



トリトン大気におけるヘイズ形成

大野 和正^{1→2}, Xi Zhang², 田崎 亮³, 奥住 聡¹

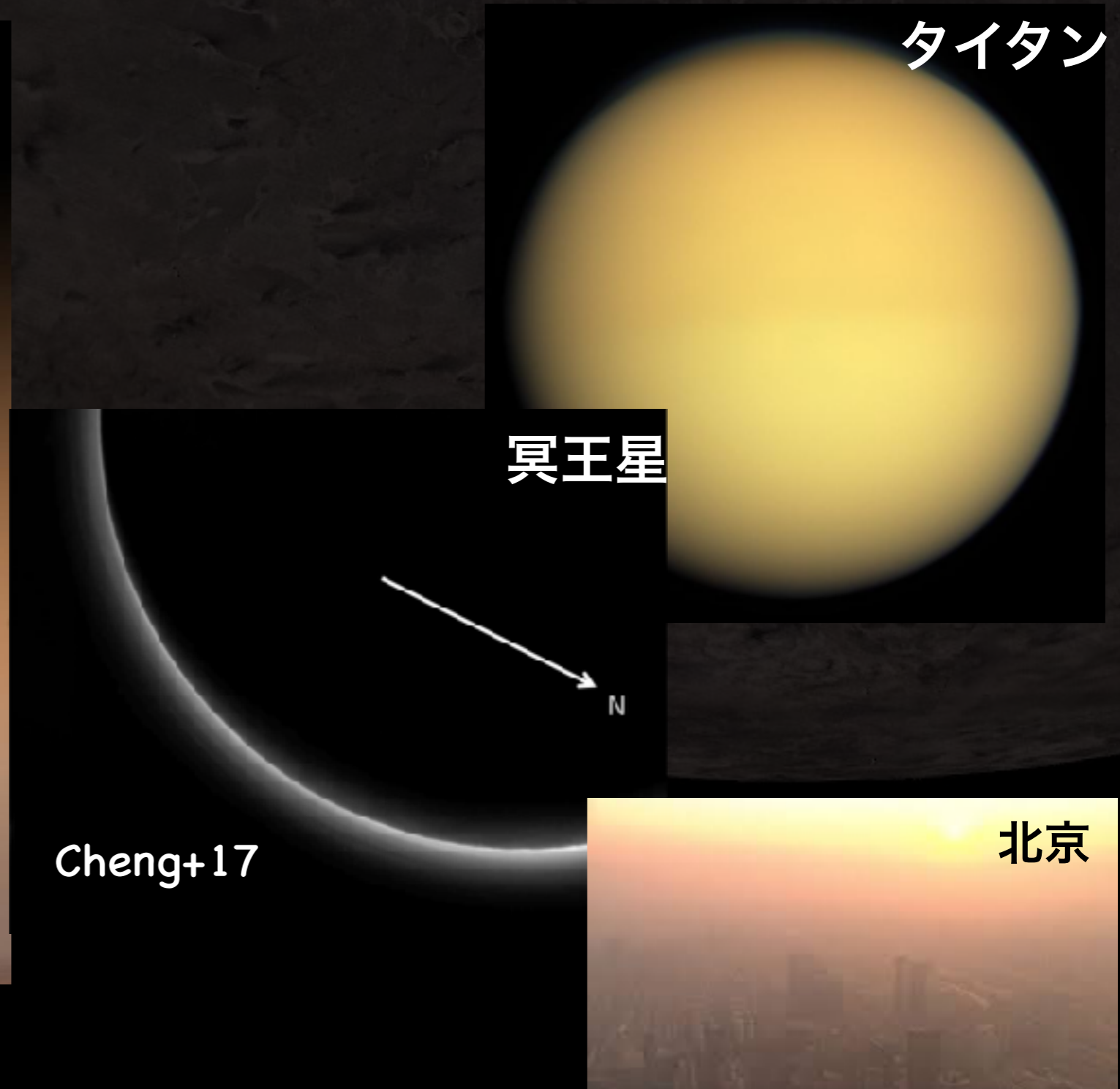
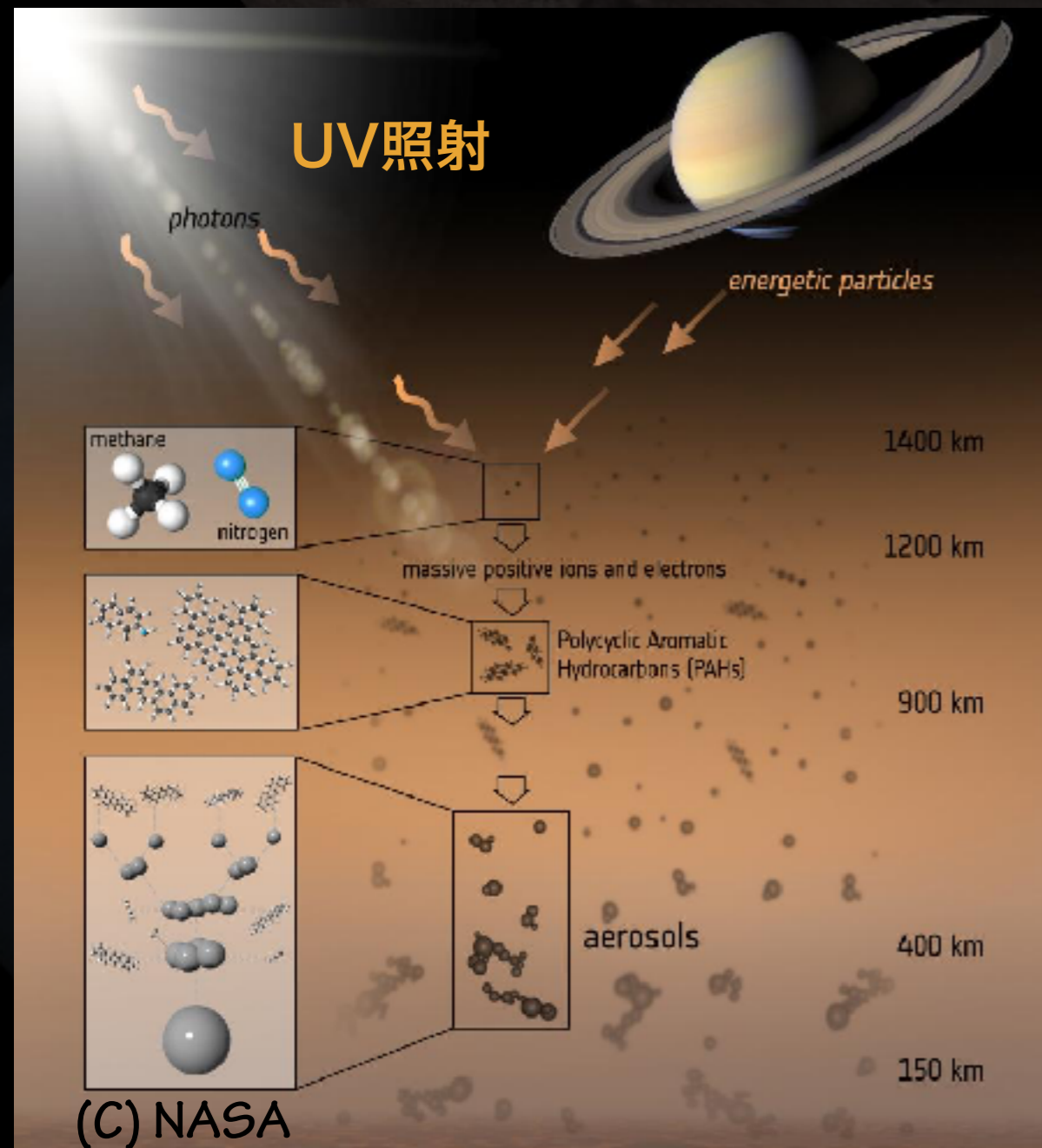
(1. 東工大, 2. カリフォルニア大学サンタクルーズ校, 3. 東北大)

トリトン

- ✓ 海王星最大の衛星(半径1350km)
- ✓ 逆行軌道を持つ → 捕獲起源?(McKinnon84)
- ✓ プルームが存在 (Smith+89)
- ✓ N₂大気を保持(表面気圧1.8Pa)
- ✓ 地表付近に雲(N₂ ice)が存在
大気の広範囲に**ヘイズ**が存在 (Pollack+90)

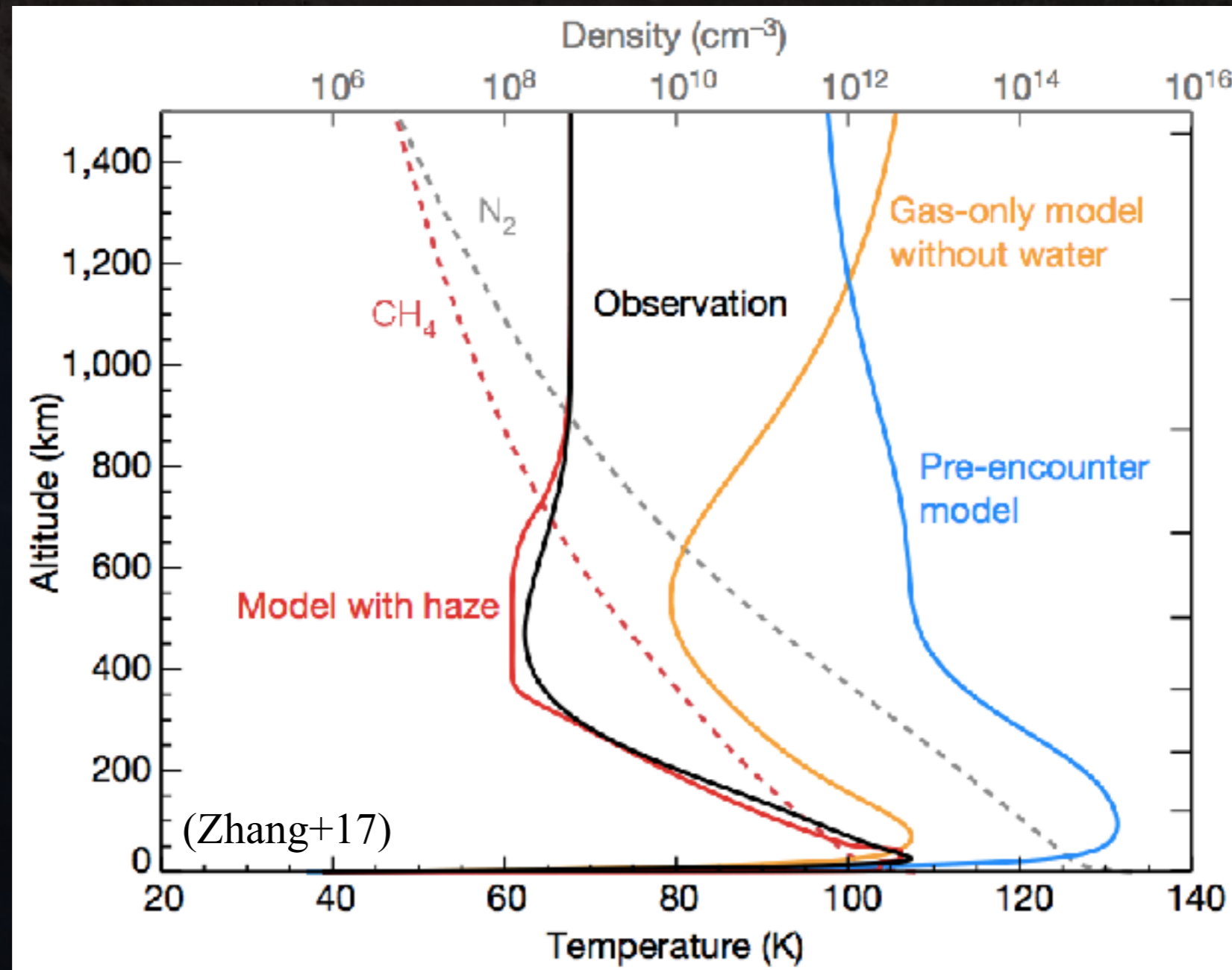
海王星

- ✓ 光化学反応で生成される大気中の微粒子
- ✓ 太陽系の衛星(タイタン、冥王星、トリトン)大気などに存在



例1) 大気の温度構造に影響 (e.g., Sagan&Chyba97, Wolf & Toon 10, Zhang+15, 17)

