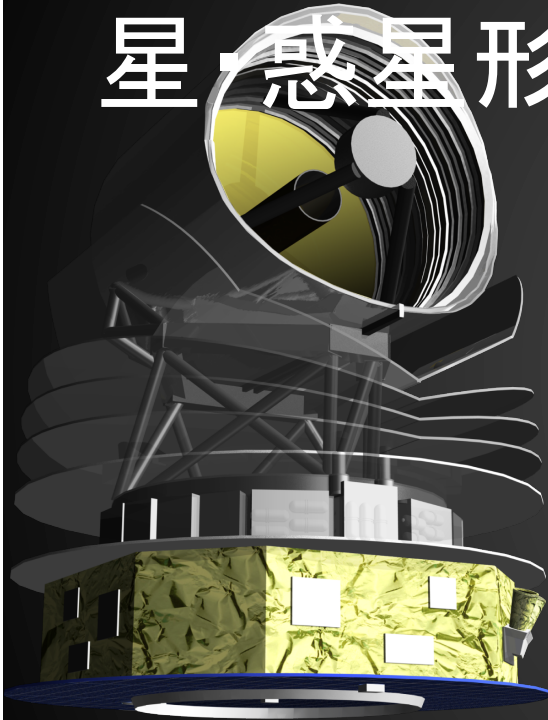


Mar. 19, 2020 @日本天文学会春季年会

# SPICAが切り拓くサイエンス： 星、惑星形成，惑星系の観測ハイライト



JAXA / SPICA Test

平野照幸 (東京工業大学)，

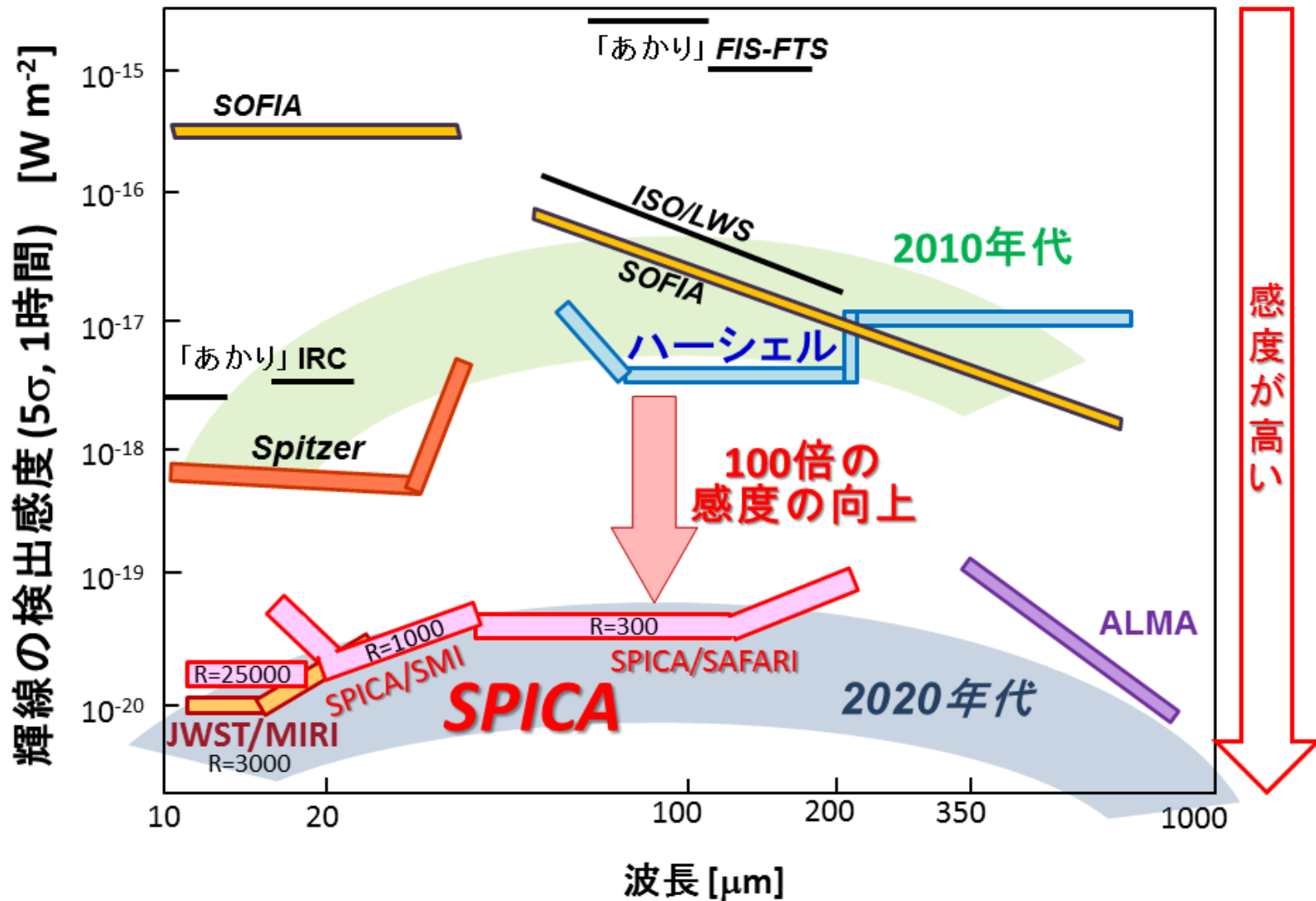
井上剛志 (名古屋大学)，本田充彦 (岡山理科大学)，

SPICA サイエンス検討会

# Outline

1. SPICAサイエンス検討会
2. 「星形成・星間媒質」のサイエンス
3. 「惑星形成」のサイエンス
4. 「太陽系・系外惑星」のサイエンス
5. まとめ

# SPICAの装置



# SPICAサイエンス検討会

## 班員体制

(ver.190806)

とりまとめ: **長尾透**(愛媛大), **野村英子**(NAOJ) (敬称略)

銀河BH進化  
泉拓磨(NAOJ)

市川幸平(東北大)  
**今西昌俊**(NAOJ)  
梅畑豪紀(理研)  
久保真理子(NAOJ)  
**竹内努**(名大)  
田村陽一(名大)  
**鳥羽儀樹**(京大)  
長峯健太郎(阪大)  
**橋本拓也**(早稲田大)  
播金優一(NAOJ)  
馬場俊介(NAOJ)  
山下拓時(NAOJ)  
和田武彦(ISAS)

近傍銀河・銀河系  
**江草芙実**(東大)

**稲見華恵**(広島大)  
金子紘之(NAOJ)  
左近樹(東大)  
**竹内努**(名大)  
田村陽一(名大)  
中西康一郎(NAOJ)  
馬場淳一(NAOJ)  
**本原顕太郎**(東大)  
渡邊祥正(日大)

星形成・星間媒質  
井上剛志(名大)

**相川祐理**(東大)  
岩崎一成(NAOJ)  
大屋瑤子(東大)  
神鳥亮(ABC)  
坂井南美(理研)  
島尻芳人(鹿児島大)  
