

集積期のタイタンの原始大気

北海道大学 理学院 宇宙理学専攻

M2 惑星宇宙グループ 倉本研究室

三上 峻

@衛星研究会, 定山溪

2013/08/07-09

目次

- 巨大氷衛星・タイタン
- 集積期のタイタン
- モデル説明
- 周土星円盤の場合(タイタン原始大気)
- 周木星円盤の場合(ガニメデ原始大気)

巨大氷衛星・タイタン

巨大氷衛星



タイタン

質量: 1.345×10^{23} kg

半径: 2,575 km

平均密度: $1,880 \text{ kg m}^{-3}$

大気: 1.5 bar (N_2, CH_4)



カリスト

質量: 1.076×10^{23} kg

半径: 2,403 km

平均密度: $1,851 \text{ kg m}^{-3}$



ガニメデ

質量: 1.482×10^{23} kg

半径: 2,634 km

平均密度: $1,936 \text{ kg m}^{-3}$

タイタン

- 土星最大の衛星
 - 半径: 2,575 km
 - 平均密度: $1,880 \text{ kg m}^{-3}$
 - 氷: 岩石 ~ 50:50
- 大気: 1.5 bar
 - N_2 (95 %), CH_4 (5 %)
 - 材料物質中の氷に含まれる揮発性成分由来
- エアロゾル
 - 光化学反応により生成
- 内部構造: 分化
 - 慣性能率因子: 0.342 ± 0.001 (less et al. 2010)

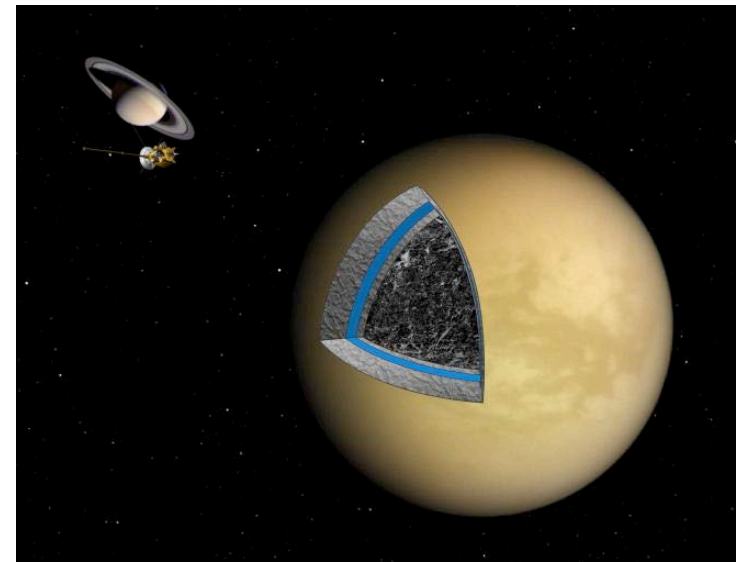
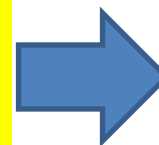


図: タイタン (NASA)

なぜ厚い大気を持つのか？
どのようにして内部が分化したのか？
これらの特徴はいつ得られたのか？

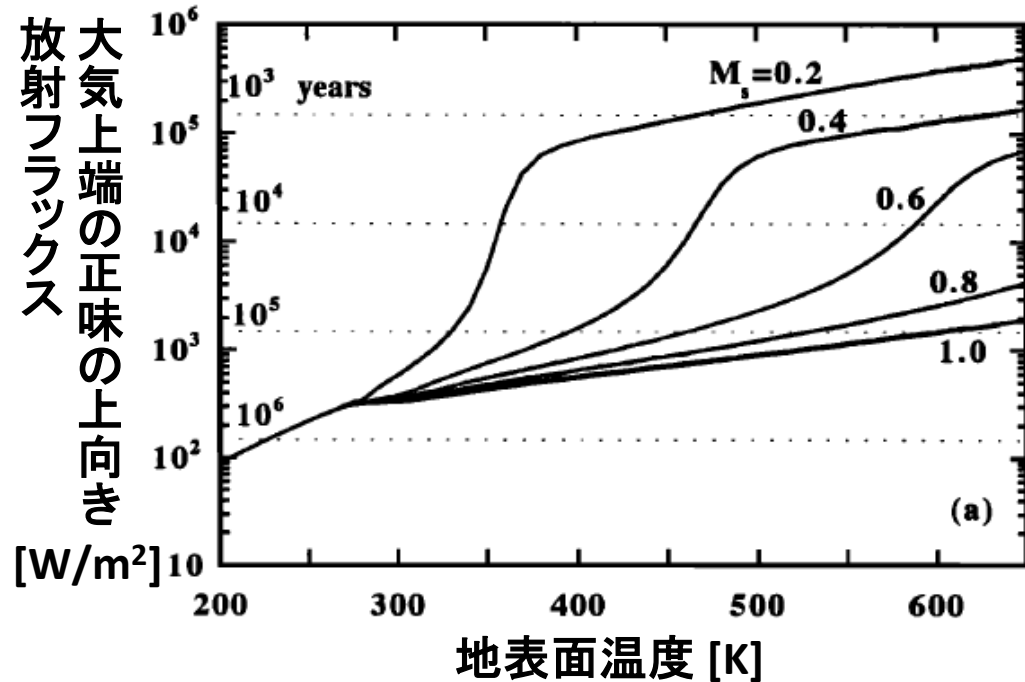


集積期のタイタンの理解
が重要

集積期のタイタン

タイタン集積期の熱史 (Kuramoto and Matsui 1994)

- 真空中で形成
- 材料物質中の氷の蒸発による水蒸気大気の保温効果を考慮
- 大気上端から放射されるフラックス F_{net}^{up} を地表面温度の関数として見積もる
- 集積エネルギーフラックスと F_{net}^{up} のバランスで表面温度が決定



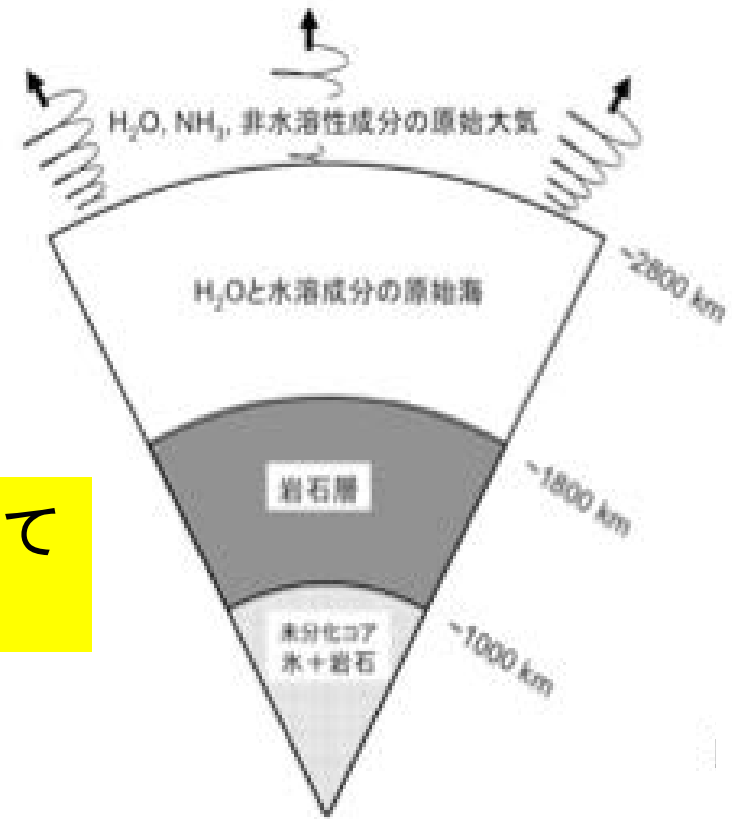
図：地表面温度と F_{net}^{up} の関係

集積時間 $< 10^5$ yr のとき表面温度 > 500 K
表層の氷の融解・十分内部が分化
材料物質由来の非水溶性ガスの大気への放出

形成期の内部構造

- 原始海
 - H_2O と水溶性成分
- 原始大気
 - $\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3 +$ 非水溶性成分

大気が非常に高温な場合、熱膨張してガスが流出する可能性

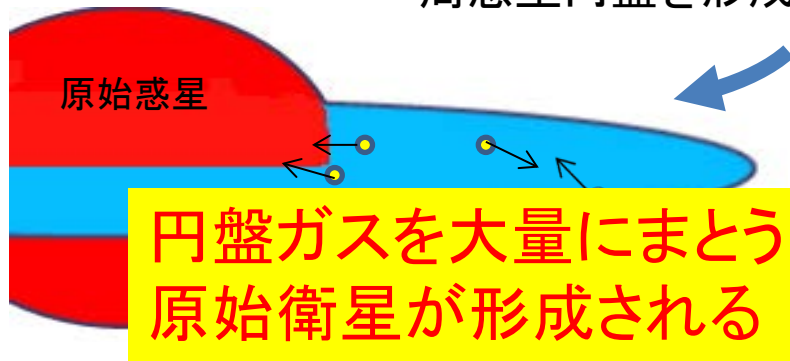


タイタンの形成期の大気と内部構造
(Planetary Geology News; 倉本, 2007)

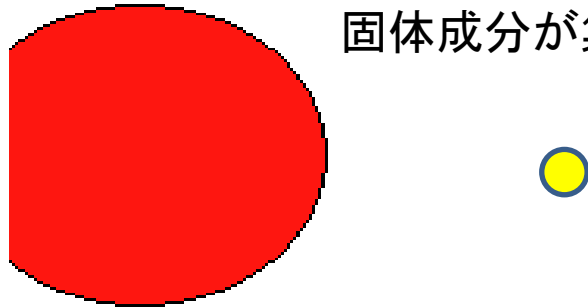
タイタン形成場：周惑星円盤

原始惑星に原始惑星系円盤ガスと
固体成分が流入

流入したガスと固体成分が
周惑星円盤を形成



固体成分が集積し衛星形成



- 厚い円盤でのタイタンの形成
(Lunine and Stevenson 1982)

- 高温円盤での形成
- 円盤ガスによる保温効果
- 分化

厚い円盤では衛星が落下し
きって残らない

- 薄い円盤でのタイタンの形成
(Barr et al., 2010)

- 形成時間 $\sim 10^{4-6}$ yr
- 未分化の可能性

円盤ガスの保温効果を考慮
していない

薄い周惑星円盤内で形成するタイタン大気の保温効果を再検討する

モデル説明

モデル概要

- 円盤と静力学的に接続するタイタン大気の平衡構造を、地表面温度の関数として求める
 - ヒル半径($\sim 20 r_{\text{Titan}}$)で大気と円盤が接続
 - 円盤の圧力と温度を境界条件として与える
 - 周惑星円盤のモデル(Canup and Ward 2002,2006) から
0.1-10 Pa , 50 K
 - 大気成分は H_2 , He, H_2O
 - H_2 - H_2 , H_2 -He 衝突誘起吸収と水蒸気の吸収を考慮
 - 吸収係数は灰色近似
 - H_2O 量は成層圏: 混合比一定, 対流圏: 飽和蒸気圧の式
 - 圏界面の高度を様々に与えることで地表面温度を振る
 - 求めた平衡構造から大気上端からの熱放射フラックスを算出し, これと地表面温度との関係を得る

大気構造

大気は対流圏と成層圏から成ると仮定

- 温度

- 成層圏: 放射平衡と仮定し, 圏界面の正味の上向き放射フラックスを与えて温度構造を仮定

$$\sigma T_{\text{atm}}^4 = \sigma T_{\text{disk}}^4 + \frac{1}{2} F_{\text{trop}}^{\text{net,up}} \left(\frac{3}{2} \tau + 1 \right) \frac{r_{\text{trop}}^2}{r^2}$$

- 対流圏: 湿潤断熱減率に従って温度構造を与える

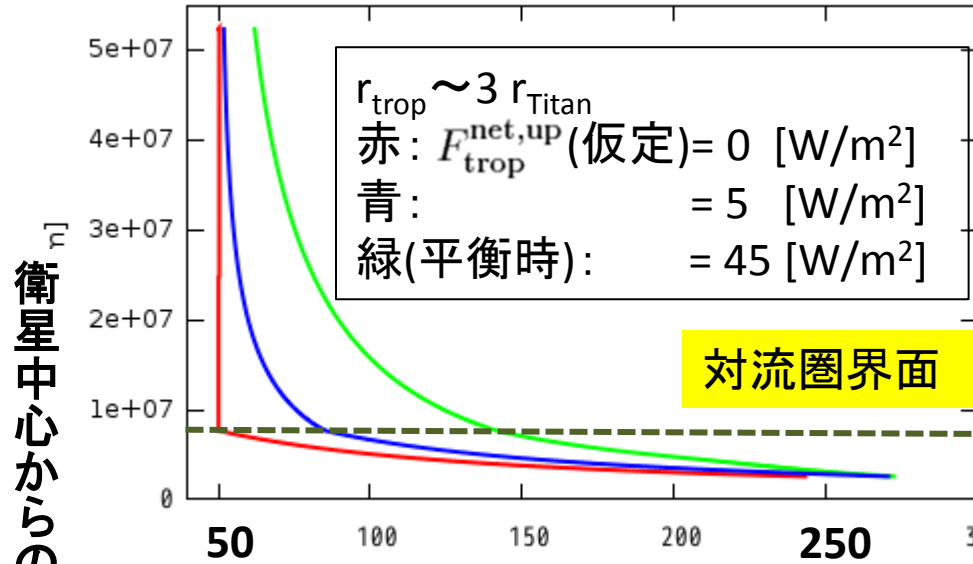
$$\frac{dT}{dr} = \frac{\frac{4}{3} \pi G \bar{\rho} r}{C_{pg}} \frac{\left[1 + \frac{L_v M_{\text{vape}}}{(P-e) R_B T} \right] \left(1 + \frac{e\epsilon}{P-e} \right)}{1 + \frac{e\epsilon}{C_{pg}(P-e)} \left[C_{pw} - \frac{L_v}{T} + \frac{L_v^2 M_{rv} P}{(P-e) R_B T^2} \right]}$$