冥王星の温度構造への影響

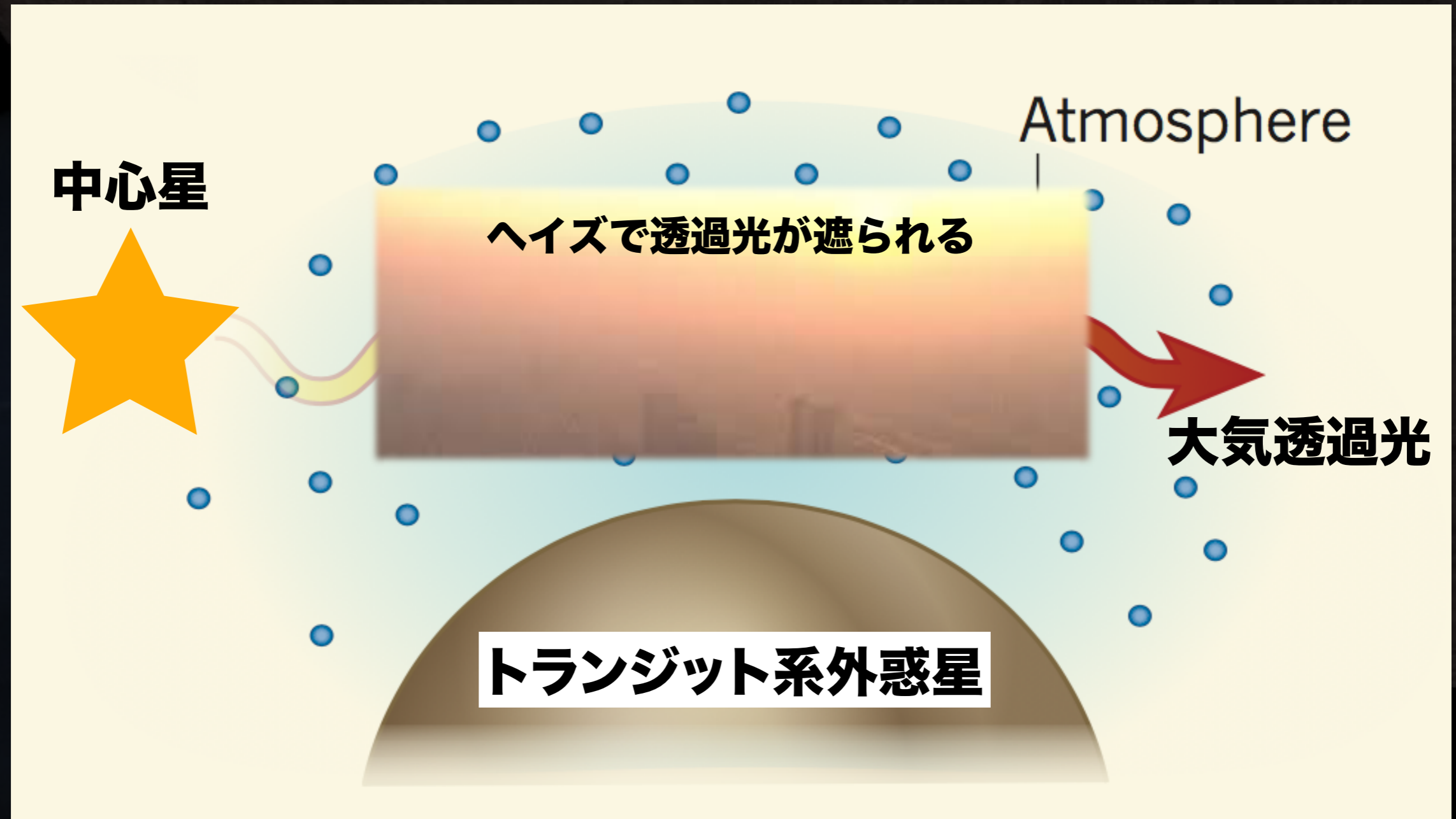


惑星の気候を理解する上でヘイズの存在は重要

何故ヘイズが重要？

例2) 大気観測に影響 (e.g., Morley+15, Kawashima & Ikoma 18, 19)

系外惑星の大気分光観測の概念図



大気観測の結果を解釈する上でヘイズは重要

N₂主成分大気を保持する衛星が3天体

(Bertrand & Forget 2017, Gladstone & Young 2019)

タイタン



- 表面温度 : 94 K
- 表面気圧 : 1.5×10^5 Pa
- UV(Ly α)フラックス : 1
(タイタンで規格化)
- CH₄混合率 : 1.5 %

冥王星



- 表面温度 : 39 K
- 表面気圧 : 1.5 Pa
- UVフラックス : 0.1
- CH₄混合率 : 0.6 %

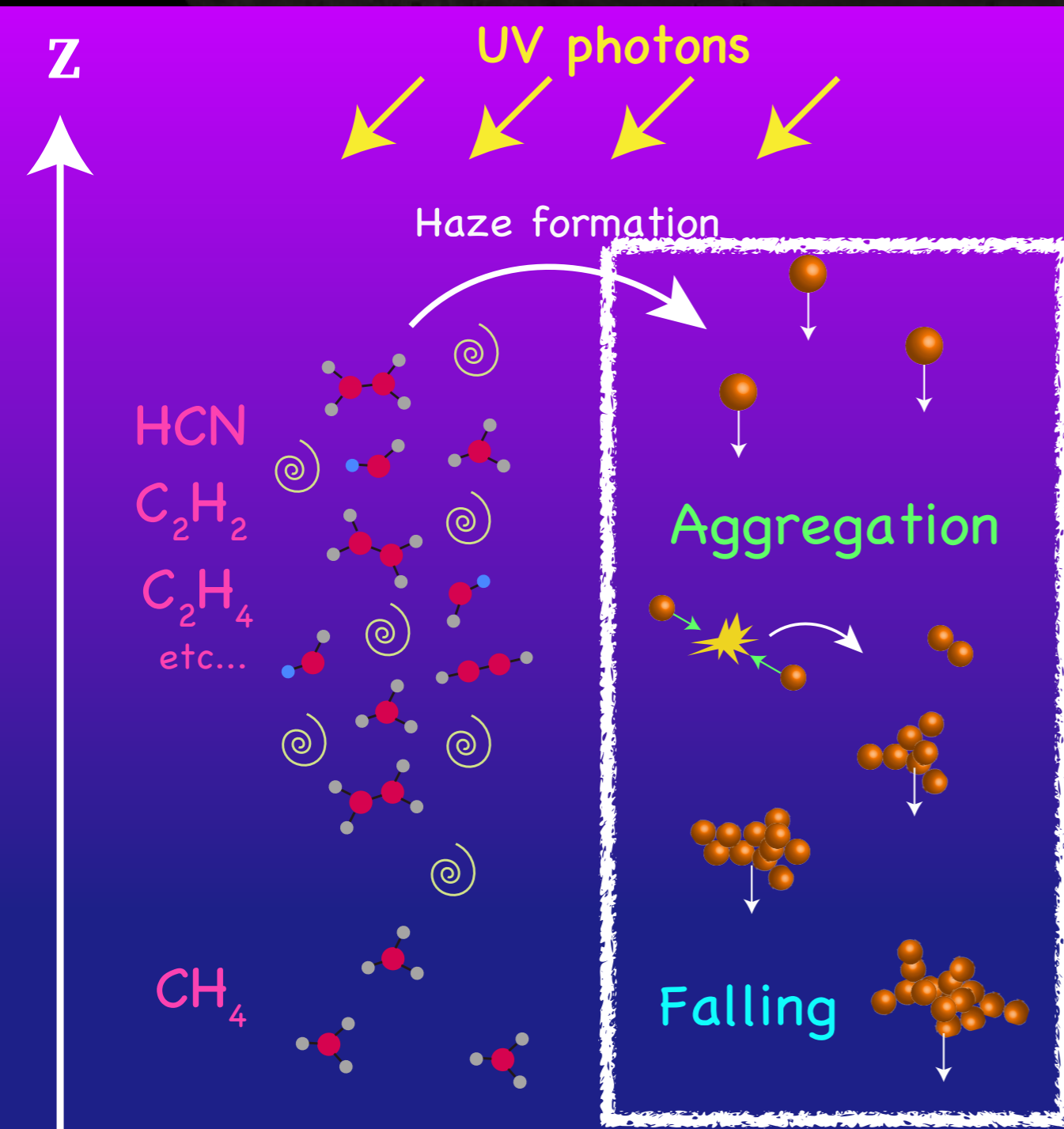
トリトン



- 表面温度 : 38 K
- 表面気圧 : 1.8 Pa
- UVフラックス : 0.2
- CH₄混合率 : 0.02 %

ヘイズ形成過程の比較研究を行う絶好のターゲット

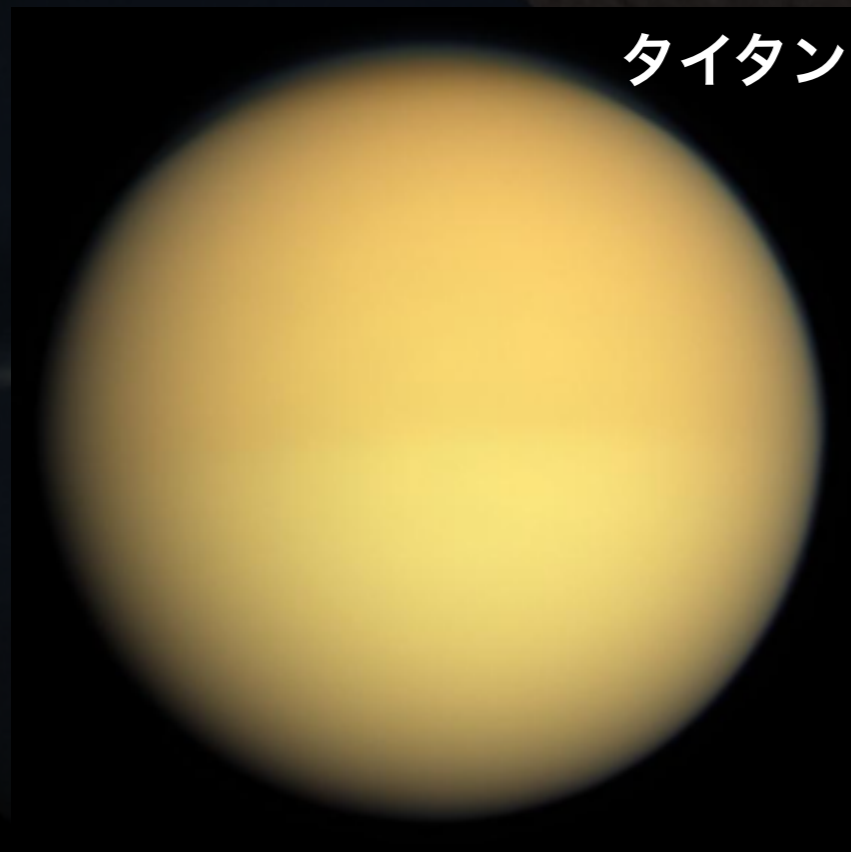
微物理モデル：ヘイズ粒子の成長・輸送を計算



観測量(e.g., 光学的厚み)とモデルを比較

ヘイズ生成量、粒子の形状、帯電量 etc

- ✓ 冥王星とタイタンは同程度のヘイズ生成量 (e.g., Lavvas+10, Gao+17)
- ✓ タイタン(と冥王星?)のヘイズはアグリゲイト (e.g., Cabane+93, Rannou+97, Gao+17)



