

放射伝達モデルを用いた 木星大気放射冷却の推定と 雲構造に関する考察

高橋康人¹, はしもとじょーじ², 石渡正樹¹, 高橋芳幸³, 大西将徳³,
杉山 耕一郎⁴, 倉本圭¹

¹北海道大学, ²岡山大学, ³神戸大学, ⁴宇宙研

2014/10/06 惑星大気研究会オンラインセミナー

目次

- 木星の大気構造概観
 - 温度構造
 - 組成分布
 - 雲構造
- 放射モデル開発
 - モデル概要
 - 光学パラメータ
- 木星の雲構造と放射冷却
- まとめ

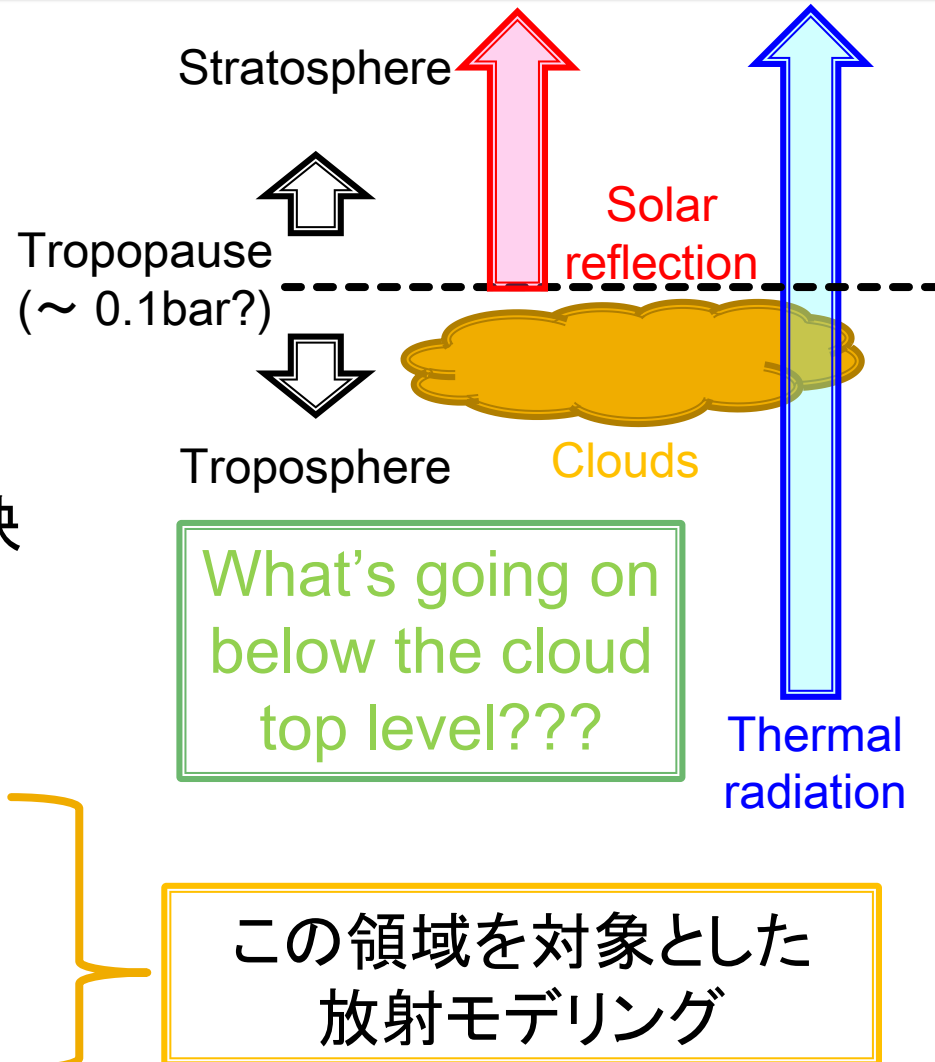
巨大ガス惑星の放射モデリング

■ 惑星の熱収支

- アルベドの決定
 - 太陽放射の吸収・散乱
- 熱放射スペクトル
 - 惑星が射出する赤外放射
 - 大気構造をダイレクトに反映
 - 特に系外惑星の大気構造を知る上で貴重な手掛かり

■ 対流圏の大気構造

- 主要な熱放射の射出源
- 雲形成が起きている領域



木星を対象としたモデル開発

- 最も観測データの豊富な木星の再現を最初の目標とする
 - 水素大気での放射伝達計算
 - 最新の吸収係数
 - 凝結成分および凝結物(雲)の寄与
 - 最新の雲対流計算の知見
 - 対流の駆動力(放射冷却)
 - 過去に先行研究が無い

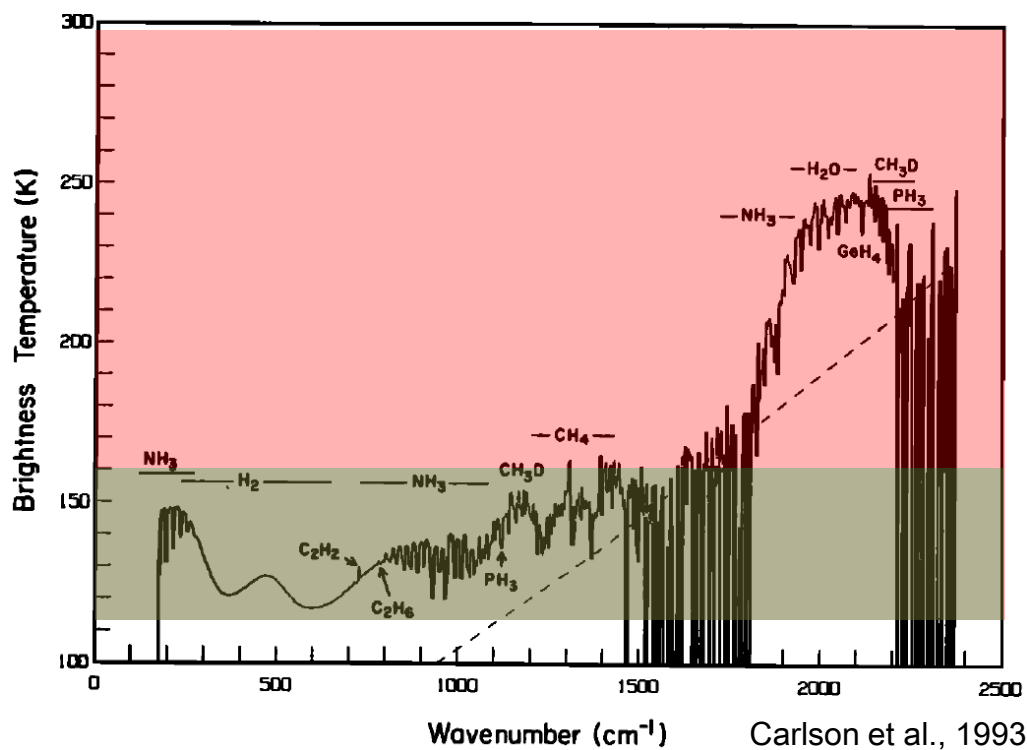
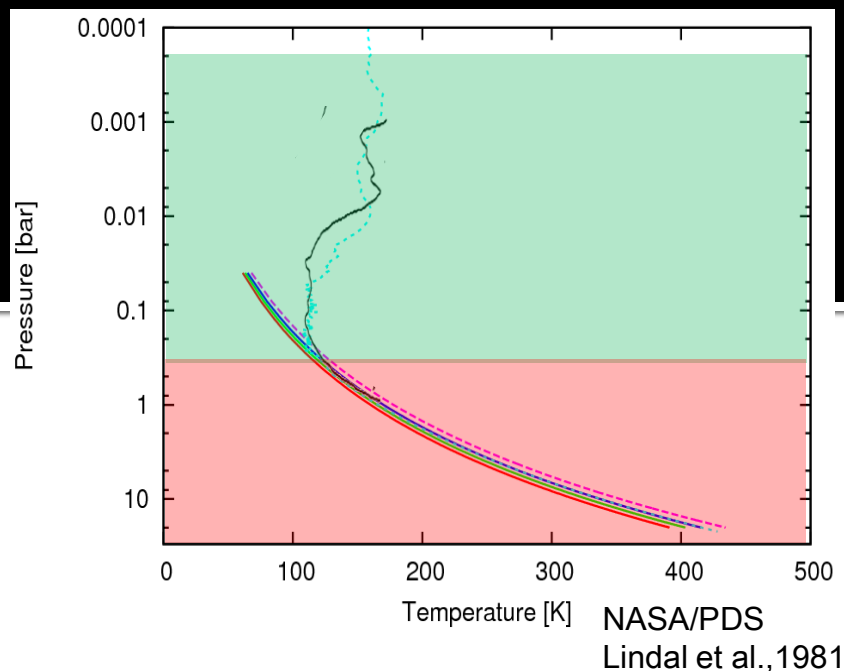
温度構造