(Lunine and Stevenson 1982)

- 平衡構造

- 与えた大気構造に対し放射計算して得られるフラックスと最初に与えたフラックスが等しくなる大気構造

温度分布(円盤境界条件: $T_{\text{disk}}=50 \text{ K}$, $P_{\text{disk}}=10 \text{ Pa}$)

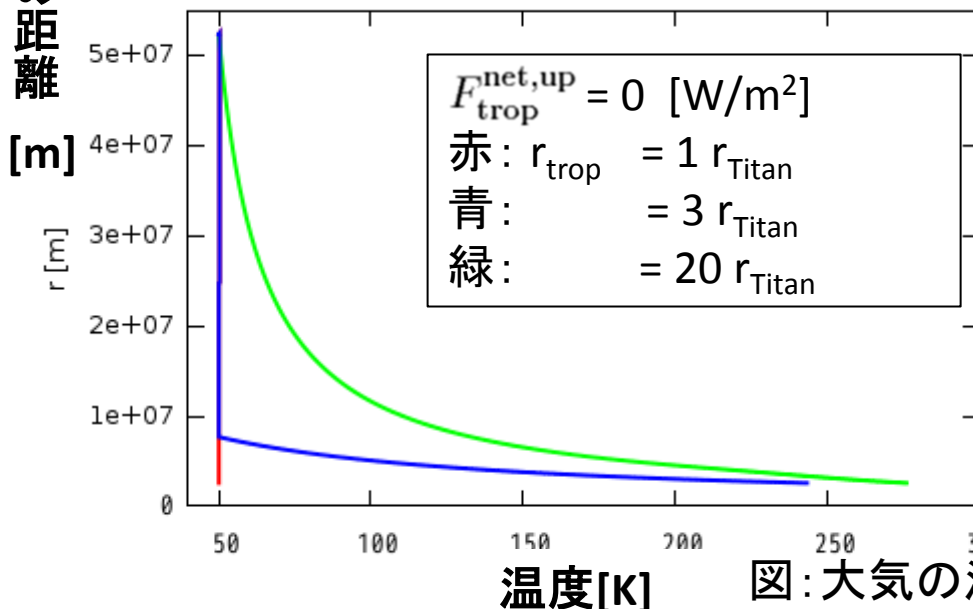


成層圏の温度分布の式

$$\sigma T_{\text{atm}}^4 = \sigma T_{\text{disk}}^4 + \frac{1}{2} F_{\text{trop}}^{\text{net,up}} \left(\frac{3}{2} \tau + 1 \right) \frac{r_{\text{trop}}^2}{r^2}$$

対流圏の温度分布の式
(湿潤断熱減率)

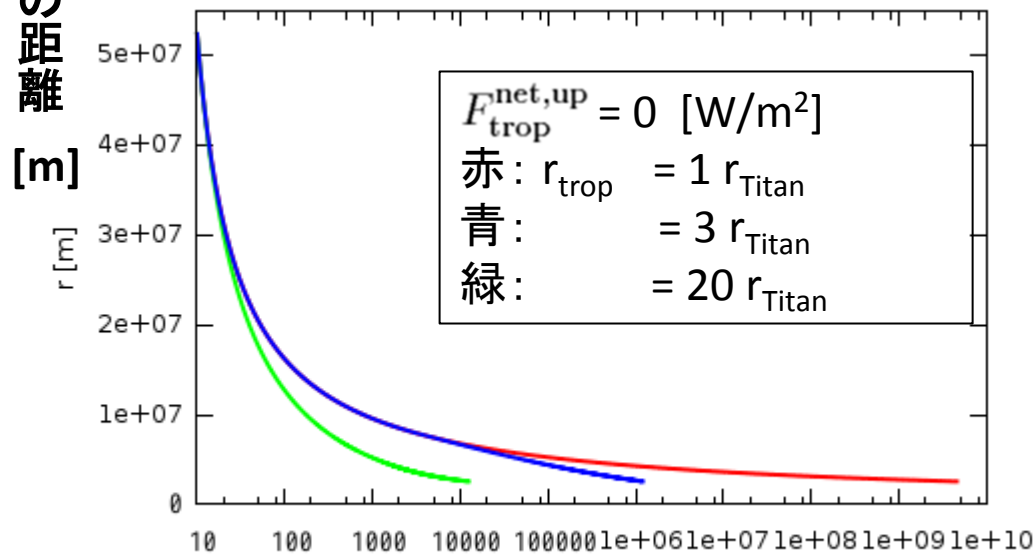
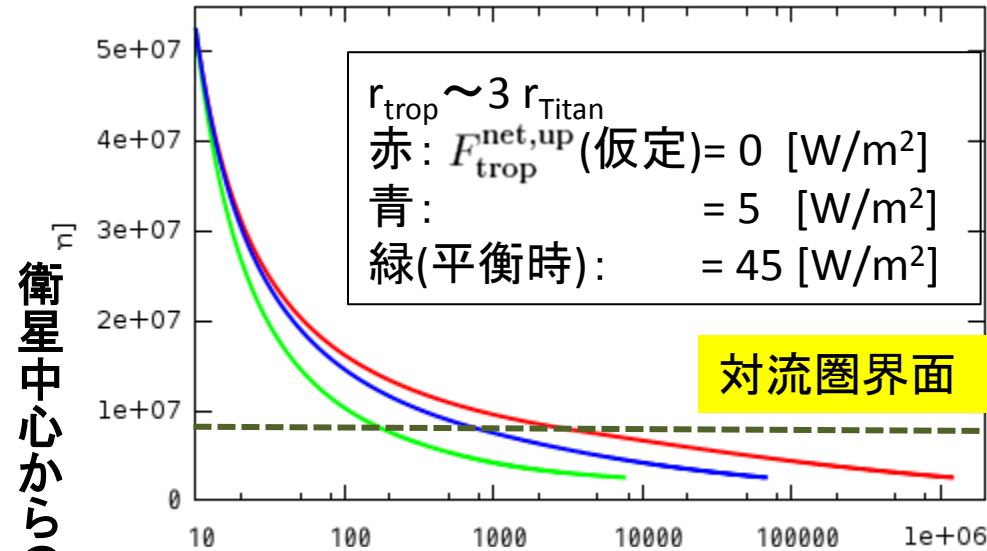
$$\frac{dT}{dr} = \frac{\frac{4}{3} \pi G \bar{\rho} r}{C_{pg}} \frac{\left[1 + \frac{L_v M_{\text{vape}}}{(P-e) R_B T} \right] \left(1 + \frac{e e}{P-e} \right)}{1 + \frac{e e}{C_{pg} (P-e)} \left[C_{pw} - \frac{L_v}{T} + \frac{L_v^2 M_{rv} P}{(P-e) R_B T^2} \right]}$$



r_{trop} が高いほど
 $F_{\text{trop}}^{\text{net,up}}$ が大きいほど
 地表面温度は高くなる

図: 大気の温度分布

圧力分布(円盤境界条件: $T_{\text{disk}}=50\text{ K}$, $P_{\text{disk}}=10\text{ Pa}$)



静水圧平衡の式

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\rho_{\text{gas}} g(r)$$

r_{trop} が高いほど
 $F_{\text{trop}}^{\text{net,up}}$ が大きいほど
 地表面圧力は小さくなる

圧力[Pa] 図: 大気の圧力分布

放射伝達

- 放射伝達方程式(波長依存性無視, 散乱なし, LTE)

$$dI = -I d\tau + B d\tau$$

- 吸収係数(灰色)

$$\kappa_{\text{gas}} \rho_{\text{gas}} = \alpha_{\text{H}_2\text{H}_2} \left(\frac{P_{\text{H}_2}}{n_0 k T} \right)^2 + \alpha_{\text{H}_2\text{He}} \left(\frac{P_{\text{H}_2}}{n_0 k T} \right) \left(\frac{P_{\text{He}}}{n_0 k T} \right) + \kappa_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}}$$

- 光学的厚さ(幾何学的に算出)

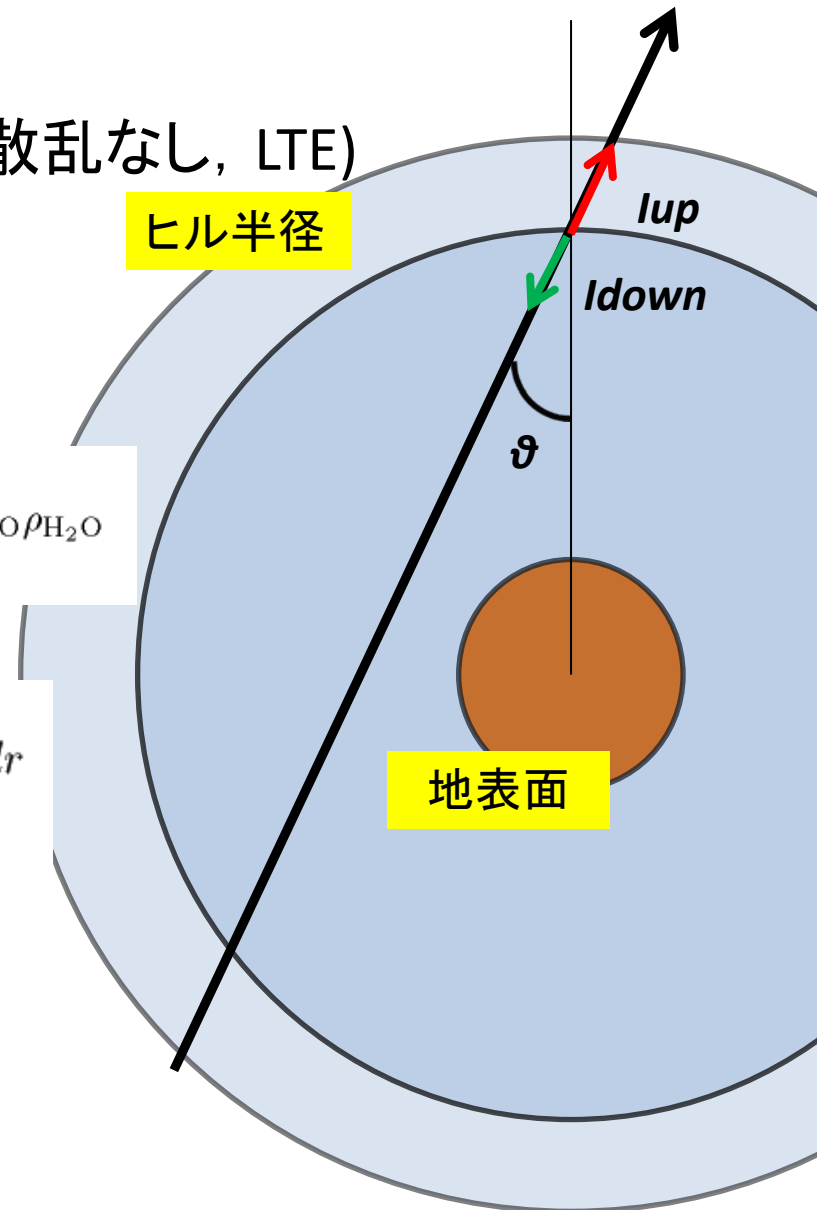
$$\tau = \int_{r_1}^{r_2} \kappa_{\text{gas}} \rho_{\text{gas}} \frac{r}{\sqrt{r^2 - r_{\text{rad}}^2 \sin^2 \theta}} dr$$

