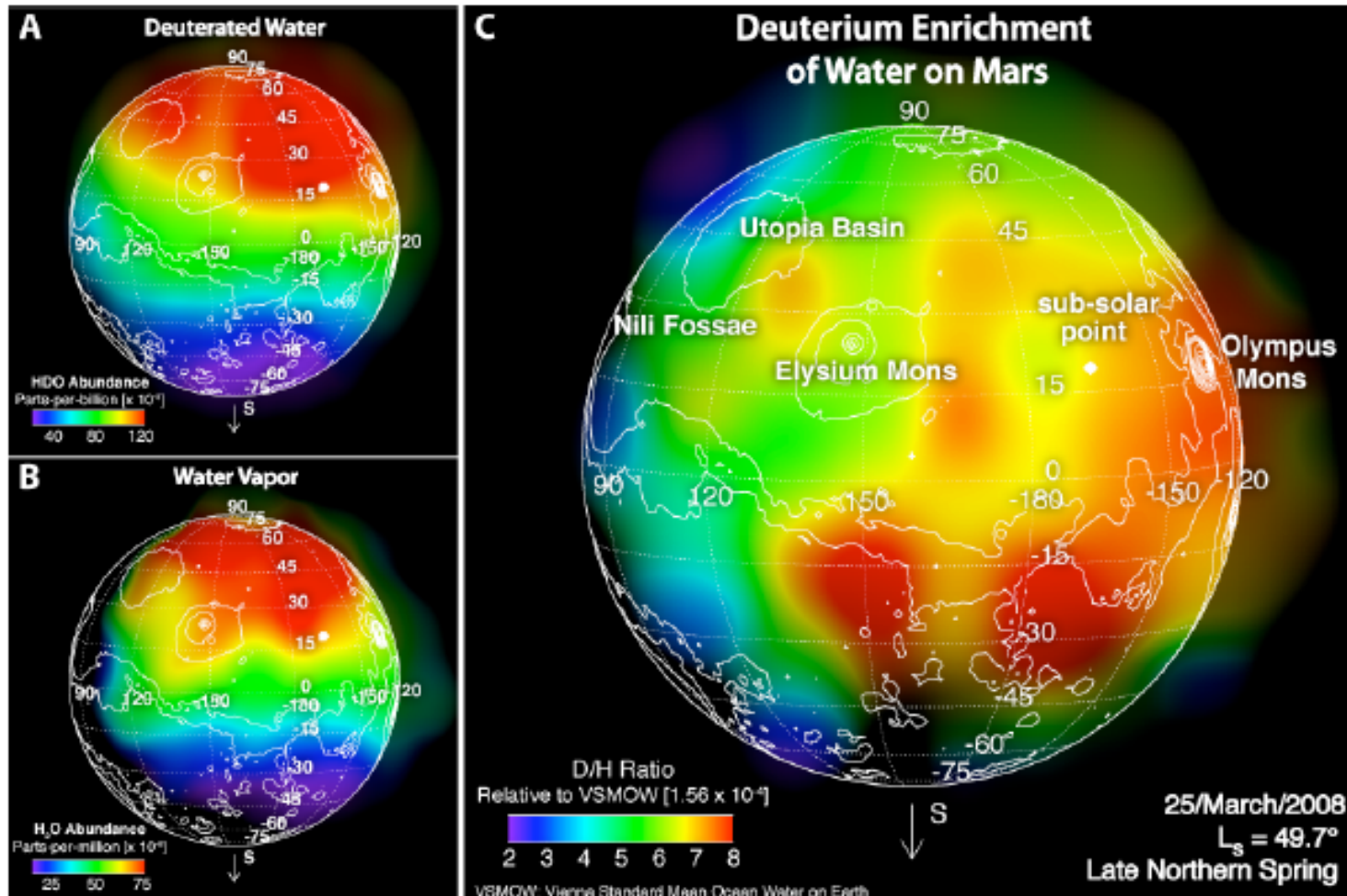


Fig. 3. Regions where CH₄ appears notably localized in northern summer (A, B₁, and B₂) and their relationship to mineralogical and geomorphological domains. (A) Observations of CH₄ near the Syrtis Major volcanic district. (B) Geologic map of Greeley and Guest (45) superimposed on the topographic shaded relief from the Mars Orbiter Laser Altimeter (46). The most ancient terrain units are dissected and etched Noachian plains (Npld and Nple) (~3.6 to 4.5 billion years old, when Mars was wet) and are overlain by volcanic deposits from Syrtis Major of Hesperian (Hs) age (~3.1 to 3.6 billion years old).

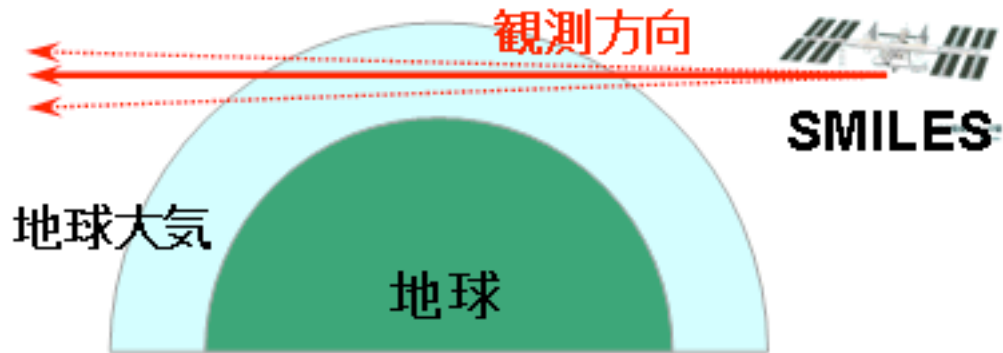
地上からの観測：火星D/H比



Mapping the D/H of water on Mars using high-resolution spectroscopy

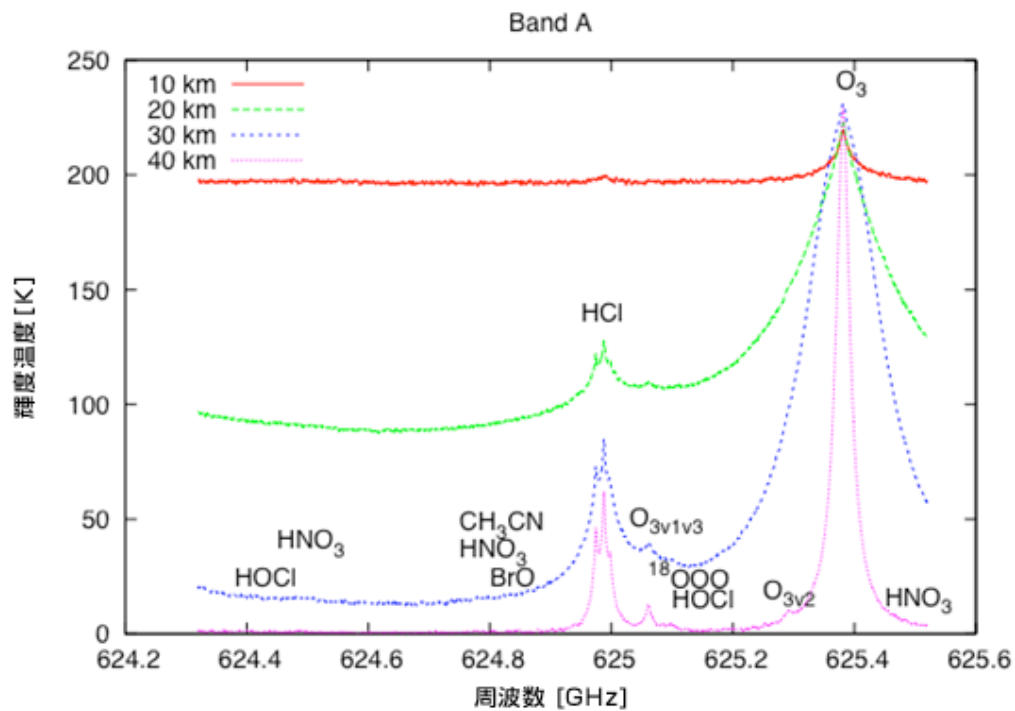
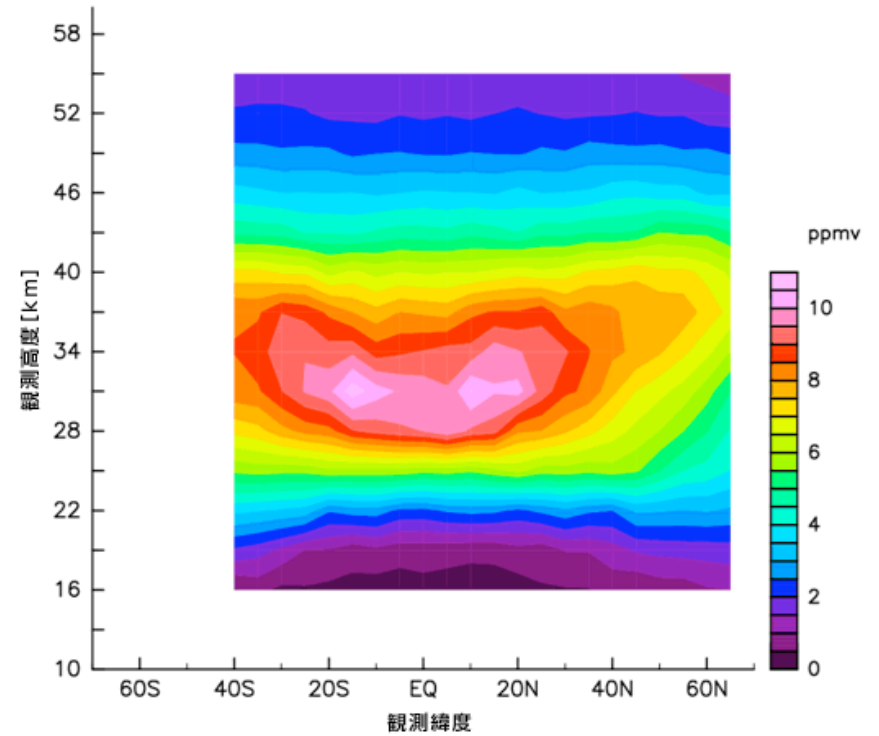
Geronimo L. Villanueva^{1,2}, M. J. Mumma¹, R. E. Novak³, T. Hewagama^{1,4}, B. P. Bonev^{1,2}, M. D. DiSanti¹