観測

- ヴォイジャー：電波掩蔽
- ガリレオ：プローブ観測

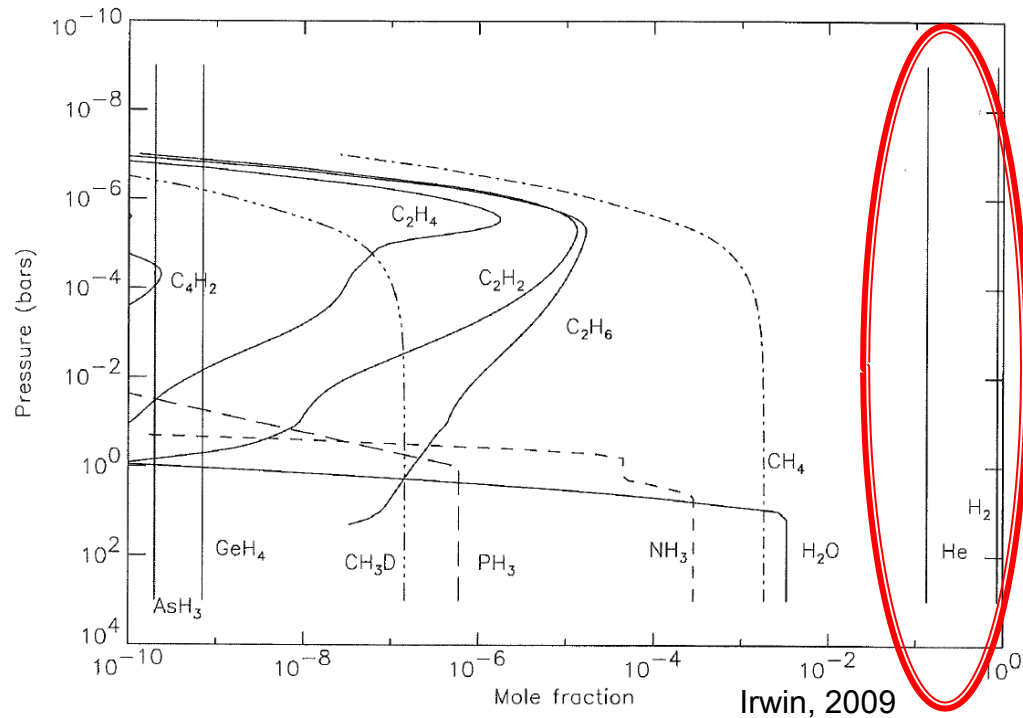
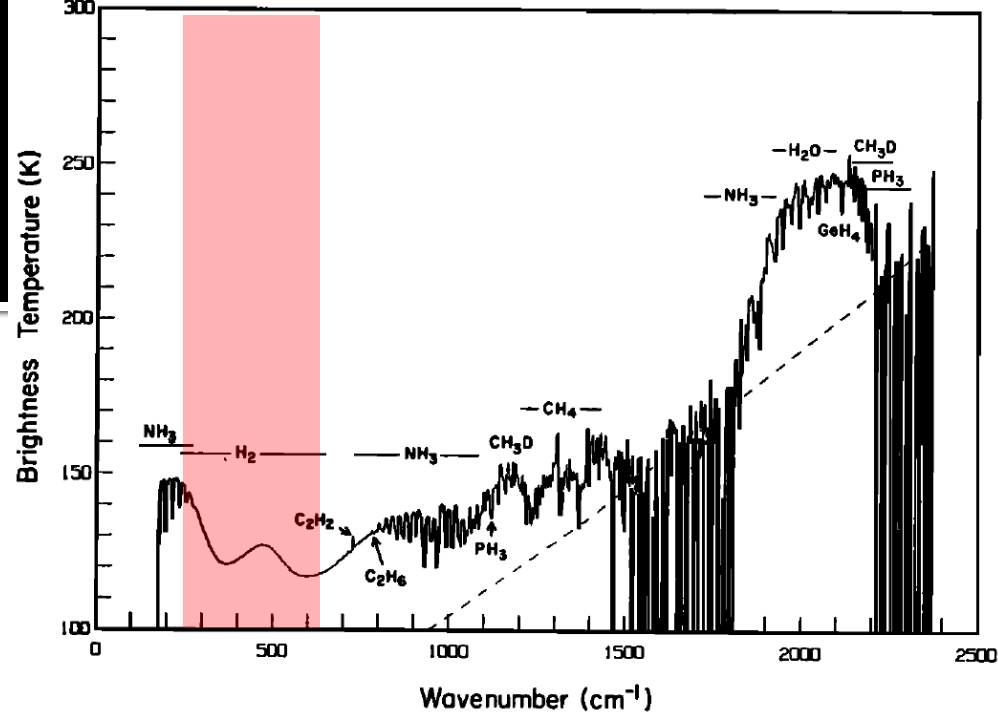
構造