- 放射強度

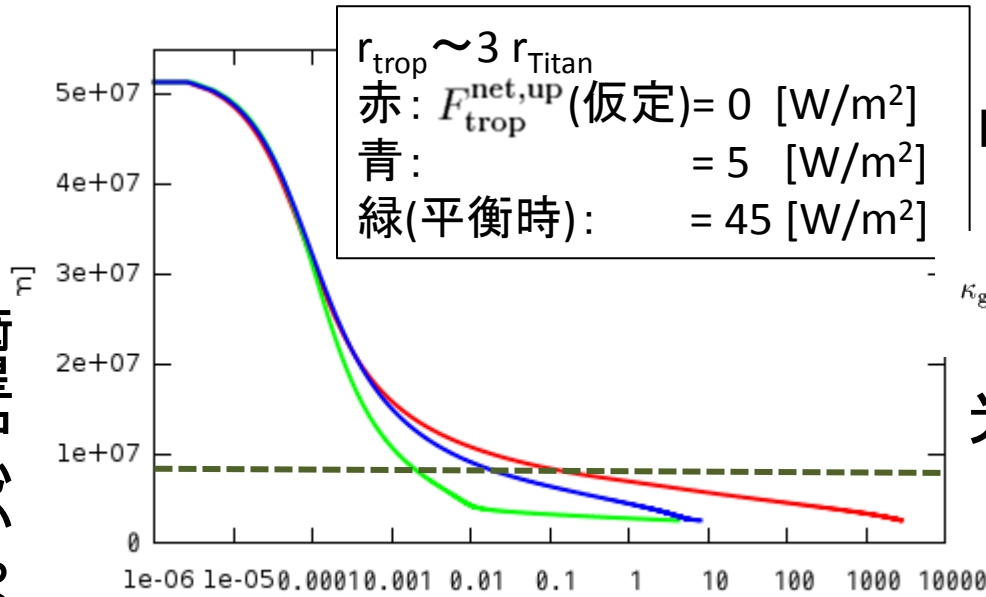
$$I(r, \theta) = B(T') e^{-\tau} + \int_0^\tau B(T) e^{-\tau'} d\tau'$$

- フラックス

$$F = 2\pi \int_0^{\pi/2} I \sin \theta \cos \theta d\theta \quad F_{\text{net}} = F_{\text{up}} - F_{\text{down}}$$



光学的厚さ分布 (円盤境界条件: $T_{\text{disk}}=50 \text{ K}$, $P_{\text{disk}}=10 \text{ Pa}$)



吸収係数

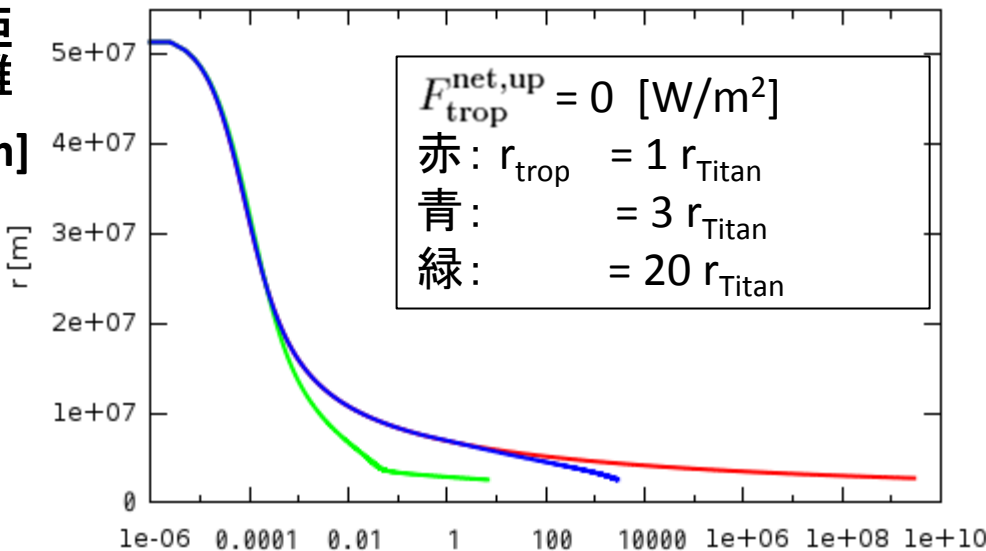
$$\kappa_{\text{gas}} \rho_{\text{gas}} = \alpha_{\text{H}_2\text{H}_2} \left(\frac{P_{\text{H}_2}}{n_0 k T} \right)^2 + \alpha_{\text{H}_2\text{He}} \left(\frac{P_{\text{H}_2}}{n_0 k T} \right) \left(\frac{P_{\text{He}}}{n_0 k T} \right) + \kappa_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}}$$

光学的厚さ

$$\tau = \int_{r_1}^{r_2} \kappa_{\text{gas}} \rho_{\text{gas}} \frac{r}{\sqrt{r^2 - r_{\text{rad}}^2} \sin^2 \theta} dr$$

衛星中心からの距離

[m]



r_{trop} が高いほど

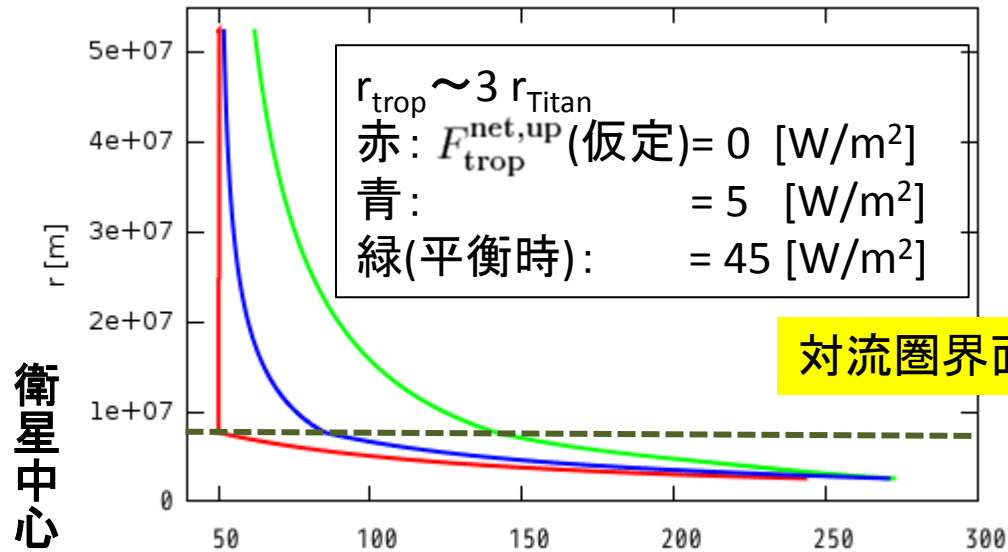
$F_{\text{trop}}^{\text{net,up}}$ が大きいほど

光学的に薄い大気が形成

光学的厚さ

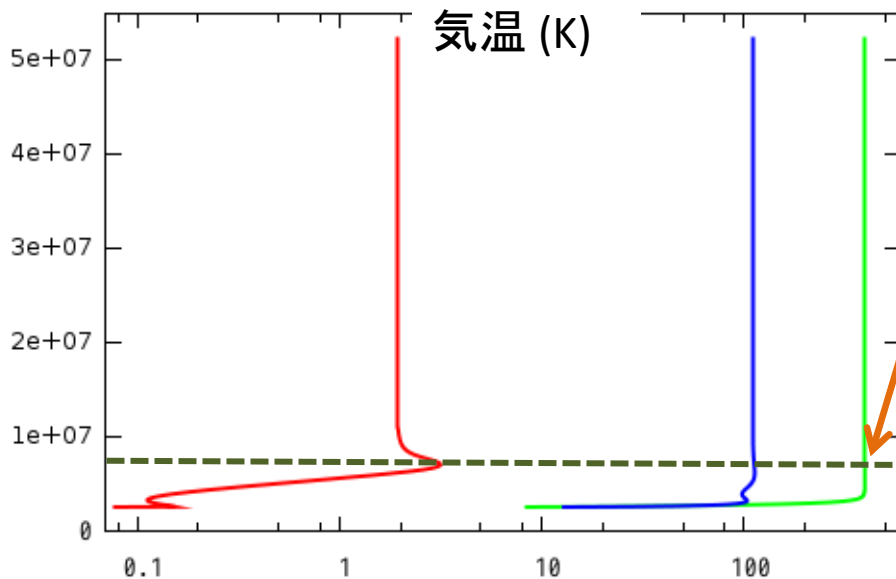
図: 大気的光学的厚さの分布

フラックスの算出 (円盤境界条件: $T_{\text{disk}}=50 \text{ K}$, $P_{\text{disk}}=10 \text{ Pa}$)



衛星中心からの距離 [m]

対流圏界面



気温 (K)

正味の上向き放射フラックス [W/m²]
(衛星表面積あたりの値)

算出した圏界面の正味の上向き放射フラックス

$$= F_{\text{trop}}^{\text{net,up}} \frac{r_{\text{trop}}^2}{r_{\text{Titan}}^2} \sim 400 [\text{W}/\text{m}^2]$$

$$\sim 45 [\text{W}/\text{m}^2]$$

算出したフラックスと仮定したフラックスが等しくなるときに得られる大気構造を平衡構造とみなす

$$= F_{\text{trop}}^{\text{net,up}} \frac{r^2}{r_{\text{Titan}}^2}$$

計算アルゴリズム

境界条件：円盤温度・圧力条件
圏界面高度決定

- 円盤温度 50 K(タイタン)
120 K(ガニメデ)
- 円盤圧力 0.1-10 Pa
(Canup and Ward 2002,2006)