リム観測: ISS/SMILES



マイクロ波の熱放射

Ozone



リム観測: Venus Express/SPICAV

恒星を光源とする吸光法

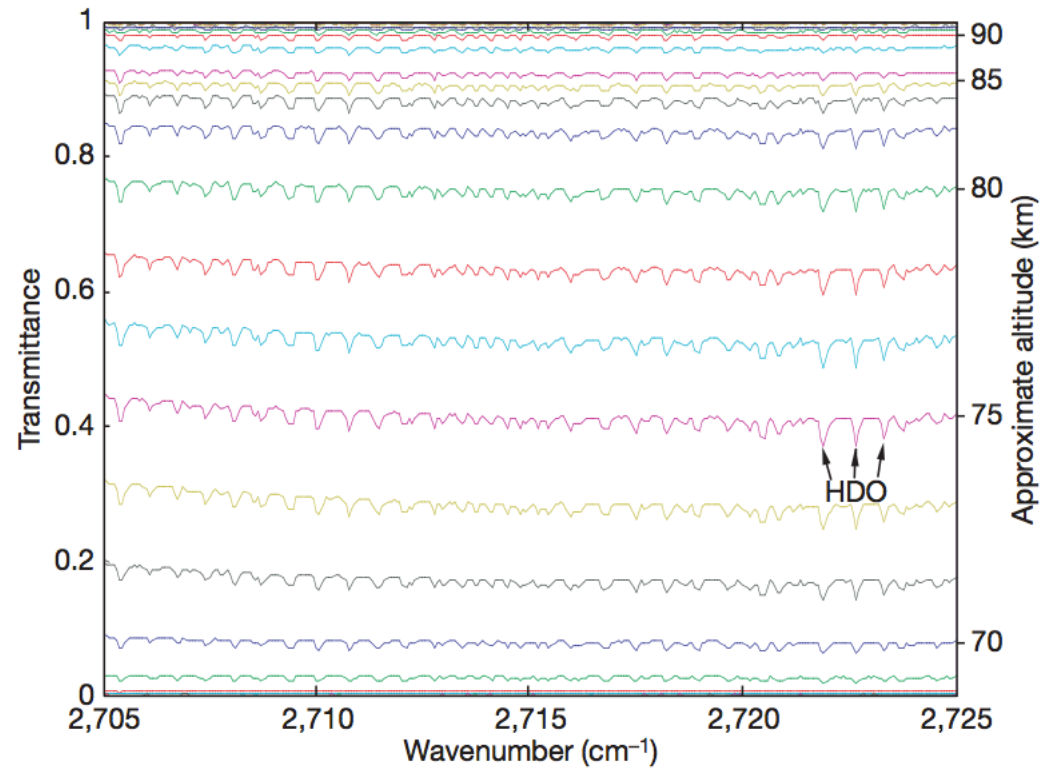
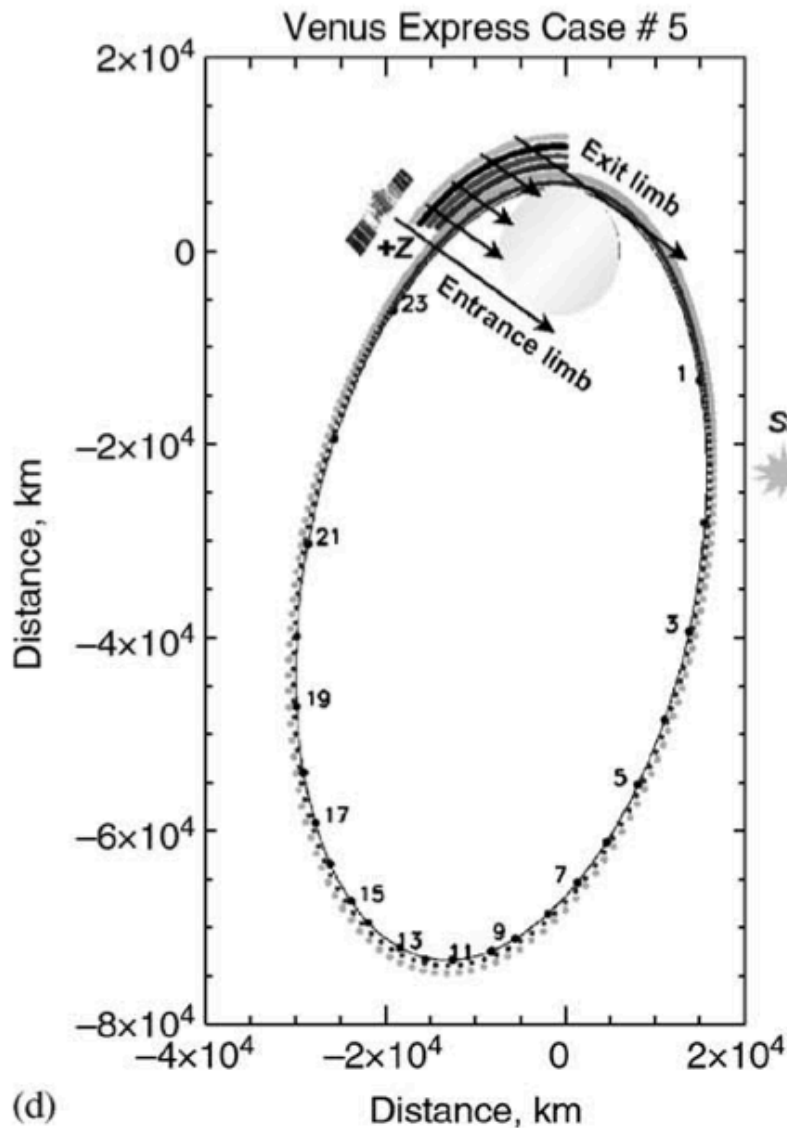


Figure 2 | Typical evolution of atmospheric spectral transmittances through one solar occultation observed by SOIR spectrometer. It is obtained by

