

GREX-PLUSで期待される惑星サイエンス: CHNO(PS) 元素の分布と惑星形成

講演者: 野津翔太 (東京大学)

要旨

中間赤外線・遠赤外線は、 H_2O をはじめ多種多様な分子(電波で観測不可能な CO_2 などの対称分子を含む)のガス輝線が豊富に存在する事、及び電波で観測できない固体物質の格子振動に由来した分光的特徴を熱放射として観測できる事などから、惑星形成過程における豊富な物質進化の解明には欠かせない波長帯である。

本講演ではまず近年の惑星形成・原始惑星系円盤研究の進展の概略を、アルマ望遠鏡による観測結果、太陽系始原天体研究との繋がりなども交え紹介する。次にJWST等でカバーされないスペース中間赤外線高分散分光観測(GREX-PLUS計画で実現を期待)とスペース遠赤外線分光観測(US 2m FIR Probeで実現を期待)の原始惑星系円盤・惑星形成研究における科学的重要性を紹介・議論する。

そして、現在次期JAXA戦略的中型計画候補の一つとして提案されている赤外線天文衛星GREX-PLUS (銀河進化・惑星系形成観測ミッション)の概略と、原始惑星系円盤(H_2O スノーラインの検出など)・太陽系外惑星・太陽系内惑星・太陽系小天体における多様なサイエンスケースについて紹介する。

GREX-PLUS Science Book: <https://arxiv.org/abs/2304.08104>
Kamp et al. 2021: doi:10.1017/pasa.2021.31

GREX-PLUSで期待される惑星サイエンス: CHNO(PS) 元素の分布と惑星形成

野津 翔太 (Shota Notsu)

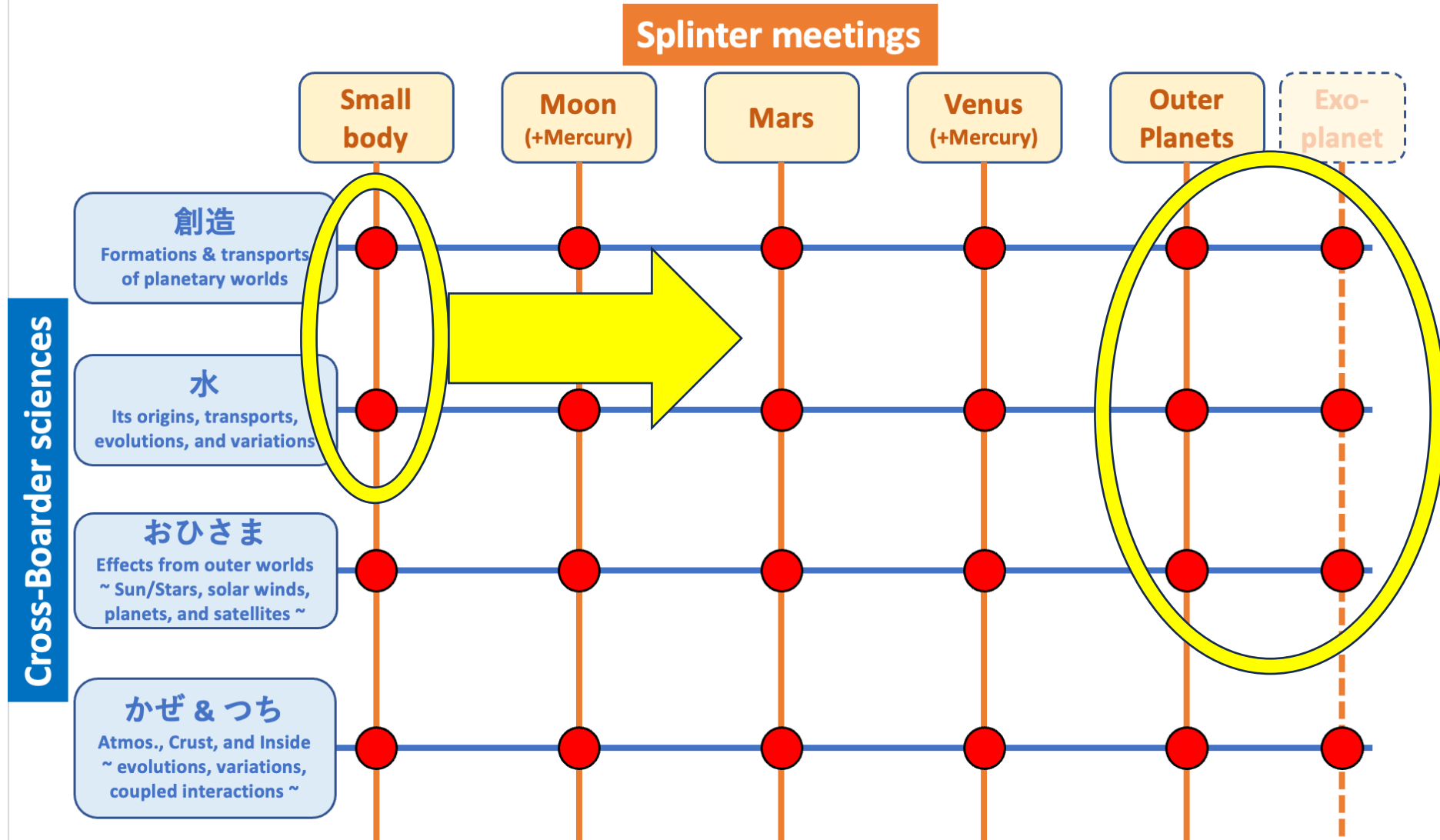
東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 地球惑星システム科学講座

講演時のスライドから一部ページ・図を削除・修正しています

GREX-PLUS Science Book: <https://arxiv.org/abs/2304.08104>
Kamp et al. 2021: doi:10.1017/pasa.2021.31

Focus of the Symposium 2024

Multiple Column x Low approach for Science requirement & Mission strategy



Making borderless teams and finding/investigating seeds for future explorations!

星・惑星形成過程におけるアストロケミストリー

分子雲



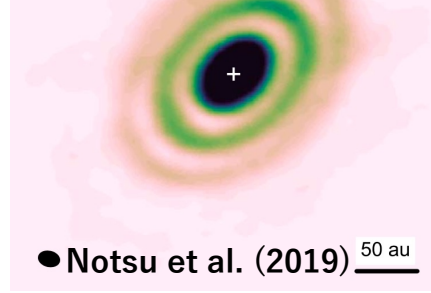
~99% ガス
~1% ダスト

ダスト
成長



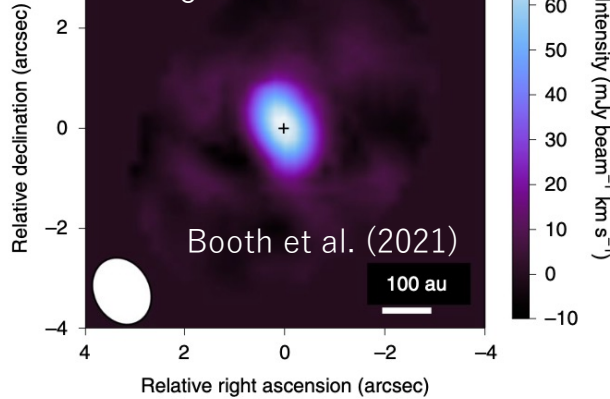
原始惑星系円盤

円盤内詳細構造
の発見 (ALMA)



CH₃OH (6_{1,5,1}-5_{1,4,1})

CH₃OH放射検出

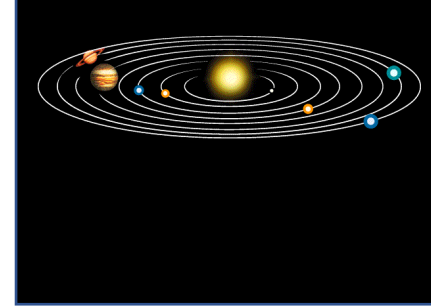


惑星
形成

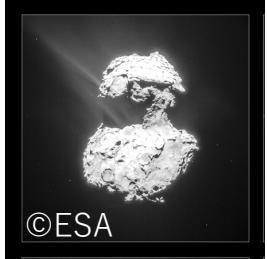


惑星系

太陽系外惑星の
発見 (1995~)

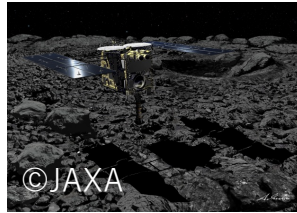


彗星



©ESA

始原的な小惑星



©JAXA

ダスト成長・円盤内の構造形成と共に、
有機分子形成を含めた化学進化も進む

惑星や彗星・小惑星など
で発見される複雑な有機
分子の起源は？

原始惑星系円盤の物理・化学構造を理論・観測の両面から研究
→惑星系形成過程と、水や有機分子の形成過程を明らかにする
→多様な系外惑星の大気構造や、彗星・小惑星の化学組成の起源に迫る

原始惑星系円盤のスノーラインとC/O比分布

小惑星Ryuguの母天体: CO₂スノーラインの外側で形成?