仮定した圏界面のフラックス(A)
から大気構造決定

放射伝達計算

算出した圏界面フラックス(B)と
仮定した圏界面フラックス(A)の比較

Aのフラックスの値を変えて計算

$A \neq B$

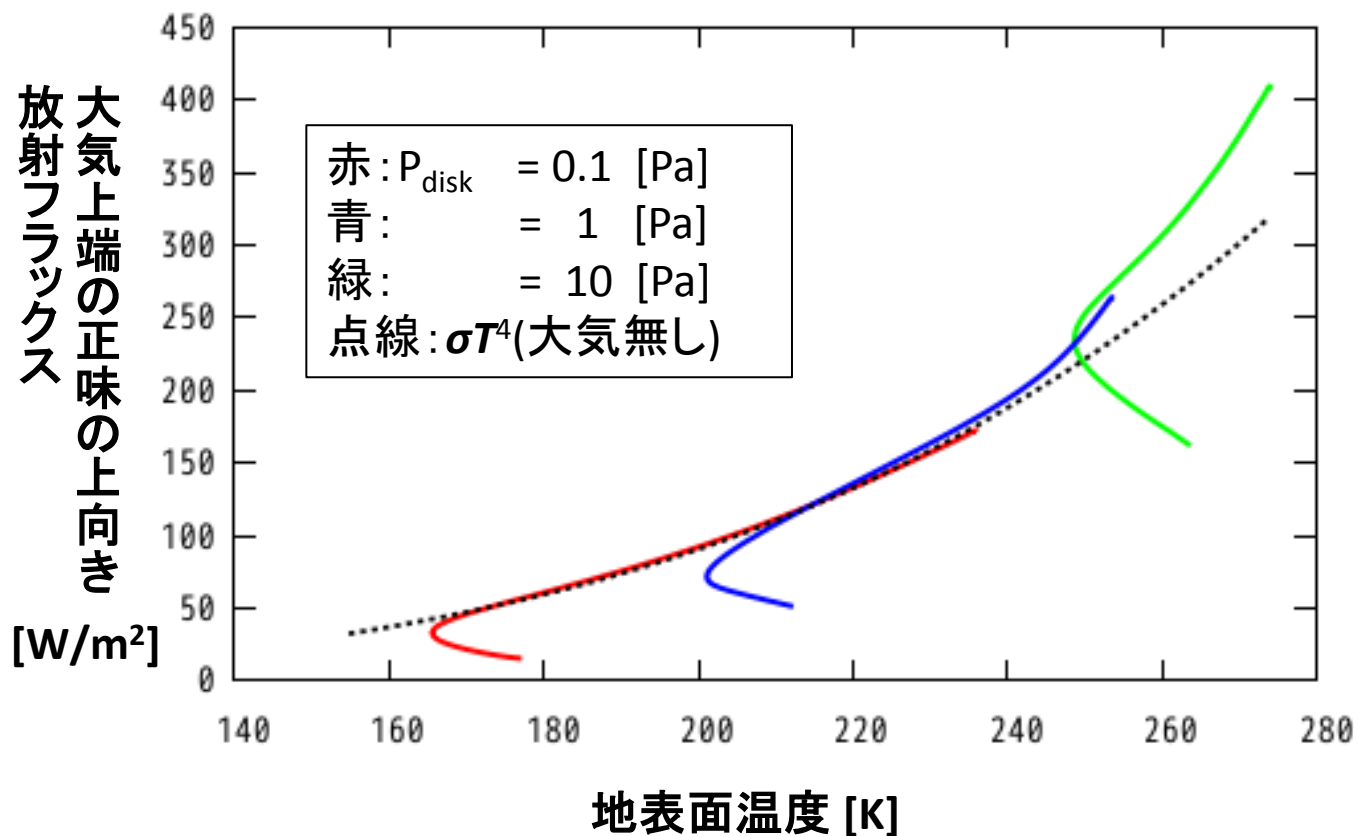
平衡大気

地表面温度の関数としての大気上端における正味の上向き放射フラックスを算出

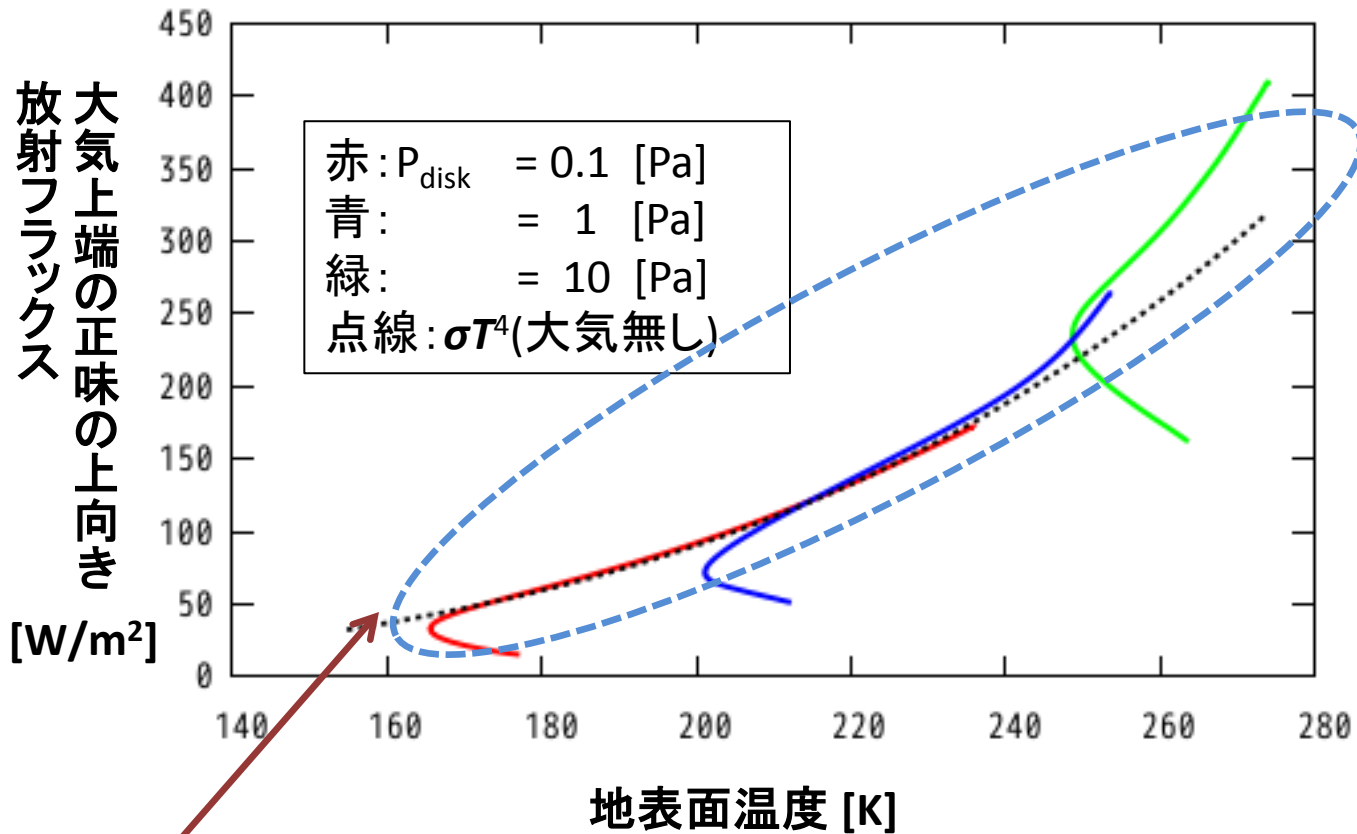
$A = B$

周土星円盤の場合(タイタン原始大気)

タイタン原始大気の放射特性 ($T_{\text{disk}} = 50 \text{ K}$)

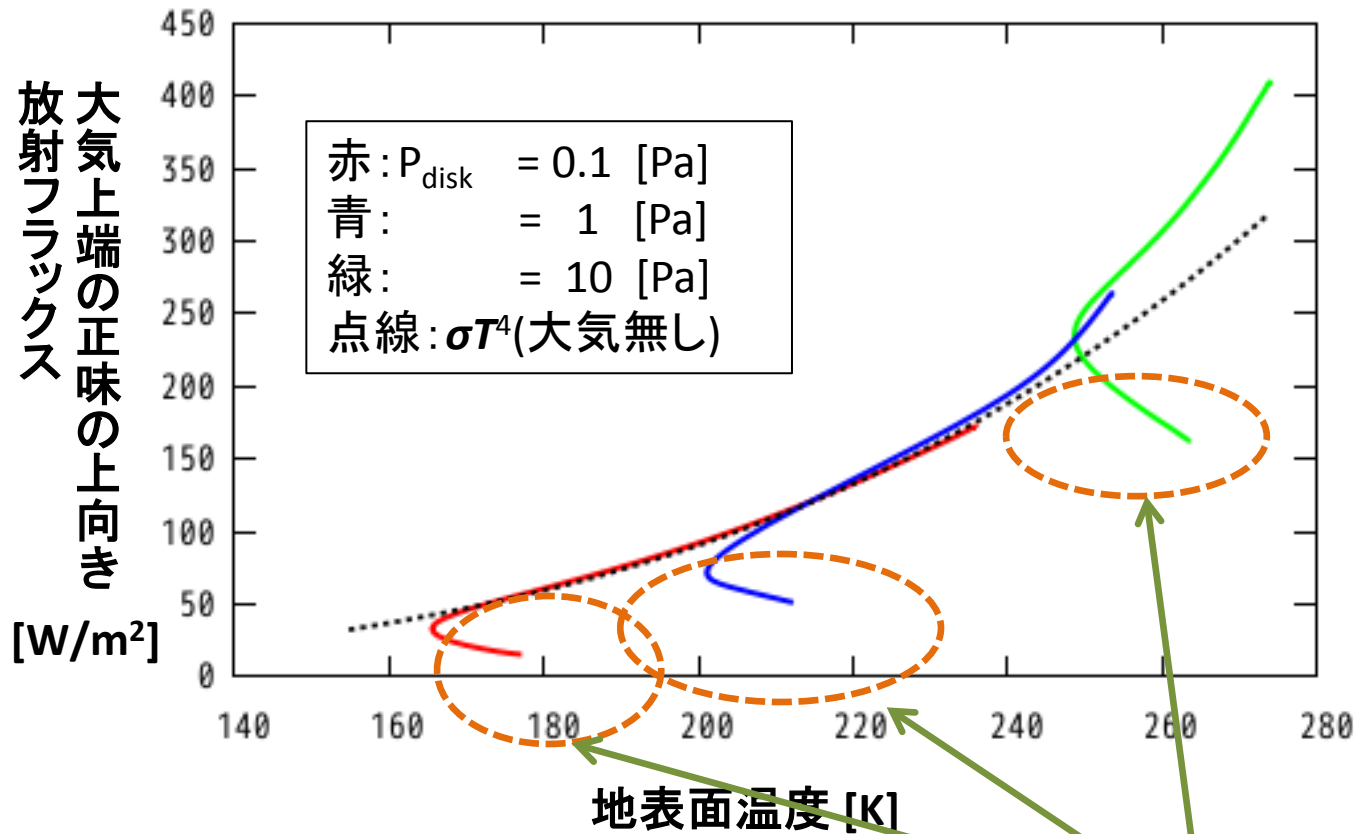


放射特性の解の性質 ($T_{\text{disk}} = 50 \text{ K}$)



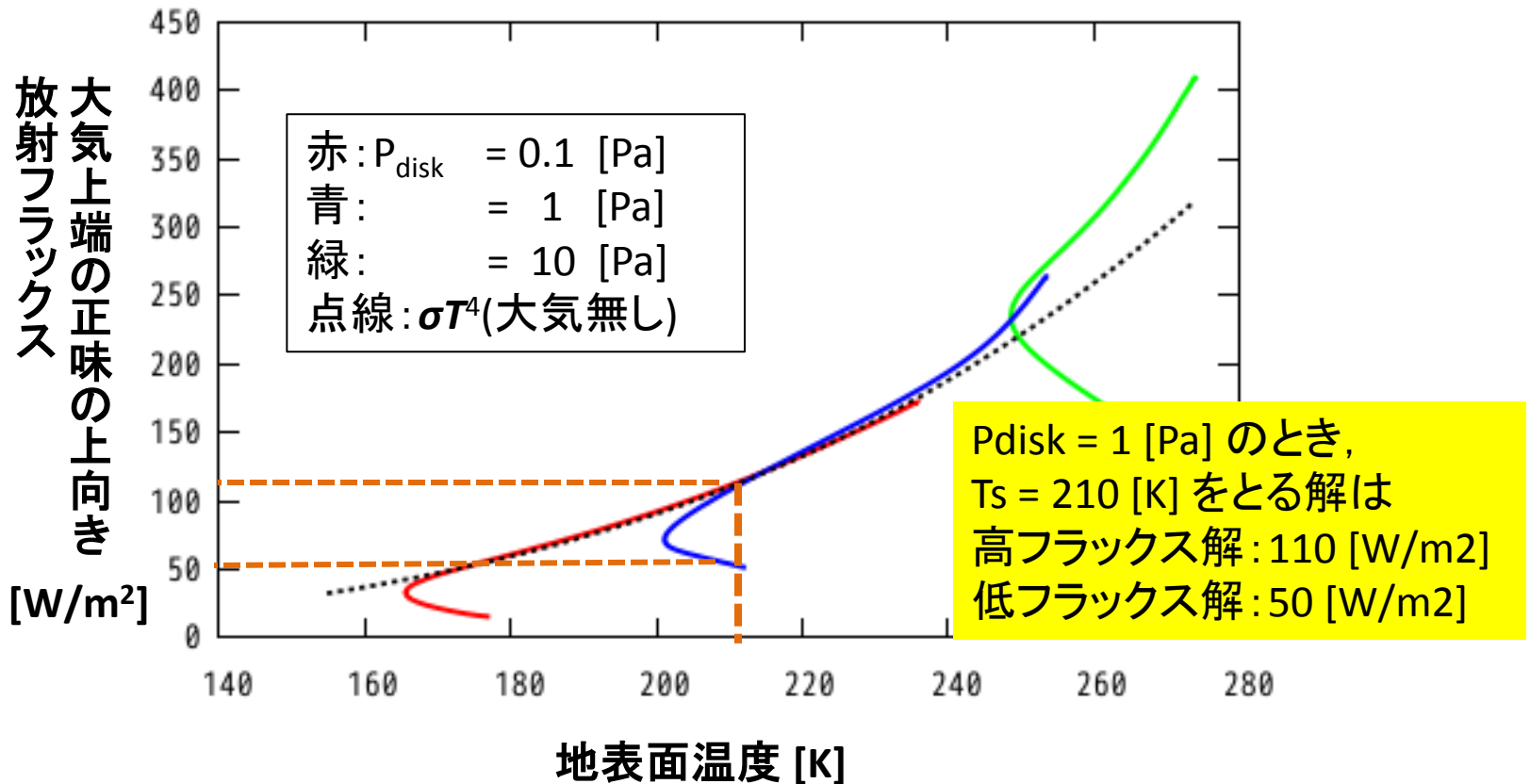
大気上端の熱放射 $\geq \sigma T^4$

放射特性の解の性質 ($T_{\text{disk}} = 50 \text{ K}$)



地表面温度が高温にもかかわらず大気上端から出る放射フラックスの値は小さい

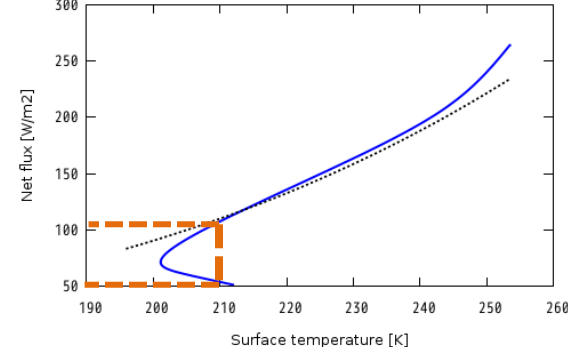
放射特性の解の性質 ($T_{\text{disk}} = 50 \text{ K}$)



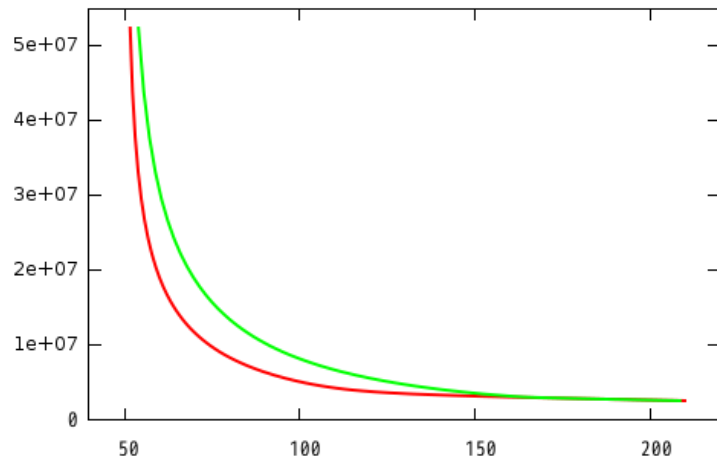
- 同じ地表面温度を取るようなフラックスの解が複数存在する
 - 高フラックス解: $\geq \sigma T^4$, 光学的に薄い大気の形成
 - 低フラックス解: 地表面温度が高い but フラックスは小さいこれらの多重解はどのような大気構造に起因しているのか？

