

# 高温のガス惑星における 大気構造と赤外放射スペクトル

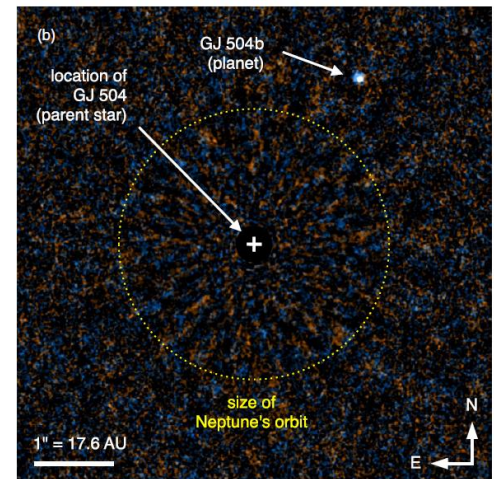
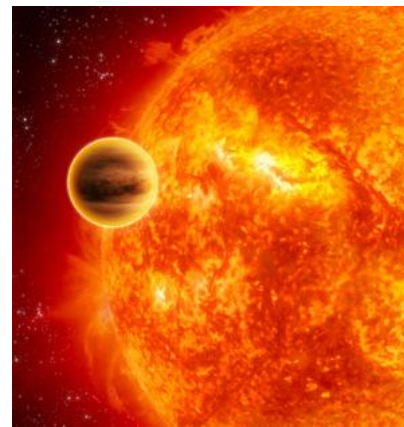
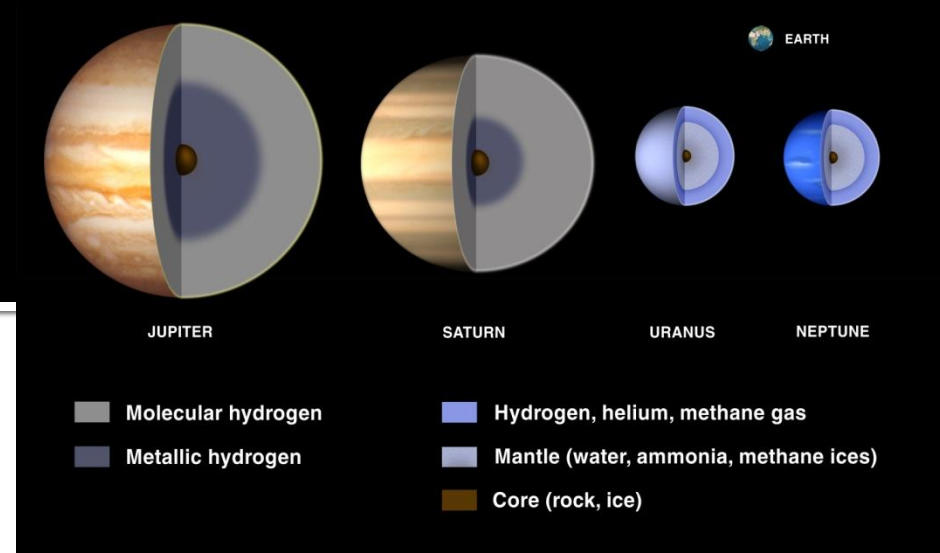
高橋康人<sup>1</sup>, はしもとじょーじ<sup>2</sup>, 石渡正樹<sup>1</sup>, 高橋芳幸<sup>3</sup>, 大西将徳<sup>3</sup>,  
倉本圭<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北海道大学, <sup>2</sup>岡山大学, <sup>3</sup>神戸大学

2014/01/06-07 系外惑星大気WS/惑星大気研究会@三鷹

# ガス惑星

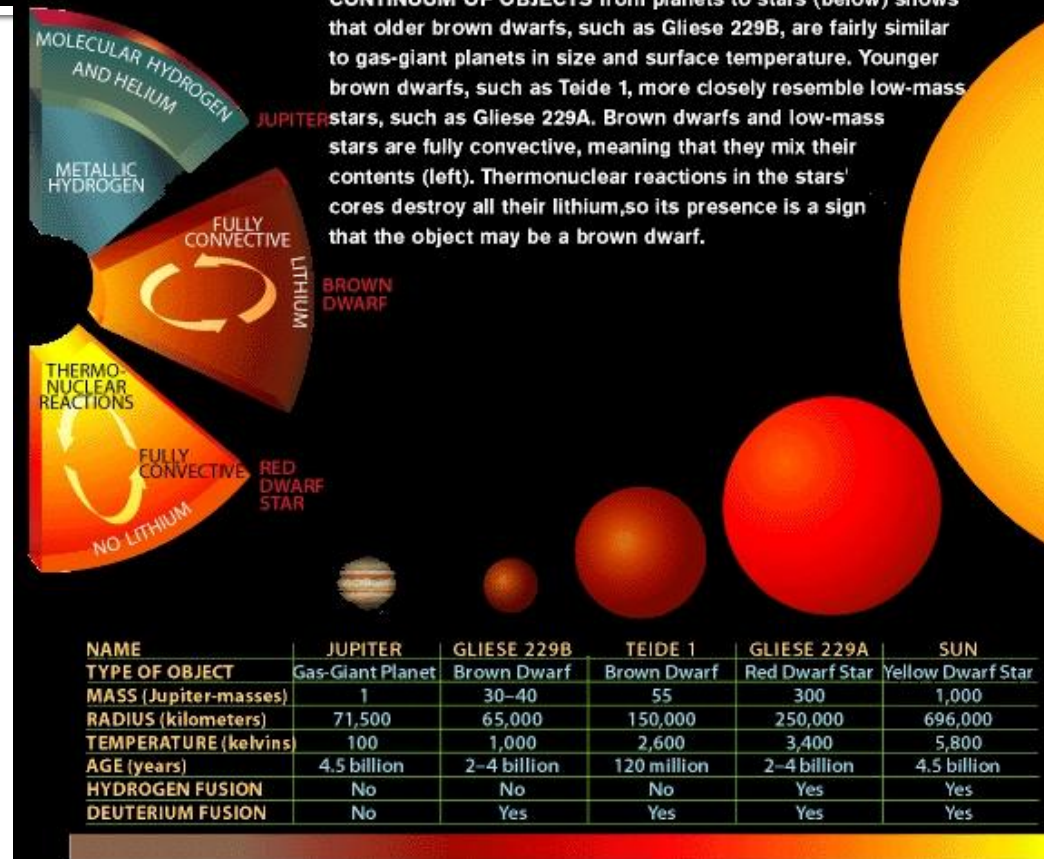
- 太陽系
  - 木星 土星 天王星 海王星
- 太陽系外(EGP)
  - ホットジュピター等
- 特徴
  - 厚い大気
    - H<sub>2</sub>, He を中心とする組成
    - 地表は無い(見えない)
    - 特異な大気循環
  - 多様な環境
    - 軌道長半径
    - 形成年代



