

二酸化炭素氷雲による 初期火星の温暖化: 雲面密度の推定

2005 年度第 4 回 D&M2 Seminar,

2005/06/01 (Wed) 13:30--15:30

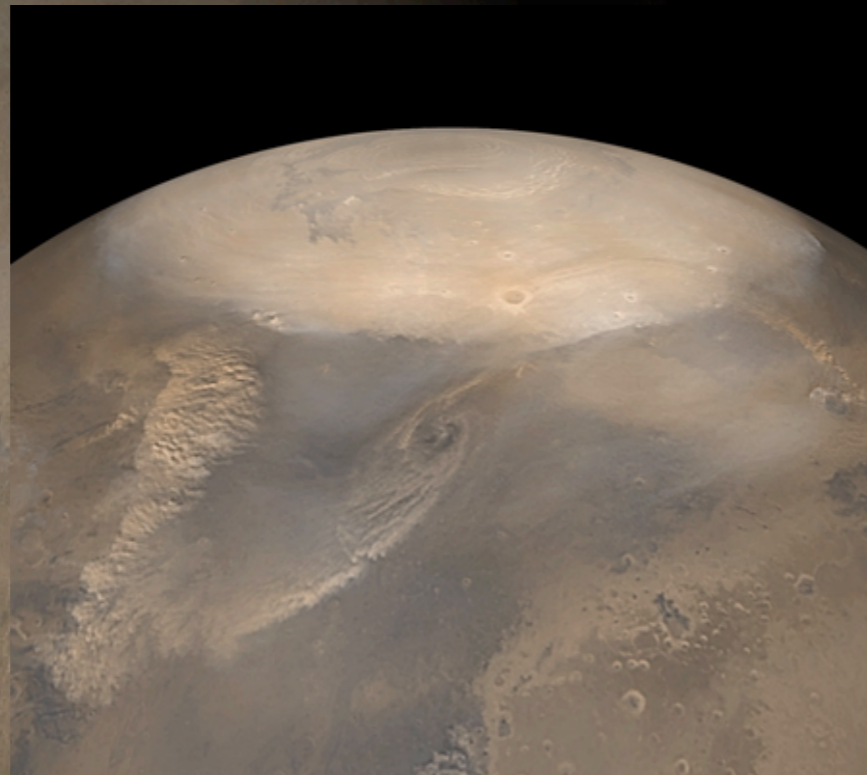
惑星物理学研究室 D1, 光田 千紘

chihiro@ep.sci.hokudai.ac.jp

現在の火星

- ☉ 太陽放射 : 地球の 43 %
- ☉ 大気主成分 : 二酸化炭素
- ☉ 大気圧 : 0.006 atm
- ☉ 地表面温度 : 215 K

乾燥寒冷な気候



火星古気候の謎

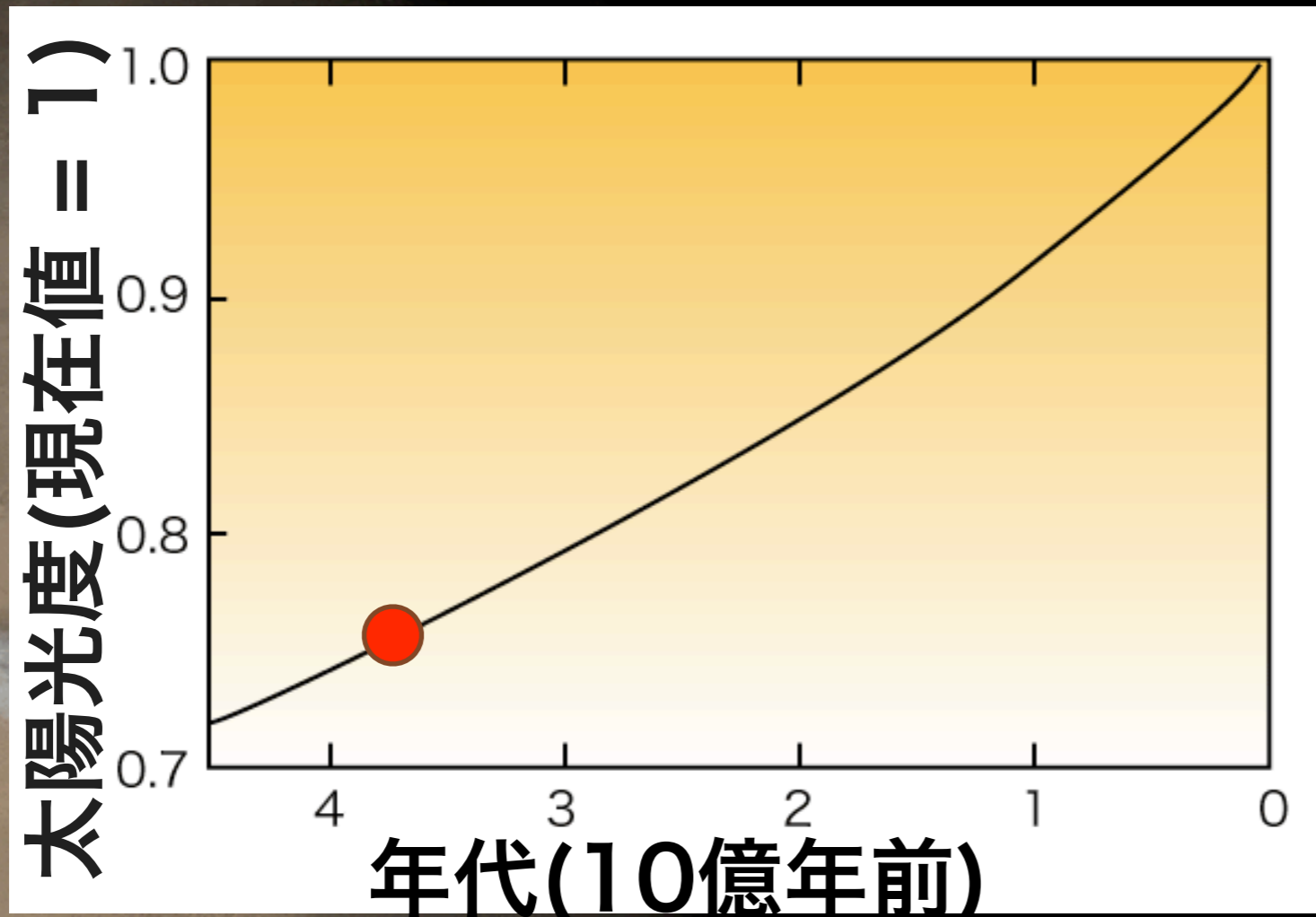
バレーネットワーク



- 38 億年前: 温暖湿潤な気候?
- 地表に流水の痕跡
- 高い地表風化率

暗い太陽のパラドックス

- 太陽輝度は火星史の間, 徐々に増加
- 恒星進化の理論(e.g. Newman and Rood 1977)...

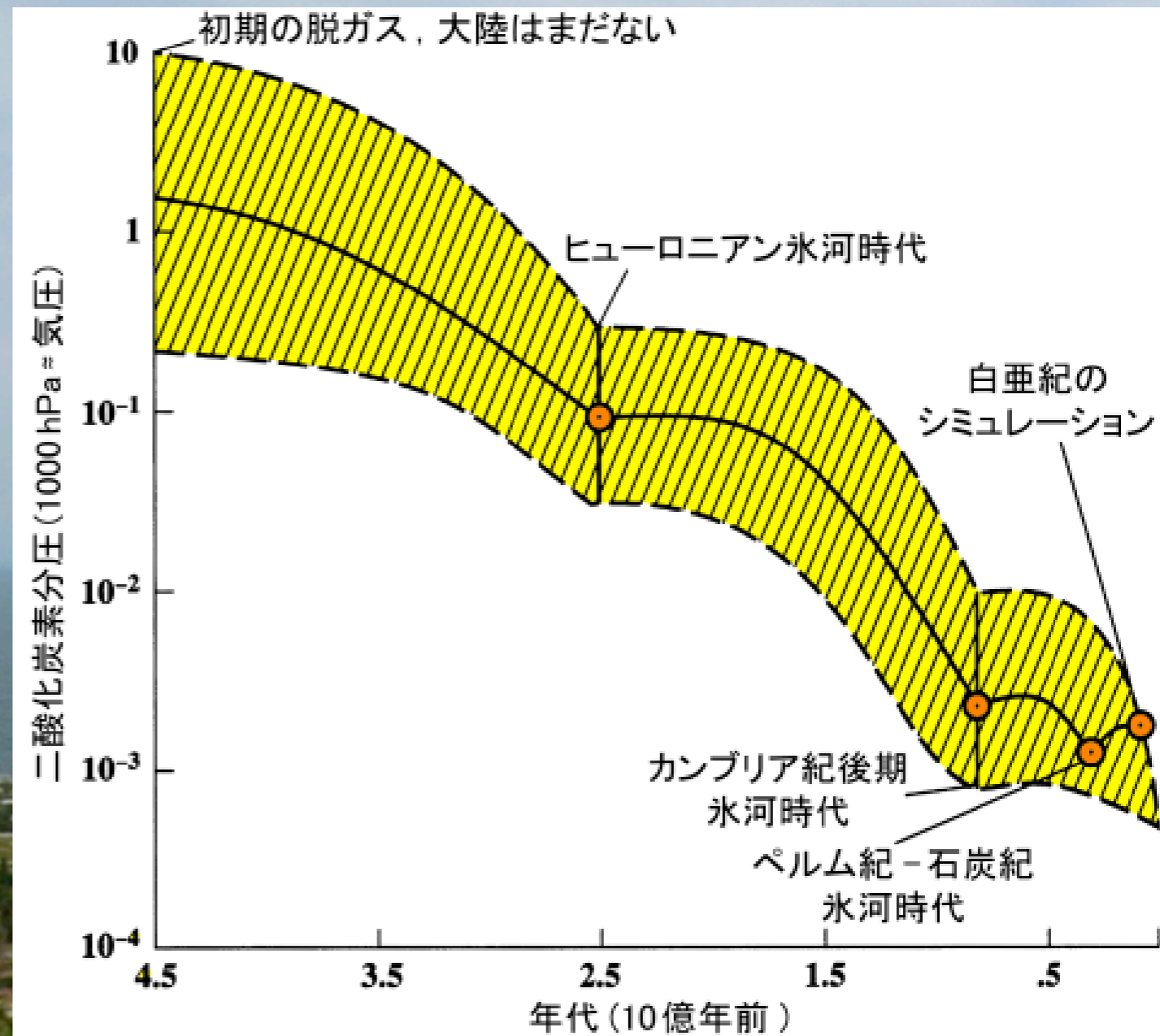


~~昔は今よりも
寒かった...?~~

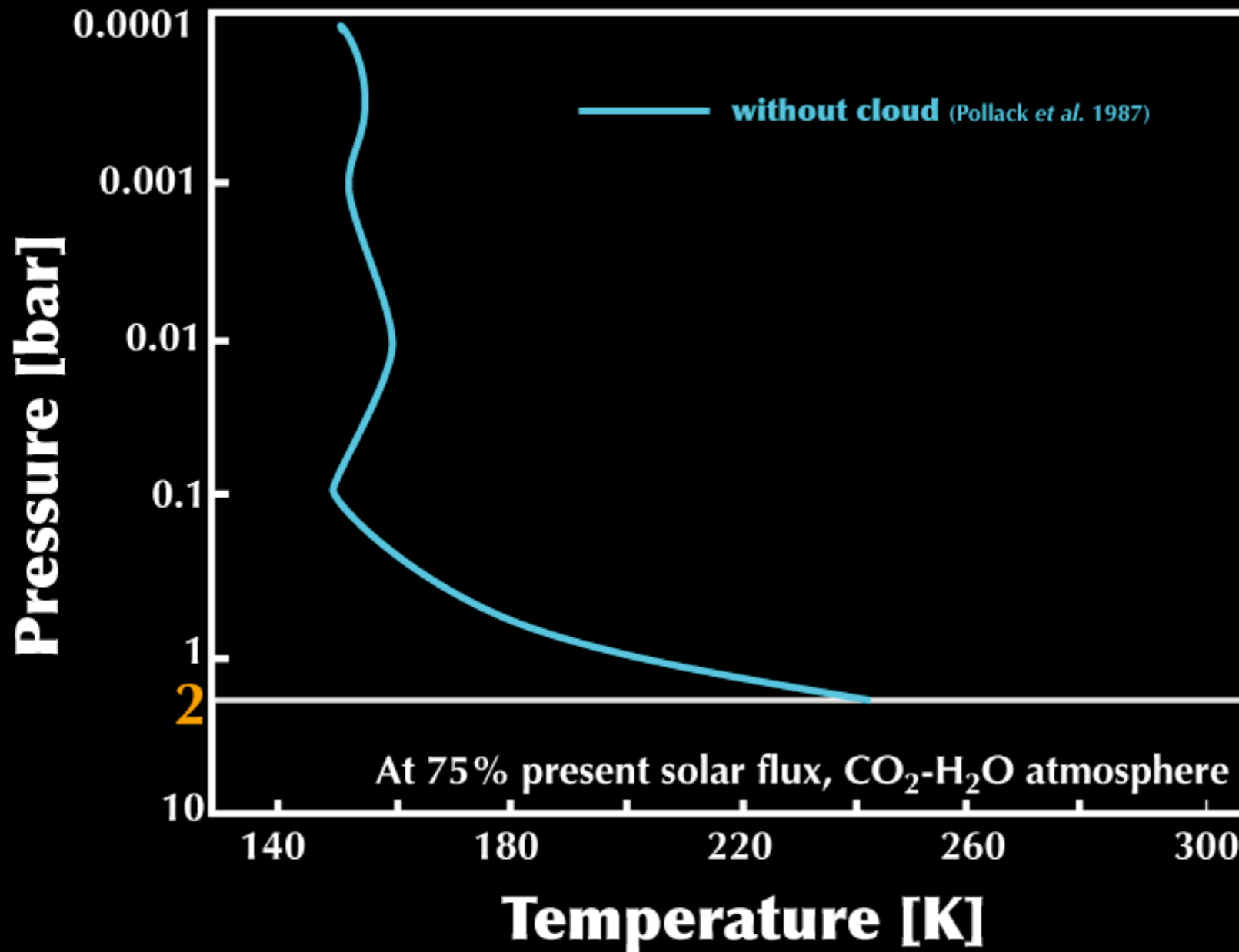
暗い太陽のパラドックス (地球の場合)