大気構造比較(1)

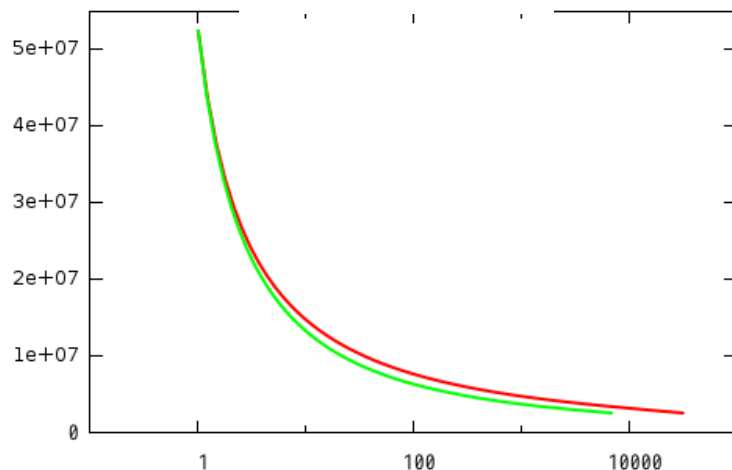
(緑: 高フラックス解, 赤: 低フラックス解)



衛星中心からの距離 [m]



温度分布[K]



圧力分布[Pa]

● 温度

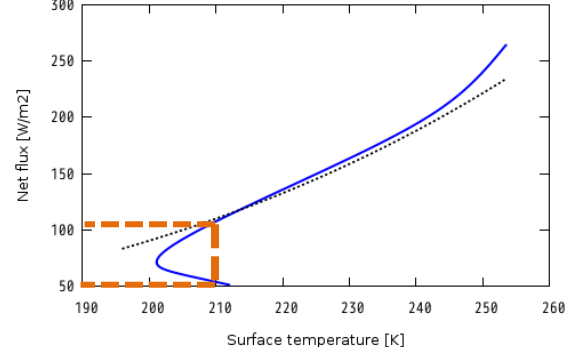
- 高フラックス解: 高高度から緩やかに温度上昇
- 低フラックス解: 低高度で急に温度上昇圧力

● 圧力

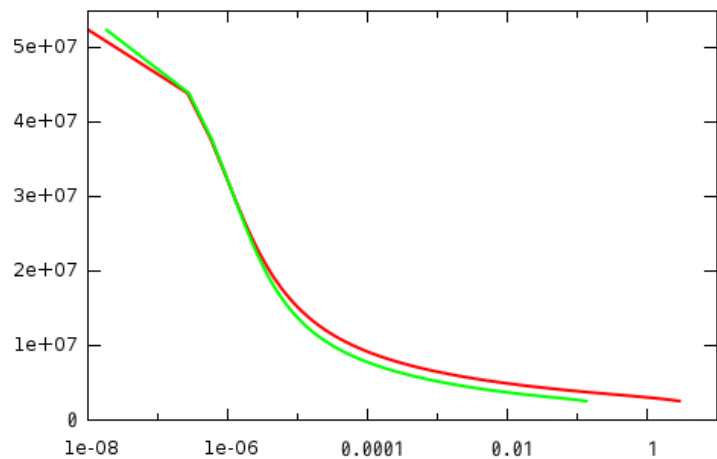
- 高フラックス: $P_s \sim 9000$ Pa
熱膨張によって圧力減少
- 低フラックス: $P_s \sim 50000$ Pa
低温大気による大気の圧縮

大気構造比較(2)

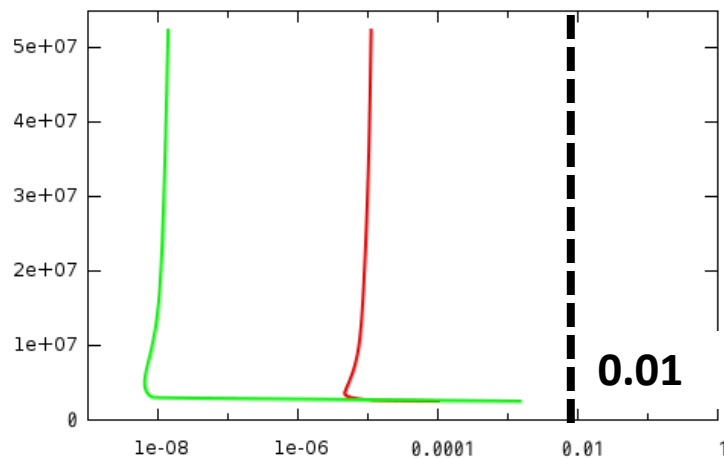
(緑: 高フラックス解, 赤: 低フラックス解)



衛星中心からの距離 [m]



光学的厚さ



H₂Oの光学的厚さへの寄与率

- 光学的厚さ
 - 高フラックス解: $\tau \sim 0.1$
 - 低フラックス解: $\tau > 1$
- H₂Oの光学的厚さの寄与率
 - 高度で異なるがほとんど寄与しない

大気構造比較(3)

(緑: 高フラックス解, 赤: 低フラックス解)

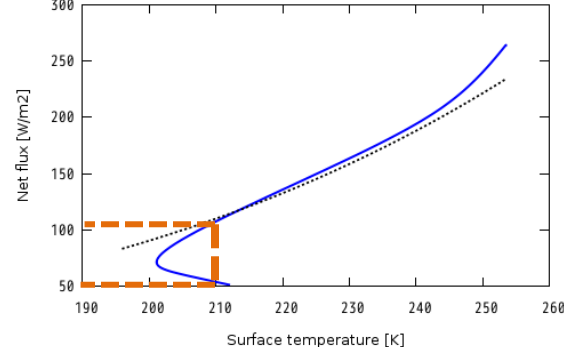
- Bondi 半径(r_{Bondi})
 - ガス分子の音速 = 惑星の脱出速度 となる半径
 - $r_{\text{Bondi}} < r$ では大気が重力に束縛されずに散逸する可能性

$$r_{\text{Bondi}} = \frac{GM_{\text{Titan}}}{c_s^2}$$

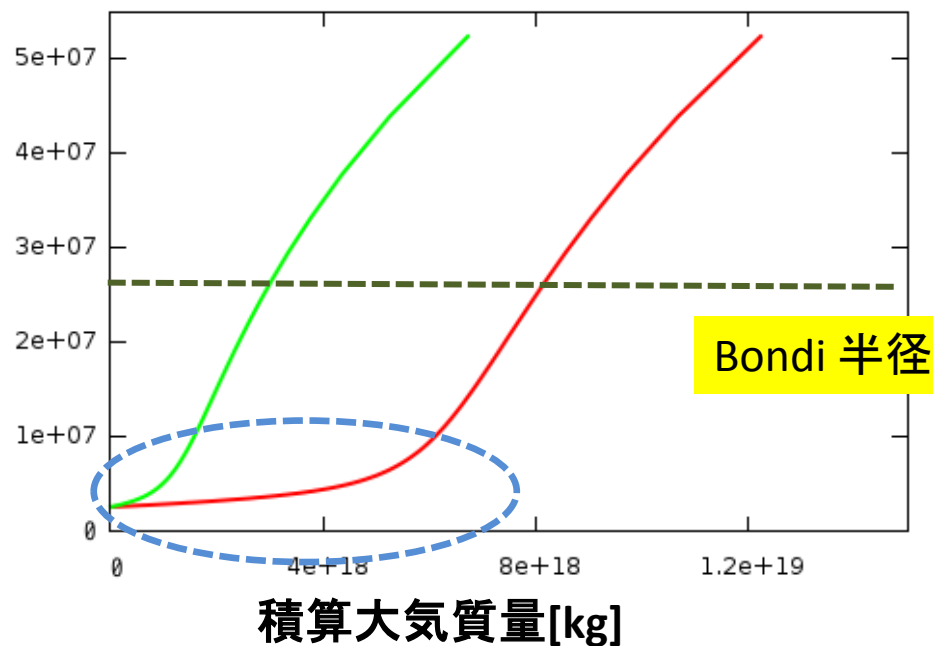
$\sim 10r_{\text{Titan}} @ 100K$

$$c_s = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

- 高フラックス解
 - 質量はほぼ一様に分布
- 低フラックス解
 - 質量は下層に集中
 - 大気が重力的に束縛
 - 大気質量は2倍



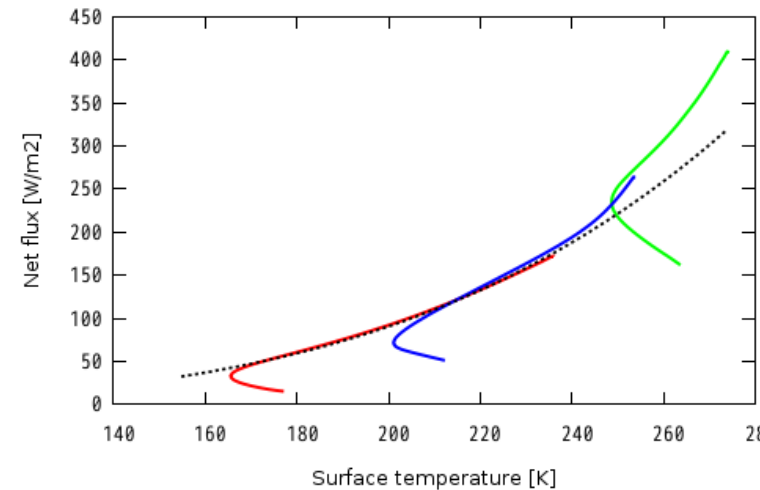
衛星中心からの距離 [m]



大気構造比較まとめ

- 高フラックス解
 - 大気上層まで温暖, 熱膨張による低圧な大気の形成
 - 光学的に薄い大気
 - 大気質量は大気全体にほぼ一様に分布(Bondi 半径以遠にも多くの質量が分布)
- 低フラックス解
 - 地表面付近における急激な温度上昇, 大気が圧縮されることによる高圧な大気の形成
 - 地表面が光学的に厚い大気
 - 大気質量は地表面付近に集中(重力的に束縛)

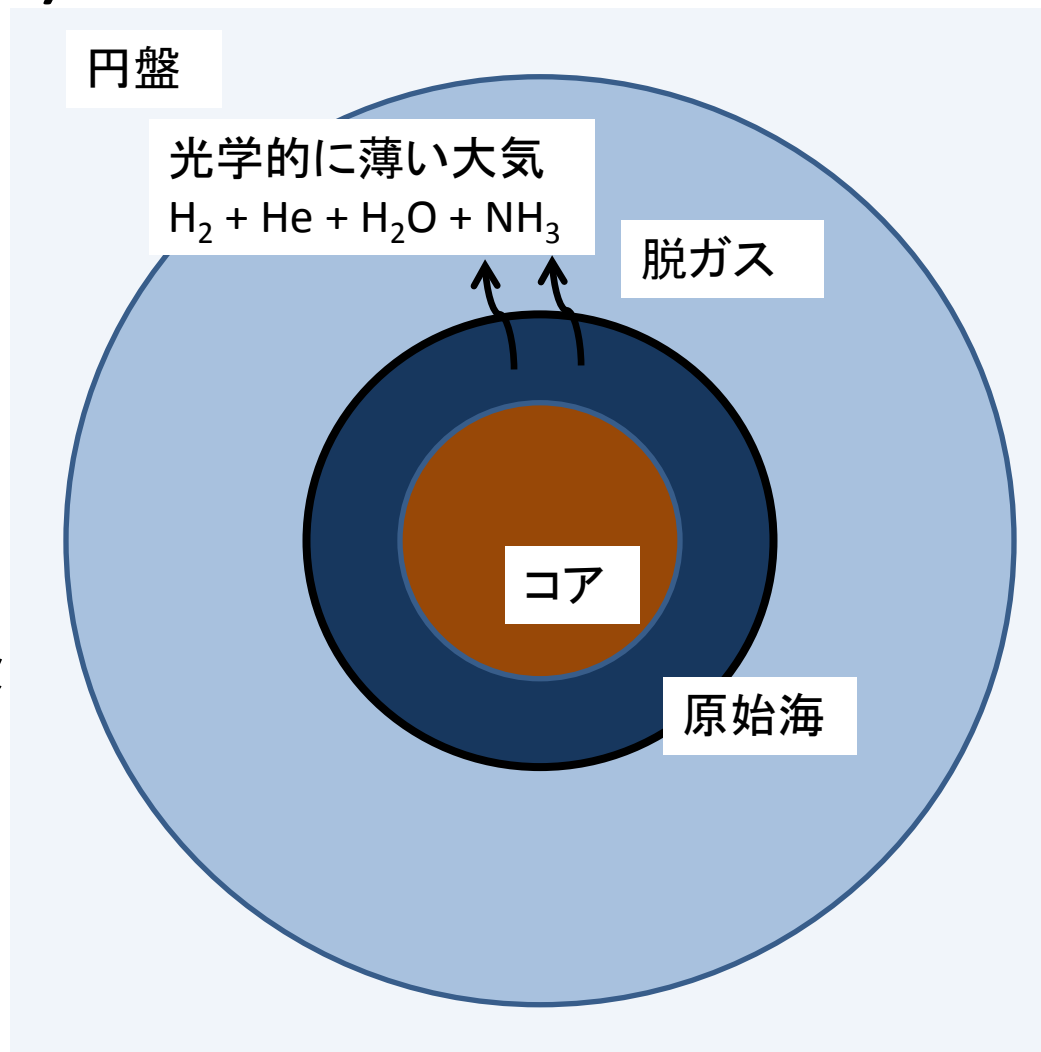
低フラックス解の重要性？



- 円盤ガスの保温効果による温暖な環境の達成
 - 円盤ガスによる光学的に厚い大気の形成によって熱がこもる
 - 大気が冷えても温暖な環境が維持される可能性
- 地表面付近に大気質量が集中しているため、大量の原始大気を保持可能
- 高フラックス解への遷移
 - 過剰な集積エネルギーフラックスの付与があると、地表面の温度上昇による大気の熱膨張が起き、光学的に厚い大気から薄い大気への遷移が起きる可能性

