

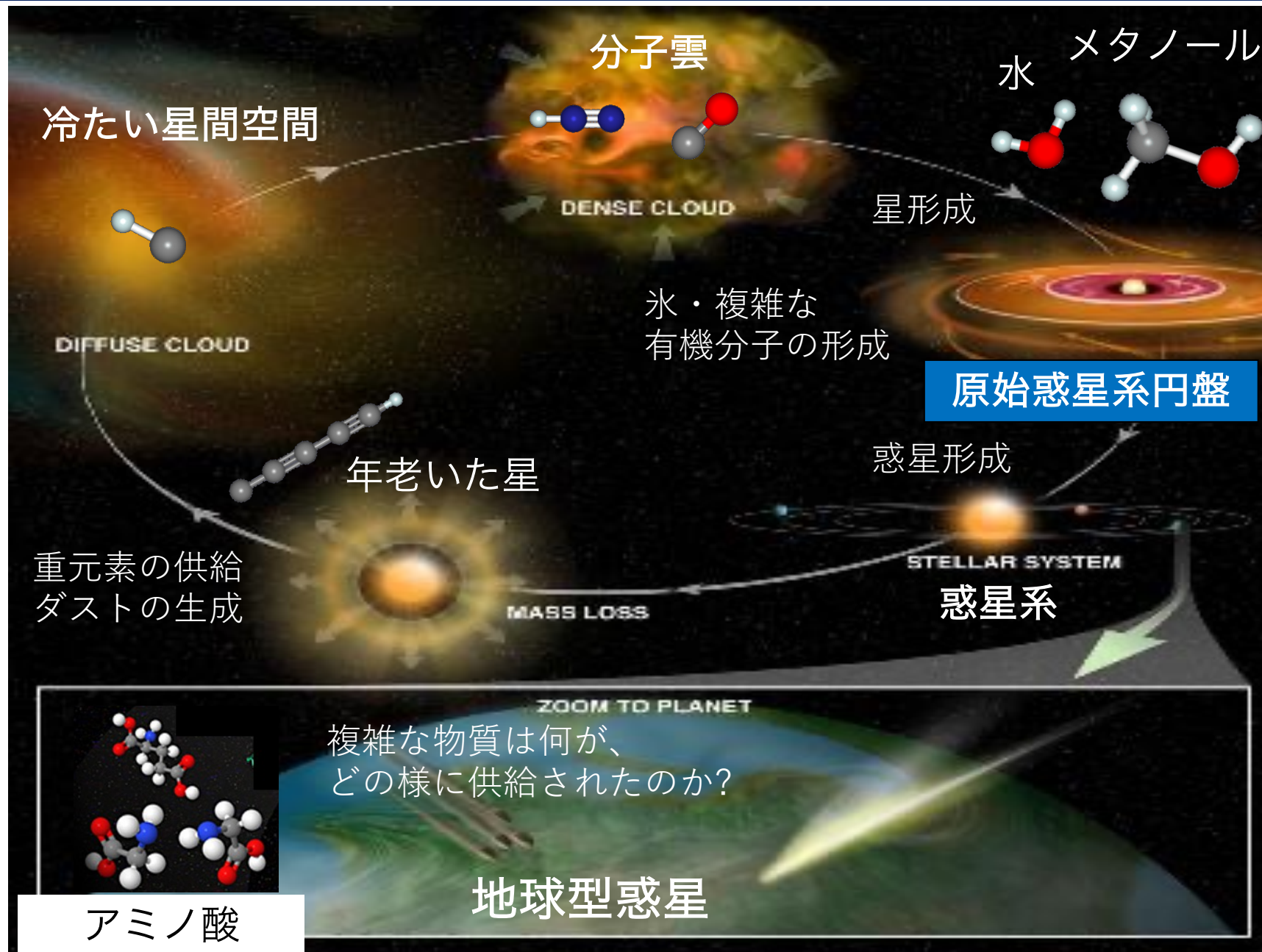
星・惑星形成

野津 翔太 (Shota Notsu)



理化学研究所 開拓研究本部 坂井星・惑星形成研究室
基礎科学特別研究員

星・惑星形成と、宇宙における物質の循環



星・惑星形成領域

↓
-低温領域

-構造形成に伴う
複雑な物質形成

↓
赤外線・電波観測

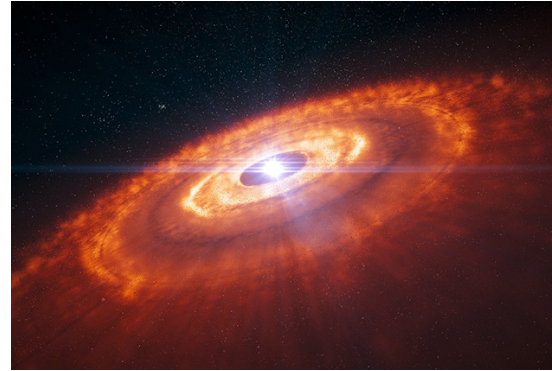
なぜ、惑星形成の(完全)理解に至っていないのか？ →原始惑星系円盤の理解が不十分であるから

NASA/ESA/Hubble Heritage Team

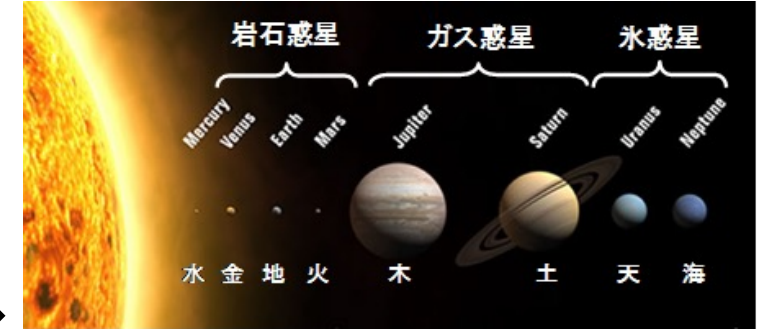
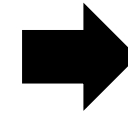


分子雲

想像図



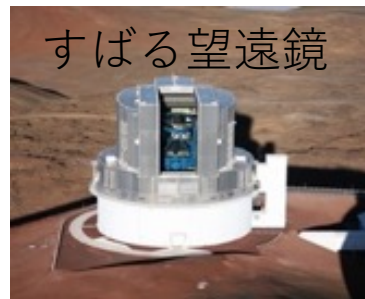
原始惑星系円盤
(**惑星形成の現場**)



惑星系



アルマ望遠鏡

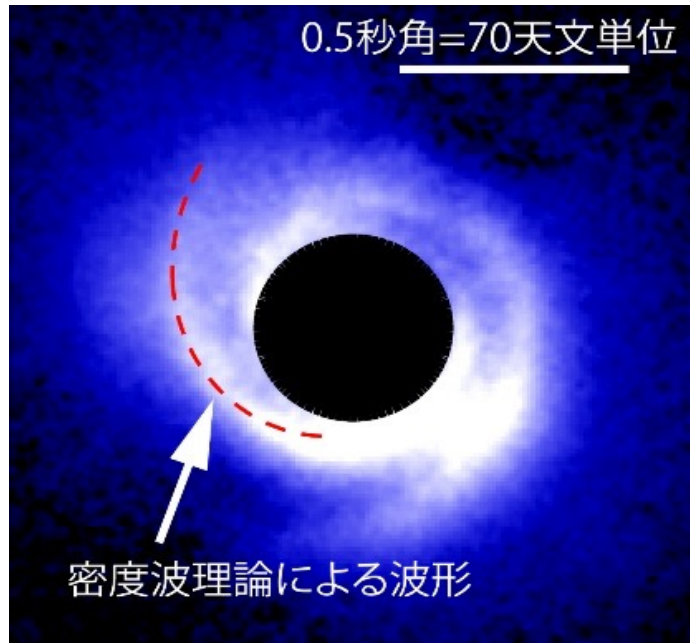


すばる望遠鏡

原始惑星系円盤の物理・化学構造を詳細観測
→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

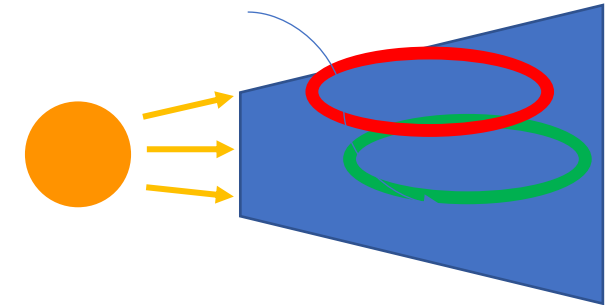
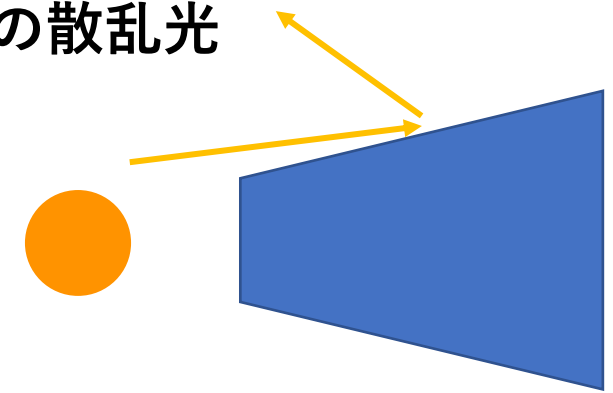
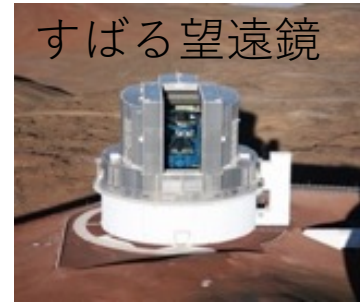
すばる望遠鏡(地上赤外線)による円盤高解像度観測

すばる望遠鏡観測 (赤外線)



腕(スパイラル)、空隙(ギャップ) など
→円盤内部に惑星の存在を示唆?!

円盤表面のダストの散乱光



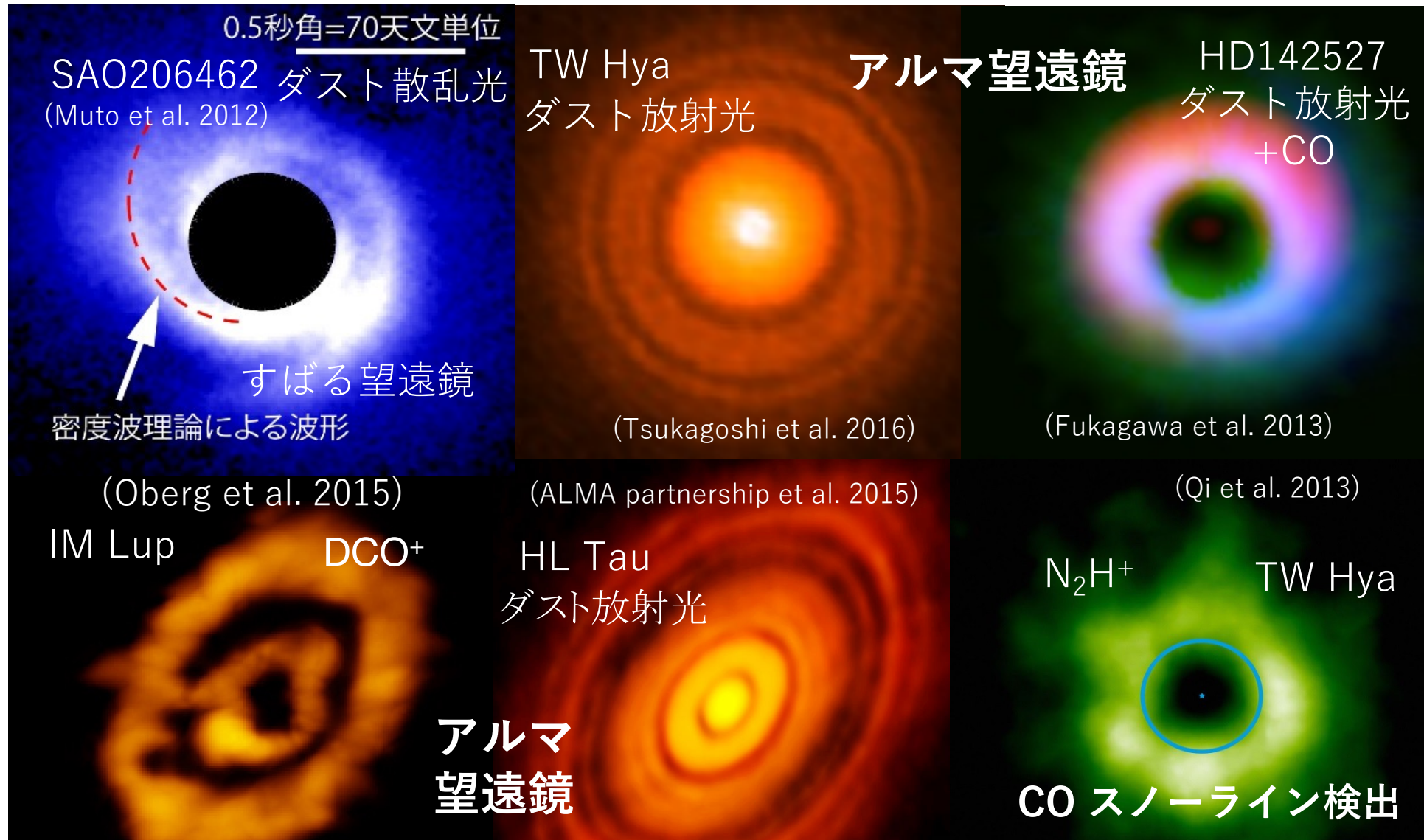
円盤表面・赤道面のダストからの
熱放射 (赤外線・電波)

アルマ望遠鏡(電波)で、惑星形成現場
(円盤赤道面)を直接観測!