Venus Express/SPICAV

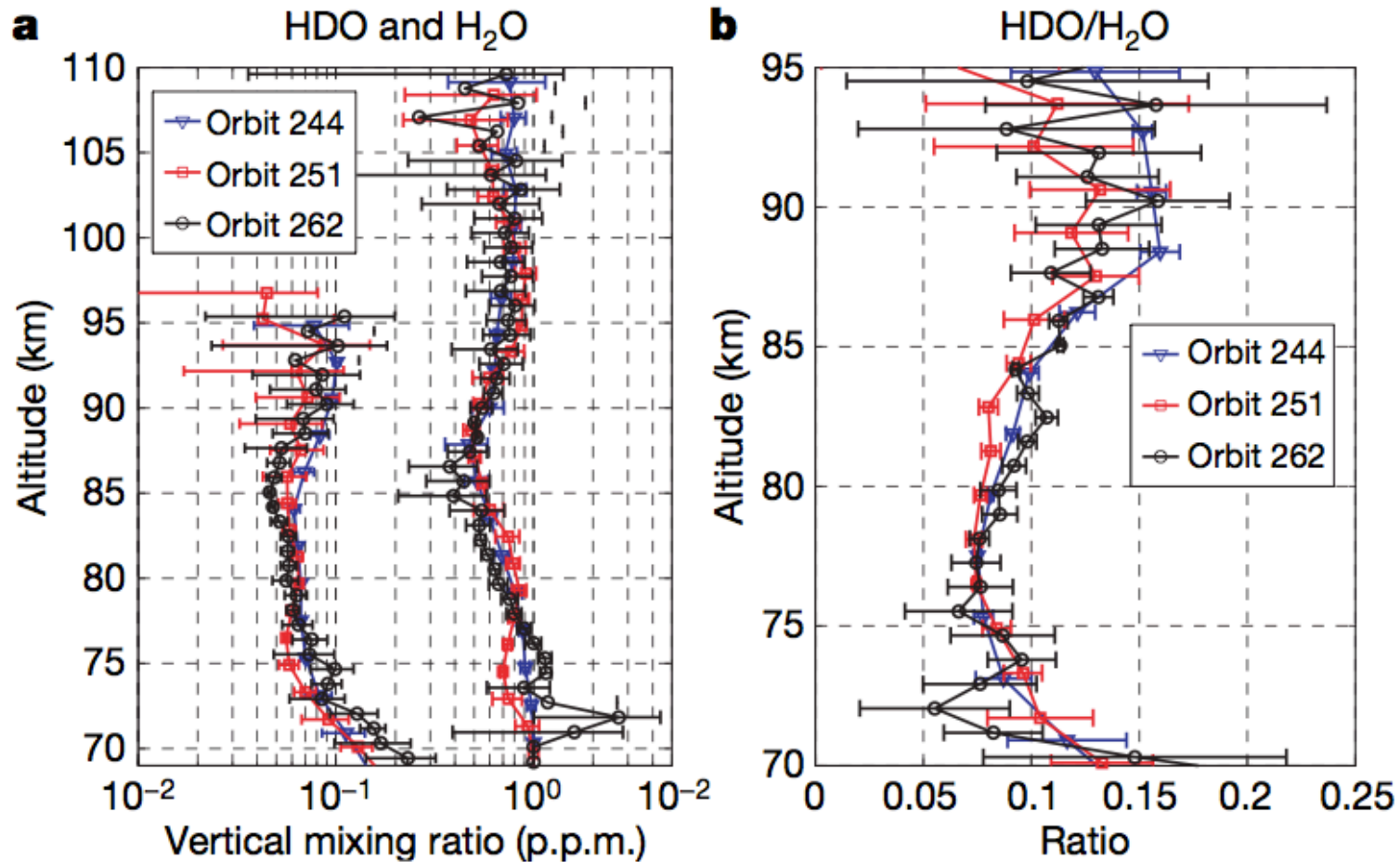
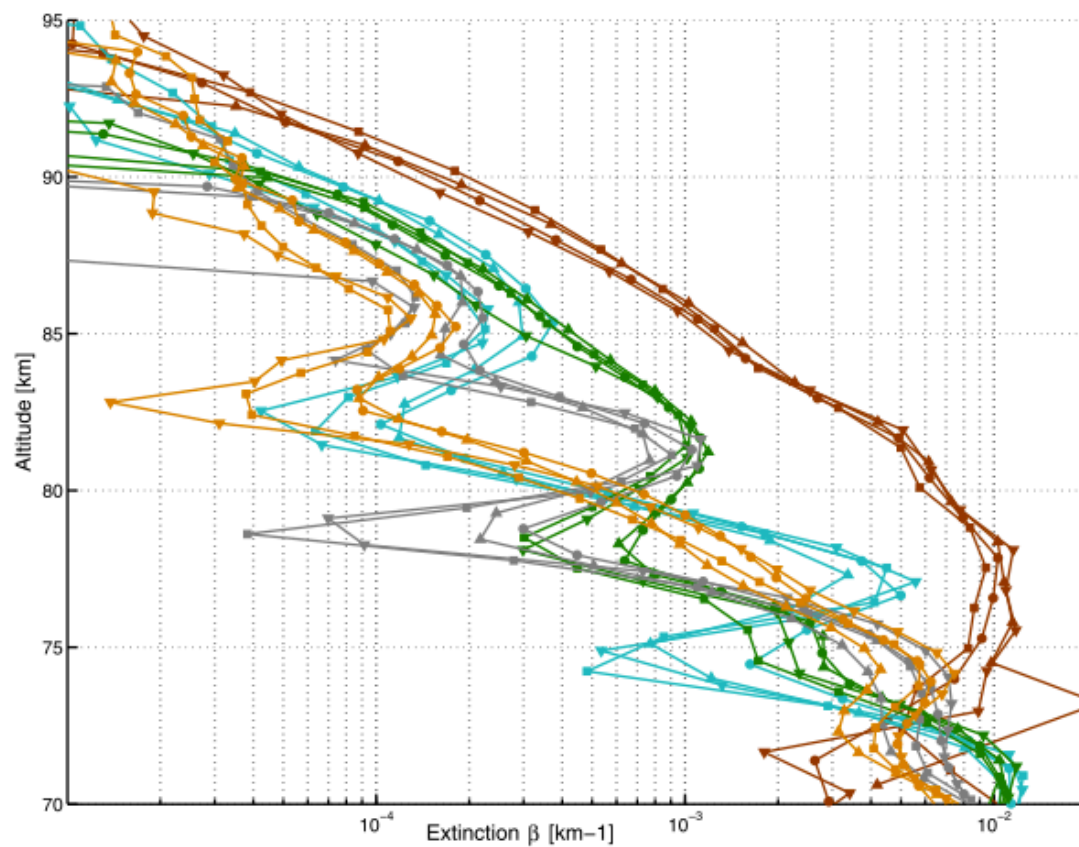


Figure 4 | HDO and H₂O mixing ratio, HDO/ H₂O vertical profiles. Both

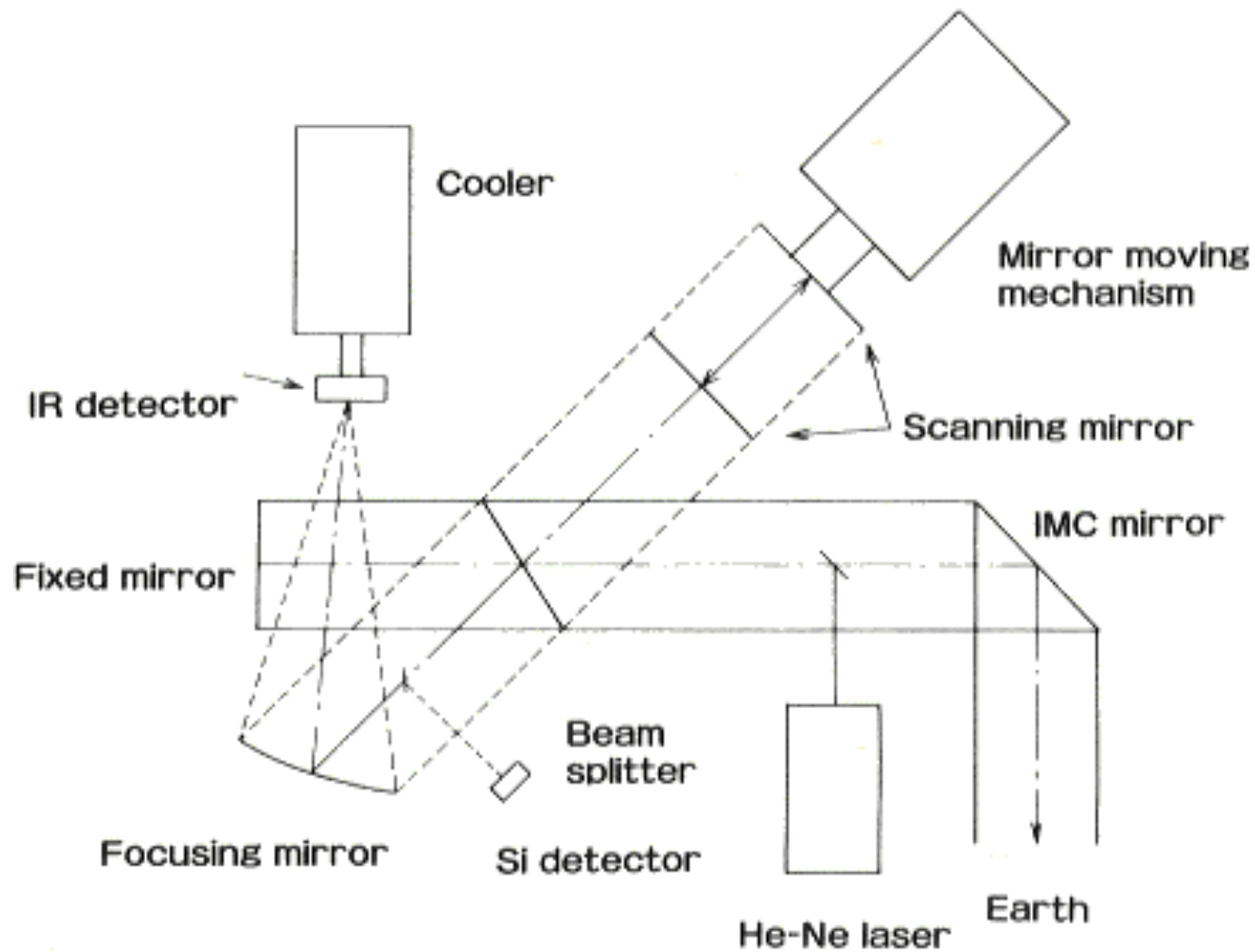
Venus Express/SPICAV

雲より上のヘイズ層



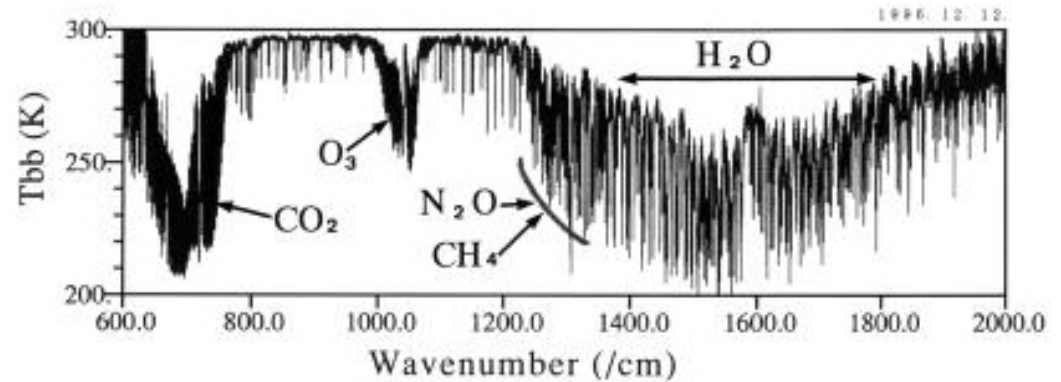
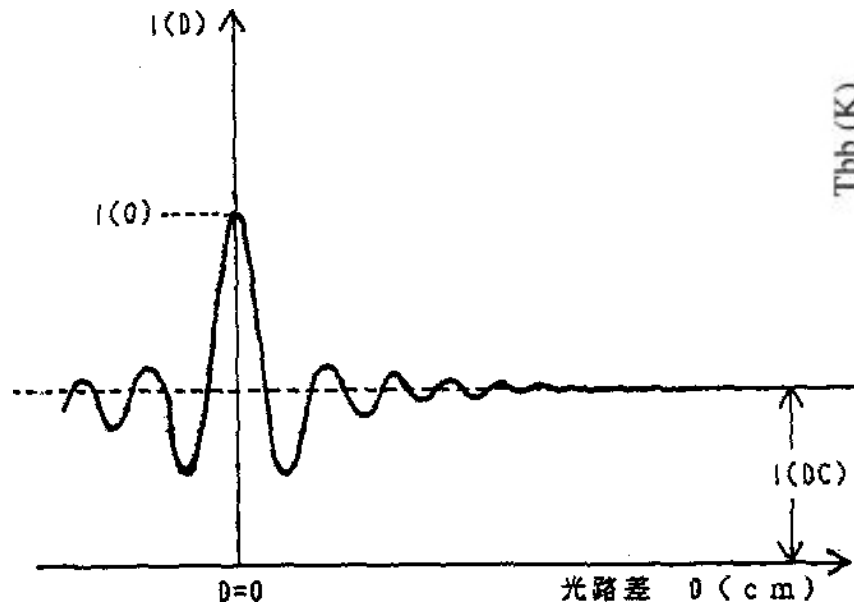
Wilquet et al. (2009)