これらの特徴が測光・分光観測に与える影響のモデリング  
⇒ 惑星のキャラクタリゼーションを進める上で不可欠

# EGP の重要性

- ホットジュピター
  - 境界条件が惑星の大気環境を変化させる好例
- 若い惑星系
  - 木星の過去の状態を探る
- 惑星と恒星の間天的な天体
  - 褐色矮星や高温の EGP
  - 惑星から恒星までの連続性を考察する手掛かり



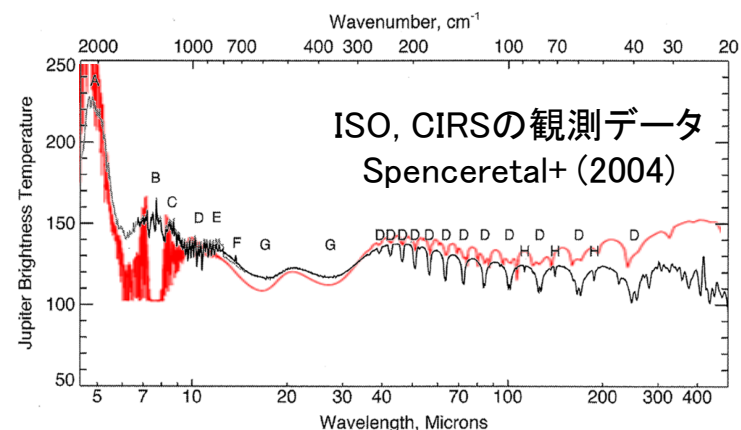
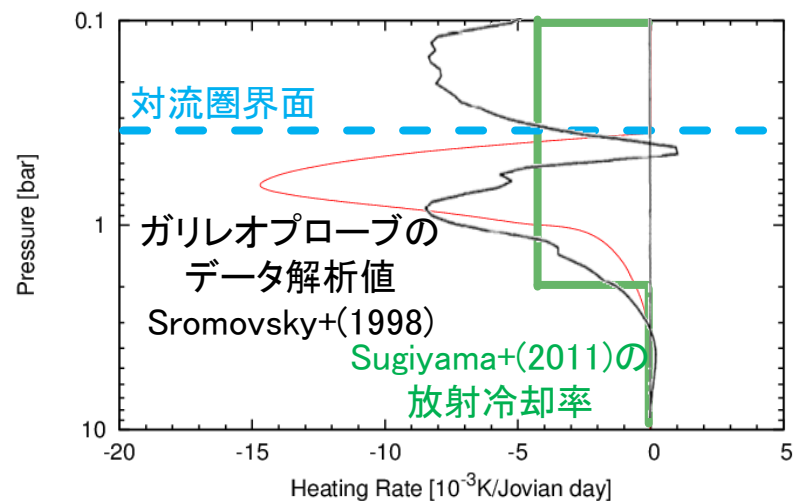
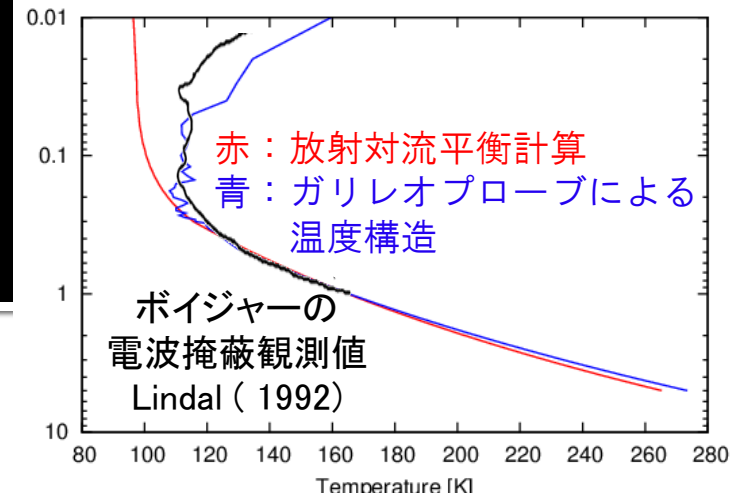
- EGP のキャラクターゼーション
  - 恒星誕生、惑星の形成から進化まで、幅広い知見を与えてくれる

# 大気モデルの開発と木星への適用

- 鉛直一次元放射対流平衡モデル
  - 境界条件を与え、それに対応する放射対流平衡な(平均的な)大気構造を求める
- 木星を想定した計算
  - 放射冷却率の推定
  - 木星雲頂高度に関する示唆