- 過去, 海は凍っていたはず...
- 45 億年間海は存在

二酸化炭素分圧が
高ければ再現可能
(Kasting, 1993)

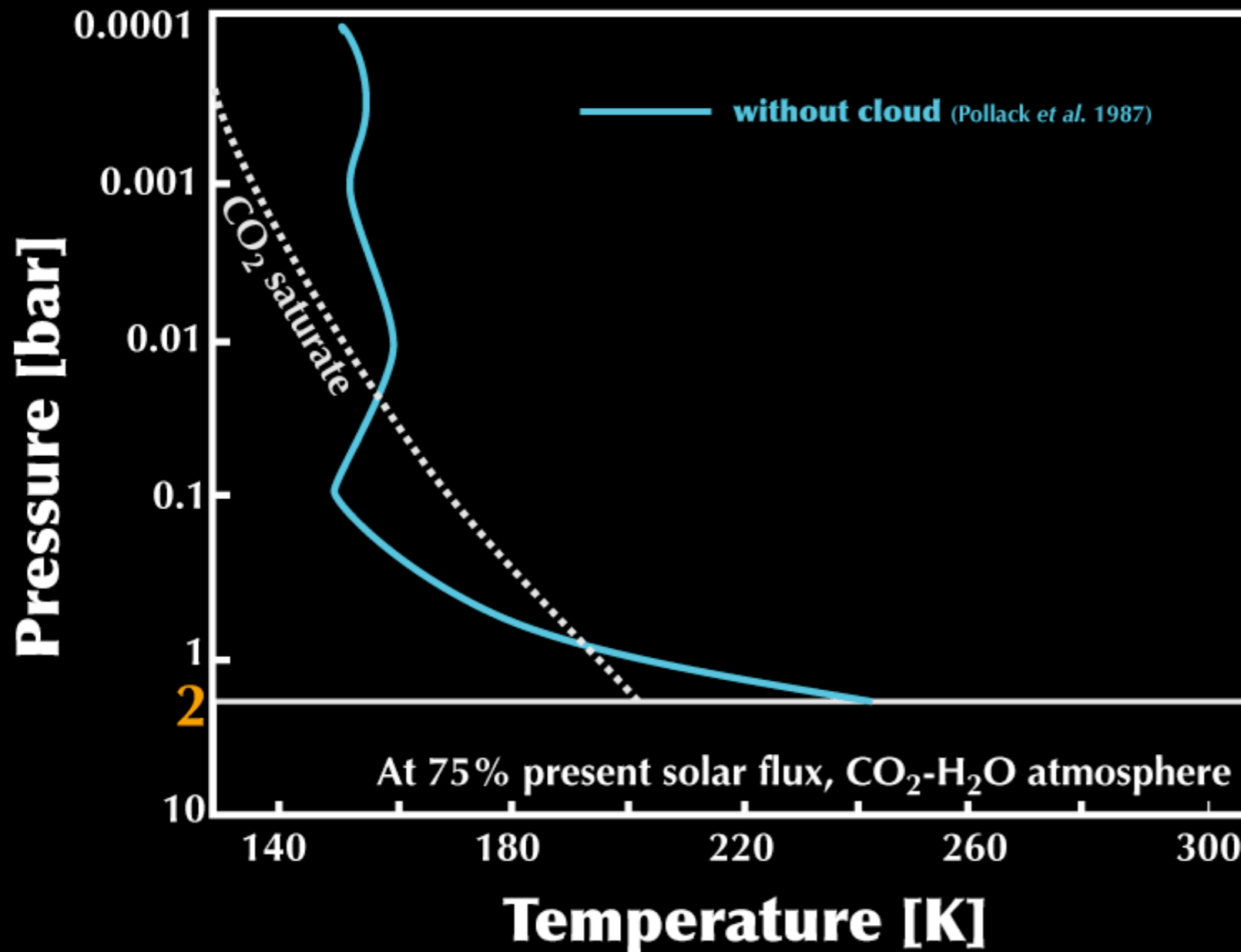


暗い太陽のパラドックス (火星の場合)



大気圧 5 気圧以上
で温暖湿潤
(Pollack et al. 1987)

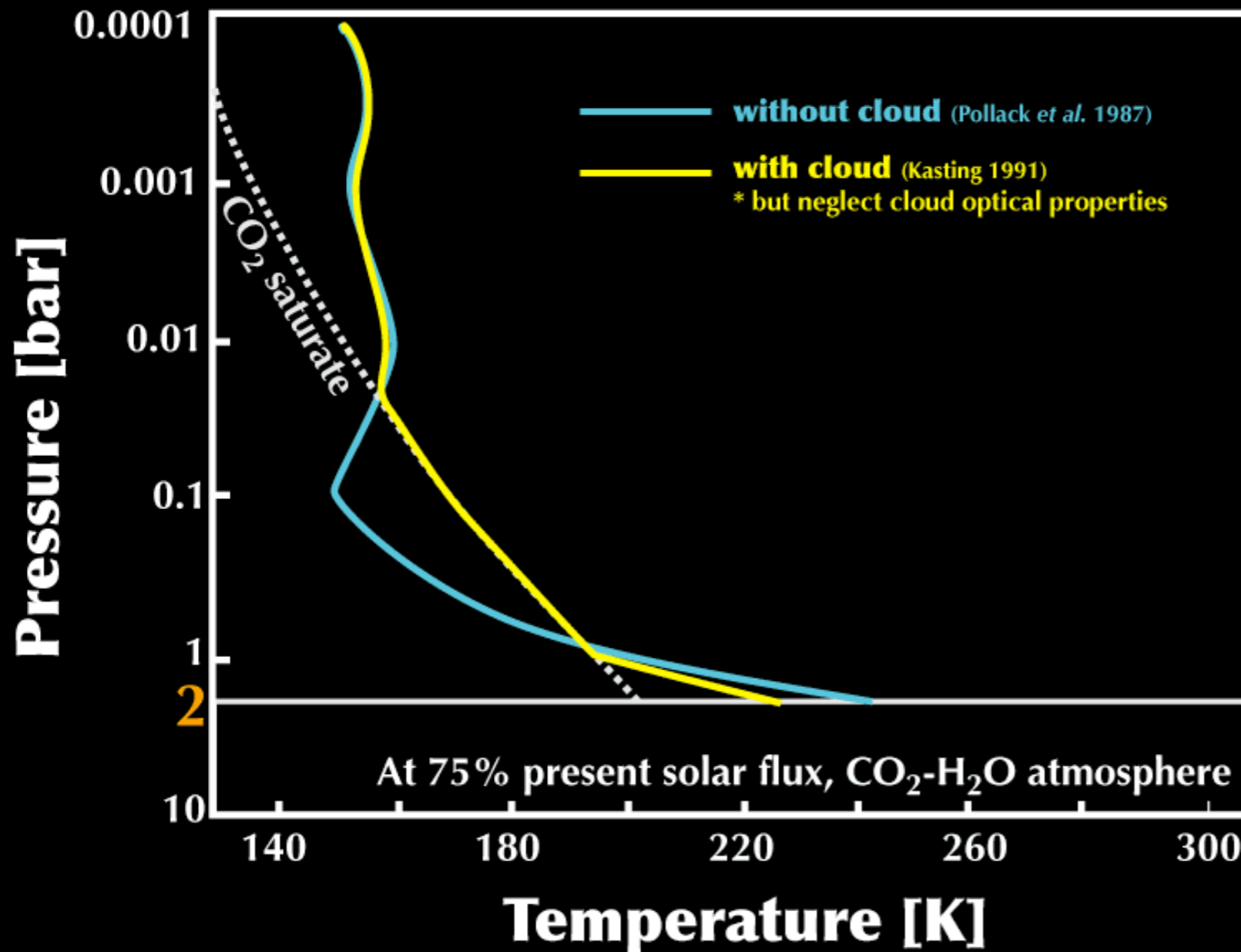
暗い太陽のパラドックス (火星の場合)



大気圧 5 気圧以上
で温暖湿潤
(Pollack et al. 1987)

CO₂ 凝結

暗い太陽のパラドックス (火星の場合)

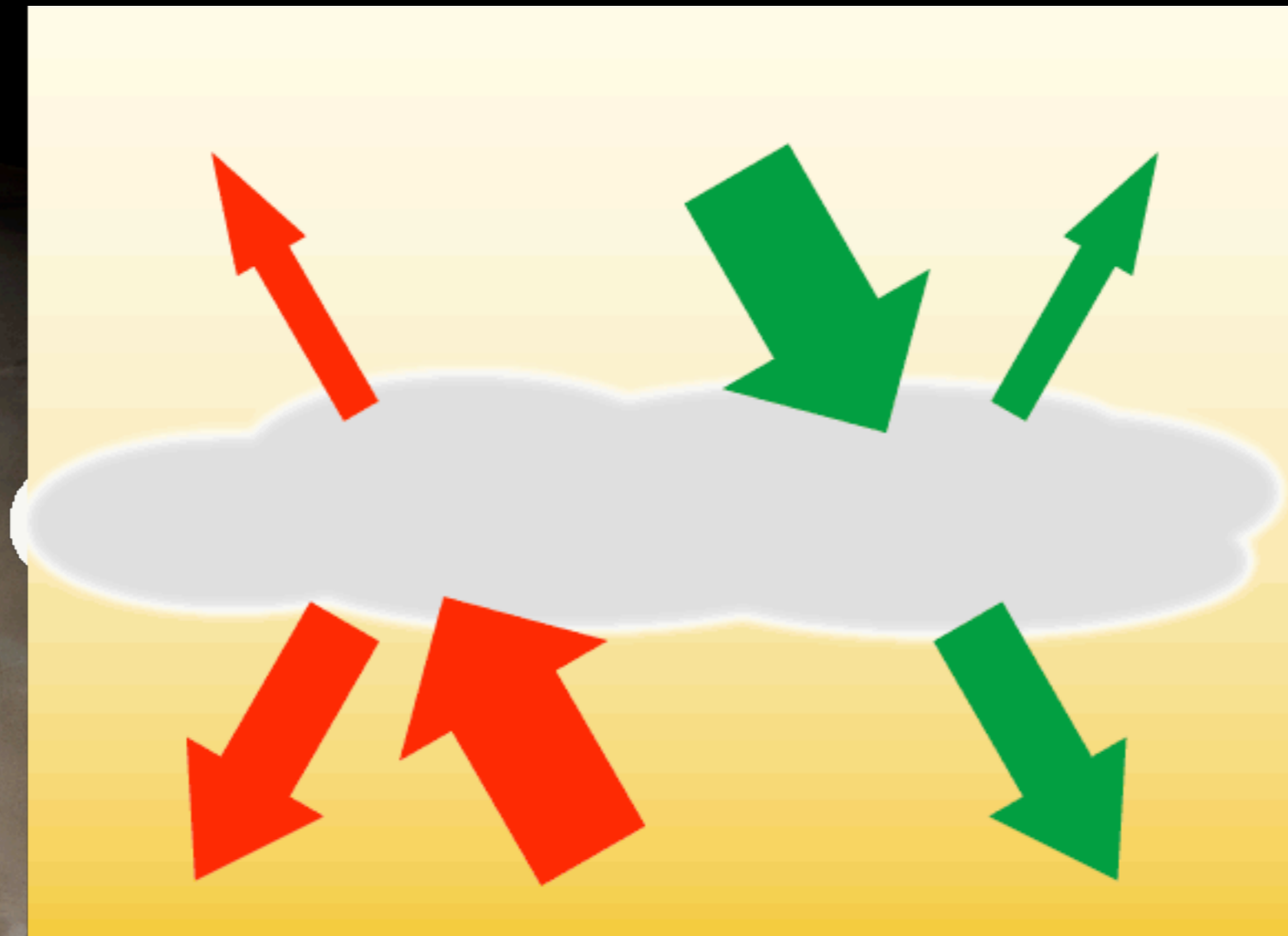


~~大気圧 5 気圧以上
で温暖湿潤
(Pollack et al. 1987)~~

CO₂ 凝結

大気圧に上限 (3.8 気圧)
温暖化不可
(Kasting, 1991)