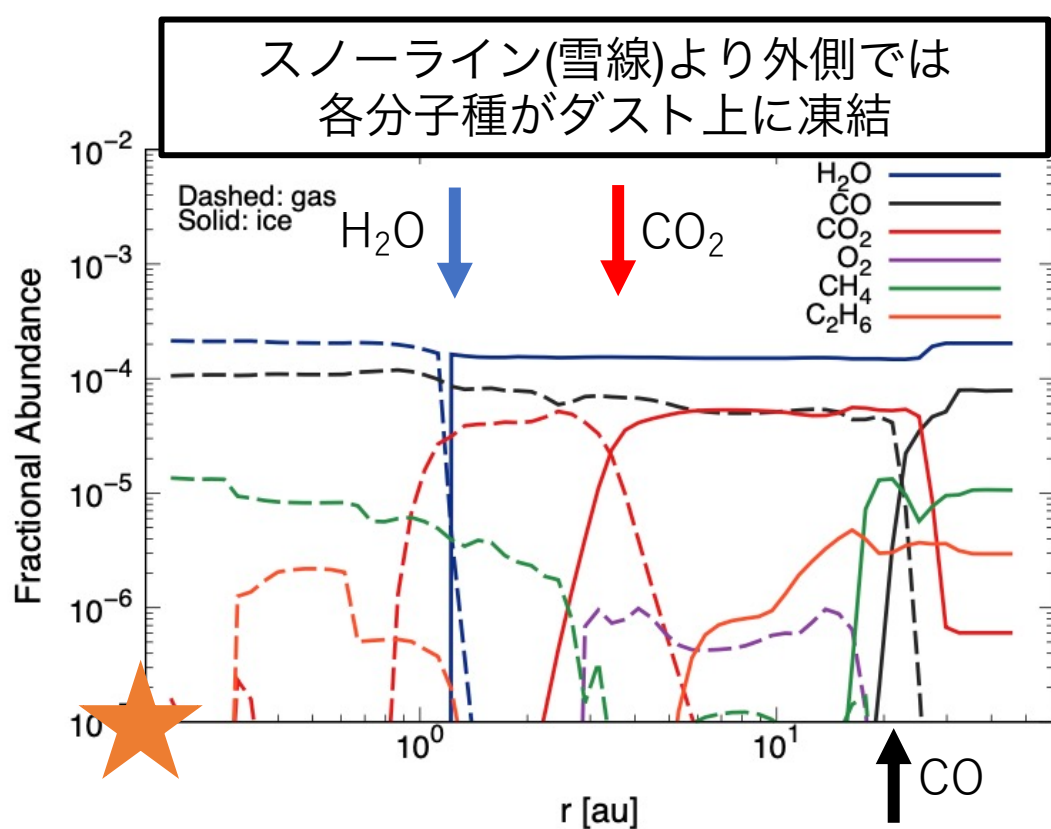
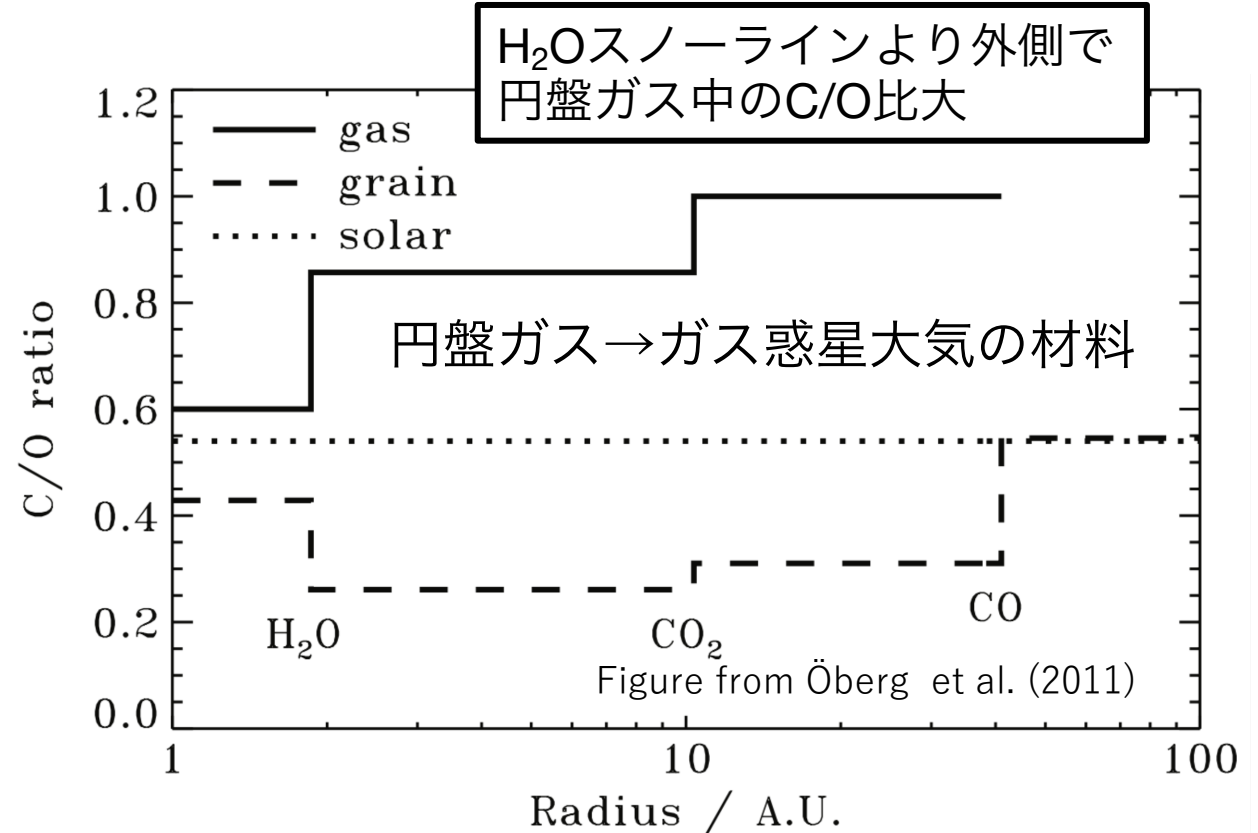


Figure from Notsu et al. (2022)



e.g., Öberg et al. (2011), Booth et al. (2017)

Eistrup et al. (2016, 2018), Notsu et al. (2020, 2022), Ohno et al. (2021)

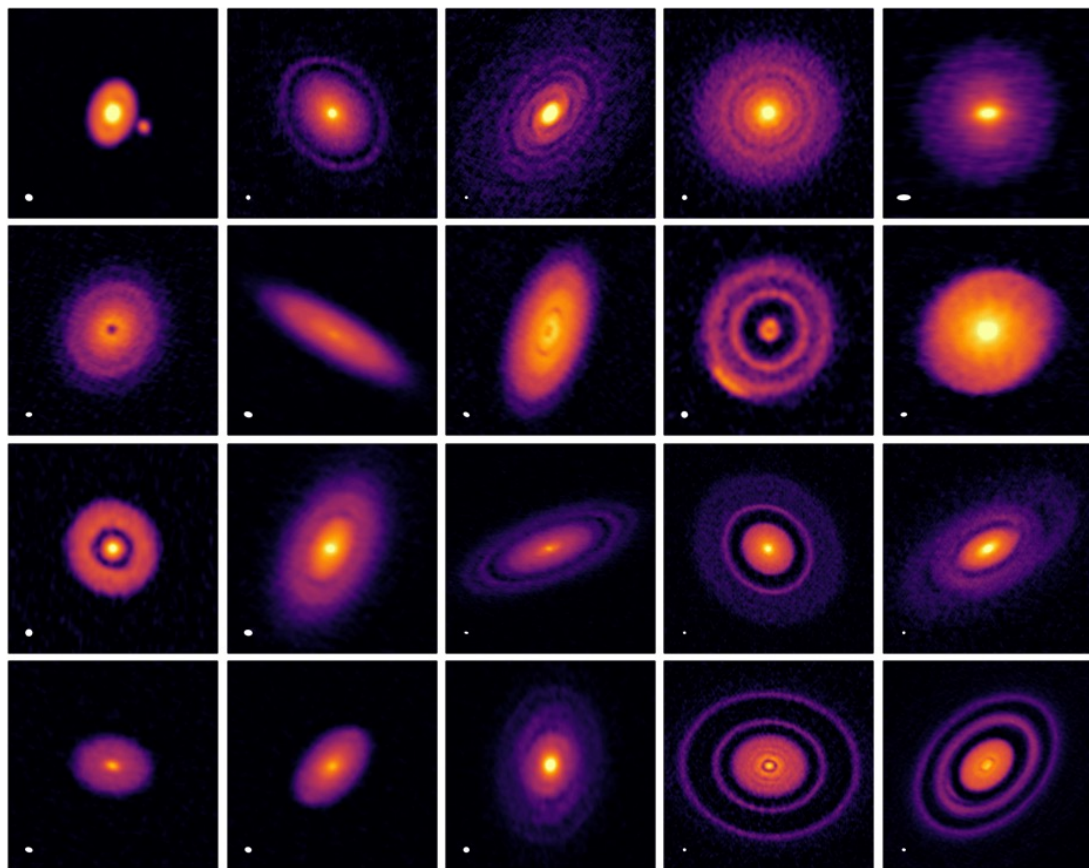
原始惑星系円盤ガスとガス惑星大気のエレメント組成比(C/O比, N/O比など)の比較
→ 惑星形成領域・移動過程を知る手がかりとなる

アルマ望遠鏡: 多数の円盤の高解像度観測 (ダスト・分子ガス)

ダスト連続波

(e.g., Andrews et al. 2018)

DSHARPプロジェクト ~ 0.035 秒角



ALMA

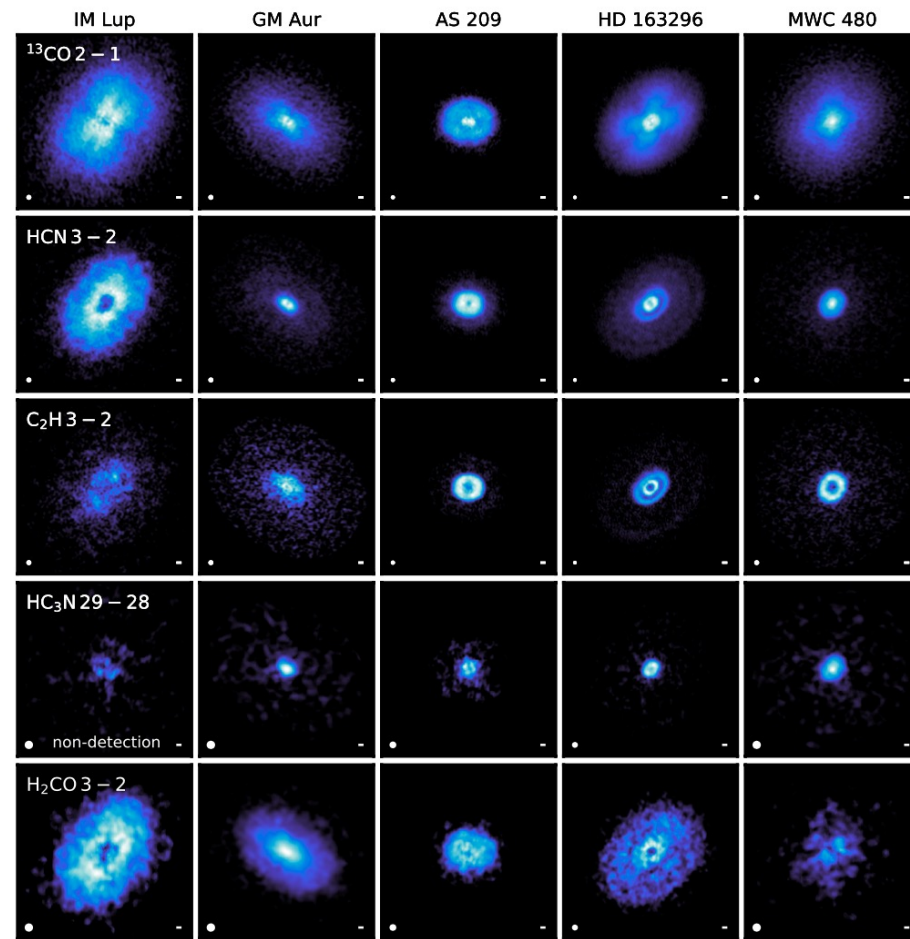


(e.g., Öberg et al. 2021)

$\sim 0.1-0.3$ 秒角

分子ガス

MAPSプロジェクト



ダスト&分子ガスで”構造”が検出：構造は普遍的

多重リング・ギャップ、渦状腕 etc. \rightarrow ダスト進化・(微)惑星形成と関連

原始惑星系円盤でこれまでに検出された分子など 一覧

紫外線 H₂ Lyman-Werner band transitions

可視光線 [OI] 6300 Å

近赤外線

H₂ v=1-0 S(1), S(0),
CO Δv=2, Δv=1,

H₂O, OH, HCN, C₂H₂, CH₄

中間赤外線

H₂ v=0-0 S(1), S(2), S(4)

H₂O, OH, HCN, C₂H₂, CO₂, etc.

(Spitzer宇宙望遠鏡 など)

遠赤外線

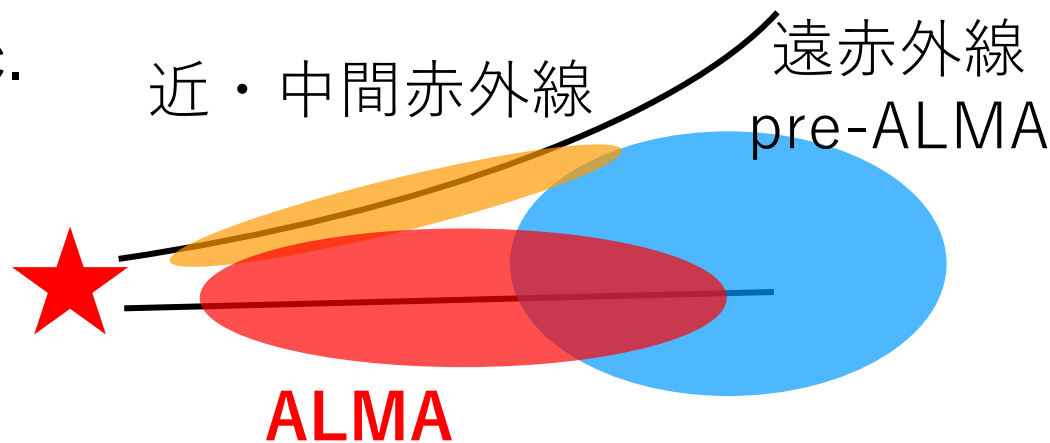
[OI] 63 μm, 145 μm, [CII] 158 μm

CO, H₂O, CH⁺, HD, NH₃, etc.