## 系外惑星への応用

- 境界条件・大気組成等を与えれば計算可能

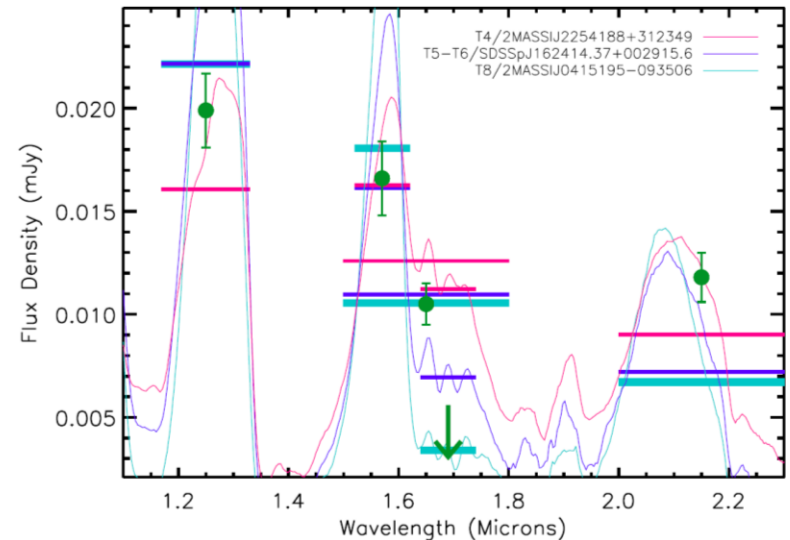
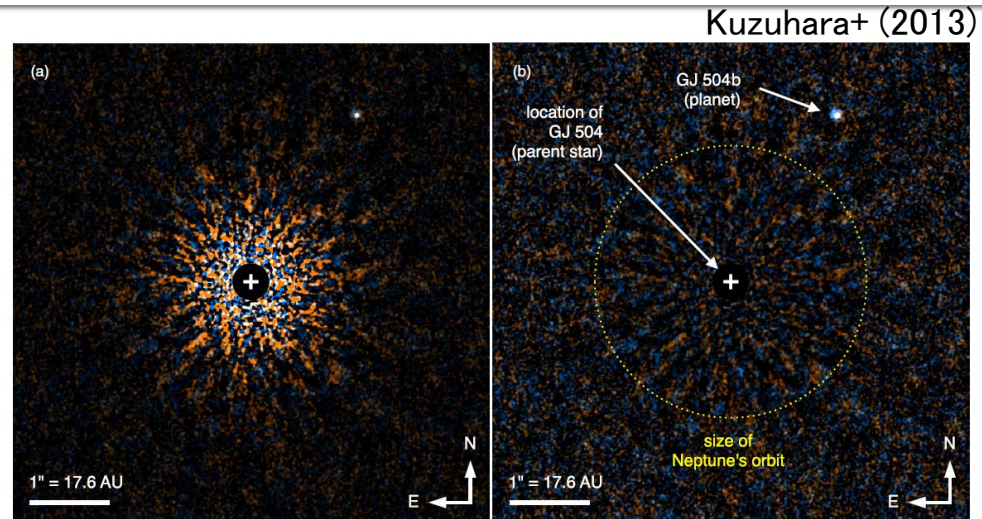




# 系外惑星 GJ 504 b

- 2013年にすばるで発見されたEGP
  - 直接撮像
  - 多波長測光
- 惑星の主なプロパティ
  - 軌道長半径: 43.5 AU
    - 中心星放射の影響は小さい
  - 質量:  $4.0^{+4.5}_{-1.0} M_{\text{Jup}}$
  - 有効温度:  $510^{+30}_{-20}$  K
    - 最も低温な EGP のひとつ
  - 重力:  $79.43 \text{ m/s}^2$

プロパティの推定は惑星進化モデル(Baraffe+ 2003)に基づく



# Baraffe+ (2003) の惑星進化モデル

- 多波長測光から惑星のプロパティを推定可能

$m/M_{\odot}$	$T_{eff}$	$\log L/L_{\odot}$	$R/R_{\odot}$	$\log g$	$M_V$	$M_R$	$M_I$	$M_J$	$M_H$	$M_K$	$M_{L'}$
0.0005	240.	-7.418	0.114	3.020	41.98	37.51	34.00	28.42	26.59	37.66	19.57
0.0010	309.	-6.957	0.117	3.300	32.58	28.68	25.89	22.43	22.38	29.11	17.41
0.0020	425.	-6.383	0.120	3.580	29.69	25.62	22.79	20.05	19.76	23.13	15.94
0.0030	493.	-6.112	0.121	3.746	28.71	24.48	21.66	18.88	18.57	20.88	15.21
0.0040	563.	-5.880	0.122	3.869	28.09	23.77	20.95	17.95	17.71	19.35	14.59
0.0050	630.	-5.686	0.122	3.965	27.65	23.25	20.44	17.23	17.02	18.15	14.06

- 課題

- 大気構造, 組成分布は不明
  - メタリシティへの言及は無い
- 熱放射のピーク波長ではない
- どこまで低温の対象に適用できるのか?

大気モデルを用いれば  
メタリシティを含めた詳細な解析が可能になる

# 本発表の目的

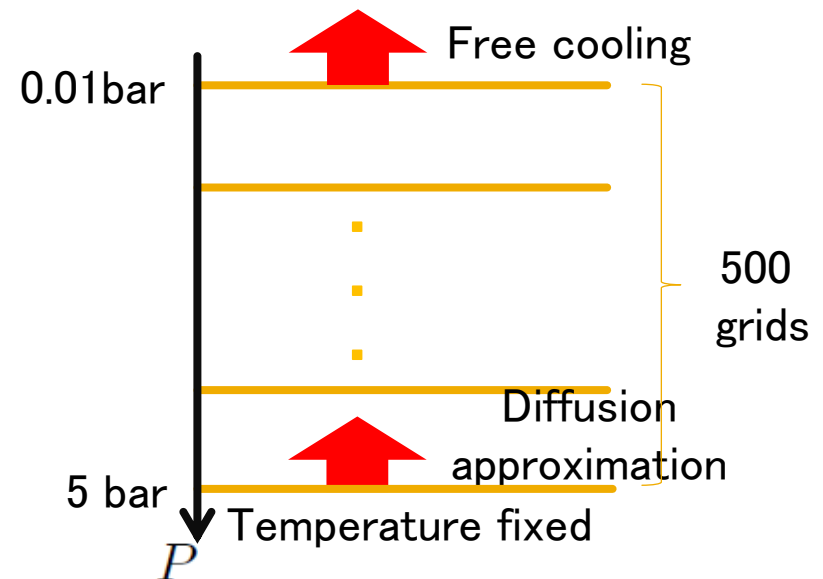
- 木星と高温のガス惑星の違いを探る
  - 温度の違いが大気構造と赤外放射スペクトルの関係にどう影響するのか
  - 木星で使ってきたモデルを、より高温のガス惑星に適用するテストケース

# モデル概要

Parameter	Value
Vertical range	0.01–5 bar
Total Grids	500
Wavenumber	0–10,000 $\text{cm}^{-1}$ $\Delta n=10 \text{ cm}^{-1}$ (1 $\mu\text{m}$ ~)
Gravity	24.82 $\text{ms}^{-2}$ (equator)