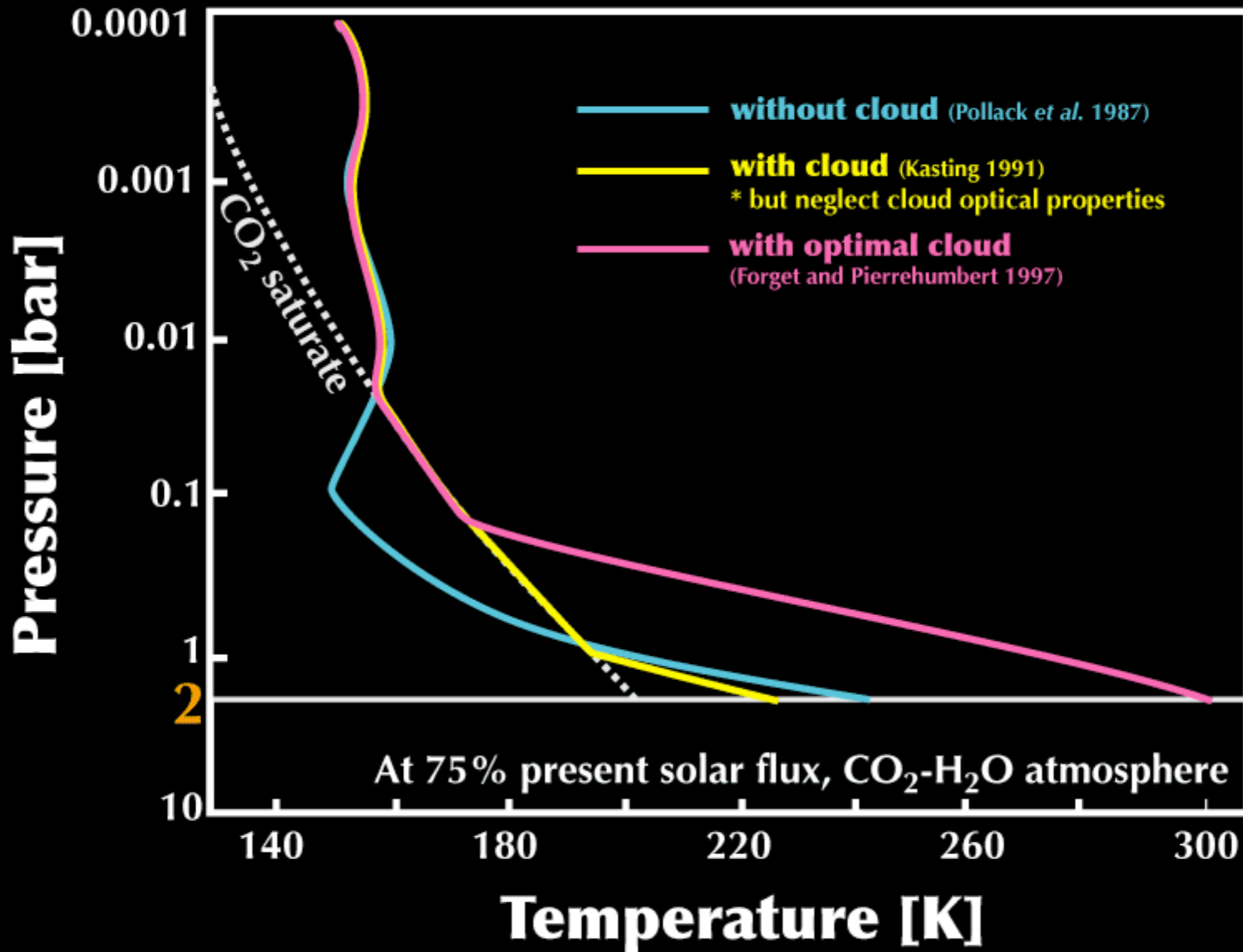
氷雲の散乱による温室効果



赤外放射反射 > 太陽放射反射

散乱温室効果

氷雲の散乱による温室効果



散乱温室効果問題の現状

- 理想的な雲が存在すれば、温暖湿潤な気候は再現可能 (e.g. Mischenka et al, 2000)
 - 理想的な雲の粒径, 面密度
- 理想的な雲は存在し続けられるのか?

粒径・面密度の決定機構

- 雲の粒径, 面密度を変化させるメカニズム
 - 衝突合体
 - 雲粒の重力沈降による雲層外への脱出
 - 放射過程における正味加熱(冷却)による蒸発(凝結)

粒径・面密度の決定機構

- 雲の粒径, 面密度を変化させるメカニズム
 - 衝突合体
 - 雲粒の重力沈降による雲層外への脱出
 - 放射過程における正味加熱(冷却)による蒸発(凝結)

本研究の目的

雲面密度と温室効果の評価

1D 放射モデル

太陽光度: 0.75 倍
(全球年平均値)

二方向近似
(散乱層: δ - Eddington 近似)

CO₂
H₂O

アルベド: 0.216
(Kieffer et al. 1977)

雲粒: 吸収/散乱(赤外/太陽)

* ミー理論(球形粒子を仮定)

CO₂復素屈折率(Warren, 1986)

気体: 吸収(赤外のみ)

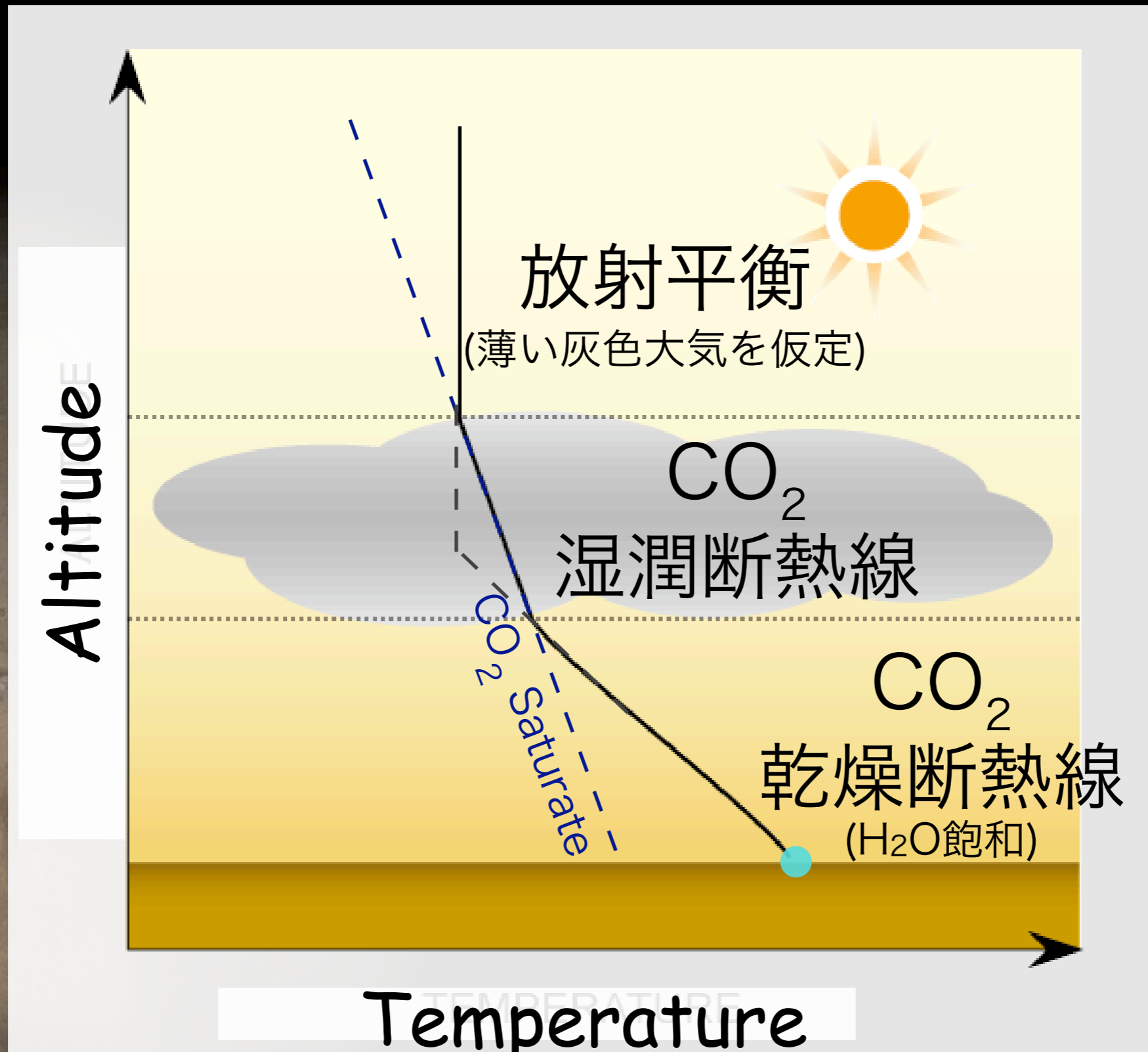
* line by line 法

吸収線パラメータ(HITRAN2000)

* 散乱層では ランダムモデル

バンドパラメータ(Houghton, 2002)

モデル: 鉛直温度構造



1D 放射モデル

太陽光度: 0.75 倍
(全球年平均値)

二方向近似
(散乱層: δ - Eddington 近似)

CO₂ 凝結潜熱
= 雲層の正味冷却エネルギー
= 雲層の射出-太陽, 赤外加熱

H₂O

アルベド: 0.216
(Kieffer et al. 1977)

雲粒: 吸収/散乱(赤外/太陽)

* ミー理論(球形粒子を仮定)

CO₂複素屈折率(Warren, 1986)

気体: 吸収(赤外のみ)

* line by line 法

吸収線パラメータ(HITRAN2000)

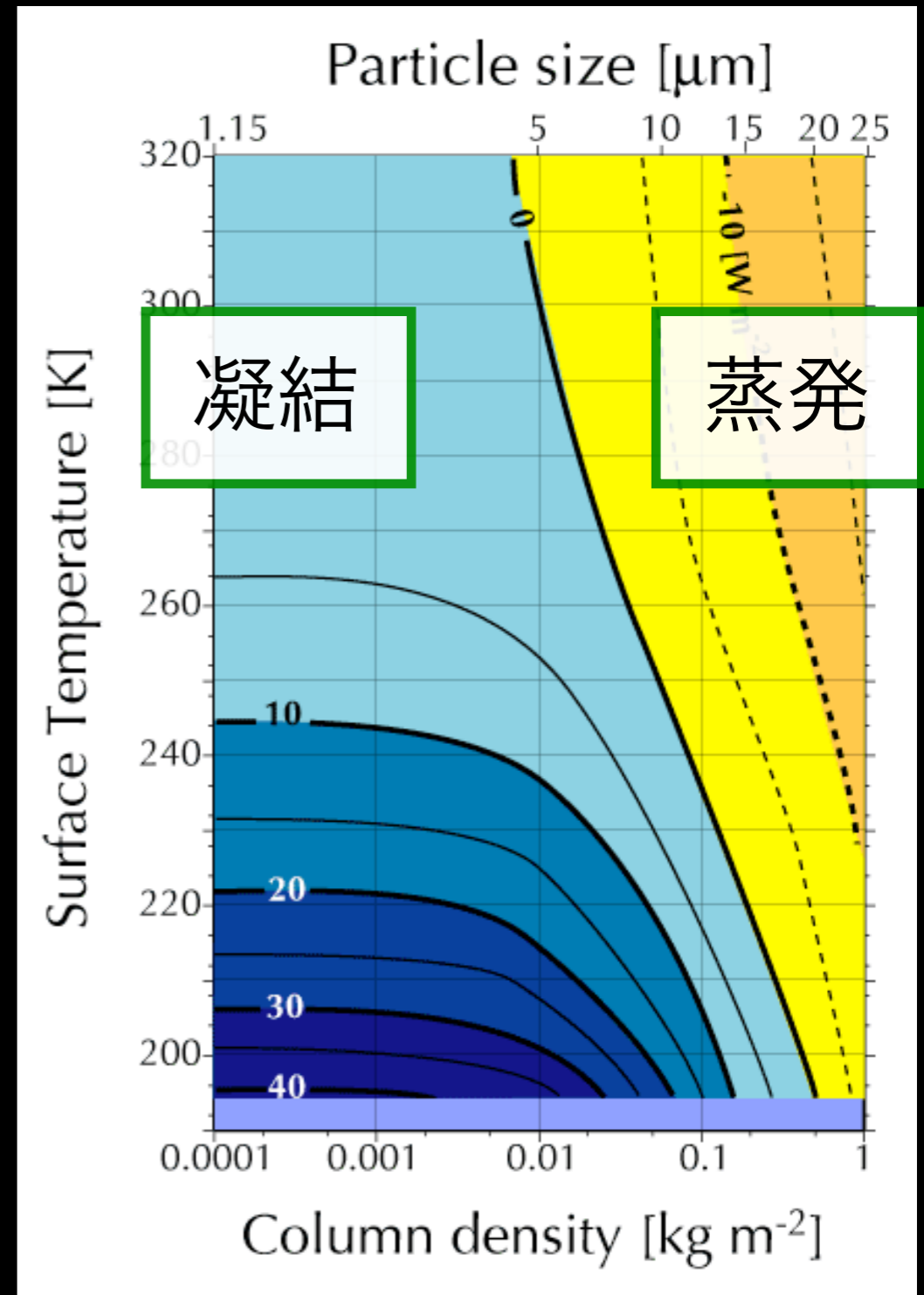
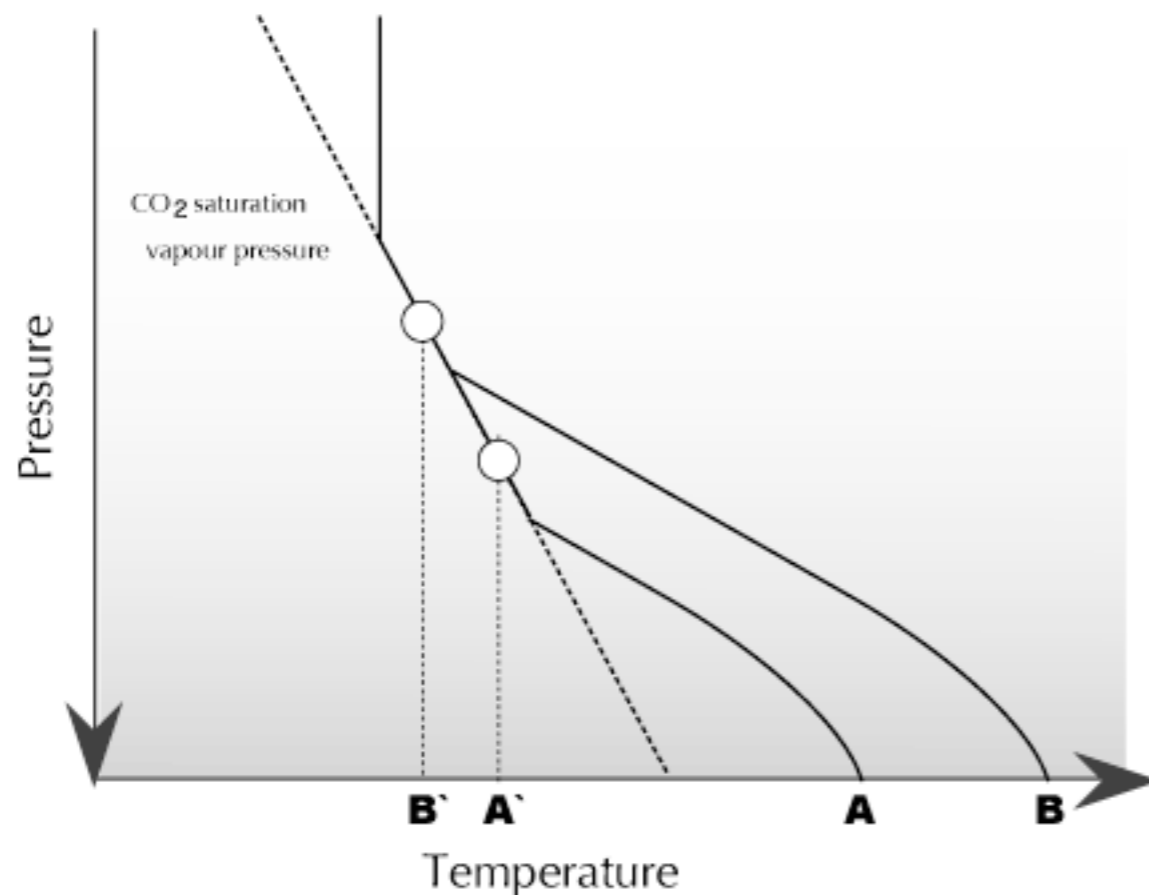
* 散乱層では ランダムモデル