HiCIAO+AO188 (2009-2015)

原始惑星系円盤のガス・ダスト詳細観測(2010's~)



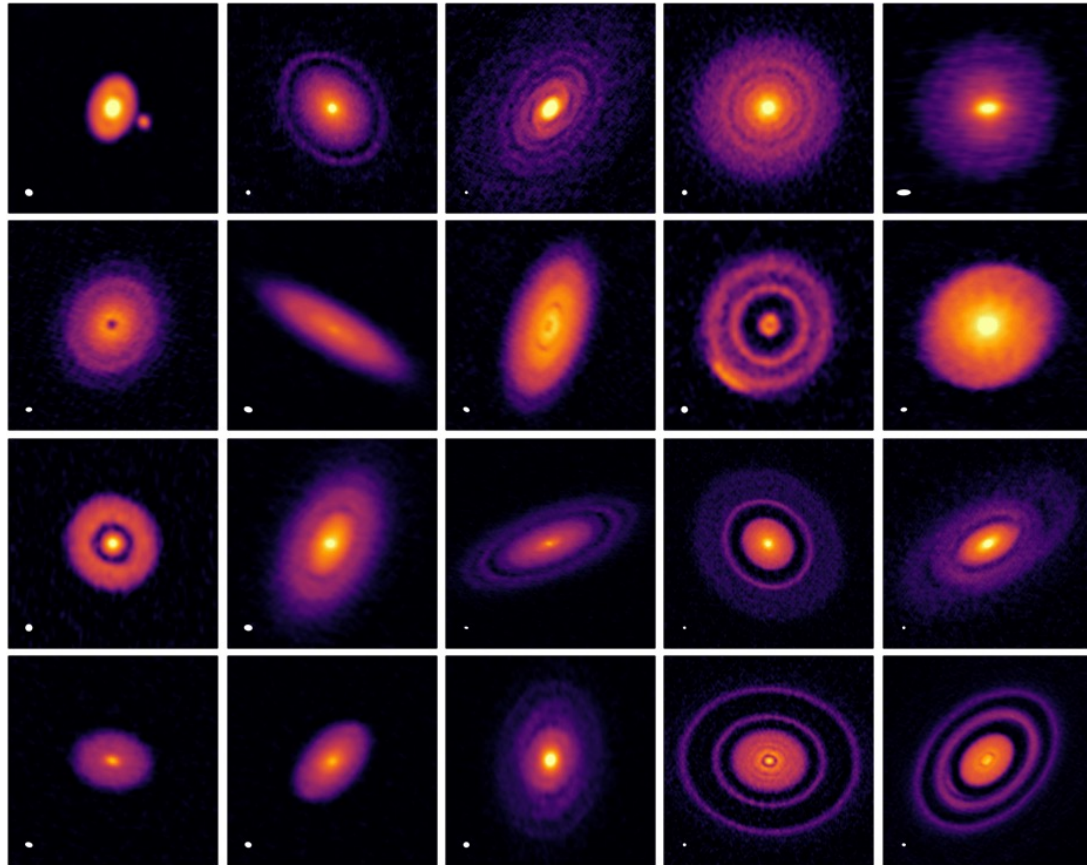
惑星形成現場の物理・化学構造が分解されつつある！

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)

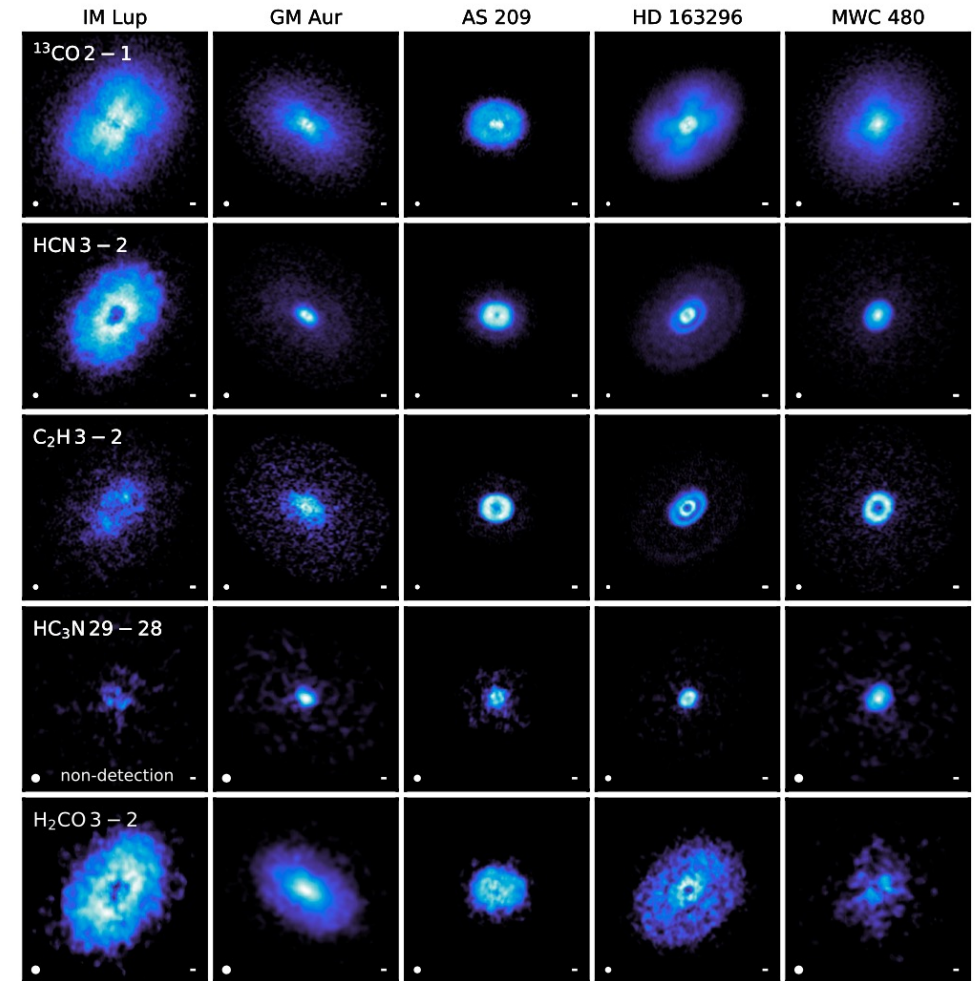
DSHARPプロジェクト



ALMA



(e.g., Öberg et al. 2021) 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.

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 H_2 Lyman-Werner
band transitions

可視光線 $[\text{OI}] 6300 \text{ \AA}$

近赤外線

H_2 $v=1-0$ $S(1)$, $S(0)$,
 CO $\Delta v=2$, $\Delta v=1$,
 H_2O , OH , HCN , C_2H_2 , CH_4

中間赤外線

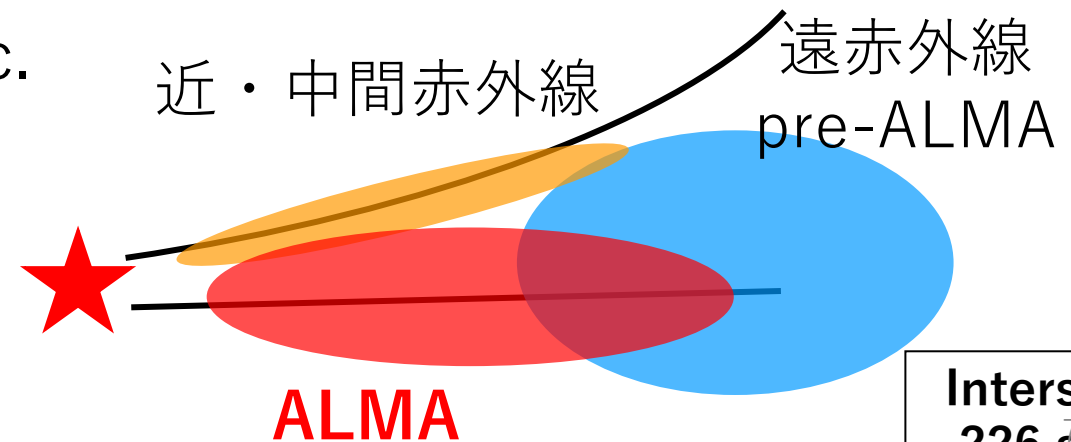
H_2 $v=0-0$ $S(1)$, $S(2)$, $S(4)$
 H_2O , OH , HCN , C_2H_2 , CO_2 , etc.
(Spitzer宇宙望遠鏡 など)

遠赤外線

$[\text{OI}] 63 \mu\text{m}$, $145 \mu\text{m}$, $[\text{CII}] 158 \mu\text{m}$
 CO , H_2O , CH^+ , HD , NH_3 , etc.
(Herschel宇宙望遠鏡 など)

ミリ波・サブミリ波

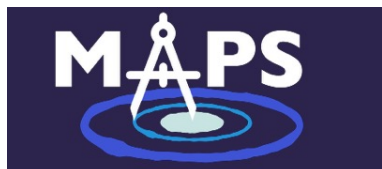
CO , ^{13}CO , C^{18}O , C^{17}O , $^{13}\text{C}^{18}\text{O}$,
 $^{13}\text{C}^{17}\text{O}$, HCO^+ , H^{13}CO^+ , DCO^+ ,
 $[\text{CI}]$, C_2H , C_2D , $c\text{-C}_3\text{H}_2$,
 H_2CO , HCOOH , CH_3OH ,
 HCN , H^{13}CN , DCN , HC^{15}N ,
 HNC , CN , C^{15}N , N_2H^+ , N_2D^+ ,
 HC_3N , CH_3CN , CS , C^{34}S , ^{13}CS ,
 H_2S , SO , H_2CS , etc.



Interstellar:
~226 species

アルマ望遠鏡観測：原始惑星系円盤の化学的多様性

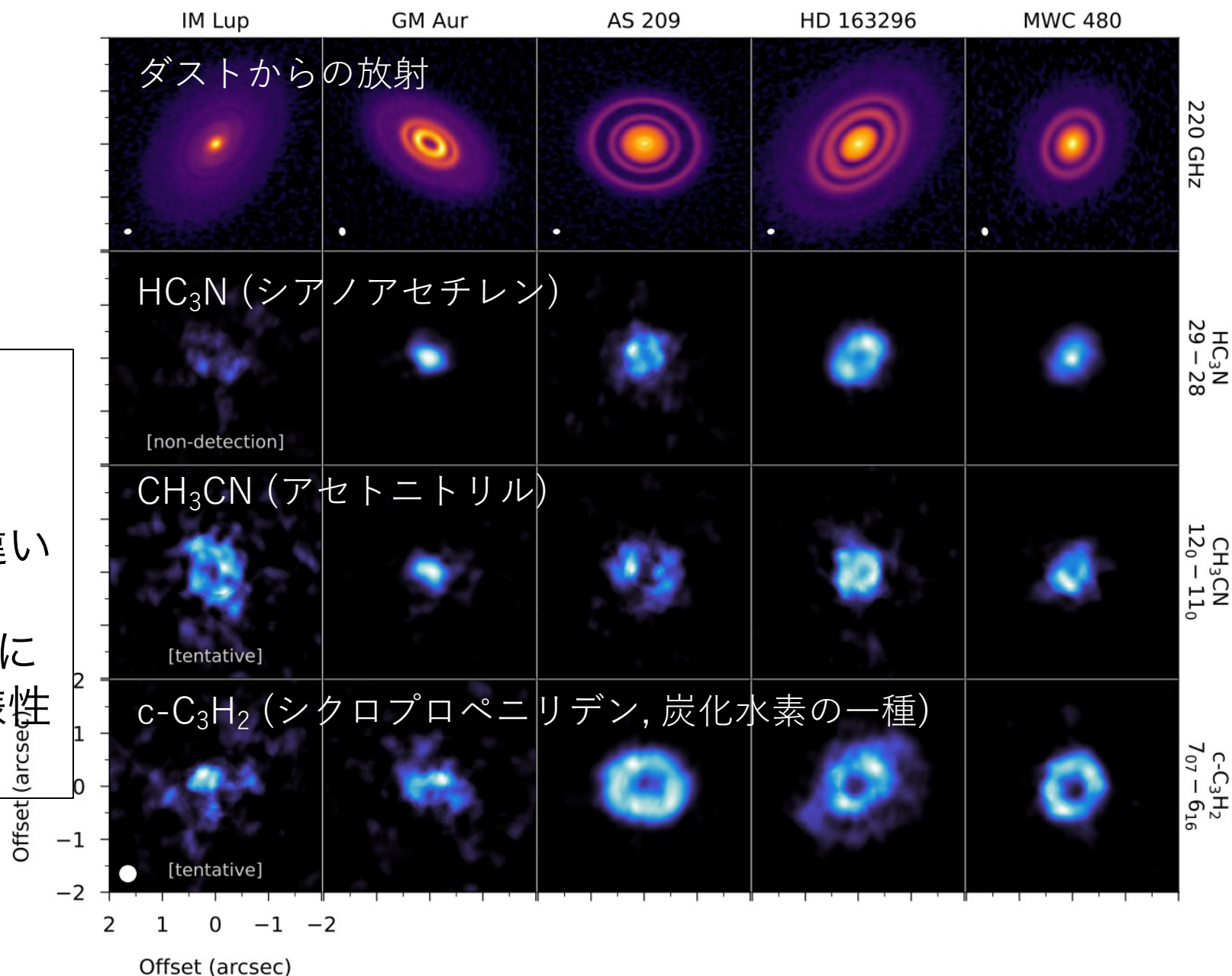
大規模観測
MAPSプロジェクト



円盤ごとに、有機分子の
存在量が異なる
→物理構造の違い
円盤形成時の化学進化の違い
などを反映?!

