

2025.10.02 第2回TMTウェビナー

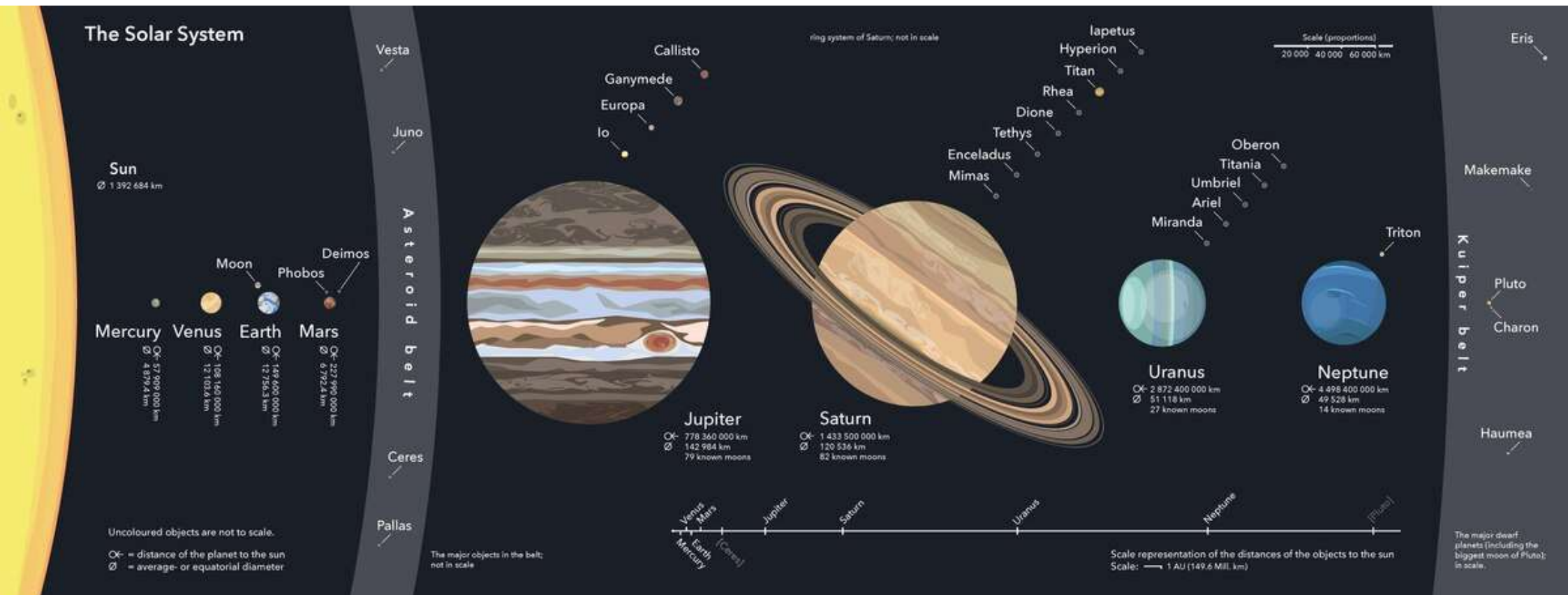
TMT で拓く太陽系小天体研究

寺居 剛

国立天文台ハワイ観測所

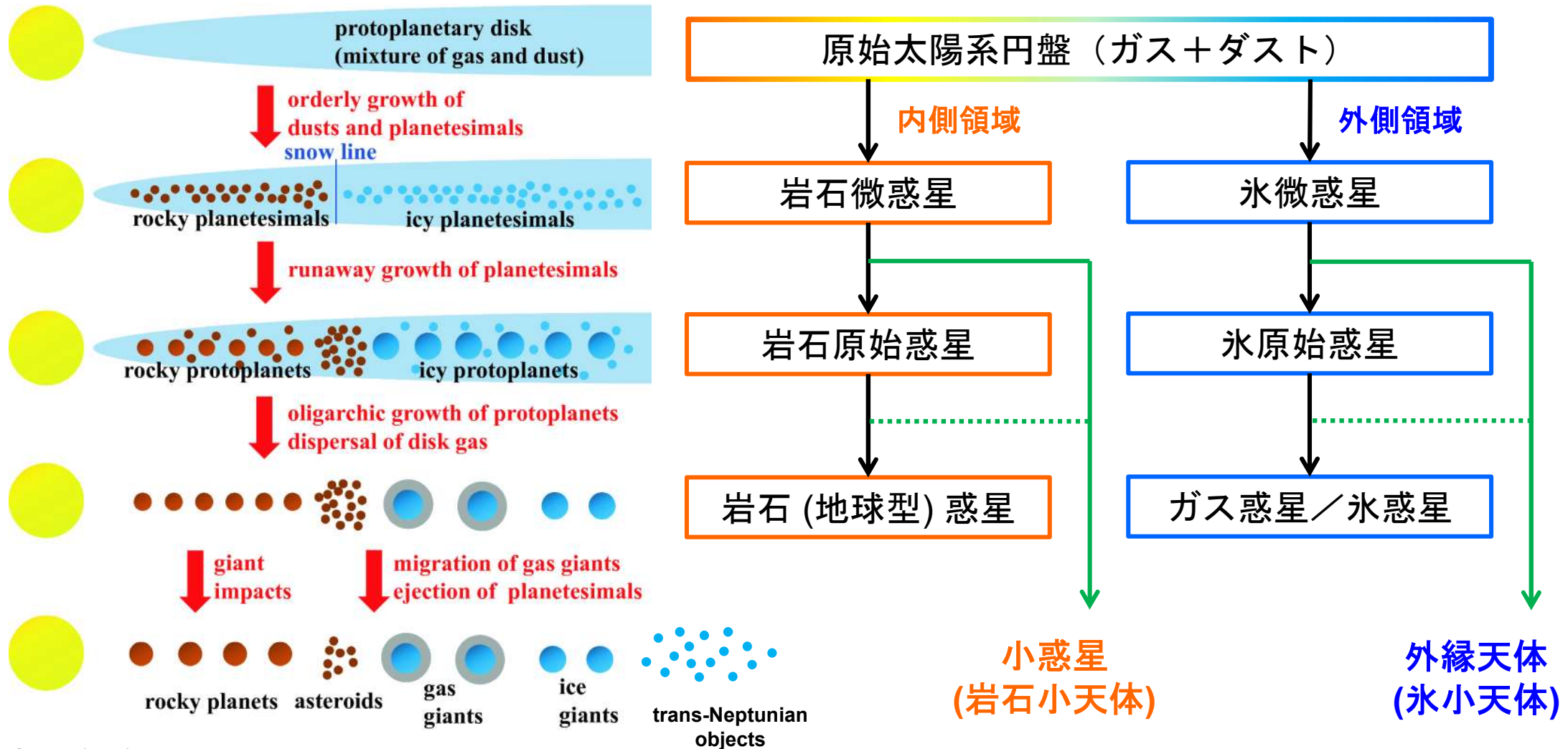
太陽系

