

惑星大気の多重散乱を扱う 輻射輸送モデルを用いた 生命の痕跡の示唆について

筑波大学 M2 石原 駿

天体形成研究会 10/22

目次

1、研究の背景・目的

系外惑星の観測

バイオマーカーの例

2、手法とその評価

輻射輸送モデル作成

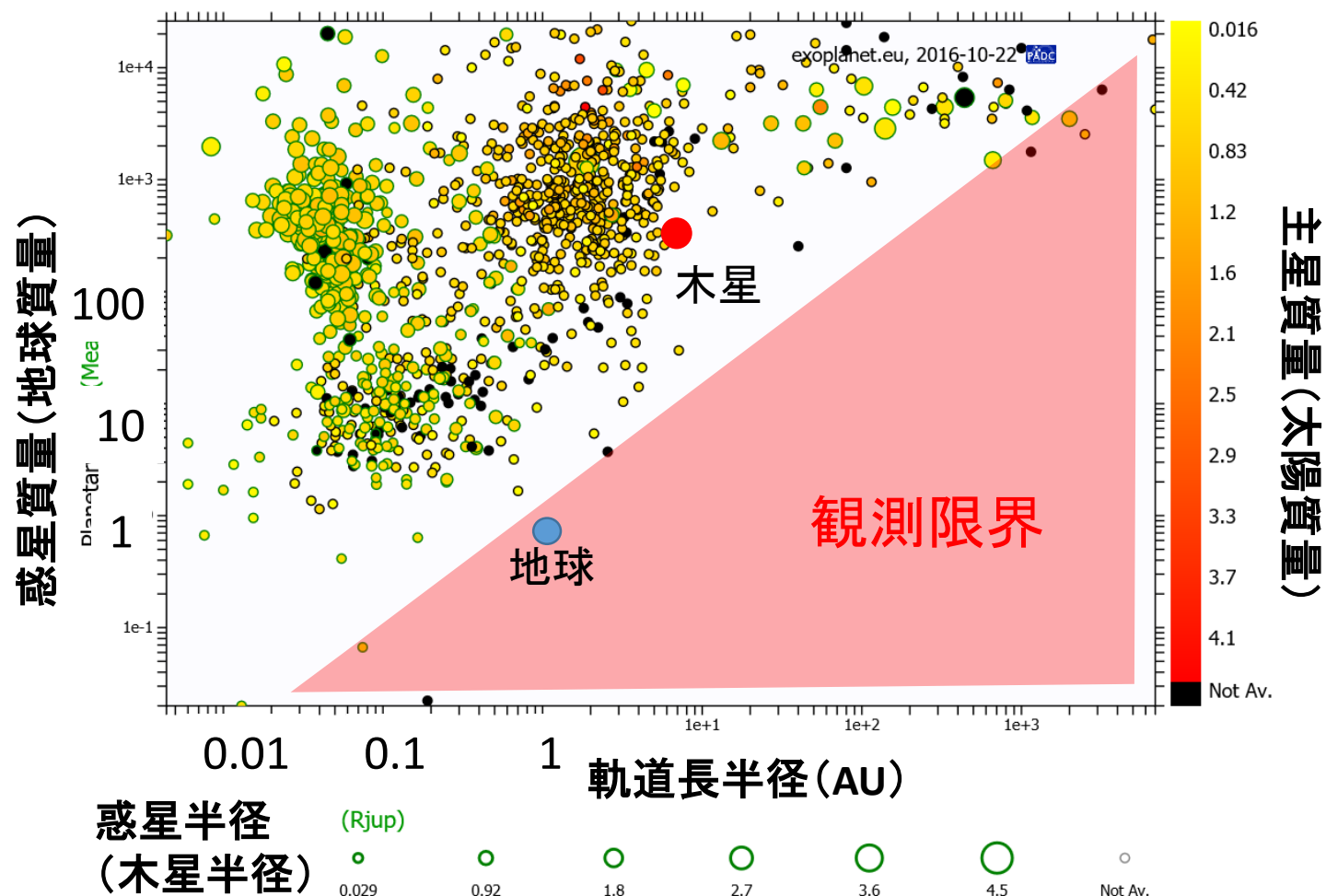
// 評価

3、結果と結論、今後の展望

模擬観測をしたときのスペクトル

定量的な評価を達成するにあたって

系外惑星の観測状況



観測可能

...約3300個

- ・統計による理解
- ・スペクトル分光

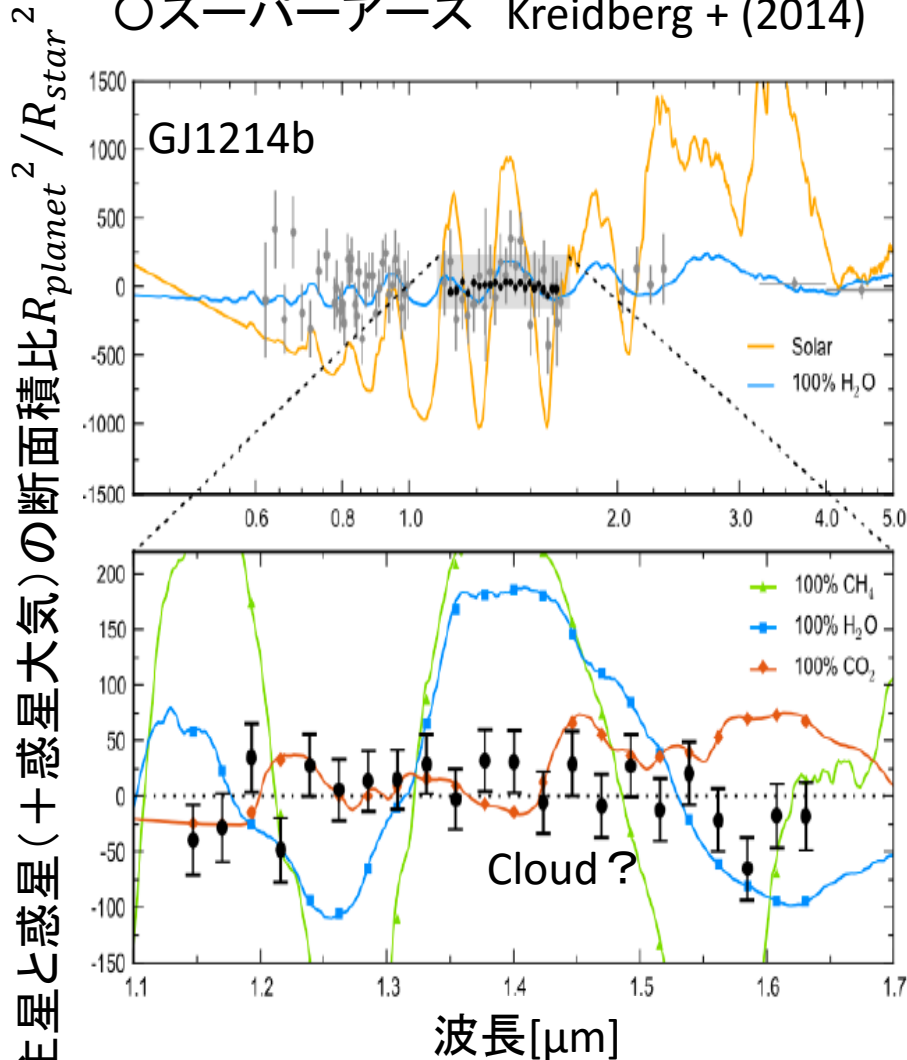
観測限界

- ・将来の望遠鏡
- ・第二の地球
「Earth-like planet」
" 太陽系

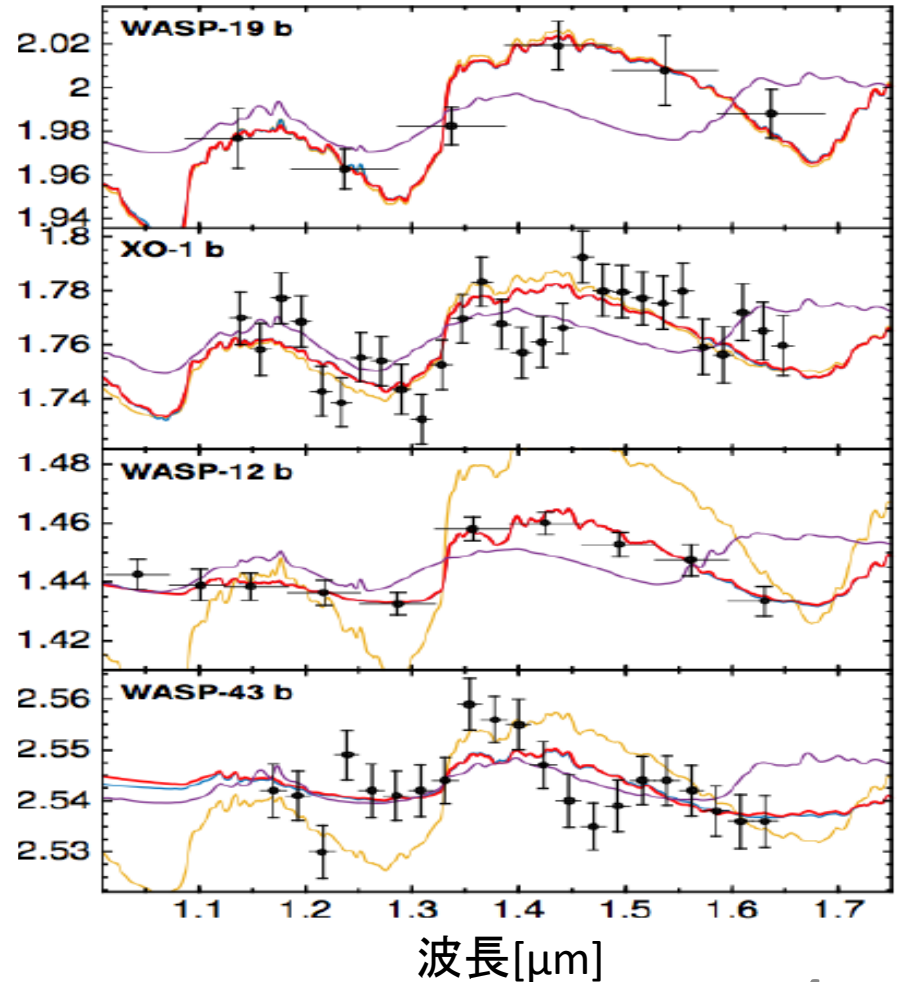
系外惑星のスペクトル分光

○スーパーアース Kreidberg + (2014)