- UVフラックス : 1
- CH₄混合率 : 1.5 %



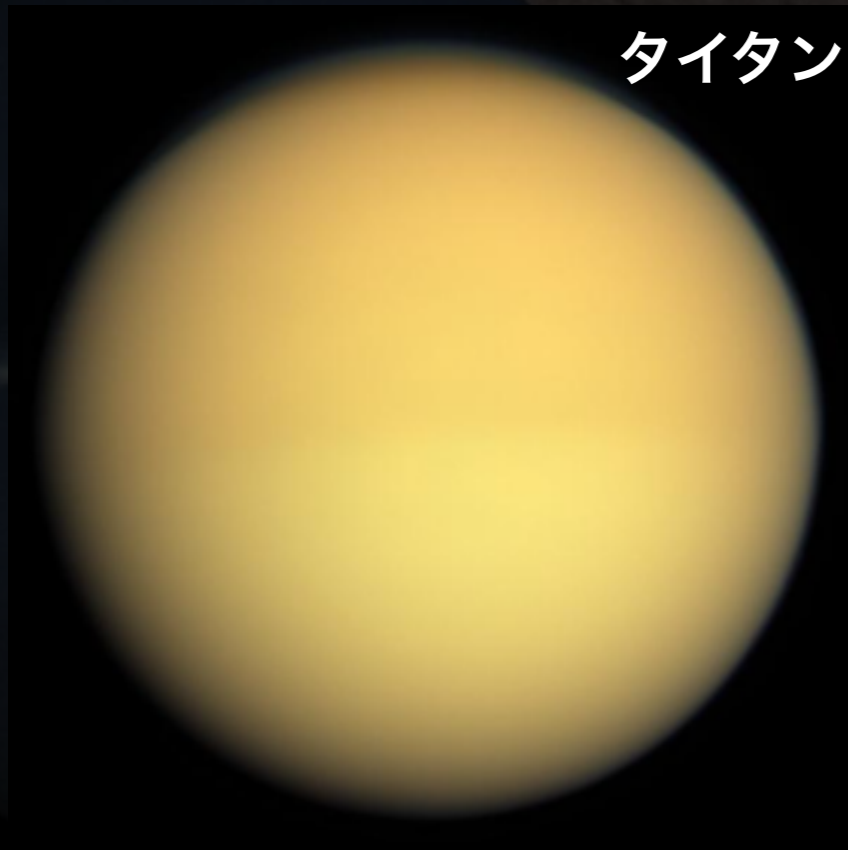
- UVフラックス : 0.1
- CH₄混合率 : 0.6 %



- ✓ 冥王星とタイタンは同程度のヘイズ生成量 (e.g., Lavvas+10, Gao+17)
- ✓ タイタン(と冥王星?)のヘイズはアグリゲイト (e.g., Cabane+93, Rannou+97, Gao+17)
- ✓ トリトンに対するヘイズ微物理モデルの適用例はない

ヘイズ生成量は?
球形?アグリゲイト?

タイタン



- UVフラックス : 1
- CH₄混合率 : 1.5 %

冥王星



- UVフラックス : 0.1
- CH₄混合率 : 0.6 %

トリトン

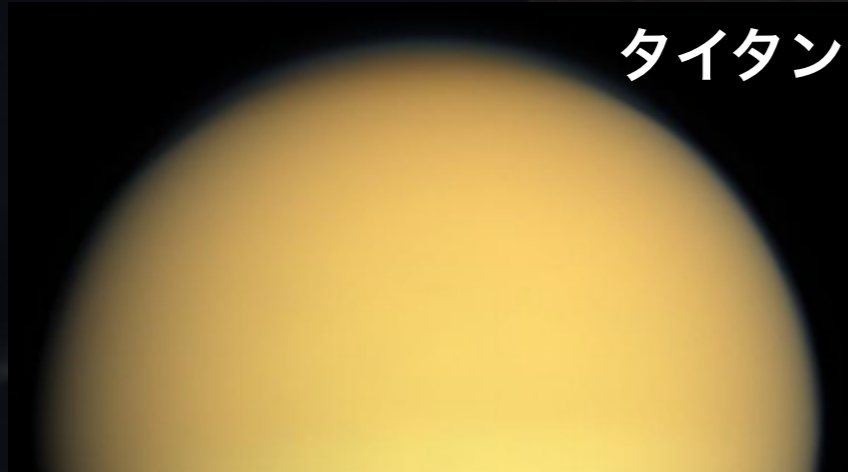


- UVフラックス : 0.2
- CH₄混合率 : 0.02 %

- ✓ 冥王星とタイタンは同程度のヘイズ生成量 (e.g., Lavvas+10, Gao+17)
- ✓ タイタン(と冥王星?)のヘイズはアグリゲイト (e.g., Cabane+93, Rannou+97, Gao+17)
- ✓ トリトンに対するヘイズ微物理モデルの適用例はない

ヘイズ生成量は?
球形?アグリゲイト?

タイタン



冥王星



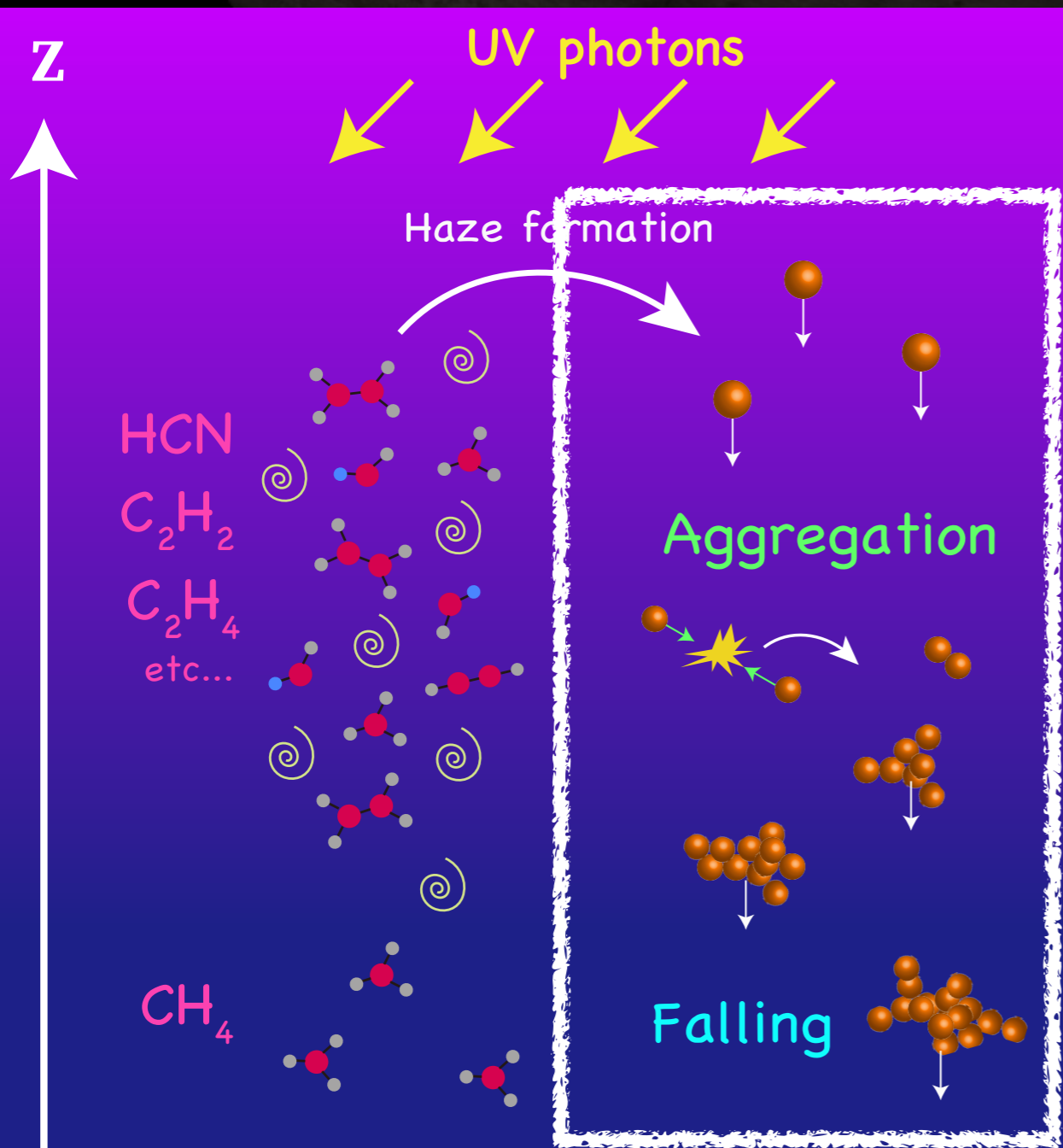
トリトン



本研究で答えたい問い

1. トリトンにおいてヘイズはどのように形成されるのか?
2. 他の衛星と比べてヘイズ生成量をどの程度か?
3. ヘイズは球形か?アグリゲイトか?