外縁天体 (TNOs) 領域 (a.k.a. カイパーベルト)



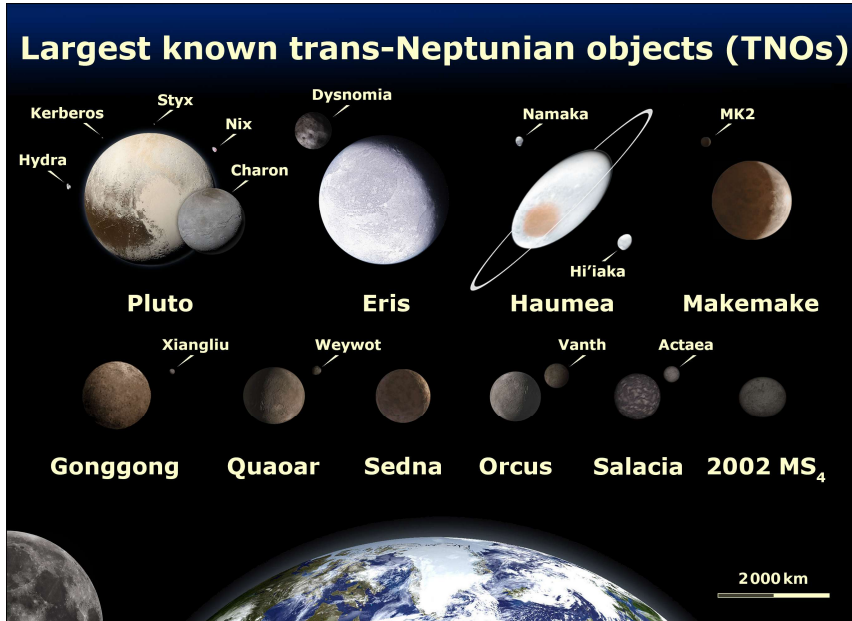
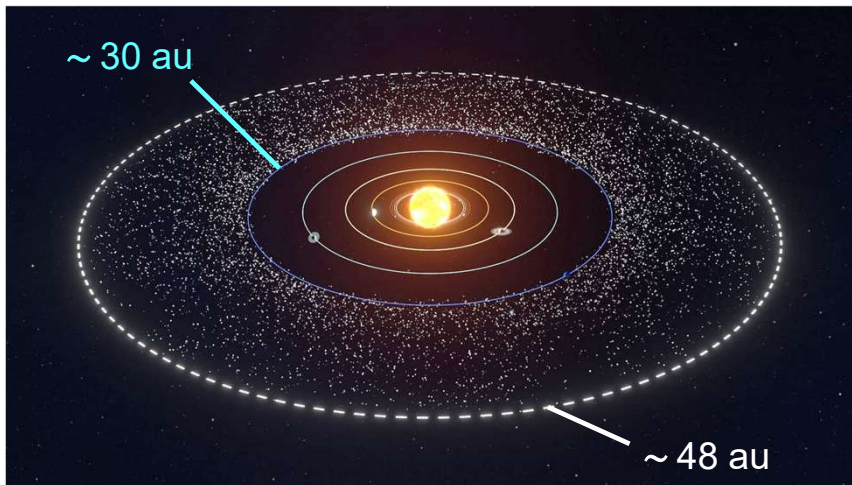
小惑星帯

惑星形成と小天体



Sugiura (2020)

