

木星上層大気の全球エネルギー 収支に関する現状の理解と課題 (Read et al., 2016 抜粋レビュー)

北大 惑星宇宙グループ 倉本研

高橋康人

2016/08/18 WTKセミナー

アウトライン

- Read et al., 2016 抜粋レビュー
 - アブストラクト
 - 木星に関する記述(6章)の要約
- 放射モデルによるエネルギー収支計算
 - 本研究の目的と Read et al., 2016 の関係
 - モデル概要
 - 計算結果
 - エネルギー収支に関する議論と考察

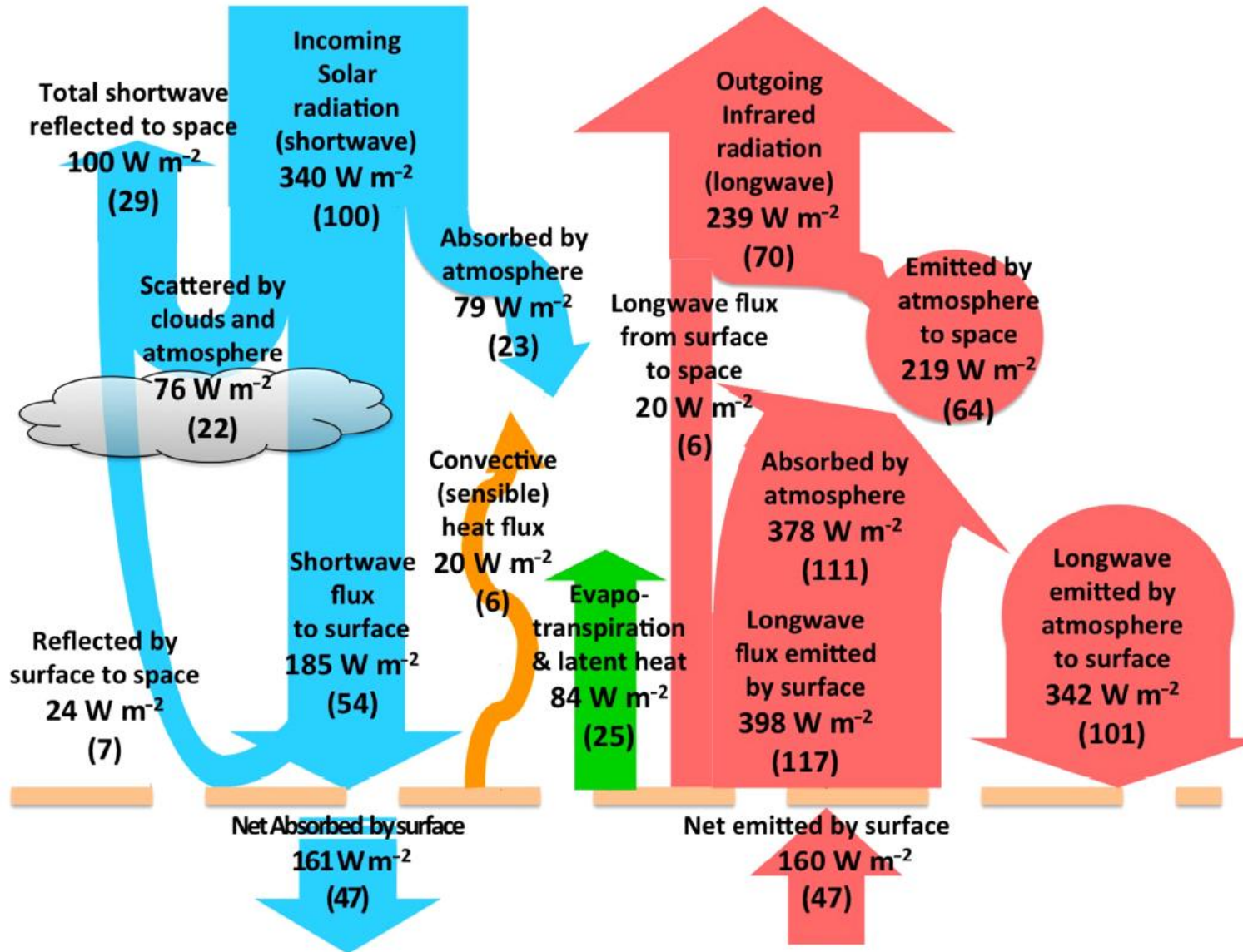
Read et al., 2016 について

- タイトル
 - “Global energy budgets and ‘Trenberth diagrams’ for the climates of terrestrial and gas giant planets”
- 著者
 - P. L. Read, J. Barstow, B. Charnay, S. Chelvaniththilan, P. G. J. Irwin, S. Knight, S. Lebonnois, S. R. Lewis, J. Mendonca and L. Montabone
- 雑誌名等
 - Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society
 - Vol. 142: pp703–720, January 2016 B
 - DOI:10.1002/qj.2704

アブストラクト

- 地球の気候システムを理解する上で、受け取る日射と射出する熱放射のバランスは重要である
- Trenberth diagrams を用いると、その重要性をシンプルかつコンパクトに表現できる
- 地球以外の太陽系天体に関しては、観測的な制約に基づいた極めて詳細な気候モデルが利用可能な天体もあるにもかかわらず、この手法の広く系統的な適用はほとんど行われていない
- そこで本稿では、総合的な放射伝達・循環気候モデルを用いて、以下の天体における全球エネルギー輸送の解析結果を示す
 - 火星・タイタン・金星・木星
- その結果を Trenberth diagrams として示し、地球のそれとの類似点および相違点をハイライトする
- さらに系外惑星への拡張のファーストステップとして、これを系外惑星 HD189733b (ホットジュピター) に適用する
- そしてこれらすべての天体についての観測とモデル計算の整合性を示す

Trenberth diagrams (地球)



本文構成

- 1章: イントロ
- 2章: 地球
- 3章: 火星
- 4章: 金星
- 5章: タイタン
- 6章: 木星
- 7章: HD189733b(ホットジュピター)
- 8章: 議論

6章：木星

- 原理的には地球型惑星と同様のアプローチを適用できる
- ただし、最終的に日射を受けるような地表を持たないという点において、注意深い考察を要する
 - 日射は大気深部に向かうにつれて、散乱と吸収によって徐々に弱まる
- 多くのガス惑星が、受け取る日射よりも多くの熱放射を出しており、放射源とみなすことができる

領域の定義

- 地表を持たないことから、領域の境界をどう設定するかが一つの命題となる
- 定義その1: 放射-対流境界の高度
 - 温度勾配が最初に Superadiabatic になる高度として定義
 - 自由対流領域の上端
 - 下向き日射フラックスと上向き対流フラックスがcomparable になる
 - 対流圏界面(tropopause) よりも少し低い
 - 日射吸収と熱吸収が同時に起こる高度
- 定義その2: 日射が完全に吸収・散乱される高度
 - これより下では完全に対流熱輸送
 - これより上では放射熱輸送と対流熱輸送の組み合わせ
- 本稿では以下の高度でのエネルギー収支についてのみ触れる
 - (1) 大気上端
 - (2) 「定義その2」の高度よりも上の領域 (Radiative absorption zone)