- ✓ ヘイズ粒子の鉛直サイズ分布を計算 (e.g., Toon+92, Lavvas+10, Gao+17)
- ✓ モノマー形成後の重力落下、衝突合体、空隙率進化を考慮



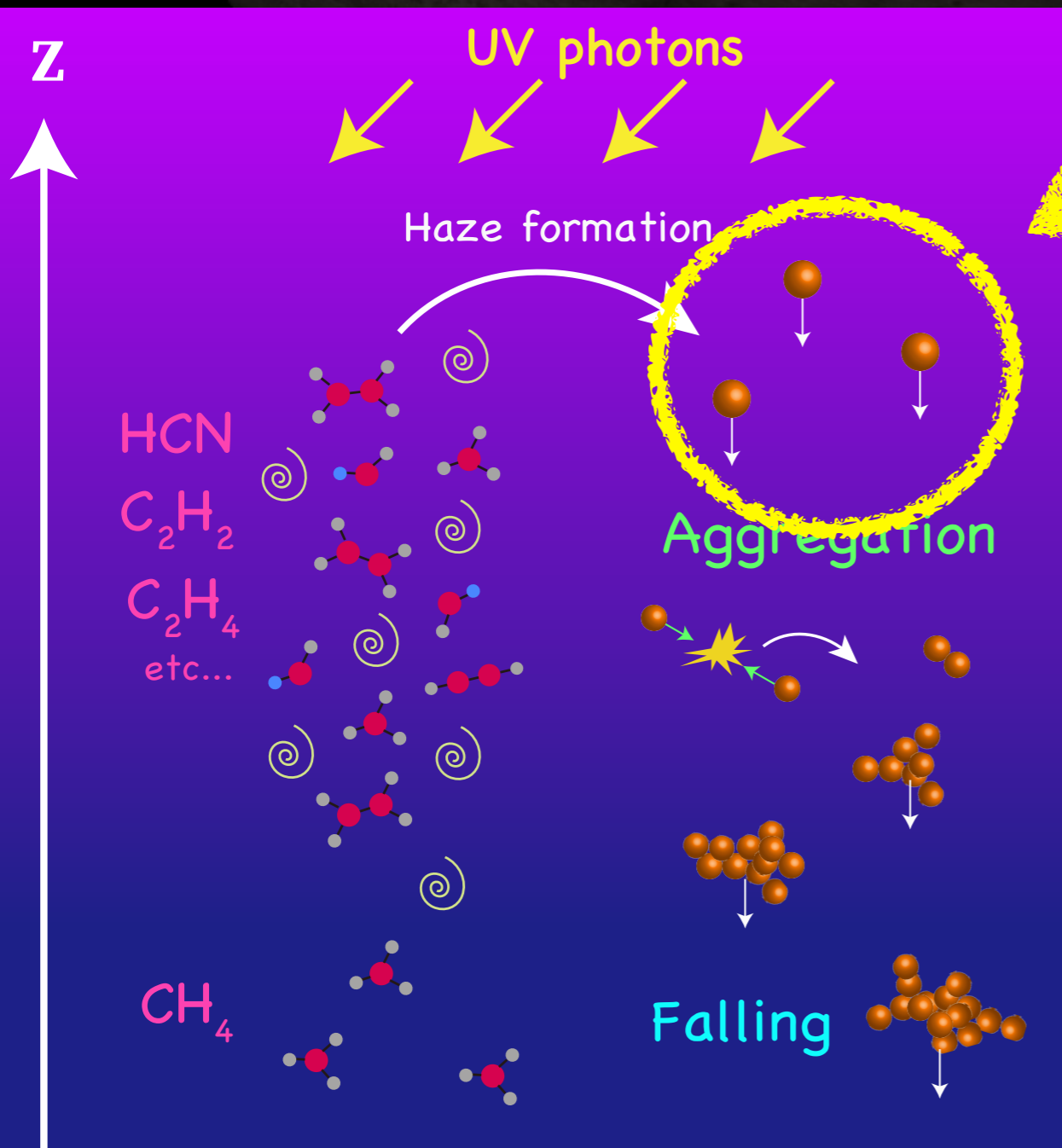
(1) 質量 m の粒子の数密度進化

$$\frac{\partial n(m)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^m K(m', m - m') n(m') n(m - m') dm' - n(m) \int_0^\infty K(m, m') n(m') dm' - \frac{\partial}{\partial z} [v_t n(m)]$$

(2) 質量 m の粒子の平均体積進化 (Okuzumi+09)

$$\frac{\partial V(m)n(m)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^m [V_{1+2}K](m', m - m') n(m') n(m - m') dm' - V(m)n(m) \int_0^\infty K(m, m') n(m') dm' - \frac{\partial}{\partial z} [v_t V(m)n(m)]$$

- ✓ ヘイズ粒子の鉛直サイズ分布を計算 (e.g., Toon+92, Lavvas+10, Gao+17)
- ✓ モノマー形成後の重力落下、衝突合体、空隙率進化を考慮



パラメーター

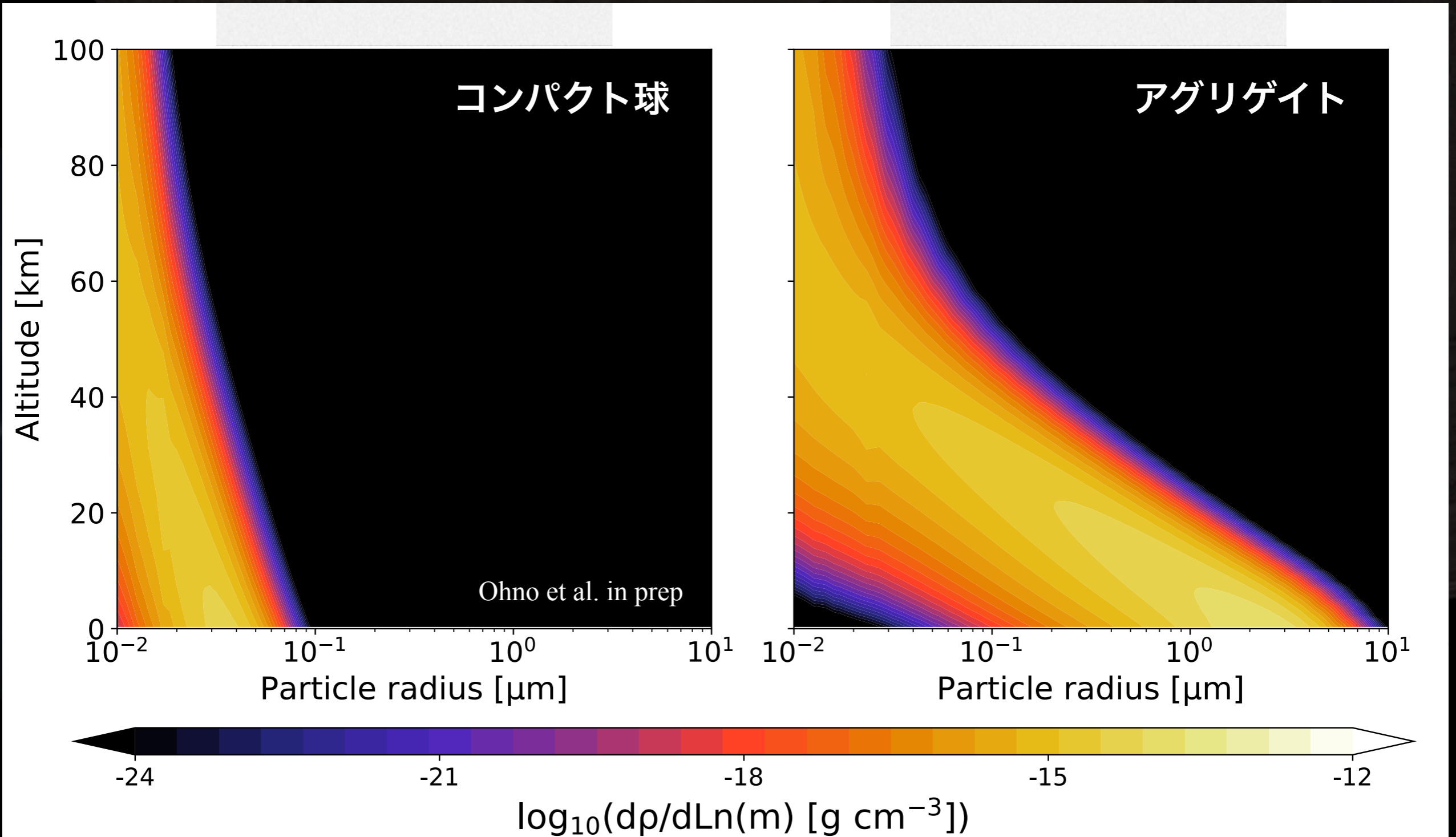
- ❖ **ヘイズ質量フラックス** (生成量と対応)
- ❖ **モノマー半径**
(先行研究と同じ $r=10$ nm を本講演では仮定)
- ❖ **粒子の帯電量**
(本講演では帯電なしを仮定)