- **対流圏**：鉛直対流によって断熱的な温度構造が保たれる
 - **成層圏**：対流安定
- ## 対流圏界面
- 0.1-0.5bar 付近



組成分布

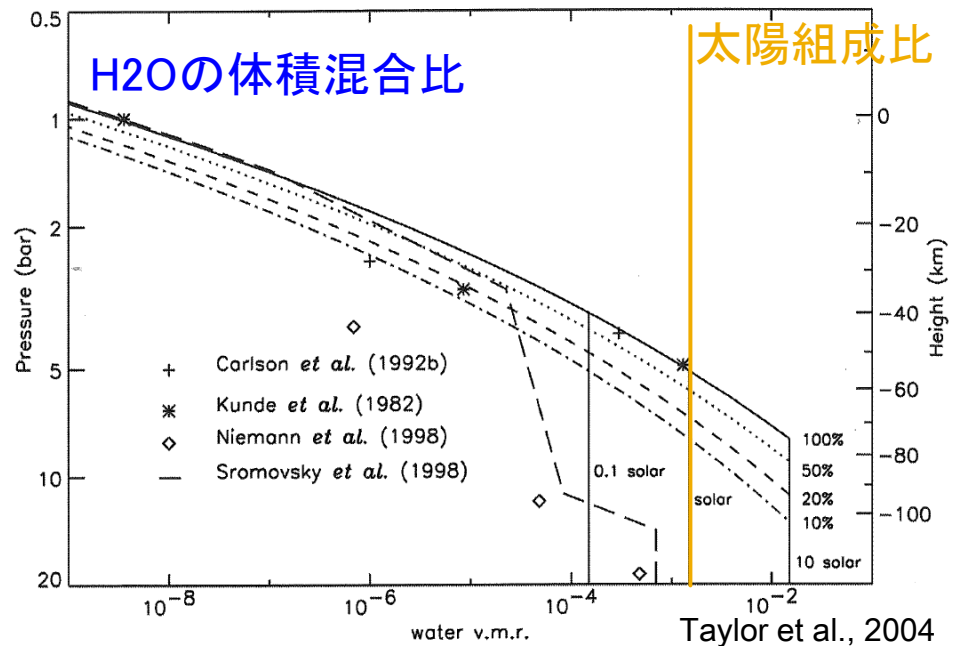
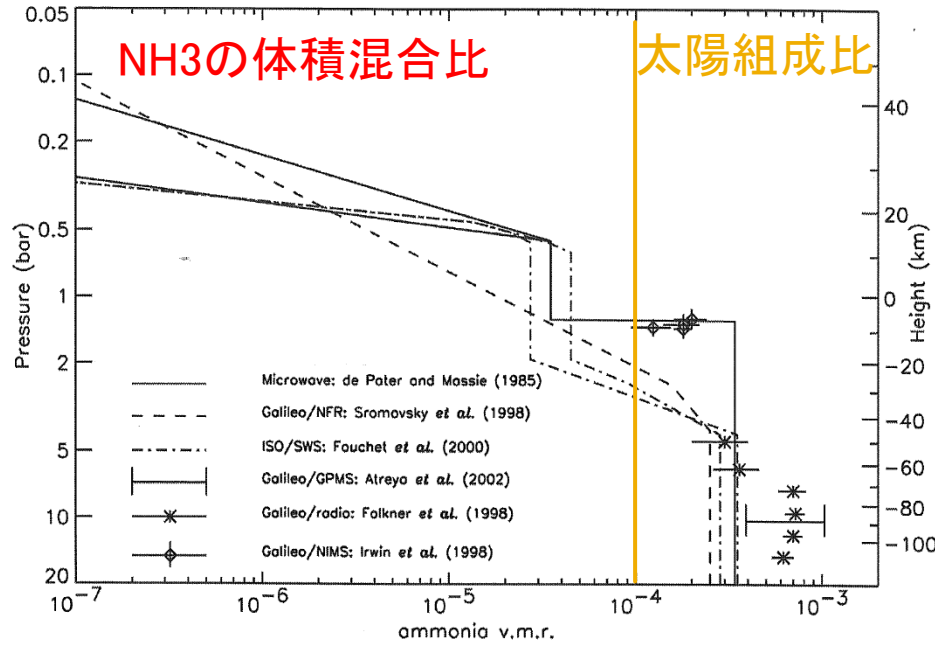
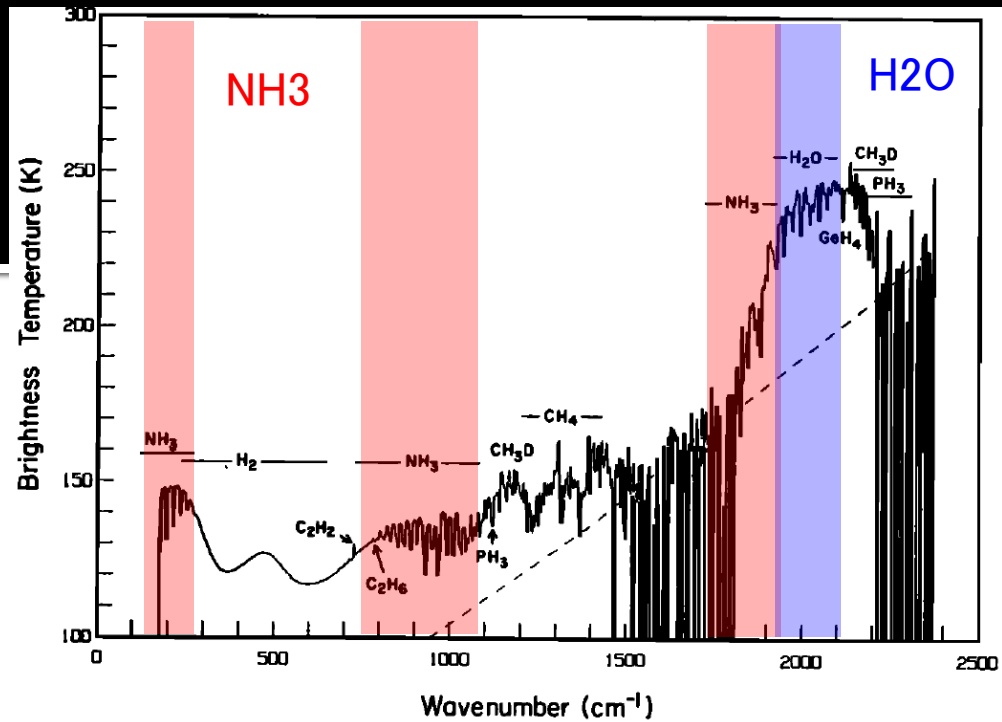
- H₂, He
 - 太陽組成比よりわずかにHeが少ない
 - 分布は一定
 - 主熱放射ピークに対する唯一の吸収体
 - 衝突誘起吸収
- 他の分子種
 - 凝結や光解離などにより分布が変化



組成分布

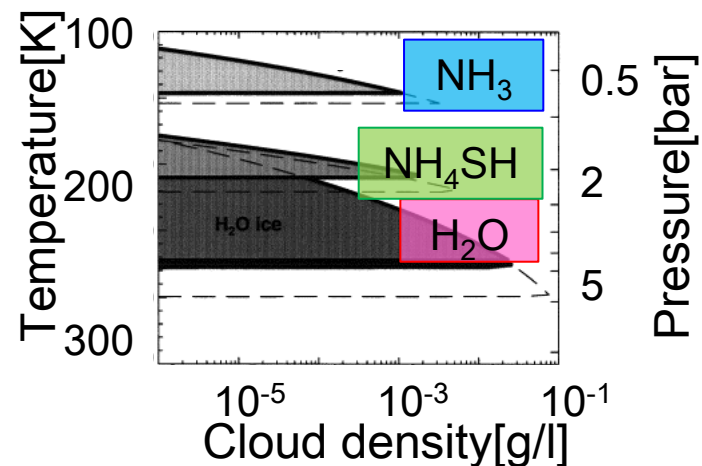
■ 凝結成分

- 複数種の雲が形成
- 凝結高度以下の存在量は不定性が大きい

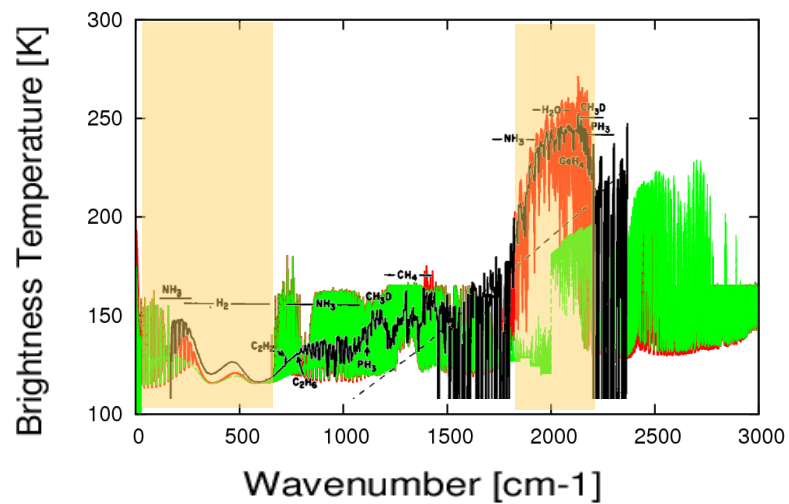
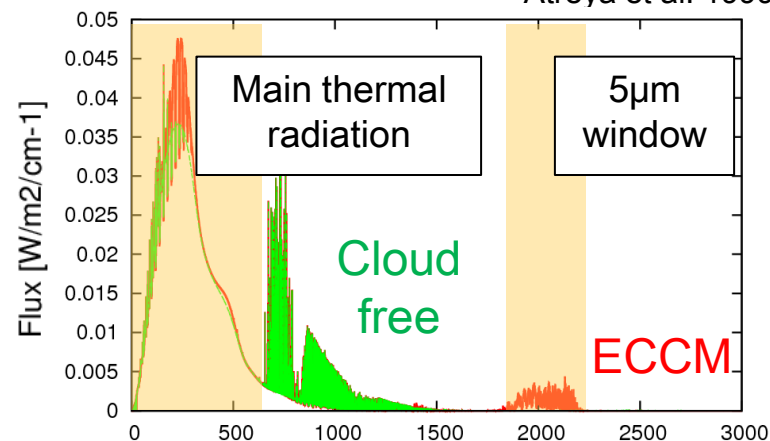