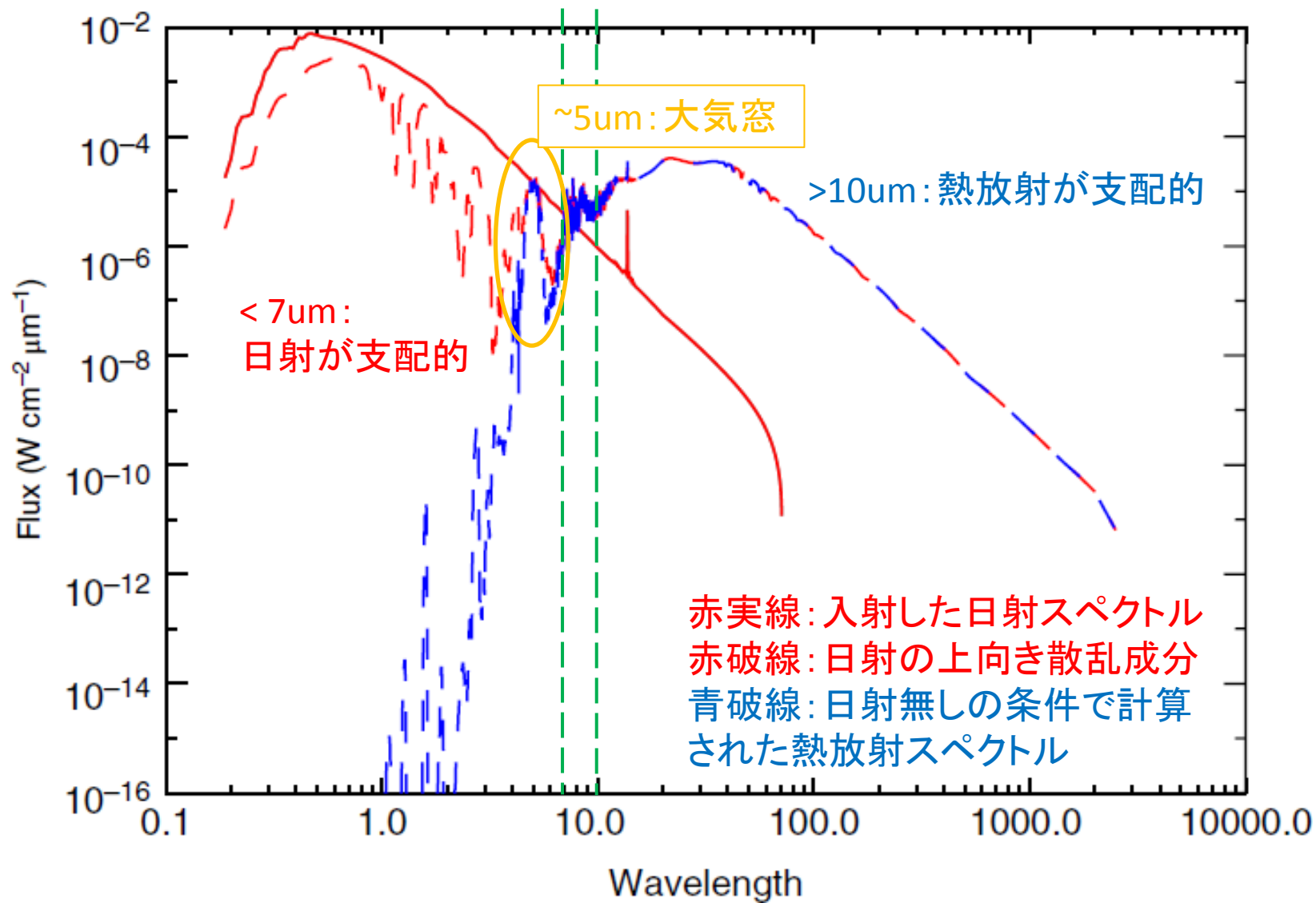
6.1 Data source

- 観測
 - 地上観測
 - Low 1966: 木星からの過剰な熱放射を確認
 - Voyager
 - Hanel et al., 1981: フライバイ観測から、木星熱放射を $13.89 \pm 0.25 \text{ W/m}^2$ 、Bond アルベドを0.34と推定
 - Galileo
 - Sromovsky et al., 1998: プローブのNFR(Net Flux Radiometer) データから、大気中でのフラックスプロファイルを推定
 - 日射フラックスは 5-7 bar までしか届かないことが示されている
 - ただし、これは 1.5-5 bar に Red absorber を導入して調整した場合
 - Cassini
 - Li et al., 2012: Voyager フライバイ時と Cassini フライバイ時の熱放射量の比較

6.1 Data source

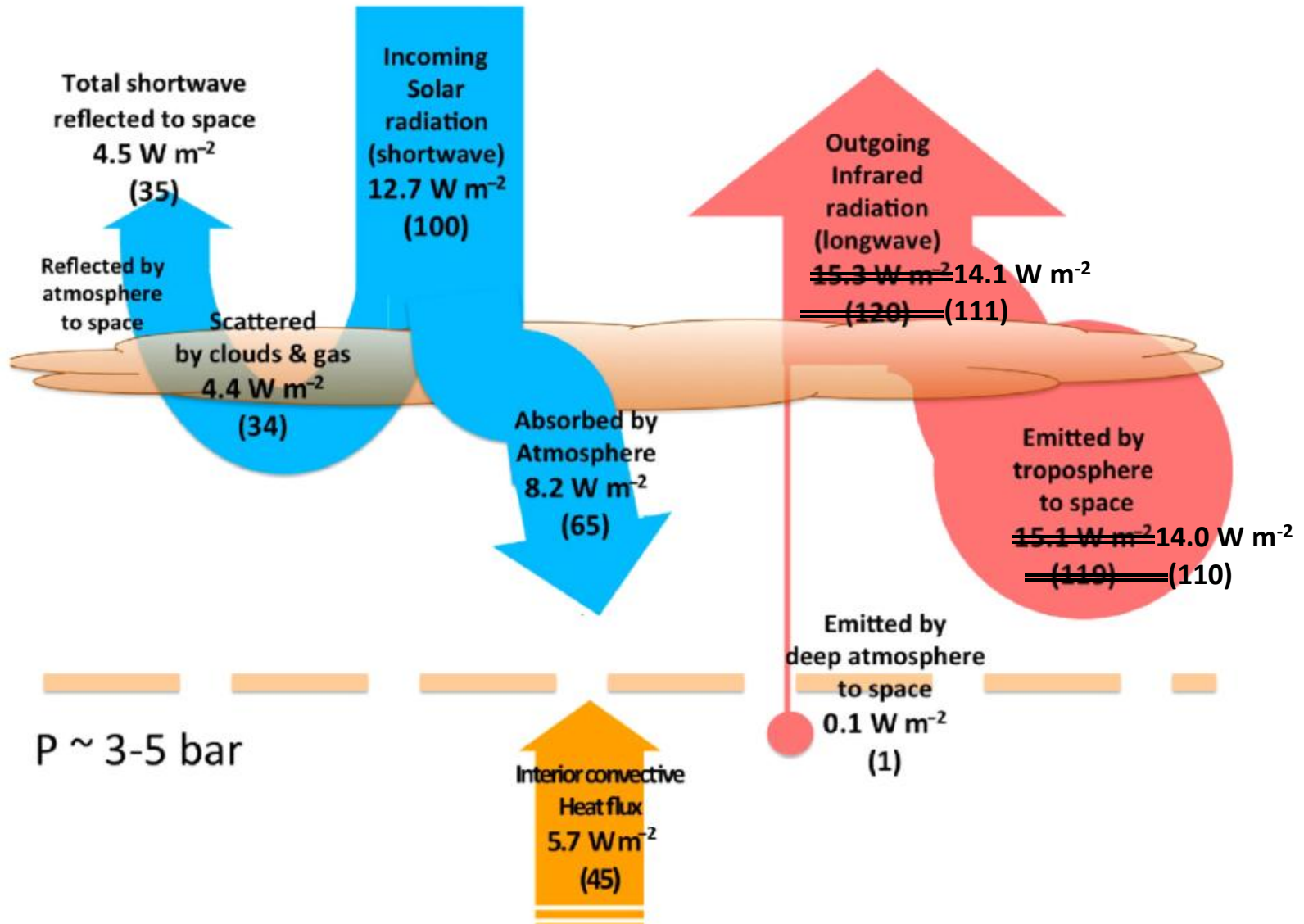
- 放射モデル
 - 観測データのみから、エネルギー収支における大気窓の影響の定量的評価や、Net の放射フラックスを高度の関数として示すことは難しい
 - 本稿では、NEMESIS放射計算ツール(Irwin et al., 2008) を用いて一次元放射伝達計算をおこない、波長積分フラックスを得る
- モデル設定
 - 大気組成
 - Irwin et al., 2005 準拠の標準組成を仮定
 - 雲
 - NH₃ ice 単一雲層を仮定
 - 温度
 - < 1bar: 典型的温度分布
 - 1-数十bar: 断熱温度勾配から外挿