→(将来)地球型惑星形成領域に
迫る、円盤内側の化学的多様性
を知りたい

Öberg et al. (2021), Ilee et al. (2021)
See also Bergner et al. (2018),
Loomis et al. (2018)



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)

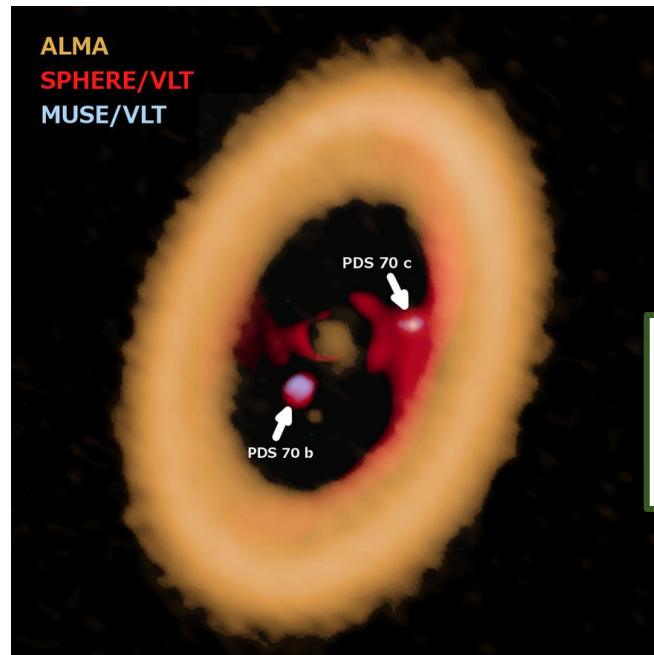
現状：アルマ望遠鏡等の電波干渉計観測(ダスト・ガス)で、星・惑星形成領域の詳細構造が見えてきた

将来(~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)

将来：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)

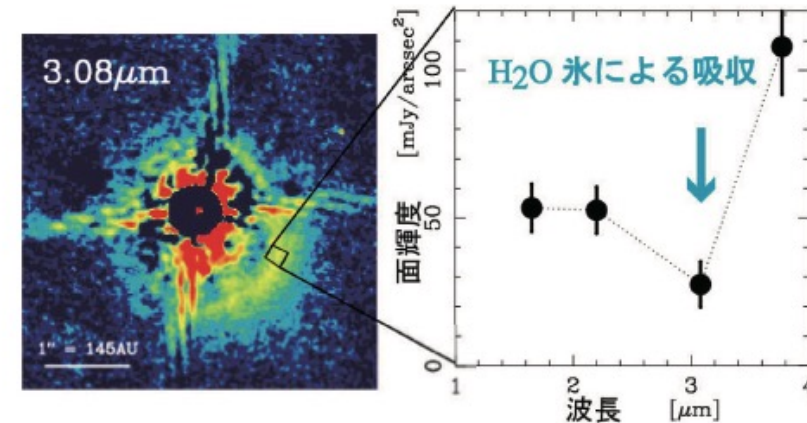


図3.1.20：HD142527円盤の近赤外散乱光スペクトルに刻まれたH₂O氷の3.1 μm 吸収。円盤外縁の低温領域表層に水の氷の存在を示した。TMTを用いれば、円盤表層の雪線に迫ることが可能である。

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

中間赤外線高分散分光：SPICA/SMI → **GREX-PLUS**
遠赤外線：SPICA/SAFARI & Origins → 2m FIR Probe?

NASA/Origins (6m):
Astro2020の結果を踏まえ、
より小規模の計画へ (2m FIR Probe)

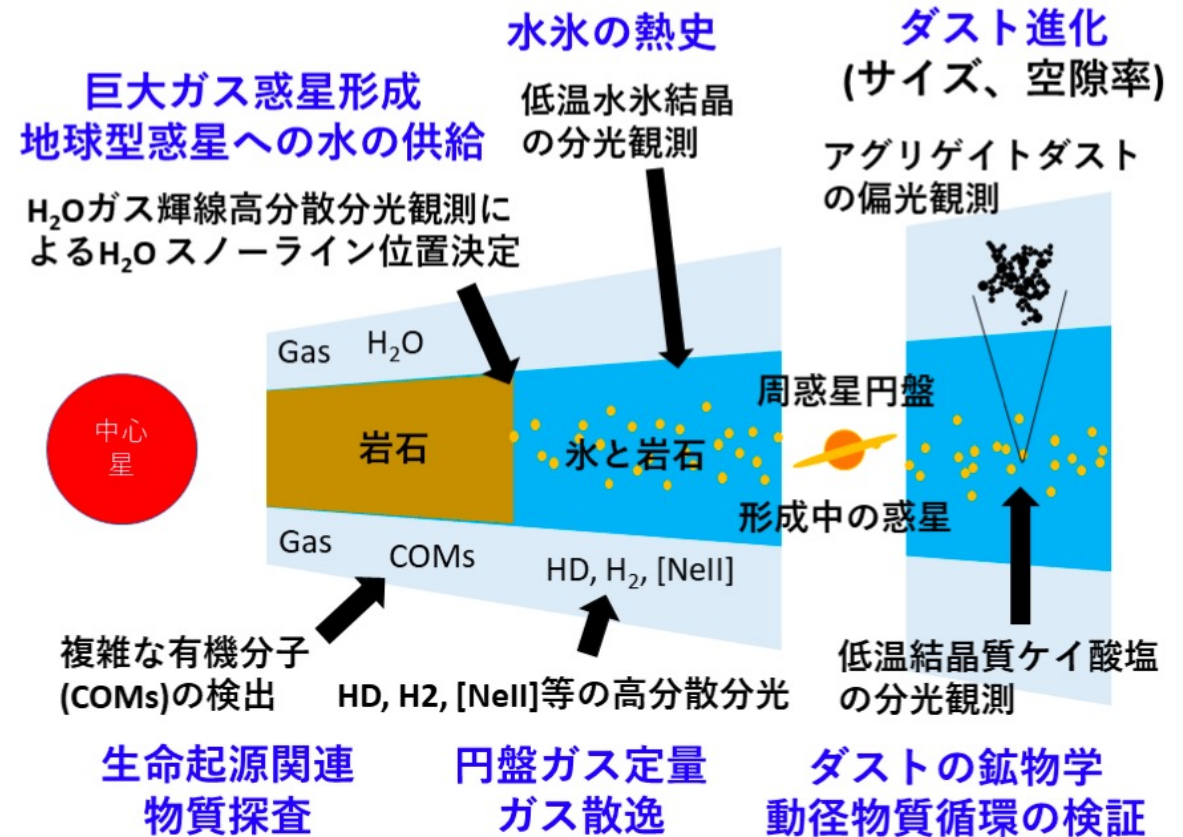


図1 惑星形成班の検討したSPICAサイエンスの概要。

Kamp et al. (2021), SPICAサイエンス検討会最終報告書, 天文月報2022年12月号 より

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($44\&63\ \mu\text{m}$, 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

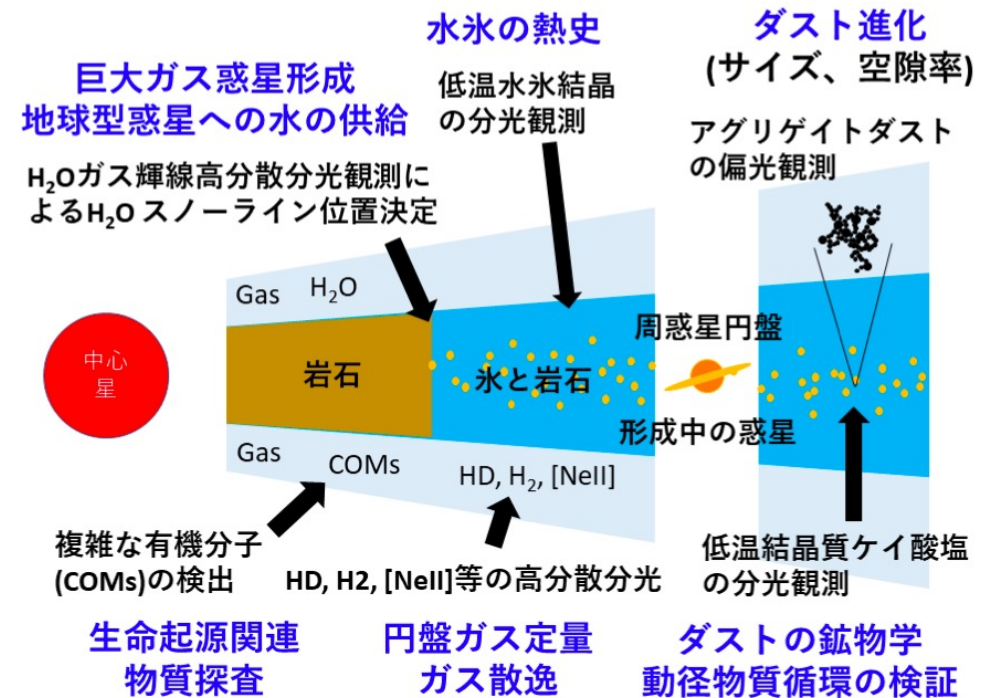
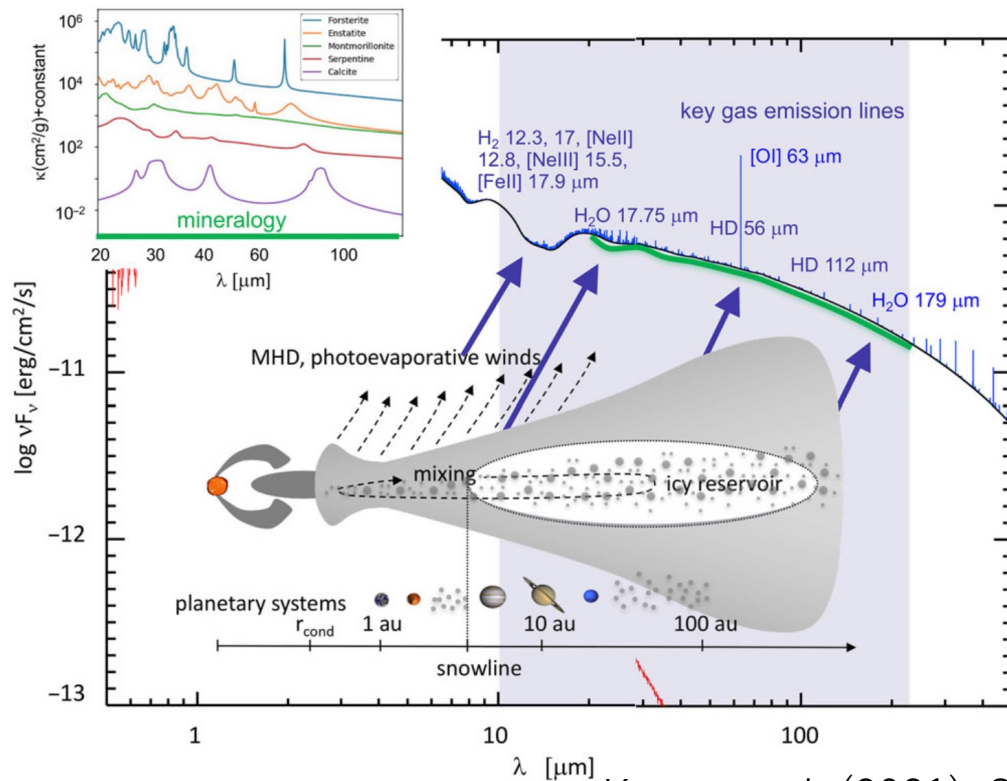
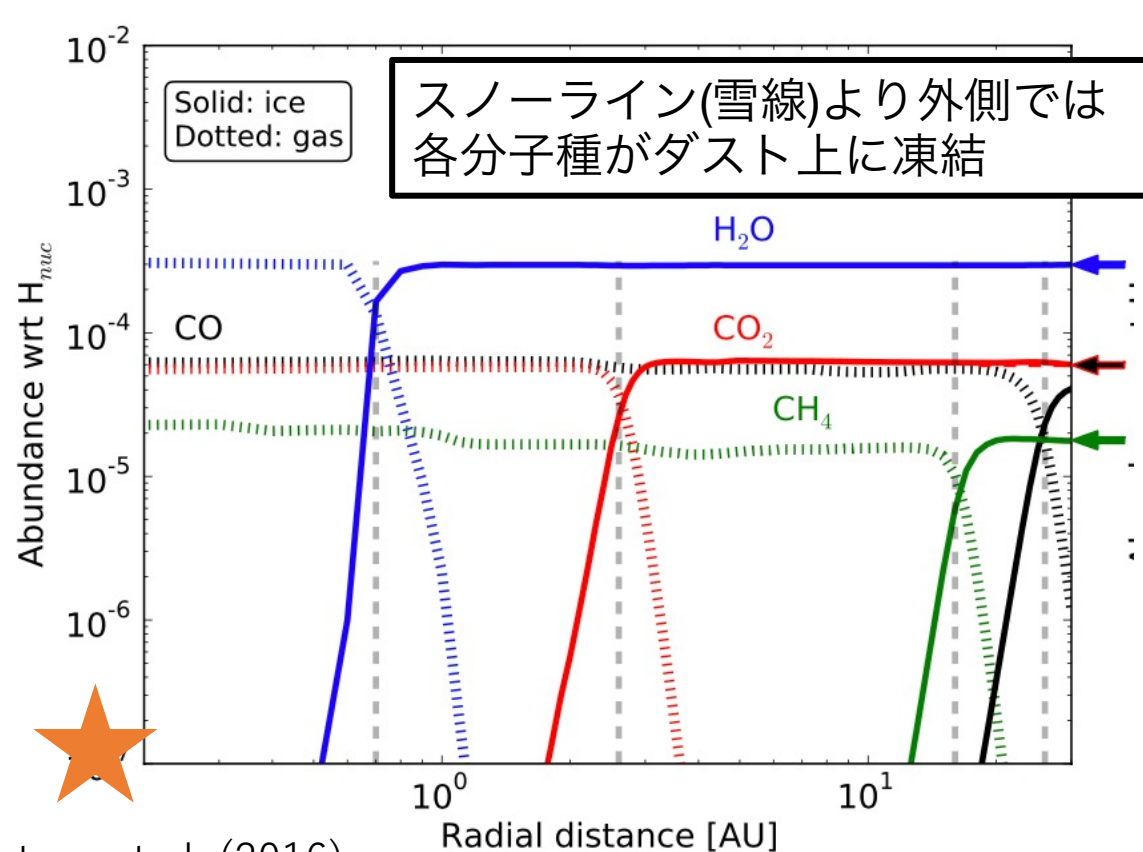
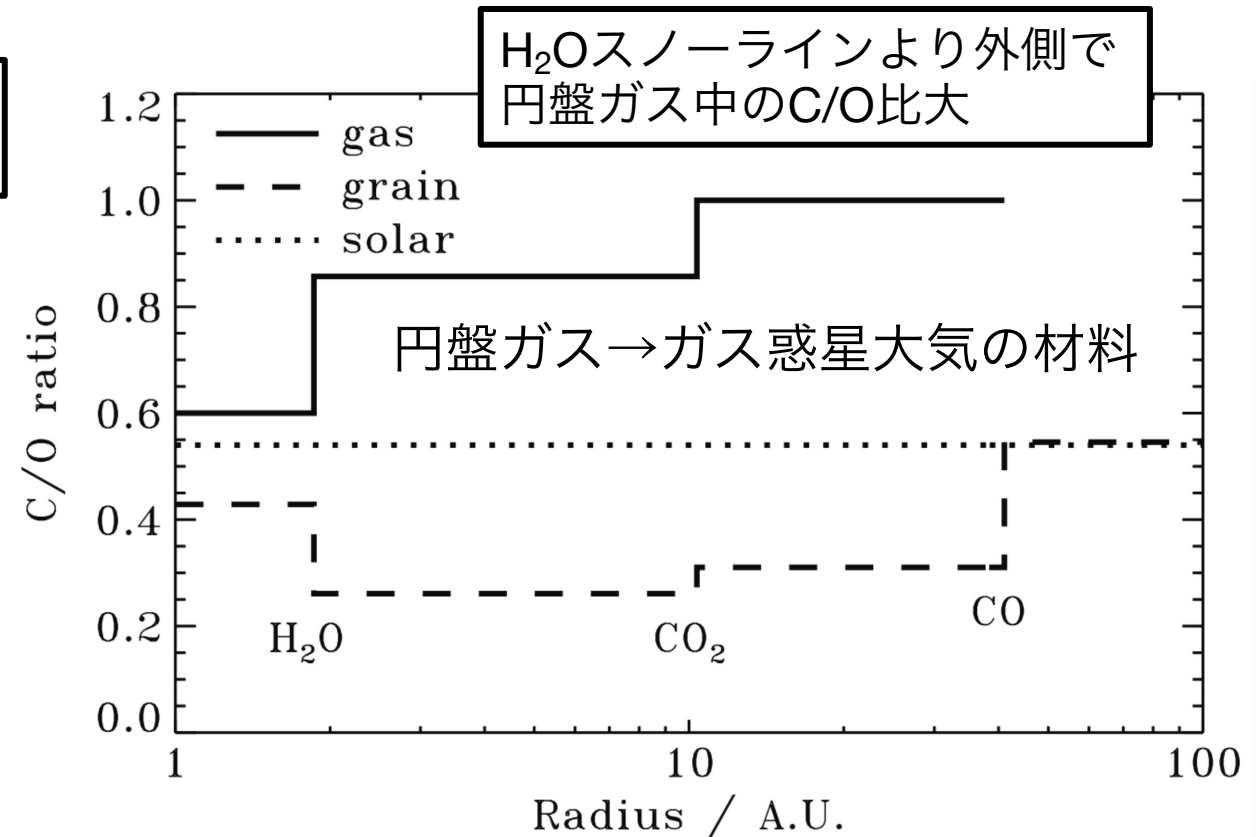