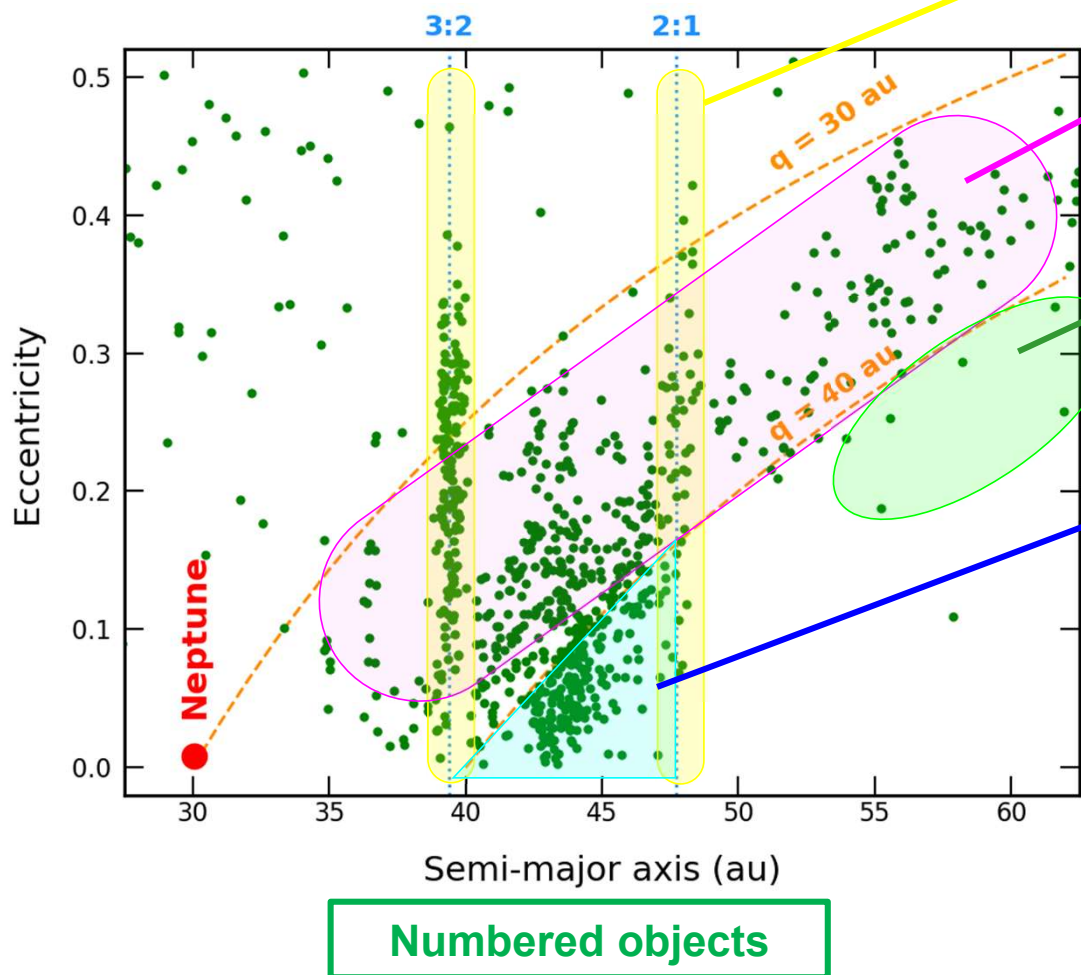
太陽系外縁天体



- 海王星軌道以遠の軌道を持つ小天体集団
- 特に ~38 au から ~48 au の範囲に密集
- 1992年に初めて発見され、現在までに仮符号が付いた天体は 5000 個以上、軌道要素が確定して登録番号が付いた天体は約 1000 個
- 4 個の準惑星を筆頭に、直径 1000 km 級の天体が 10 個近く存在
- 氷分子に富み、始原的な天体として重要

外縁天体の力学構造

軌道長半径 vs. 軌道離心率



Resonant 天体