Opacity sources	reference
$\text{H}_2$ - $\text{H}_2$ collision induced absorption (CIA)	Borysow 2002
$\text{H}_2$ -He CIA	Borysow 1989
$\text{H}_2\text{O}$ line absorption	HITRAN2012
$\text{CH}_4$ line absorption	HITRAN2012
$\text{NH}_3$ line absorption	HITRAN2012
$\text{H}_2\text{S}$ line absorption	HITRAN2012

- 一次元放射対流平衡モデル
- 非灰色大気
- 散乱は無視
- 凝結の効果は体積混合比変化のみ
- 上部境界
  - 自由冷却
  - 太陽放射は無視
- 下部境界
  - 温度固定
  - 上向き放射を拡散近似で与える





# 気体成分の鉛直分布

## ■ 大気組成

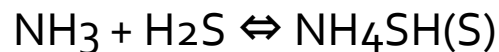
- 大気はH<sub>2</sub>, He, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>Sのみから成ると仮定
- 鉛直分布は体積混合比で与える
  - 単位体積中に占める割合

$$\log P = A - \frac{B}{T}$$

P: Pressure  
A, B, C: Antoine equation parameters  
T: Temperature

$$\log P_{NH_3}^i + \log P_{H_2S}^i = 34.15 - \frac{10833.6}{T^i}$$

$$\log (P_{NH_3}^{i+1} - \Delta P) + \log (P_{H_2S}^{i+1} - \Delta P) = 34.15 - \frac{10833.6}{T^i}$$



## ■ 混合比計算

- 対流圏下部での混合比は以下の通り与える(太陽組成)
  - 高温であり、かつ対流によってかき混ぜられる

from "Jupiter"

He	CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> S
0.16	7.0x10 <sup>-4</sup>	1.8x10 <sup>-4</sup>	1.5x10 <sup>-3</sup>	3.1x10 <sup>-5</sup>

## ■ 凝結による混合比減少

- 飽和蒸気圧はクラウジウス=クラペイロン式で導出
- 凝結物自体の放射特性は無視

	A	B
H <sub>2</sub> O	17.477	6164.65
CH <sub>4</sub>	10.682	1163.8
NH <sub>3</sub> (195.5K以下)	17.347	3930.6
NH <sub>3</sub> (195.5K以上)	11.901	2850.4

# 線吸収

- 振動と回転のエネルギー準位変化に起因
  - 不連続(離散的)な吸収特徴
- H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S
  - H<sub>2</sub>, He に次いで多い分子
  - HITRAN2012 を利用

- Line by Line 法
  - 波数解像度 : 0.01cm<sup>-1</sup>
  - カットオフ : 25cm<sup>-1</sup>
  - 吸収線形は Voigt 線形
    - Kuntz (1997), Ruyten (2004)
- 放射計算
  - 圧力 4 点から対数的に内挿
  - 波数解像度は平均化

$$S_i(T) = S_i(T_{ref}) \frac{\exp(-hcE_{j,i}/kT)}{\exp(-hcE_{j,i}/kT_{ref})} \frac{Q(T_{ref})}{Q(T)} \frac{[1 - \exp(-hc\nu_{0,i}/kT)]}{[1 - \exp(-hc\nu_{0,i}/kT_{ref})]}$$

$$\sigma_i(\nu) = S_i(T) f(\nu - \nu_{0,i}) \leftarrow f_V(\nu - \nu_0) = \frac{1}{\alpha_D \sqrt{\pi}} Voigt(x, y)$$

$$d\tau_{z,\nu} = \frac{\sigma_{z,\nu} P_z}{MgP} dP$$

$\sigma$ : Line absorption cross-section  
 $S$ : Line intensity  
 $T$ : Temperature  
 $f$ : Absorption profile  
 $\nu$ : Wavenumber  
 $\alpha_D$ : Halfwidth for Doppler profile  
 $Voigt$ : Voigt function  
 $x, y$ : Functions of P,T, $\nu$   
 $h$ : planck constant  
 $c$ : Light speed  
 $E$ : Potential energy for lower level  
 $k$ : boltzmann constant  
 $Q$ : Partition function  
 $\tau$ : Optical depth  
 $M$ : Average mass of single molecule

# 衝突誘起吸収

## ■ 分子間衝突に起因

- 極性の無い分子も吸収を持つようになる
- 並進エネルギーがかかわるため連続吸収
- あまり強くないが存在量が多いと有効

$$d\tau_{xy,\nu} = \frac{\alpha_{xy,\nu} P_x P_y}{n^2 M g k T P} dP$$

## ■ H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>-He

- 回転-並進(Roto-Translational, RT), 回転-振動(Roto-Vibrational, RV)のモードを持つ
- 50K, 10cm<sup>-1</sup> 毎のテーブルから線形補間
- Borysow (1989, 2002)

$\tau$ : Optical depth

$\alpha$ : Collision induced absorption coefficient

$\nu$ : Wavenumber

$n$ : amagat unit

$M$ : Average mass of single molecule

$g$ : Gravity

$k$ : Boltzman constant

$T$ : Temperature

$P$ : Pressure

# 放射伝達方程式

- 放射による熱輸送
  - 二方向近似
- 下部境界からの上向きフラックス
  - 温度固定
  - 拡散近似項を導入

$F_\nu^\downarrow$  : Downward flux

$F_\nu^\uparrow$  : Upward flux

$F_\nu^{surface}$  : Upward flux from lower boundary

$B_\nu$  : Planck function

$S_\nu$  : Solar constant for Jupiter

$C_P$  : Specific heat at constant pressure

$F$  : Net upward flux

$z$  : Altitude

$t$  : Time

$\rho$  : Density

$$F_\nu^\downarrow(z) = \int_z^\infty \pi B_\nu(T(z')) \frac{\partial}{\partial z'} \exp\left(-\frac{5}{3}(\tau_\nu(z) - \tau_\nu(z'))\right) dz'$$

$$F_\nu^\uparrow(z) = \int_0^z \pi B_\nu(T(z')) \frac{\partial}{\partial z'} \exp\left(-\frac{5}{3}(\tau_\nu(z') - \tau_\nu(z))\right) dz'$$