分光装置：フーリエ分光計

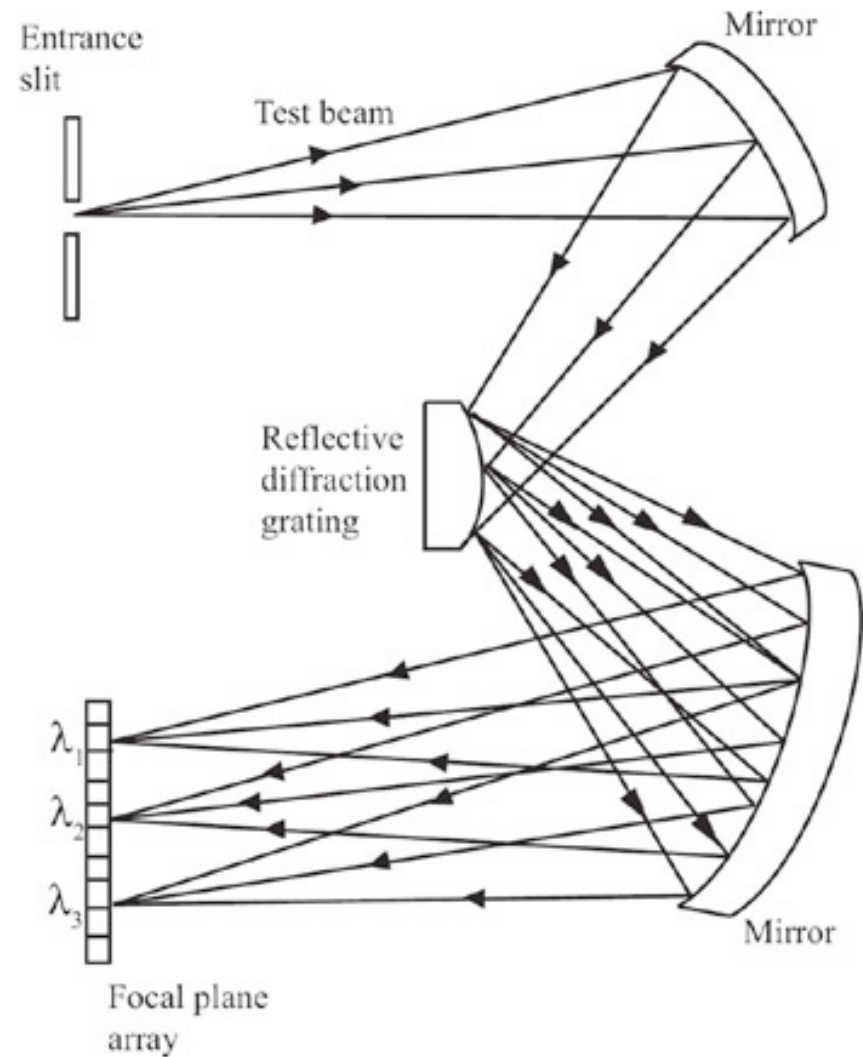
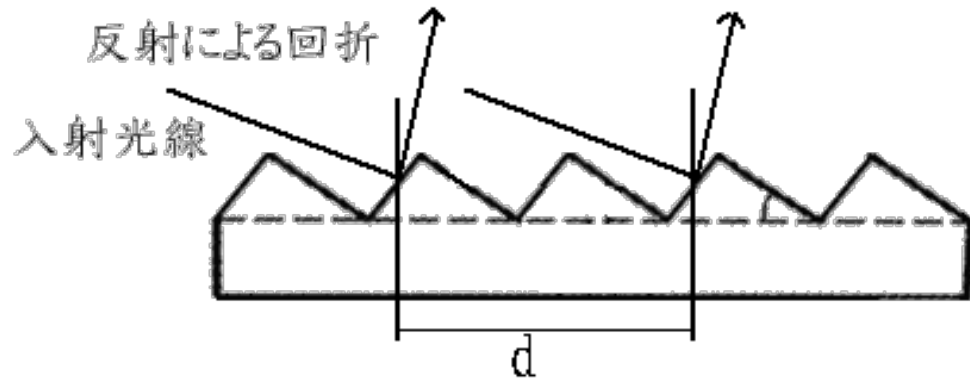
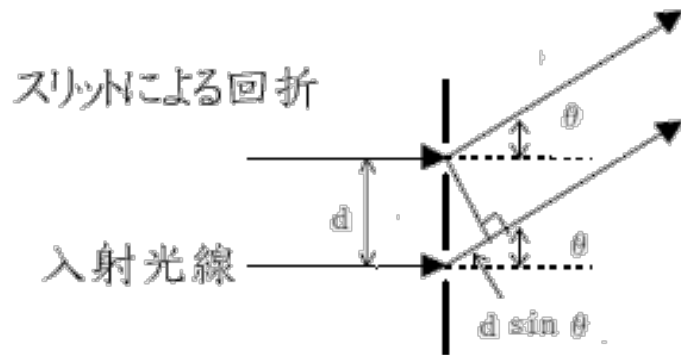


分光装置:フーリエ分光計

インターフェログラム → FFT → スペクトル



分光装置：回折格子

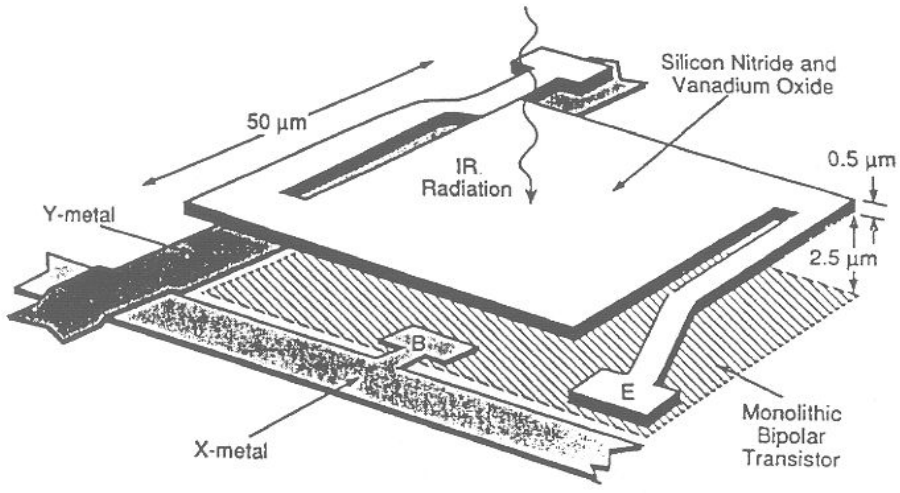


検出器(1): 量子型素子

- 光子が検出器材料に作用して電荷を生じることを利用。一定時間電荷を蓄えて読み出す。
- 赤外では検出器の熱雑音や光学系からの背景放射を抑えるために極低温への冷却が必要
- 主な種類
 - 光導電型 (Si, Ge, InSb, HgCdTeなど)
 - ショットキー接合型 (PtSiなど)
 - pn接合型
 - 量子井戸型
 - トンネル接合型

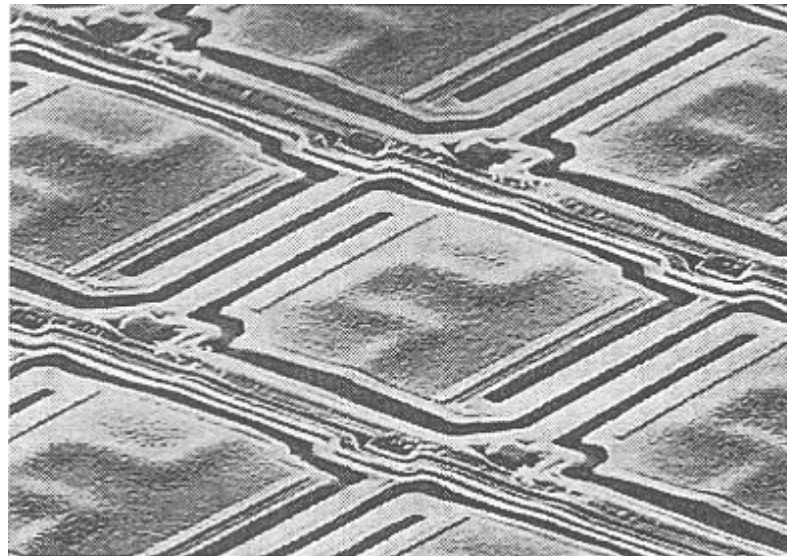
検出器(2): 熱型素子

- 赤外線の入射量に応じて検出器の一部の温度が変化することを利用
- 一般に、赤外であっても冷却が不要。光学系からの背景放射や検出器への熱伝導があっても、それらが安定してさえいれば、計測対象の赤外線の量に応じた温度変化を検出できる。
- 主な種類
 - 焦電型(パイロ): 温度変化に伴う電荷発生
 - 熱起電力型(サーモパイル): 2つの異なる金属の対の熱起電力
 - 抵抗変化型(ボロメータ): 抵抗体の抵抗値が温度によって変化