バンドパラメータ(Houghton, 2002)

CO₂ 凝結潛熱

(大気圧 1bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})

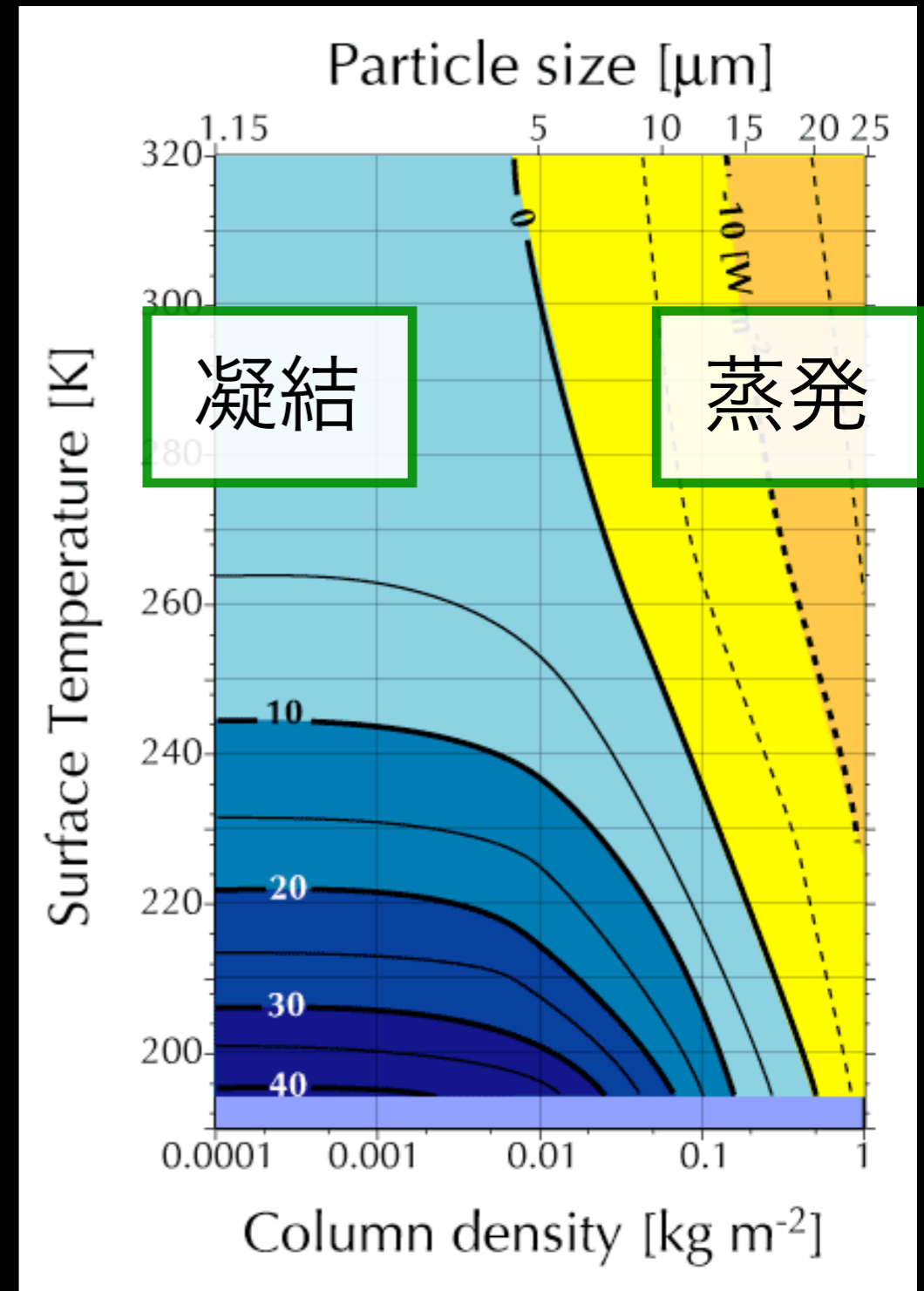
- 地表面温度が増加
- 雲温度低下



CO₂ 凝結潜熱

(大気圧 1bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})

- 地表面温度が増加
 - 雲温度低下
 - 自己冷却減少
 - 赤外加熱増加
- 粒径が増加
 - 加熱, 冷却とも増加
 - 結果的に潜熱減少へ

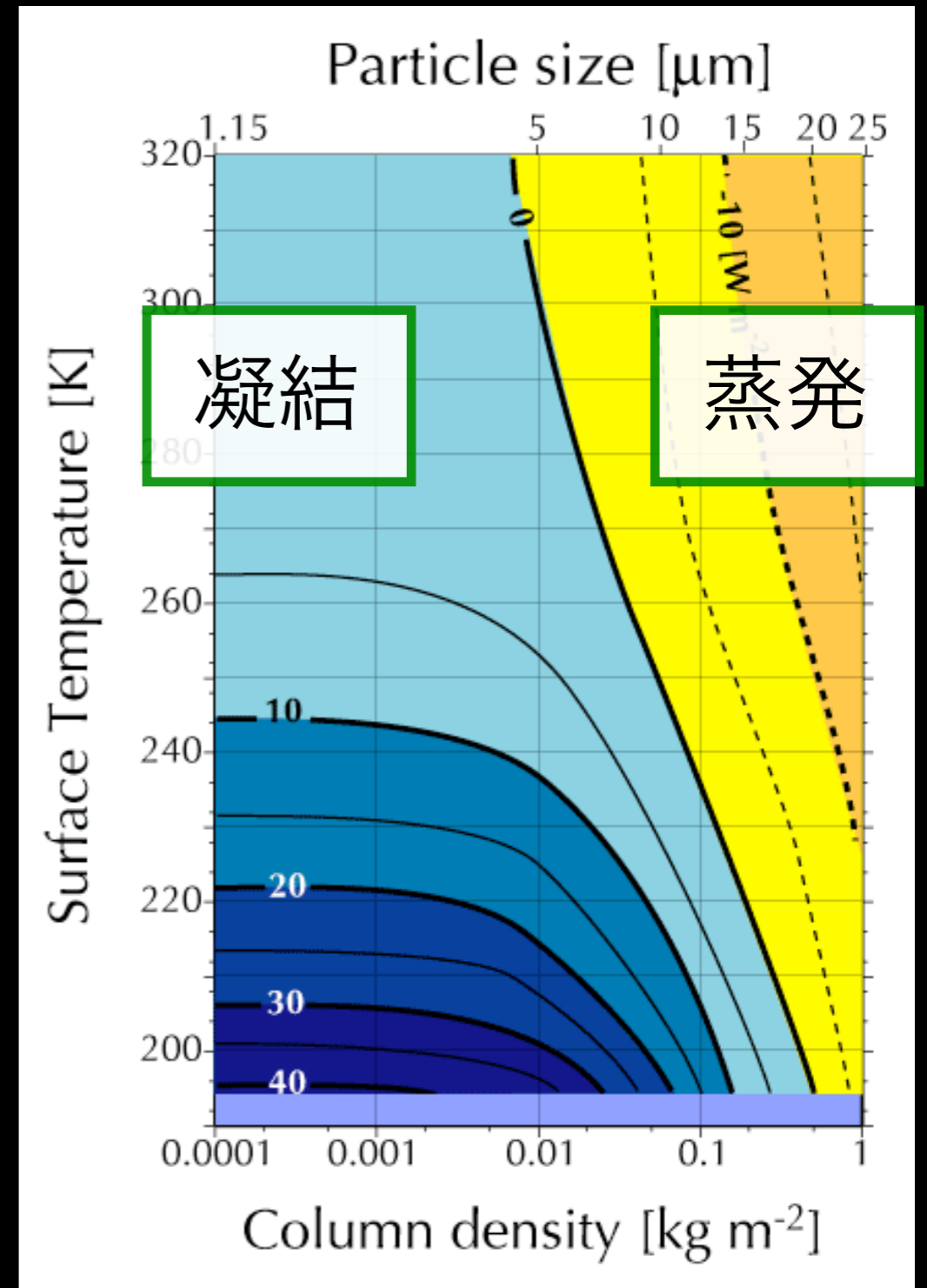


CO₂ 凝結潜熱

(大気圧 1bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})

● 粒径と凝結潜熱:

負の相関



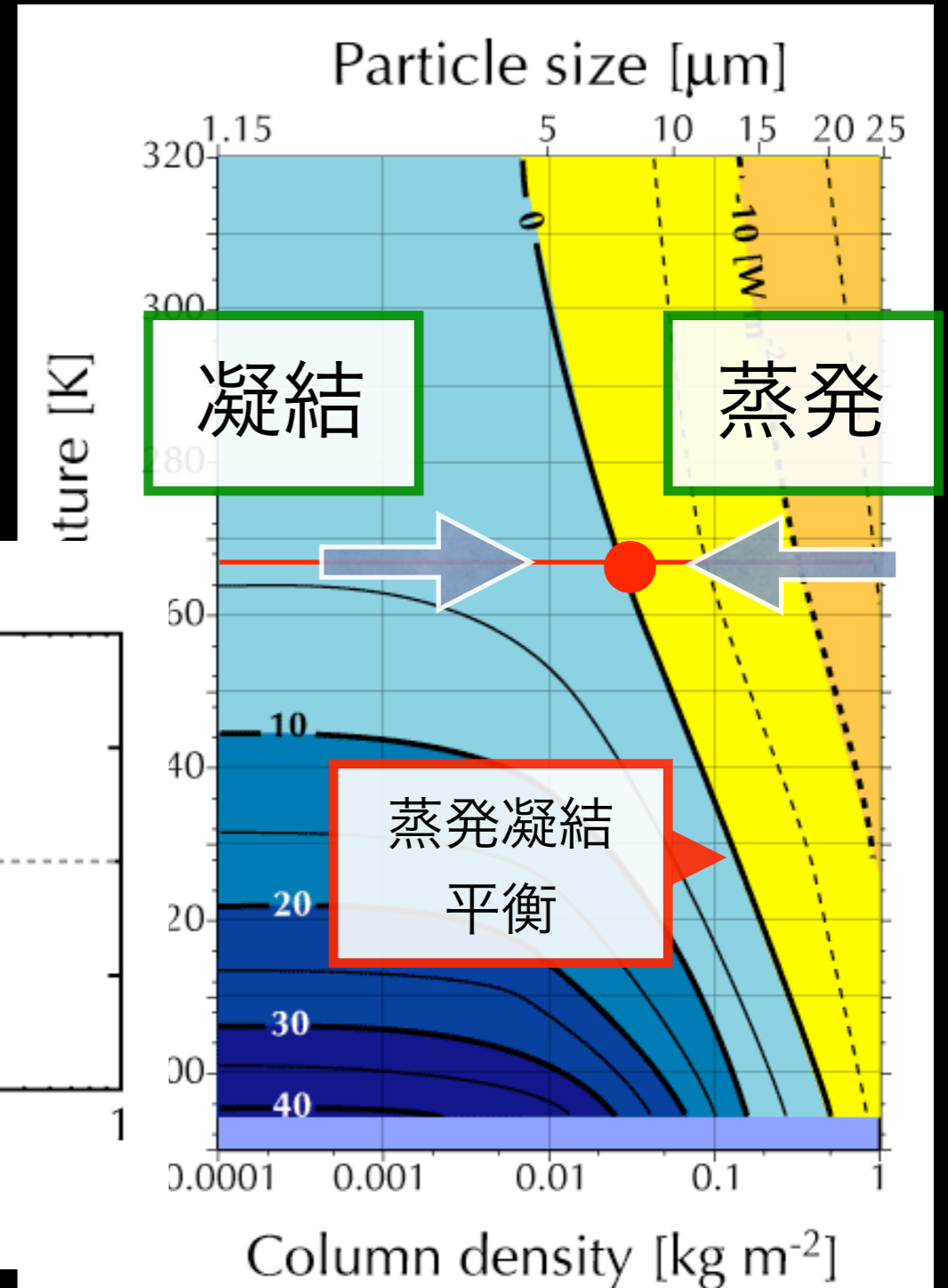
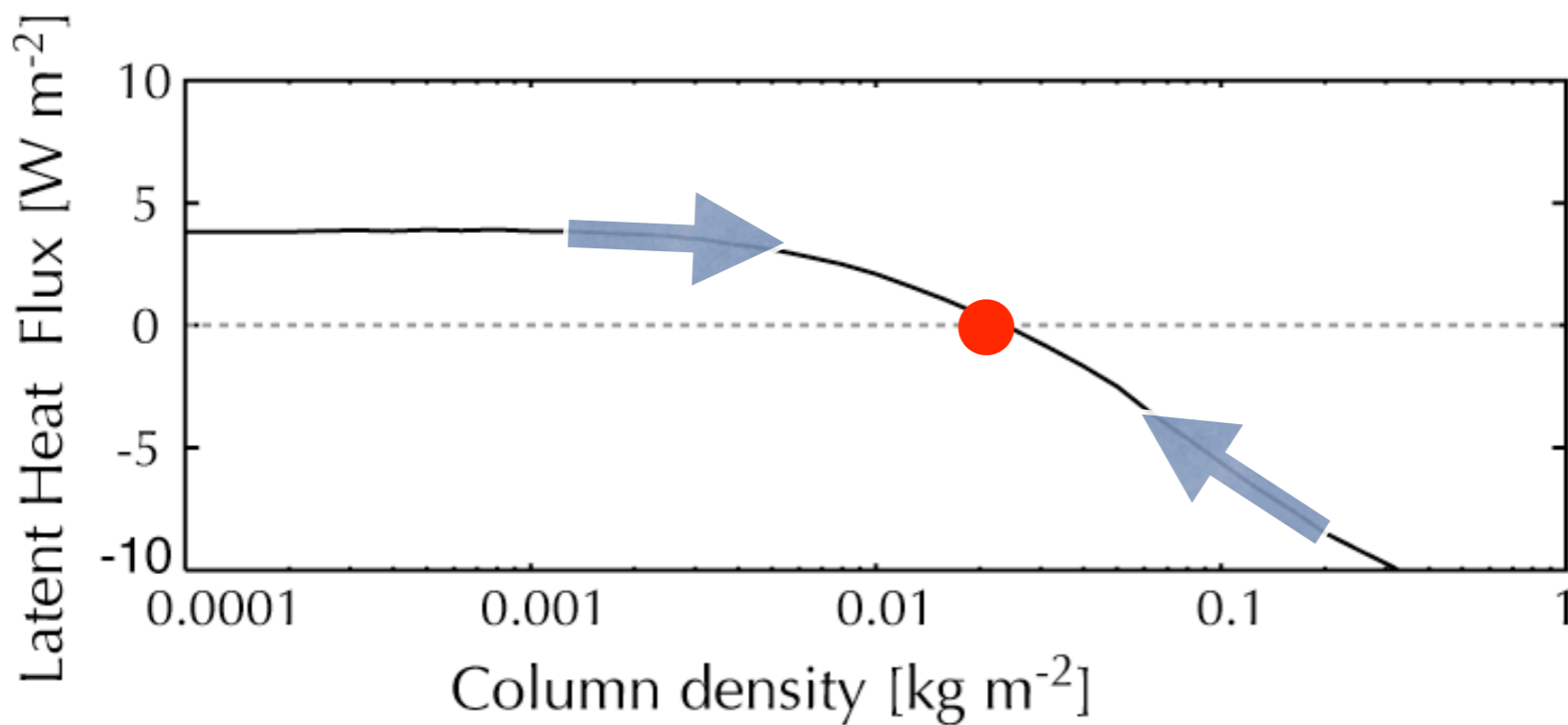
CO₂ 凝結潜熱