○ホットジュピター Benneke (2015)



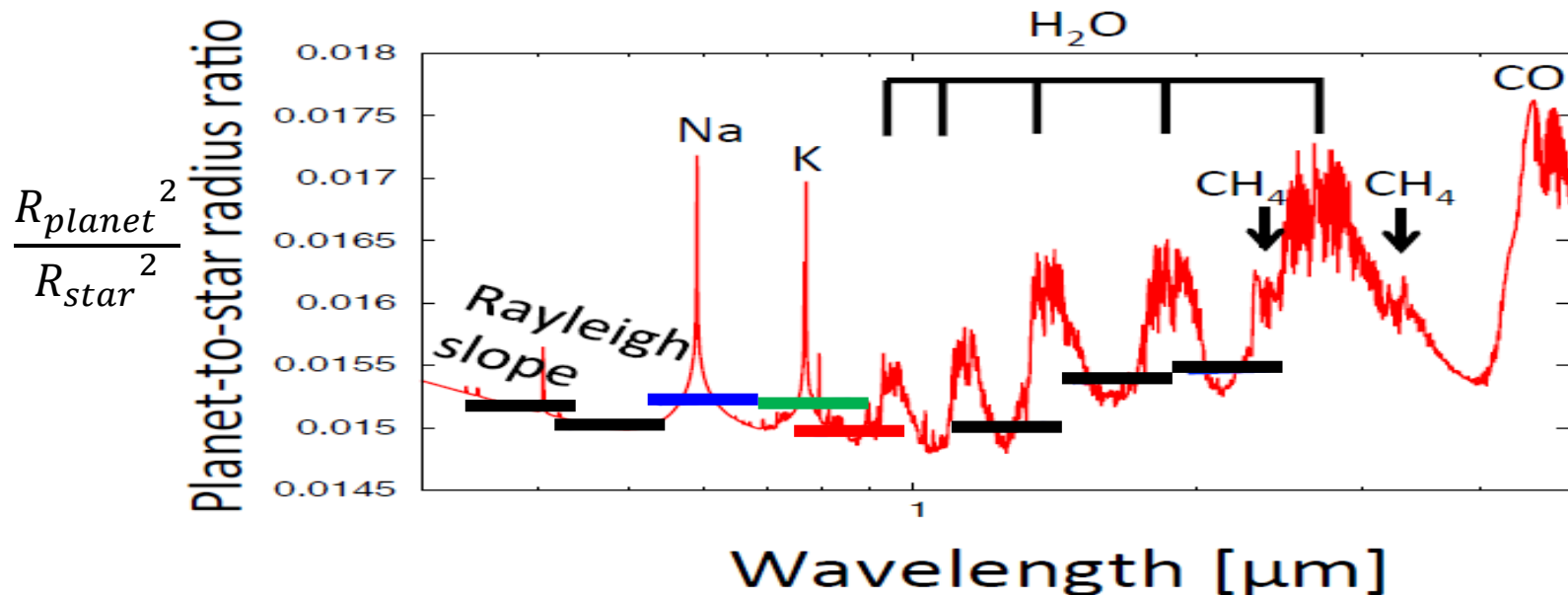
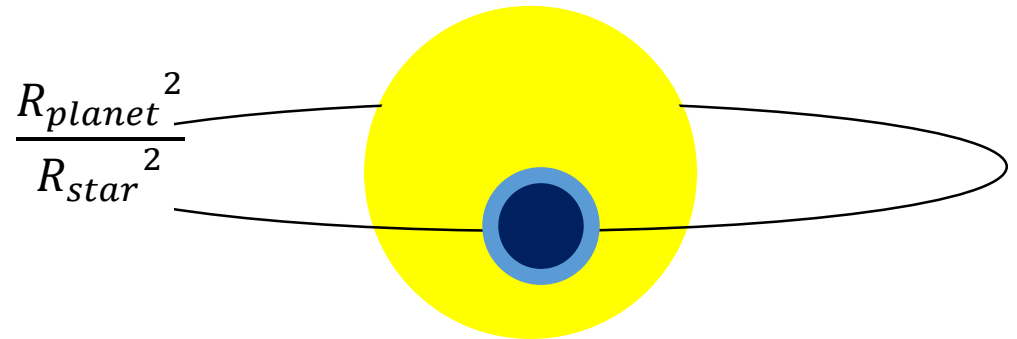
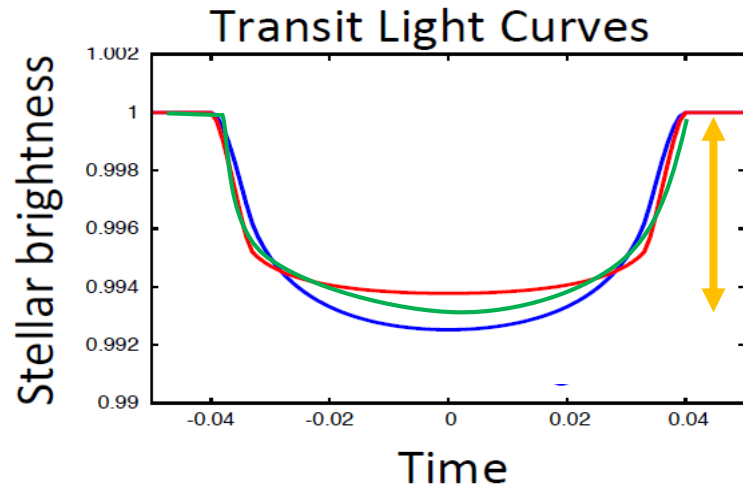
→雲の存在を示唆



→水蒸気量を特定

系外惑星のスペクトル分光法

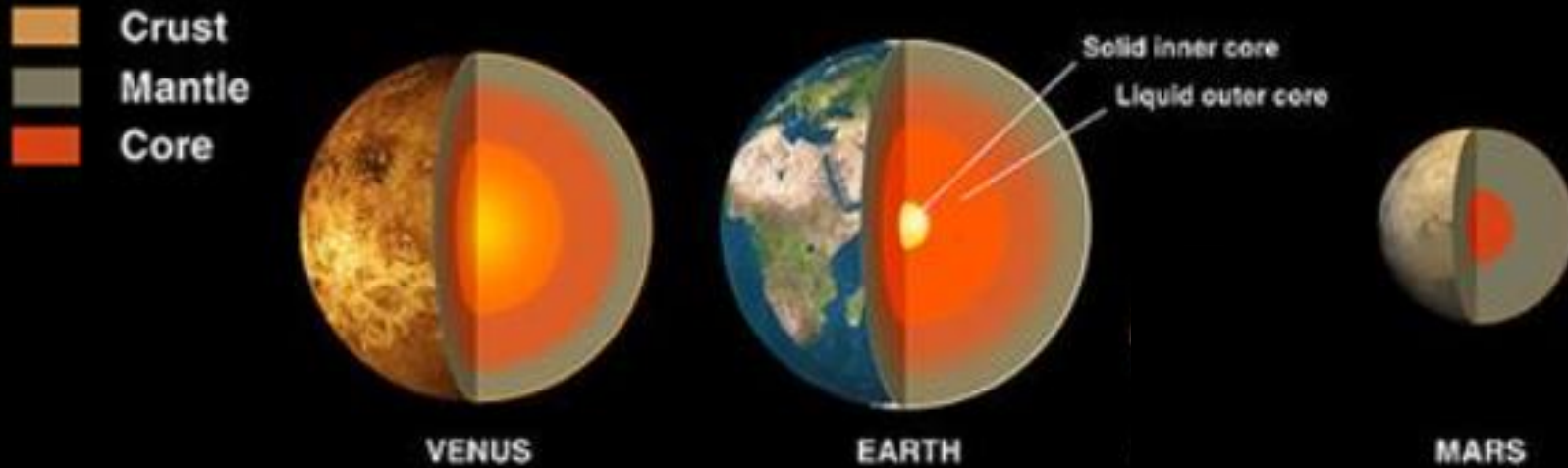
トランジット観測 の場合



バイオマーカー(大気分子)

Background: ideas of looking for life remotely

NASA



金星

CO₂(95%)

N₂(3.5%)

地球

N₂(77%)

O₂(21%)

火星

CO₂(95%)