雲構造

- 平衡雲凝結モデル (Equilibrium Cloud Condensation Model)
 - Weidenschilling and Lewis, 1973
 - 太陽組成比と熱化学平衡計算
- 観測された熱放射スペクトルとの不一致
 - 5 μm 窓領域で放射量が小さい
= 雲層が光学的に厚過ぎて下層からの放射を遮っている
 - ECCMでは凝結物が凝結高度に滞留
- 放射の観点ではECCMの雲分布の推定は不適



Atreya et al. 1999



雲構造

■ 放射モデルによる熱放射スペクトル解析

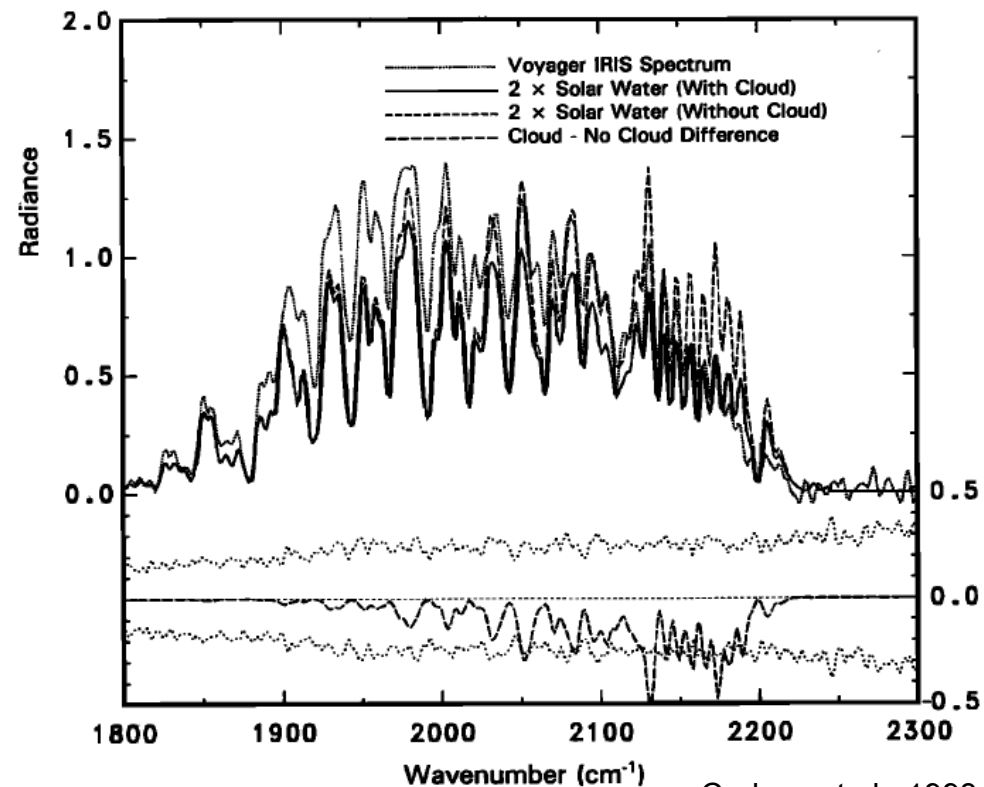
- Carlson et al., 1993

- スペクトルと整合的な組成分布や雲構造を推定

■ 雲構造

- ECCMに相似な雲分布
 - 気体成分はECCMと同様
- 雲の光学的厚さを推定

- ECCMよりも光学的に薄い雲構造を示唆



数値計算から得られた雲対流の影響

■ 二次元雲対流モデル

- Sugiyama et al., 2014, Icarus

- 雲微物理と流体力学計算

■ ECCMとの主な相違点

- 雲密度の大幅な減少

- 最大でもECCMの1/100以下

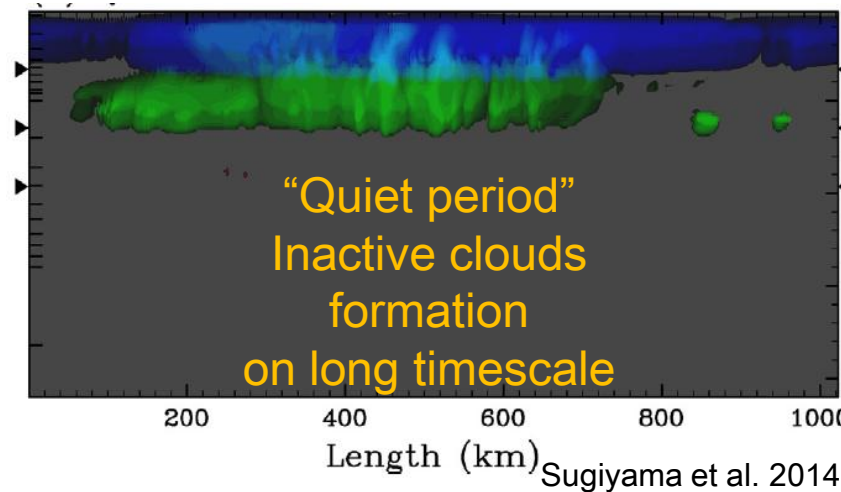
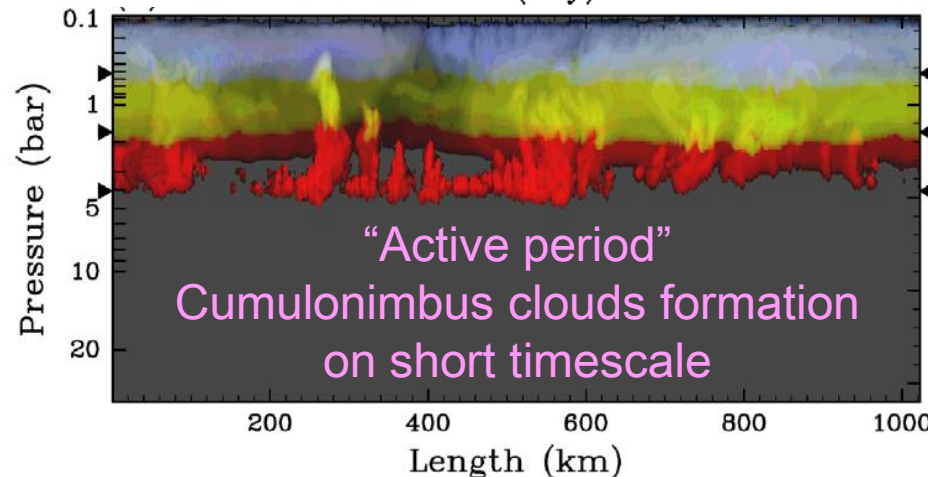
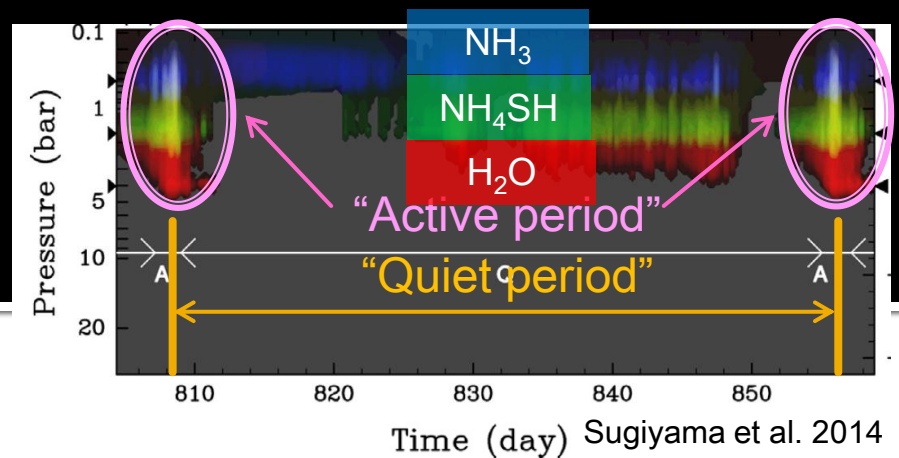
- 鉛直方向への広がり