(Herschel宇宙望遠鏡 など)

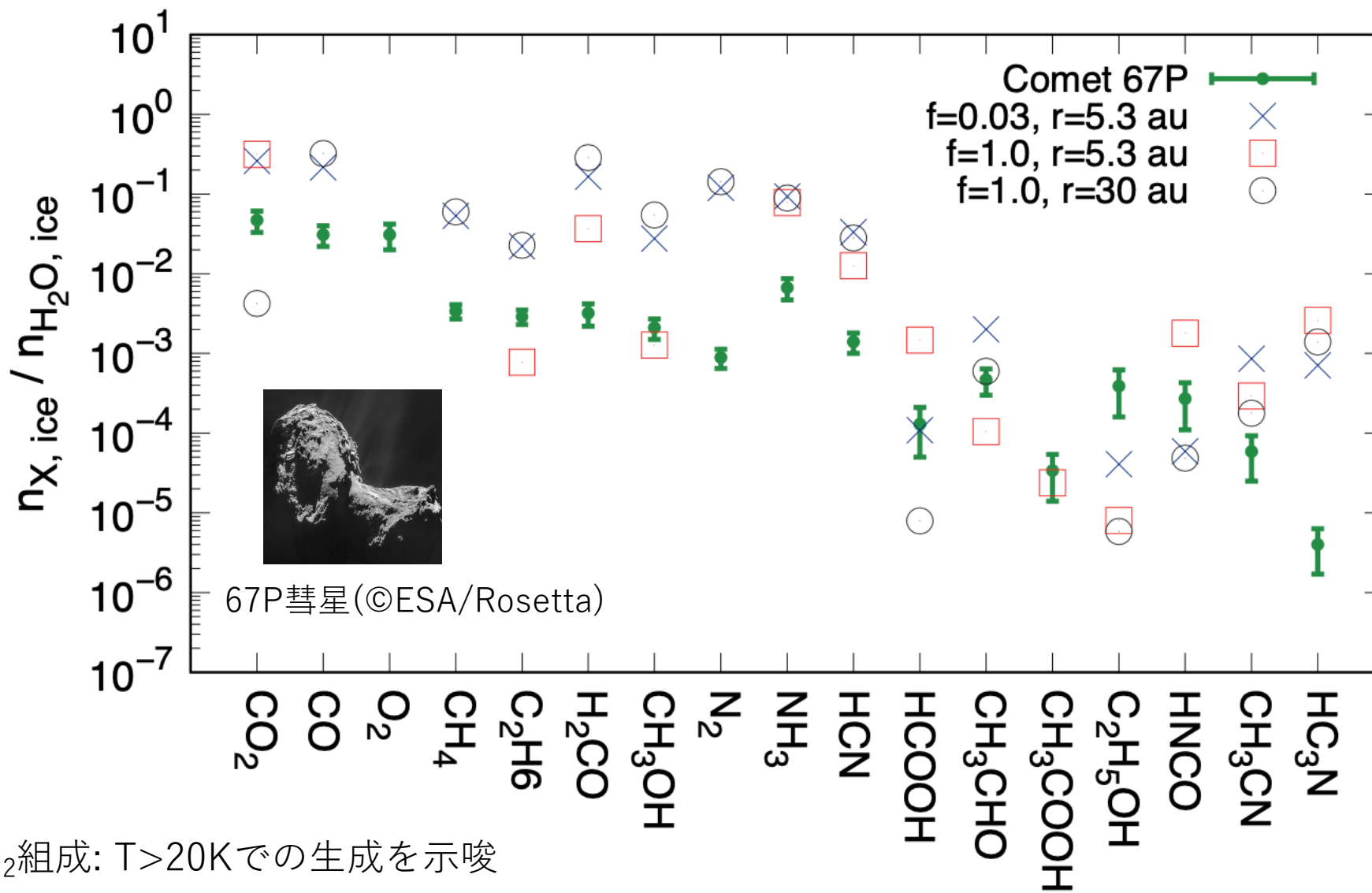
ミリ波・サブミリ波

CO, ¹³CO, C¹⁸O, C¹⁷O, ¹³C¹⁸O,
¹³C¹⁷O, HCO⁺, H¹³CO⁺, HC¹⁸O⁺, DCO⁺,
[CI], C₂H, C₂D, c-C₃H₂,
H₂CO, HCOOH, CH₃OH, CH₃OCH₃
HCN, H¹³CN, DCN, HC¹⁵N,
HNC, CN, C¹⁵N, N₂H⁺, N₂D⁺,
HC₃N, CH₃CN, CH₂CN, CS, C³⁴S, ¹³CS,
H₂S, SO, H₂CS, SO₂, etc.



氷分子組成比較: 円盤モデル vs 彗星 (67P/Churyumov-Gerasimenko)

Notsu et al. (2022)



CO₂組成: T>20Kでの生成を示唆

始原的な小惑星
(Ryugu, Bennu)
組成との比較も重要



化学的起源を探る上で、
同位体比の情報
(D/H, 12C/13C, 14N/15N etc.)
も極めて重要
(e.g., Yamato, Notsu et al. 2024)

次世代彗星(始原天体)
サンプルリターン
にも期待

電波・地上赤外線観測の将来サイエンス概要

電波 (サブミリ波・ミリ波・センチ波)

現状：アルマ望遠鏡等の電波干渉計観測(ダスト・ガス)で、星・惑星形成領域の詳細構造が見えてきた
2030年代～：アルマ2やngVLA (次世代大型電波干渉計, センチ波)等で、

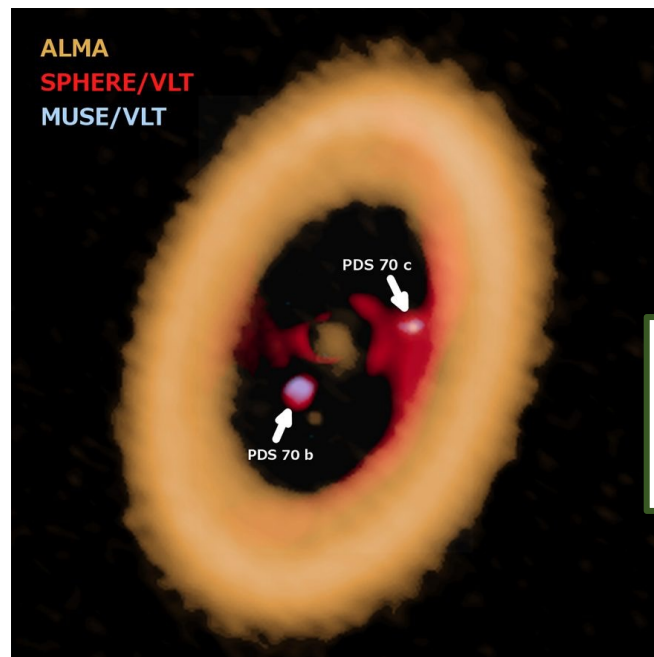
地球軌道スケール(1 au)を空間分解

(生命関連分子に繋がる)複雑な有機分子の観測も進むと期待



近・中間赤外線 地上望遠鏡 (すばる2・TMT/MICHI, MODHIS) (cf. Poster 48: TMTのサイエンスについて)

2030年代～: すばる2やTMT等の観測で円盤内で形成中の惑星や、水氷($\sim 3 \mu\text{m}$)の分布を捉える など



TMT/MICHI, MODHIS

アルマ望遠鏡
赤外線(惑星大気)
可視光線(水素ガス)

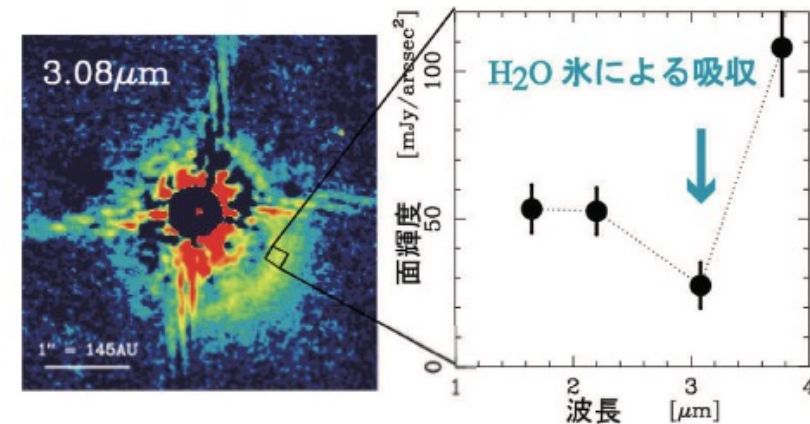


図3.1.20 : HD142527円盤の近赤外散乱光スペクトルに刻まれたH₂O氷の3.1 μm 吸収。円盤外縁の低温領域表層に水の氷の存在を示した。TMTを用いれば、円盤表層の雪線に迫ることが可能である。
Credit: Honda et al. 2009¹⁹

宇宙望遠鏡を必要とする惑星形成サイエンス：中間・遠赤外線観測

2030年代～、宇宙望遠鏡が必要なサイエンスとは？

→(JWSTがカバーしない) **中間赤外線高分散分光・遠赤外線観測**にフロンティア！
惑星形成過程における豊富な物質進化の解明には欠かせない

中間・遠赤外線の特徴

- ガス**：H₂Oをはじめ多種多様な分子の輝線が豊富に存在
電波で観測できない&困難な分子種も多数
(H₂, HD, CO₂, C₂H₂, [OI], [CII] etc.)
- 固体(ダスト)**：電波では観測できない、
固体物質の格子振動に由来した分光的特徴が存在
吸収(近赤外線)ではなく、熱放射を観測できる