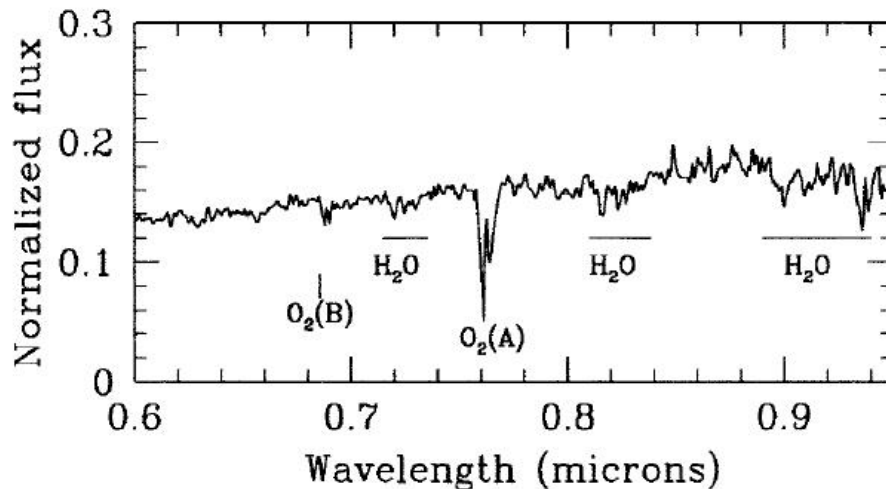
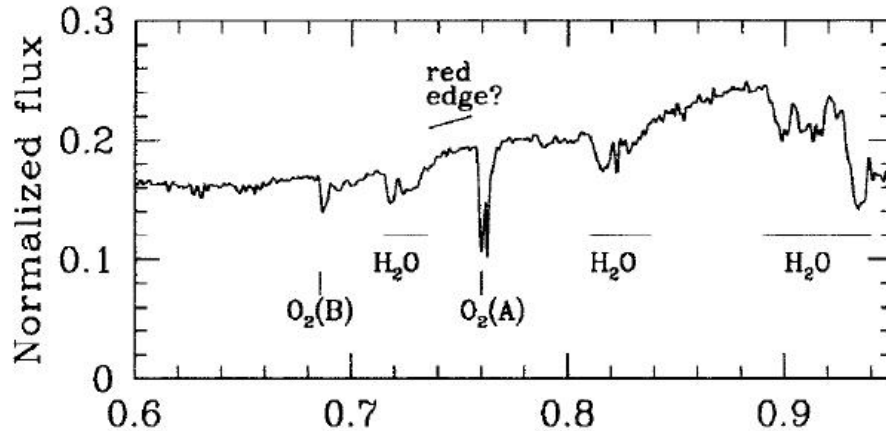
N₂(2.7%)

↑Pallé+2009の観測でもみえる

観測から生命の存在を示唆するO₂/O₃大気
→バイオマーカーの一例

バイオマーカー(地表面)

Background: ideas of looking for life remotely



Seager+2005

観測から海・植生の存在を示唆する
→バイオマーカーの一例

将来の観測

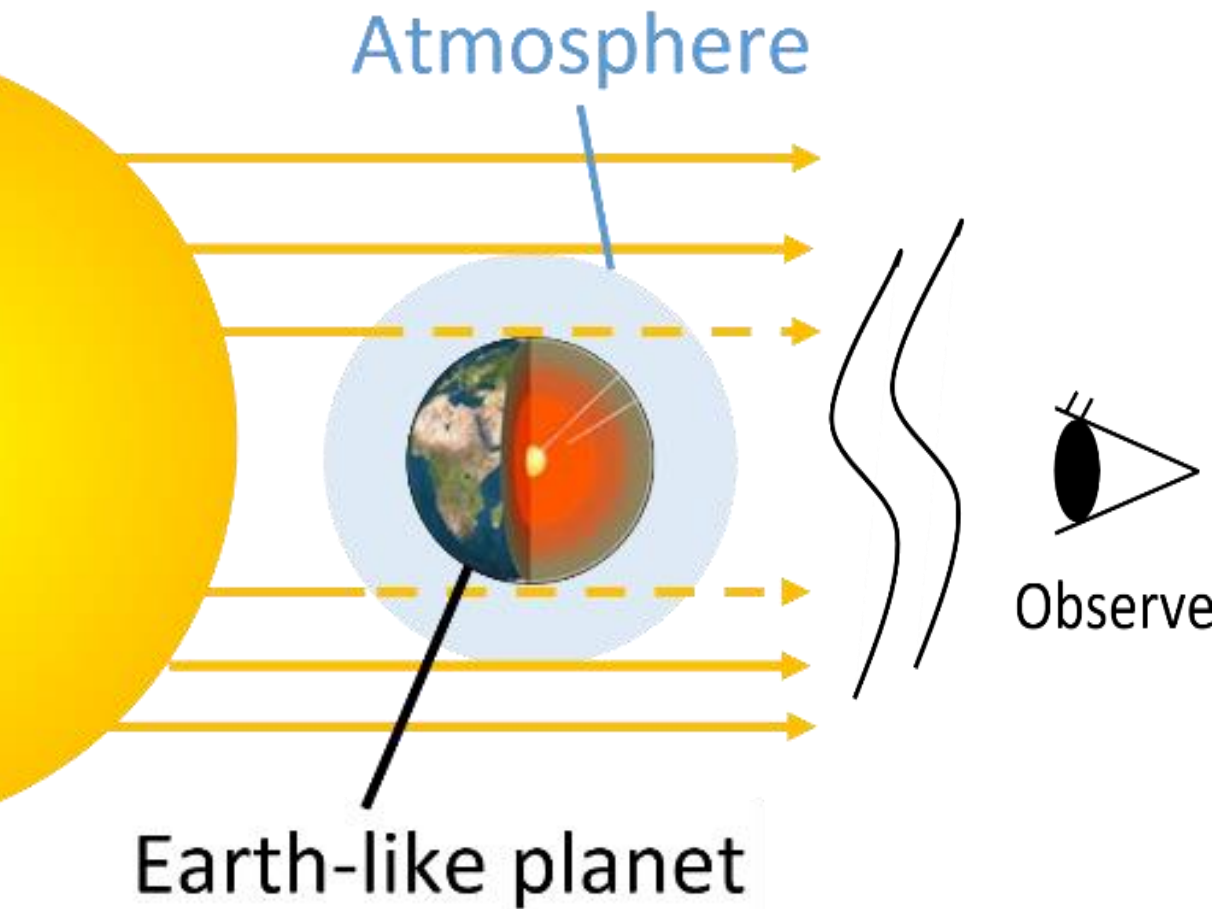
…系外惑星でバイオマーカーの検出を行う

輻射輸送モデルの必要性

実際の観測と合わせる

検出されるか定量的に見積もる

本研究の特徴

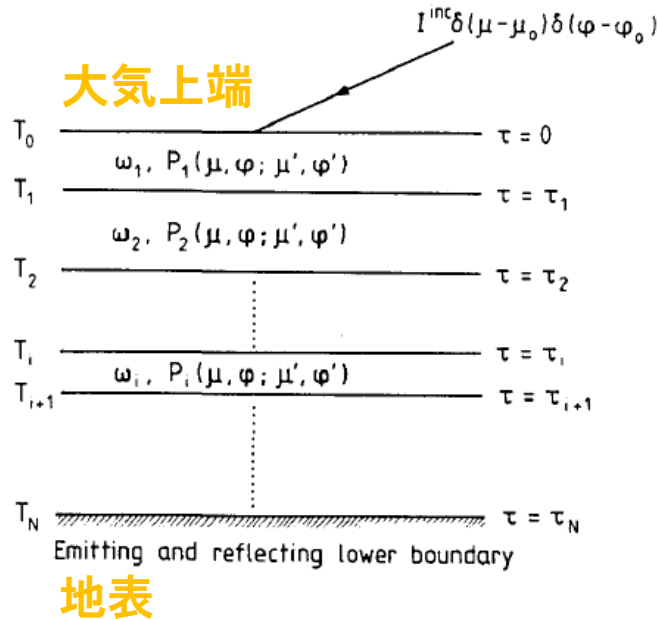


将来の観測である
「Earth-like planet」の
トランジット分光観測を
模擬した
輻射輸送モデルを作り

バイオマーカー
(大気・地表)の
検出可能性を
定量的に見積もる

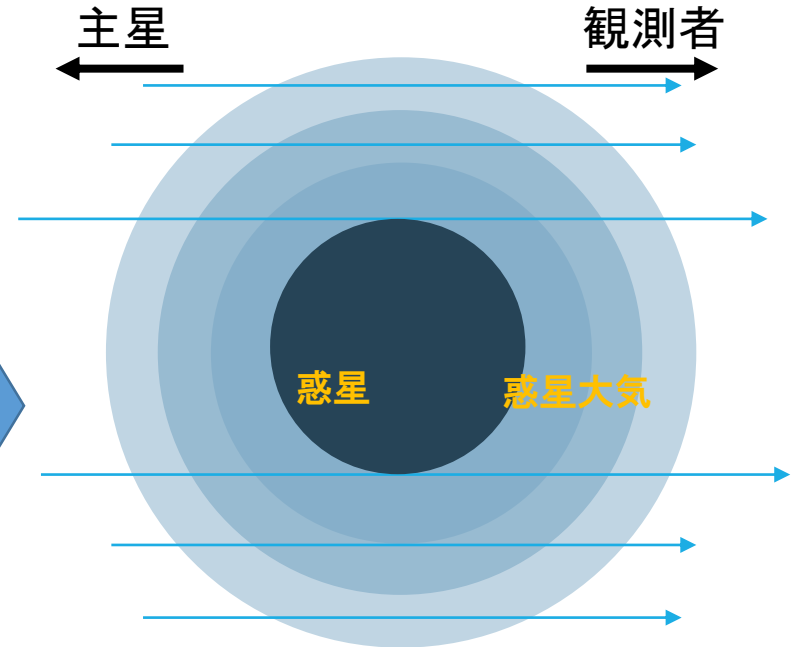
惑星大気の輻射輸送モデル

1次元平衡平板大気



幾何が
大切

1次元球対称大気



金星の夜面の熱放射

Meadows&Crisp(1996)

大気の吸収・散乱・放射を
網羅する。

Earth-like planetの模擬観測

Betremieux&Kaltenegger(2014)