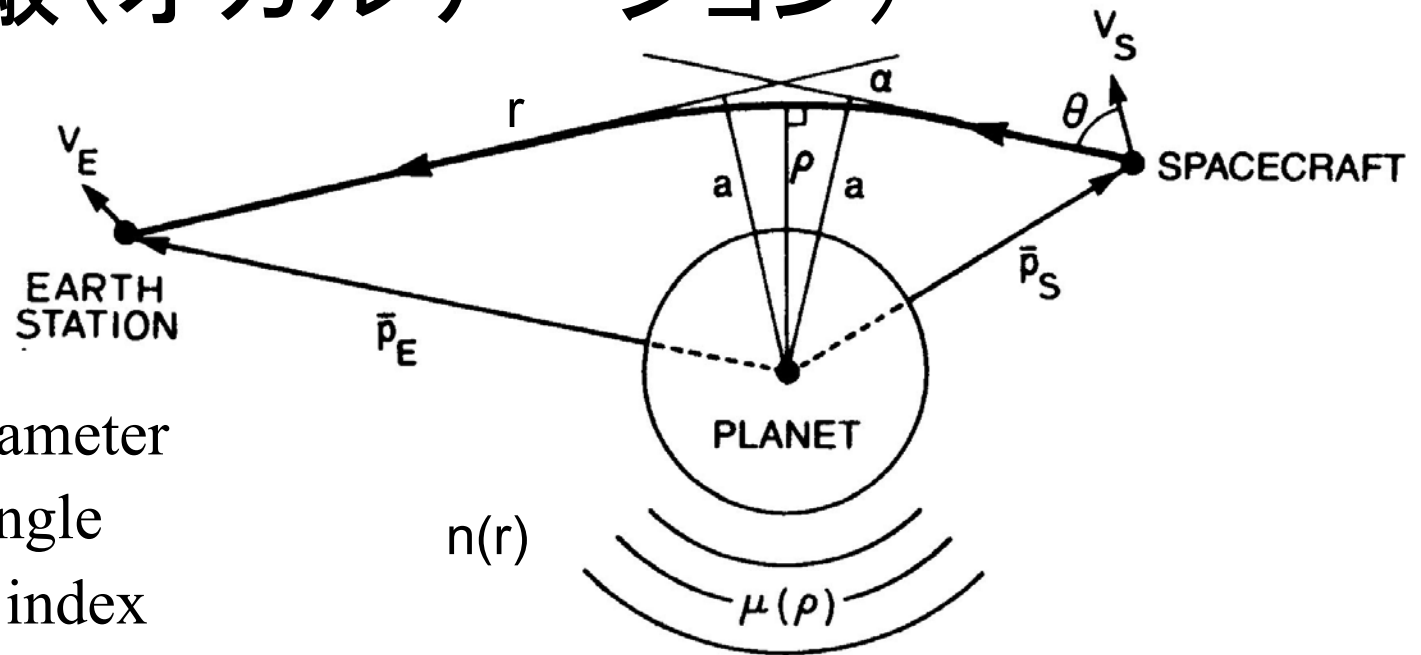


ボロメータの構造

(全体が真空パッケージに収められる)



電波掩蔽 (オカルテーション)



a : Impact parameter

α : Bending angle

n : Refractive index

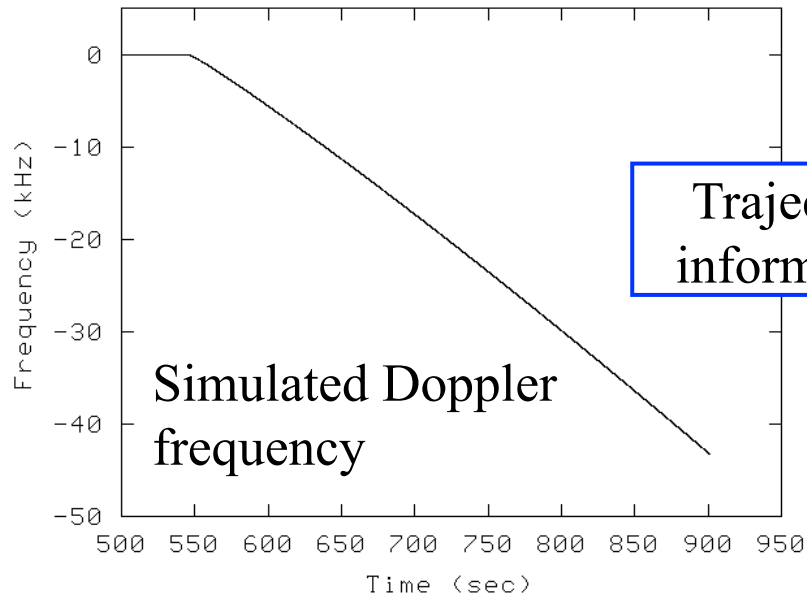
r : Distance from planet center

$$\alpha(a) = -2a \int_{r=r_0}^{r=\infty} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial r} \frac{dr}{\sqrt{(nr)^2 - a^2}}$$

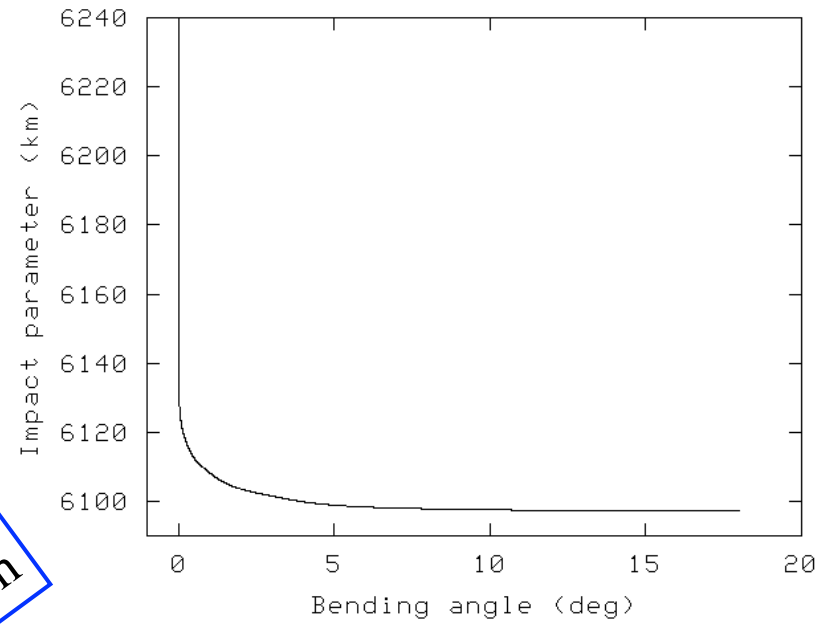
Abel transformation:

$$\pi \ln n(r_{01}) = - \int_{a=a_1}^{a=\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - a_1^2}} da$$

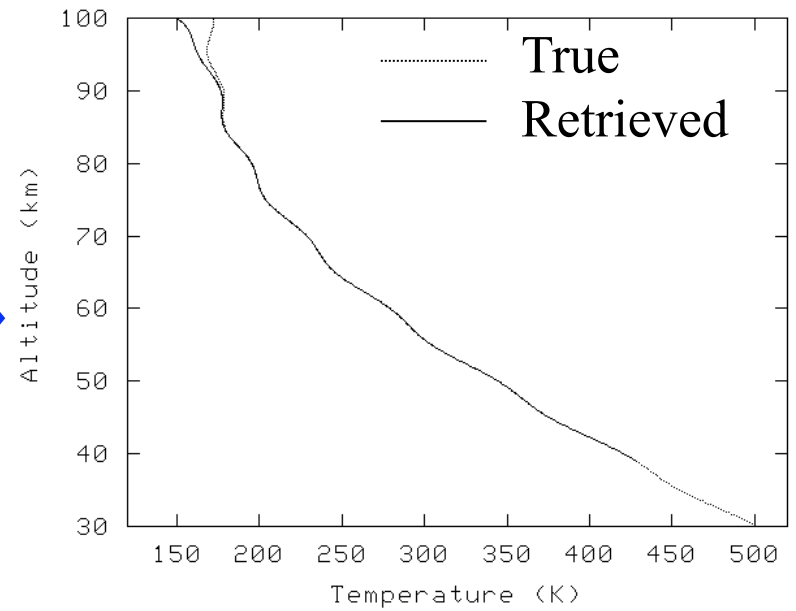
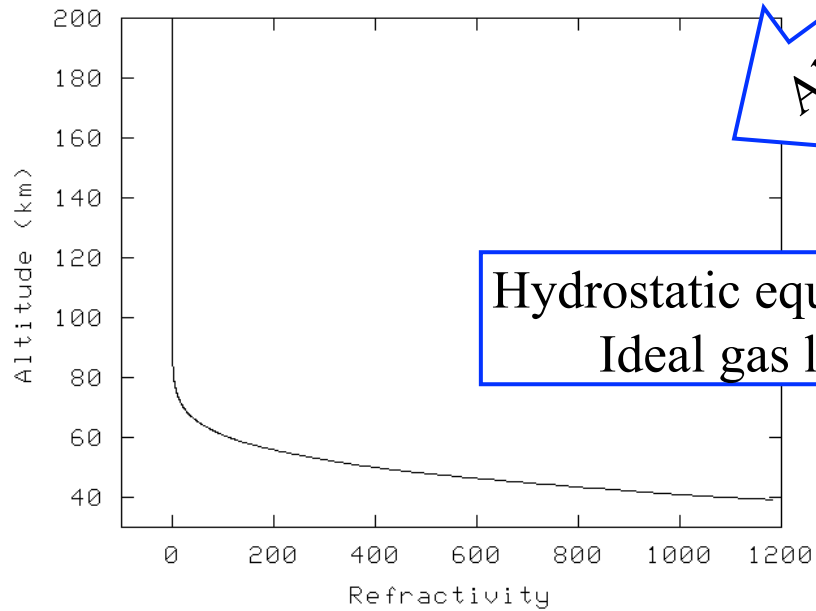
Retrieval procedure