図1 惑星形成班の検討した SPICA サイエンスの概要。

原始惑星系円盤のスノーラインと惑星大気組成: 基本的描像



Eistrup et al. (2016)



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

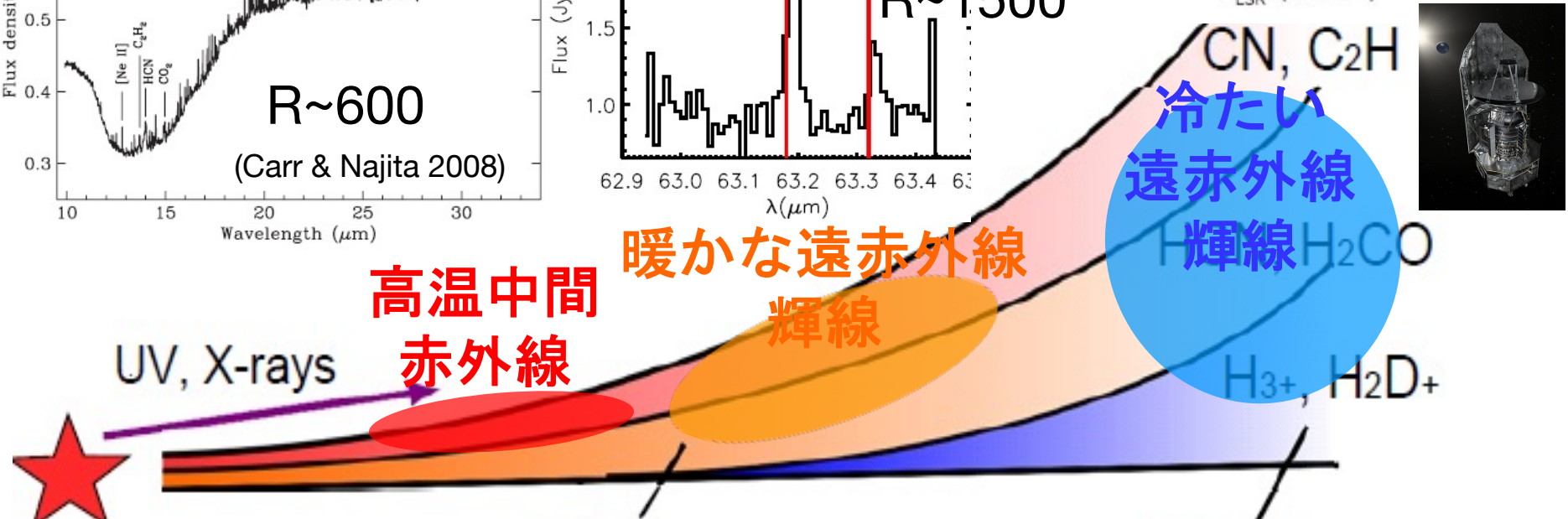
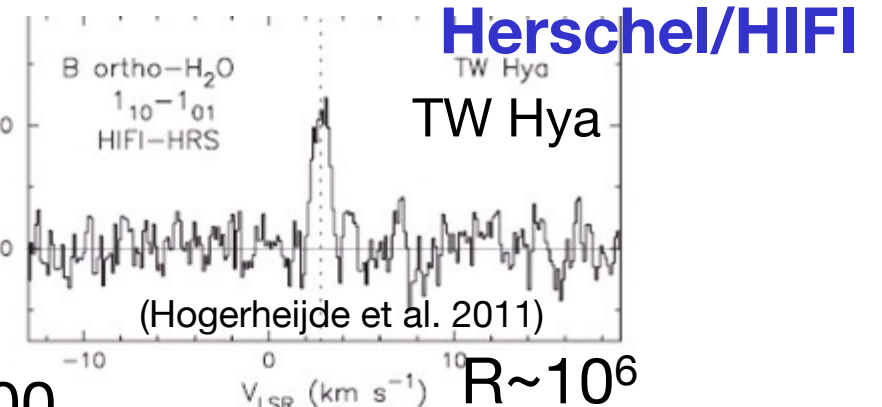
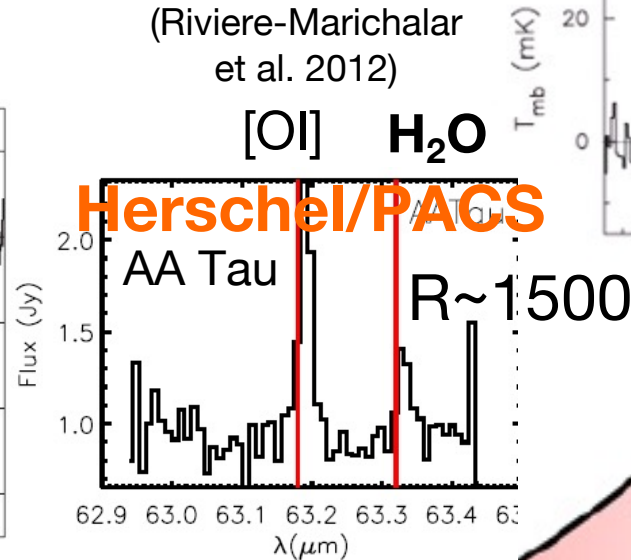
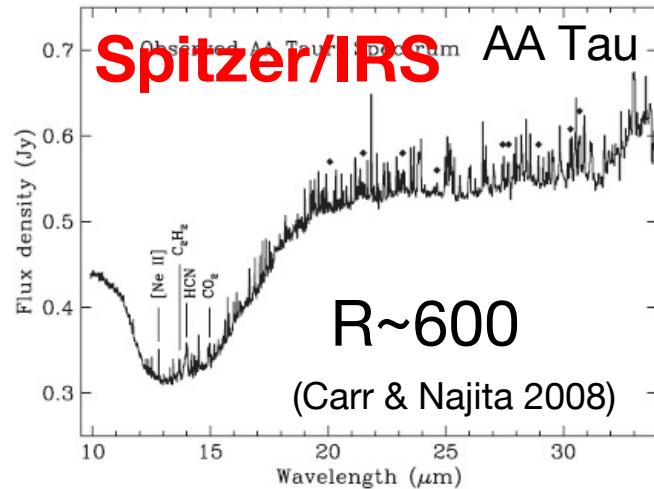
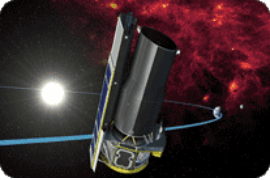
Eistrup et al. (2016, 2018), Notsu et al. (2020, 2022 in prep.), Ohno et al. (2021)

原始惑星系円盤ガスとガス惑星大気のエ素組成比(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。

過去の原始惑星系円盤 H_2O 輝線観測 (Spitzer, Herschel)

(e.g., van Dishoeck et al. 2014, 2021)