NEMESISで計算された木星大気上端での 可視および熱放射のスペクトル



- 以下の解析では、NEMESIS計算の結果を用いて、Li et al., 2012 の観測を赤外と可視に分解する
- 計算されたToAフラックスはLi et al., 2012と1-2%の精度で整合的
 - なお5um 放射は全放射の1%未満に過ぎないため、ほとんど無視できる

6.2 Global energy budget



議論

- このようなエネルギー収支は巨大惑星の典型的なスタイル
 - ただし内部熱源が存在しないと見られる天王星は除外される
- 一部例外はあるかもしれないが、それでも巨大ガス惑星については基本的にこの考え方を適用するべきである

レビューのまとめと疑問

- Read et al., 2016 では、シンプルな大気モデルに基づく放射計算で観測と統合的なエネルギー収支が得られると結論している
- 一方で、現実の木星は複雑な大気構造を持つ
 - ダイナミクス
 - 複数の雲層・ヘイズ層
 - ガス分布の不定性

- 本当にこんなエネルギー収支になるのか?
- 大気中での具体的なエネルギーフラックスのプロファイルは?
- 日射はちゃんと計算できているのか?
 - こちらの整合性を確認する記述が無い

放射モデルによる エネルギー収支計算

放射対流平衡モデルを用いた 木星大気放射冷却率プロファイルの推定

- 本研究の目的
 - 大気外への惑星放射と大気構造の関係の考察
 - 大気上端におけるエネルギー収支・放射スペクトルを解析する
 - 大気中でのエネルギー輸送のメカニズムの考察
 - エネルギーフラックスの鉛直分布から放射冷却率プロファイルを解析する
- Read et al., 2016 との関係
 - 上記の目的を達成する上で、全球エネルギー収支の見積もりは必要不可欠
 - Read et al., 2016 で示されたエネルギー収支は、現時点での一般的な理解と言える
 - そのエネルギー収支の疑問点について、我々のモデルから得られるエネルギー収支との比較から考察を試みる

放射伝達モデル

- モデル概要

- 鉛直一次元非灰色放射伝達モデル (0-100,000cm⁻¹, 1cm⁻¹刻み)
- 平行平板大気, 局所熱力学平衡, 静水圧平衡を仮定
- 重力加速度 23.1 m s⁻²

- 境界条件

- 上端
 - 太陽光下向きフラックス入射 (Gueymard 2004; 入射角60deg, 軌道長半径5.2AU)
- 下端
 - 温度固定
 - 大気深部からの放射を模した上向き拡散近似フラックス入射

- 光学計算

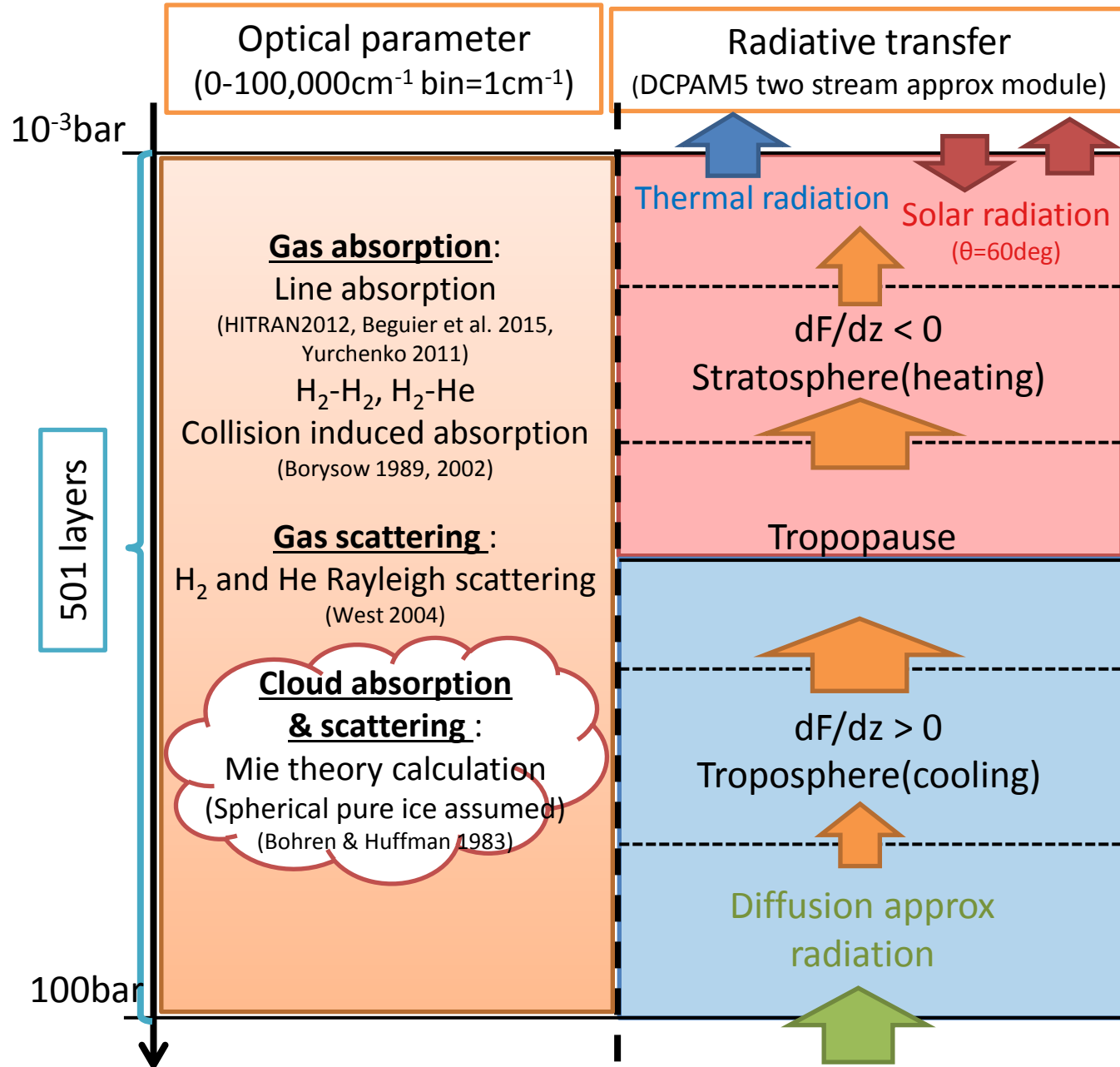
- 線吸収: H₂O, CH₄, NH₃, PH₃, H₂S (HITRAN2012; GEISA2009; Beguier et al. 2015; Yurchenko 2011)
- 衝突誘起吸収: H₂-H₂, H₂-He (Borysow 2002, 1989)
- Rayleigh 散乱: H₂およびHe (West et al. 2004)
- 雲・ヘイズの吸収・散乱: H₂O ice, NH₄SH solid, NH₃ ice, haze (Howett et al. 2007; Martonchik et al. 1984; Warren 1984; Sromovsky et al. 1998)