海王星と平均運動共鳴の位置にある天体

Scattered disk 天体

海王星から強い重力相互作用を受けて
軌道が散乱された天体

Detached 天体

大きな軌道半径を持ち (現在は) 非散乱
軌道にある天体

Classical 天体

海王星から離れており、かつ低離心率のため
海王星による重力散乱を受けない天体

低軌道傾斜角

“cold” classical

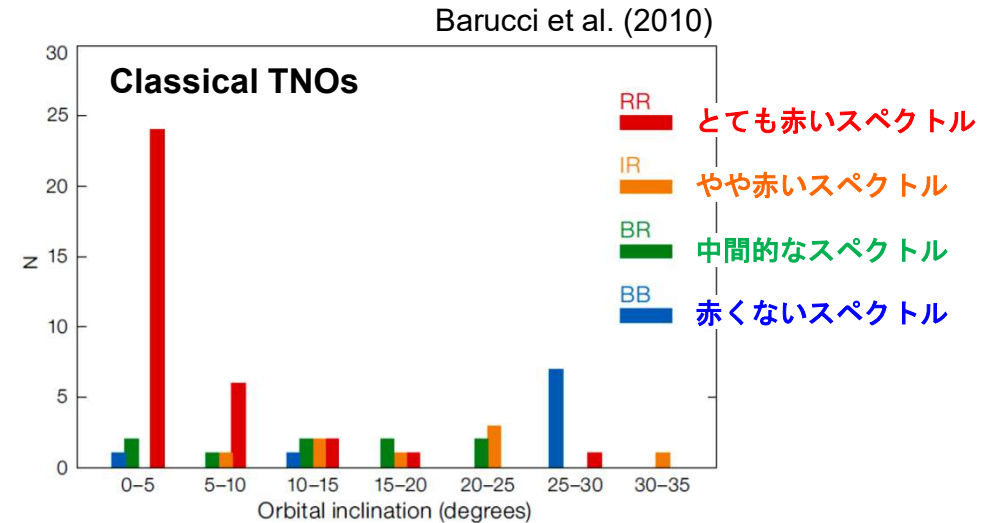
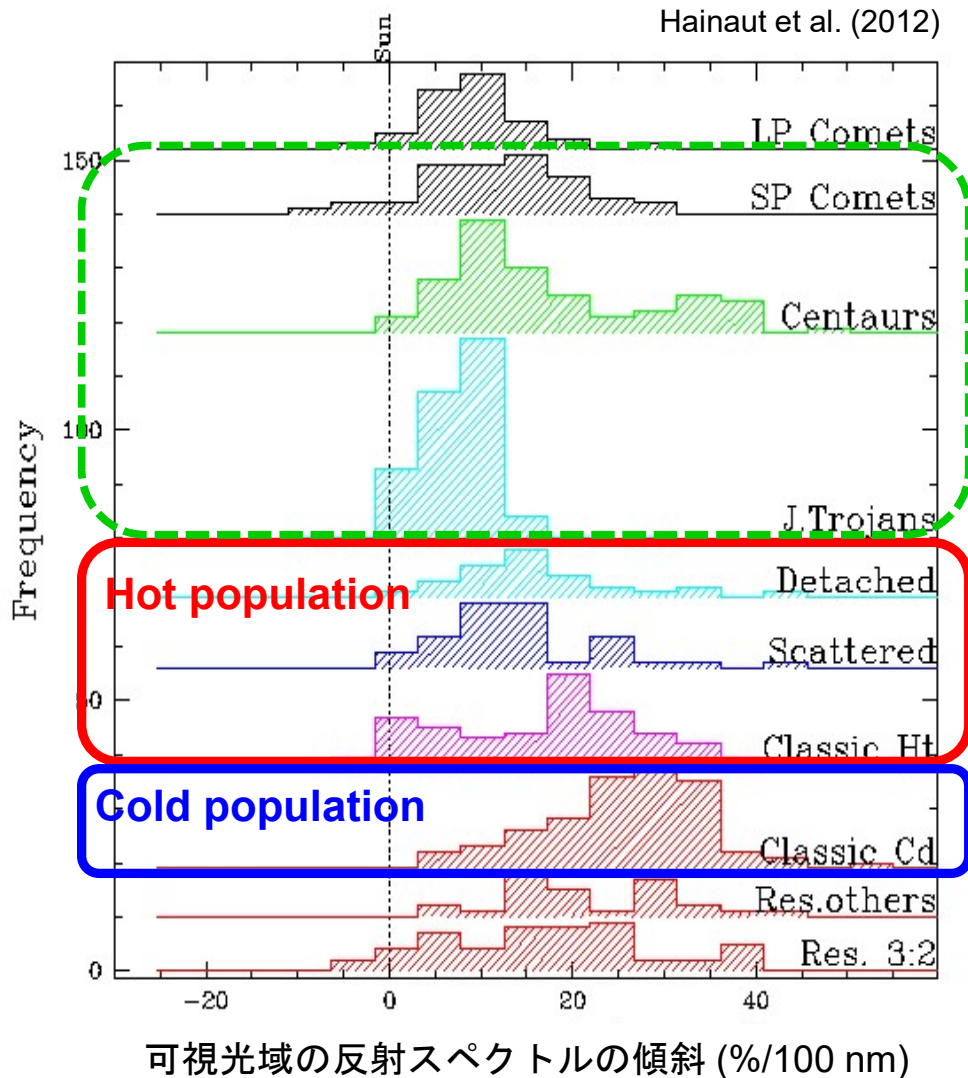
高軌道傾斜角