温度圧力構造は Strobel & Zhu 17 の
輻射伝導散逸モデルから引用



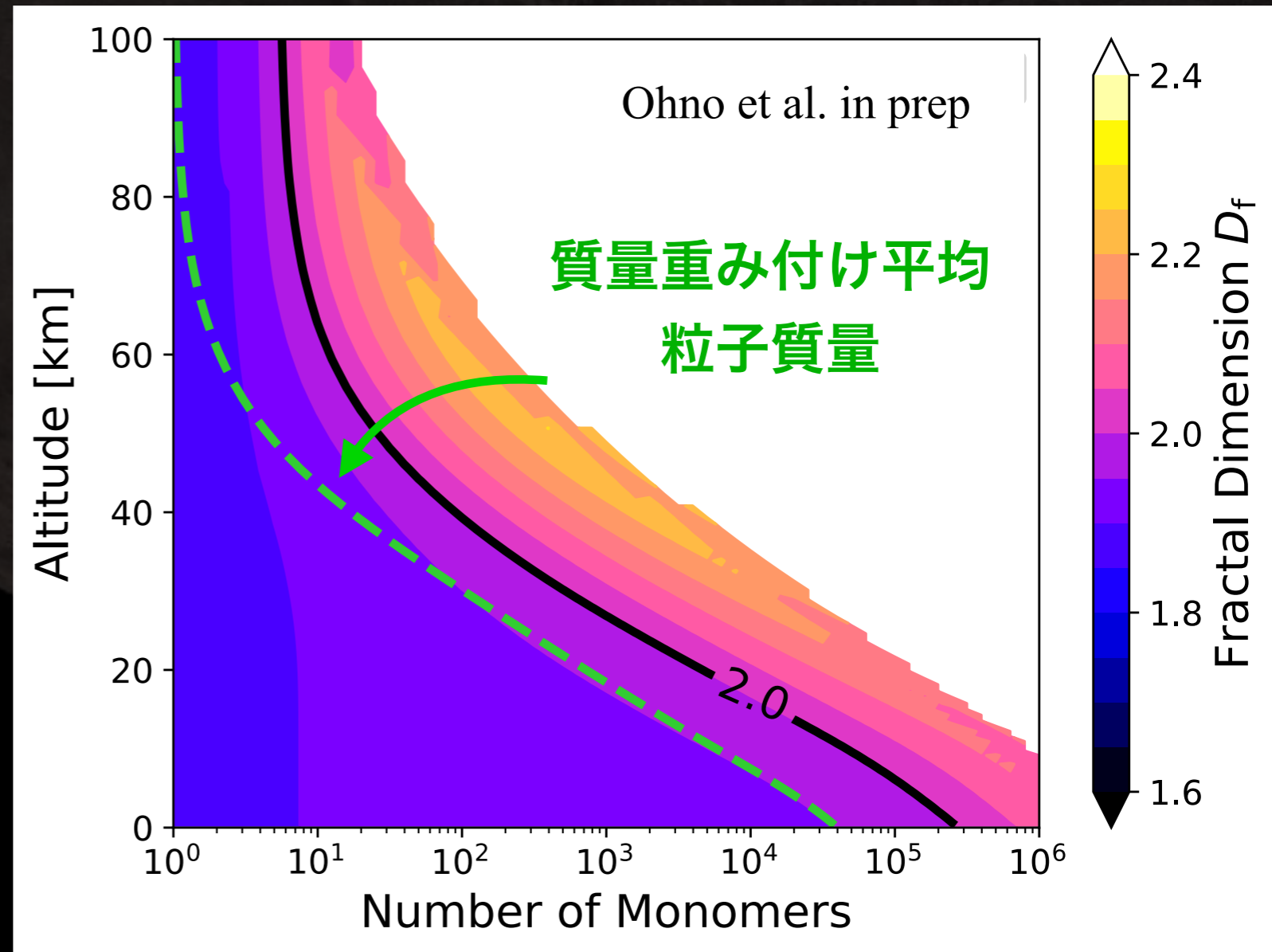
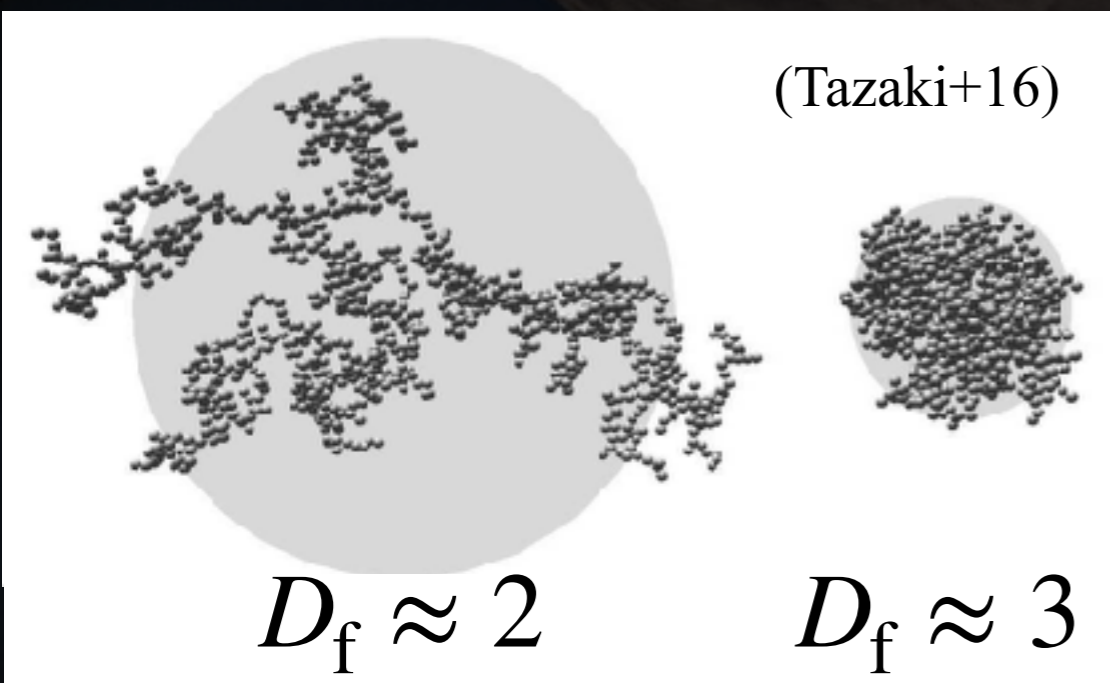
結果

- ✓ 下層ほど粒子サイズは大きくなる ← 落下速度が遅くなるため
- ✓ コンパクト球の場合は殆ど成長しない (<0.1 μm)



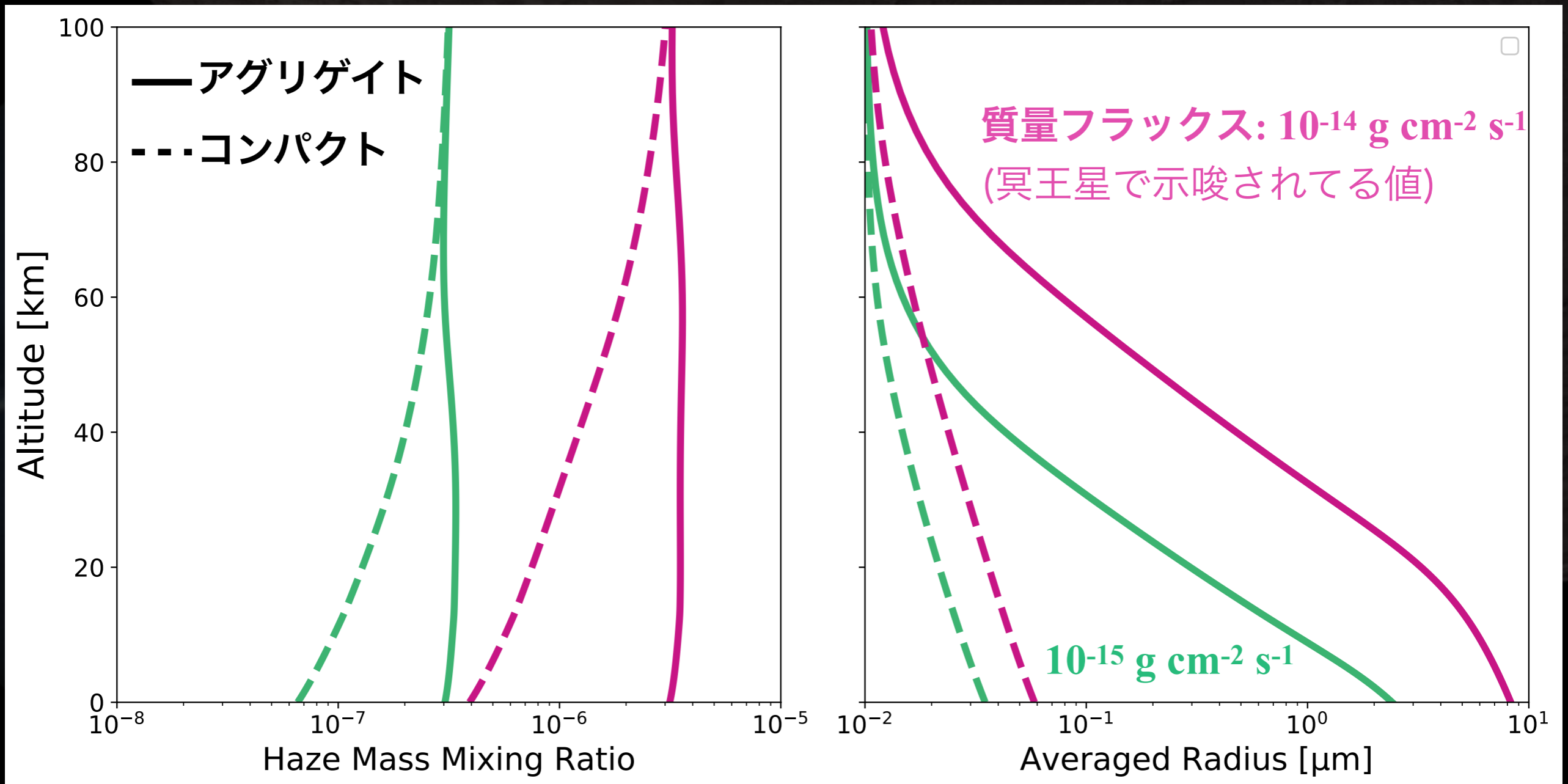
- ✓ フラクタル次元は高度、粒子サイズに依存
- ✓ 大サイズの粒子ほどフラクタル次元が高くなる