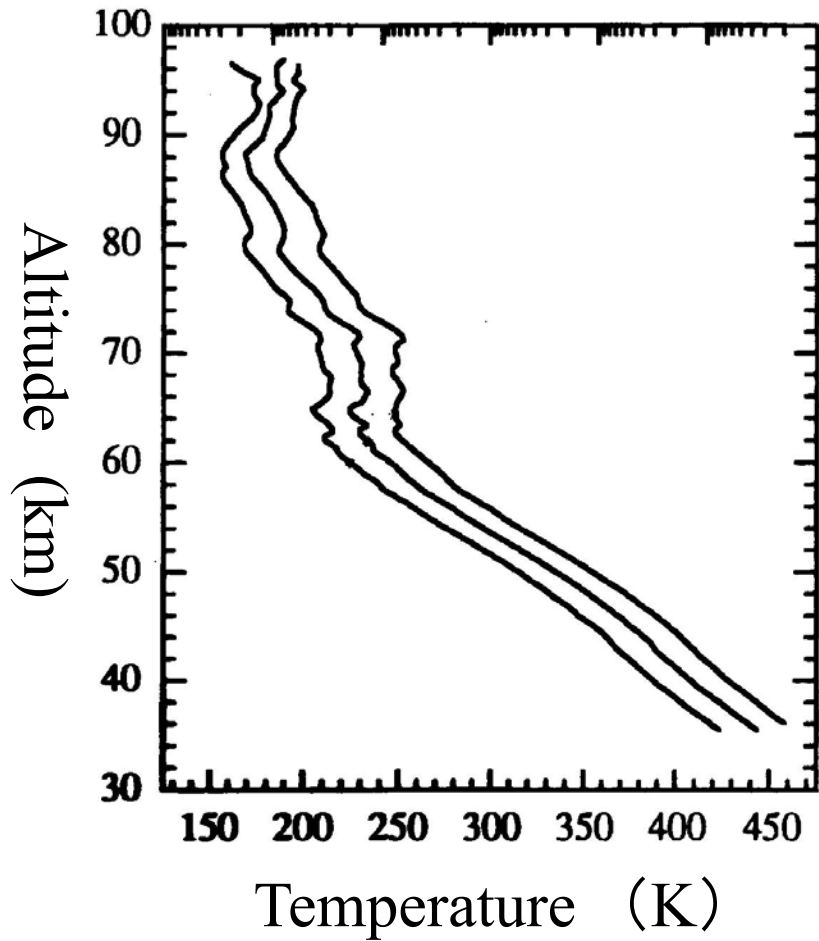
Trajectory information



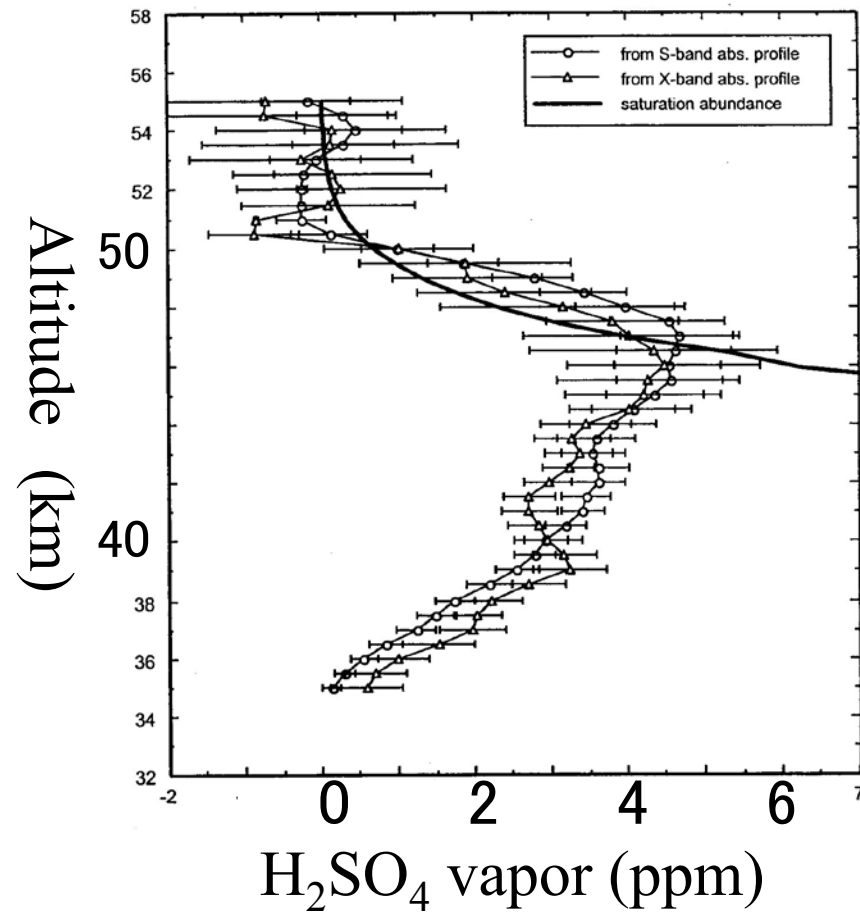
Abel transform



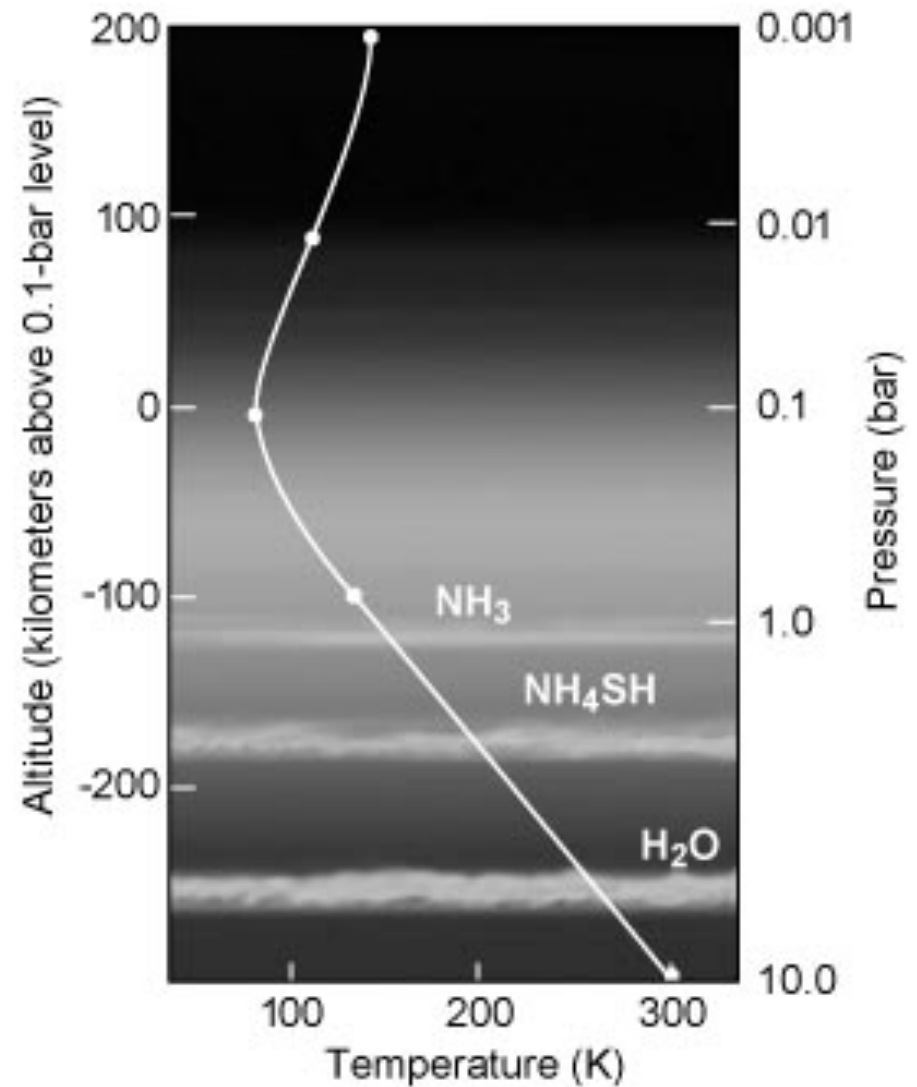
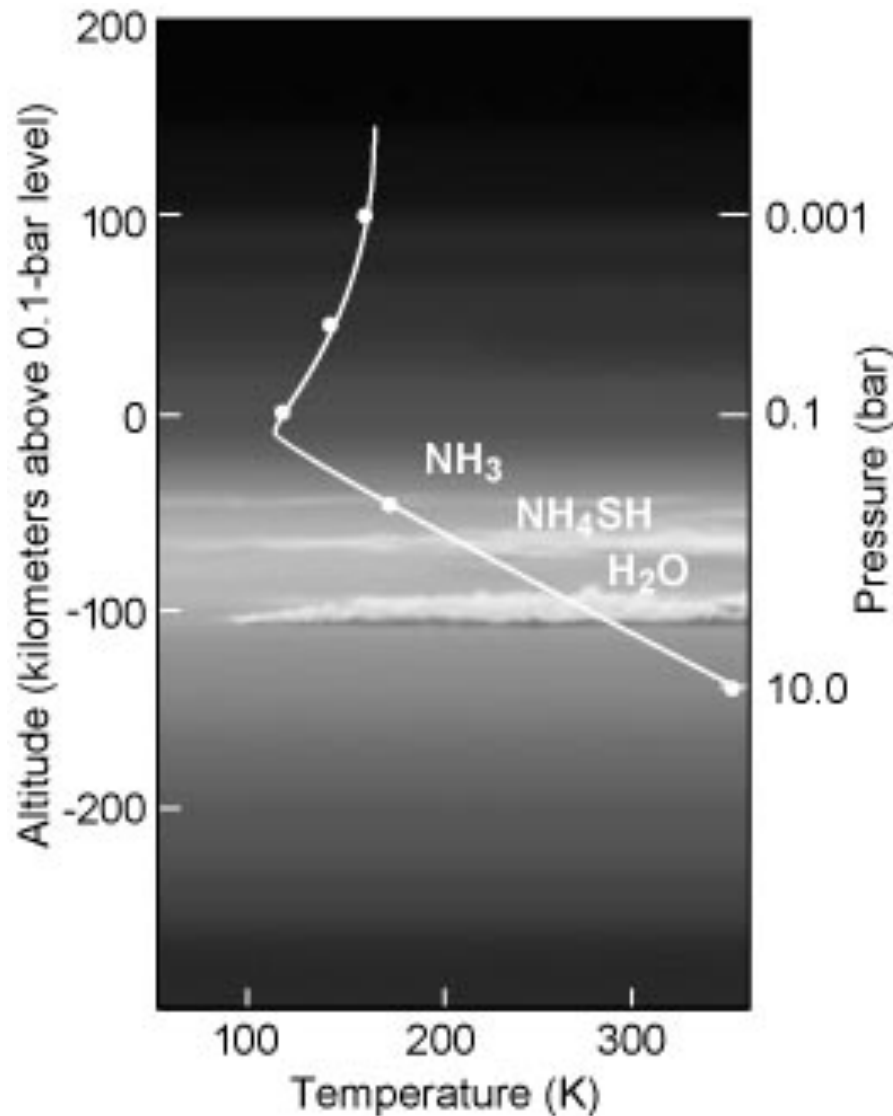
Magellan radio occultation
(Hinson & Jenkins, 1995)