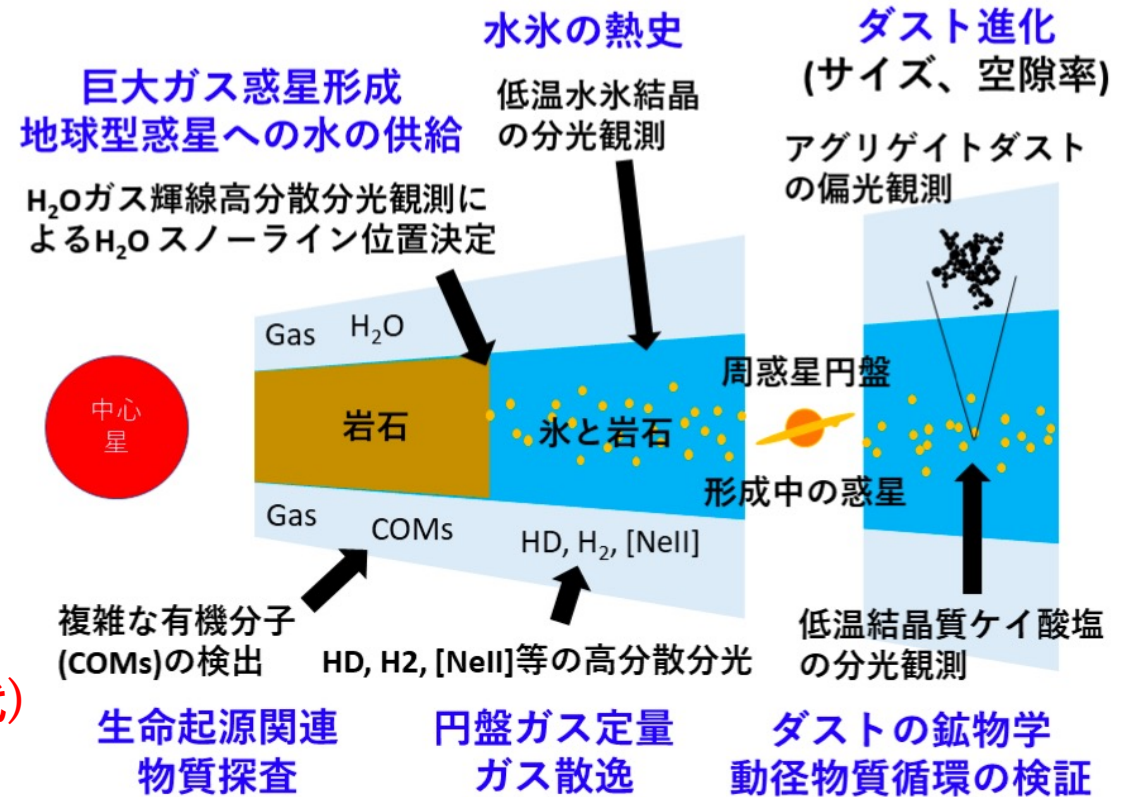


図1 惑星形成班の検討したSPICAサイエンスの概要。

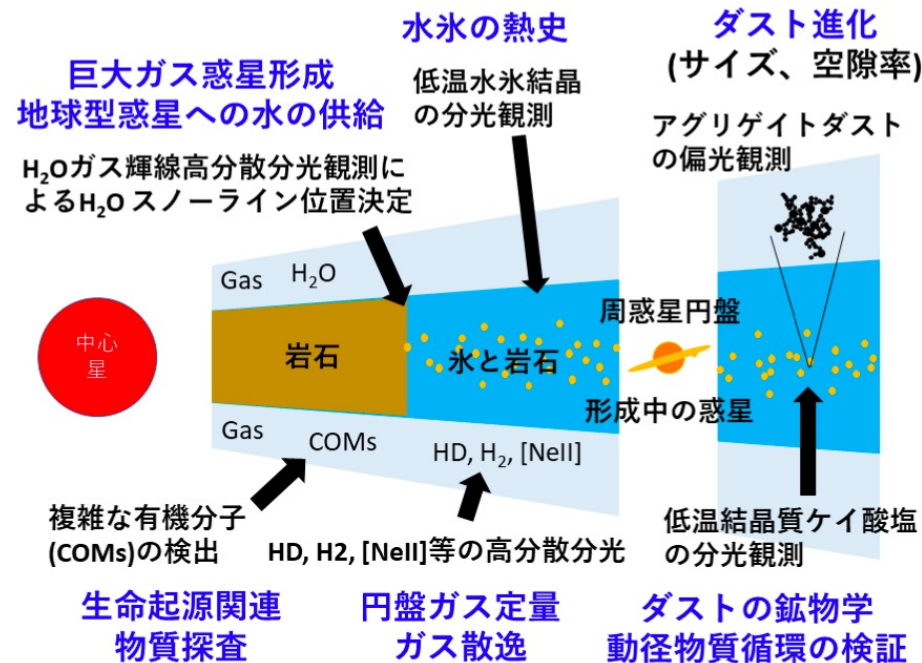
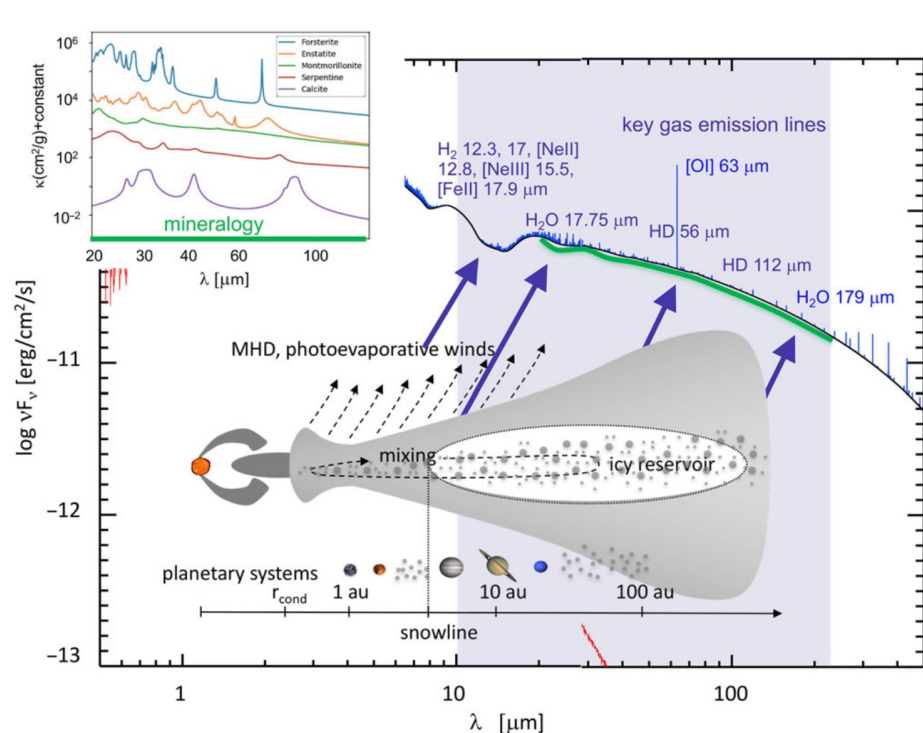
中間赤外線高分散分光：SPICA/SMI→**GREX-PLUS (2030年代)**

遠赤外線：SPICA/SAFARI

→ **US 2m FIR Probe (撮像&分光, 2030年代)**

中間・遠赤外線宇宙望遠鏡を必要とする主要研究題目

1. H_2O 輝線の高分散分光観測 (中間赤外線・遠赤外線) → 円盤 H_2O スノーライン位置の検出
2. HCN , CO_2 , C_2H_2 , CH_3CN 等の輝線(主に中間赤外線)の分光観測 → 円盤内C/O比・有機物分布
3. HD (遠赤外線), H_2 (中間赤外線) 輝線などの分光観測 → 円盤ガスの定量と散逸過程の解明
4. 低温水氷の分光的特徴($44\&63\ \mu m$, 遠赤外線)の分光観測 → 円盤内の水氷の熱史の解明
5. 低温結晶ケイ酸塩の分光的特徴(遠赤外線)の分光観測 → 円盤鉱物学と動径物質循環の一般性検証
6. 円盤の偏光観測(遠赤外線)によるダストサイズ・空隙率の導出 → 微惑星形成過程の検証



赤字：中間赤外線 (GREX-PLUS)

黒字：遠赤外線 (US 2m FIR Probe)

図1 惑星形成班の検討したSPICAサイエンスの概要。

GREX-PLUS

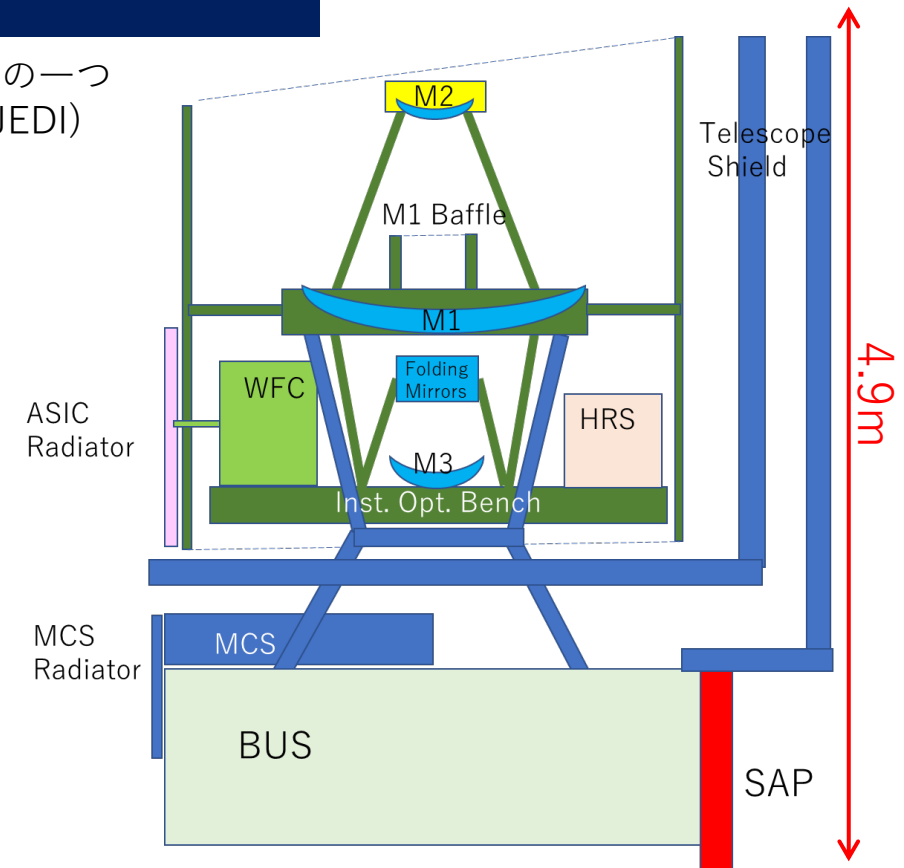
(Galaxy Reionization EXplorer and PLanetary Universe Spectrometer)

銀河進化・惑星系形成観測ミッション

PI: 井上昭雄教授
(早稲田大学)

- 望遠鏡
 - 主鏡口径：1.2m
 - 温度：50K未満(断熱放射冷却)
- 観測装置
 - 広視野カメラ(WFC)
 - 5バンド合計1,260平方分角
 - 近赤外線：F232, F303, F397
 - 検出器50K未満(断熱放射冷却)
 - 中間赤外線：F520, F680
 - 検出器30K未満(機械式冷凍機)
 - 高分散分光器(HRS)
 - 波長分解能：25,000以上
 - 検出器7K未満(機械式冷凍機)
- バス
 - 新規開発要素の少ない標準的構成
- 打上
 - H3-30Sによるシングルローンチを想定
- 軌道・運用期間
 - 太陽-地球L2、5年+延長運用2年(可能なら+ α)

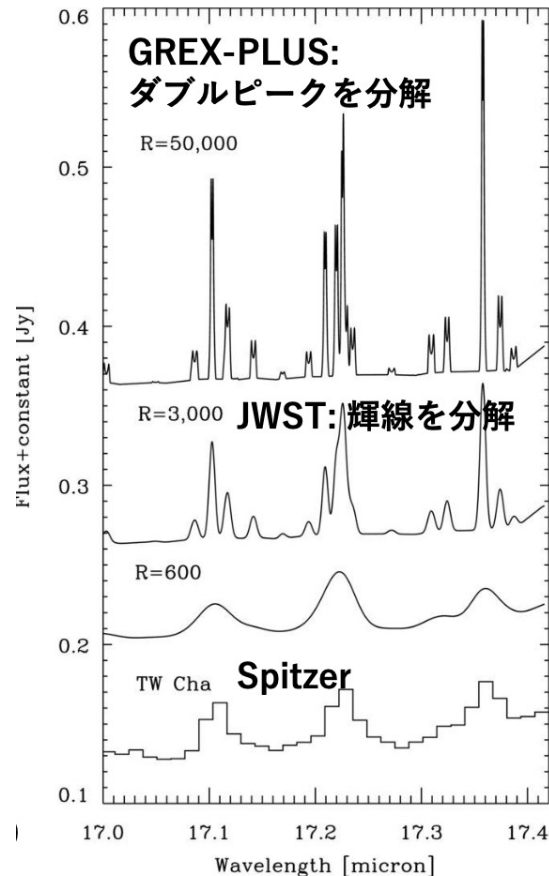
次期JAXA戦略的中型計画候補の一つ
(小惑星SR, GREX-PLUS, X線JEDI)