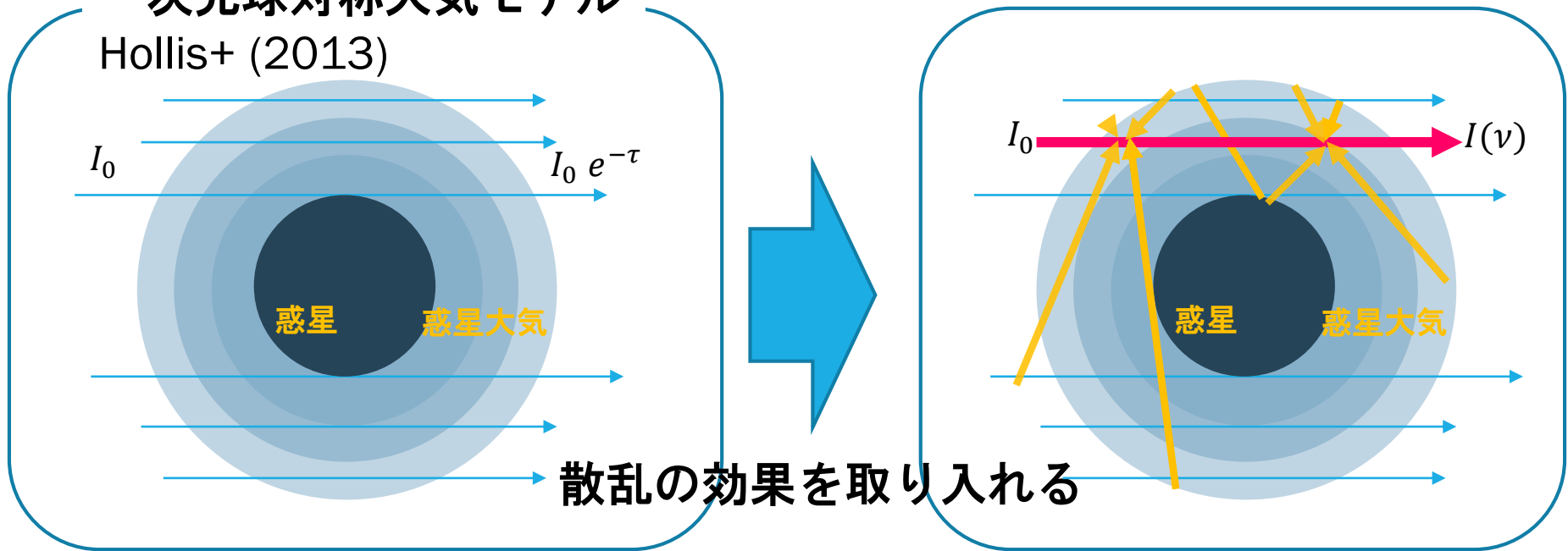
Misra, Meadows,&Crisp(2014)

光の屈折を扱う。

散乱を加味した輻射輸送方程式

一次元球対称大気モデル

Hollis+ (2013)



$$I(\lambda, x) = I_0(\lambda) e^{-\tau(\lambda, x)}$$

$$+ \varpi(\lambda) (1 - e^{-\tau(\lambda, x)}) \int P(\Omega, \Omega') I(\lambda, \Omega') d\Omega'$$

散乱して入る光

等方散乱を仮定 : $P(\Omega, \Omega') = 1/4\pi$

球対称大気のラムダイテレーション法

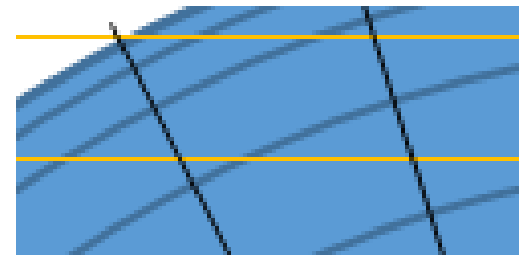
○初期の源泉関数 S

$$I_{u_0,k}^{(2)} = I_{u_0,k-1}^{(2)} e^{-\tau} + S^{(1)} (1 - e^{-\tau})$$

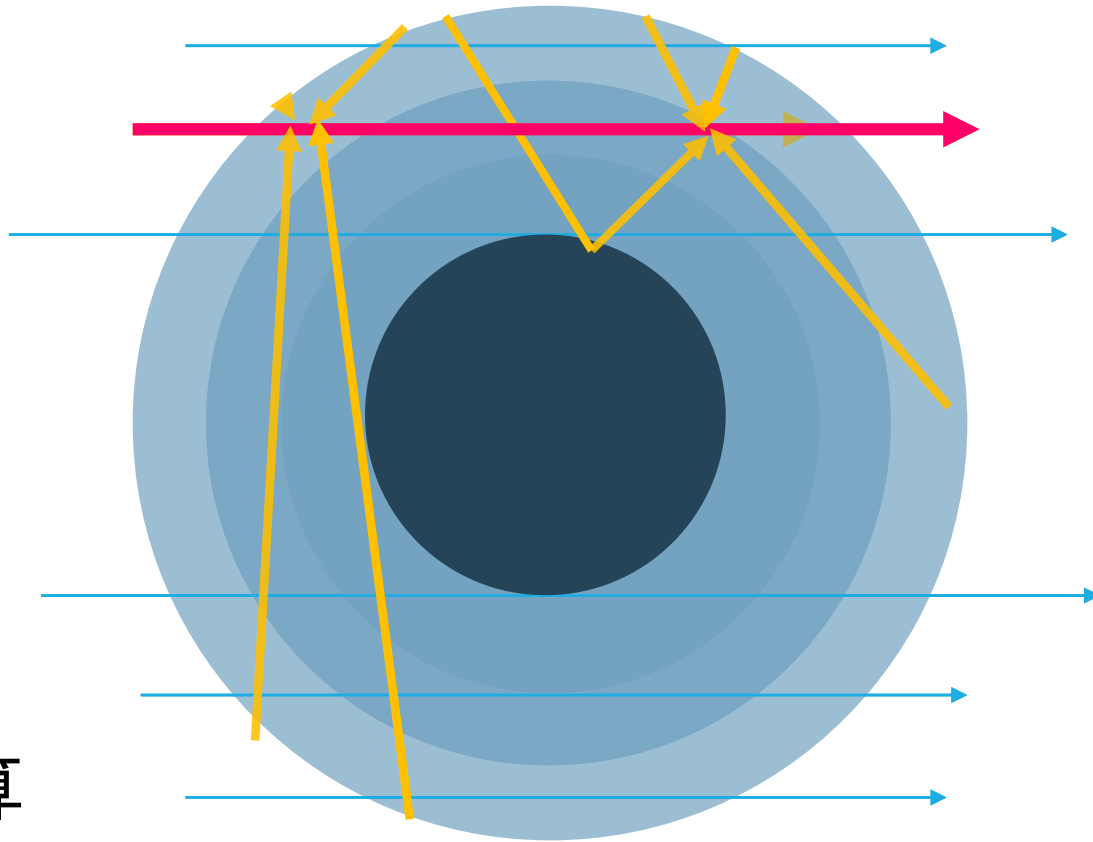
$$S^{(1)} = \frac{\omega}{2} \sum_u^{all} P_{u_0,u} I_u^{(1)} \sin \theta_u \Delta \theta_u$$

ω : 単散乱アルベド
 $P_{u_0,u}$: 散乱位相関数
 u : 光の方向

$$\frac{I_{u_0,k}^{(n)} - I_{u_0,k}^{(n-1)}}{I_{u_0,k}^{(n)}} < 10^{-3} \text{ まで Iteration}$$



球対称大気のラムダイテレーション法

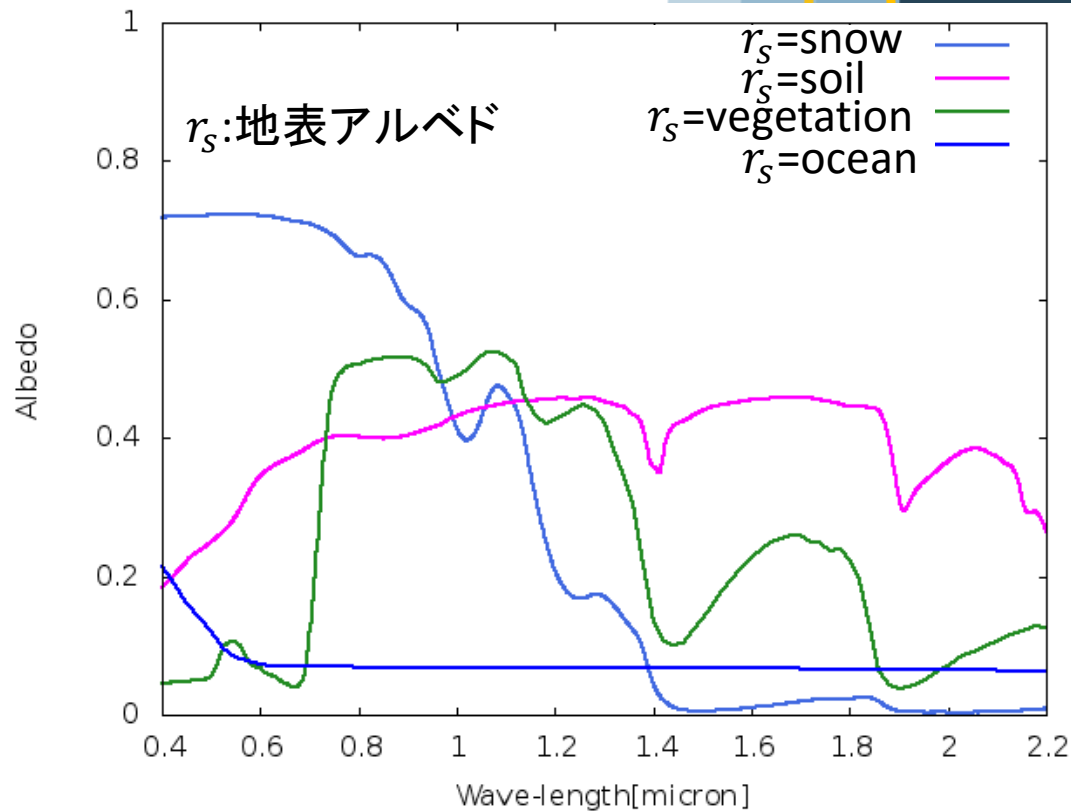
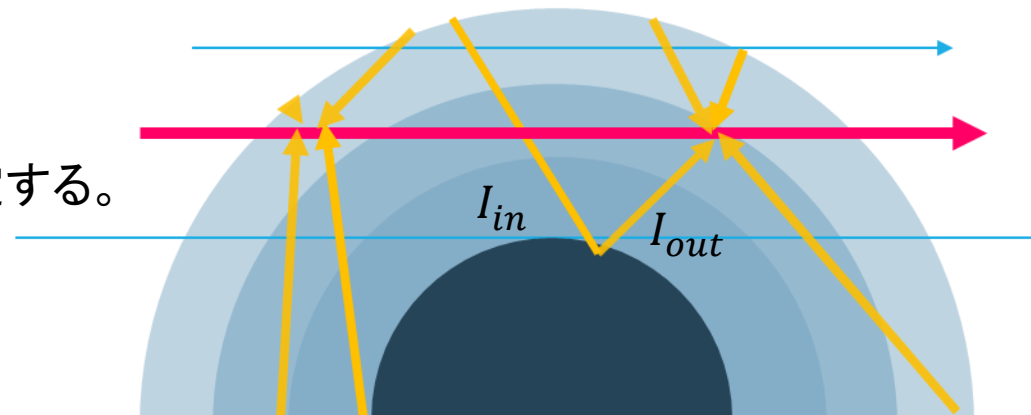