$$F_\nu^{surface}(z) = \left( \pi B_\nu(T_s) + \frac{3}{5} \pi \frac{dB}{d\tau} \right) \exp\left(-\frac{5}{3}(\tau_\nu(0) - \tau_\nu(z))\right)$$

$$\frac{dT(z)}{dt} = -\frac{1}{\rho C_P} \frac{dF(z)}{dz}$$

# 対流調節

## ■ 対流不安定の解消

- 二層間で対流不安定が存在した場合、ただちに等温位へと調節されるものとする

## ■ 対流判定

$$T_2 < T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

## ■ 対流調節

- 下端から二層毎に調節

- 比熱一定
- 圧力等間隔グリッド

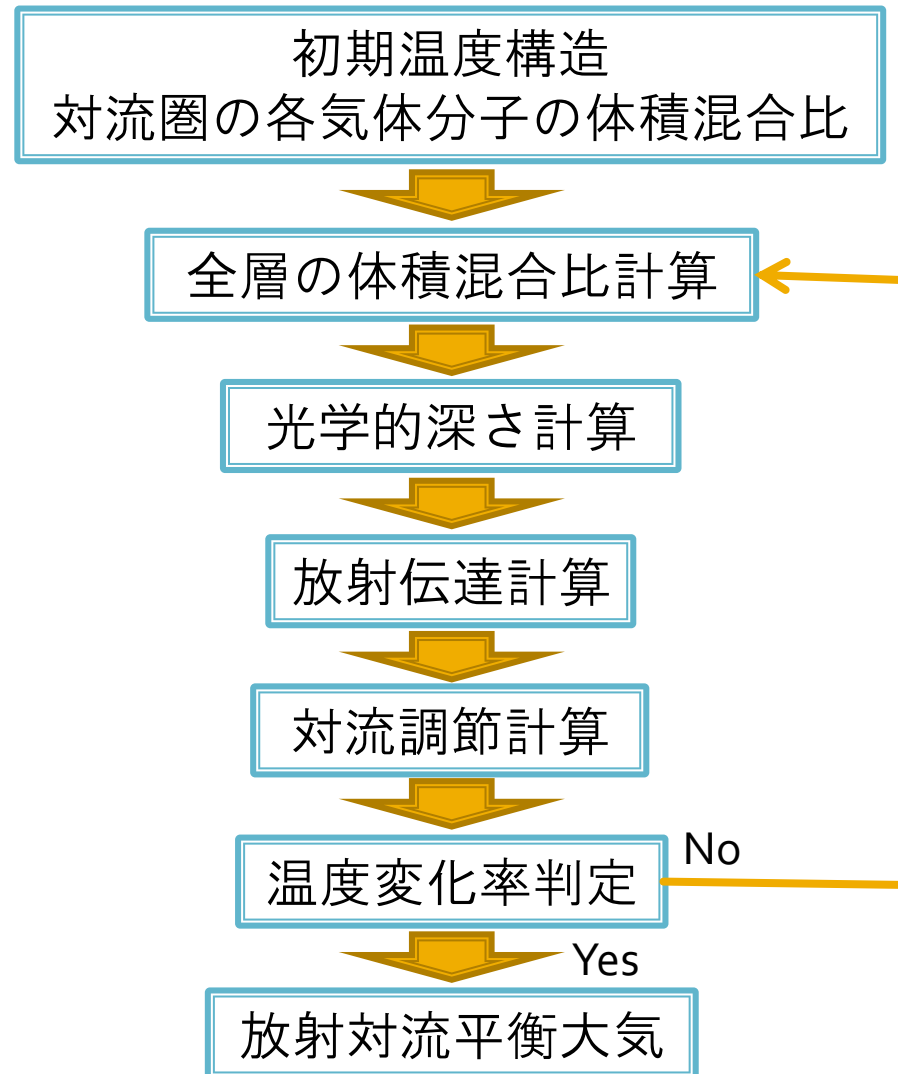
$$E_1 + E_2 = E'_1 + E'_2 \quad T'_2 = T'_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$
$$T_1 + T_2 = T'_1 + T'_2$$

## ■ 対流調節ループ

- 全層の調節終了後、以下の条件を満たすまで調節を継続
  - 全ての二層間で温位が「ほぼ」保たれているか

# 放射対流平衡計算

- 放射対流平衡構造
  - 温度変化率 $10^{-10}\text{K/s}$  以下  
=木星の放射の時定数より十分に小さい
  - これを収束条件とする





# モデル計算設定

## ■ 木星モデル

- 木星の有効温度(120K)を再現できるモデル
- 165K@1bar, metallicity = 1x solar

## ■ 中間モデル

- 木星と GJ504b の中間の有効温度(295K)となるモデル
- 550K@1bar, metallicity = 2x solar

## ■ GJ504bモデル

- 有効温度 510K となるモデル
- 750K@1bar, metallicity = 4x solar

- solar ... 太陽組成比のO,C,N,SをH<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S に置き換えた体積混合比