GREX-PLUS 中間赤外線高分散分光観測

- JWST/MIRI (R~3,000) より1桁高い波長分解能
- TMTより数倍以上高感度
- 波長も連続的にカバー

-CdZnTeイメージング
グレーティングによる
小型化・軽量化



Pontoppidan et al. (2010)

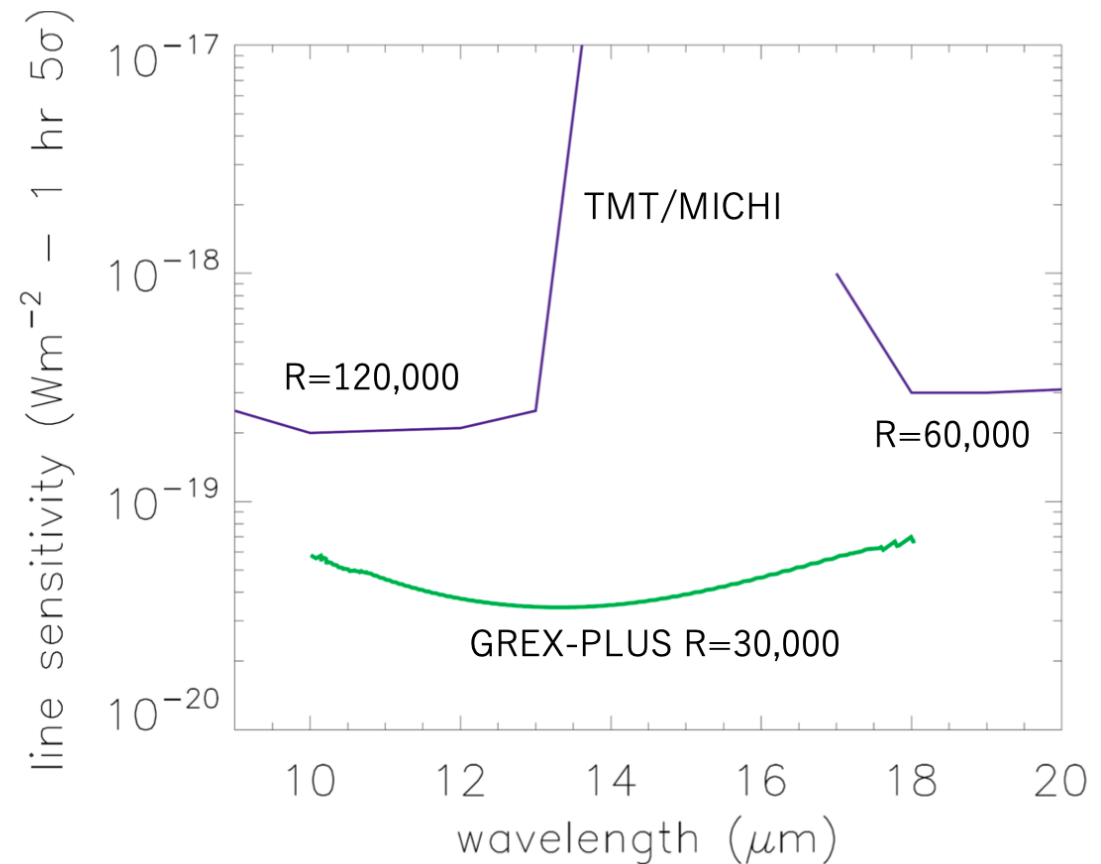
中間赤外線の特徴

H₂Oをはじめ多種多様な分子の輝線が豊富に存在
電波で観測できない&困難な分子種も多数

表 1.3.1 GREX-PLUS 高分散分光器の性能

波長帯 [μm]	10–18
波長分解能 [$\lambda/\Delta\lambda$]	30,000–34,000
スリットサイズ [arcsec ²]	8×3.5
ピクセルスケール [arcsec pix ⁻¹]	1.5
検出器	Si:As
連続光感度 [mJy; 5σ, 1hr]	4.2 / 5.0 (*)
輝線感度 [10^{-20} W m ⁻² ; 5σ, 1hr]	3.4 / 4.1 (*)

(*)波長 14 μm での黄道光放射強度: 16 MJy/str (低い場合) / 50 MJy/str (高い場合)



GREX-PLUSの二大理学的目標

大目標：宇宙の空間と物質の起源の理解

手段：銀河探査

近中間赤外線超広視野サーベイ観測により、他の手段では発見できない大質量の「**初代銀河**」を探査。宇宙構造形成論を検証する。

(必要な観測)波長2ミクロン超でのみ検出可能な赤方偏移 $z > 15$ の銀河、特に数密度が低い、明るい($M_{uv} < -21$) 大質量銀河の探査

大目標：宇宙における生命の可能性の探求

手段：惑星系形成領域における水の探査

中間赤外線高分散分光観測により、「**スノーライン**」の時空間進化を調査し惑星系形成論を検証する。

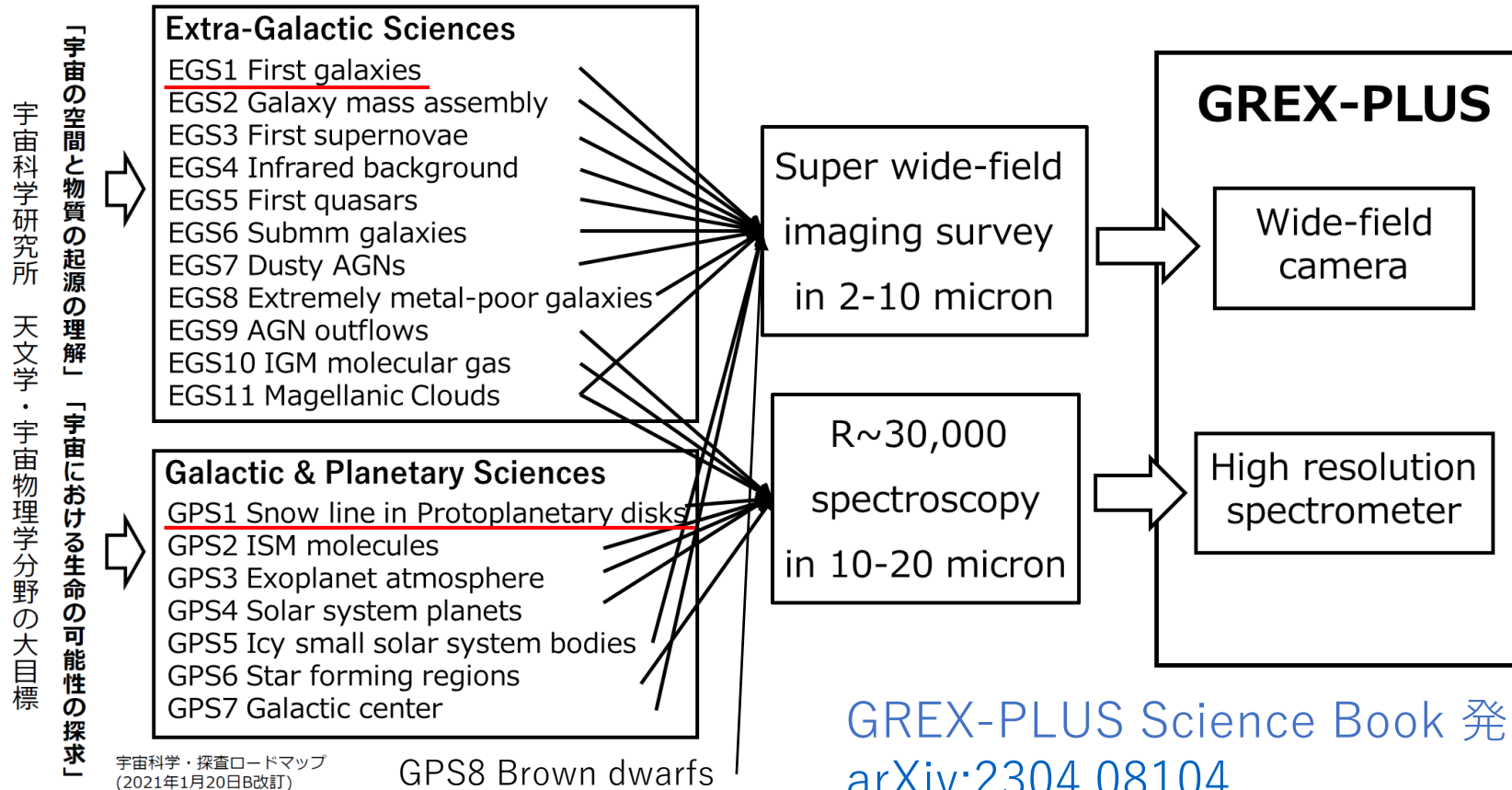
(必要な観測) 100個程度の様々な進化段階の原始惑星系円盤について、水分子17.8 μm 輝線などのケプラー運動を速度分解し、スノーライン位置を特定する

中間赤外線の特徴

H_2O をはじめ多種多様な分子の輝線が豊富に存在
電波で観測できない&困難な分子種も多数

H_2O 輝線に加え、C/O比や有機分子の分布、円盤散逸の研究に用いる分子輝線も**同時取得!**
詳細: 2023年4月発行 Science Book (arXiv: 2304.08104)

ISAS/JAXAの天文学・宇宙物理学の大目標とGREX-PLUSが目指すサイエンステーマの関係



H₂O 輝線の高分散分光観測: 円盤 H₂Oスノーライン位置の検出

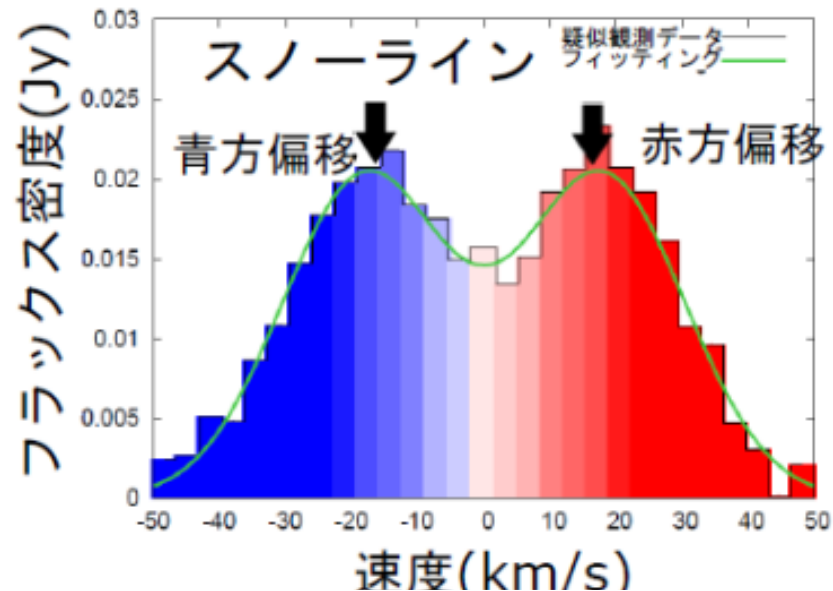
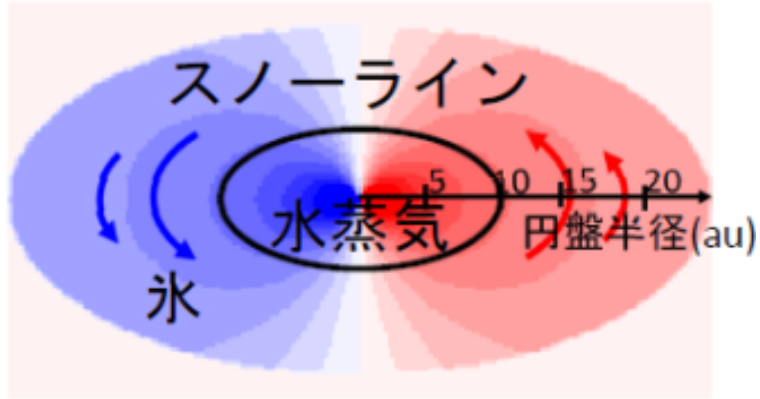
原始惑星系円盤: (ほぼ) **ケプラー回転**