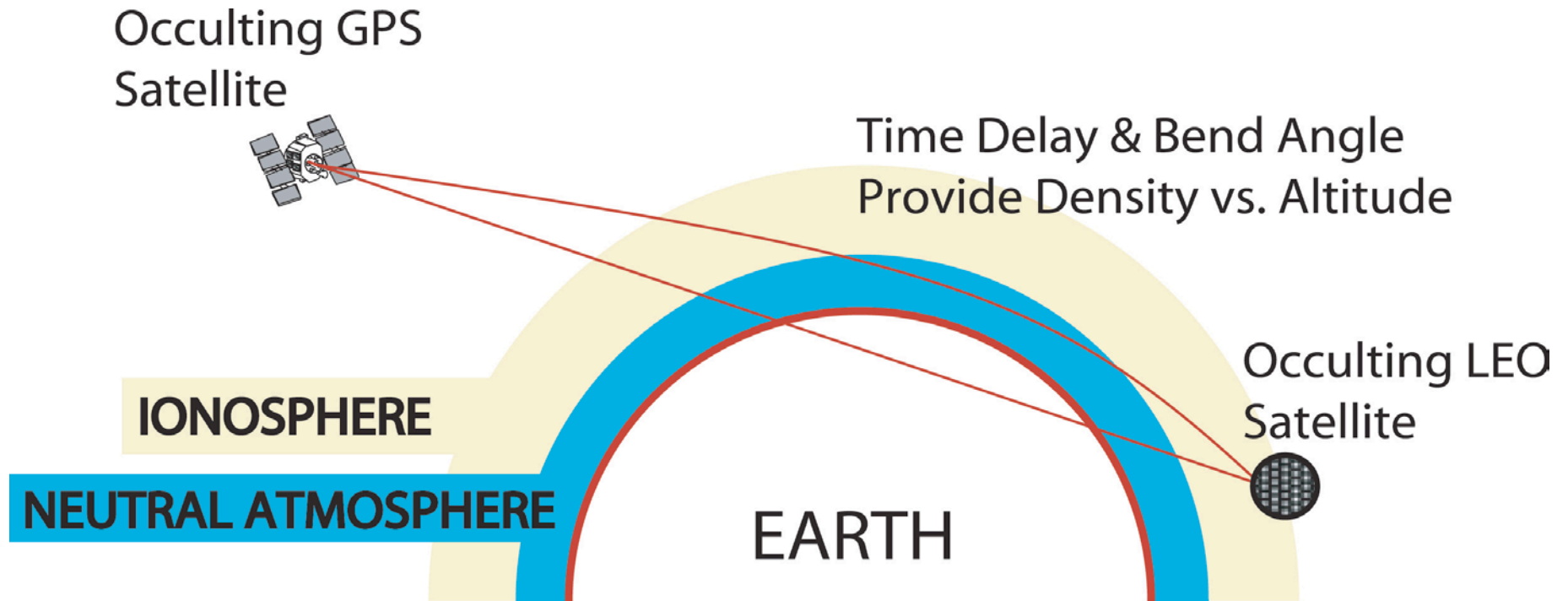
(Kolodner & Steffes, 1998)



木星、土星の大気構造(ボイジャー探査機)



電波掩蔽の地球への応用: GPS気象学

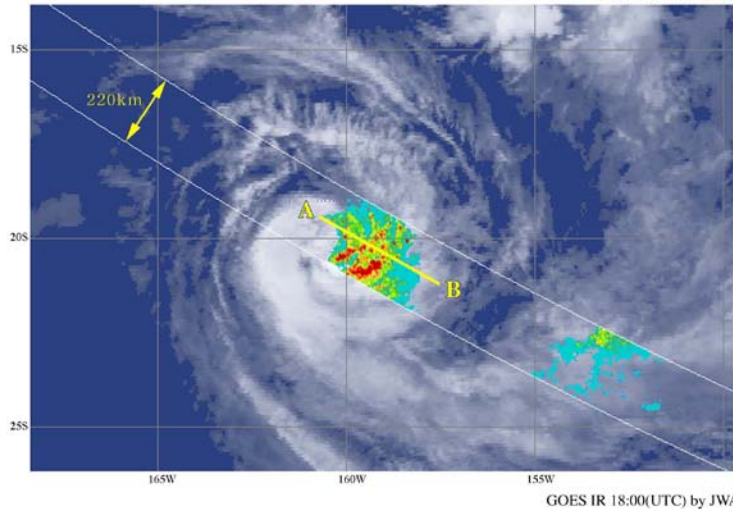


大気レーダー：熱帯降雨観測衛星 TRMM

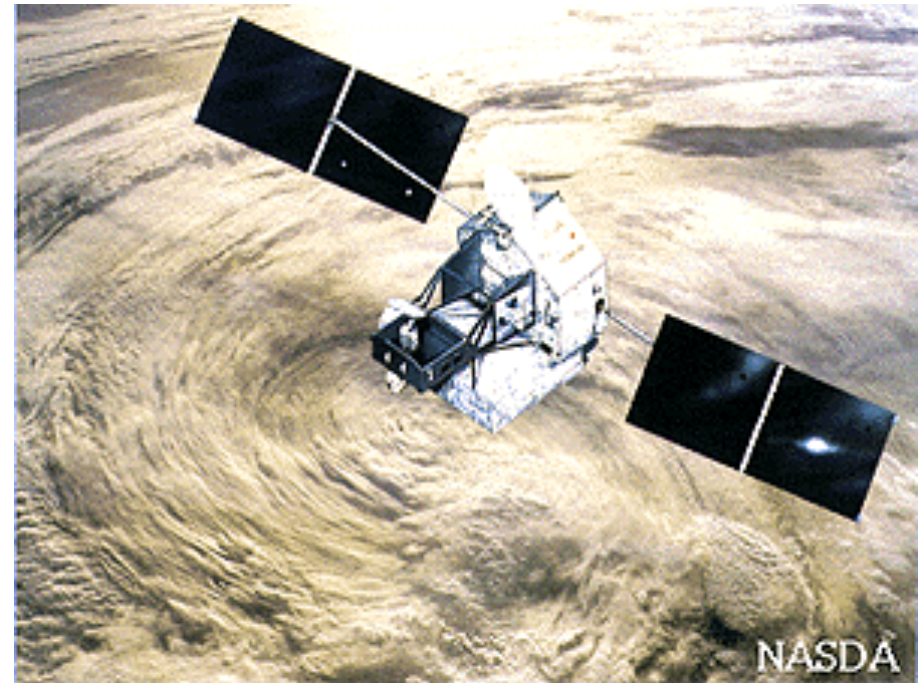
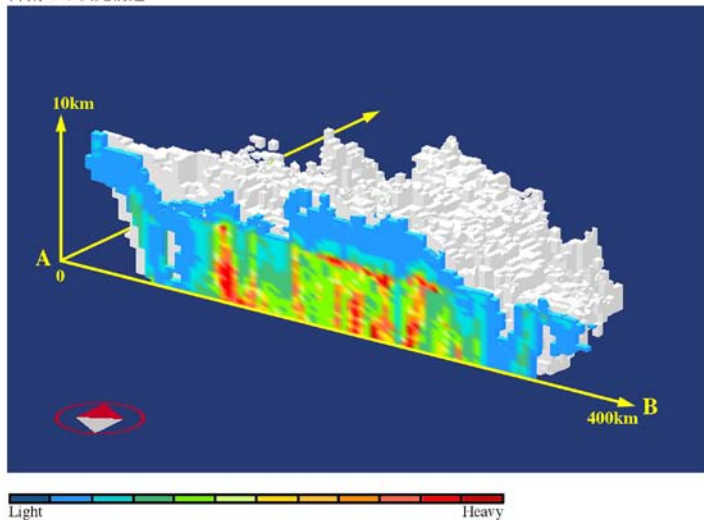
TRMM 降雨レーダ サイクロン (パム)