H_2O , OH, HCN, CO_2 , C_2H_2



過去の H_2O 輝線観測: 円盤表面や外側の光脱離領域をトレース
 H_2O スノーライン(@円盤内側赤道面)の良いトレーサーではない

1. 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

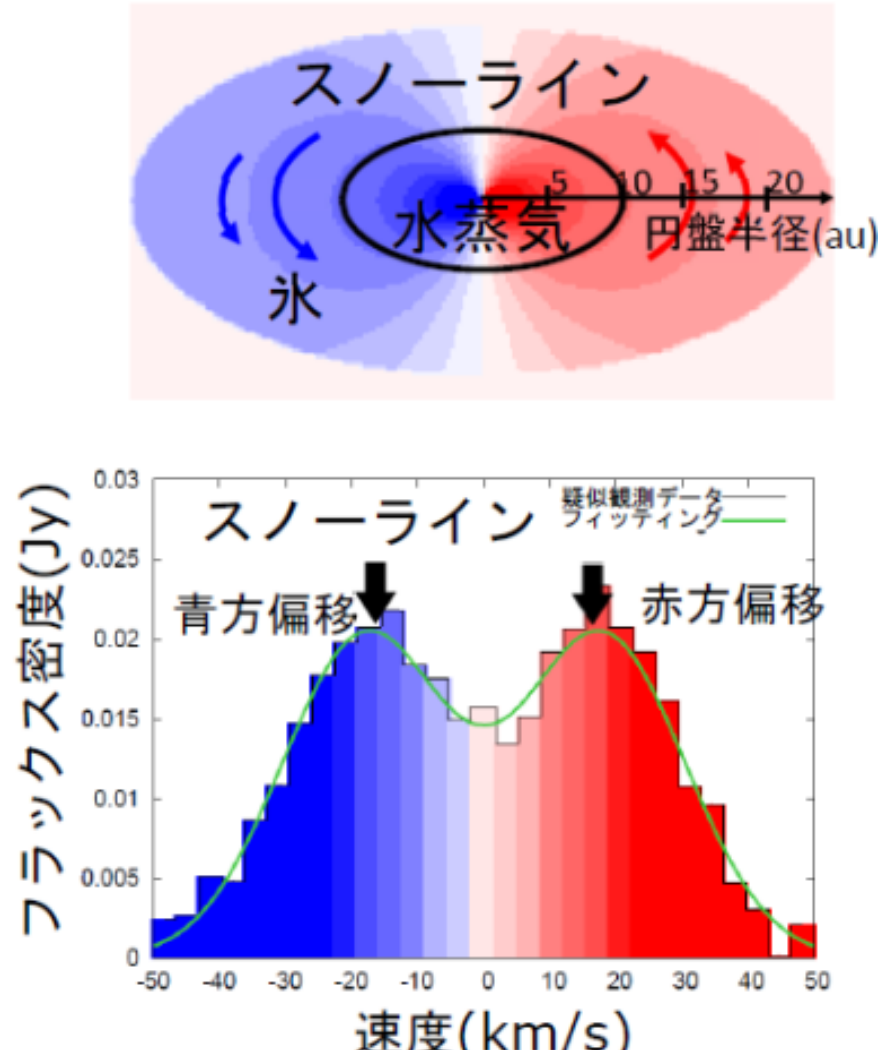
原始惑星系円盤: (ほぼ) **ケプラー回転**



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



$$\Delta v = \sqrt{\frac{GM_s}{r}} \sin i$$

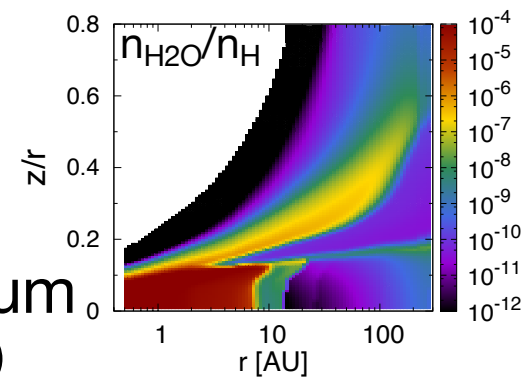
i : 傾斜角

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

H₂O 輝線プロファイルの観測を通じた H₂Oスノーラインの位置同定 -化学反応計算+放射輸送計算-



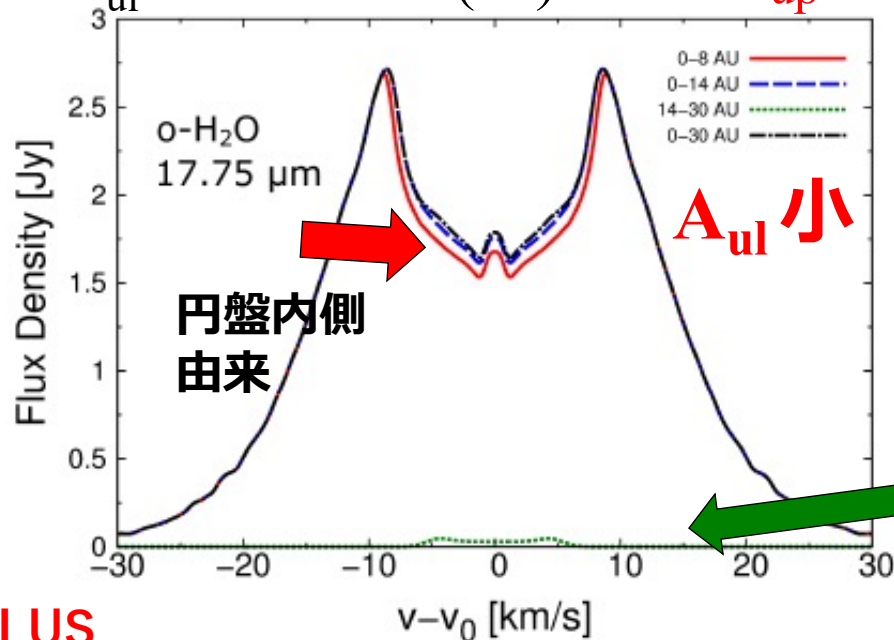
ortho-H₂¹⁶O 17.75μm

$$A_{ul} \sim 2.9 \times 10^{-3} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$E_{up} \sim 1000\text{K}$$

o-H₂¹⁶O 63.32μm

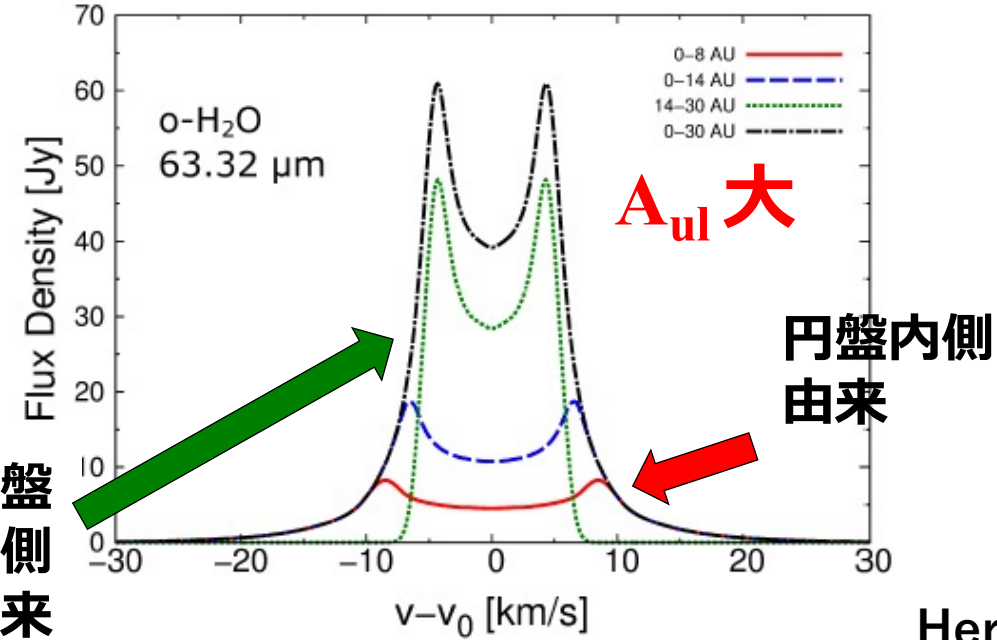
$$A_{ul} \sim 1.7 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$



GREX-PLUS

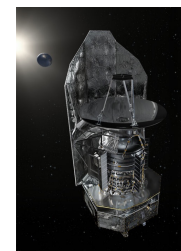
Notsu et al. (2016, 2017, 2018)

Herbig Ae 円盤



Herschel/PACS

$i=30^\circ$ Distance:140pc



放射係数が小さく ($A_{ul} \sim 10^{-6} - 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) 励起エネルギーが比較的大きい ($E_{up} \sim 1000\text{K}$) ortho-H₂¹⁶O 輝線のプロファイルを調べる事で、円盤赤道面H₂Oスノーラインの位置を同定可能！

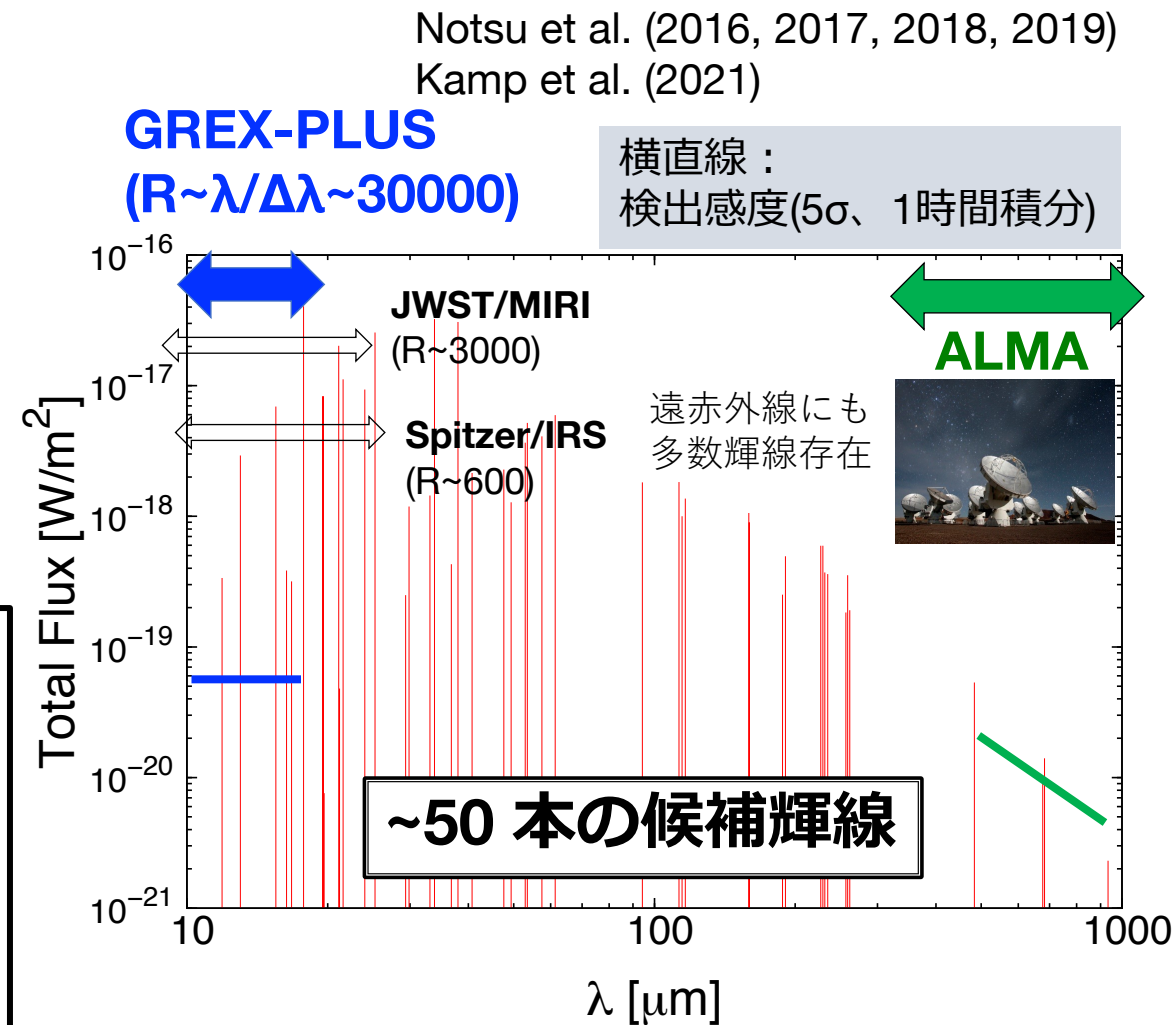
H₂Oスノーライン・トレーサー 水輝線のフラックス予測

右図：H₂Oスノーライン検出に適した
ortho-H₂¹⁶O輝線のフラックス分布
(Herbig Ae円盤の場合)

ALMA 近傍(~150 pc)のHerbig Ae円盤であれば、
~10時間積分で検出可能 → 天体数が限られる

GREX-PLUS ortho-H₂¹⁶O 17.75 μm輝線がターゲット
T Tauri円盤：近傍分子雲では~3時間積分で検出可能
Herbig Ae円盤：近傍分子雲では<30分積分で検出可。
Orion分子雲でも<1時間 積分で可。

JWST/MIRI: 速度分解はできないが輝線の検出は期待
→GREX-PLUSに向けた候補天体探しに活用



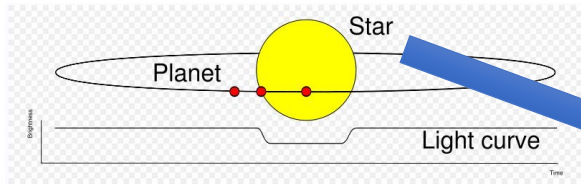
**H₂Oスノーライン・サーベイ観測には
中間赤外線高分散分光観測が重要！**

2. 原始惑星系円盤内 C/O比分布 & 有機物分布

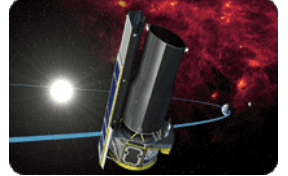
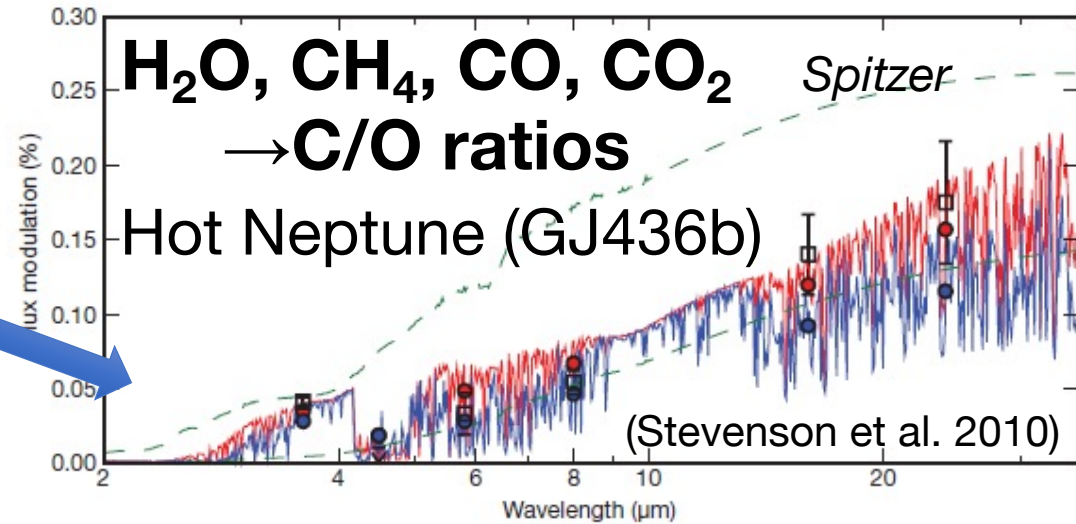
太陽系外惑星大気

JWST, Ariel,
GREX-PLUS

cf. 小玉貴則氏
講演



トランジット二次食
(熱放射)



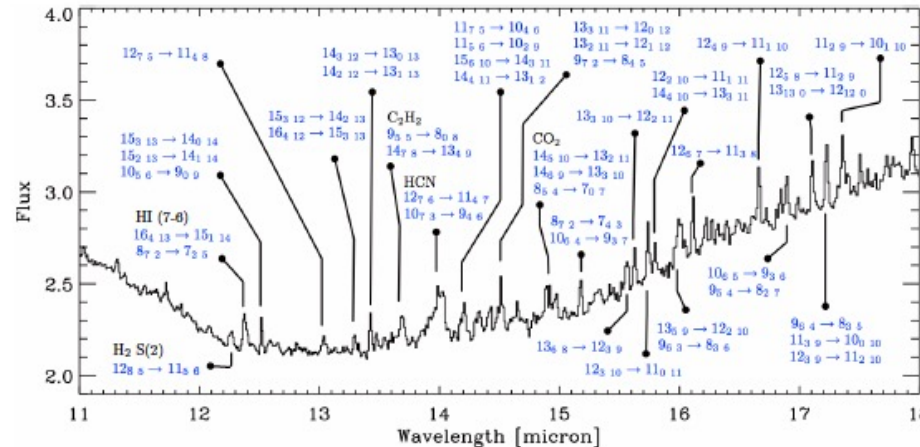
原始惑星系円盤

$\text{CH}_4, \text{CO}_2, \text{C}_2\text{H}_2$ など:
電波で観測できない分子種

JWST/MIRI (R~3000)