- 放射伝達計算

- 2流近似法 (Toon et al. 1989; DCPAM 放射計算モジュール)

任意の物質分布および温度分布のもとで、大気中での放射伝達過程を解くモデル

Model overview



全球平均モデル

モデルの想定

- 理論的な全球平均物質分布・温度分布を与えたものを全球平均モデルとし、以降の考察の基準とする

物質分布

- 雲対流シミュレーションの静穏期のプロファイルを時間・空間平均したものを用いる

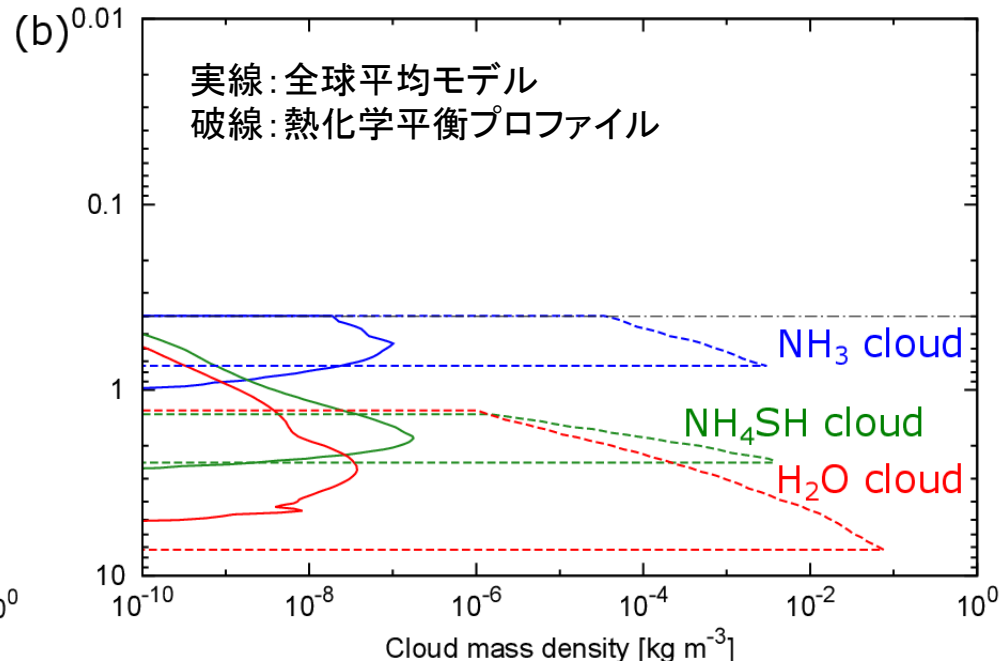
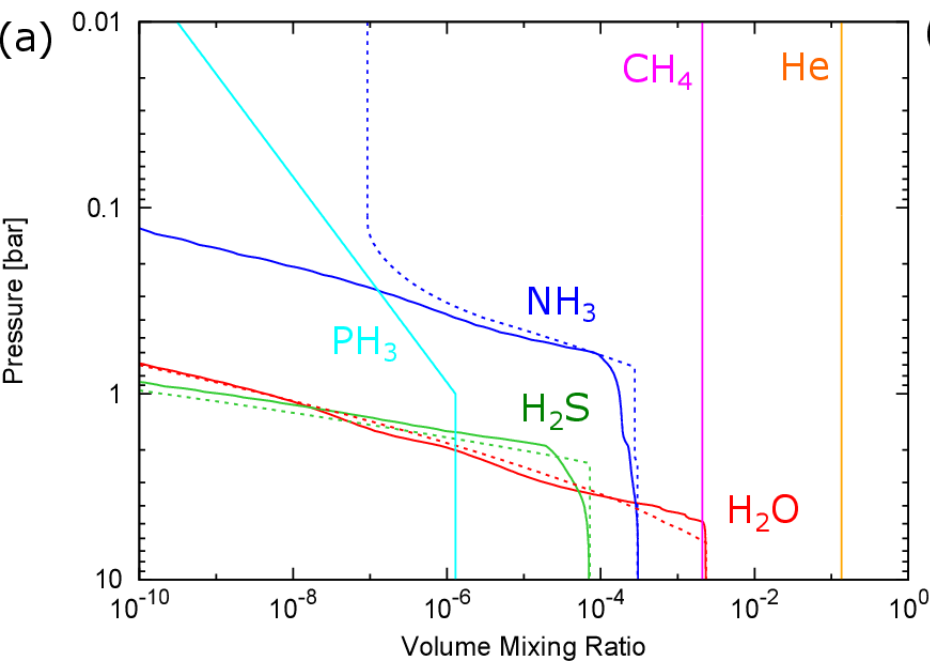
- 静穏期は雲サイクルの大部分を占める

- 雲分布は0.1倍、対流圏界面を上端として打ち切り

- 雲粒径: $\text{NH}_3=0.5$, $\text{NH}_4\text{SH}=3\mu\text{m}$, $\text{H}_2\text{O}=10\mu\text{m}$

- ただし粒径の制約は上部で0.5-2 μm , 下部で1-100 μm までとかなり幅がある点に注意

- 簡単のためヘイズは無視



全球平均モデル

- 全球平均モデルにおける温度構造

- 時間・空間平均した温度構造は放射対流平衡温度構造で近似できると仮定

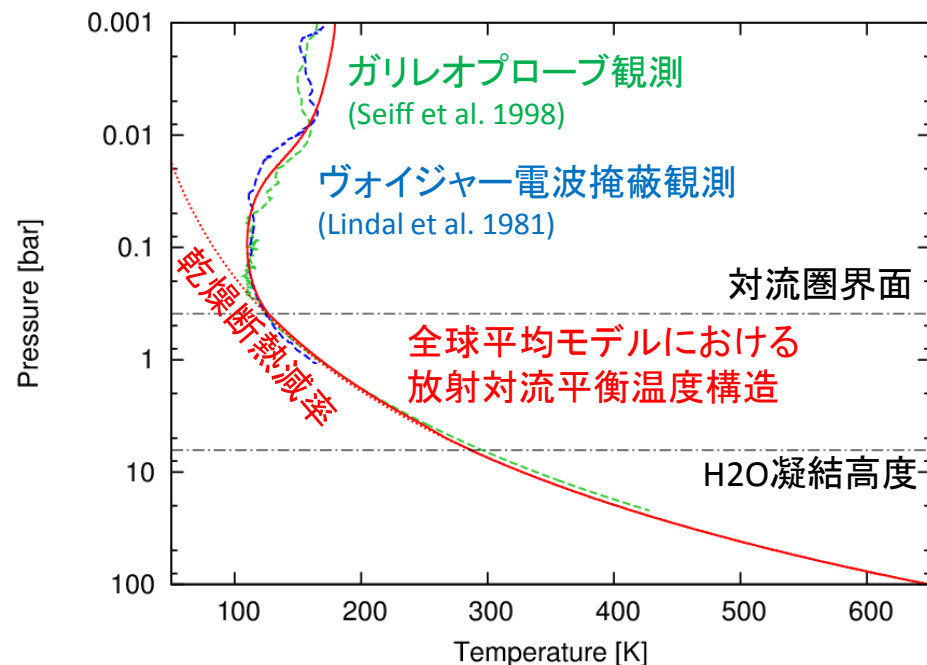
- 初期温度分布

- 基準温度 165K@1bar を与え、H₂He大気を仮定して断熱線を引き、これに対応する下端の温度を固定(628K@100bar)
- 100Kより低温の領域を等温とする