$$m_{\text{agg}} \propto r_{\text{agg}}^{D_f}$$

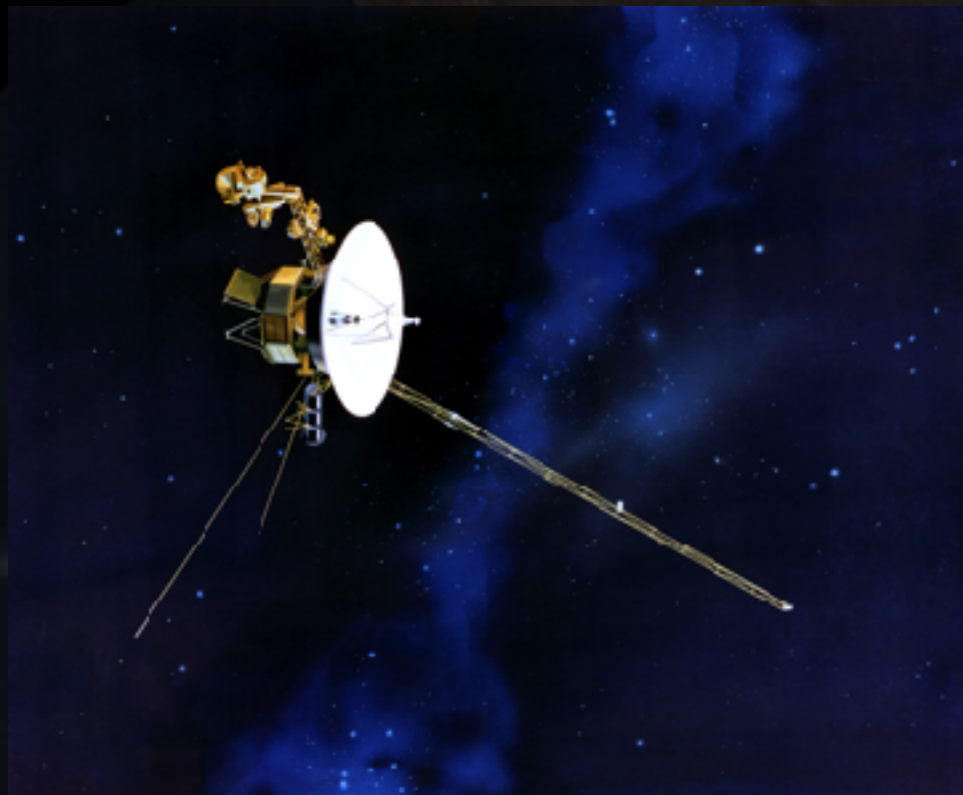


大半のヘイズはフラクタル次元 $D_f \sim 1.95$ を持ちうる

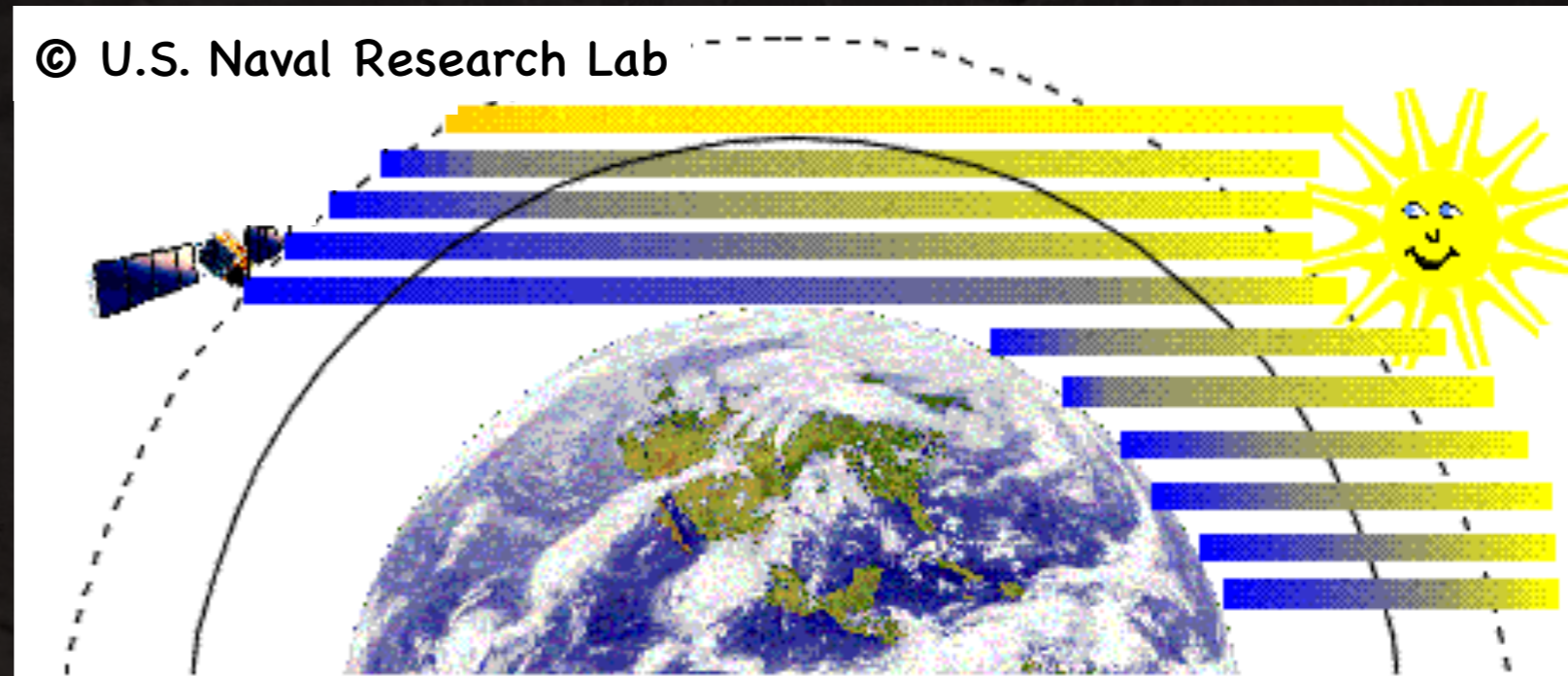
- ✓ 質量混合率・サイズは質量フラックスと共に増加
- ✓ アグリゲイトの場合は質量混合率は鉛直一定になる



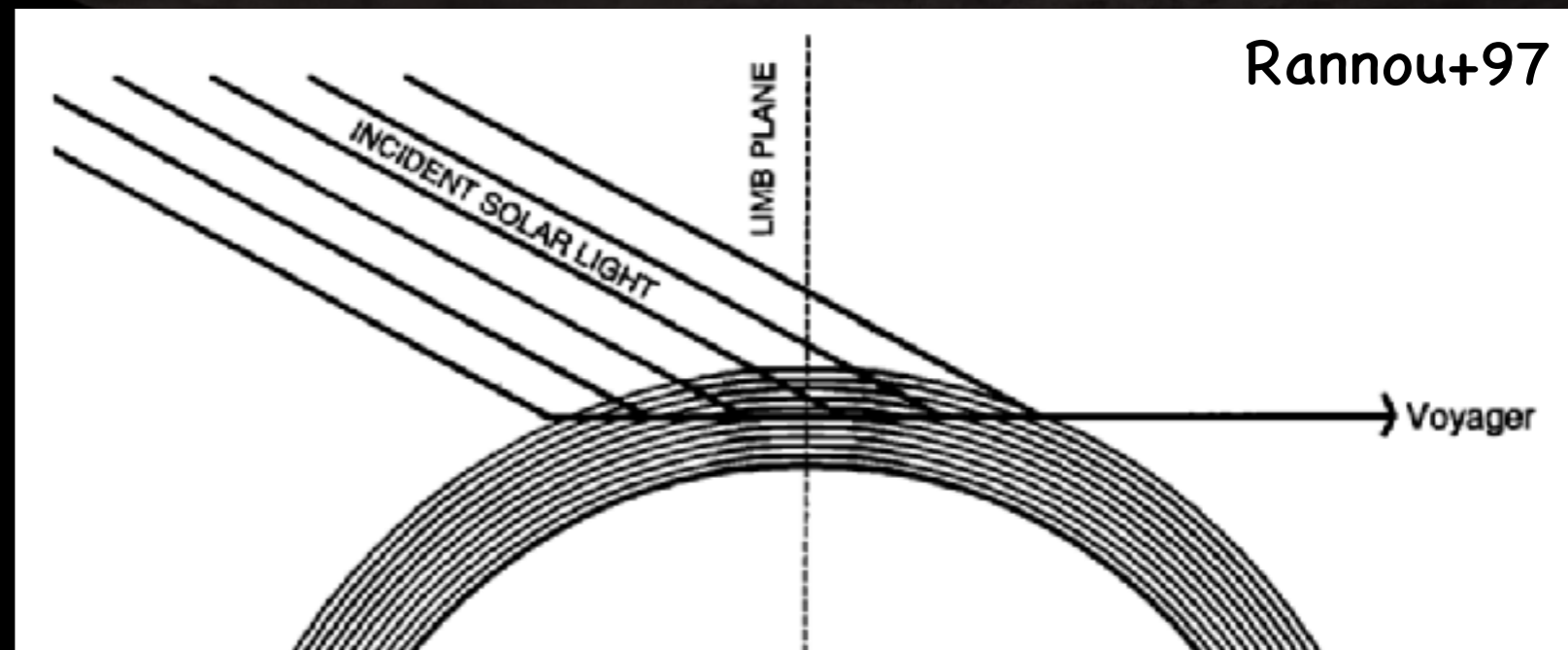
Voyager 2が
トリトンのヘイズ観測を実施



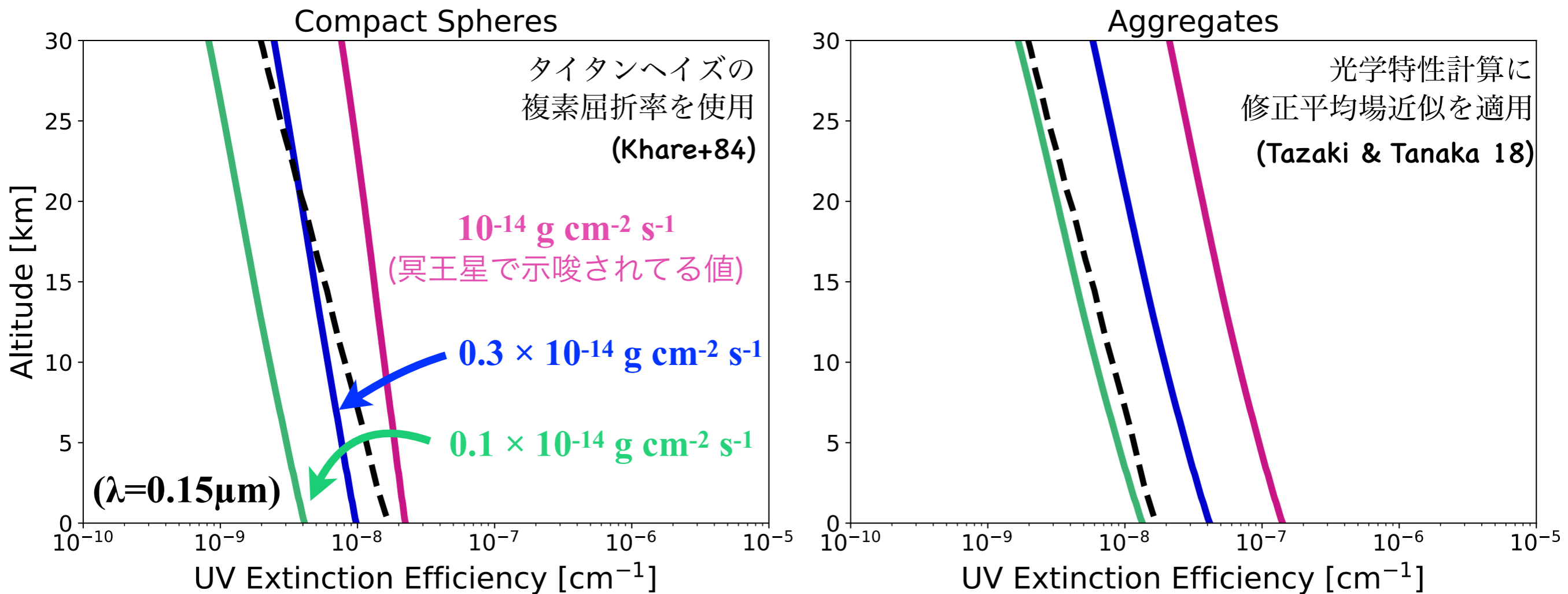
(1) 太陽の遮蔽観測 → ヘイズ減光係数の鉛直分布
(Herbert & Sandel 91, Krasnopolsky+92)



(2) ヘイズの散乱光観測 → 粒子サイズ・形状
(Pollack+90, Rages & Pollack 92, Hillier+90, 92)



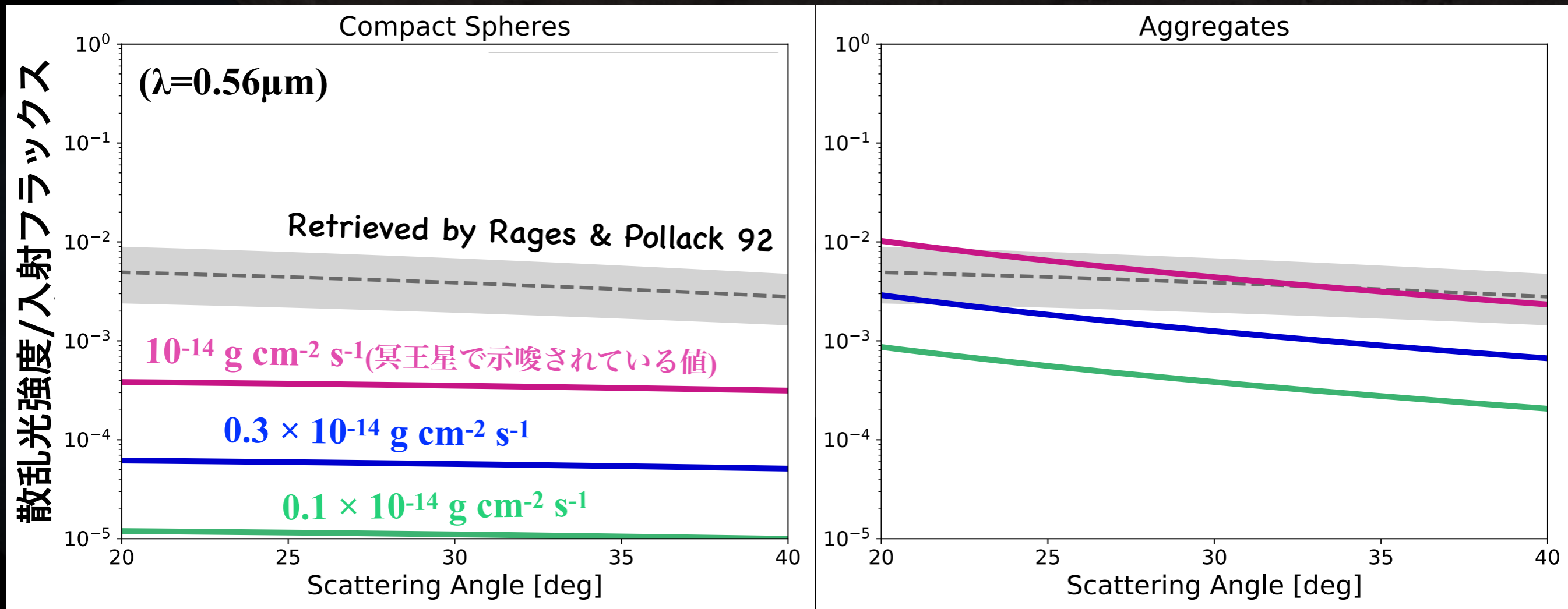
- ✓ ヘイズ質量フラックスが冥王星より~1桁低い時に観測をよく再現
- ✓ アグリゲイトヘイズは観測された鉛直勾配もよく再現