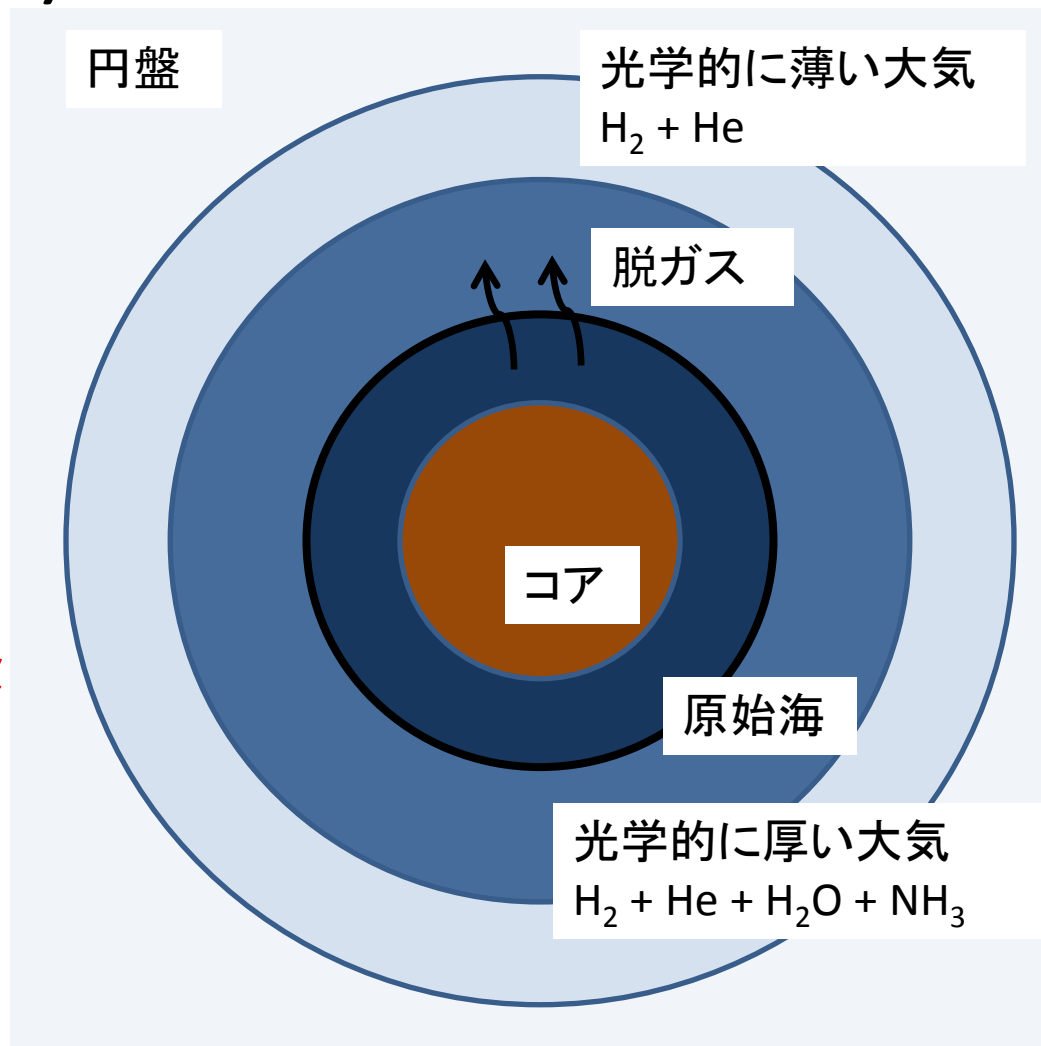
タイタンの大気(仮説)

- 集積期に高温状態を経験
 - 光学的に薄い大気形成
 - 原始海の形成
 - 内部からの脱ガスにより揮発性成分供給
- 集積熱が逃げて大気温度が下がる
 - 大気下部に光学的に厚い大気が形成
 - 地表温度はあまり下がらない
- 周惑星円盤が消失
 - 高高度にある円盤ガス成分大気が散逸
 - UV入射による光化学反応
 - 氷地殻形成



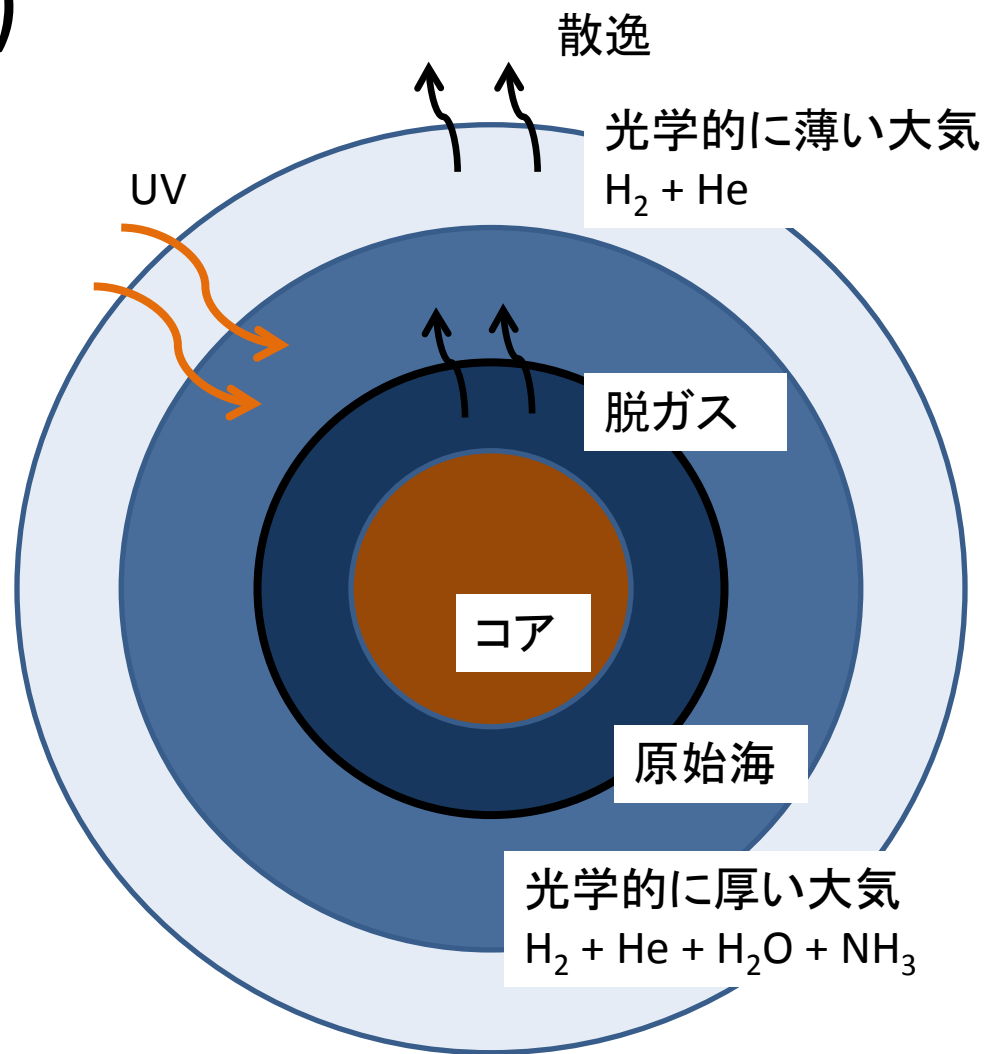
タイタンの大気(仮説)

- 集積期に高温状態を経験
 - 光学的に薄い大気形成
 - 原始海の形成
 - 内部からの脱ガスにより供給
- 集積熱が逃げて大気温度が下がる
 - 大気下部に光学的に厚い大気が形成
 - 地表温度はあまり下がらない
 - 高い NH_3 分圧が維持
- 周惑星円盤が消失
 - 高高度にある円盤ガス成分大気が散逸
 - UV入射による光化学反応
 - 氷地殻形成



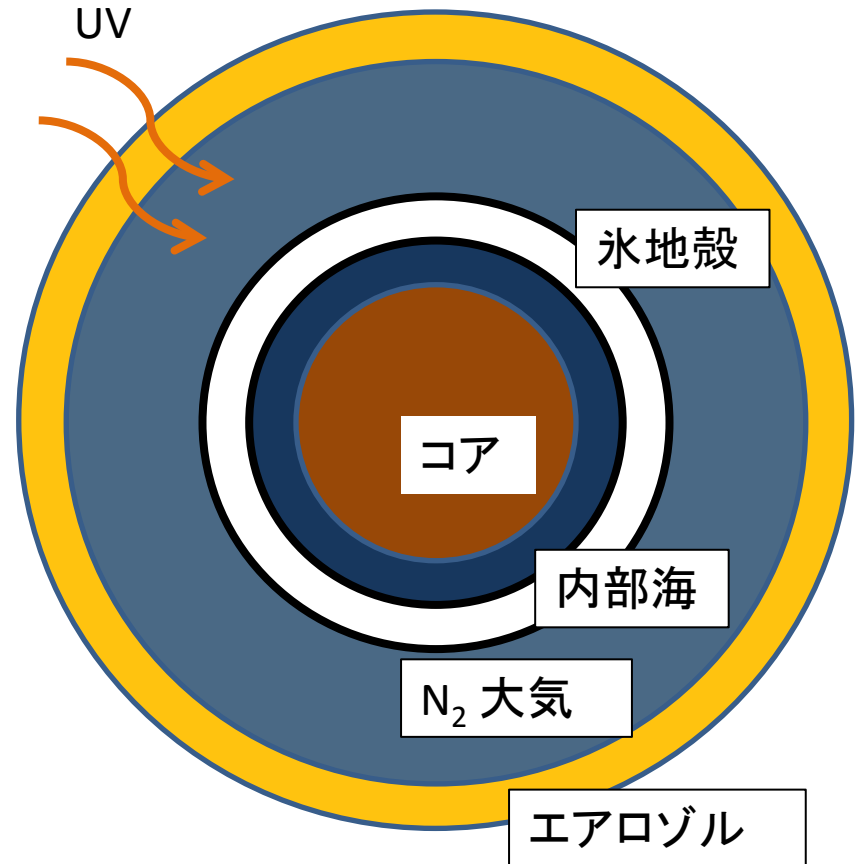
タイタンの大気(仮説)

- 集積期に高温状態を経験
 - 光学的に薄い大気形成
 - 原始海の形成
 - 内部からの脱ガスにより供給
- 集積熱が逃げて大気温度が下がる
 - 大気下部に光学的に厚い大気が形成
 - 地表温度はあまり下がらない
- 周惑星円盤が消失
 - 高高度にある円盤ガス成分大気が散逸
 - UV入射による光化学反応
 - 氷地殻形成