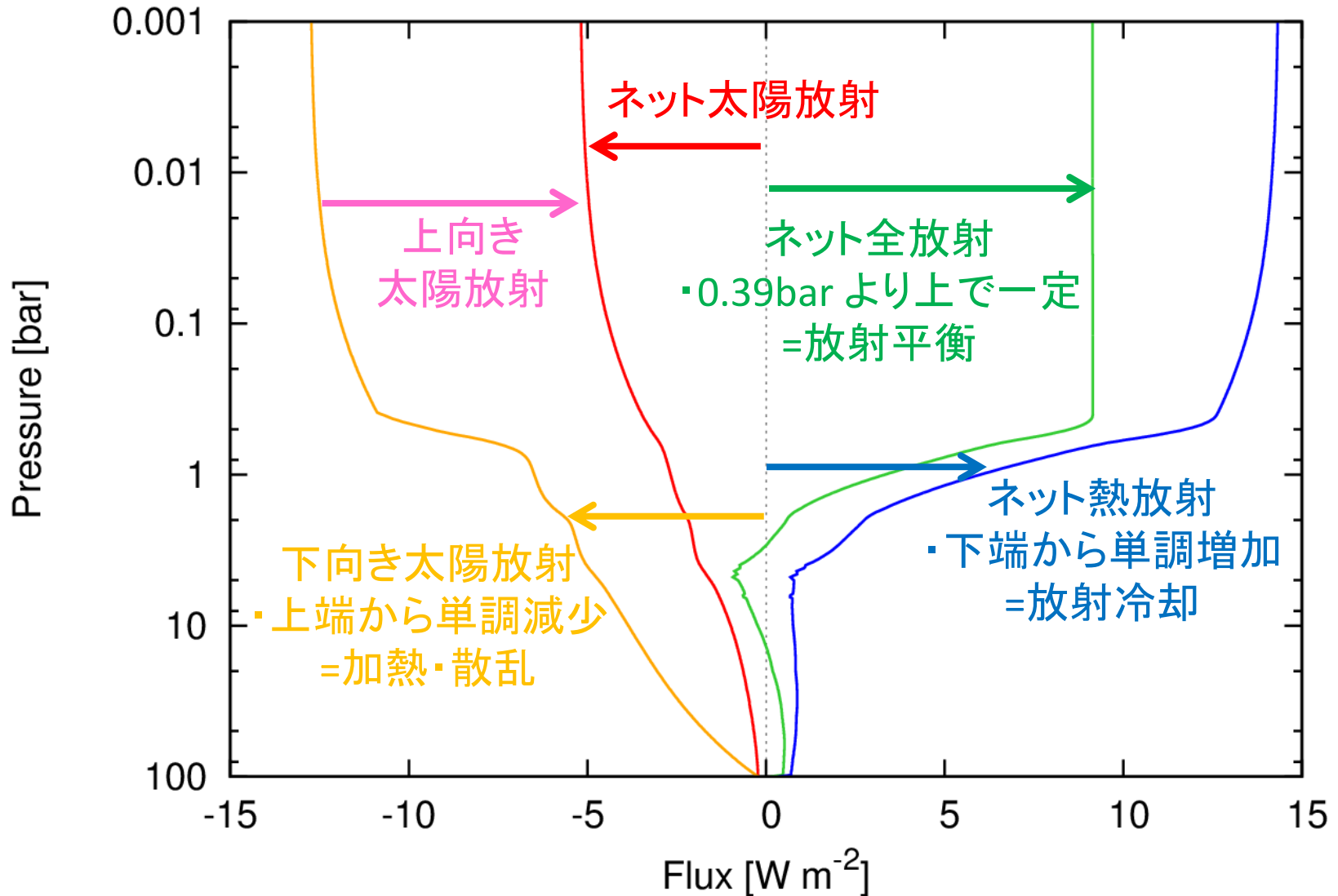
- 放射対流平衡温度構造の決定

- 初期温度構造に対して、右に示す温度変化過程を繰り返すことで放射対流平衡温度構造を求める
- 成層圏の放射冷却率の絶対値の最大値が十分に小さくなるまで行う
- なお対流圏界面高度は次節で示す放射冷却率の符号が変化する高度であり、数値的に決定される

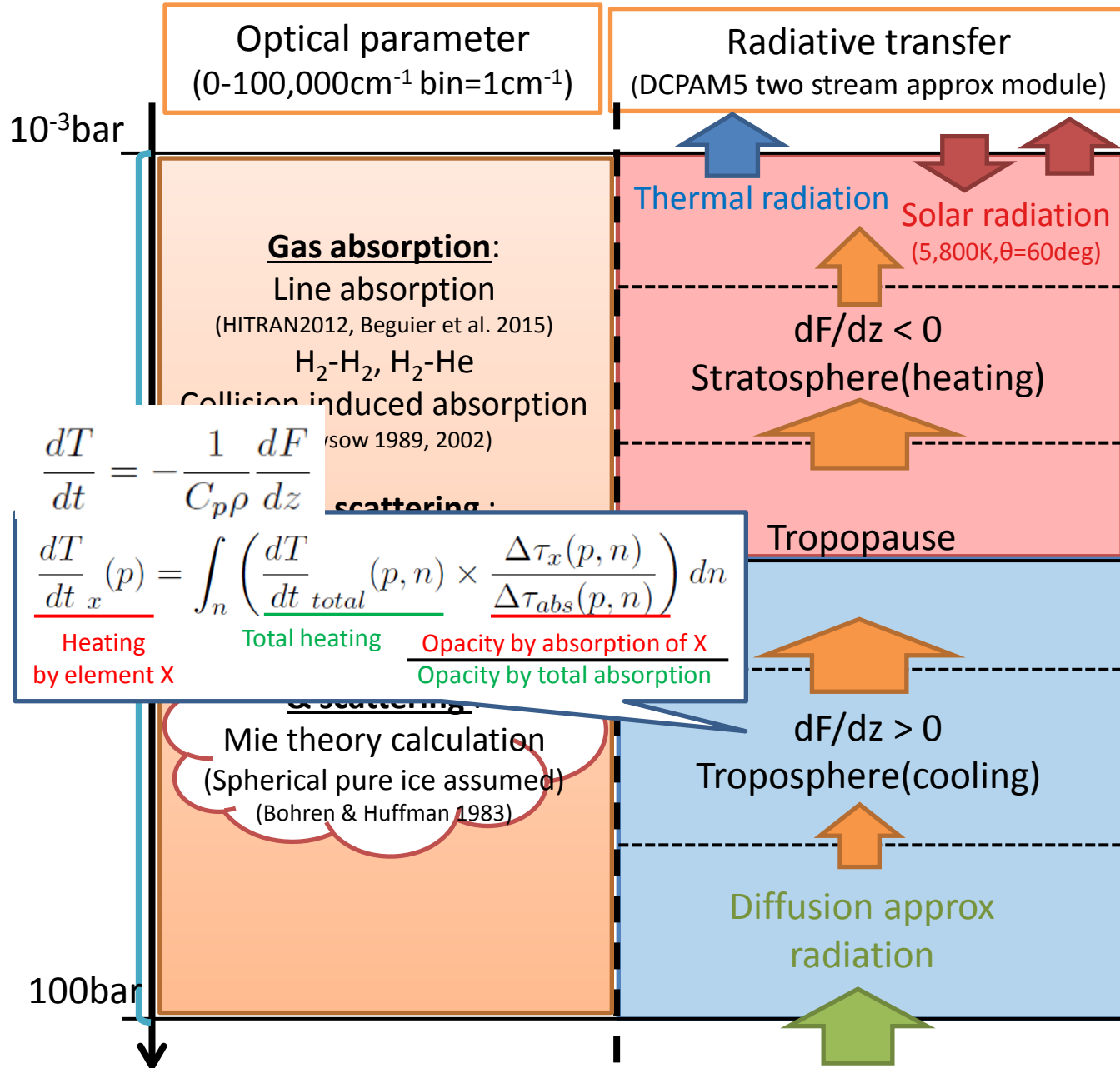
1. 下端--H₂O凝結高度(対流圏下部)
 - 乾燥断熱減率
2. H₂O凝結高度—対流圏界面高度(対流圏上部)
 - 湿潤断熱減率
3. 対流圏界面—大気上端(成層圏)
 - 大気各層の放射収支に基づく温度変化