ヘイズ生成が前駆物質質量で律速されていることを示唆？

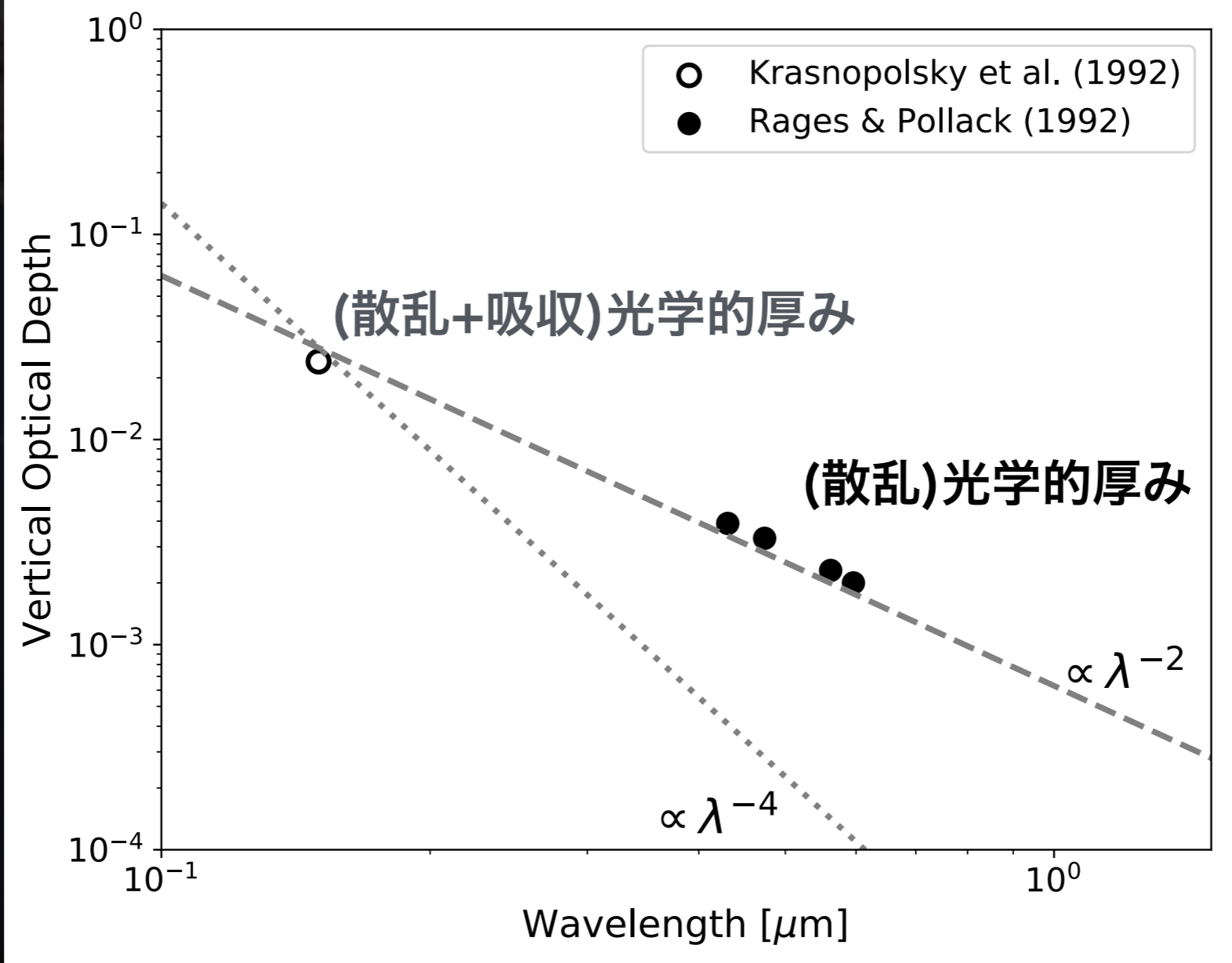
散乱光観測(@VIS)との比較

- ✓ 散乱光強度は光学的に薄いヘイズに対して $I/F \approx (1/4)P(\theta)\tau_{sca}\sqrt{2\pi R_p/H}$
(Liou02, Gladstone+16, Cheng+17)
散乱位相関数 散乱光学的厚み
- ✓ 散乱光強度は観測より低くなる傾向