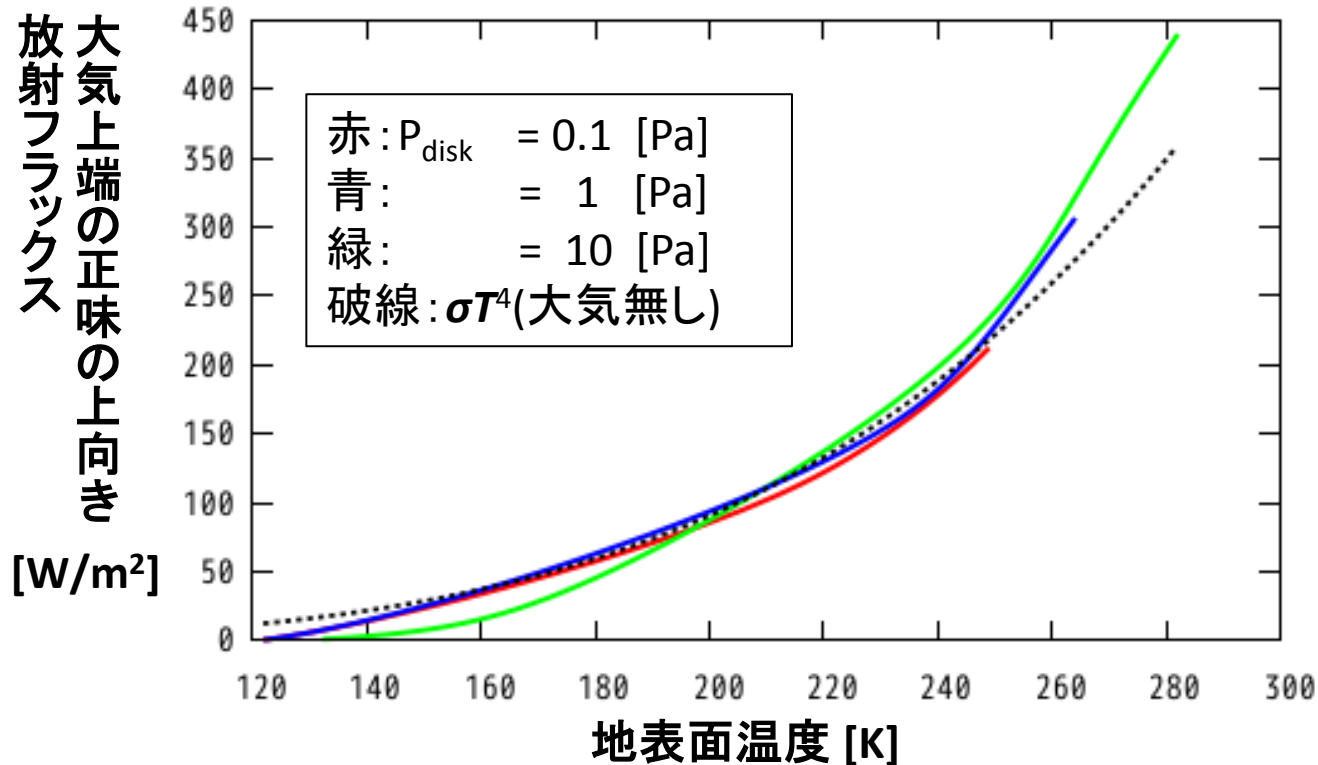
タイタンの大気(仮説)

- 集積期に高温状態を経験
 - 光学的に薄い大気形成
 - 原始海の形成
 - 内部からの脱ガスにより供給
- 集積熱が逃げて大気温度が下がる
 - 大気下部に光学的に厚い大気が形成
 - 地表温度はあまり下がらない
- 周惑星円盤が消失
 - 高高度にある円盤ガス成分大気が散逸
 - UV入射による光化学反応
エアロゾル形成
 $\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2$
 - 氷地殻形成



周木星円盤の場合(ガニメデ原始大気)

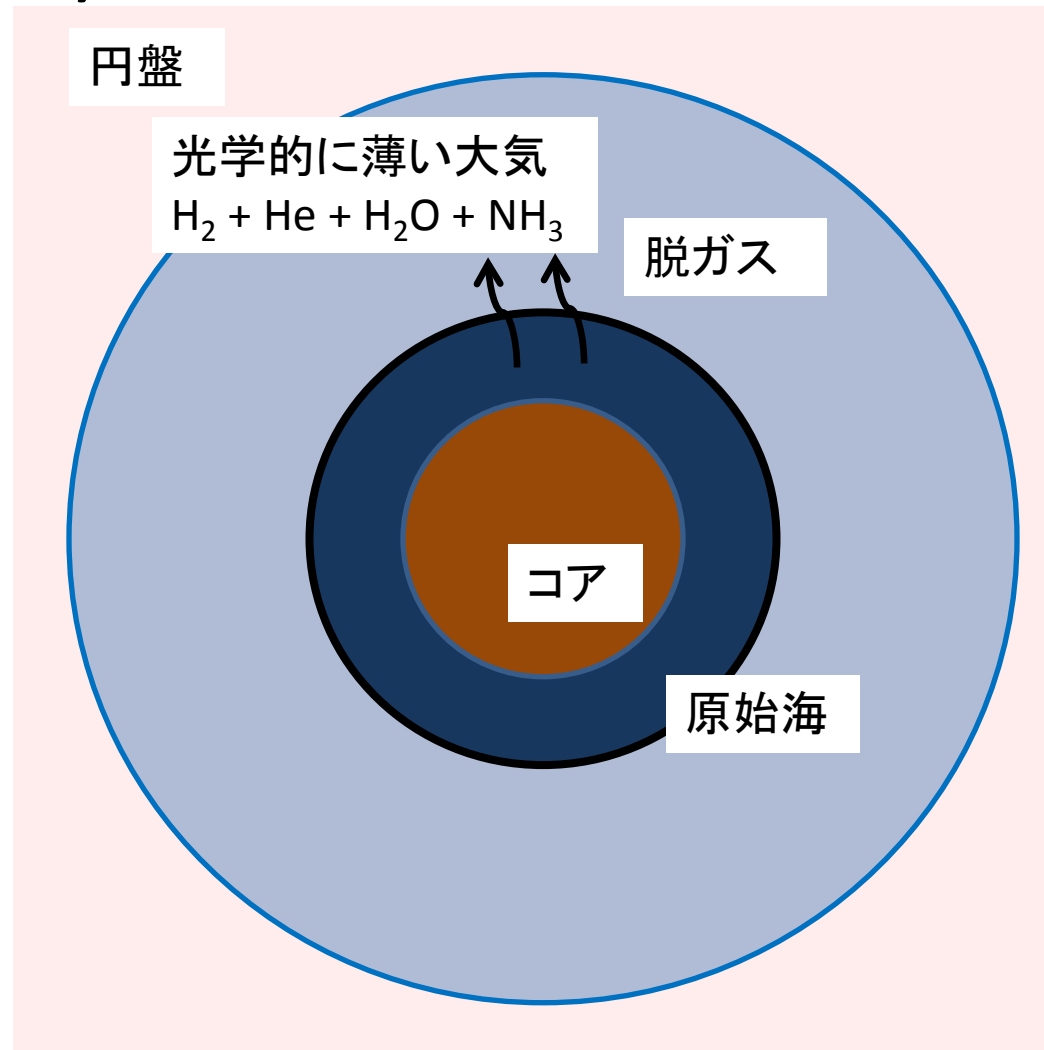
ガニメデ原始大気の放射特性 ($T_{\text{disk}} = 120 \text{ K}$)



- 円盤が高温な場合は多重解が存在しない
 - $\sim \sigma T^4$
- 光学的に厚い大気の形成は難しい

ガニメデの大気(仮説)

- 集積期に高温状態を経験
 - 光学的に薄い大気形成
 - 原始海の形成
 - 内部からの脱ガスにより供給
 - 集積熱が逃げても円盤温度が高いので大気温度はあまり下がらない
 - 光学的に薄い大気を維持
 - 周惑星円盤が消失
 - 高高度大気の散逸
 - 光学的に薄い大気のため大気温度が急激に降下
- H₂O, NH₃ の凝結
- 氷地殻の形成

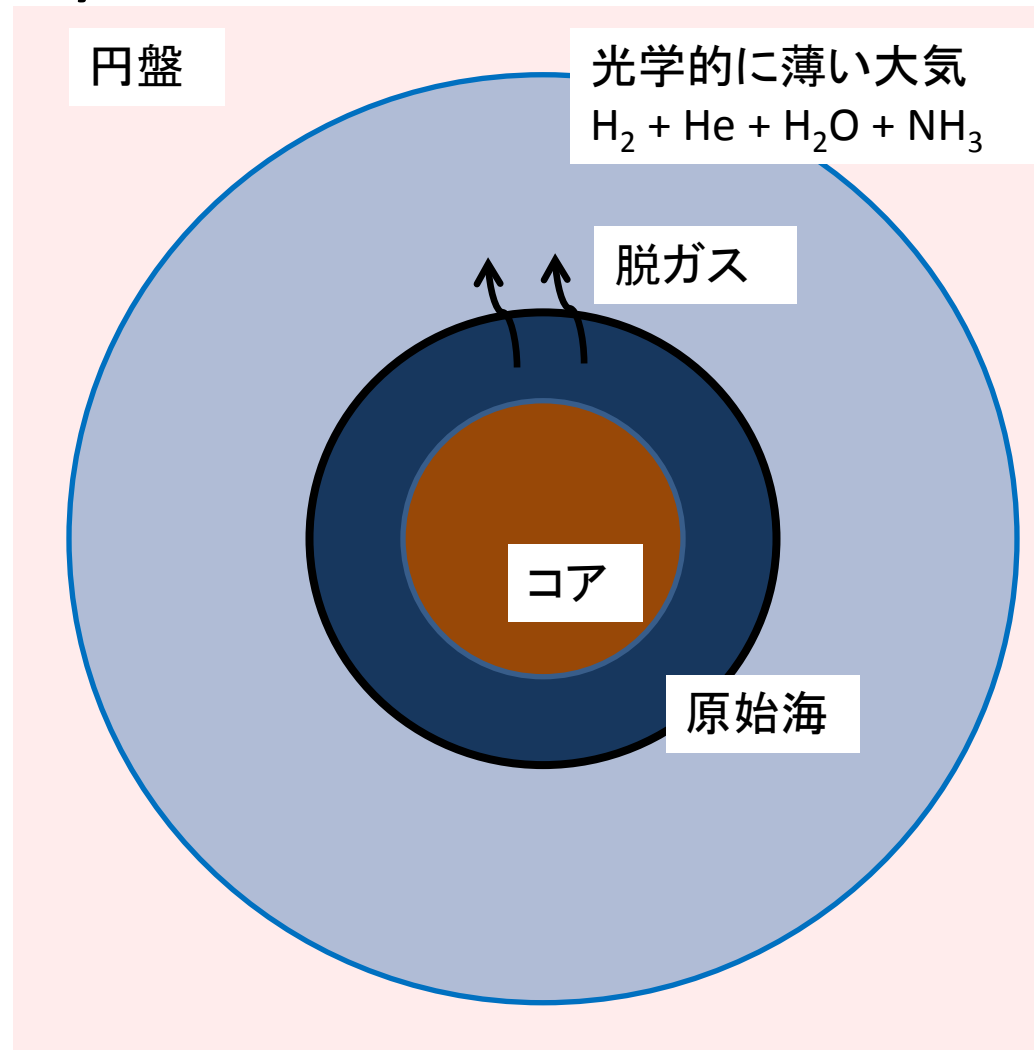


ガニメデの大気(仮説)

- 集積期に高温状態を経験
 - 光学的に薄い大気形成
 - 原始海の形成
 - 内部からの脱ガスにより供給
- 集積熱が逃げても円盤温度が高いので大気温度はあまり下がらない
 - 光学的に薄い大気を維持
- 周惑星円盤が消失
 - 高高度大気の散逸
 - 光学的に薄い大気のため大気温度が急激に降下

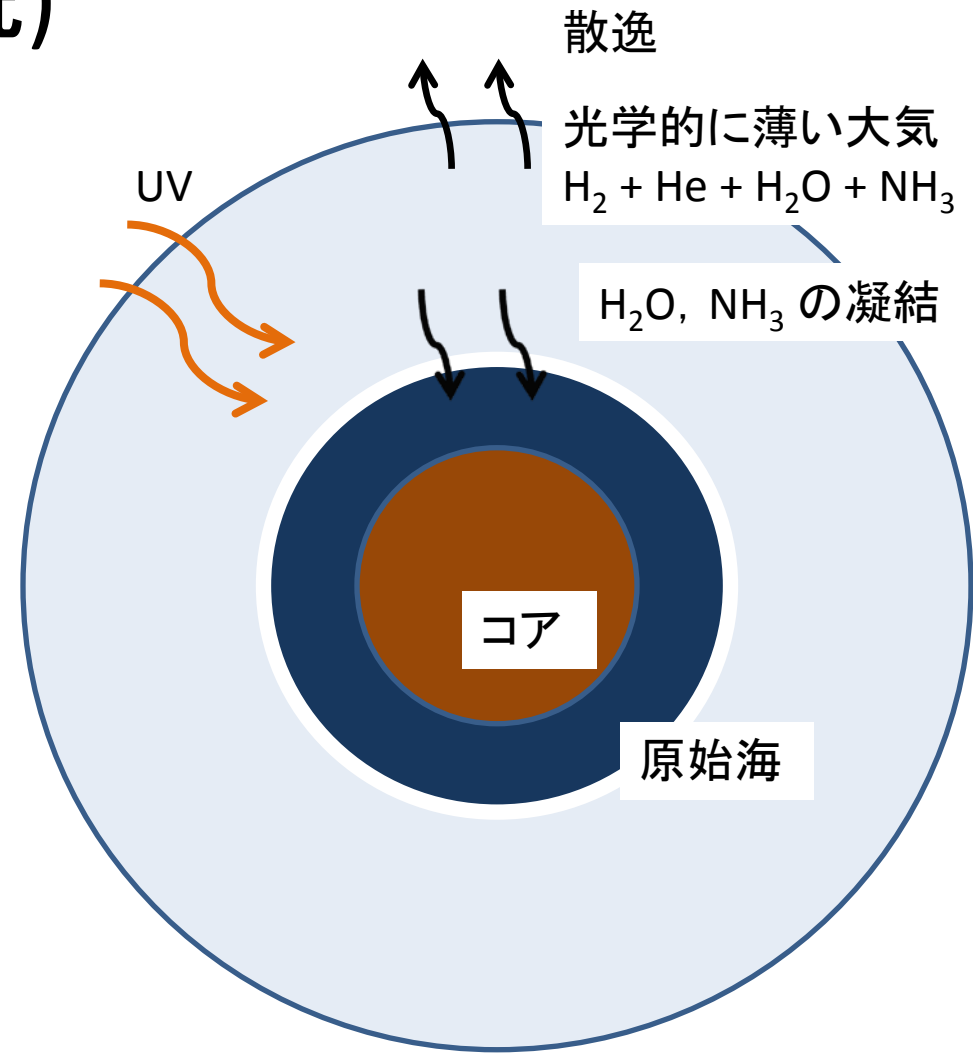
H_2O , NH_3 の凝結

 - 氷地殻の形成



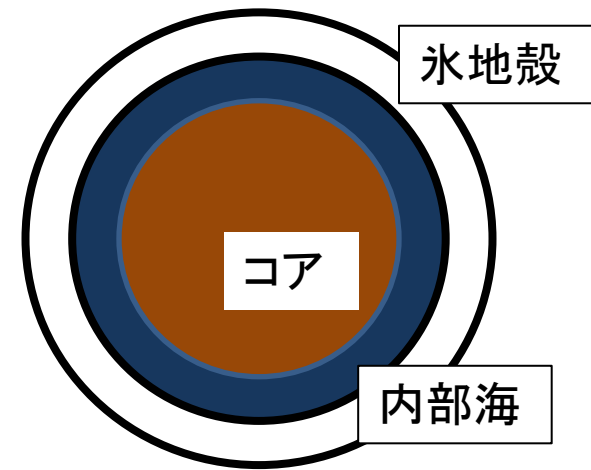
ガニメデの大気(仮説)