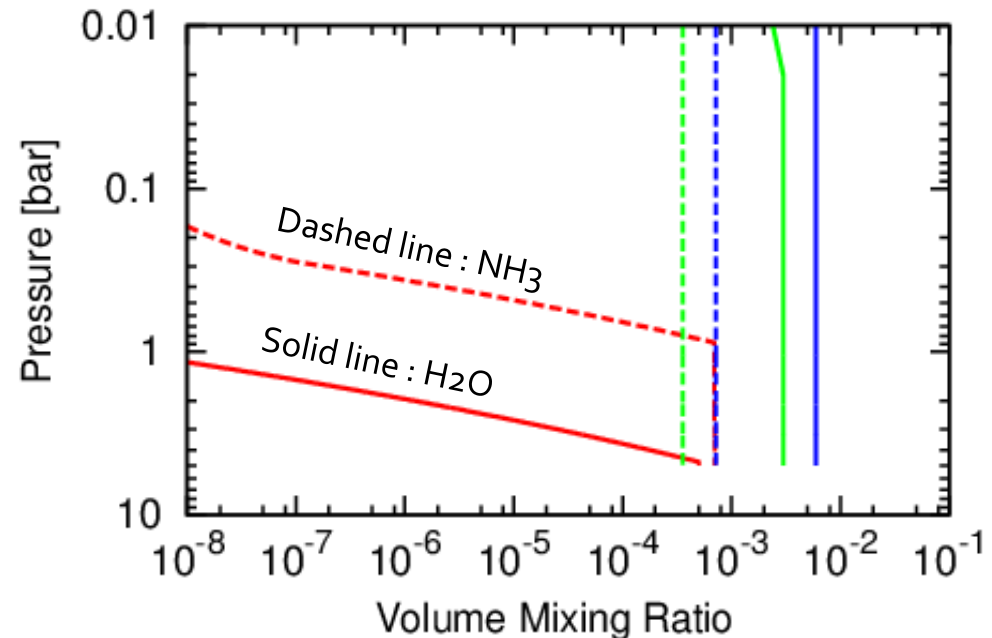
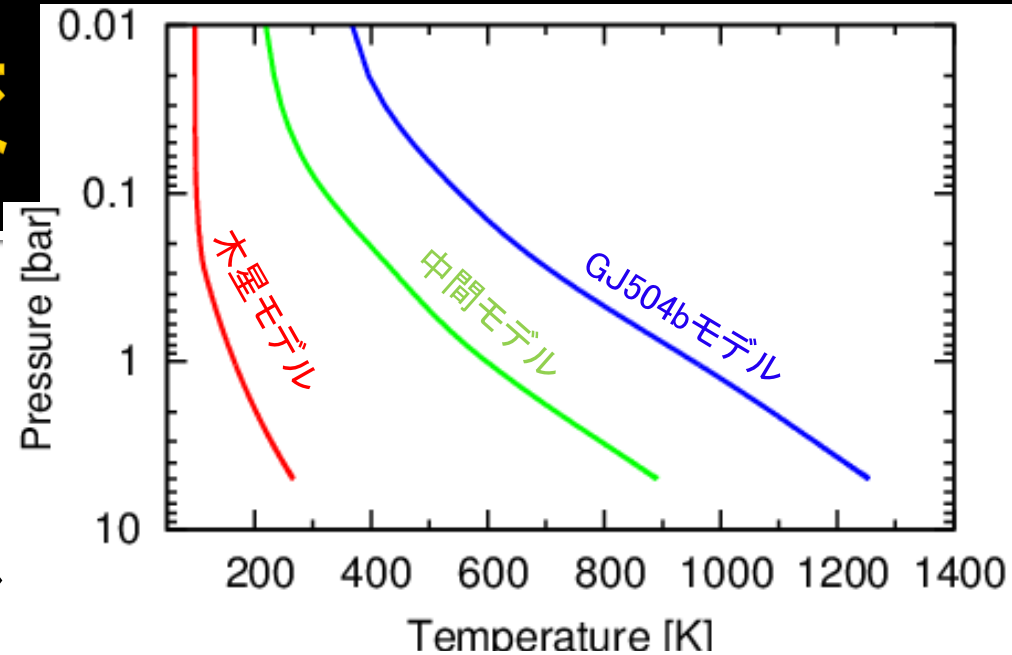
# 大気構造の比較

## ■ 温度構造

- 木星モデルの上部は放射平衡で等温
- 中間モデル、GJ504bモデルでは放射平衡な温度勾配が断熱温度勾配に近づく

## ■ 組成分布

- 木星モデルでは凝結がおきて混合比減少
- 中間・GJ504bモデルはmetallicityが大きくても凝結がおきない



# スペクトルの比較

## ■ 木星モデル

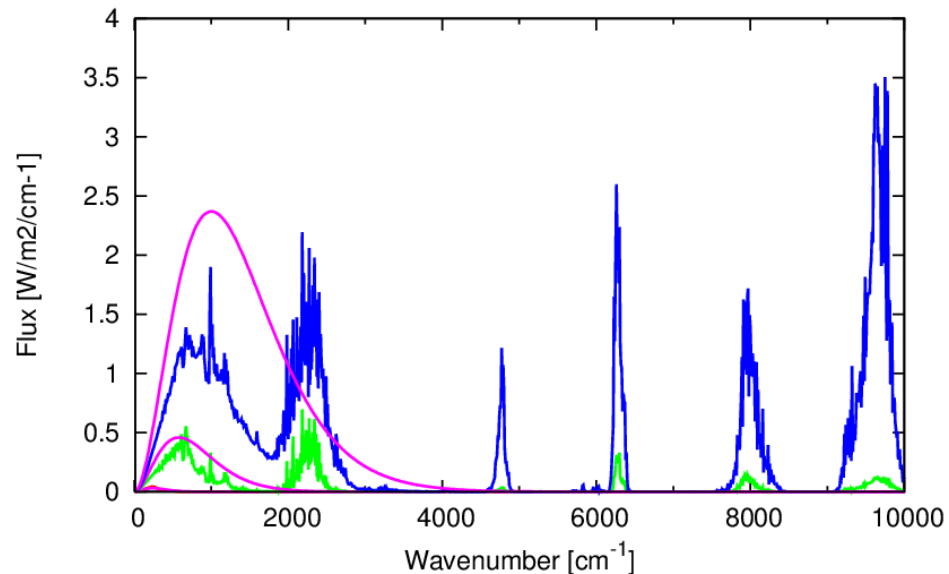
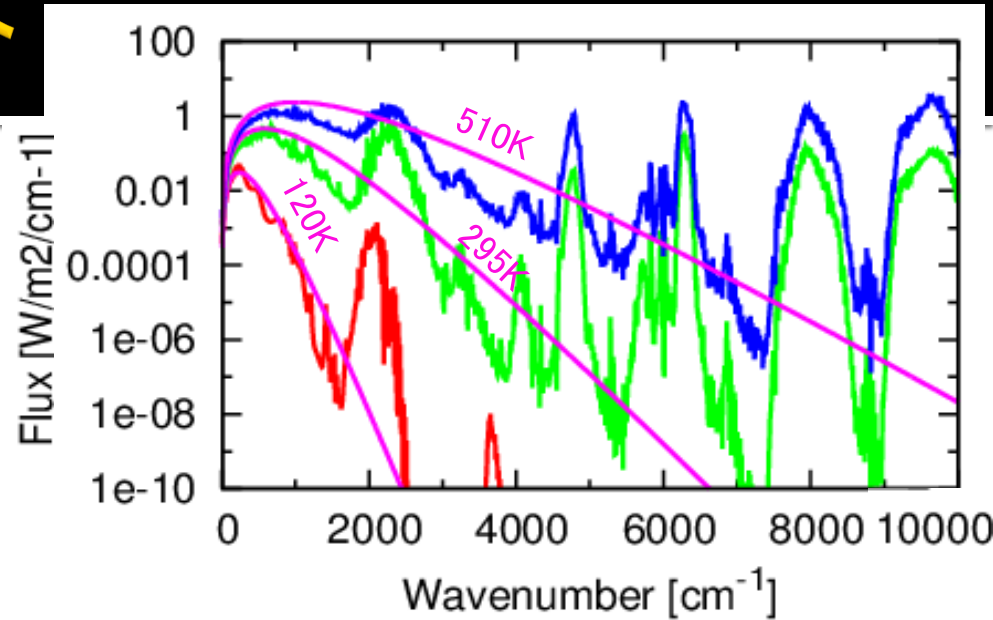
- 熱放射ピークと大気の窓からの放射