(大気圧 1bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})

● 粒径と凝結潜熱:

負の相関

* ただし, 放射緩和時間長



CO₂ 凝結潜熱

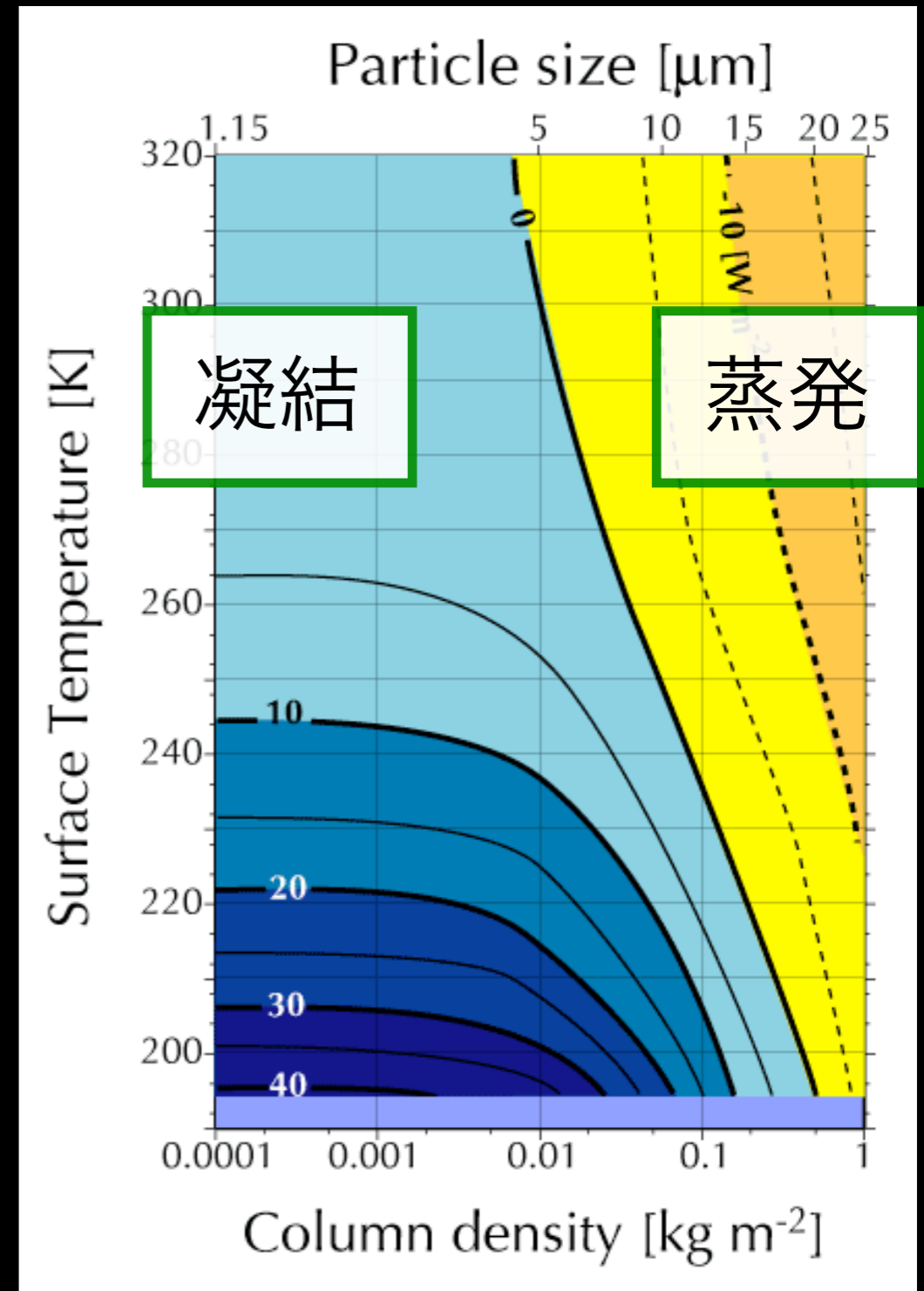
(大気圧 1bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})

● 粒径と凝結潜熱:

負の相関

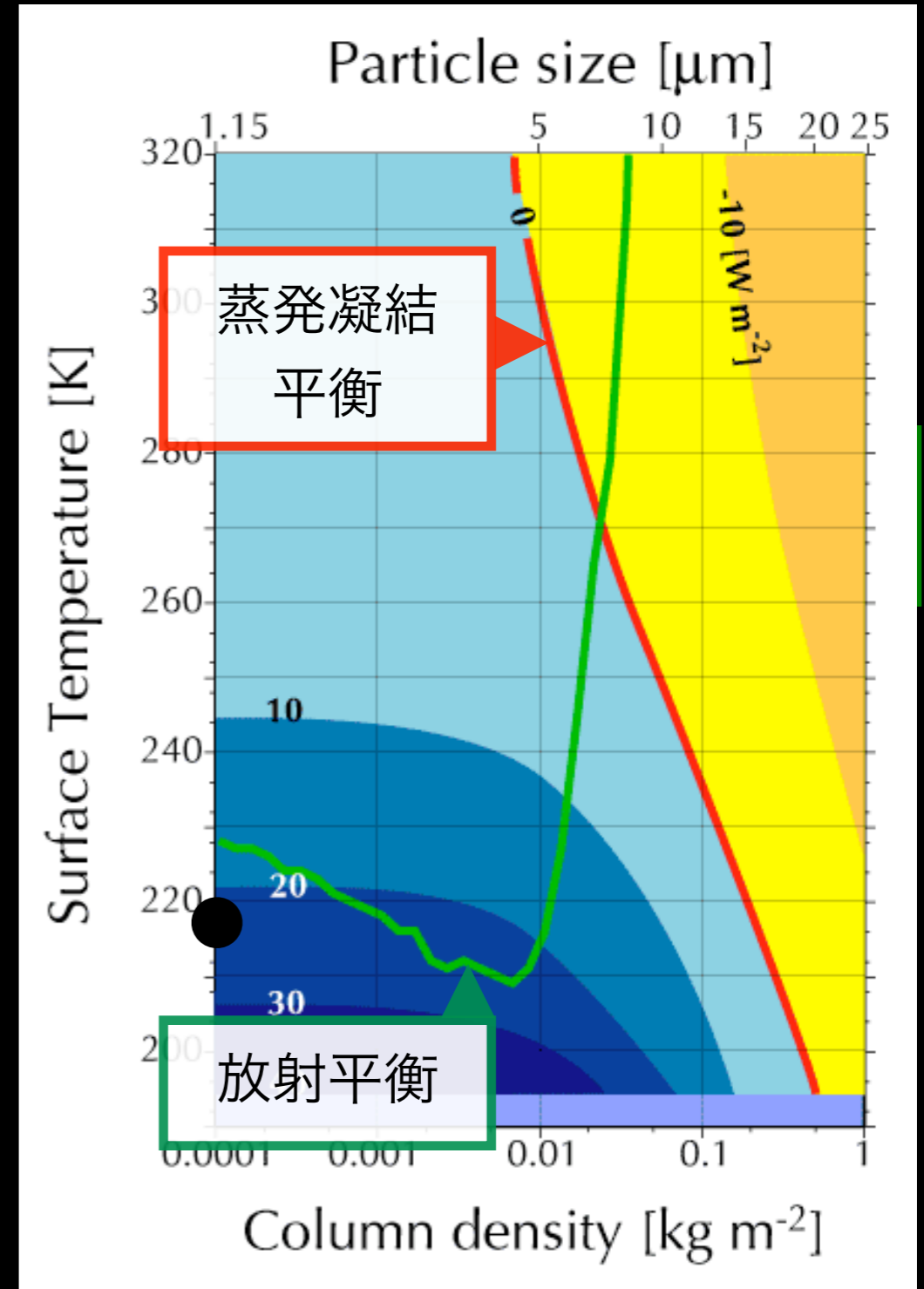
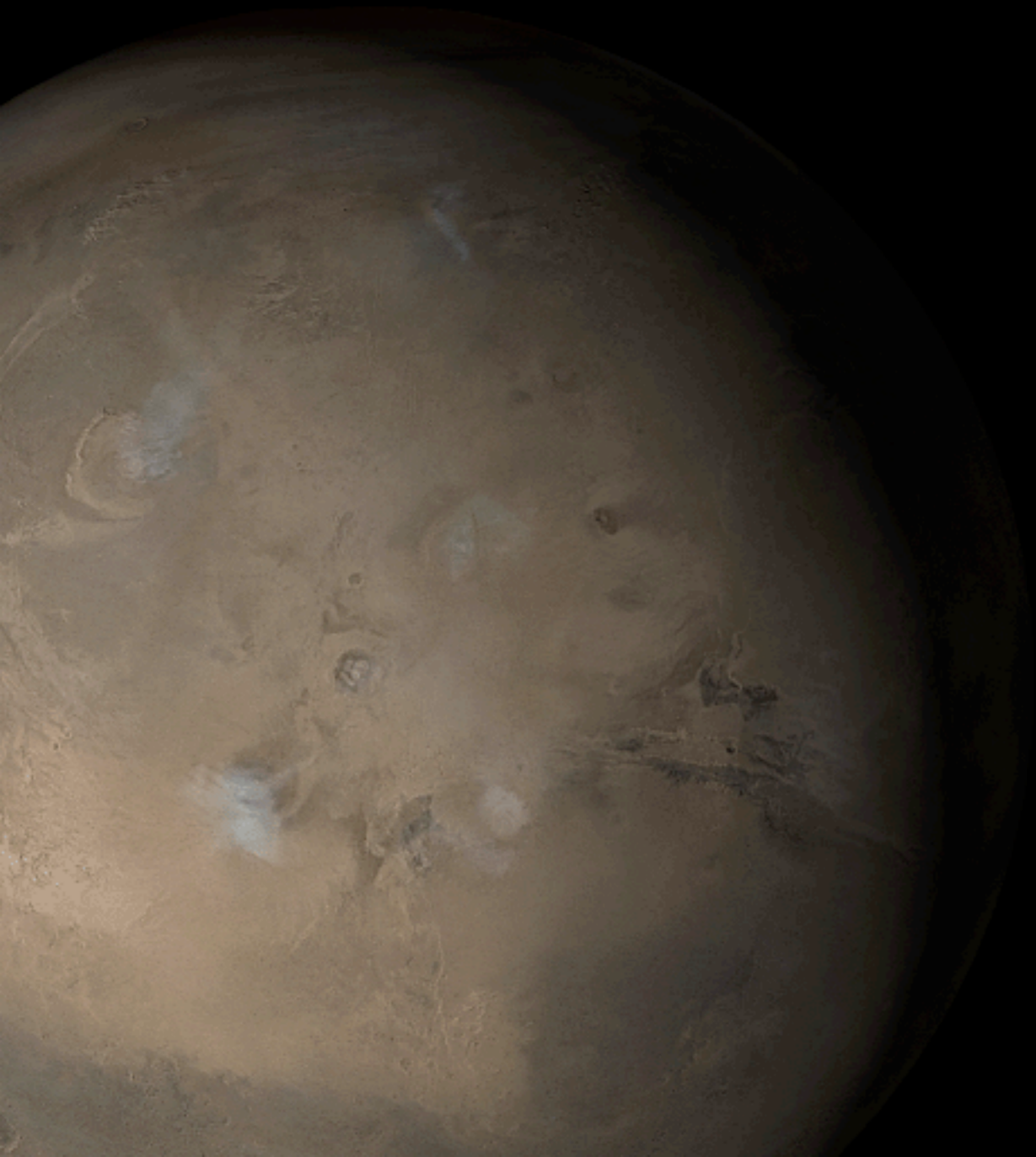
面密度変化に対する
凝結潜熱の負の
フィードバック

* ただし, 放射緩和時間長



地表面温度の見積もり

(大気圧 1bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})