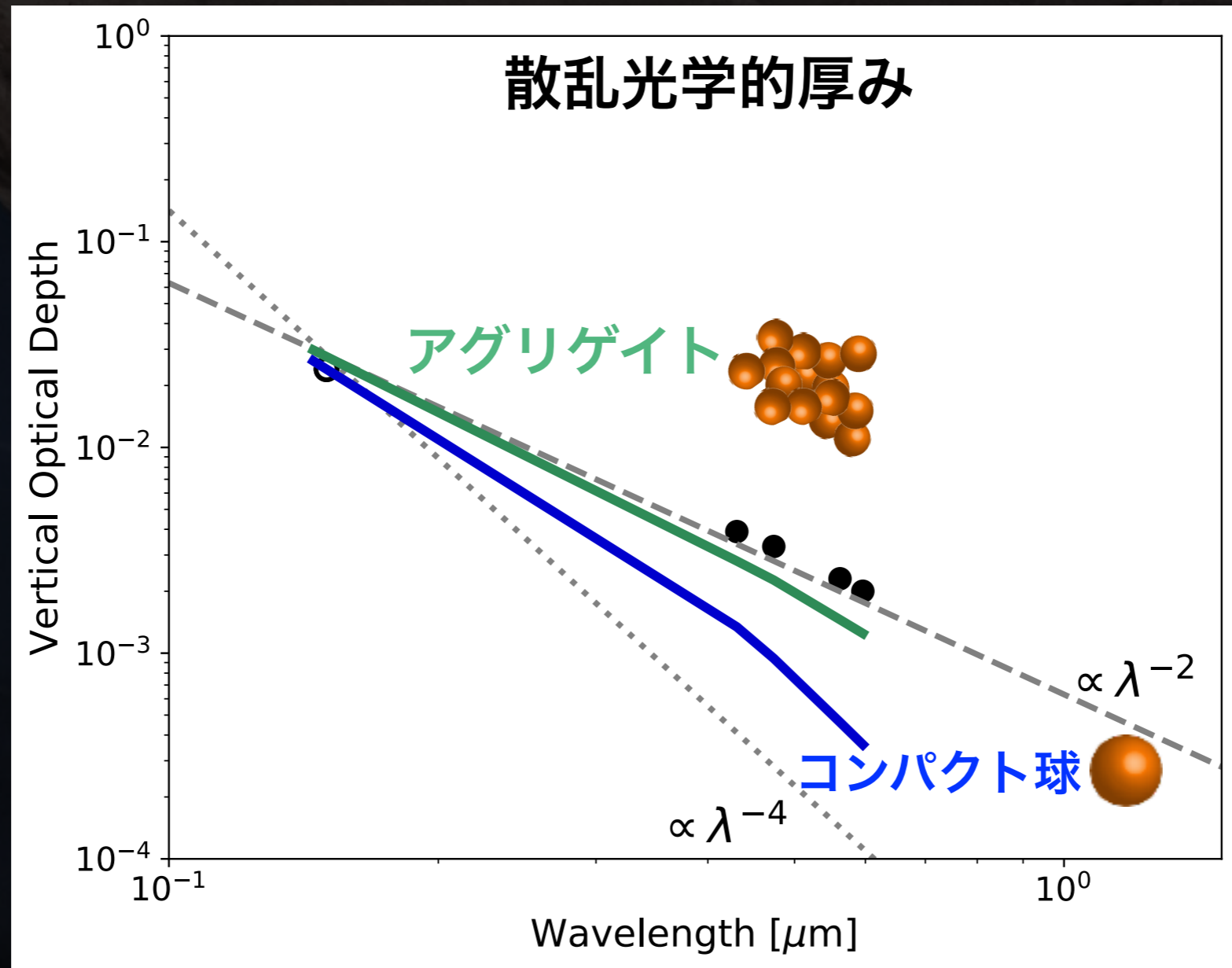


遮蔽観測からの推定より~1桁高い質量フラックスが必要

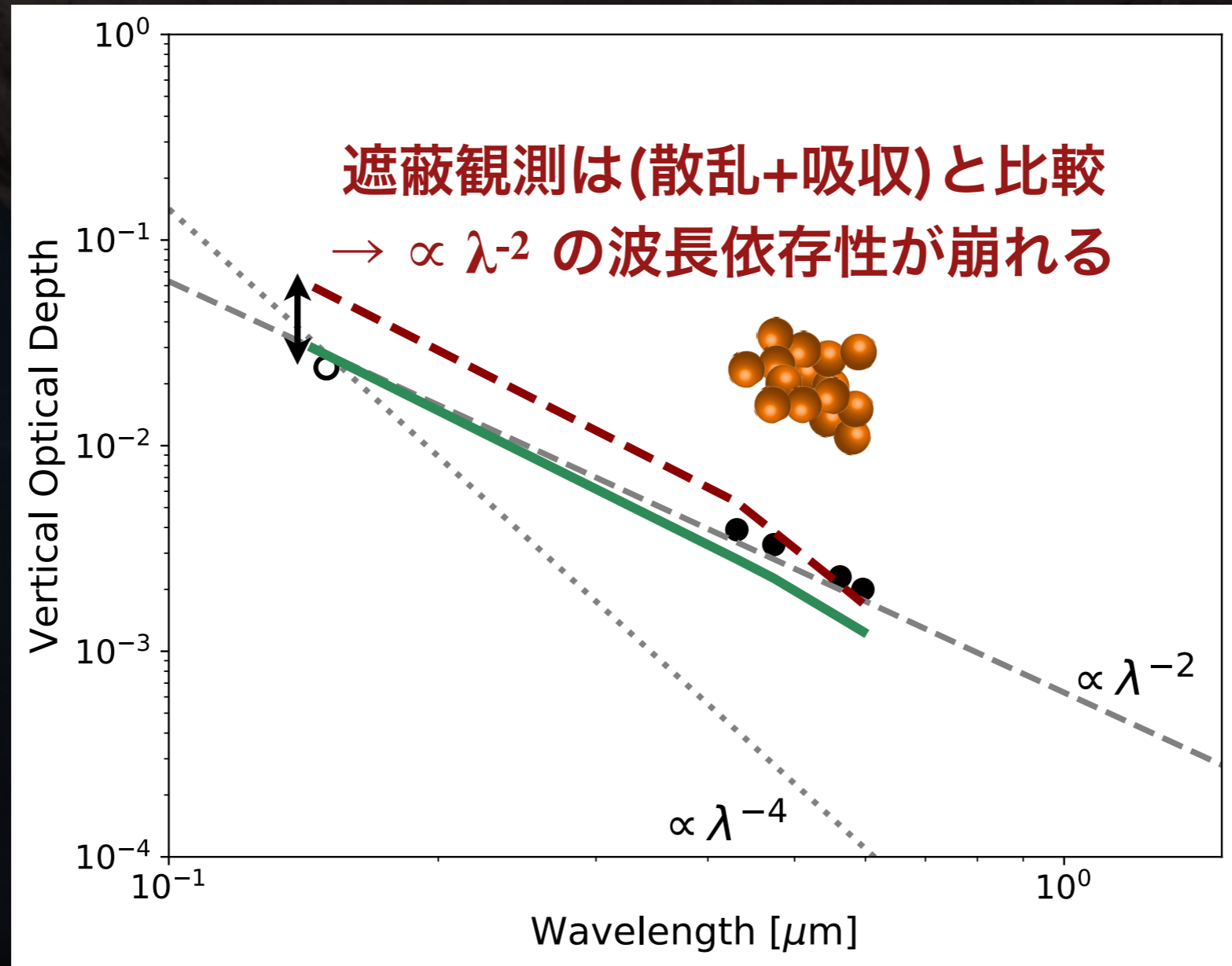
✓ 観測が示唆するヘイズの光学的厚みは λ^{-2} に比例



- ✓ 観測が示唆するヘイズの光学的厚みは λ^{-2} に比例
 - ▶ コンパクト球 → 粒径が小さすぎて波長依存性が強くなりすぎる
 - ▶ アグリゲイト → 散乱光学的厚みの波長依存性は整合的



- ✓ 観測が示唆するヘイズの光学的厚みは λ^{-2} に比例
 - ▶ コンパクト球 → 粒径が小さすぎて波長依存性が強くなりすぎる
 - ▶ アグリゲイト → 散乱光学的厚みの波長依存性は整合的



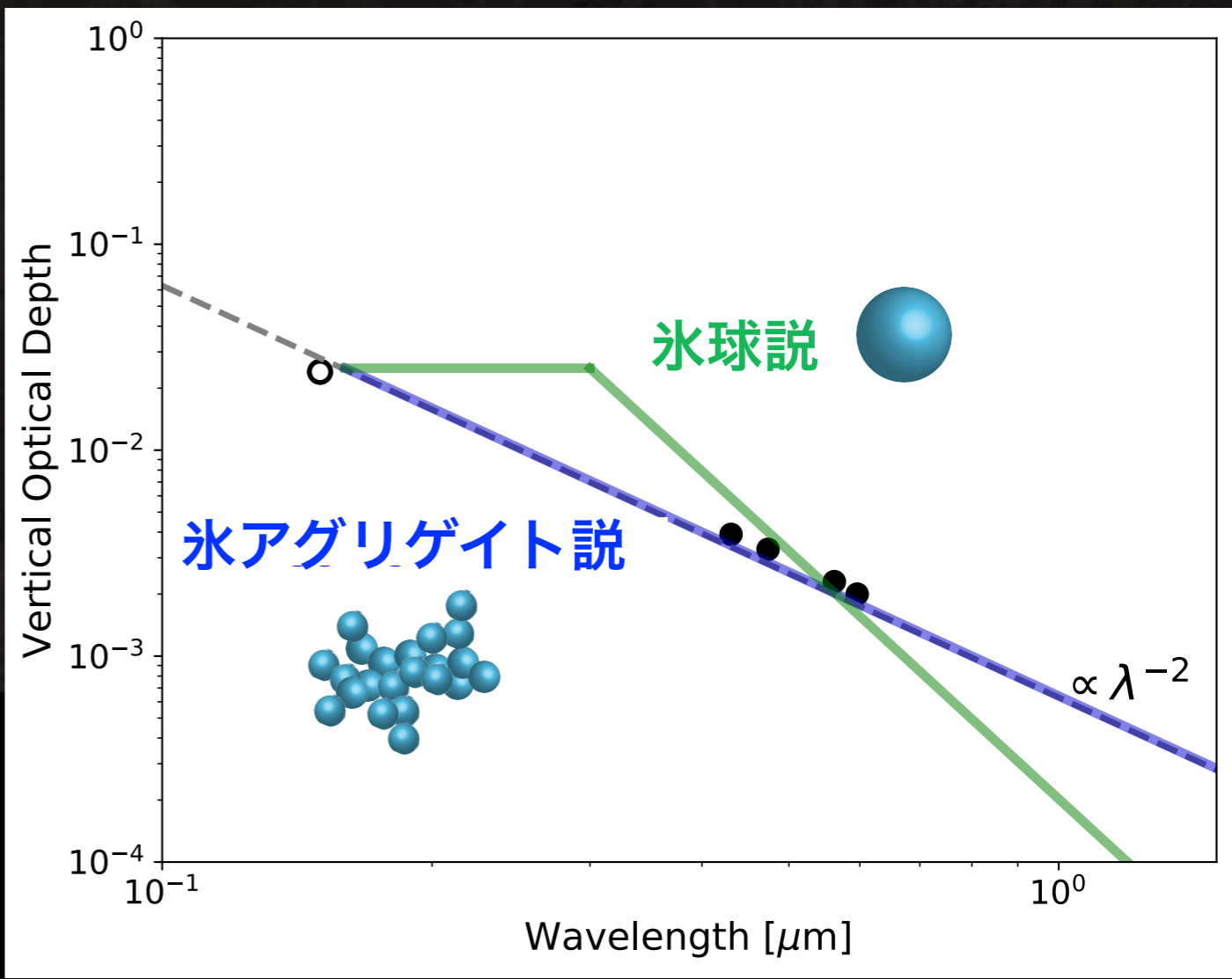
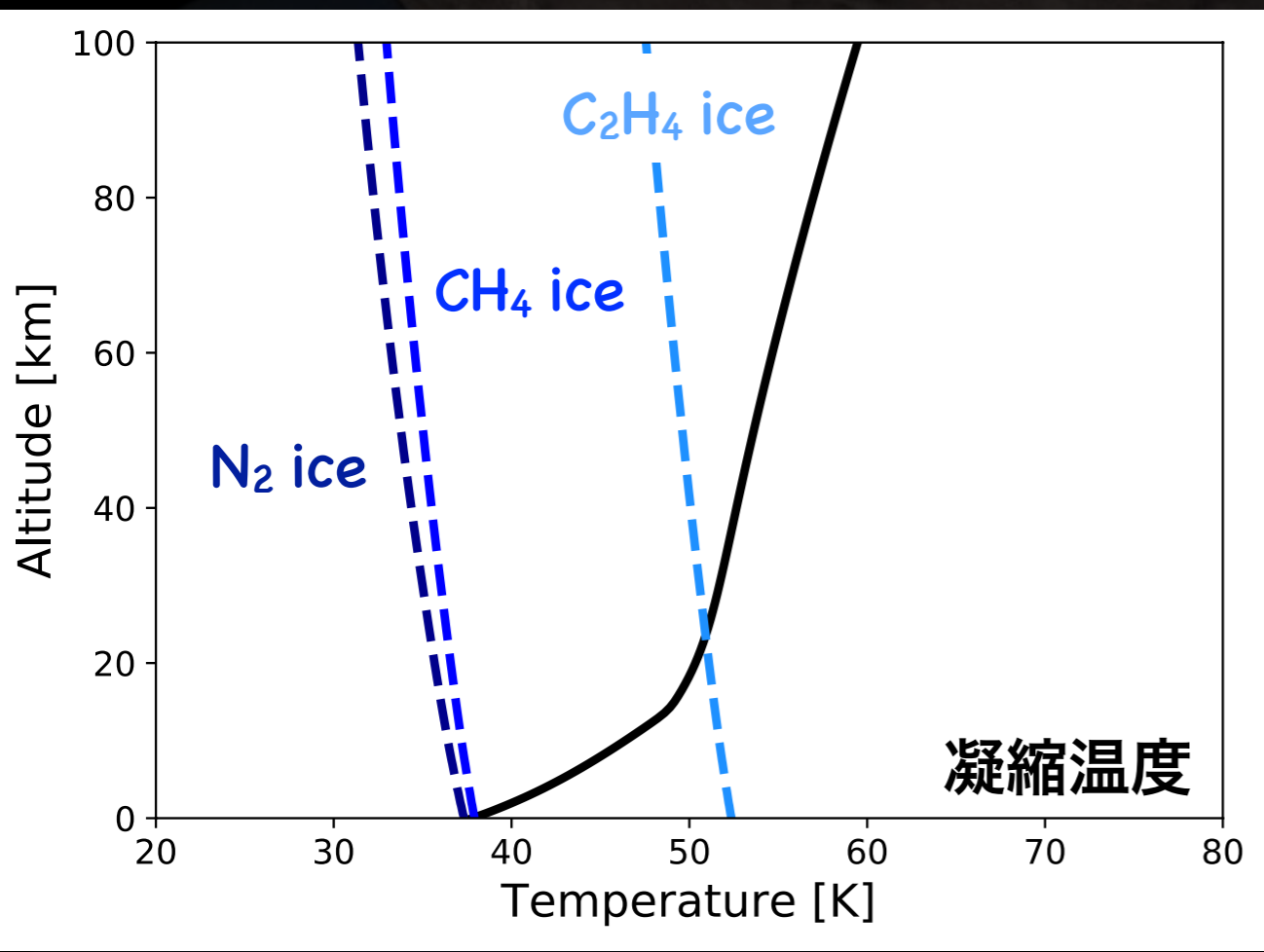
タイタンのヘイズのような物質は吸収が強すぎる

炭化水素氷の凝縮が重要？

波長依存性を説明しうる2つの仮説

- (1) アグリゲイトが殆ど吸収しない物質(氷?)で構成 (氷アグリゲイト説)
- (2) ヘイズが凝縮成長で十分大きいサイズのコンパクト球に成長 (氷球説)

炭化水素氷が凝縮可能



**トリトンのヘイズ形成において
炭素水素氷が重要な役割を持つ可能性がある**

サイズ分布・空隙率進化を考慮した微物理モデルを構築し トリトンにおけるヘイズの鉛直構造を調べた

- ✓ アグリゲイトヘイズはコンパクト球より桁で大きいサイズに成長
- ✓ 大半のヘイズは $D_f \sim 1.95$ を取りうる ← タイタンに示唆される値と一致
- ✓ 太陽遮蔽観測(@UV)は質量フラックスが冥王星より~1桁低い時説明可能
アグリゲイトの方がヘイズ鉛直構造をよりよく説明
- ✓ ヘイズ散乱光観測(@VIS)は質量フラックスが冥王星程度の時説明可能
- ✓ 質量フラックスの不一致はヘイズ光学特性に由来 (タイタンヘイズは黒すぎる)
- ✓ 炭化水素氷の凝縮によって不一致が解消される可能性がある