GREX-PLUS (R~30000)

$\text{HCN}, \text{C}_2\text{H}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{OH}, \text{CO}_2$ (Emission) → C/O ratios



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

Pontoppidan
et al. (2010)

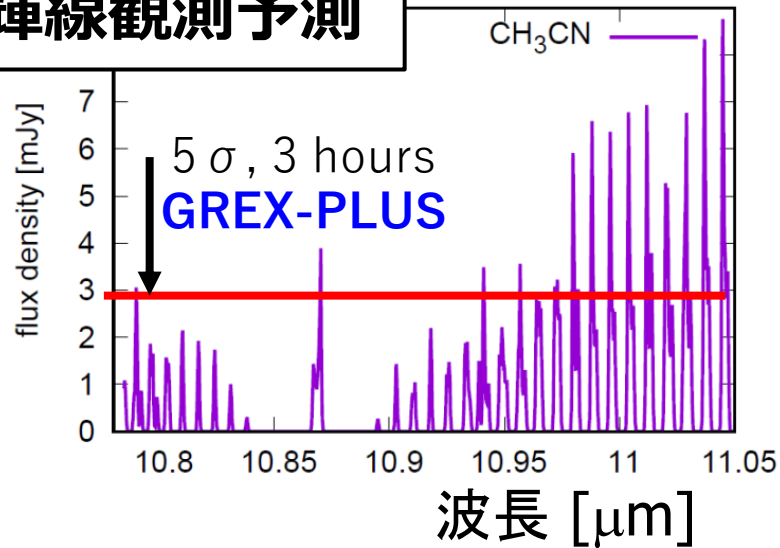
原始惑星系円盤ガスとガス惑星大気の元素組成比(C/O比など)の比較
→ 惑星形成領域・移動過程を知る手がかりとなる。

2. 原始惑星系円盤内 C/O比分布 & 有機物分布

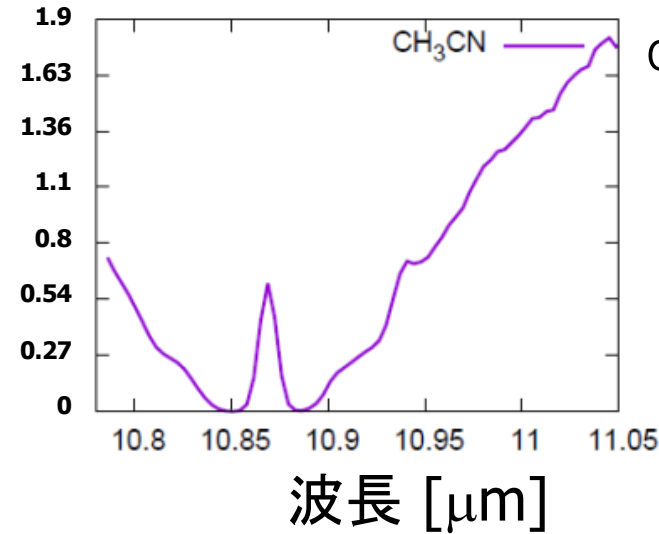
中間赤外線 有機分子輝線観測予測

R~30000

例: CH₃CN



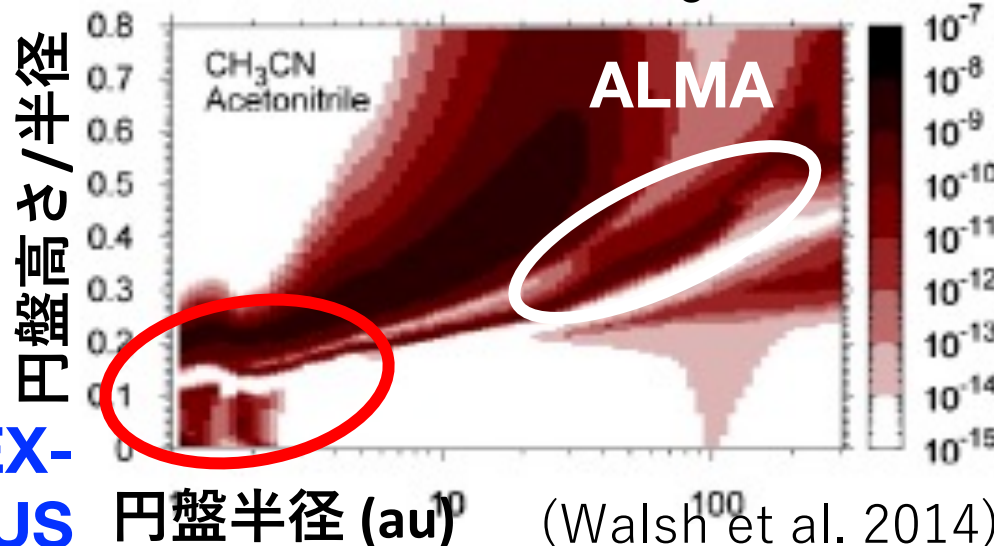
R~3000 (JWST/MIRI) [N. Sano, B. Hu. H. Nomura]



d=60pc

高分散観測により
S/Nが高くなる
→多数の有機分子輝線
の検出

円盤中のガス中CH₃CNの分布



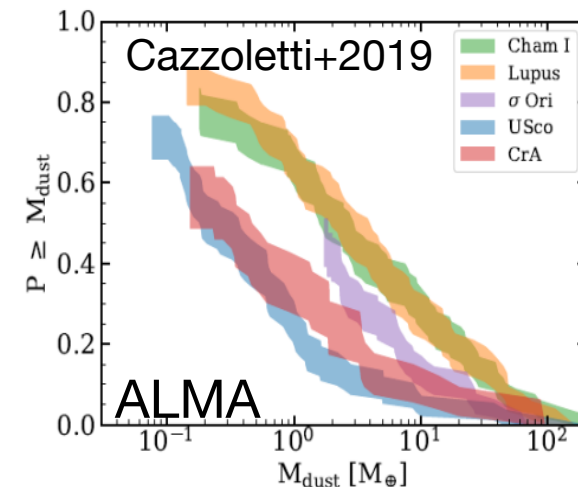
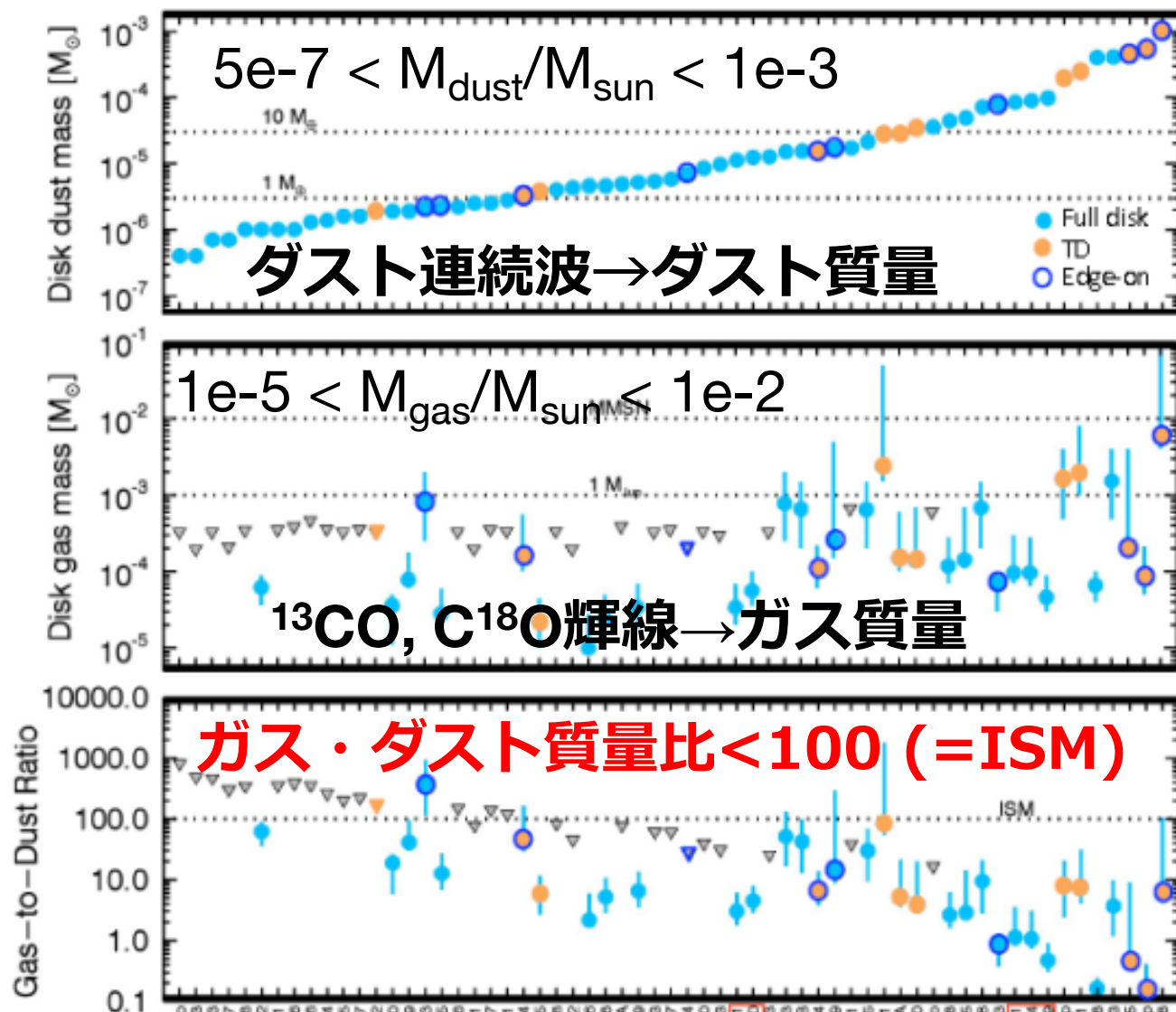
中間赤外線高分散観測により、ALMAでは検出が難しい、円盤内縁由来の有機分子輝線を検出

円盤内縁部の有機分子生成過程を解明する

3. HD&H₂輝線等を用いた円盤ガスの定量と散逸過程の解明

ALMAサーベイ観測 Band 6, Lupus

(Miotello et al. 2017)



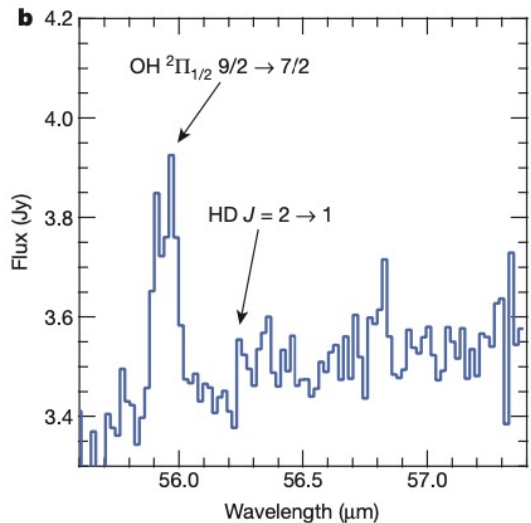
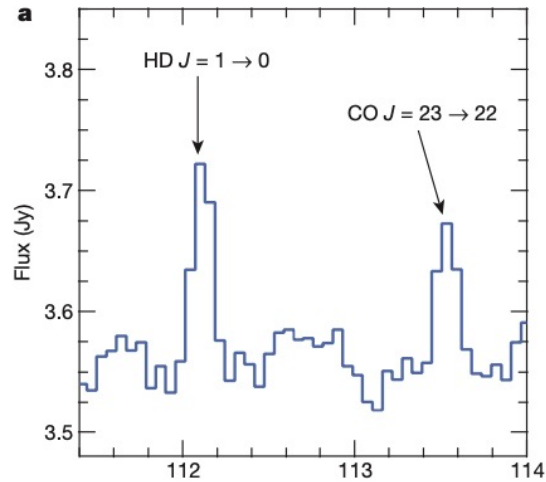
円盤内COガス:
ダスト上への凍結や化学進化で、
ISMの組成(~10⁻⁴)より減少

観測結果：円盤ガス量が本当に少ない or
化学進化でCO量が減っている?
電波観測のみでは不定性が残る

↓
円盤ガスの正確な定量には、
水素分子ガス(HD, H₂)の観測が重要!