輝線のドップラーシフトの解析から、輝線放射領域の中心星からの距離の情報が得られる



高温赤道面から放射されるH₂O輝線を
高分散分光観測し、H₂Oスノーライン位置を同定する



$$\Delta v = \sqrt{\frac{GM_s}{r}} \sin i \quad i: \text{傾斜角}$$

円盤からの赤外線輝線の速度幅 $\sim 30\text{km/s}$
→ 速度構造の解析には

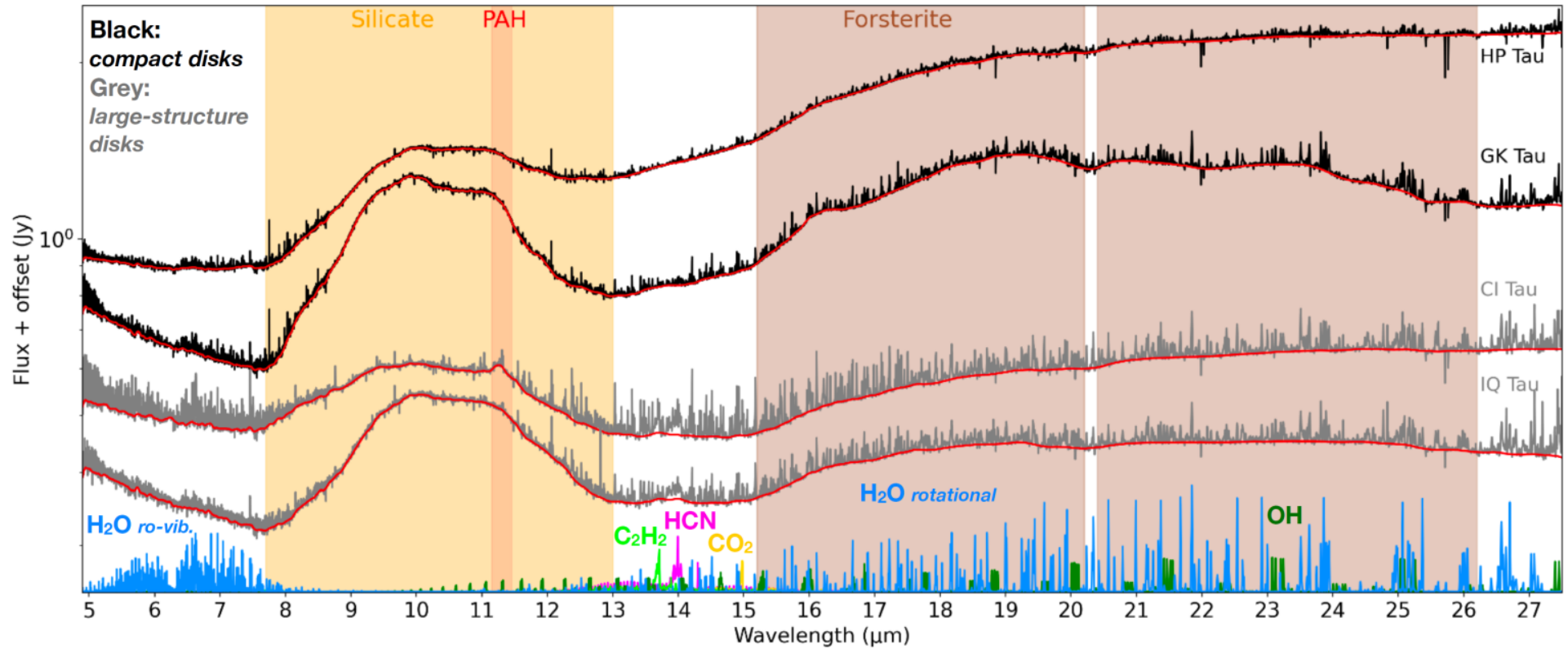
$R \sim 30,000$ の波長分解能が必要
→ **GREX-PLUS など**

JWST/MIRIスペクトル

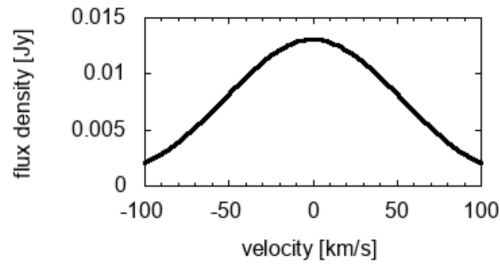
T Tauri円盤 (0.4-0.8 太陽質量; K型星)

※ JWSTは高感度なため、T Tauri型星でも暗いもの (K-M型星) を選んでいる

Banzatti et al. 2023



水スノーラインの位置が小さすぎるため画像で捉えることは不可能
→ 水分子の公転運動(ケプラー運動)を速度分解する



R=3,000 ($\Delta V=100\text{km/s}$) JWST
o-H₂O 17.75 μm 輝線
(Herbig Ae星; Notsu et al. 2017)



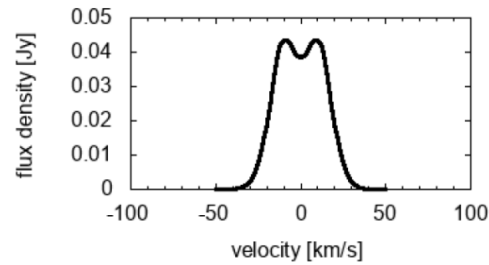
水蒸気



ケプラー運動未分解
→ スノーライン位置
を特定できない

氷

0.1 au 1 au 10 au



R=30,000 ($\Delta V=10\text{km/s}$) GREX-PLUS
o-H₂O 17.75 μm 輝線
(Herbig Ae星; Notsu et al. 2017)



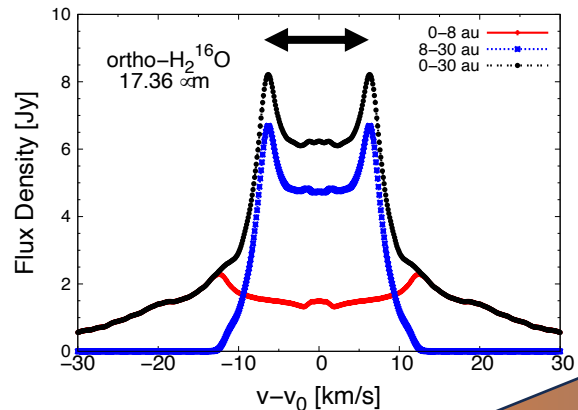
水蒸気

ケプラー運動分解
→ スノーライン位置特定

氷

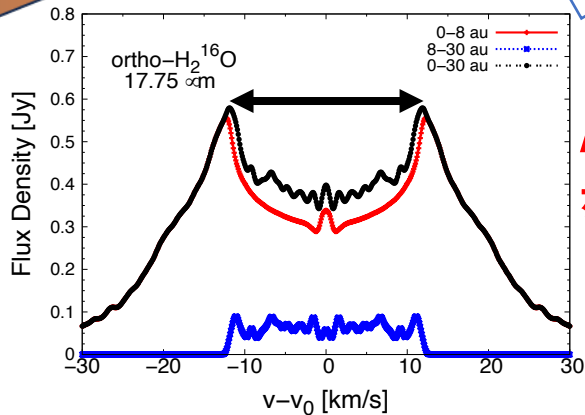
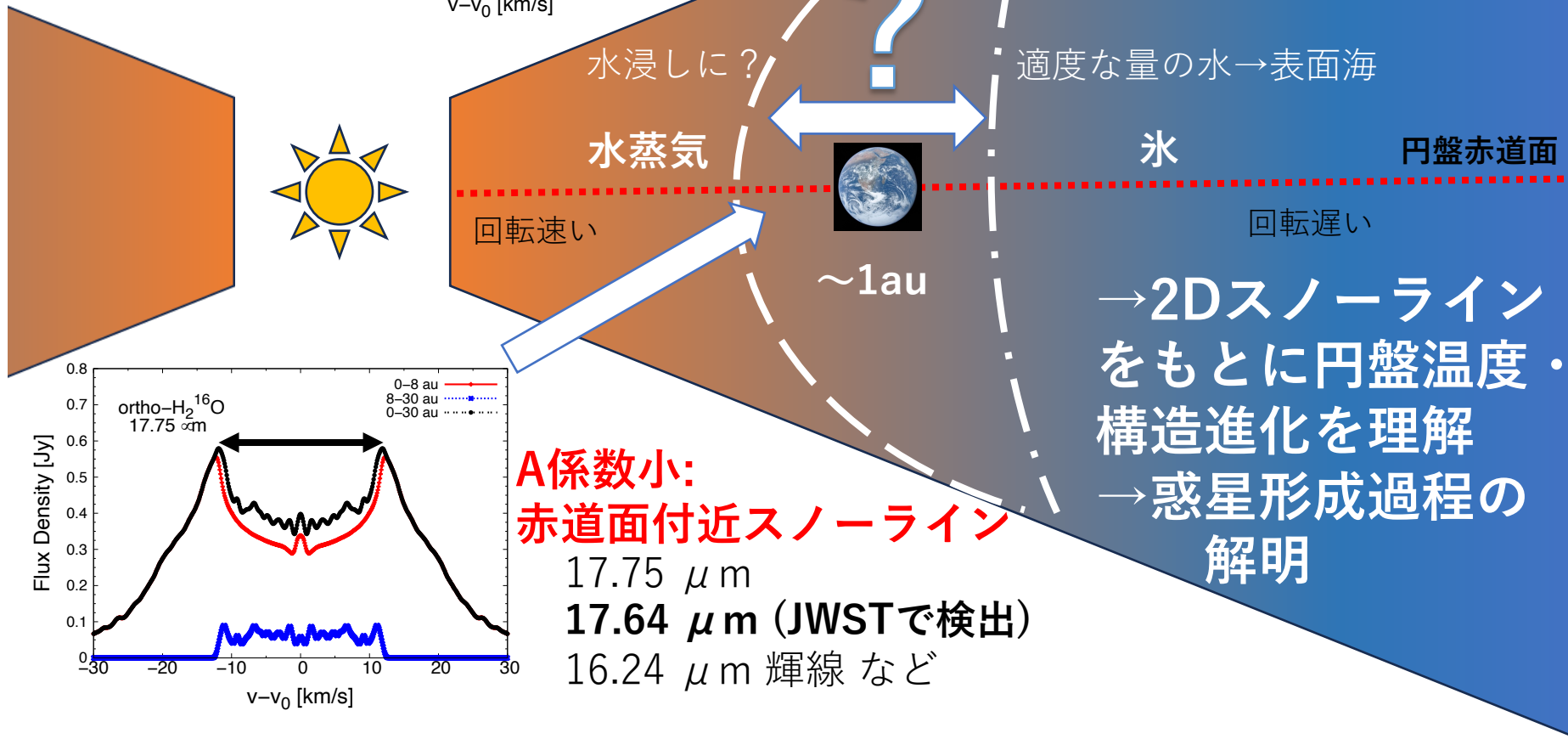
0.1 au 1 au 10 au