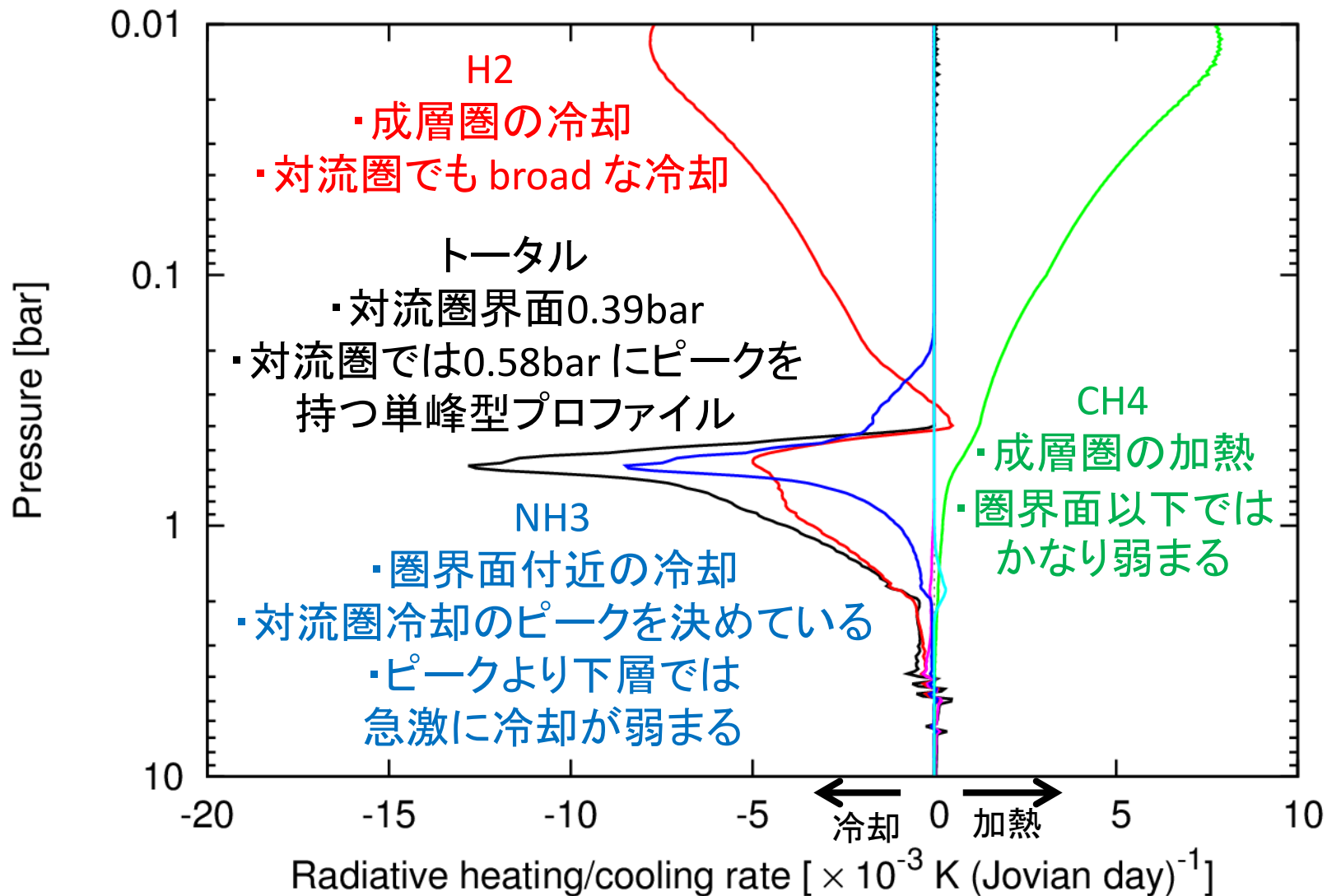
全球平均モデルの放射場 ネットフラックスプロファイル



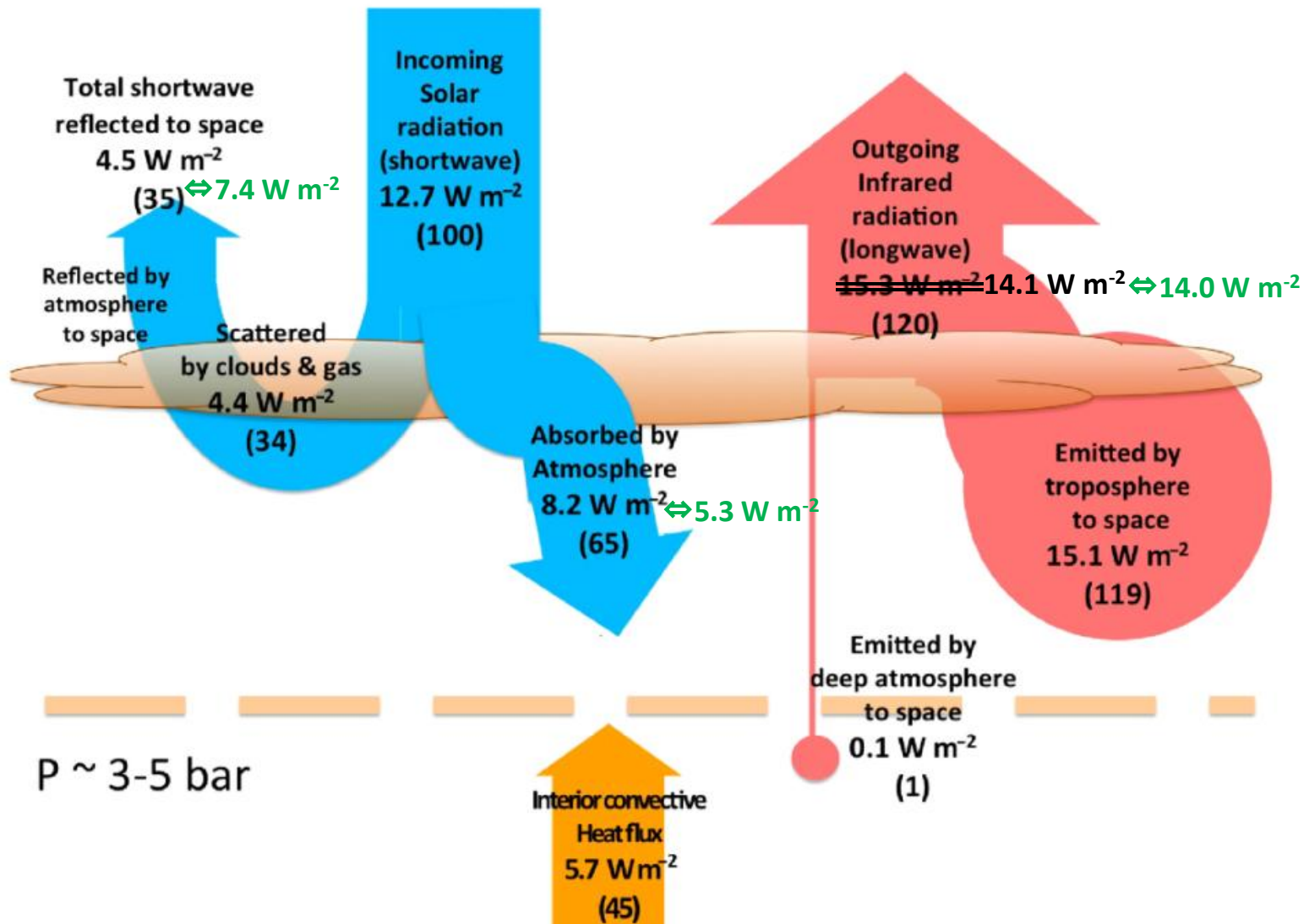
Model overview



全球平均モデルの放射場 放射冷却率プロファイル



Read et al., 2016との比較



本モデルの計算設定の下ではボンドアルベドがかなり大きくなる
観測されたアルベドを再現するには、対流圏における日射吸収を強くする必要がある

Read et al., 2016 との相違点

- 温度分布

- Read : 典型的な温度分布
- 本モデル : 放射対流平衡温度分布

- 気体分布

- Read : Irwin et al., 2005に基づく 3x solar 気体分布
- 本モデル : 杉山モデルに基づく対流的な気体分布

- 雲分布

- Read : NH3 ice sheet cloud
- 本モデル : 杉山モデルに基づく対流的な雲分布

日射吸収を大きく変える
ほどの影響は無い

雲プロパティの与え方によって
エネルギー収支は容易に変化する

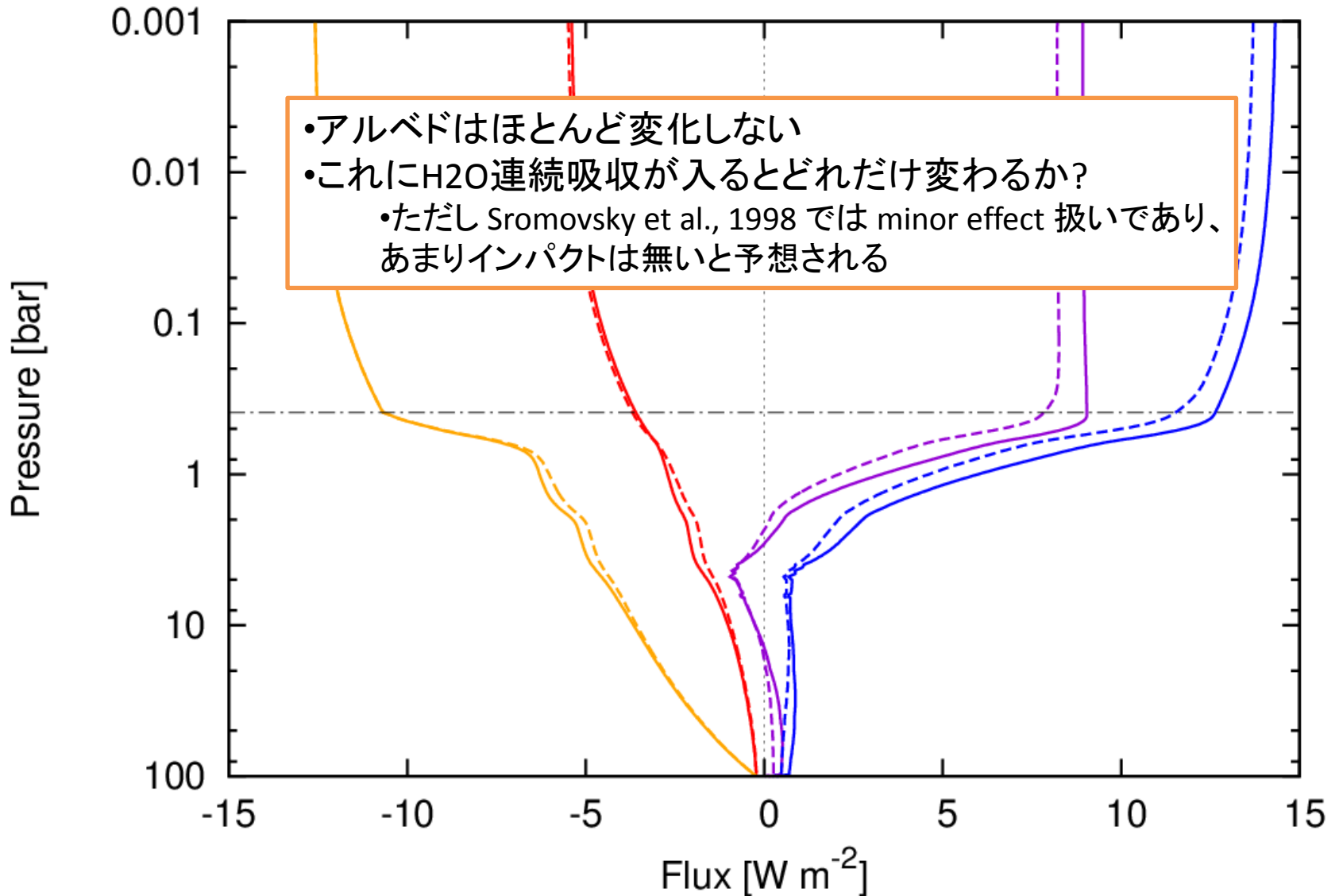
日射吸収体の候補