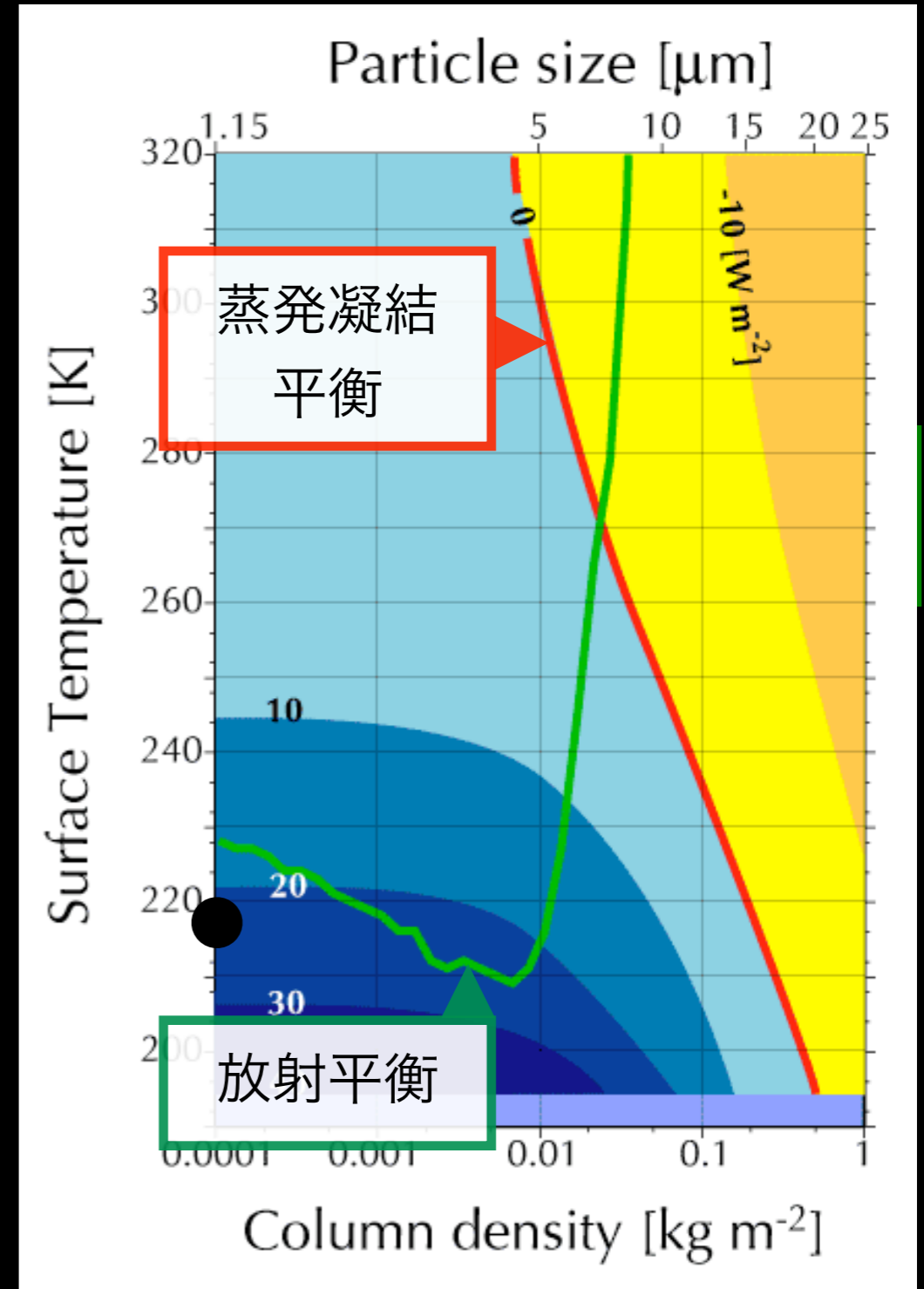
地表面温度の見積もり

(大気圧 1bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})

時定数

蒸発凝結(時間)

<< 放射(週)



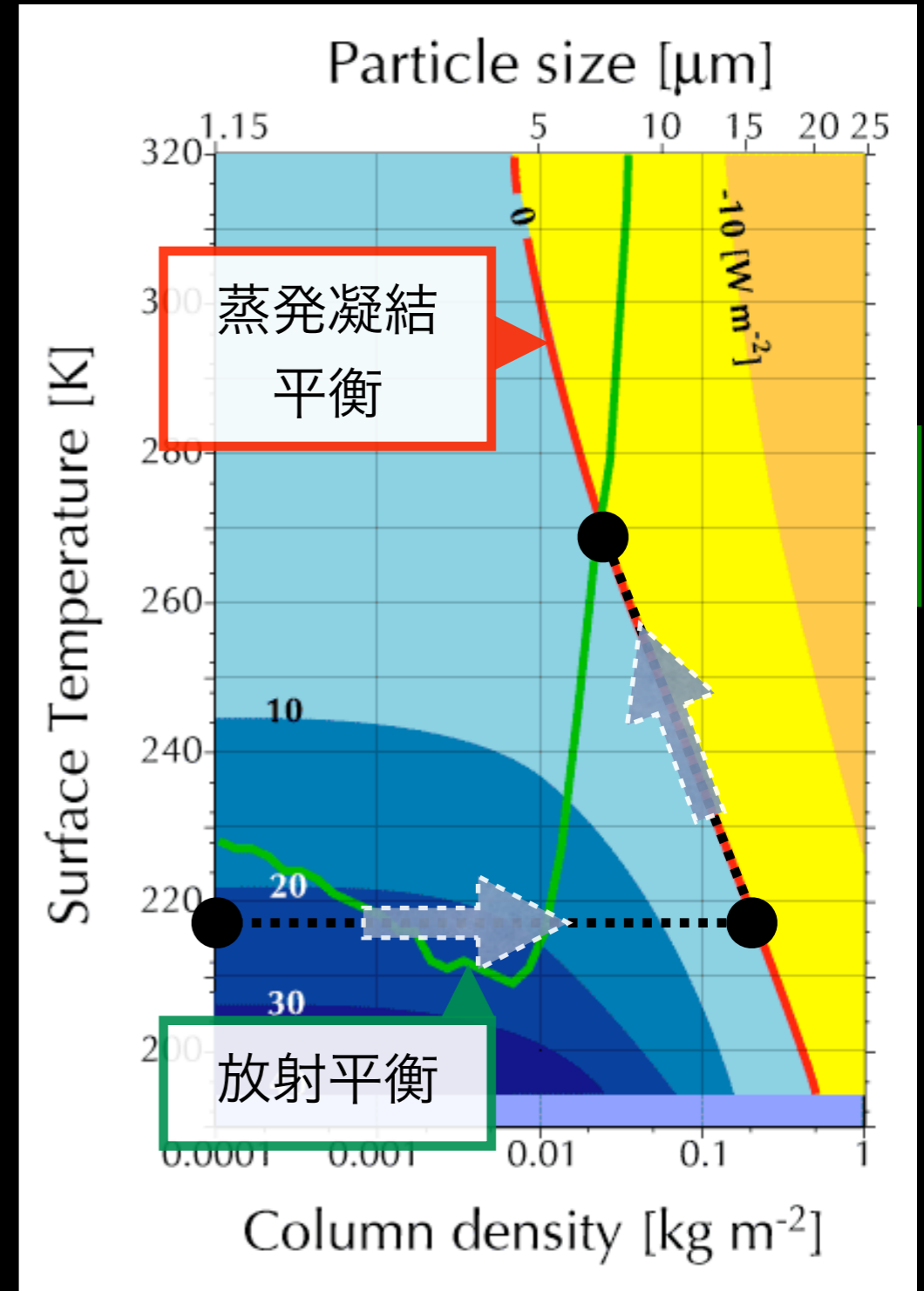
地表面温度の見積もり

(大気圧 1bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})

時定数

蒸発凝結(時間)

<< 放射(週)



地表面温度の見積もり

(大気圧 1bar, 凝結核面数密度 10^{10} m^{-2})

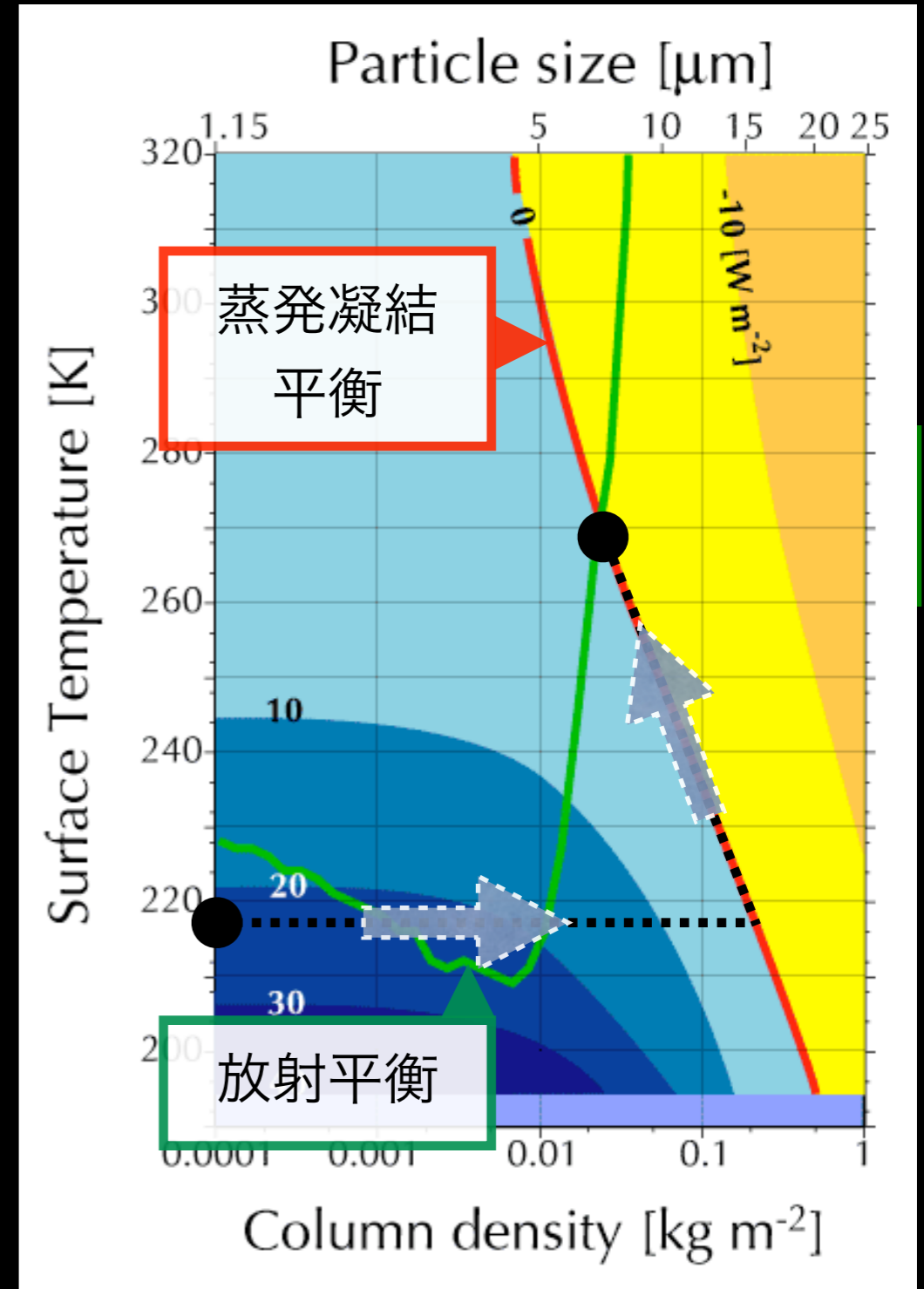
時定数

蒸発凝結(時間)

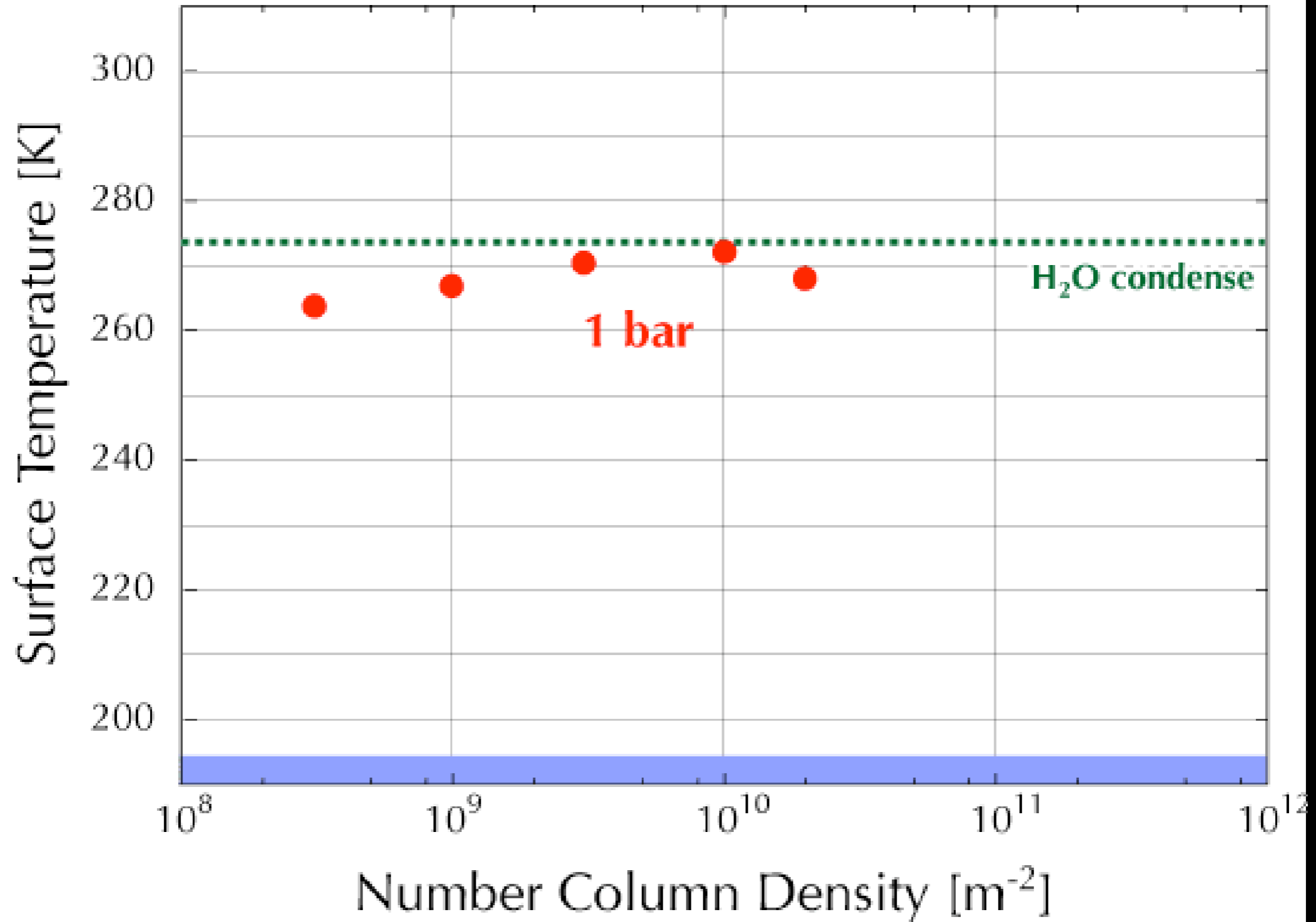
<< 放射(週)