“hot” classical



高軌道傾斜角の non-resonant 天体を
“hot population” と総称

cold/hot populations の反射スペクトル



- cold population 天体は赤いスペクトルを持つ
- hot population 天体はそれほど赤くないスペクトルのものが多い
- 木星－海王星間の領域に位置する他の小天体集団は hot population と類似のスペクトル

外縁天体の起源

	Cold population	Hot population
軌道離心率・傾斜角	小さい	大きい
赤いカラー／スペクトル	多い	少ない
反射率	高い	低い
binary	多い	少ない
サイズ分布傾斜 (大型天体の割合)	急 (少ない)	緩やか (多い)

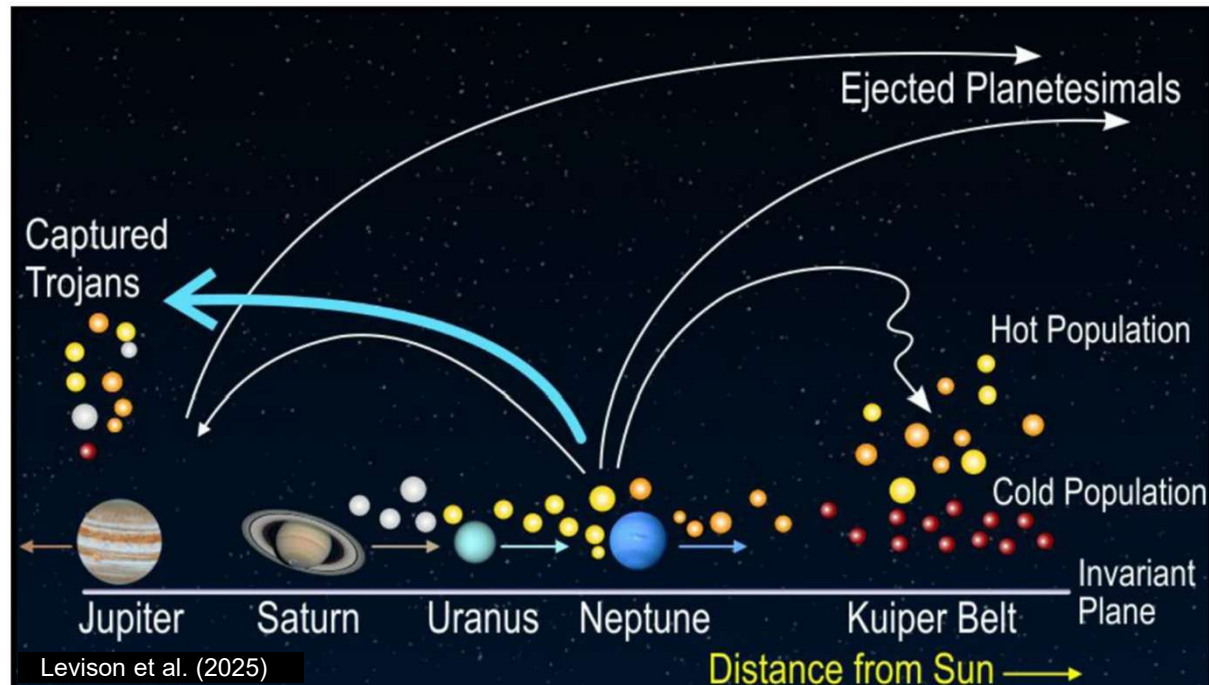
→ 両者は起源（形成された場所）が異なる

Cold population …… 現在の位置と（ほぼ）同じ場所で形成された

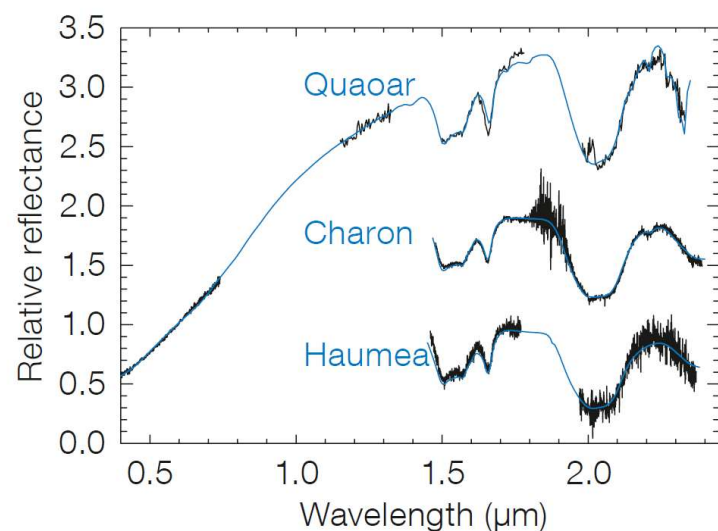
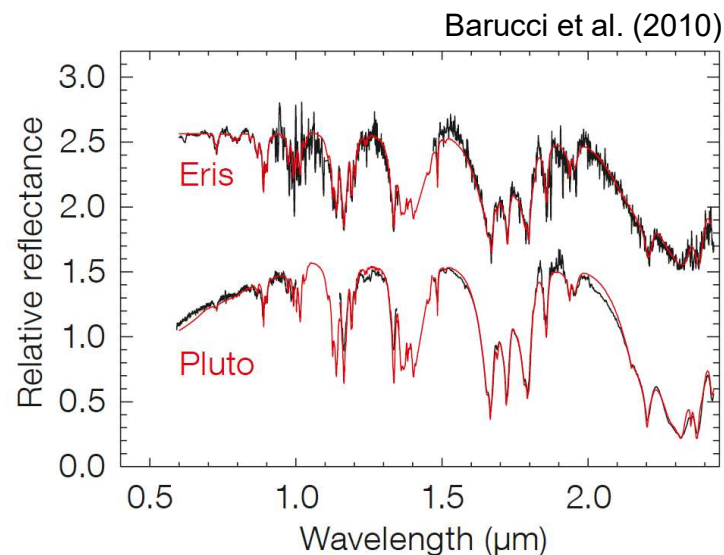
Hot population …… 今よりも内側の領域 (< 30 au) で形成され、その後に外縁天体領域に運搬された

惑星大移動

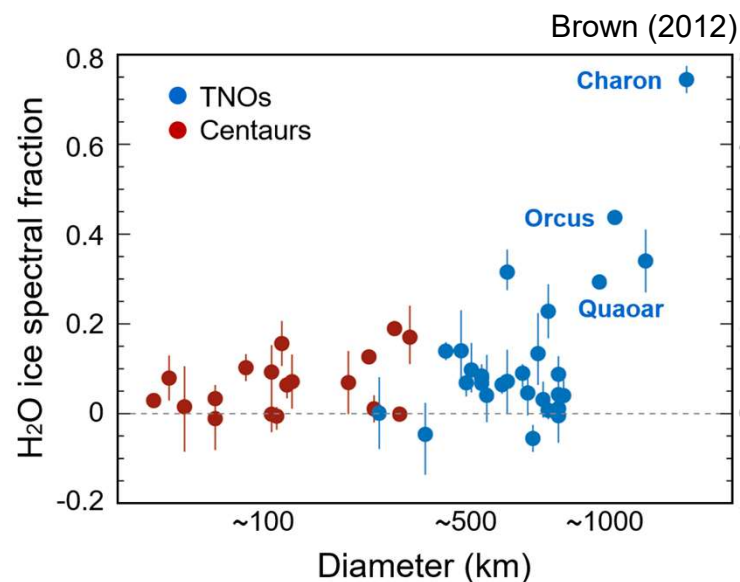
- 外縁天体の力学構造を説明するには、海王星は形成後に外側に移動する必要がある。
- 木星から海王星までの巨大惑星は今の配置よりも狭い範囲内で形成され、微惑星円盤との重力相互作用により軌道半径が変化したとする仮説が有力。
- Hot population 天体は天王星や海王星からの重力摂動によって外側に散乱された
- 内側に散乱された天体の一部が木星トロヤ群の起源？