日本の強みである理論惑星科学 + 中間赤外線高分散分光



A係数大: 表層スノーライン

12.40 μm , 17.1 μm
 17.36 μm 輝線 など
 (JWST等で検出)



A係数小: 赤道面付近スノーライン

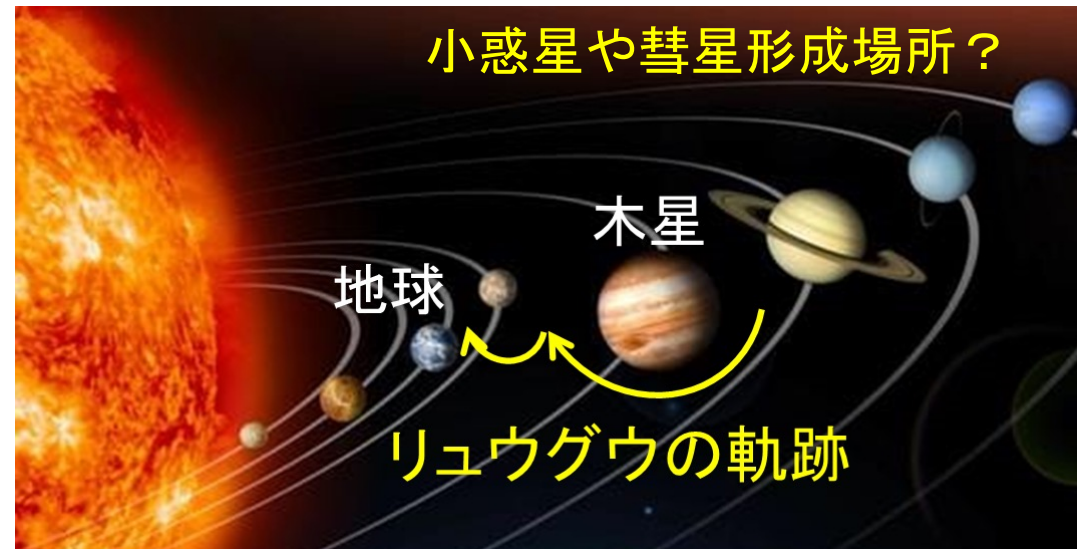
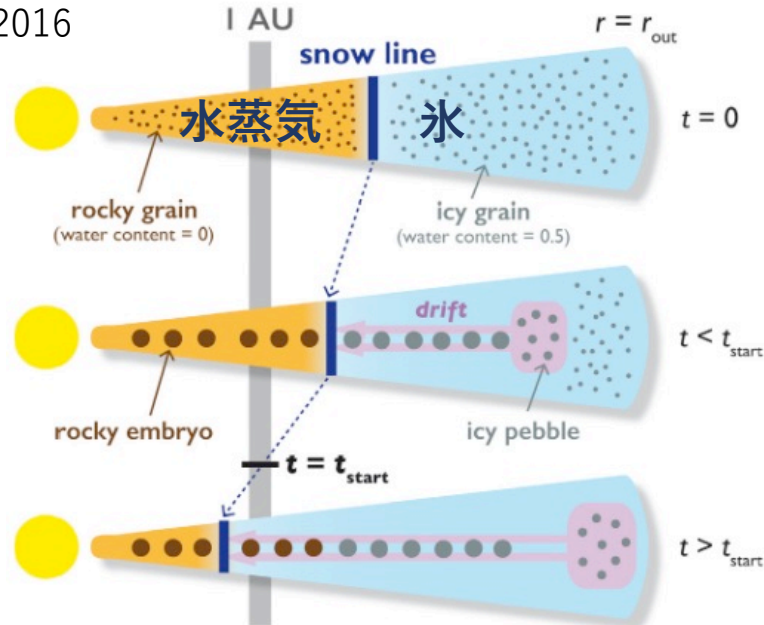
17.75 μm
 17.64 μm (JWSTで検出)
 16.24 μm 輝線 など

→ 2Dスノーライン
 をもとに円盤温度・
 構造進化を理解
 → 惑星形成過程の
 解明

H₂Oスノーライン：惑星形成過程のミッシングリンク

- 理論予想：原始惑星系円盤スノーラインの時間進化
- 観測的検証：GREX-PLUS高分散分光観測
 - 多数の水輝線を速度分解→スノーライン位置・形状
 - 100個程度の原始惑星系円盤を観測→汎惑星形成論の構築
- 太陽系探査ミッション：小惑星、彗星物質を採取
 - 全体像の中で太陽系の位置づけを明らかにする意義

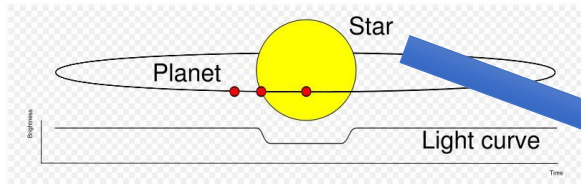
Sato, Okuzumi, Ida
2016



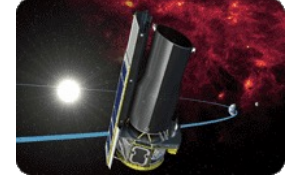
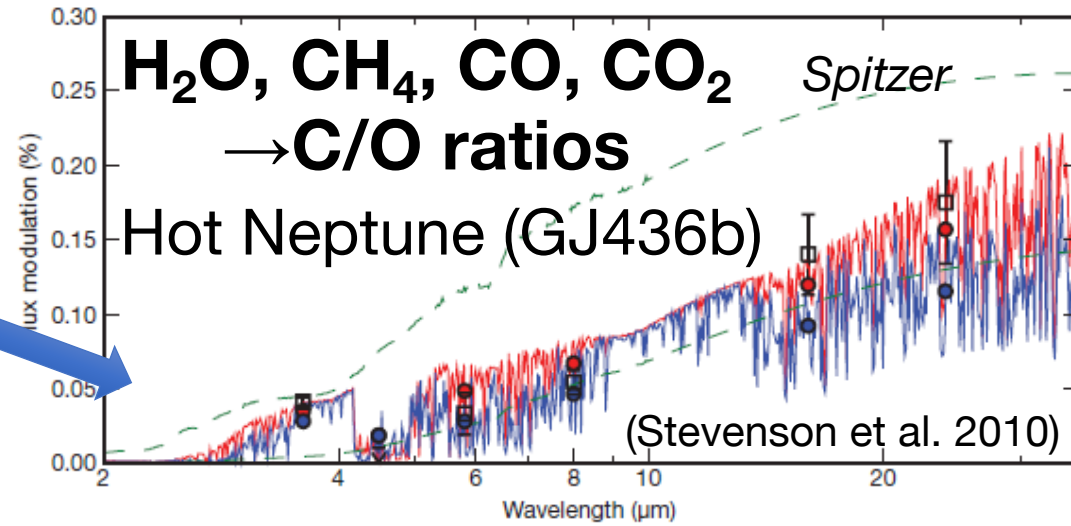
原始惑星系円盤内 C/O比分布 (& 有機物分布)

太陽系外惑星大気

JWST, Ariel,
GREX-PLUS



トランジット二次食
(熱放射)

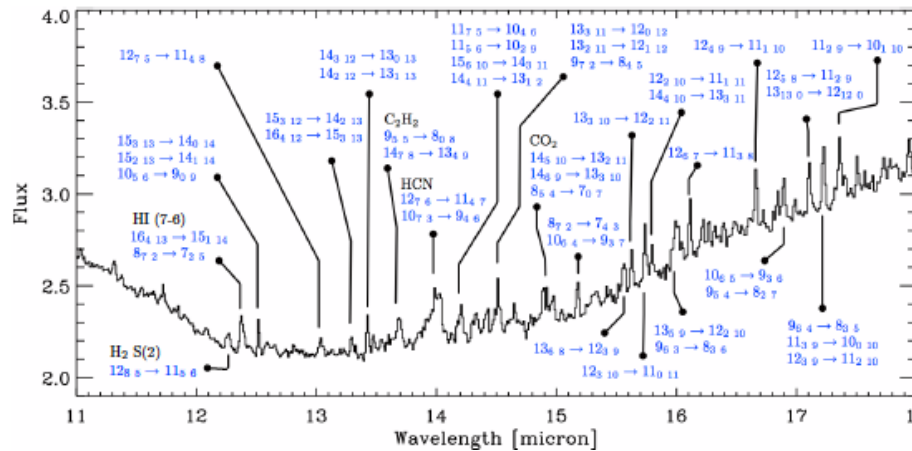


原始惑星系円盤

CH₄, CO₂, C₂H₂ など:
電波で観測できない分子種

JWST/MIRI (R~3,000)
GREX-PLUS (R~30,000)

H₂O, OH, CO₂ (Emission) → C/O ratios



RNO 90 (T Tauri円盤),
Spitzer/IRS (R~600)

Pontoppidan
et al. (2010)

原始惑星系円盤ガスとガス惑星大気のエレメント組成比(C/O比など)の比較
→ 惑星形成領域・移動過程を知る手がかりとなる。

GREX-PLUSによる太陽系内惑星・太陽系小天体サイエンス

特にこれまでの観測が限定的な木星以遠の巨大ガス惑星・氷惑星及びタイタン大気に対して、炭化水素分子輝線やH₂輝線の高分散分光観測を実施し、外惑星の気温構造(対流圏から上部成層圏までの気温鉛直分布)や大気組成(季節変動, 同位体比分別を含む)を制約する。

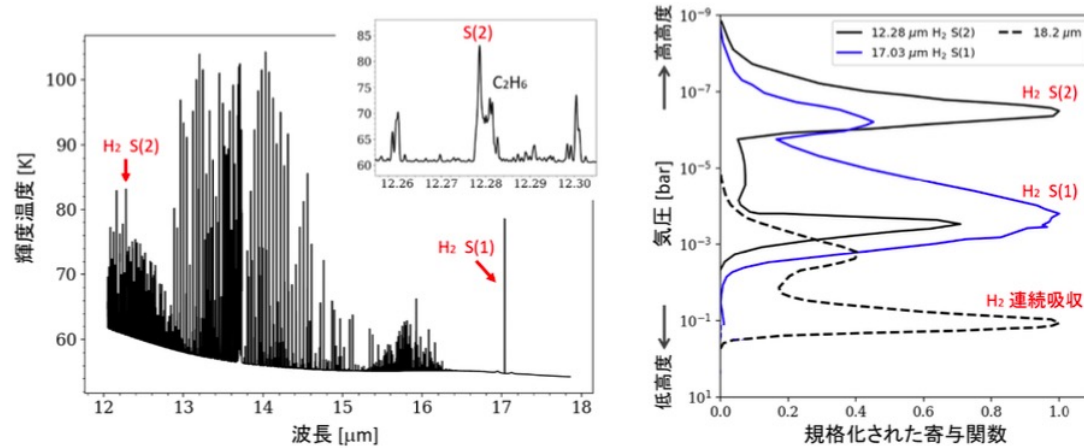


図 2.2.9 (左) 波長 12—18 μm における天王星大気の高分散分光スペクトル(波長分解能 30,000)。H₂ の四重極子放射を矢印で示した。16 μm よりも短波長側では C₄H₂, C₂H₂, C₂H₆ などのラインが存在。(右)左図のスペクトルから、天王星大気のどの気圧(高度)範囲の気温が制約できるかを示した図(Orton et al. 2014 のデータにもとづき作図)。各波長の観測スペクトルから、寄与関数が大きくなっている気圧(高度)の気温が導出できる。