二平衡が満たされる値へ収束する

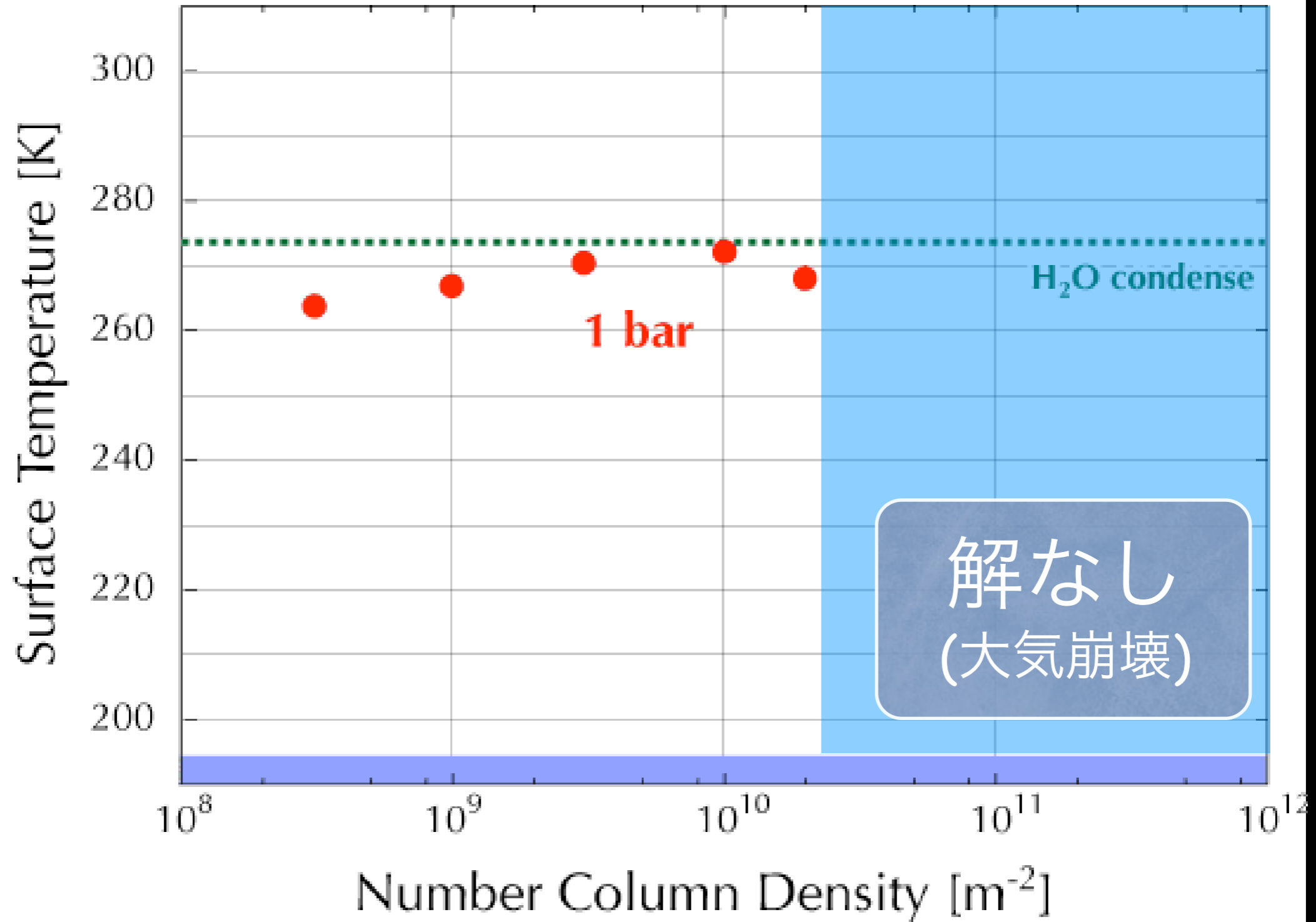
地表面温度: 271 K



地表面温度の見積もり (大気圧 1 bar)

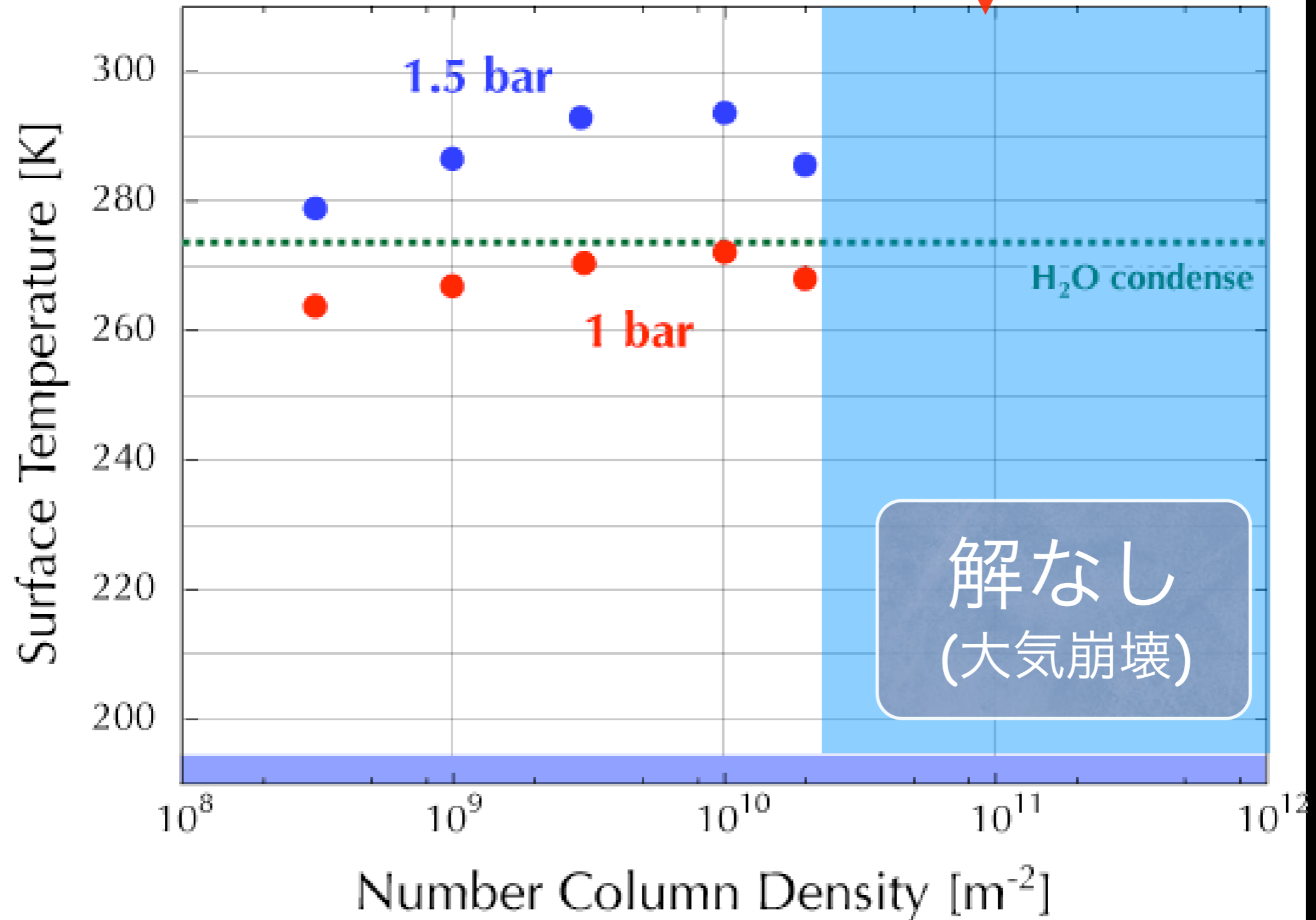


地表面温度の見積もり (大気圧 1 bar)



地表面温度の見積もり

現在の火星ダスト



粒径・面密度の決定機構

- 雲の粒径, 面密度を変化させるメカニズム
 - 衝突合体
 - 雲粒の重力沈降による雲層外への脱出
 - 放射過程における正味加熱(冷却)による蒸発(凝結)

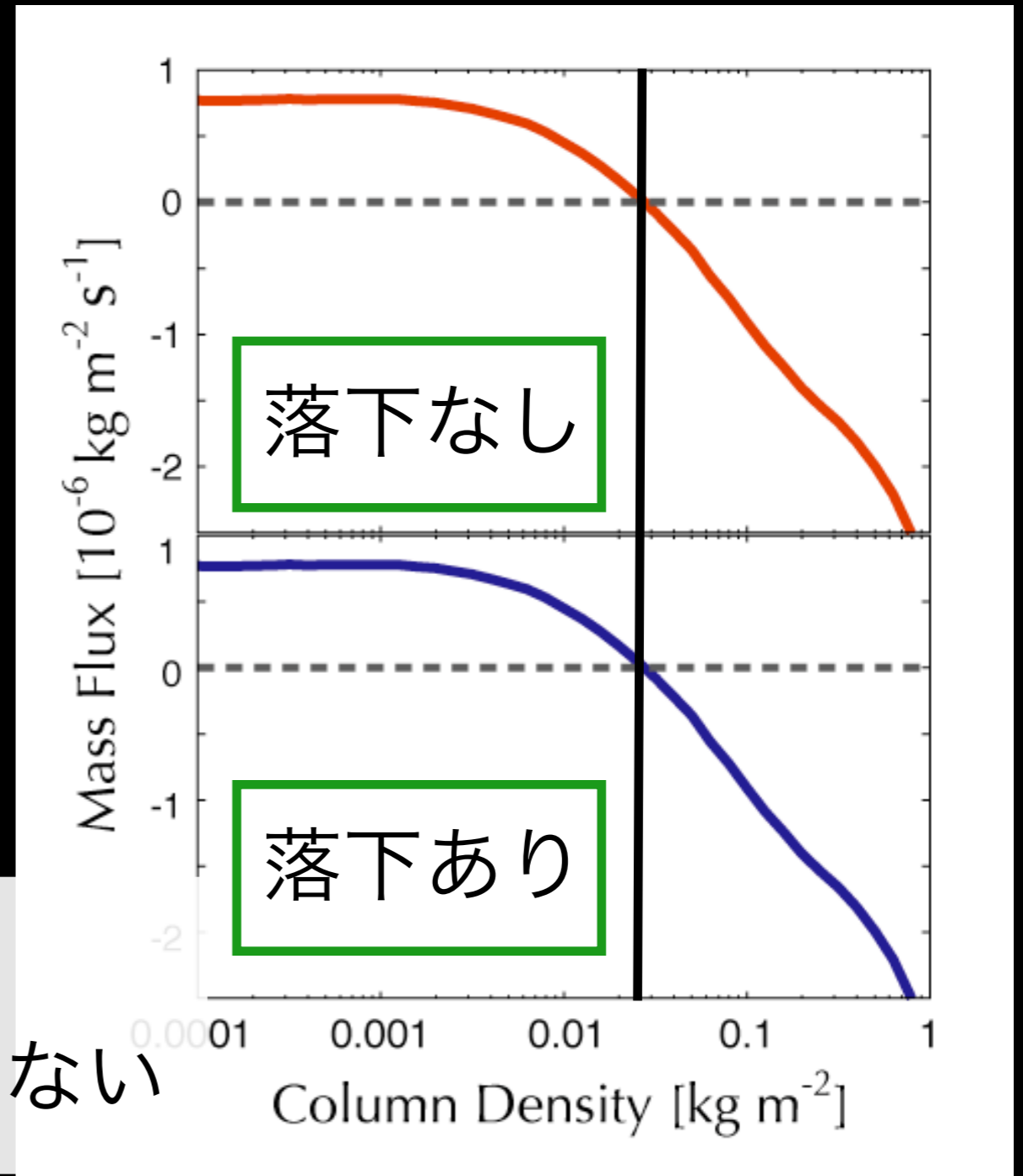
粒径・面密度の決定機構

- 雲の粒径, 面密度を変化させるメカニズム
 - 衝突合体
 - 雲粒の重力沈降による雲層外への脱出
 - 放射過程における正味加熱(冷却)による蒸発(凝結)

雲粒落下の影響

- 落下量の見積もり
 - ストークス沈降速度
 - 雲の鉛直構造は一様
 - 雲層外に出た雲粒は蒸発

雲粒落下を考慮しても
雲面密度の見積もりは変わらない



まとめ

- 散乱温室効果問題：雲の粒径, 質量面密度の見積もりが重要
- 凝結核の面数密度を与えると, 雲面密度及び地表面温度が決定
 - CO₂ 凝結潜熱が雲の質量面密度を支配
 - 大気圧 1.5 bar, 凝結核の面数密度 10^9 -- 10^{10} m⁻² で **地表面温度 > 273 K**
- CO₂ 凝結率と雲の質量面密度の負のフィードバックが気候の安定化に寄与