外縁天体の表層物質

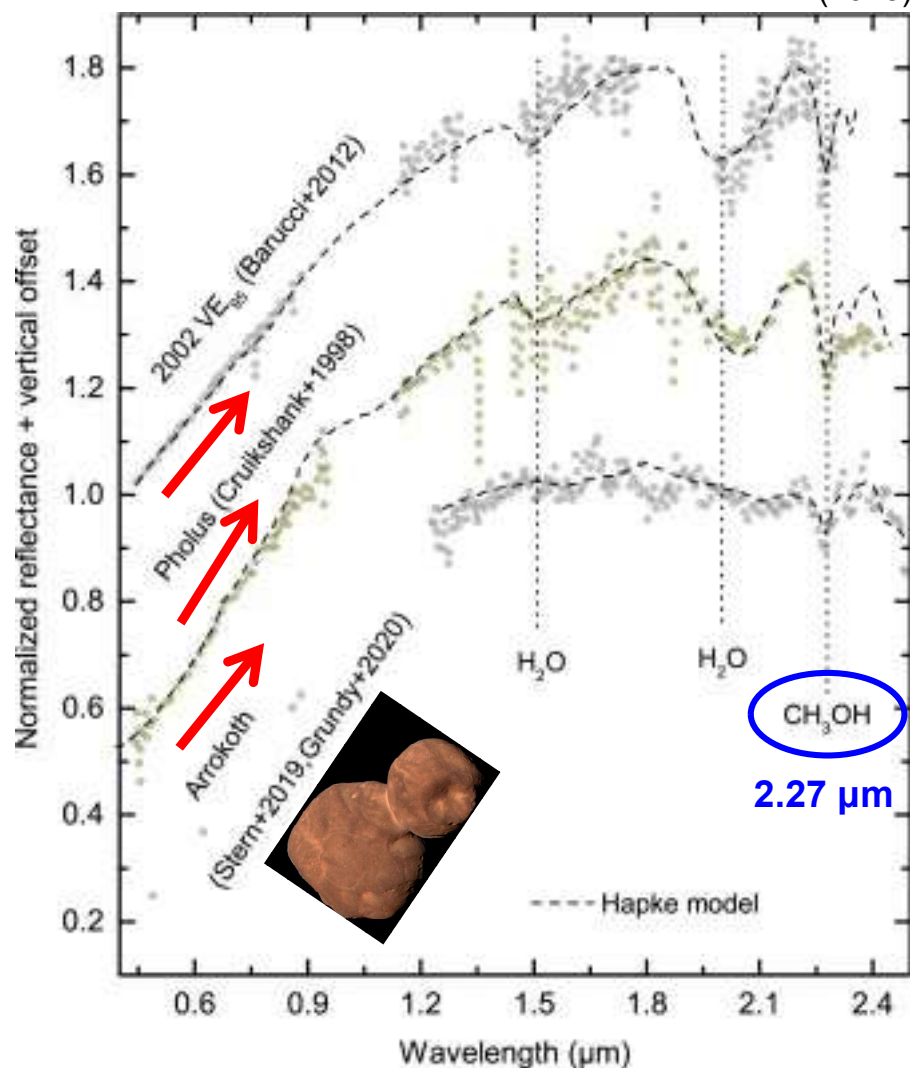


- 外縁天体や氷衛星のスペクトルからは H_2O や CH_4 氷を始め、 N_2 、 CH_3OH 、 C_2H_6 、 CO 、 CO_2 、 NH_3 -hydrate などの氷分子が検出されている。
- 準惑星相当の大型天体の表層は CH_4 氷が支配的。それら以外の天体上で見つかる氷は主に H_2O 。
- H_2O 氷が検出されない天体も多い。
- H_2O 氷量と可視カラーの関係性ははっきりしてなかった。



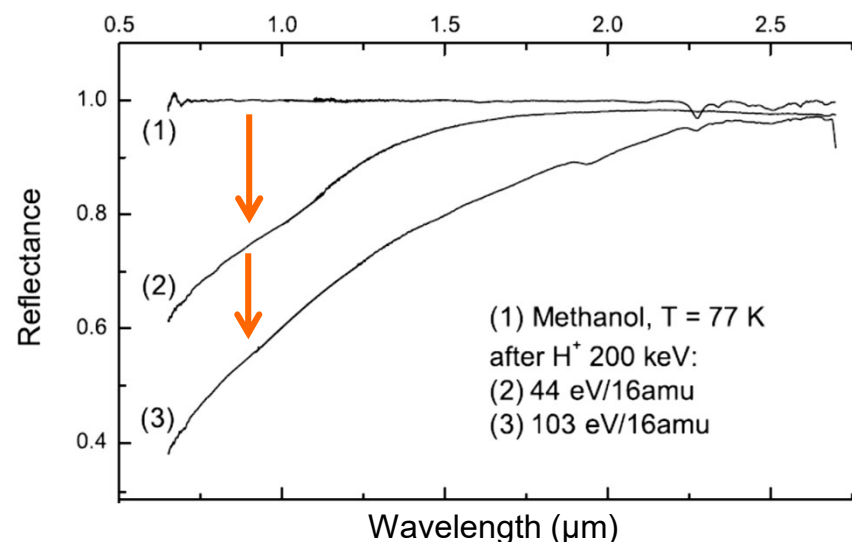
外縁天体表面の赤化

Hénault et al. (2025)



- 赤化の誘発分子として **CH₃OH** (メタノール) 氷が有力。
- イオン照射実験から高エネルギー粒子の被曝によって可視スペクトルが赤化することが確認されている。
- 地上観測 or 探査機による分光観測から CH₃OH 氷のフィーチャーが明確に検出された例は約3天体。いずれも可視光でかなり赤いカラーを示す。

Brunetto et al. (2006)



JWSTによる近赤外分光観測

- JWST/NIRSpec による TNO 54 天体の近赤外分光観測 (Pinilla-Alonso et al. 2025)
- 3つのスペクトル型に分類

1. H₂O タイプ (Bowl type)

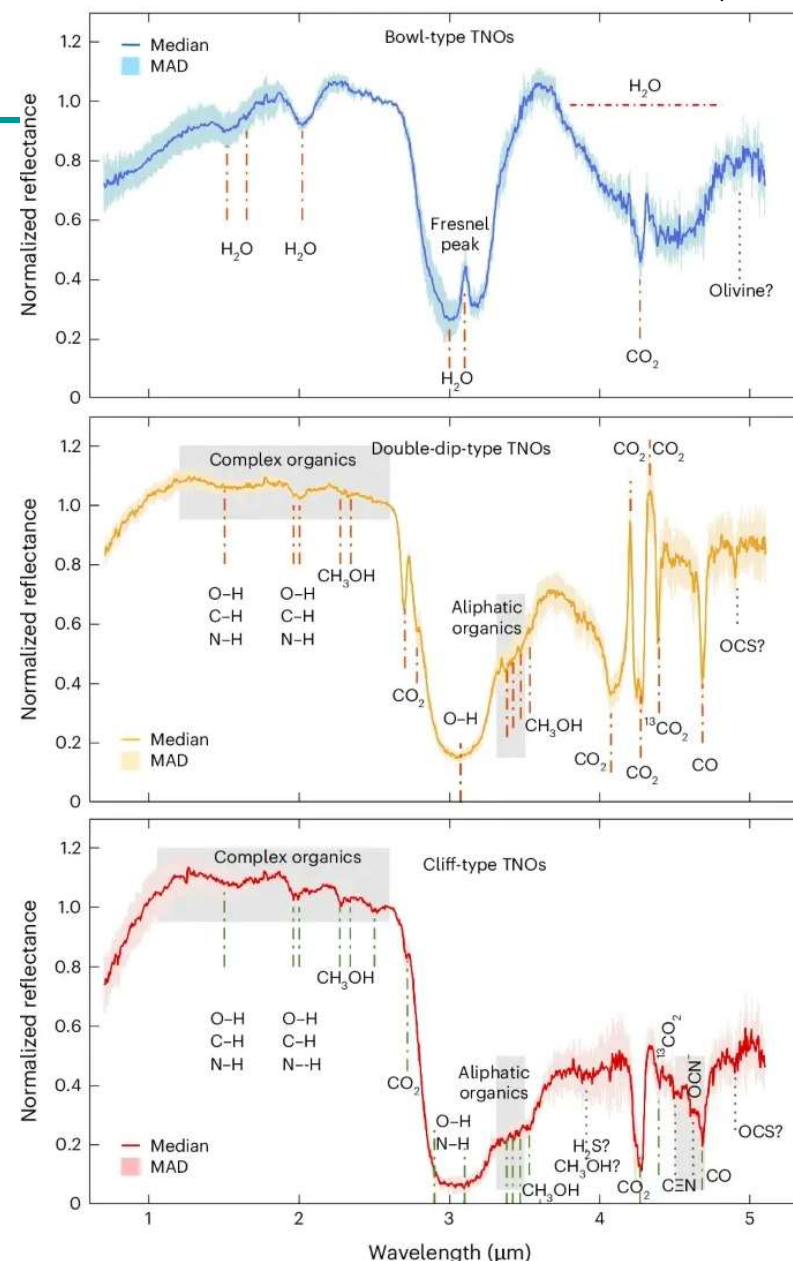
- ✓ H₂O 氷のフィーチャーが支配的
- ✓ 有機物や CH₃OH 氷に乏しい。ダスト成分あり？