- 1, I を計算
- 2, S として保存
- 3, 新たな I を計算
- 4, 2と3を繰り返す

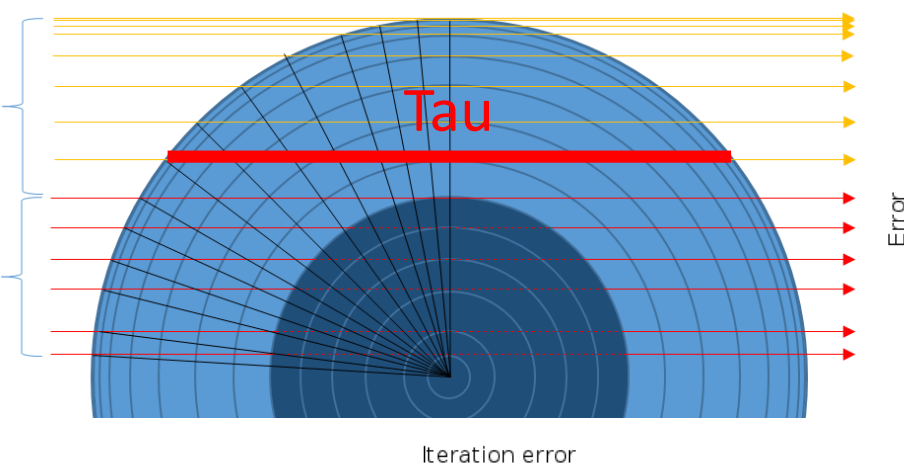
地表の反射

○地表はランバート面(等方性反射)を仮定する。

$$I_{out} = r_s I_{in}$$

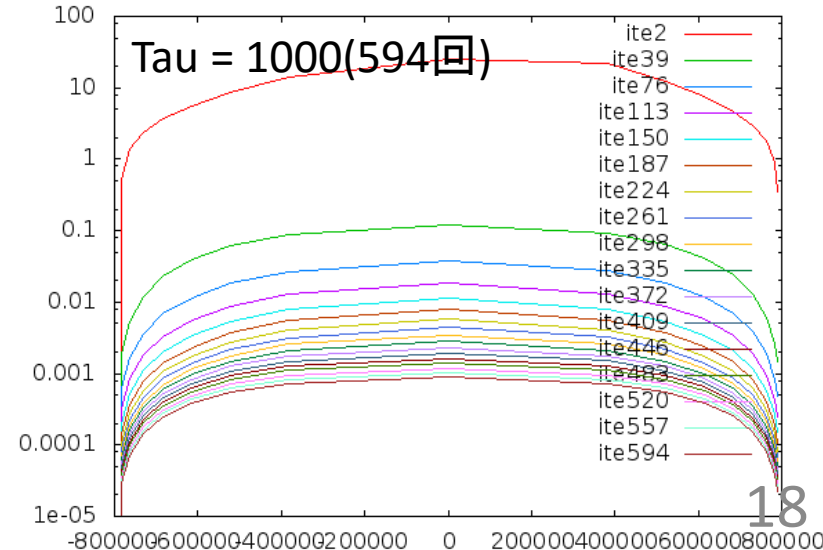
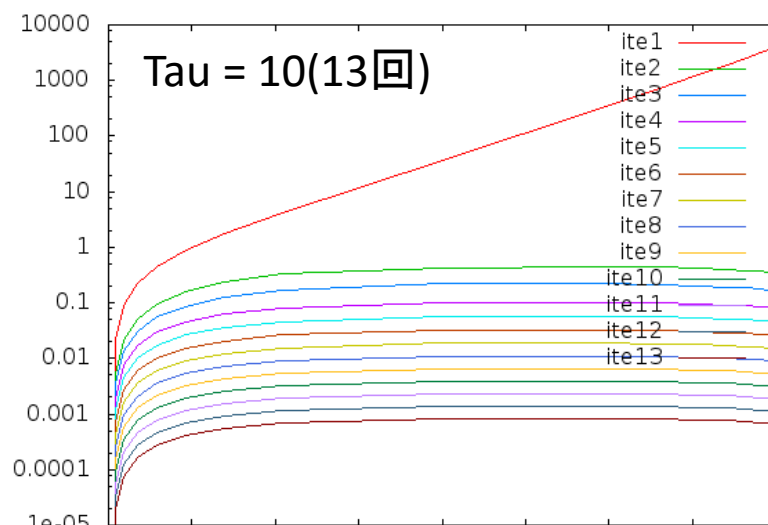
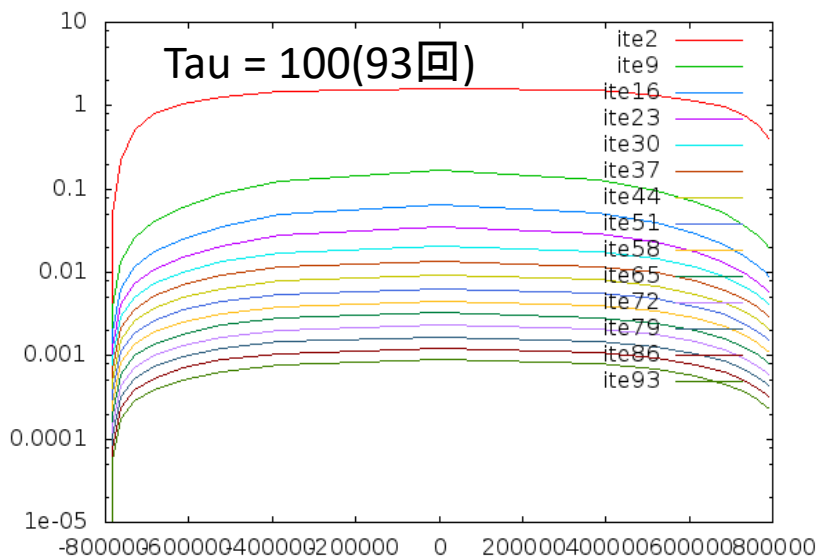