- 大気深部でのガス吸収
 - HITRAN では足切りされている弱い吸収線が、高温・高圧下にある大気深部では日射の吸収に寄与する
- ヘイズ
 - モデルで想定した雲以外の固体吸収体(ヘイズ等)により、日射が吸収される
- 雲着色物質(chromophores)
 - 雲層の氷を汚染するような物質によりアルベドが下がり、日射が吸収される
 - ヘイズとの区別は明確ではない

大気深部でのガス吸収

- HITRAN
 - 地球を基準とした標準状態で重要な吸収線のデータベースであり、地球とは異なる環境でどこまで有効かは定かではない
 - 以下の主要な重元素成分について、不足している吸収線データを導入
- CH₄
 - HITRAN : 11502 cm⁻¹ までの吸収線(一部欠落)
 - Beguier et al., 2015 : HITRAN で欠落している 10,000cm⁻¹ (=1μm) 付近の吸収線
 - スペクトル形状には寄与するが、日射吸収量を変えるほどの効果は無い
- NH₃
 - HITRAN : 7000 cm⁻¹までの吸収線 (一部欠落)
 - Yurchenko 2011 : 12000cm⁻¹ までの吸収線
- H₂O
 - HITRAN : 25000 cm⁻¹までの吸収線
 - 連続吸収は未導入だが要検討