2. CO₂ タイプ (Double-dip type)

- ✓ CO₂ や O-H・C-H・N-H のフィーチャーが支配的
- ✓ CO₂、CO、有機物に富み、H₂O 氷に乏しい

3. CH₃OH タイプ (Cliff type)

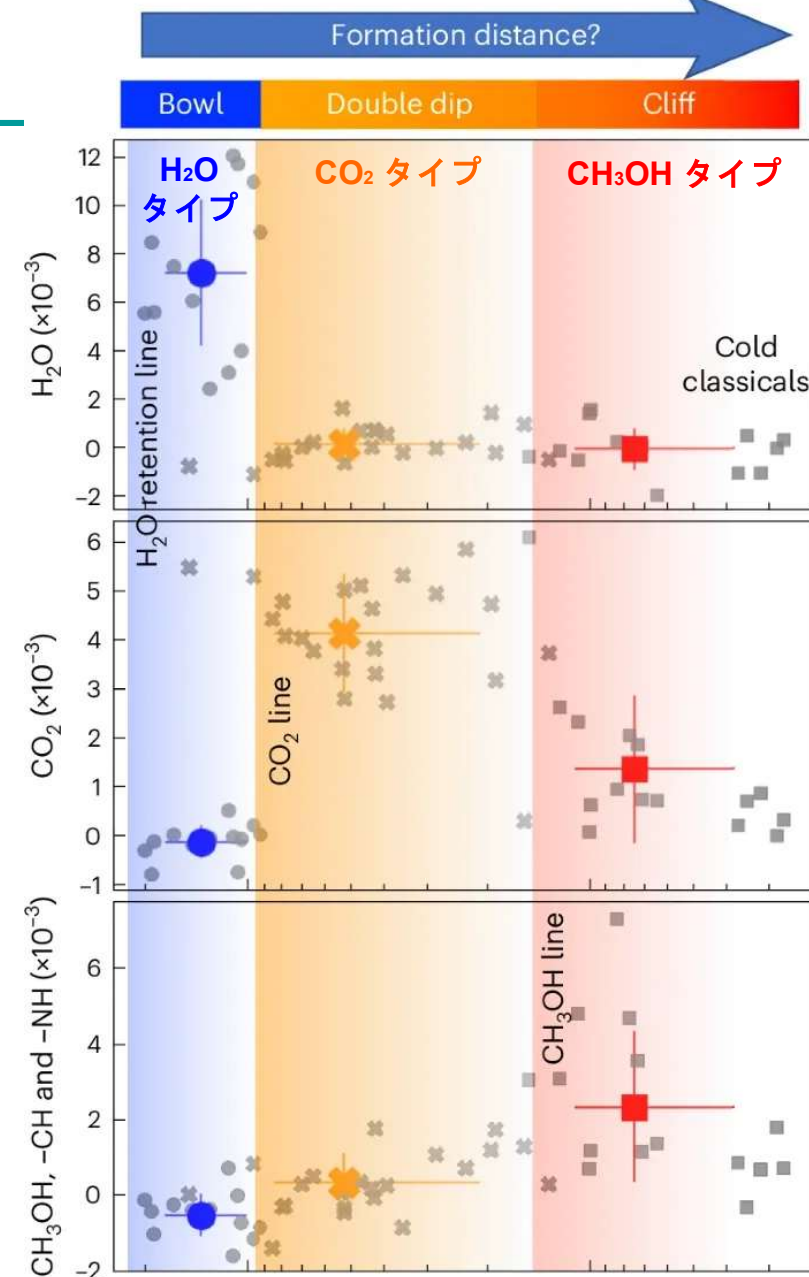
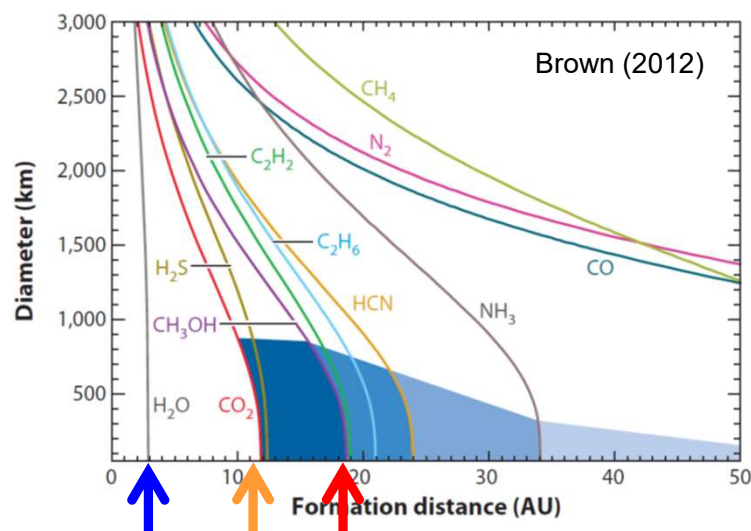
- ✓ CH₃OH や O-H・C-H・N-H のフィーチャーが支配的
- ✓ CH₃OH や有機物に富み、H₂O 氷に乏しい
- ✓ 短波長側で非常に赤いスペクトル