モデルの妥当性の評価(テスト計算) iteration収束値 $<10^{-3}$



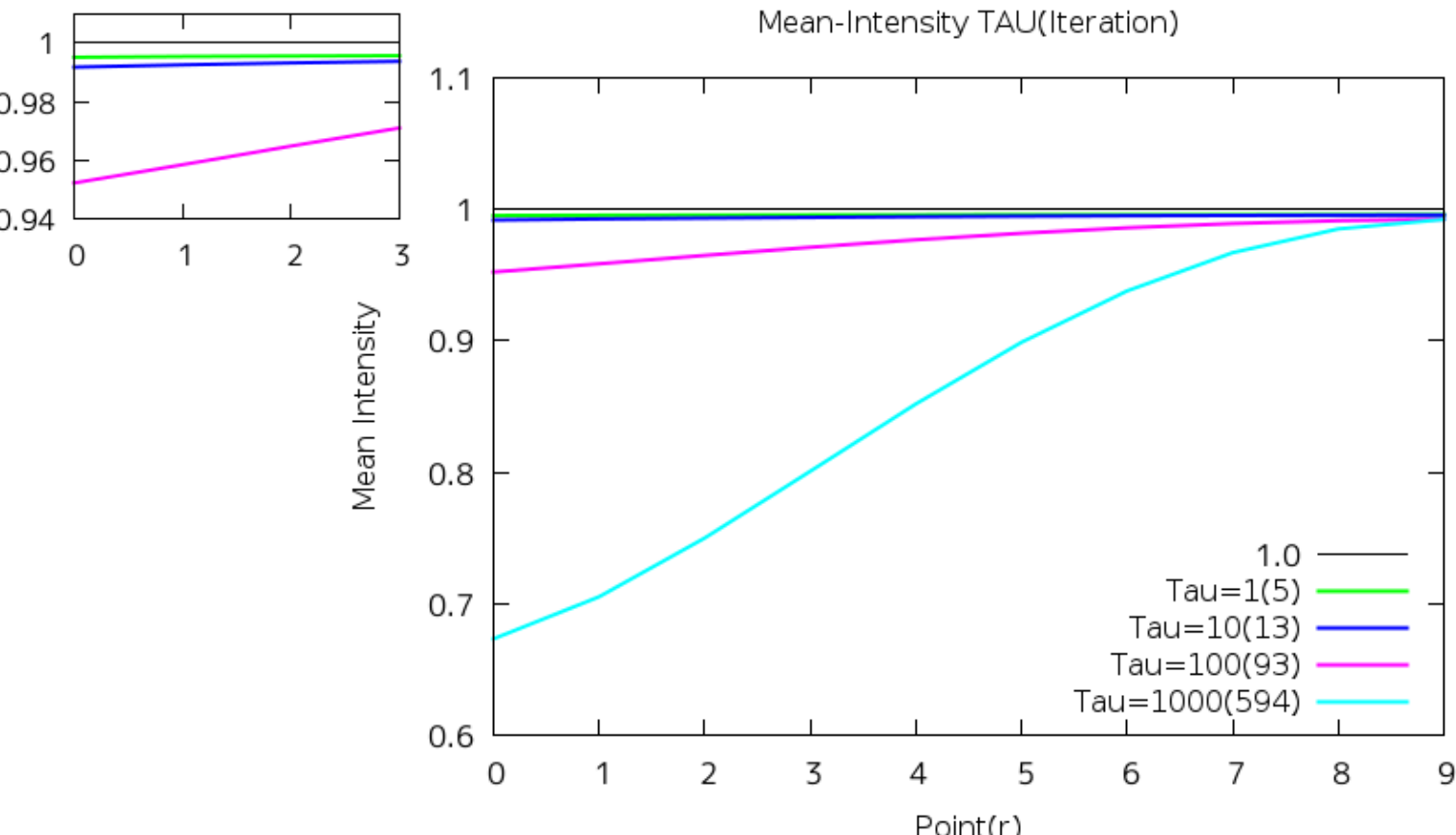
Error

Iteration error



モデルの妥当性の評価(テスト計算) mean_intensity J

- 散乱のみする大気(アルベド=1)等方散乱を仮定
→ $J(\tau)=\text{const.}$ になる。

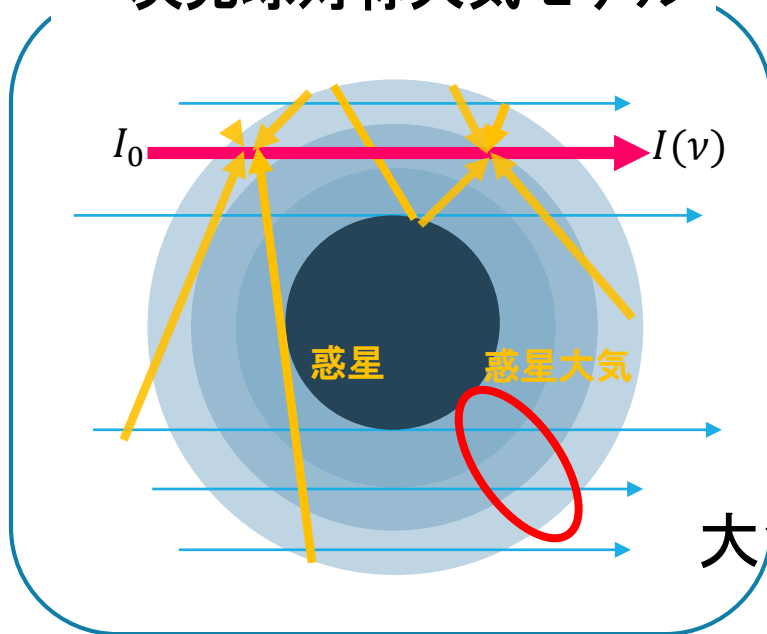


輻射輸送方程式のパラメータ

$$I(\lambda, x) = I_0(\lambda)e^{-\tau(\lambda, x)} + \varpi(\lambda)(1 - e^{-\tau(\lambda, x)}) \int P(\Omega, \Omega') I(\lambda, \Omega') d\Omega'$$

等方散乱を仮定 : $P(\Omega, \Omega') = 1/4\pi$

一次元球対称大気モデル



大気の1次元構造をパラメータとしておく。

パラメータ：大気の1次元構造

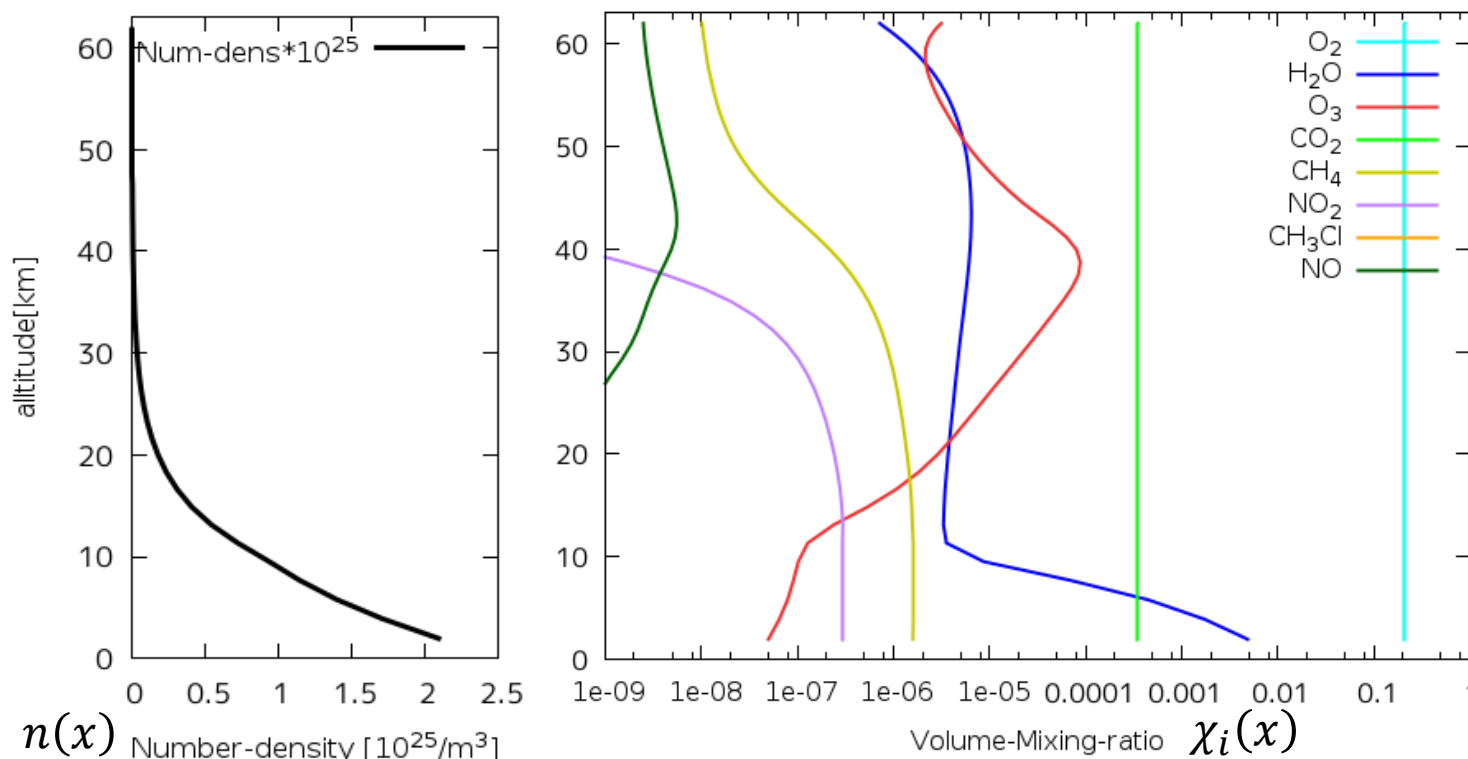
・雲がない晴れた地球大気, 理想気体 (Segra+(2005))

→ 大気分子のレイリー散乱

分子iの吸収断面積

$$\tau(\lambda, x) = \int_0^x \sigma(\lambda, x') n(x') dx' \quad \sigma(\lambda, x) = \sum_i \sigma_i(\lambda) \chi_i(x) + \sigma_s(\lambda)$$

数密度
消散断面積
組成比
散乱断面積



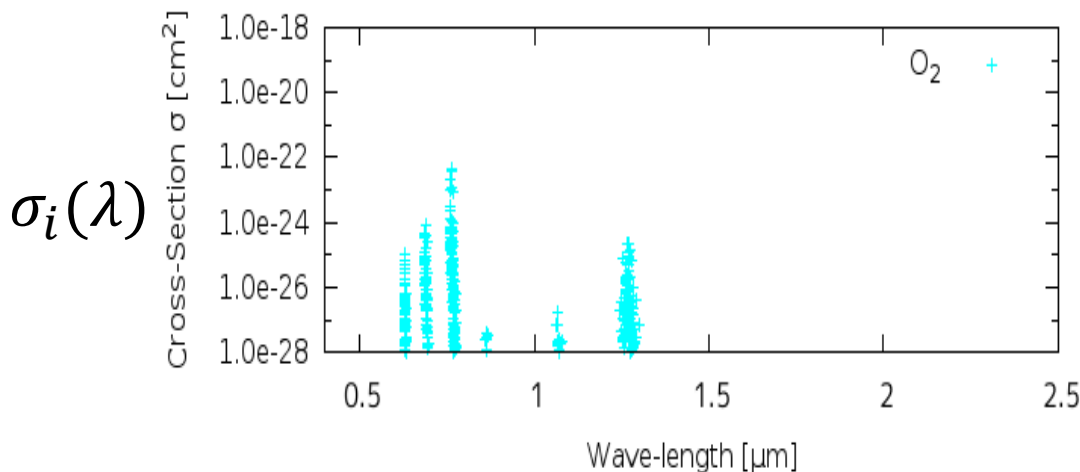
パラメータ：波長依存性

・雲がない晴れた地球大気, 理想気体 (Segra+(2005))