数ヶ月～半年に1回程度のモニター観測→**季節変動**

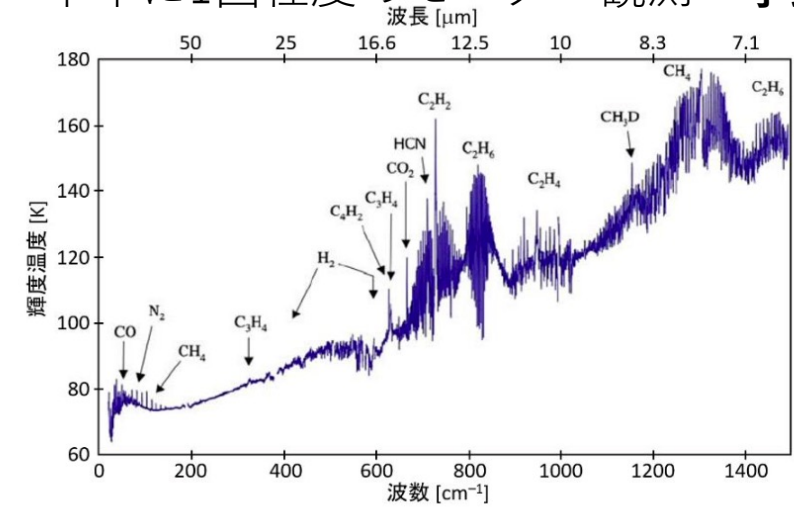


図 2.2.8 Cassini/CIRS によって観測されたタイタン大気の赤外スペクトル(Coustenis et al. 2007 をもとに作図)。CIRS の波長分解能は最高で 0.5 cm^{-1} である。

その他：小惑星、太陽系外縁天体(TNO)天体の観測など。
近・中間赤外線広視野カメラによる撮像(氷)観測も

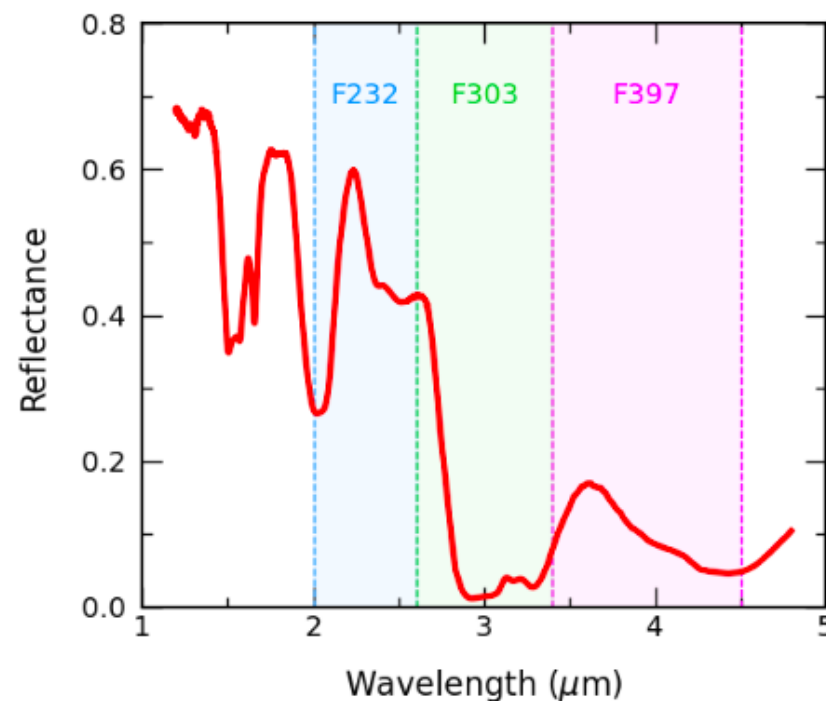
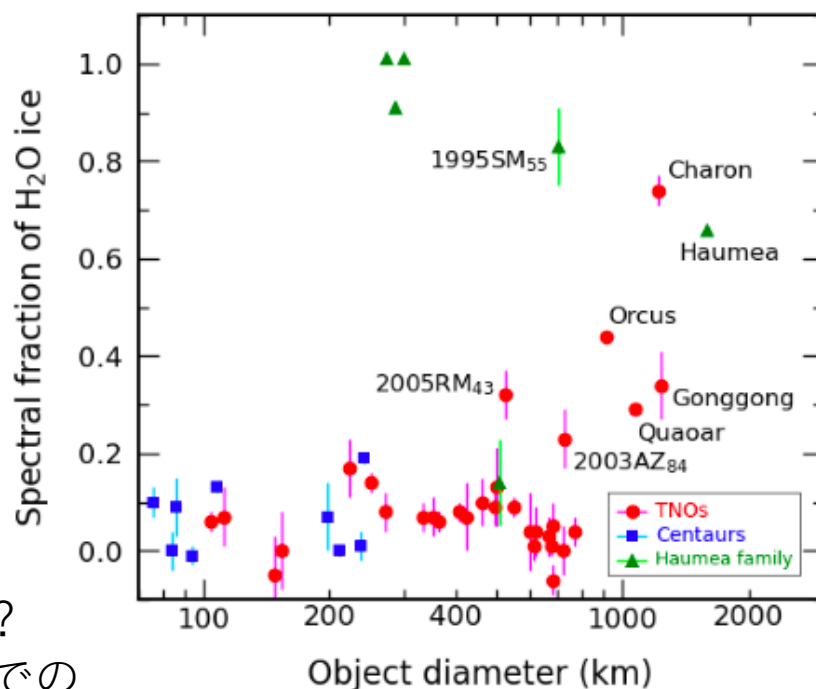
JAXA WG設立提案書より

詳細：GREX-PLUS Science Book: <https://arxiv.org/abs/2304.08104>

GREX-PLUSによる太陽系内惑星・太陽系小天体サイエンス

小惑星(~100)、太陽系外縁天体(TNO)天体(>50)

近・中間赤外線広視野カメラを用いた、 $3\mu\text{m}$ H_2O 氷観測

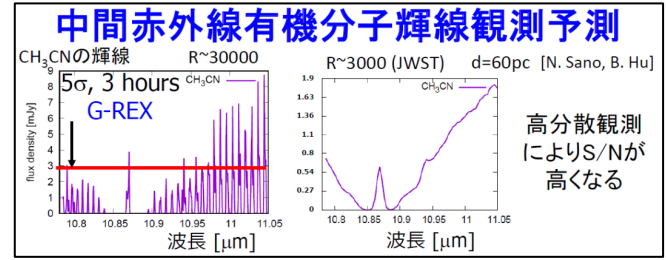


直径800km以下の
TNOで表面水枯渇?
→より多くの天体での
観測が重要

Figure 3.14: The plot of spectral fraction of H₂O ice (Brown et al. 2012) vs. body size for TNOs (including Charon; red circles), Centaurs (blue squares), and Haumea family members (green triangles).

Figure 3.15: Near-infrared reflective spectrum of crystalline H₂O ice at 60 K (Mastrapa et al. 2009). The shaded areas represent wavelength ranges of the planned filters for GREX-PLUS.

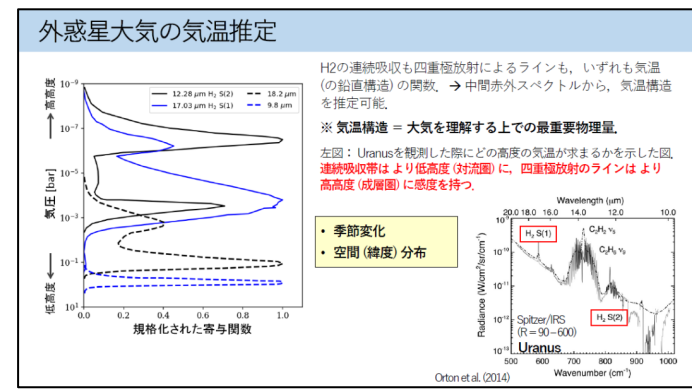
多様な中間赤外線高分散分光のサイエンス



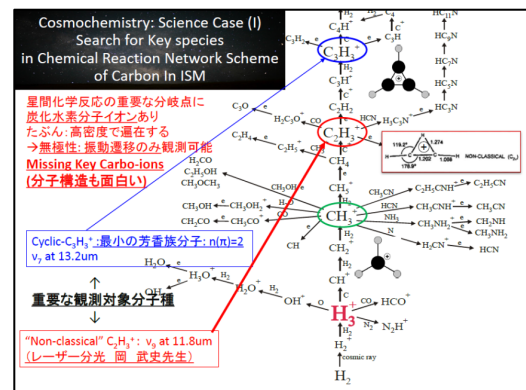
野村英子 (2021/3/24)

- スペースR=30,000は真にユニーク
- 波長10-20ミクロン帯 = 分子分光の「指紋領域」
 - 原始惑星系円盤H₂Oスノーライン、ケプラー運動分解、円盤2次元水分布・C/O/N比分布
 - 原始惑星系円盤内縁における有機分子生成過程の解明
 - ホットジュピターの起源：どこで形成されたのか？ migration / in-situ
 - トランジット大気の透過分光：H₂O, NH₃, HCN, C₂H₂などからのC/O比がカギ
 - 星間化学反応の分岐点: C₂H₃⁺ 11.8 μm vs C₃H₃ 13.2 μm
 - 外惑星の気温構造(大気を理解するための最重要物理量)
 - H₂ S(1) 17.03 μm, H₂ S(2) 12.28 μm, H₂ 連続吸収帯 9.8, 18.2 μm

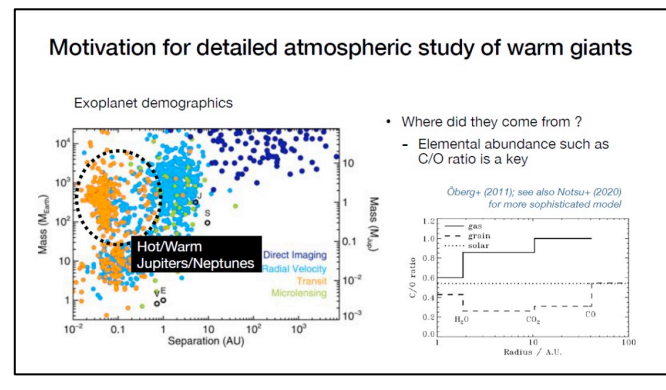
藤井友香 (2021/3/25)



佐川英夫 (2021/3/25)



平原靖大 (2021/3/24)



參考資料

主要参考資料 (サイエンスブック等)

すばる望遠鏡とTMTが結ぶ新たな宇宙像 (サイエンスブック2020)

<https://tmt.nao.ac.jp/researchers/science/>

Kamp,.....,Notsu,.... et al. 2021, PASA. 38, e055, “The formation of planetary systems with SPICA”
doi:10.1017/pasa.2021.31

天文月報2020年12月号 “SPICAで探る惑星形成過程の物質進化”, “SPICAで探る星形成・星間物質”

天文月報2022年4, 5, 6月号 アストロケミストリー特集

SPICAサイエンス検討会 最終報告書 (2020年12月1日公開)

https://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/SPICA_HP/suishin/docs/SPICA_final_report_20201201.pdf

Origins Space Telescope, Mission Concept Study Report (2019年8月)

<https://origins.ipac.caltech.edu/download/MediaFile/174/original>

GREX-PLUSサイエンス検討会(2022年3月) 講演資料

<http://www.obsap.phys.waseda.ac.jp/grex-plus-sws-220324-25.html>

GREX-PLUS JAXA WG設立提案書

GREX-PLUS Science Book (2023年4月発行): <https://arxiv.org/abs/2304.08104>

遊星人2024年3月号(掲載予定): “原始惑星系円盤の化学進化とスノーライン - 水・有機分子の起源”