外縁天体の形成環境

- 天体表面に氷分子を保持できる太陽からの距離：

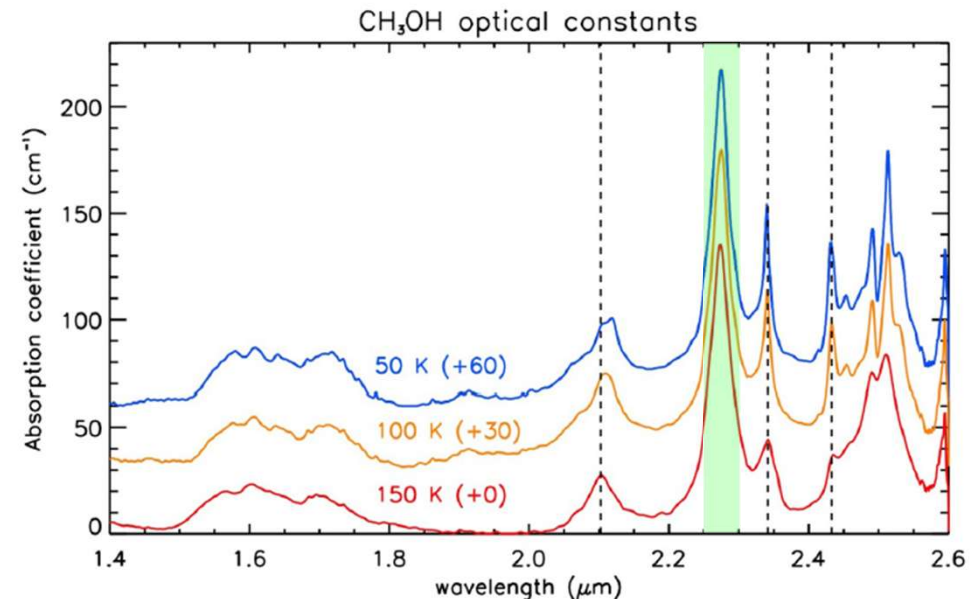
$$\text{H}_2\text{O} < \text{CO}_2 < \text{CH}_3\text{OH}$$
- 推測される天体の形成領域：
 - ✓ H_2O タイプ天体は H_2O 氷 – CO_2 氷ライン間の領域
 - ✓ CO_2 タイプ天体は CO_2 氷 – CH_3OH 氷ライン間の領域
 - ✓ CH_3OH タイプ天体は CH_3OH 氷ライン以遠の領域



TMT で目指すこと

- IRIS による外縁天体の近赤外観測
- 高感度を生かし、多数個の天体を対象に CH₃OH 氷の含有量を高 S/N で測定
- 天体表面の CH₃OH 氷量と様々な物理量 (軌道要素、天体サイズ、バルク密度 etc.) との関係性を紐解き、表面組成の普遍性・多様性・特殊性を明らかにする

Cook et al. (2019)



- 太陽系外縁部における小天体の形成環境と力学・化学進化を探索し、惑星大移動の詳細な描像に迫る
- 精度や効率の高い観測を実現するために、狭帯域フィルターを用いた測光観測手法も検討

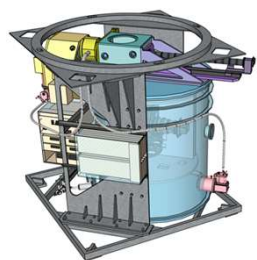
今後の展望



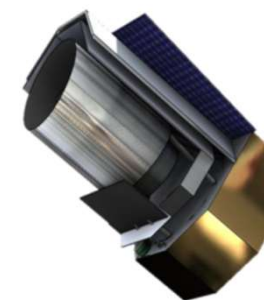
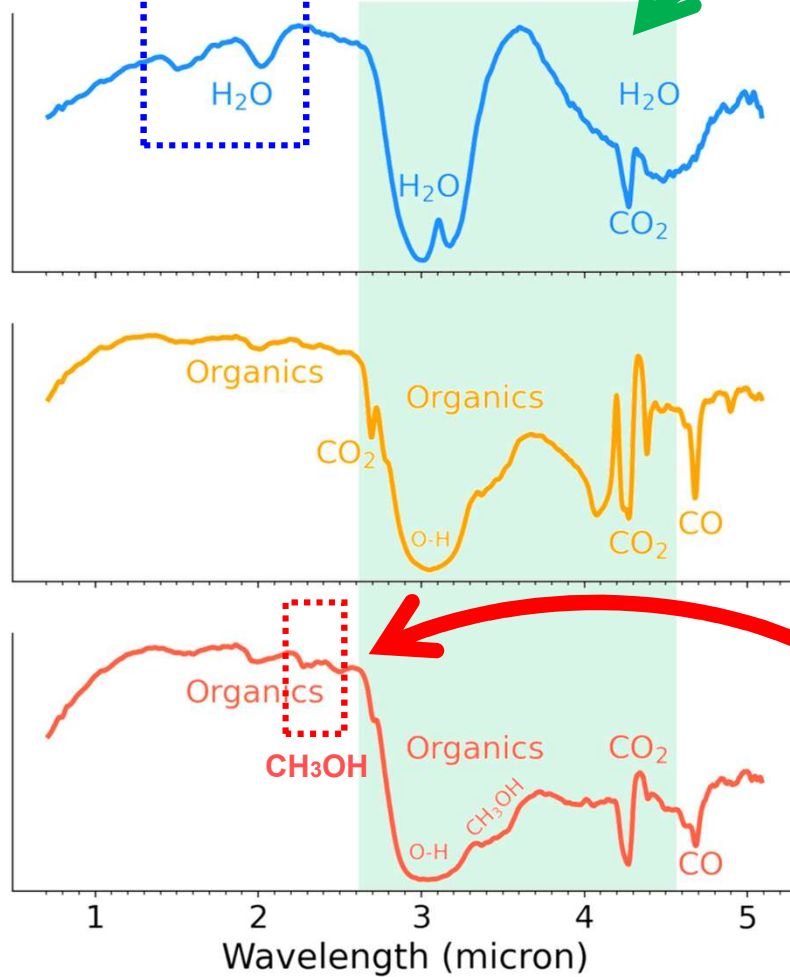
ULTIMATE-Subaru



Roman



TAO/SWIMS



GREX-PLUS



TMT