## ■ 中間モデル

- 短波長での放射が見え始める

## ■ GJ504bモデル

- 短波長での放射が遠赤外での放射を超える



# 木星と高温なガス惑星の違い

## ■ 組成分布

- 木星では大気深部で凝結していた H<sub>2</sub>O が上層まで分布

➤ H<sub>2</sub>Oの吸収の寄与が顕著に

## ■ 赤外放射スペクトル

- 温度上昇による放射量の増加と短波長での大気の窓の存在

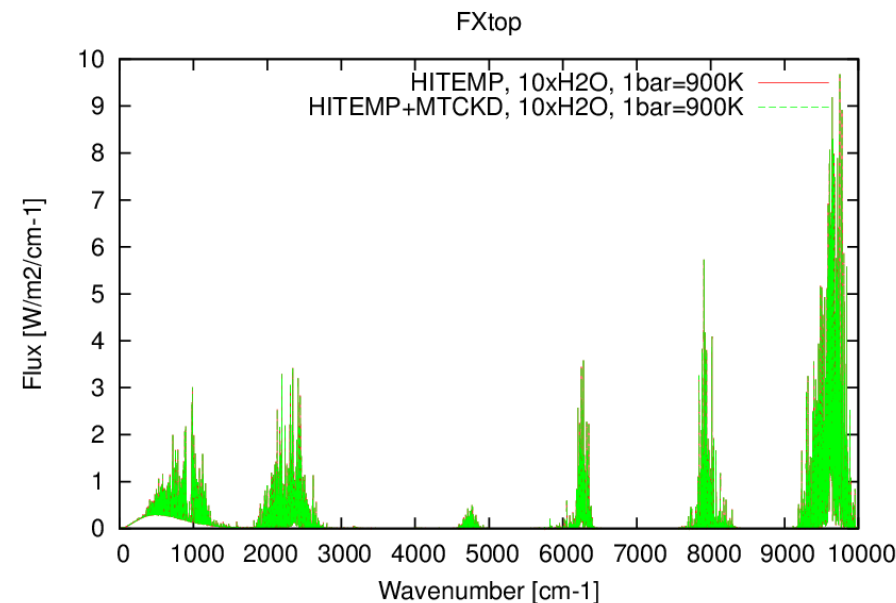
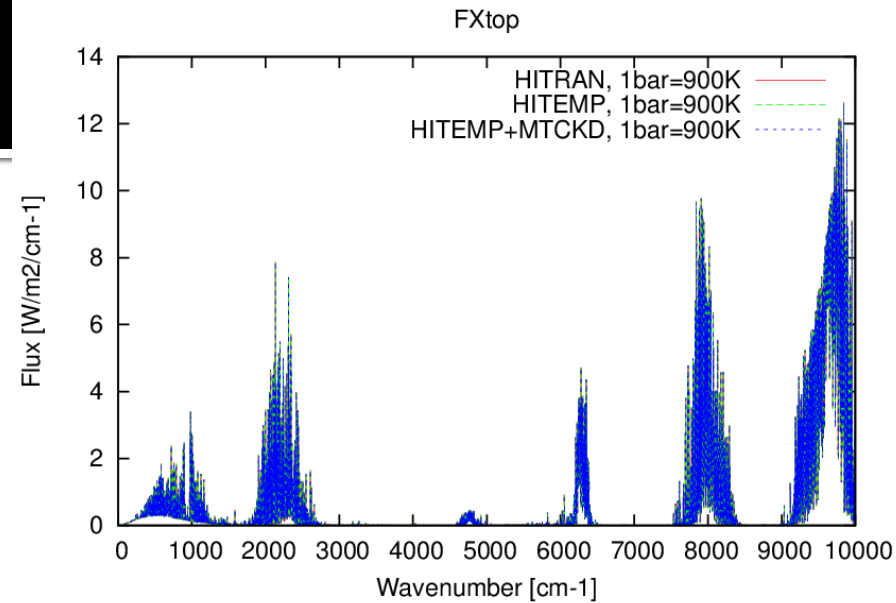
➤ 短波長での放射強度が強くなる

# H2O吸収の試算

- H2Oの吸収
  - 存在比の上昇で吸収量増加=放射抑制
  - 温度上昇で放射量増加
  - 連続吸収の有無による違い・H2O 量変化への応答を調べる
    - 連続吸収によって短波長の放射が抑制される可能性
- 計算設定
  - 断熱温度分布
    - 1bar=165K, 500K, 900K
  - H2O吸収線データソース
    - HITRAN, HITEMP, HITEMP+MT\_CKD
  - 組成
    - H2O のみ 1x solar, 5x solar, 10x solar