- 間欠的な活動性

- 乾燥空気と湿潤空気の混合

■ この雲層構造は観測された熱放射とどの程度整合的か？

- 放射と対流の関係に着目した研究はほとんど無い



目的

- 雲対流モデルから与えられる雲と気体の分布を用いて計算した熱放射スペクトルが、観測された熱放射スペクトルと整合的か調べる
- 雲対流と放射冷却の間で起こり得るフィードバック効果について考察する

モデル概要

- 木星大気を想定した一次元放射伝達モデル

- Line-by-line model for $0-3,000\text{cm}^{-1}$ ($\lambda > 2.0\mu\text{m}$)
- 雲層は一定の粒径の雲粒から成ると仮定

- 光学パラメータ

$$\tau = \tau_{\text{CIA}} + \tau_{\text{LA}} + \tau_{\text{R}} + \tau_{\text{C}}$$

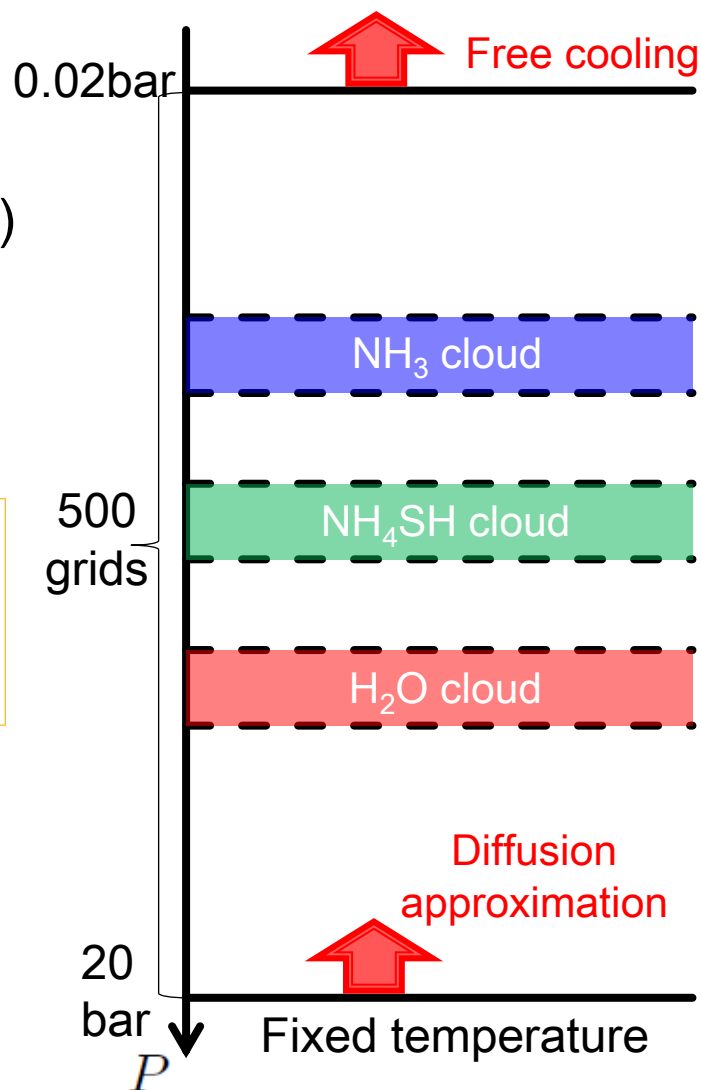
$$\omega = \frac{\tau_{\text{R}}\omega_{\text{R}} + \tau_{\text{C}}\omega_{\text{C}}}{\tau}$$

$$g = \frac{\tau_{\text{R}}\omega_{\text{R}}g_{\text{R}} + \tau_{\text{C}}\omega_{\text{C}}g_{\text{C}}}{\tau_{\text{R}}\omega_{\text{R}} + \tau_{\text{C}}\omega_{\text{C}}}$$

CIA=H₂, He の衝突誘起吸収
LA=線吸収
R=気体によるレイリー散乱
C=雲による消散

- 放射伝達計算

- 平行平板大気を仮定した二流近似
 - Toon et al., 1989
 - 計算コードは DCPAM 5.0 を用いる



光学パラメータ

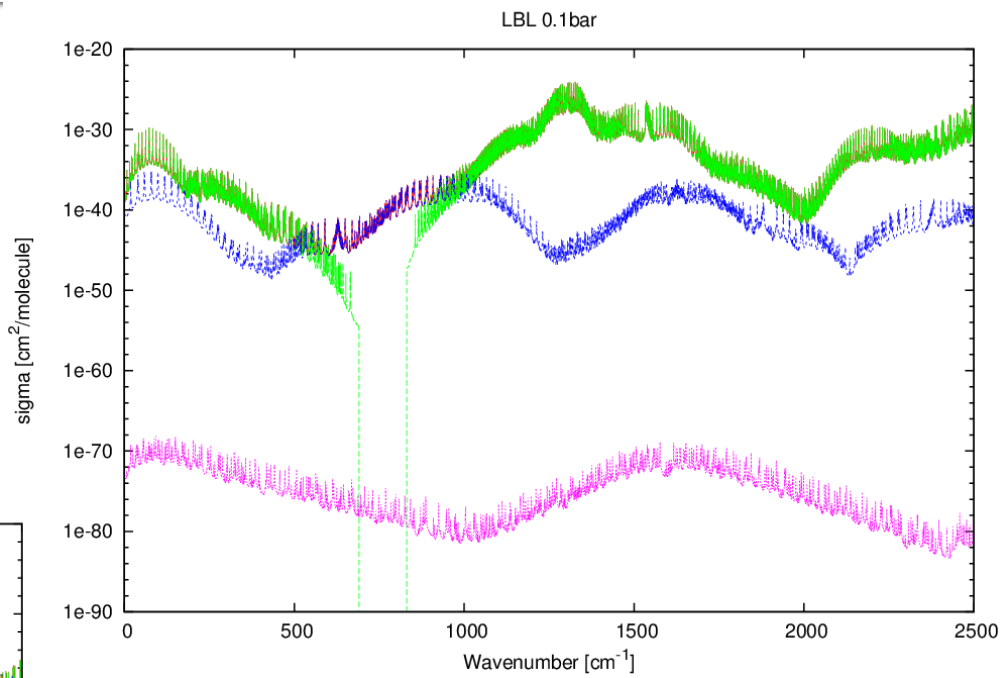
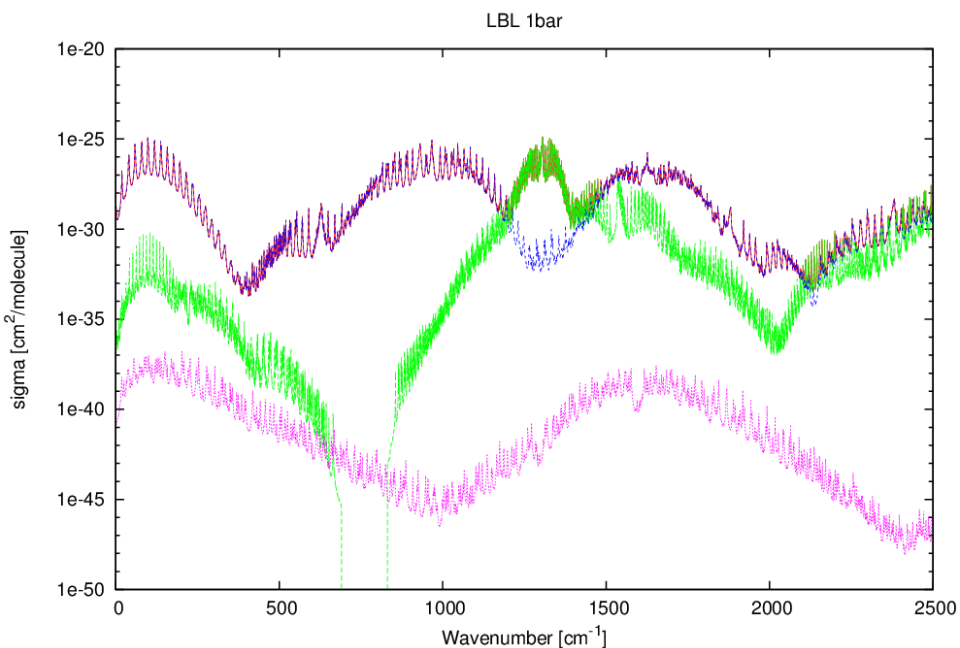
～気体の光学的深さ・散乱～