Yurchenko 2011の有無による変化

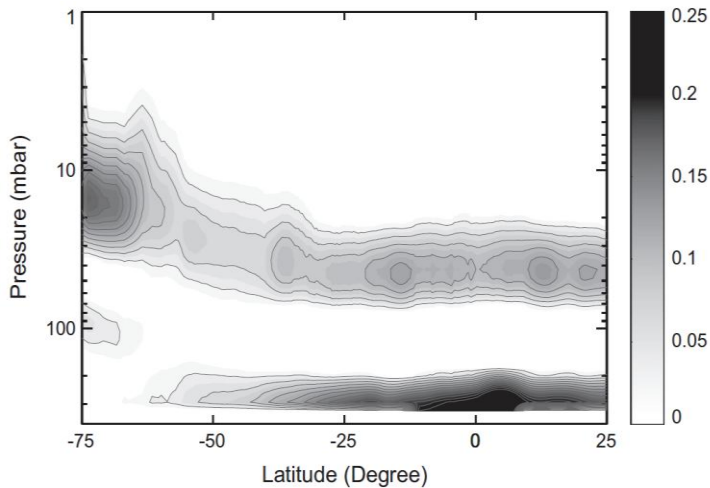


ヘイズ

- ヘイズの構造
 - 観測スペクトルのフィッティングには3層モデルが用いられる(Banfield et al., 1998)
 - 成層圏ヘイズ (0.01-0.05bar 付近)
 - 対流圏ヘイズ (0.1-0.2bar 付近)
 - 雲層 (0.4-1bar 付近)
- 成層圏ヘイズ
 - 先行研究による制約が最も進んでいるヘイズ層
 - Zhang et al., 2015 : 成層圏ヘイズによる加熱・冷却の見積もり
- 対流圏ヘイズ
 - 成層圏ヘイズに対して異なる光学特性を持つと見られるヘイズ層
 - Strycker et al., 2011 : 一部のバンドの吸収が対流圏ヘイズ層のみで起きると仮定した場合の対流圏ヘイズ光学特性の推定
 - この仮定はGRSやOval BAにおける着色域と対流圏ヘイズ位置の相関性から支持される一方で、NH₃雲層にも着色物質が存在するという観測とは調和的ではない
- 雲層
 - NH₃をはじめとする凝結物が存在する層
 - 便宜的に設定されるものであり、semi infinite・純粋なNH₃ ice 層として扱われることが多い

Zhang et al., 2013; 2015

地上IR観測データから推定した
成層圏ヘイズの相対密度



放射モデル概略

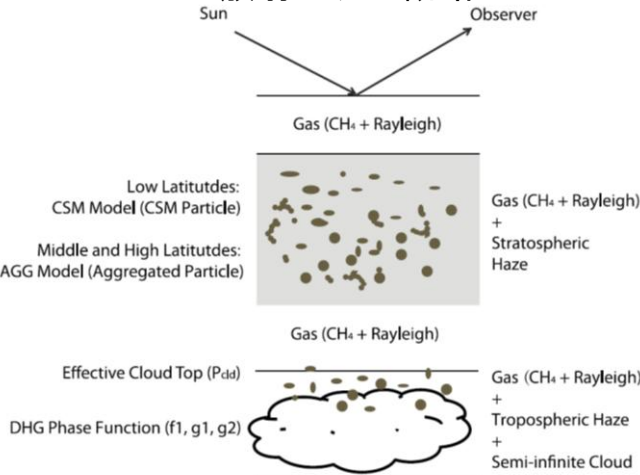
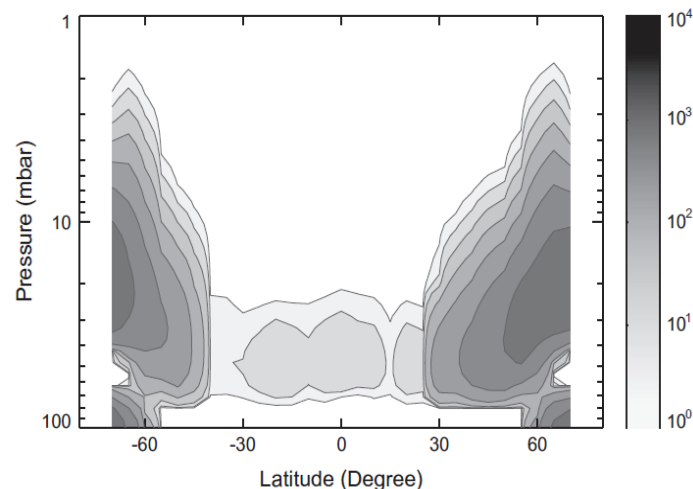


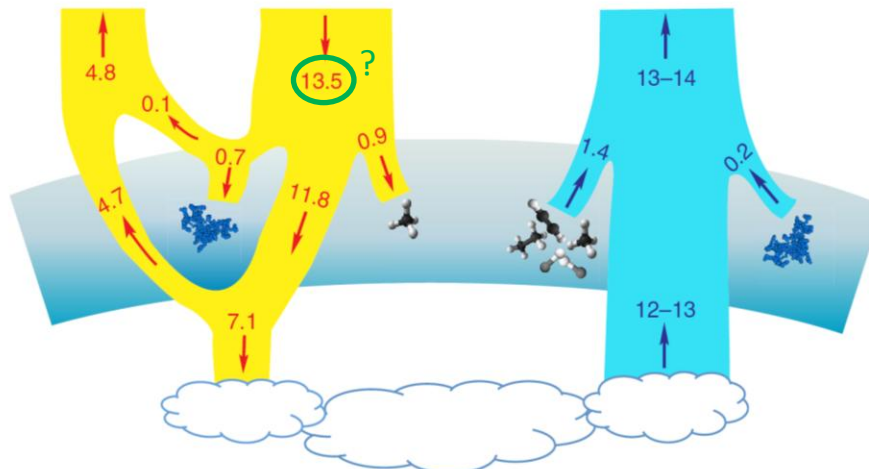
Fig. 5. Illustration of the structure of the retrieval model.

- 成層圏ヘイズだけでは吸収は不十分と見られる
- 対流圏ヘイズによる吸収が強ければアルベドを説明できるかもしれないが、現時点でエネルギー収支の視点に基づく先行研究は無い

Cassini SSI データから推定した
成層圏ヘイズの数密度



成層圏エネルギー収支



雲着色物質 (Chromophores)

- 木星雲の呈色源
 - ヘイズと明確に区別することはできない
 - Strycker et al., 2011 では対流圏ヘイズ = 着色物質という扱い
 - ここでは「雲層の氷のアルベドを下げる物質」として考える
- 候補物質
 - C: CH₄ 光分解からの生成物(C₂H₂, C₂H₆)
 - P: PH₃ 光分解からの生成物
 - S: H₂S, NH₄SH からの S 解離による生成物
 - その他(混合物等)
 - NH₃ ice + C₂H₂ 環境での生成物によるコーティングにより、GRSのスペクトルが説明できる (Carlson et al., 2016)
 - ただし他の領域ではスペクトル形状が異なるため、他のメカニズムの効果は無視できない
- 実験的・観測的制約
 - 上記の物質は木星環境下で合成できることが室内実験から確かめられている (Moses et al., 2005 他)
 - しかしいずれもスペクトル特徴がブロードなため、観測的に制約するまでには至っていない

まとめと今後の方針

- 木星のエネルギー収支

- Read et al., 2016 によれば簡単に説明できるように見えるが、対流圏での日射吸収は単純な雲モデルだけでは再現できない
 - 日射を吸収するのはガスか?ヘイズか?着色物質か?

- 本研究の方針

- 木星対流圏の放射冷却率プロファイルを示す上で、観測アルベドを再現できないのは大きな問題
- 先行研究による制約を踏まえつつ、自分なりのヘイズ・着色物質モデルを構築して放射計算に導入
- それが放射冷却率プロファイルに与える影響についての考察を含めて論文文化

- これまでブラックボックスだった対流圏でのエネルギー収支に関して、初めての定量的制約を示すことができる