# H2O連続吸収の 寄与

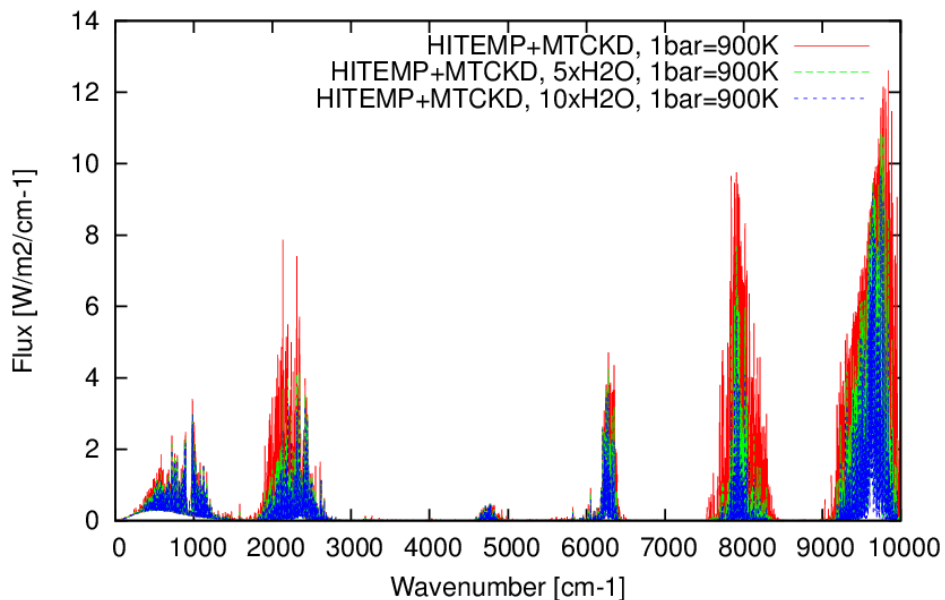
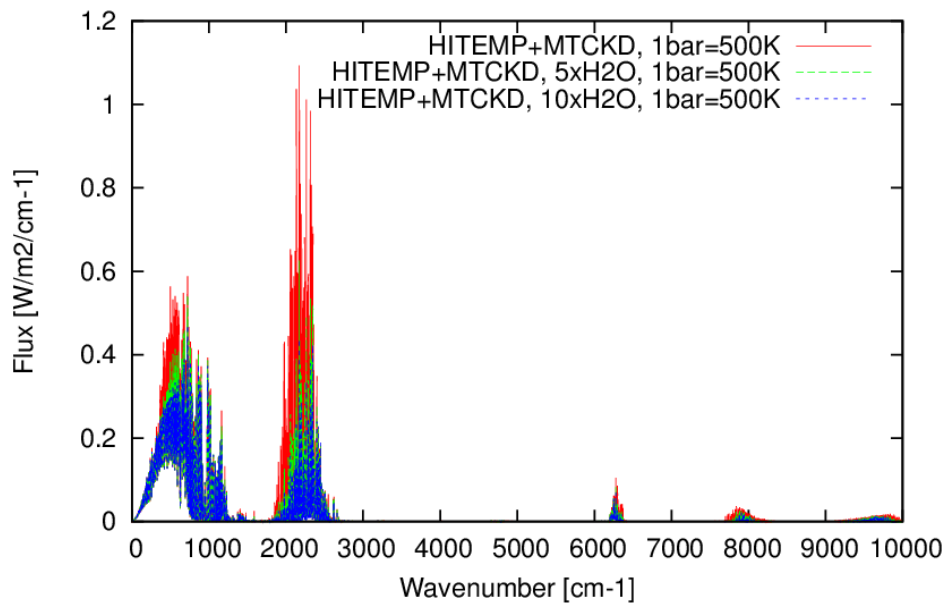
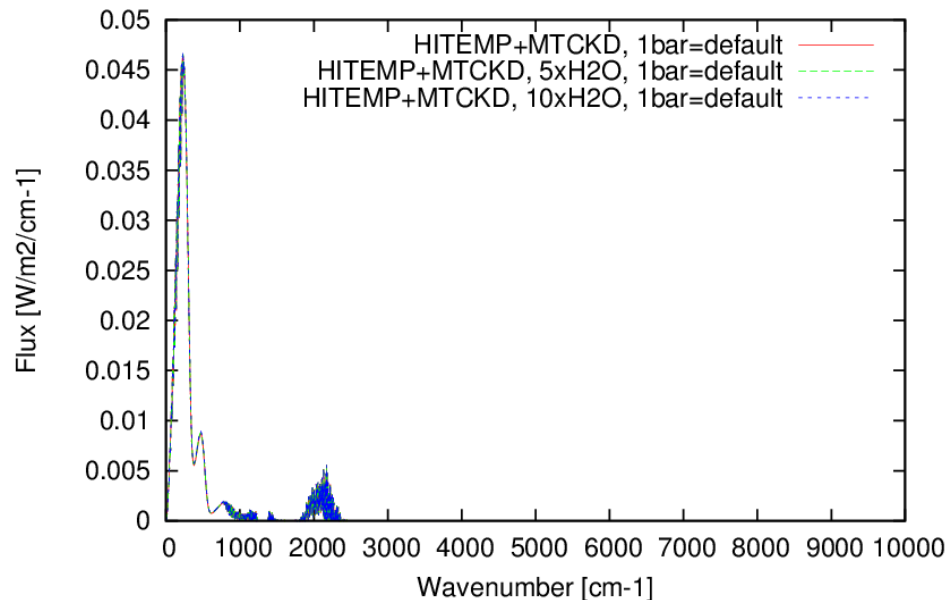
- 目立った差異は無い
  - 連続吸収の有無はスペクトルに影響していない
- 原因
  - 温度上昇でH2O雲形成がなくなったとしても H2O 量が少なすぎる





# H2O 量変化に対する応答

- 熱放射のピーク波長での寄与に対して、短波長での寄与は顕著となる
- 近赤外の観測波長帯に強く寄与している



# まとめ

- ガス惑星の鉛直一次元大気モデルの開発
  - 最小限の境界条件で木星について(ある程度は)説明できるようになった
  - モデルを高温のガス惑星に応用し、木星との差異を調べる
- 木星と高温ガス惑星の違い
  - H<sub>2</sub>Oの凝結の有無
  - 近赤外における放射量の増加, H<sub>2</sub>O量への応答性
- 今後導入が必要な要素
  - 他の分子種
    - 1000K@1barでCOが形成
  - 雲形成
    - NH<sub>3</sub> や H<sub>2</sub>O 以外の成分による雲