- 連続吸収
 - H₂-H₂, H₂-He 衝突誘起吸収
 - Borysow 1989, 2002
- 線吸収
 - H₂O, CH₄, NH₃, H₂S, PH₃
 - HITRAN2012
- レイリー散乱
 - 太陽組成比のH₂-He大気における近似式
 - Irwin 2009

あらかじめ計算した
データテーブルから内挿

線吸収の内訳(例)

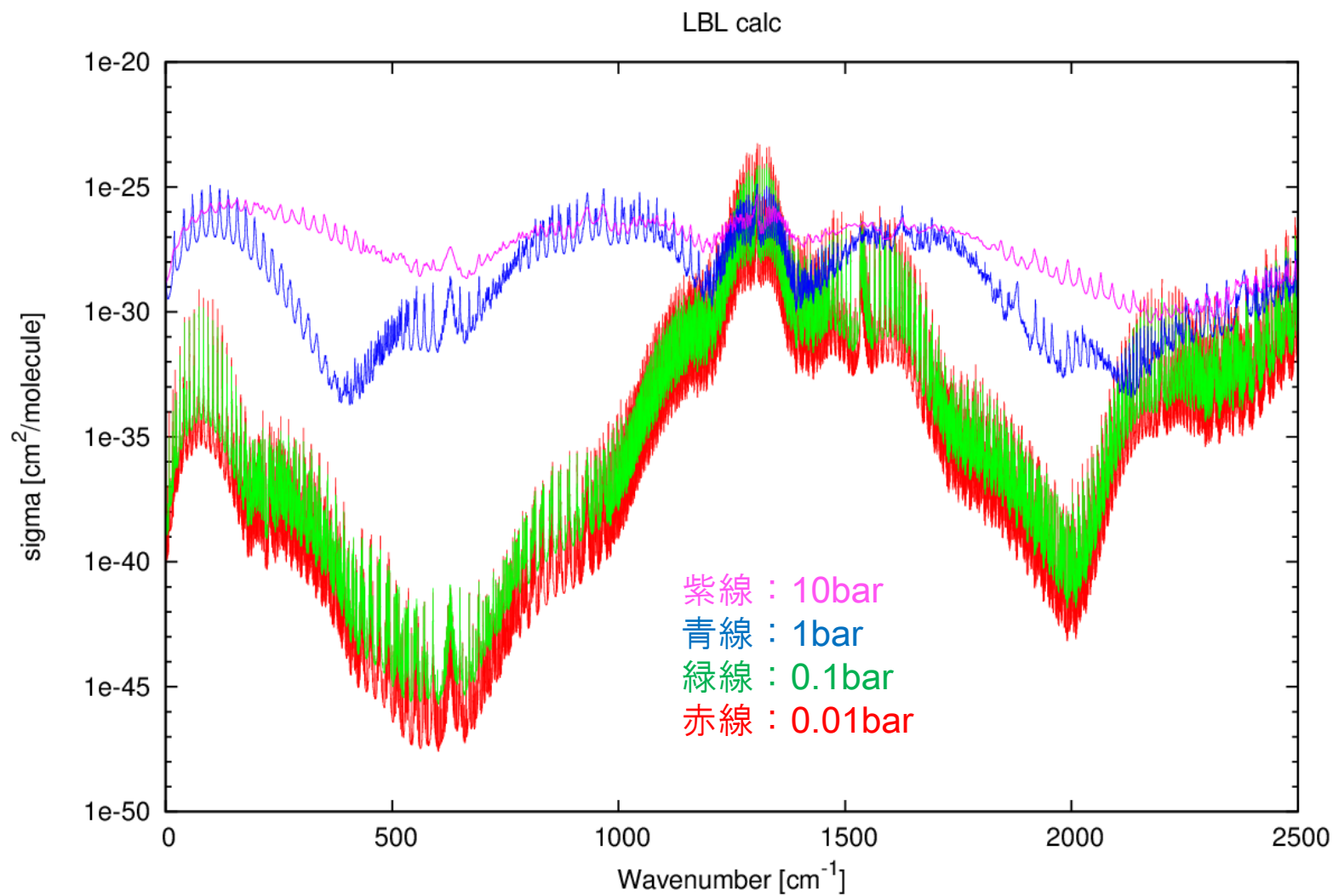
- →0.1bar における
吸収断面積



- ←1bar における
吸収断面積

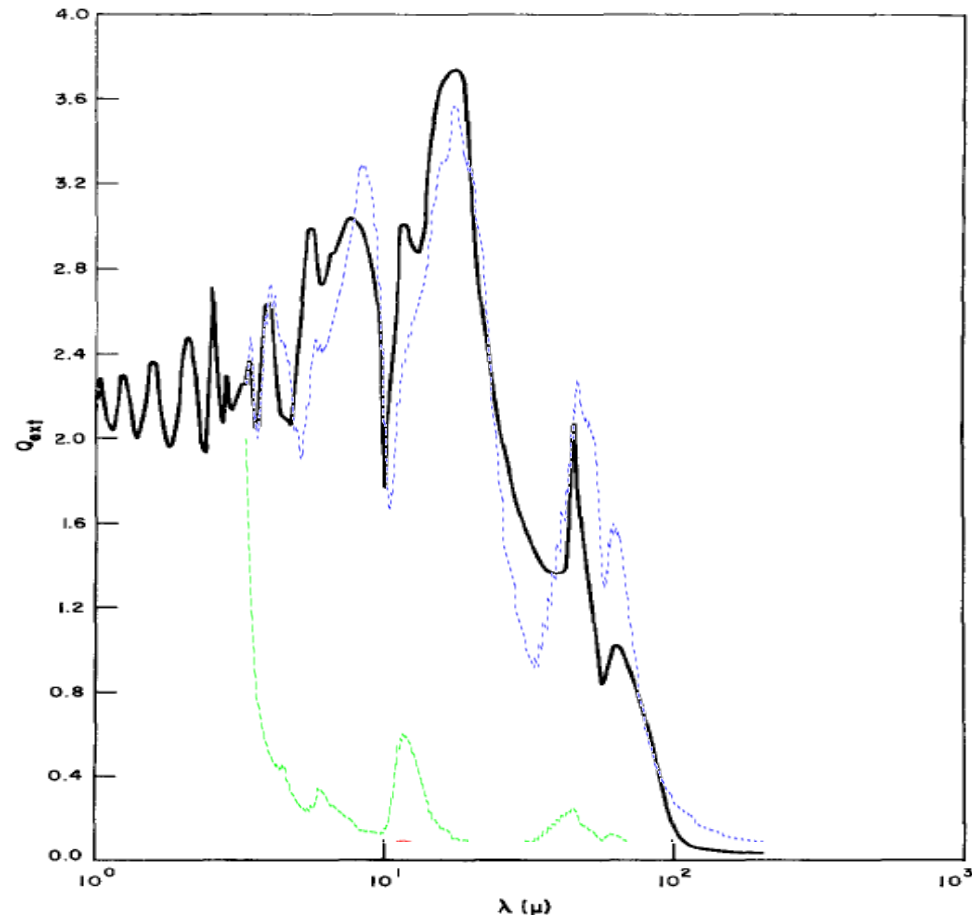
赤線 : 総和
緑線 : CH₄
青線 : NH₃
紫線 : H₂O

各高度での線吸収(例)