今後の課題・展開

- 真面目に 1D 放射対流平衡を解く
 - 散乱コード: adding 法
 - 気体吸収: K 分布 or バンド
 - 雲層の鉛直構造を考慮
- 大気圧依存性
 - 温室効果極大値の評価
- CH₄ による影響の見積もり
 - 雲は存在し続けることを期待...
- なんとかして? 凝結核の面数密度を推定

参考文献

- Houghton J. 2002 : The Physics of Atmospheres third edition, Cambridge Univ. Press.,pp320
- NASA/JPL Planetary Photojournal, <http://photojournal.jpl.nasa.gov/>
- Kasting J. F.,1991 : CO₂ condensation and the climate of early mars, Icarus, Vol. 94, pp. 1-13
- Pierrehumbert R. T. and Erlick C., 1998 : On the scattering greenhouse effect of CO₂ ice cloud, J. Atmos. Sci., Vol.55, pp.1987-1903
- Pollack,
- Mischna, M. A., Kasting, J. F., and Freedman, R., 2000, Influence of carbon dioxide clouds on early Martian climate, Icarus, 145, pp.546–554
- Yokohata T., Kosugita K., Matatsugu O.,and Kuramot K., 2002 : Radiative absorption by CO₂ ice cloud on early mars: Implication on the stability and greenhouse effect of clouds, Proceedings of 35th ISAS Lunar and Planetary Science Conference, pp.13--16
- Warren, S. G. 1986 : Optical constraints of carbon dioxide ice, Appl. Opt, VOL.95,pp.2650-2674CO₂

雲の質量面密度見積もり

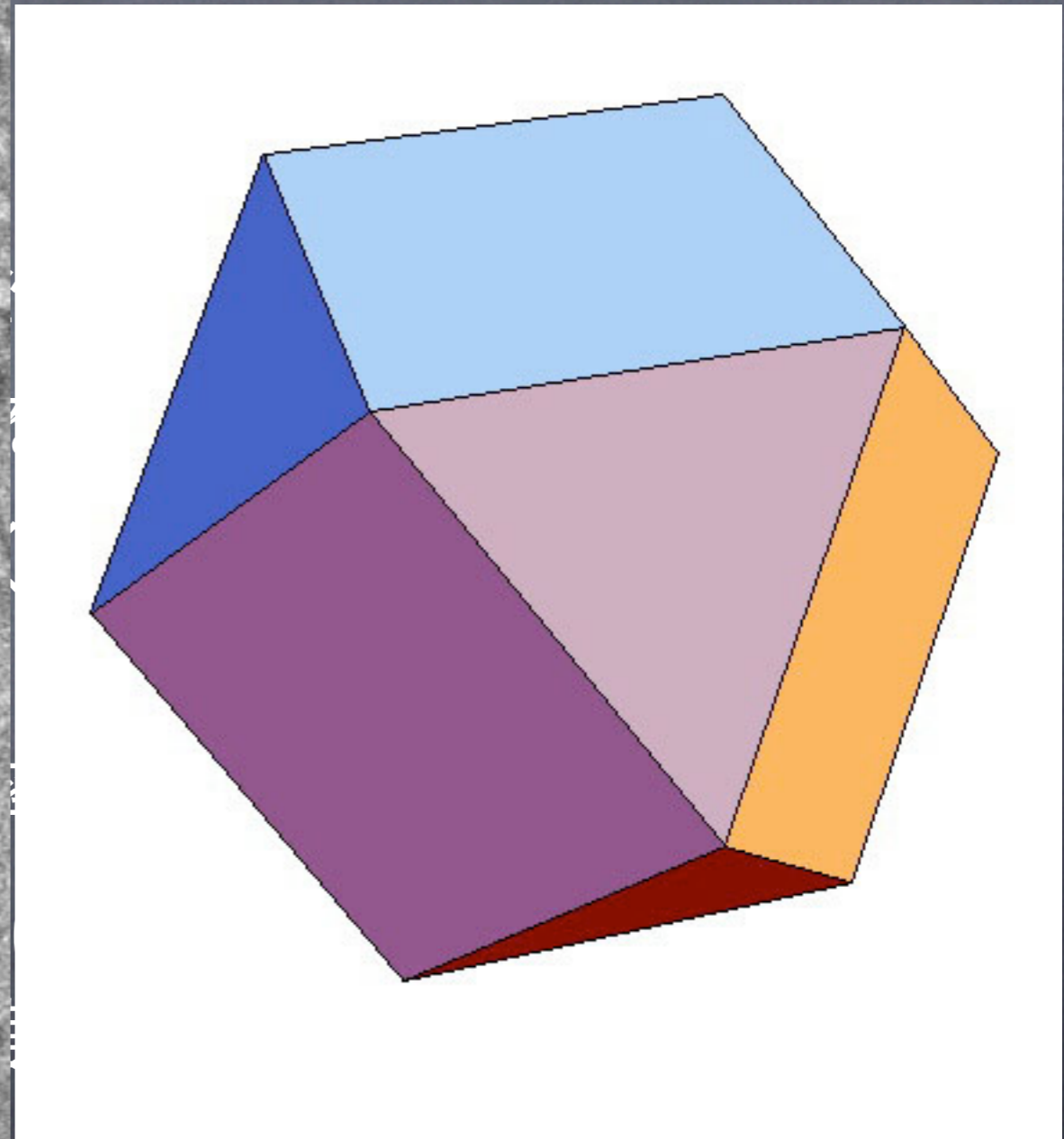
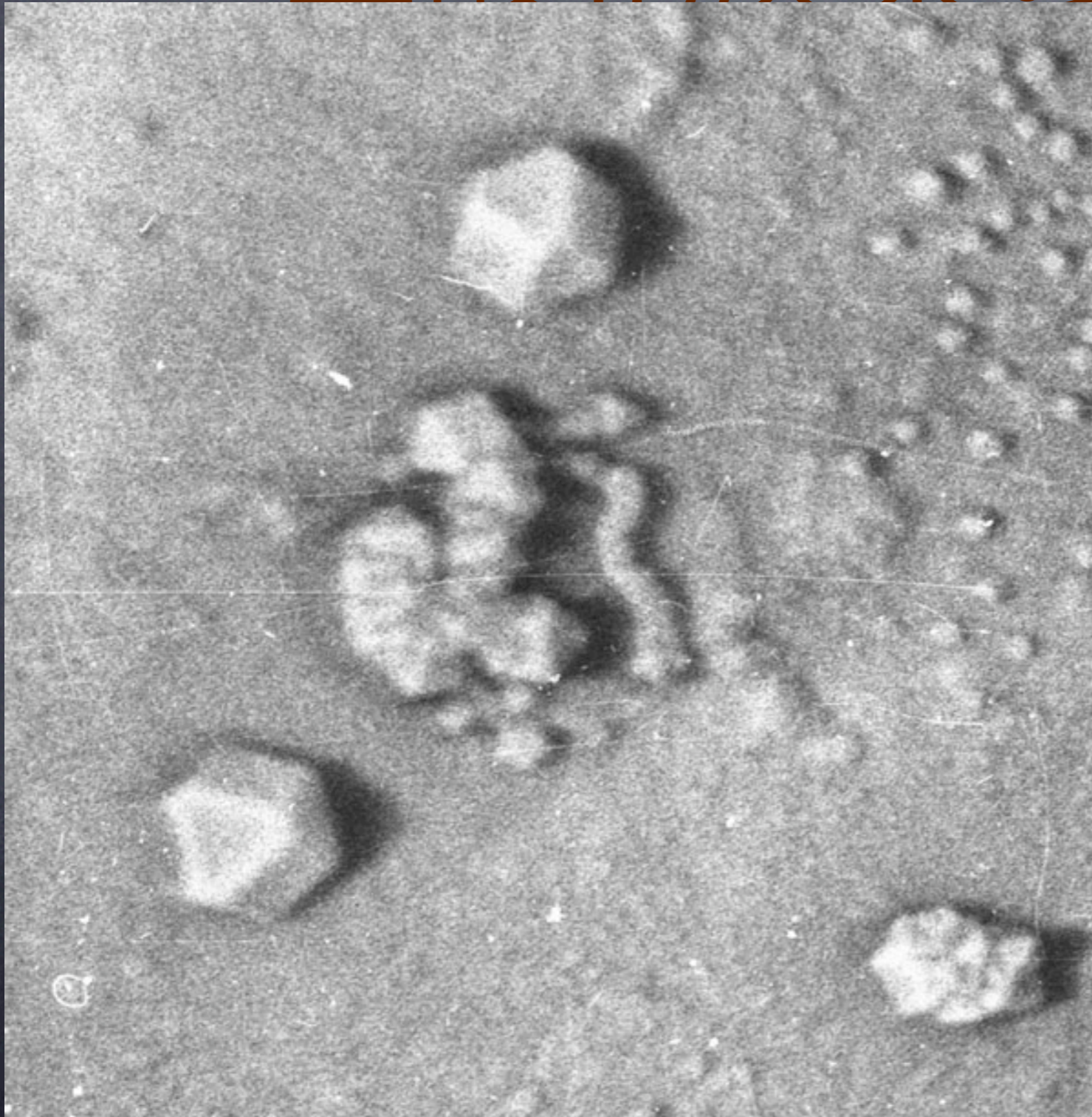
(Yokohata et al. 2002)

- 二酸化炭素凝結 - 雲粒の重力沈降 = 0
- 雲層のエネルギーバランスモデル
 - 凝結潜熱 = 放射過程による正味冷却量
- 雲への赤外加熱の過大評価？
 - 大気下層を黒体近似
- 凝結/蒸発による粒径の変化を無視

古火星環境での温室効果

- Pollack et al. 1987 (1D 放射対流平衡モデル)
 - 大気圧 > 5 atm で地表面温度 > 273 K .
- Kasting 1991 (1D 放射対流平衡モデル)
 - 大気圧 > 1 atm で大気凝結. 温室効果は弱まる.
- Pierrehumbert and Erick 1998 (雲放射モデル)
 - 雲粒半径 ~ 10 μm (惑星放射波長域)では雲の散乱によって強い温室効果

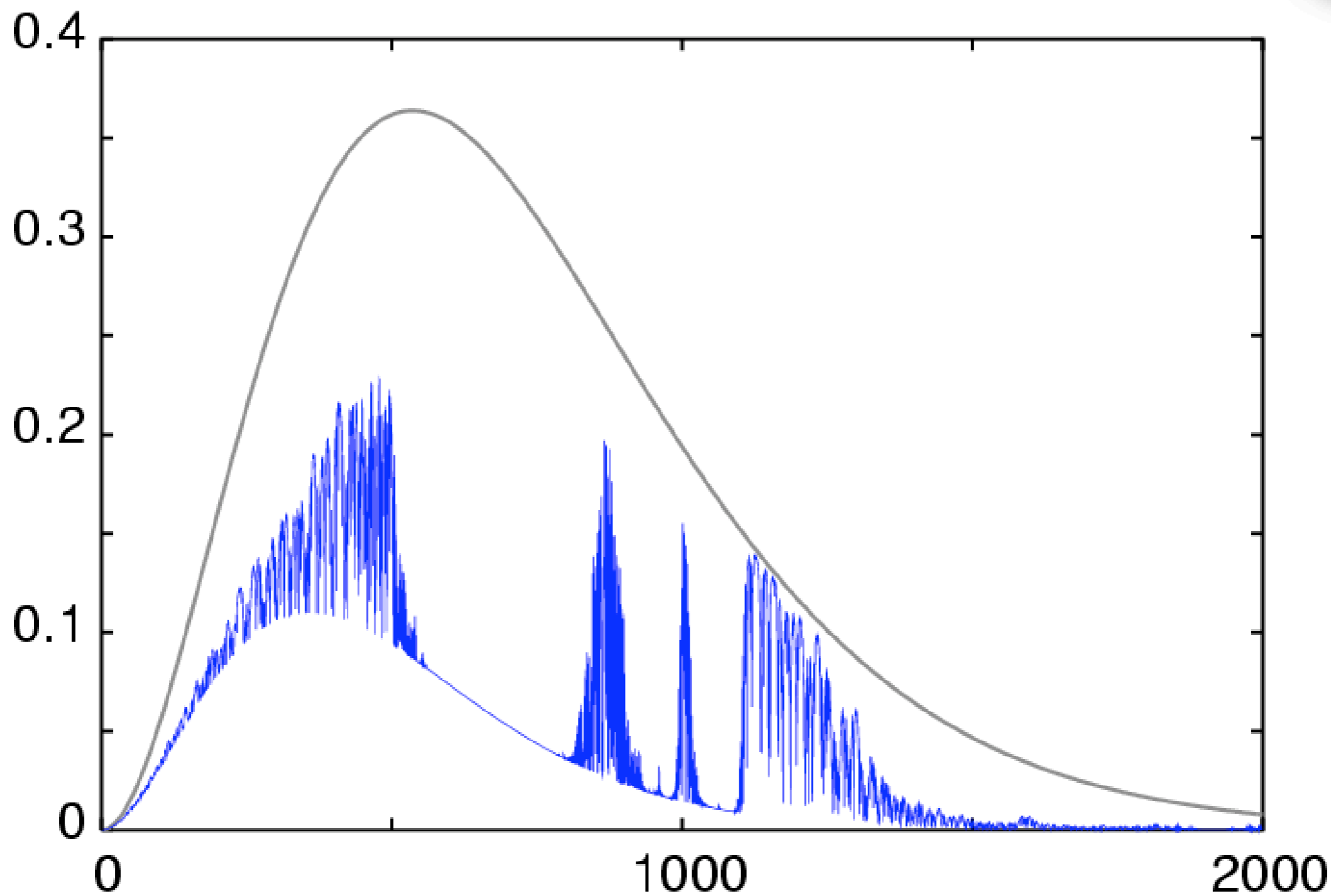
二酸化炭素の結晶構造



4snowflakes/cuboctahedronrh400.jpeg

<http://www.exo.net/~pauld/Mars/4snowflakes/snowflakes200.jpeg>

雲への入射スペクトル



地球型惑星の比較

	火星	地球	地球 (堆積岩)	金星
大気組成				
N2	2.7	78.1	1.0	1.8
O2	-	20.9	-	-
Ar	1.6	0.9	0.01	0.02
CO2	95.3	0.035	99.0	98.1
CO2 分圧 [bar]	6×10^{-3}	10^{-4}	80	90