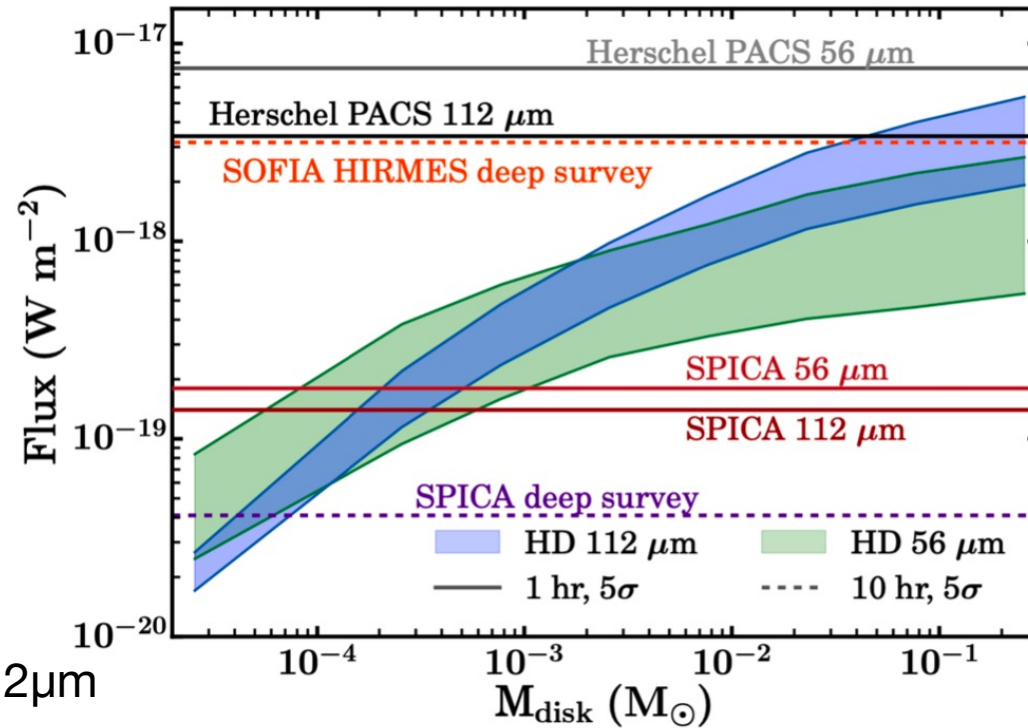
3. HD&H₂輝線等を用いた円盤ガスの定量と散逸過程の解明

HD輝線の観測サーベイ (~100天体) : 円盤ガスの正確な定量が可能
→ SPICA/SAFARIでの観測サーベイが期待されていた



HD輝線
J=1-0 112μm
J=2-1 56μm

Trapman et al. (2017)



遠赤外線
SOFIA: 感度が不足
NASA/Origins (6m):
Astro2020の結果を踏まえ、
より小規模の計画へ
(2m FIR Probe)

中間赤外線 高分散分光観測 (**GREX-PLUS**)

H₂ S(1) 17μm, H₂ S(2) 12μm, [Ne II] 12.8μm 輝線

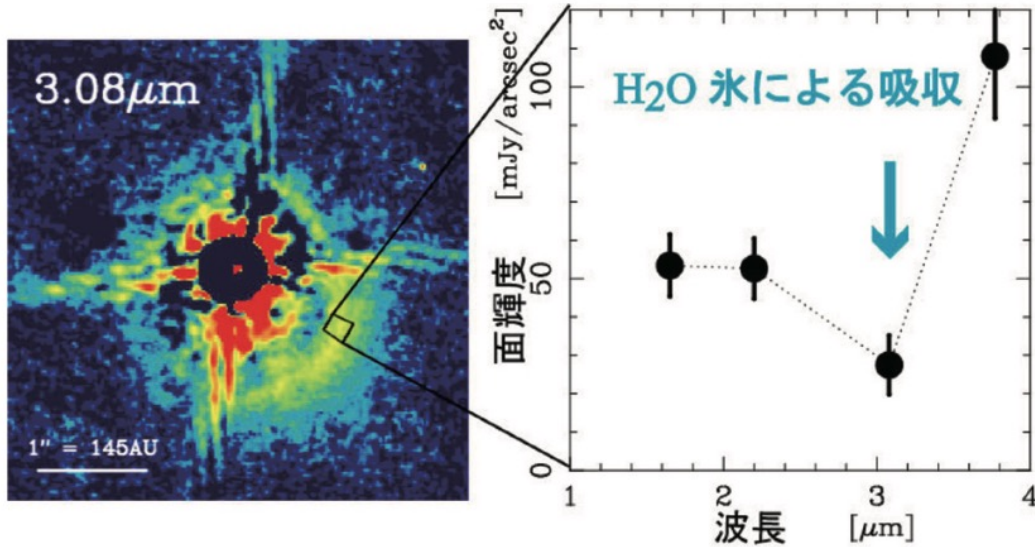
→ 円盤散逸期のガス質量定量 / 円盤表層の電離・解離領域の構造理解

Herschel/PACSで円盤HD輝線を検出
しかし、確実な検出は数天体のみ

e.g., Bergin et al. (2013), McClure et al. (2016)

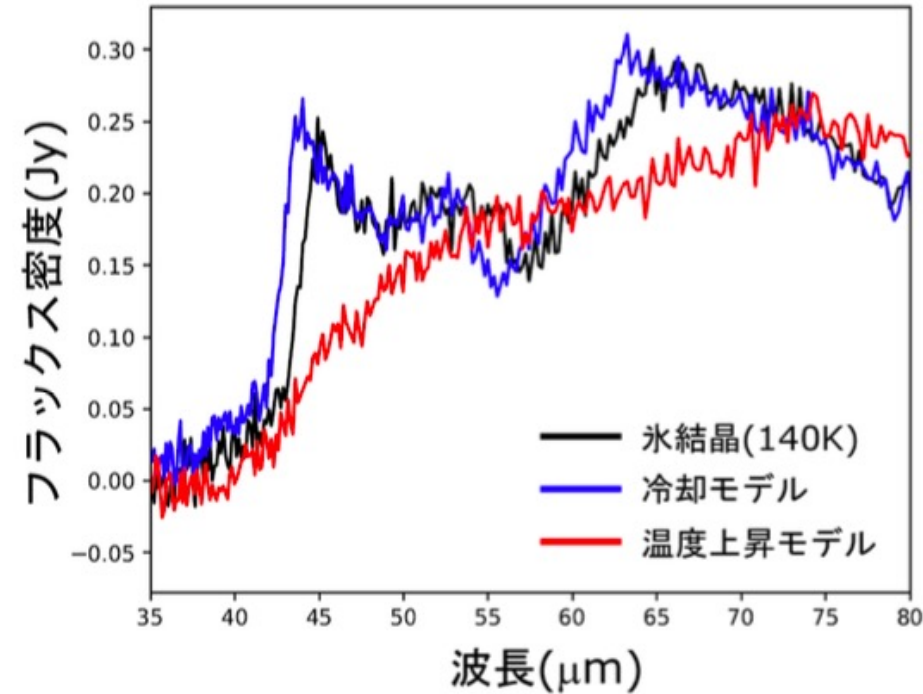
4. 円盤内の水氷の熱史の解明

Kamp et al. (2021)



(e.g., Honda et al. 2009, 2016)

すばる2 & TMT/MICHI: $\sim 3\mu\text{m}$ 水氷吸収の空間分布を捉える
吸収を観測するので、背景光源が必要
天体のgeometryなどにも依存する



$44\mu\text{m}$ はISO以降観測なし

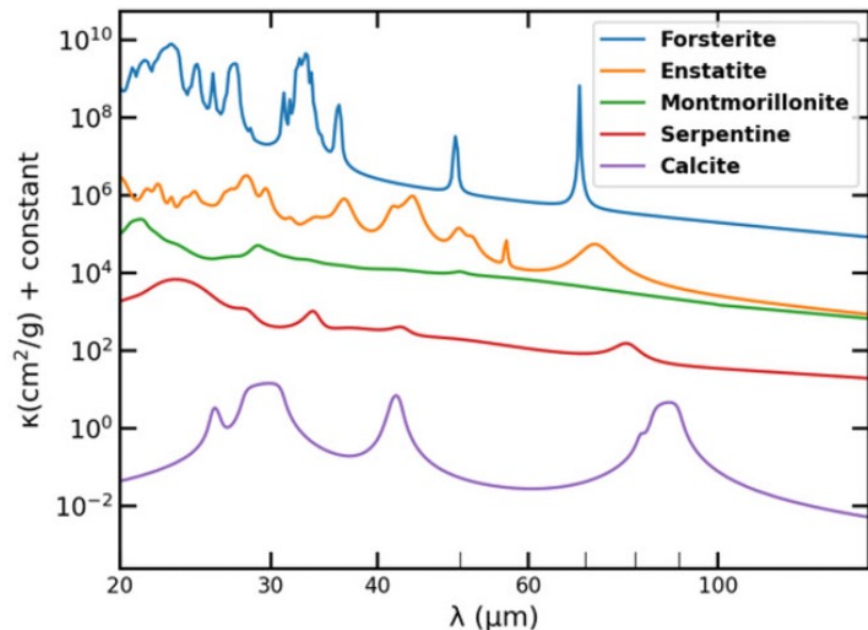
遠赤外線の $44\mu\text{m}$, $63\mu\text{m}$ 付近に格子振動モード
低温領域の水氷からの熱放射の観測が可能
結晶状態(非晶質/結晶質)に敏感な分光的特徴

SPICA/SAFARI

遠赤外線分光的特徴($\sim 44, 63\mu\text{m}$)の観測サーベイにより、
円盤内の水氷の存在量&熱史の解明が期待される

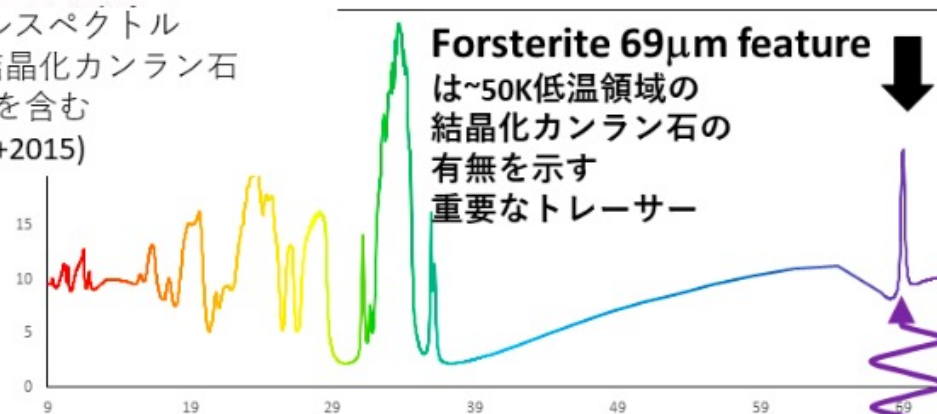
5. 円盤鉱物学と動径物質循環の一般性検証

Maaskant et al. (2015), Kamp et al. (2021)

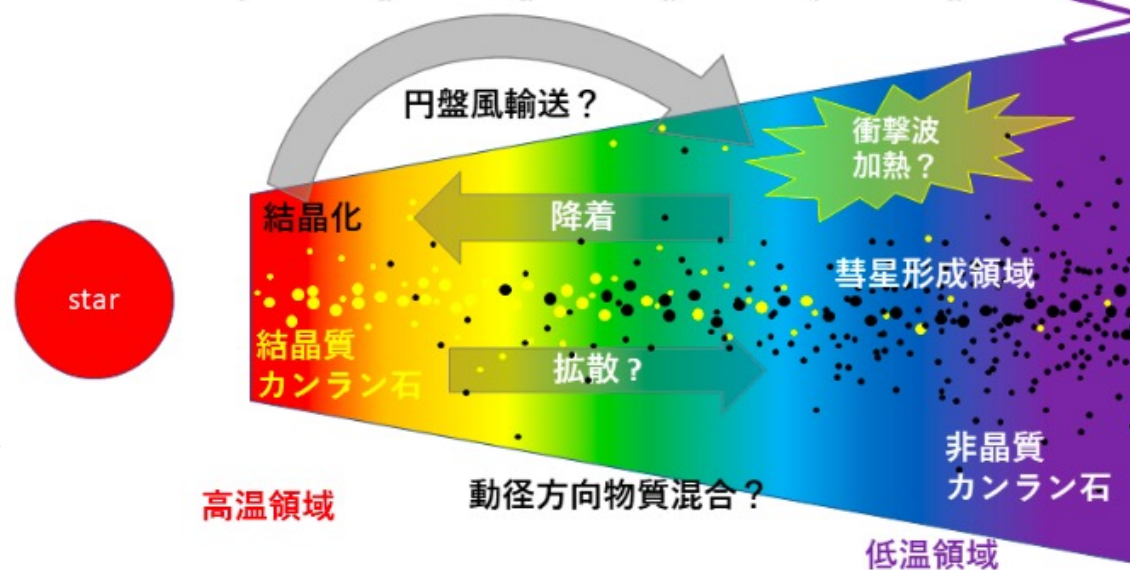


鉱物の分光的特徴：ピーク位置や輝線幅などから、
Fe/Mg 比, 温度, 結晶質/非晶質などの情報が推測可能

円盤モデルスペクトル
with 10%結晶化カンラン石
(forsterite)を含む
(Maaskant+2015)



SPICA/SAFARI



遠赤外線分光的特徴(69μmなど)：円盤低温領域 (彗星形成領域) の(結晶質)シリケイトをトレース



結晶質シリケイト(高温領域で形成)が彗星形成領域 (T ~ 50 K) へと輸送された過程を検証する

まとめ：宇宙望遠鏡を必要とするサイエンス：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？

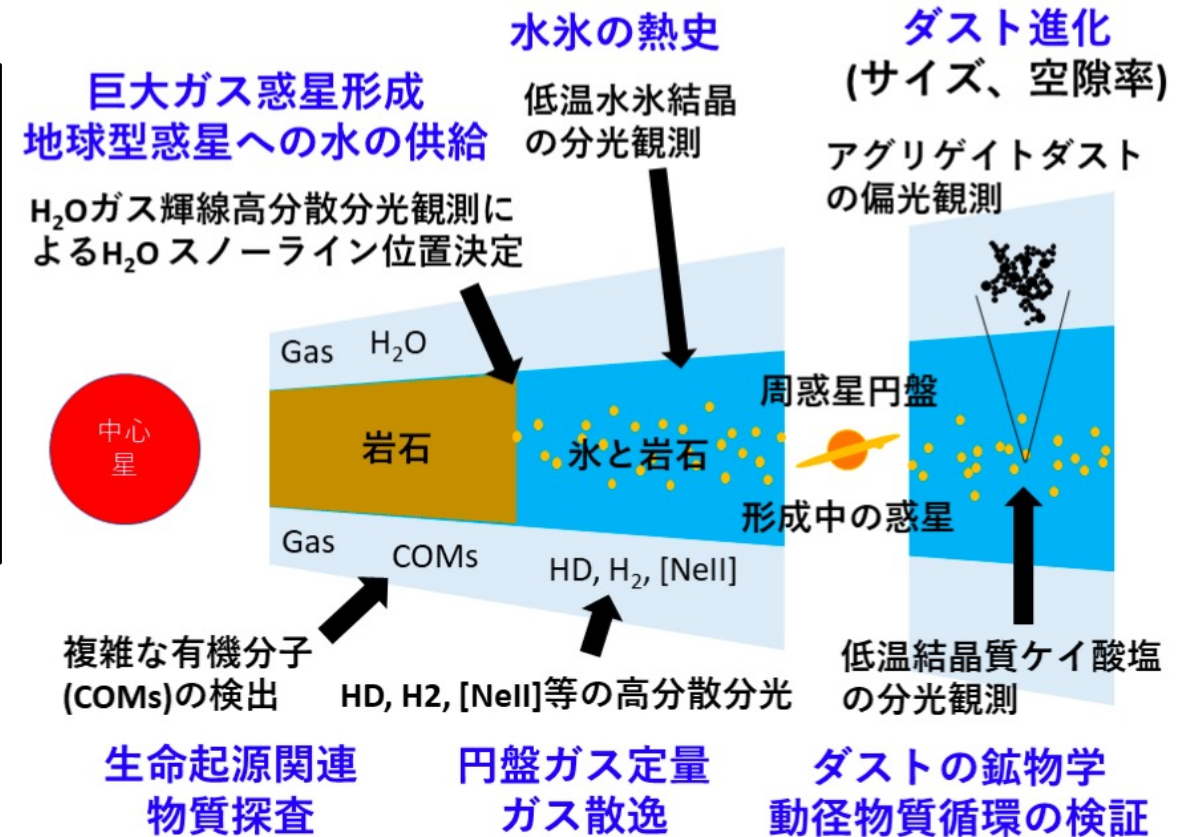
→(JWSTがカバーしない) **中間赤外線高分散分光・遠赤外線観測**にフロンティア！
惑星形成過程における豊富な物質進化の解明には欠かせない

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

中間赤外線高分散分光：SPICA/SMI → **GREX-PLUS**
遠赤外線：SPICA/SAFARI & Origins → 2m FIR Probe?