光学パラメータ ～雲の吸収・散乱～

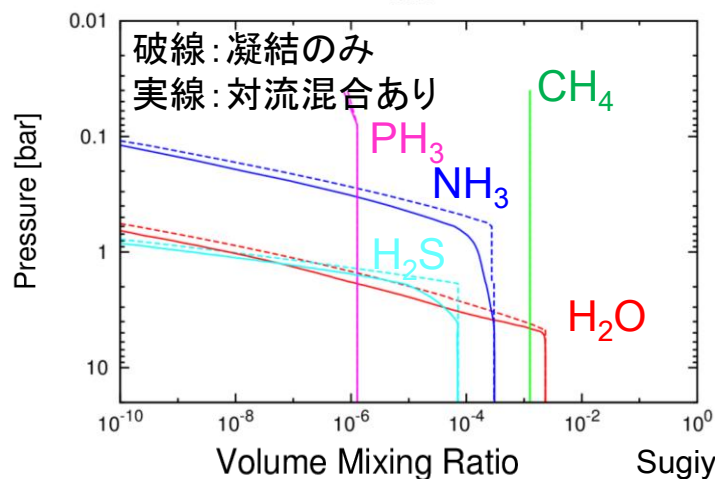
- ミー理論計算
 - 粒径と複素屈折率から Q_{ext} , Q_{scat} , Asymmetry factor を計算
 - Bohren and Huffman, 1998
 - 計算コードははしもとじょーじさん提供
 - 複素屈折率は Howett 2009 等を参照



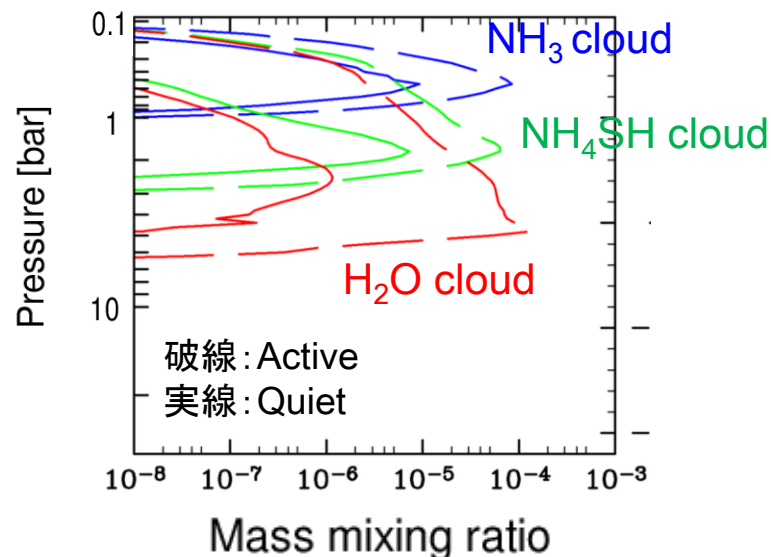
Irvine, 1968

セッティングとパラメータ

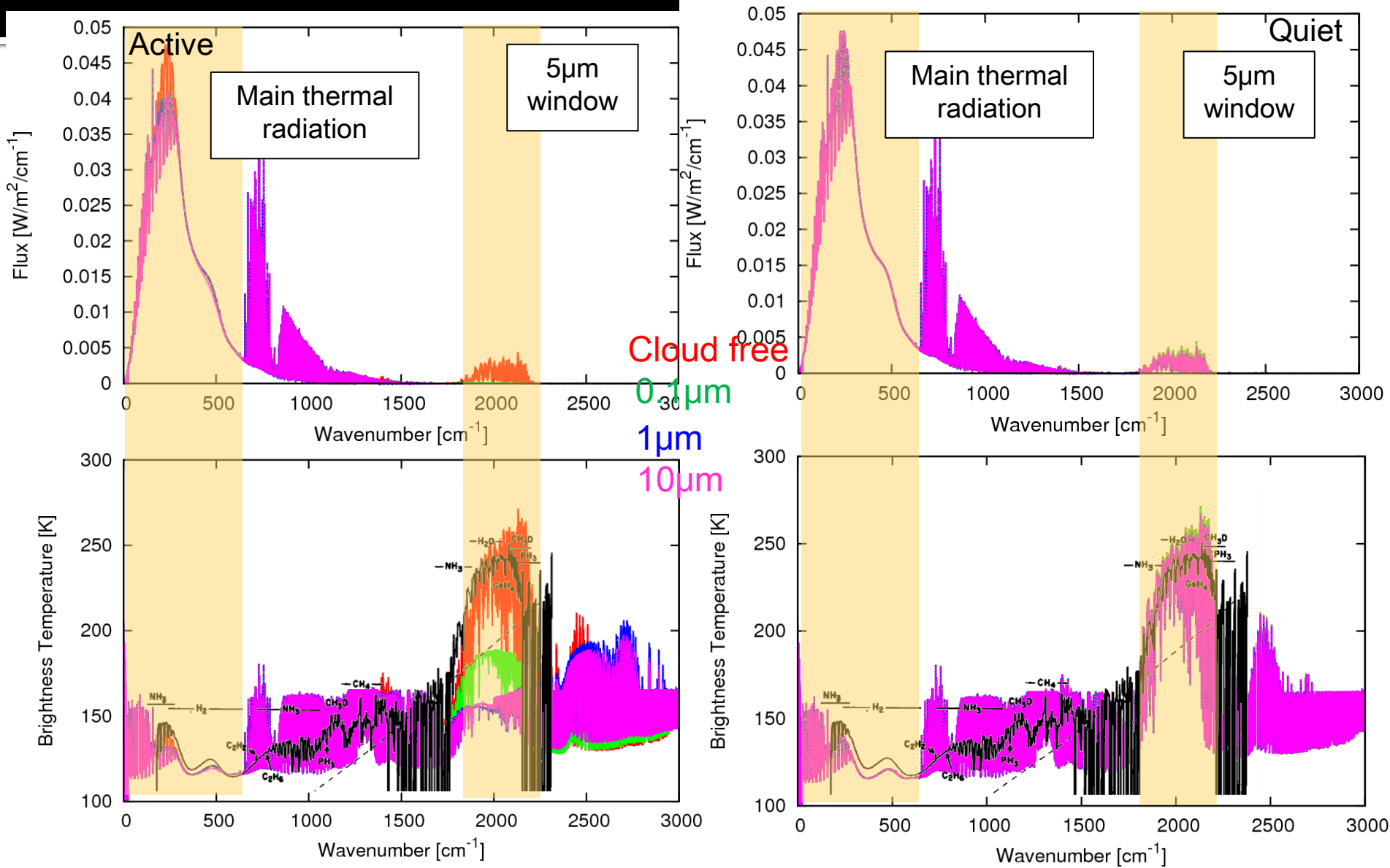
- 重力
 - 23.1m/s² (木星の平均値)
- 大気深部の組成
 - H₂, He, H₂O, NH₃, H₂S, CH₄, PH₃
 - 凝結成分は太陽組成比の3倍
- 温度プロファイル
 - ガリレオプローブの観測値
- 凝結気体プロファイル
 - 乾燥空気と湿潤空気の対流混合あり