→ 大気分子のレイリー散乱

分子*i*の吸収断面積

$$\tau(\lambda, x) = \int_0^x \underbrace{\sigma(\lambda, x)}_{\text{消散断面積}} \underbrace{n(x')}_{\text{数密度}} dx' \quad \sigma(\lambda, x) = \sum_i \underbrace{\sigma_i(\lambda)}_{\text{分子}i\text{の吸収断面積}} \underbrace{\chi_i(x)}_{\text{組成比}} + \underbrace{\sigma_s(\lambda)}_{\text{散乱断面積}}$$

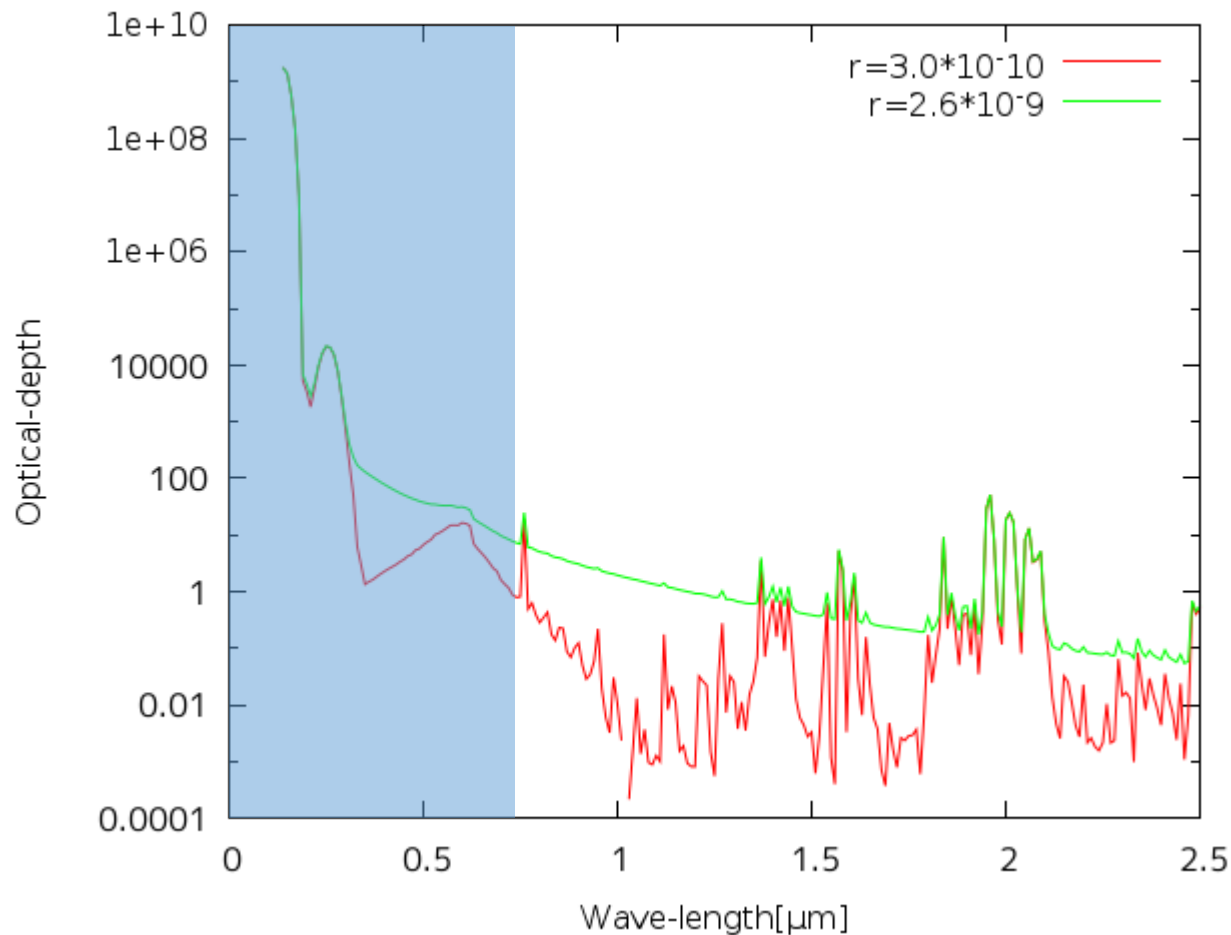


$$\varpi(\lambda) = \frac{\sigma_s(\lambda)}{\sigma(\lambda, x)}$$

大気の単散乱アルベド

$$\sigma_s(\lambda) = \frac{128\pi^5}{3\lambda^4} \left(\frac{3}{4\pi N_s} \right)^2 \left(\frac{m_r^2 - 1}{m_r^2 + 2} \right)^2 f(\delta)$$

光学的厚み(モデルの扱う波長)