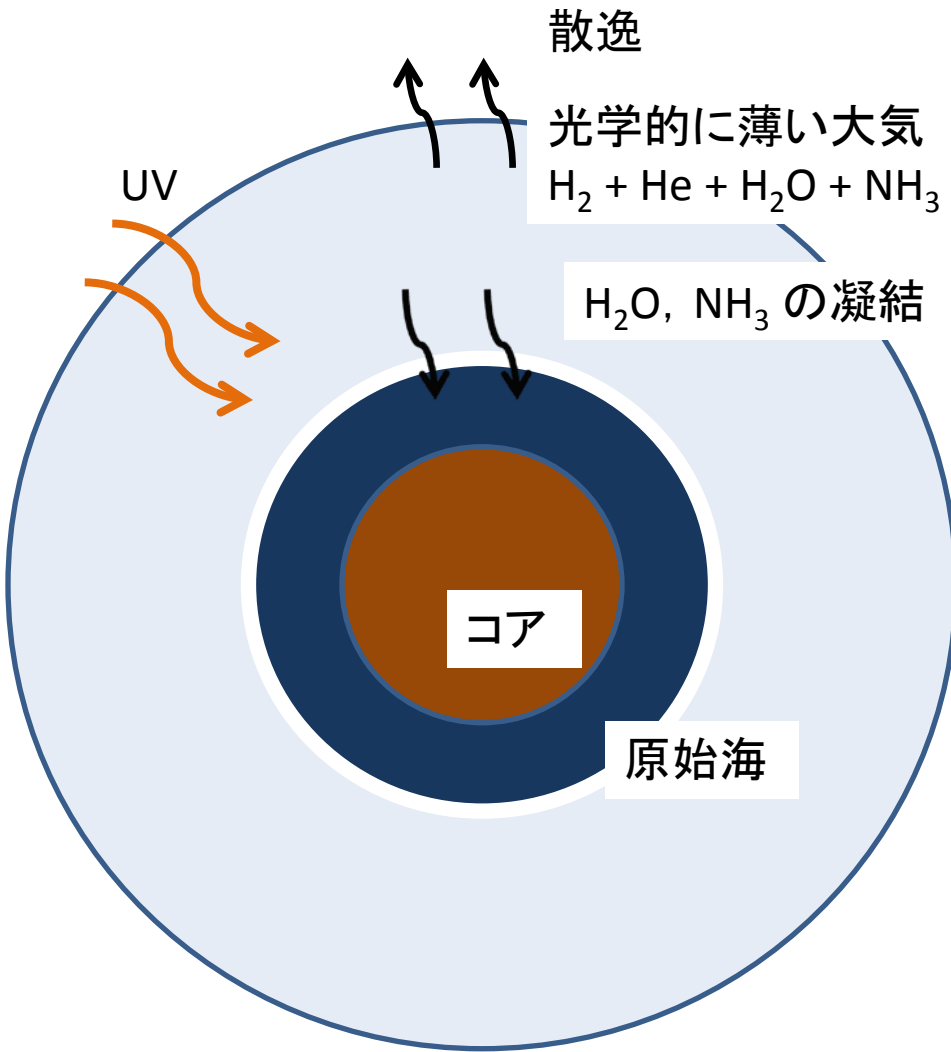
- 集積期に高温状態を経験
 - 光学的に薄い大気形成
 - 原始海の形成
 - 内部からの脱ガスにより供給
- 集積熱が逃げても円盤温度が高いので大気温度はあまり下がらない
 - 光学的に薄い大気を維持
- 周惑星円盤が消失
 - 高高度大気の散逸
 - 光学的に薄い大気のため大気温度が急激に降下
 - H_2O, NH_3 の凝結
 - 氷地殻の形成



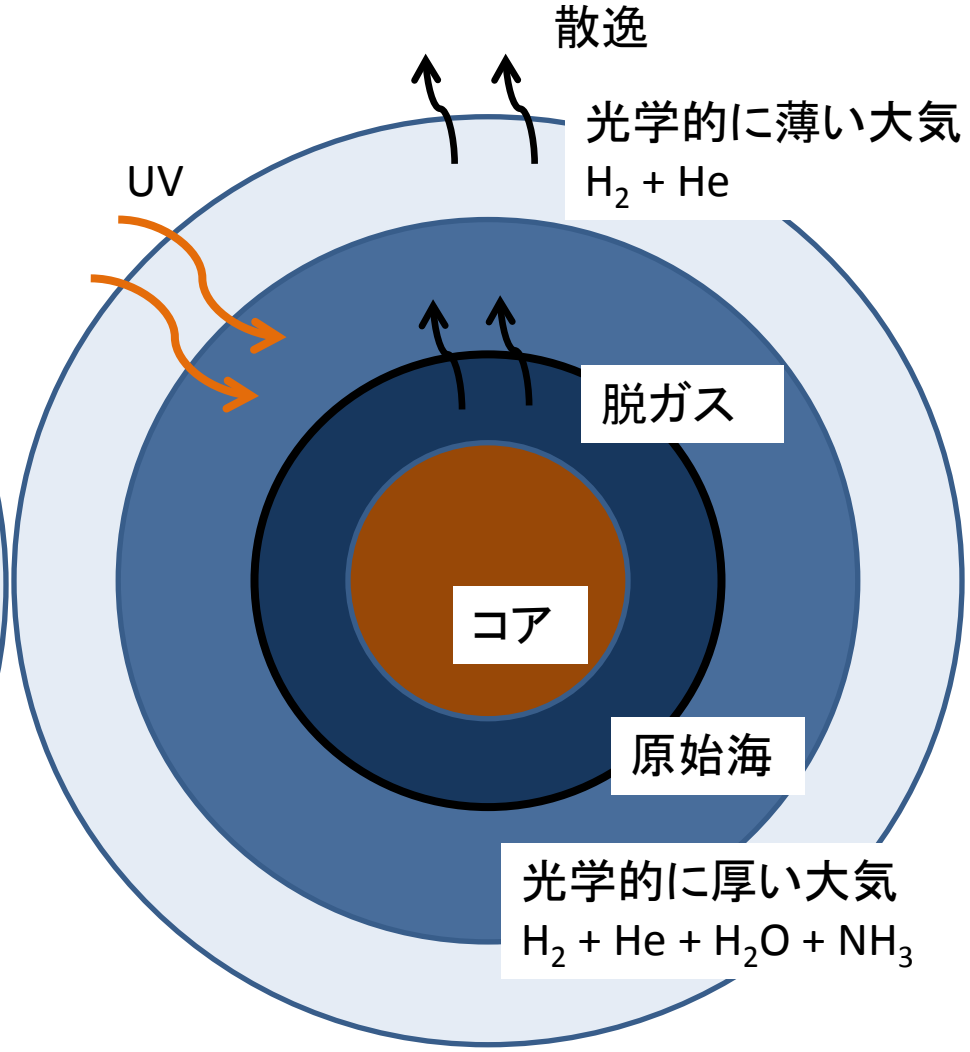
ガニメデの大気(仮説)

- 集積期に高温状態を経験
 - 光学的に薄い大気形成
 - 原始海の形成
 - 内部からの脱ガスにより供給
 - 集積熱が逃げても円盤温度が高いので大気温度はあまり下がらない
 - 光学的に薄い大気を維持
 - 周惑星円盤が消失
 - 高高度大気の散逸
 - 光学的に薄い大気のため大気温度が急激に降下
- H₂O, NH₃ の凝結
- 氷地殻の形成

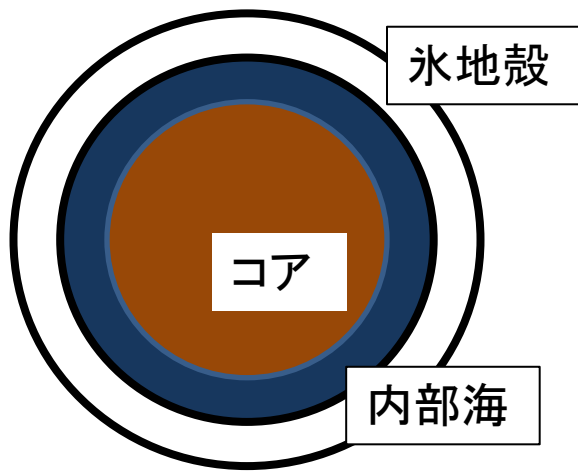




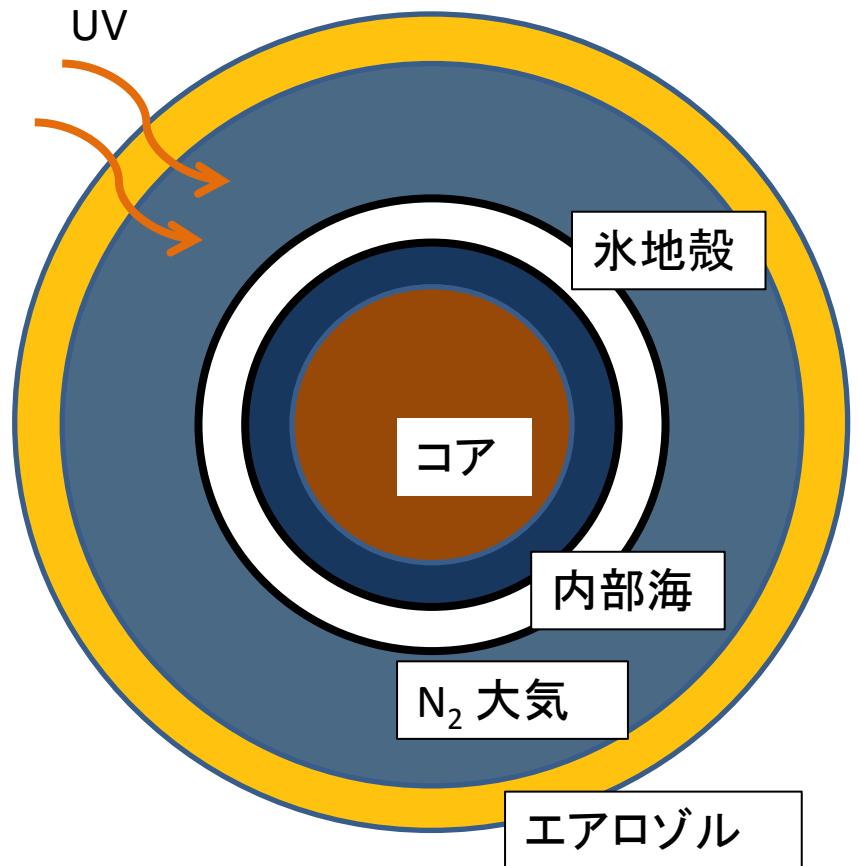
ガニメデ



タイタン



ガニメデ



タイタン

タイタンとガニメデ

- 大気の有無は円盤温度が低いことによる光学的に厚い大気形成に起因
- タイタン (T_{disk} 低)
 - 光学的に厚い大気が形成
 - 保温効果と大気の圧縮により H_2O と NH_3 が高い分圧で保持可能
 - NH_3 の光分解等で厚い N_2 大気が形成
- ガニメデ (T_{disk} 高)
 - 光学的に薄い大気が形成
 - 保温効果も大気の圧縮もないので、凝結と散逸が顕著
 - 大気が消失