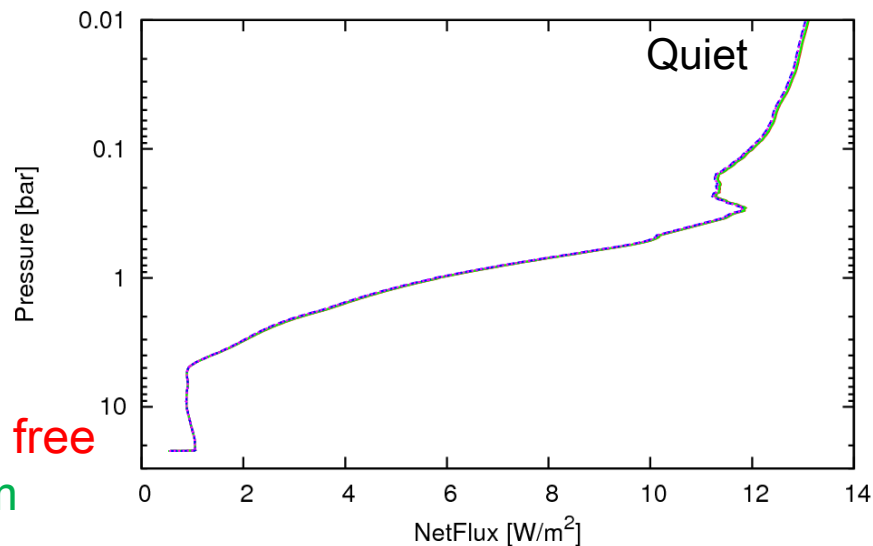
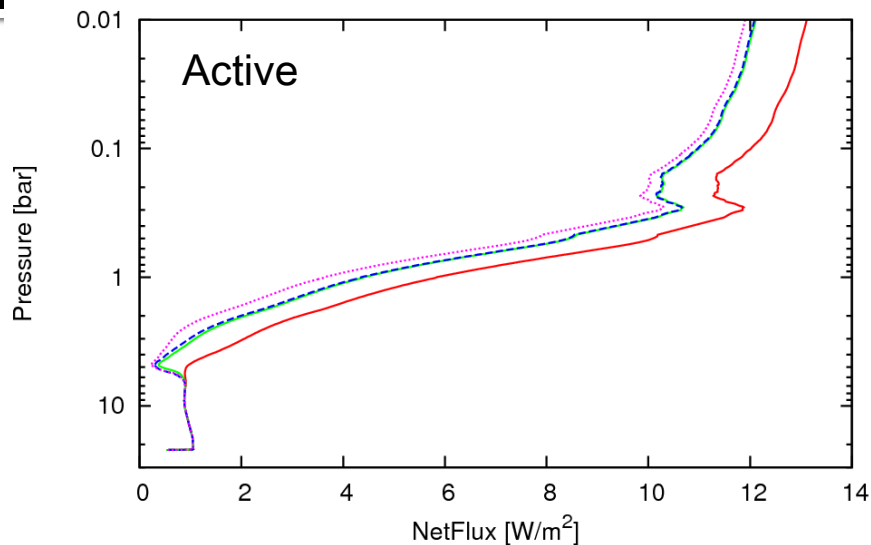
- 雲質量密度プロファイル (3 種)
 - 雲無し, Active, Quiet*
 - ただし今回はH₂O雲のみを与えた結果を示す
- 雲粒の粒径 (3 種)
 - r_C=0.1, 1, 10μm
 - 質量密度を保存するように与える



熱放射スペクトル



正味熱放射・放射冷却率

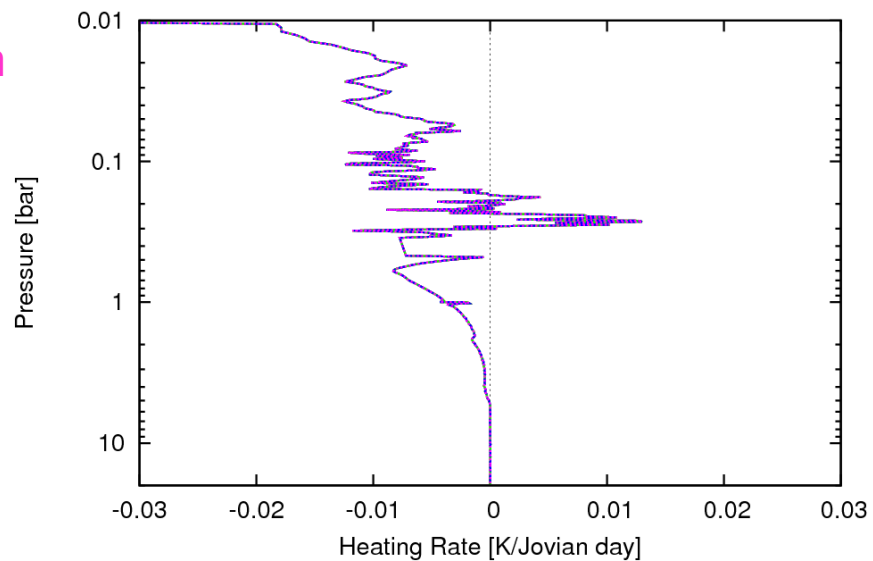
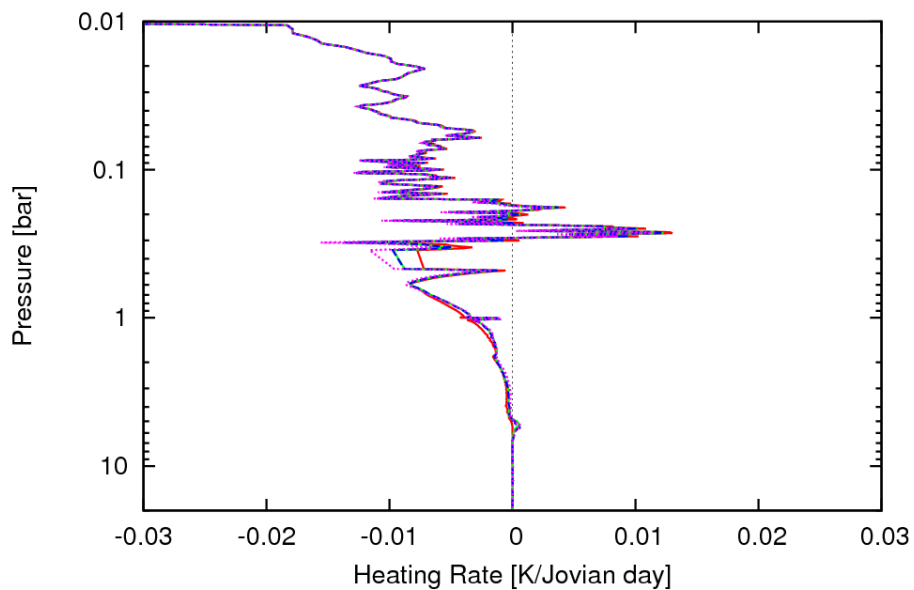


Cloud free

0.1 μm

1 μm

10 μm



議論：雲対流モデルによる雲構造推定と観測された熱放射スペクトルの整合性

- 5 μ m window からの放射量
 - Active period
 - ECCM同様、雲によって放射が遮蔽されるため放射量が小さい
 - Quiet period
 - ほとんど雲無しの場合と変わらない放射量となり、観測値を少し超えた値となる
- 整合性に関する考察
 - Active と Quiet の重み付き平均から観測値を説明できる
- 雲対流モデルの雲構造は観測された熱放射と整合的

議論：

放射冷却から雲対流へのフィードバック

- Active period
 - H₂O雲の有無によって放射量に 1 W/m² 程度の差ができる
 - 対流を駆動する放射強制がわずかに弱まる
 - Quiet period
 - 放射冷却量は雲無しモデルからほとんど変化しない
 - Quiet period の期間はほとんど変わらない
- H₂O雲の形成による雲対流サイクルへの影響は限定的

まとめ

- 木星の大気構造
 - ガリレオプローブの直接探査やスペクトルの解析からおおよその構造はわかっているが、特に雲頂下での組成分布や雲構造などについては不定性が大きい
- 熱放射スペクトルと雲構造
 - Sugiyama et al., 2014 にて示された雲構造は、いくつかの条件付きではあるが熱放射スペクトルと整合的であることが確認できた

参考文献

- Atreya, S. K., et al, A comparison of the atmospheres of Jupiter and Saturn: deep atmospheric composition, cloud structure, vertical mixing, and origin, P&SS, vol.47, pp1243–1262.
- Carlson, B. E., Lacy, A. A. and Rossow, W. B., Tropospheric gas composition and cloud structure of the Jovian North Equatorial Belt, 1993, JGR, vol.98, pp5251–5290.
- Irwin, P. G. J., Giant planets of our solar system : atmospheres compositions, and structure, 2009, Springer.
- Lindal, G. F., et al, The atmosphere of Jupiter – an analysis of the Voyager radio occultation measurements, 1981, JGR, vol.86, pp8721–8727.
- Sugiyama, K., et al, Numerical simulations of Jupiter's moist convection layer: Structure and dynamics in statistically steady states, Icarus, vol.229, pp71–91.
- Taylor, F. W., et al, The composition of the atmosphere of Jupiter, 2004, Cambridge.