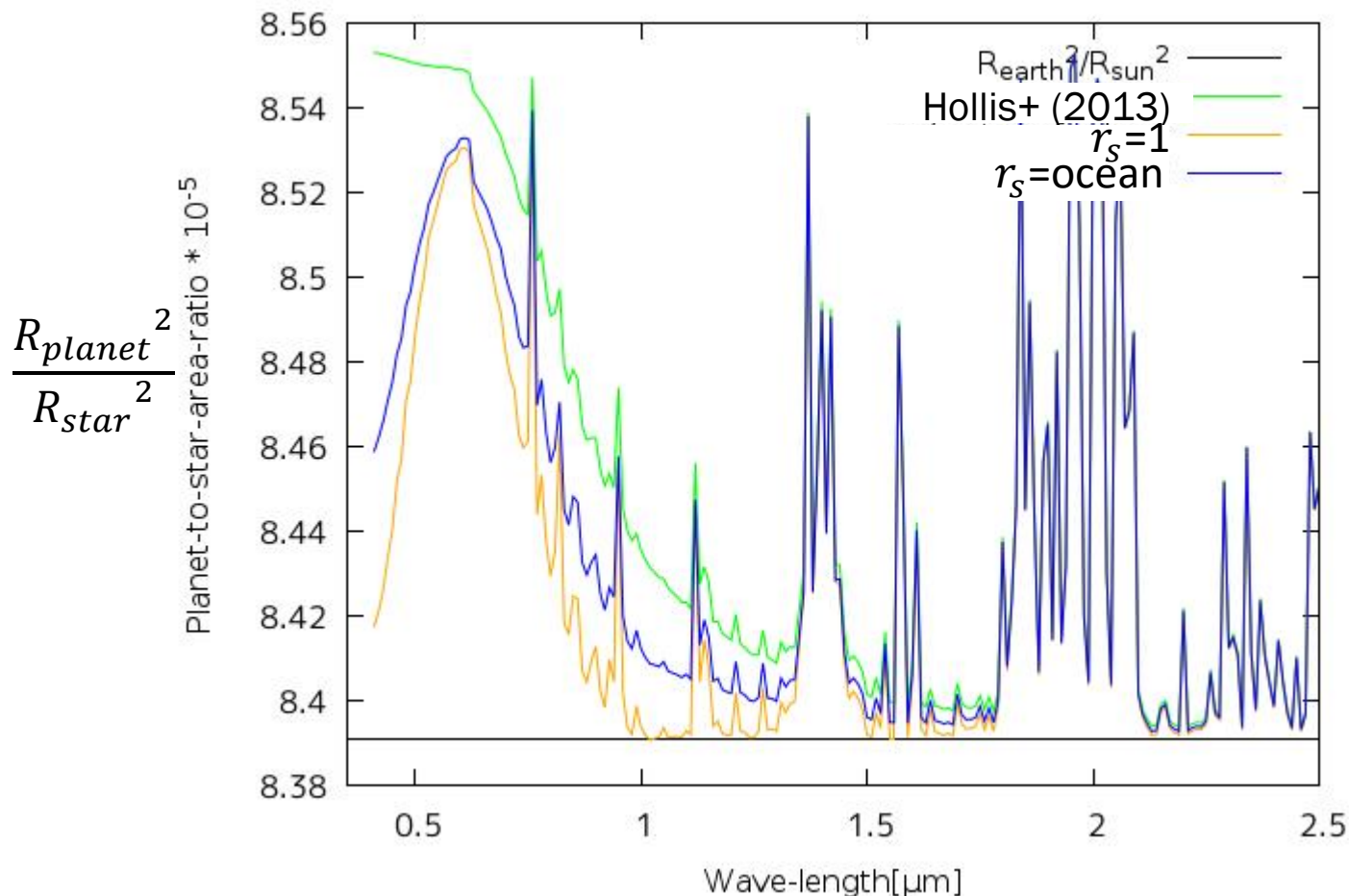


0.7 μm 以下はTAU >40 となり、今回のモデルでは は扱えない。

Earth-like planetの模擬観測

1、先行研究との比較

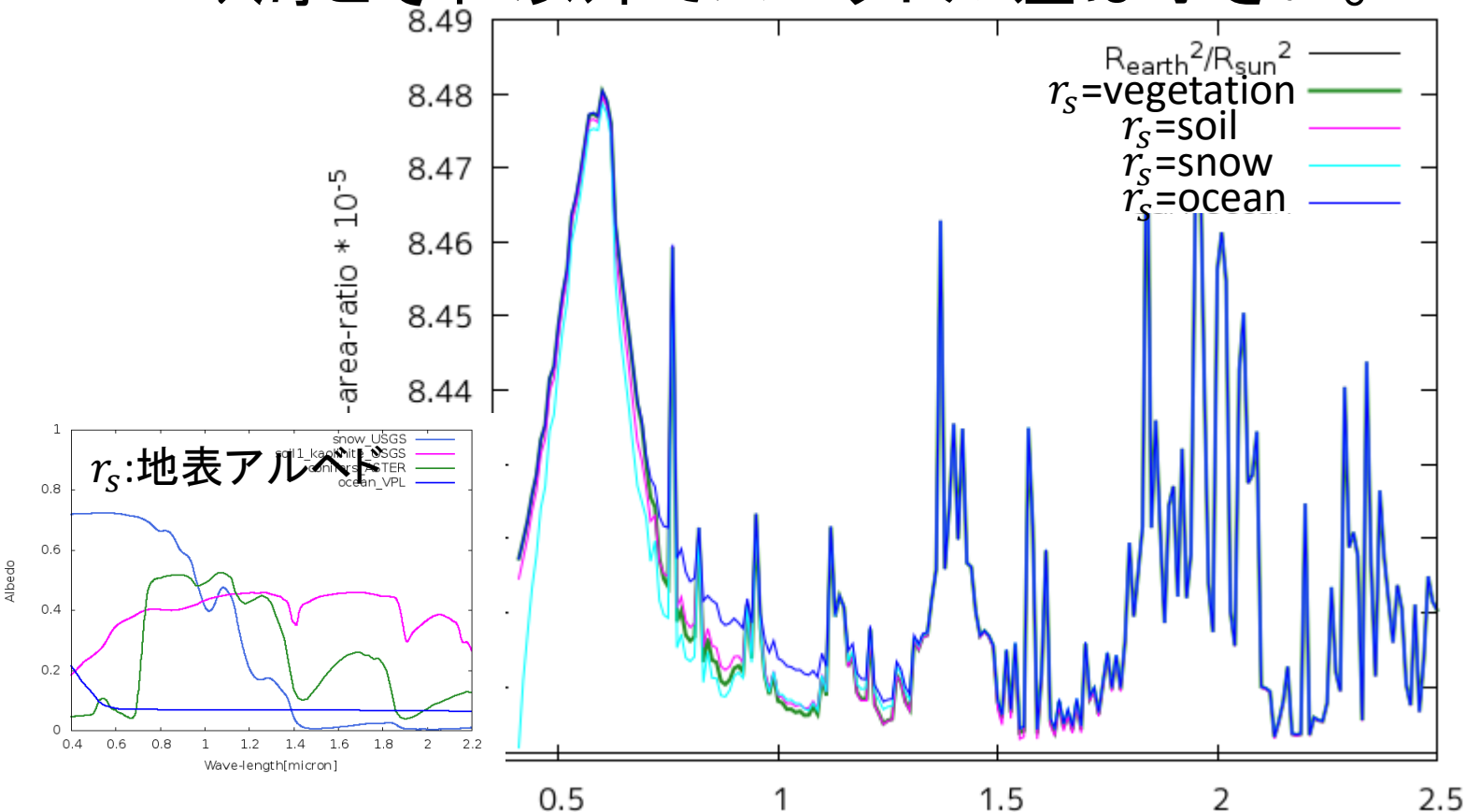
- 屈折と散乱の扱いを考えると、妥当か。



Earth-like planetの模擬観測

2、地表の環境

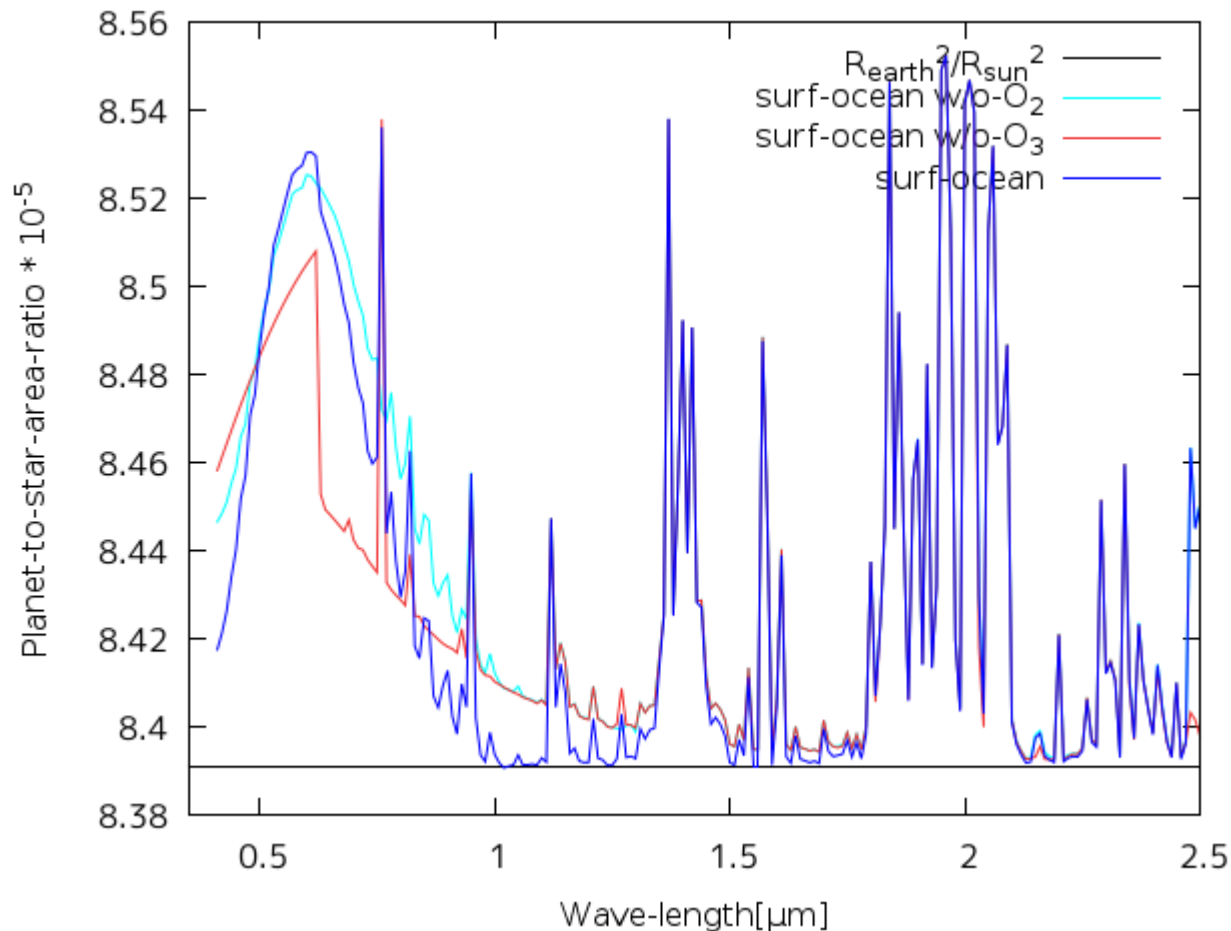
- トランジット観測では、近赤外のレイリー散乱は少ない
→ 海とそれ以外でスペクトル差は小さい。



Earth-like planetの模擬観測

3、大気中の酸素・オゾン

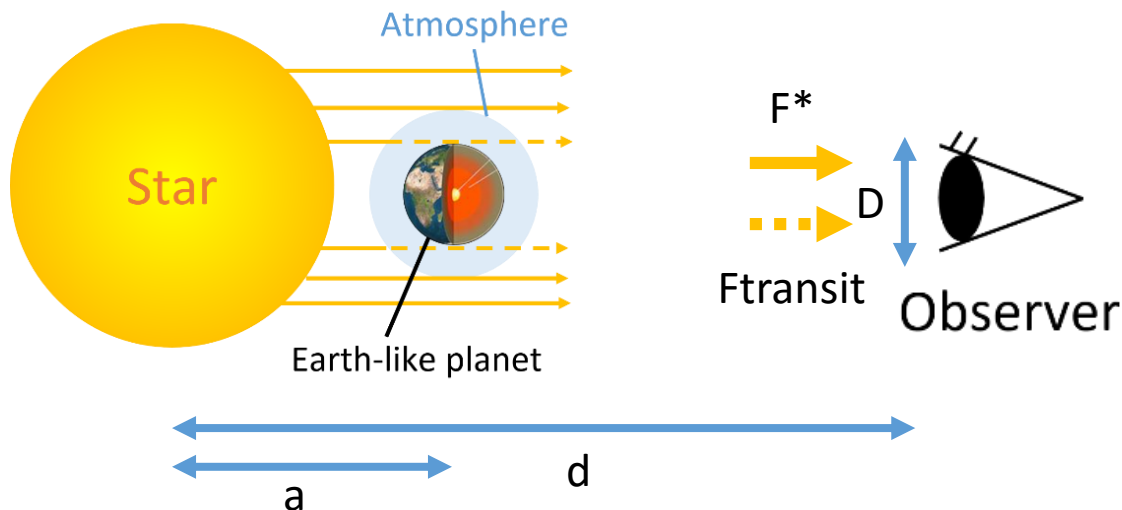
- オゾンの吸収は紫外線で起きる。



Earth-like planetの模擬観測 方針：分解能の調整

- 実際の観測器の精度を再現する。
→ スペクトルの分解能を調整する。

HANNO +2014



宇宙望遠鏡で観測（量子効率100%）
波長分解能 $R_{\text{transit}}^{\text{max}}$ を算出した。

まとめ

Earth-like planetのバイオマーカーを観測できるかの議論

- 球対称大気の輻射輸送モデルをつくり、
地表・大気環境を変えてスペクトルを出した。

今後

- モデルの改善
- 定量的な議論 (Hanno+2014)
- 地球をトランジット観測した結果 (palle+2009) との比較