NASA/Origins (6m):
Astro2020の結果を踏まえ、
より小規模の計画へ (2m FIR Probe)



Kamp et al. (2021), SPICAサイエンス検討会最終報告書, 天文月報2022年12月号 より

まとめ：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($44\&63\ \mu\text{m}$, 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

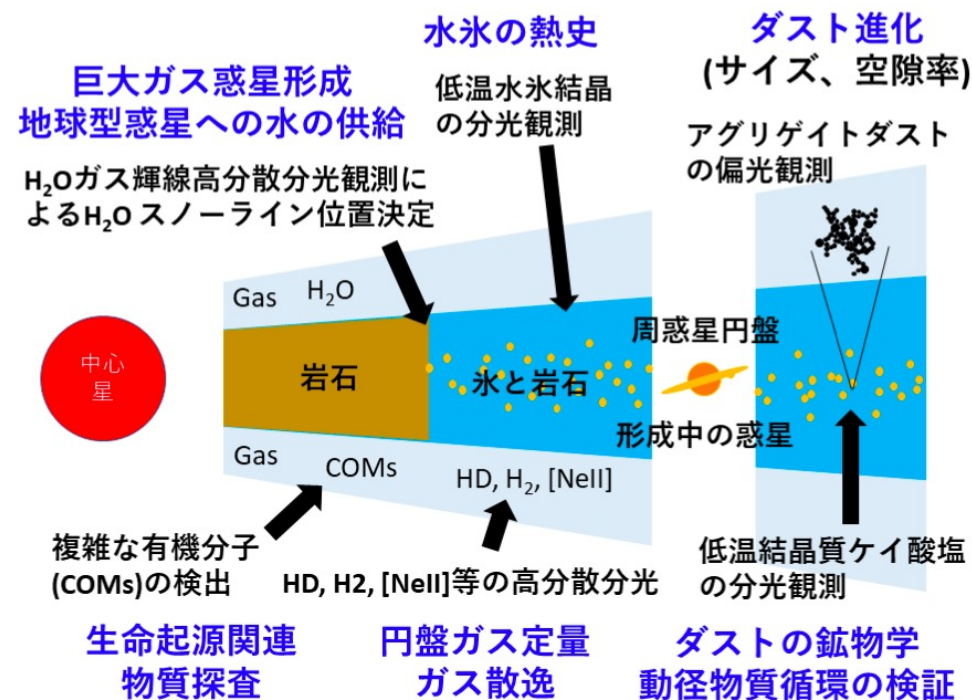
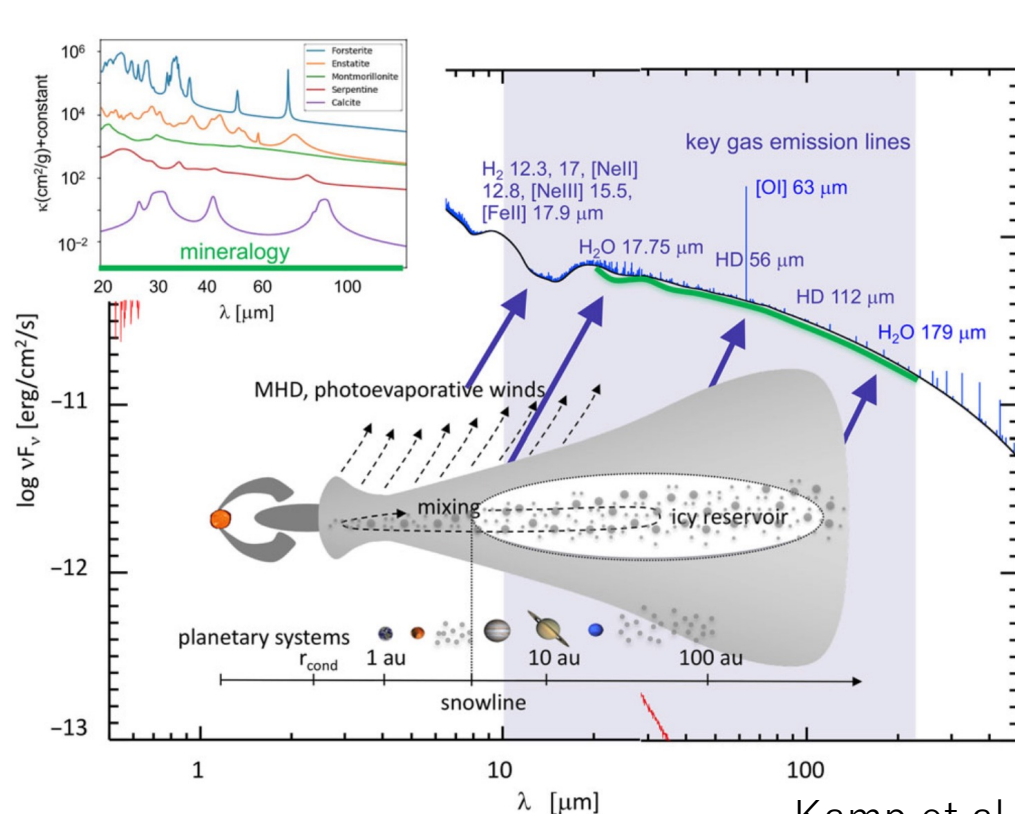


図1 惑星形成班の検討した SPICA サイエンスの概要。

主要参考資料 (日本語版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”

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 JAXA WG設立提案書

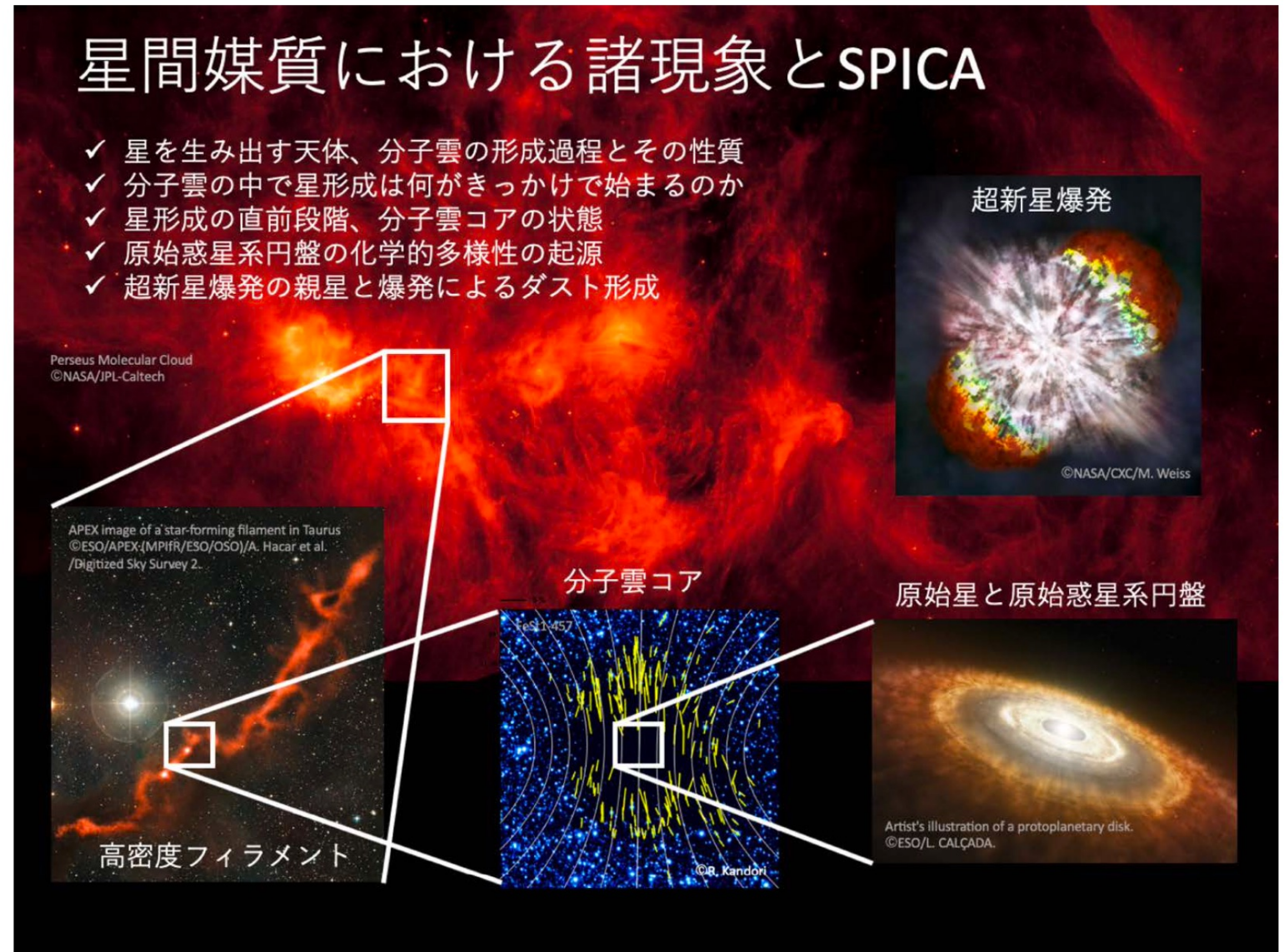
遠赤外線 星形成のサイエンス

遠赤外線偏光観測
→星形成領域 磁場分布

[CII] 158 μm 輝線
[OI]; 63 μm & 145 μm 輝線 など
→分子雲の電離・解離領域の観測

星間媒質における諸現象とSPICA

- ✓ 星を生み出す天体、分子雲の形成過程とその性質
- ✓ 分子雲の中で星形成は何かきっかけで始まるのか
- ✓ 星形成の直前段階、分子雲コアの状態
- ✓ 原始惑星系円盤の化学的多様性の起源
- ✓ 超新星爆発の親星と爆発によるダスト形成



Perseus Molecular Cloud
©NASA/JPL-Caltech

APEX image of a star-forming filament in Taurus
©ESO/APEX-(MPIfR/ESO/OSO)/A. Hacar et al.
/Digitized Sky Survey 2.

高密度フィラメント

分子雲コア

超新星爆発
©NASA/CXC/M. Weiss

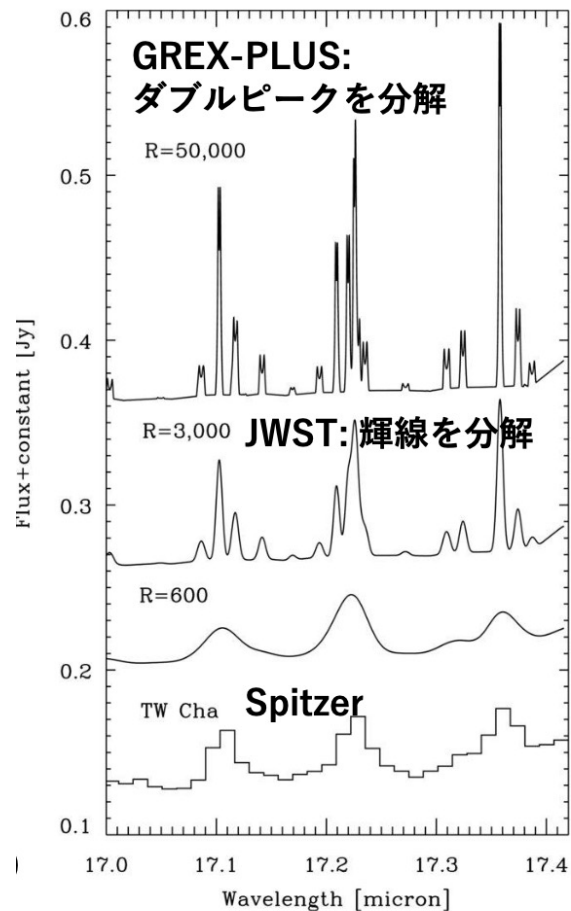
原始星と原始惑星系円盤
Artist's illustration of a protoplanetary disk.
©ESO/L. CALÇADA.

©B. Kandel

GREX-PLUS

中間赤外線高分散分光観測

- JWST/MIRI ($R \sim 3,000$) より一桁高い波長分解能
- TMTより数倍以上高感度
- 波長も連続的にカバー



Pontoppidan et al. (2010)