1997年12月8日17:57-18:02 (世界時)

降雨の水平分布 高度：2.0km



降雨の3次元構造

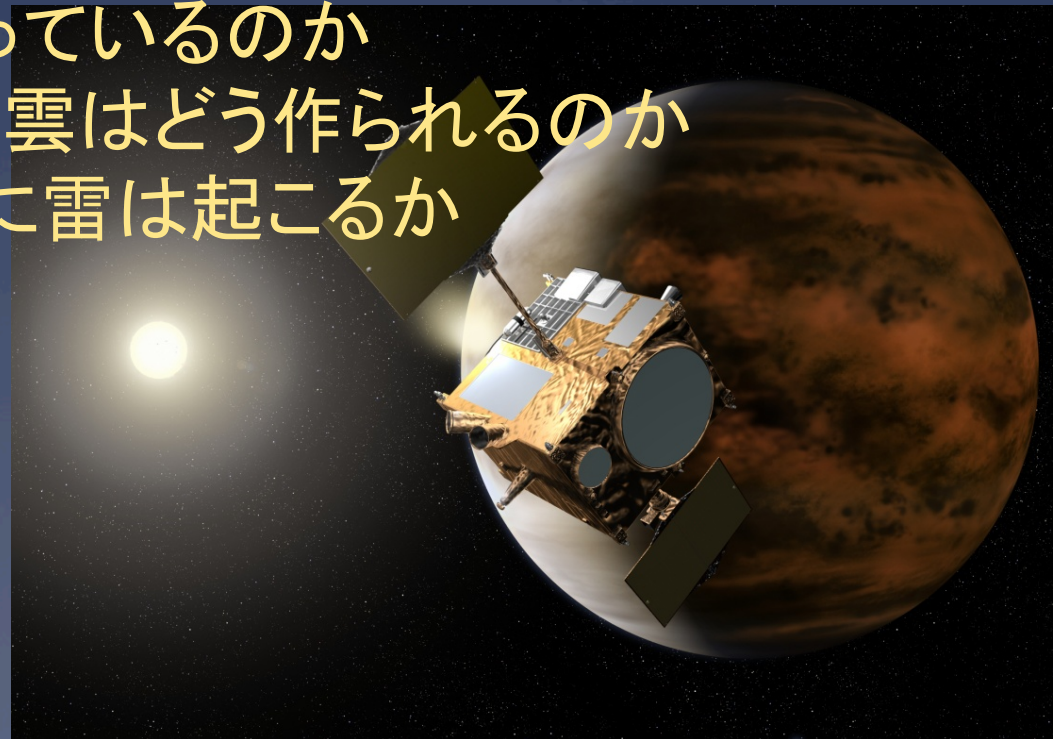


降雨レーダによる台風の観測

この手法への惑星への応用はまだ

金星気象衛星あかつき

- * 日本初の金星探査機（月以外の天体を周回するのはこれが初）
- * 金星周回軌道から雲の下まで透視するリモートセンシングによって地球の双子星の気候のしくみに迫る
 - * 地球に無い高速大気循環「超回転」はなぜ起こるのか
 - * 子午面循環はどうなっているのか
 - * 全球を隙間無くおおう雲はどう作られるのか
 - * 氷晶の生じない大気に雷は起こるか
- * 打上2010年夏（H2A）



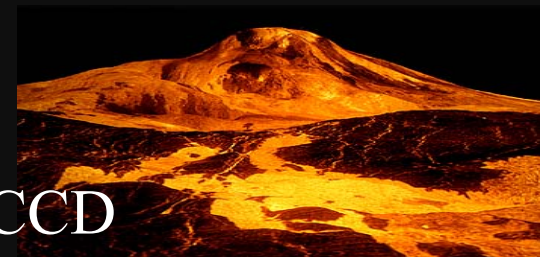
科学観測機器 (1)

1 μ mカメラ IR1 (東京大学・JAXA)

$\lambda = 0.9, 0.97, 1.01 \mu\text{m}$ (近赤外の窓)

視野 $12 \times 12^\circ$, 1024x1024画素, 検出器 SiCCD

→ 下層の雲, 活火山, 地表物質



2 μ mカメラ IR2 (JAXA)

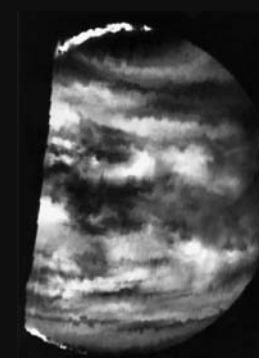
$\lambda = 1.73, 2.26, 2.32 \mu\text{m}$ (近赤外の窓),

2.02 μm (CO_2 吸収), 1.65 μm (黄道光)

視野 $12 \times 12^\circ$, 1024x1024画素, 検出器 PtSi

→ 下層の雲, 粒径, 雲頂高度, 下層の一酸化炭素

Galileo (2.3 μm)

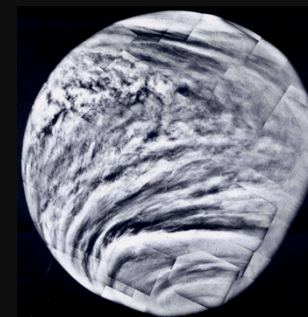


紫外イメージャ UVI (北海道大学・JAXA)

$\lambda = 283, 365 \text{ nm}$

視野 $12 \times 12^\circ$, 1024x1024画素, 検出器 SiCCD

→ SO_2 , 未同定吸収物質



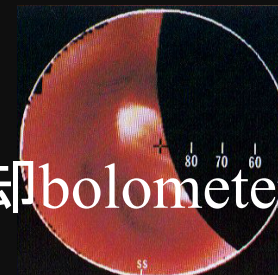
科学観測機器 (2)

中間赤外カメラ LIR (立教大・JAXA)

$\lambda = 10 \mu\text{m}$ (幅 $4 \mu\text{m}$)

視野 $16.4 \times 12.4^\circ$, 248×328 画素, 検出器 非冷却bolometer

→ 雲頂温度

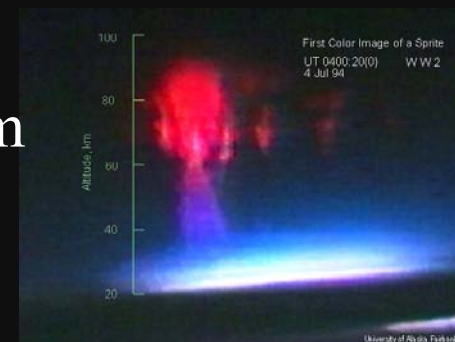


雷・大気光カメラ LAC (北大)

視野 $16 \times 16^\circ$, $\lambda = 777, 551, 553, 558, 630 \text{ nm}$

8×8 画素, 検出器 APD (32kHz sampling)

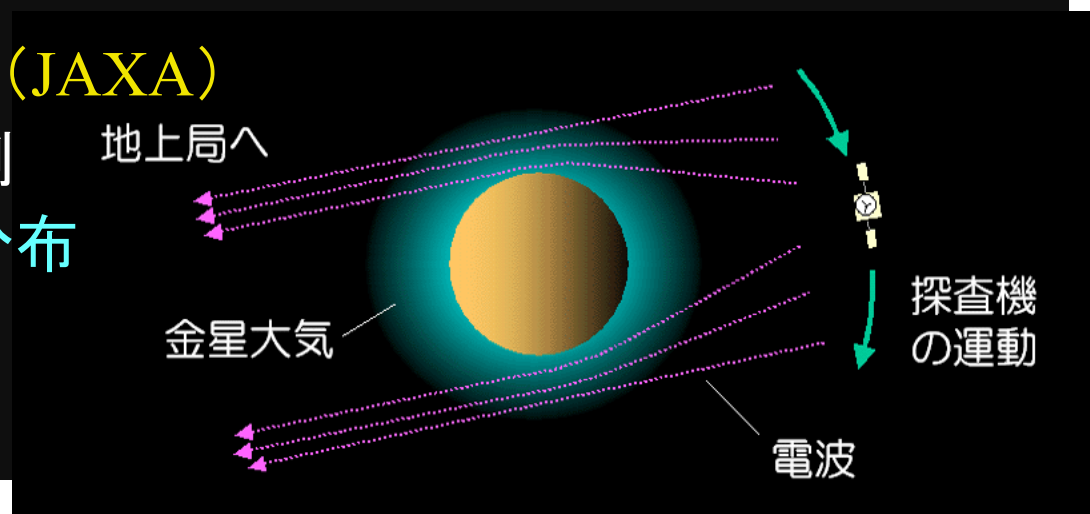
→ 雷放電, O_2 / O 大気光



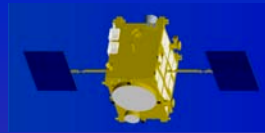
超高安定発振器 USO (JAXA)

電波オカルテーション観測

→ 気温・硫酸蒸気高度分布



あかつき



多波長リモセンで 迫る3次元循環

気温・硫酸蒸気の高度
分布 (電波掩蔽)

大気光
(雷・大気光カメラ)

二酸化硫黄
(紫外イメージャ)

雲の温度
(中間赤外カメラ)

下層の雲
(1 μ m/2 μ mカメラ)

風速ベクトル
(雲の動きから)

一酸化炭素
(2 μ mカメラ)

雷放電
(雷・大気光カメラ)

水蒸気(1 μ mカメラ)

地表物質・活火山
(1 μ mカメラ)

90 km

65 km

50 km

35-50 km

10 km

地表面

成層圏

硫酸雲

対流圏