**下西隆**(東北大)  
**立原研悟**(名大)  
野沢貴也(NAOJ)  
日高宏(北大)  
**古家健次**(筑波大)  
古屋玲(徳島大)  
守屋堯(NAOJ)  
山本智(東大)

惑星形成  
**本田充彦**(岡山理大)

**相川祐理**(東大)  
**石原大助**(ISAS)  
田崎亮(東北大)  
橘省吾(東大)  
茅原弘毅(大産大)  
中川貴雄(ISAS)  
野津翔太(Leiden)  
**野村英子**(NAOJ)  
藤井悠里(名大)  
藤原英明(NAOJ)  
松本侑士(ASIAA)  
武藤恭之(工学院大)  
**百瀬宗武**(茨城大)  
森昇志(東大)

太陽系・系外惑星  
**平野照幸**(東工大)

臼井寛裕(ISAS)  
**大坪貴文**(ISAS)  
大野和正(東工大)  
奥住聡(東工大)  
奥谷彩香(東工大)  
笠羽康正(東北大)  
川内紀代恵(東大)  
川島由依(SRON)  
癸生川陽子(横国大)  
**小林仁美**(LLP)  
小林浩(名大)  
佐川英夫(京産大)  
**関根康人**(東工大)  
空華智子(NAOJ)  
**高橋葵**(ABC)  
藤井友香(東工大)  
前澤裕之(大阪府大)  
**松尾太郎**(大阪大)  
水木敏幸(ISAS)  
薮田ひかる(広島大)

・現時点で29機関から計72名(内、班長5名)が参加

- 赤字で示した方は ESA SST の Science WG にも参加

・各班のメーリングリスト

- 銀河BH進化
- 近傍銀河・銀河系
- 星形成・星間媒質
- 惑星形成
- 太陽系・系外惑星

spica\_swg\_highz@googlegroups.com

spica\_swg\_nbq@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

spica-starformation-ism@astro-th.phys.nagoya-u.ac.jp

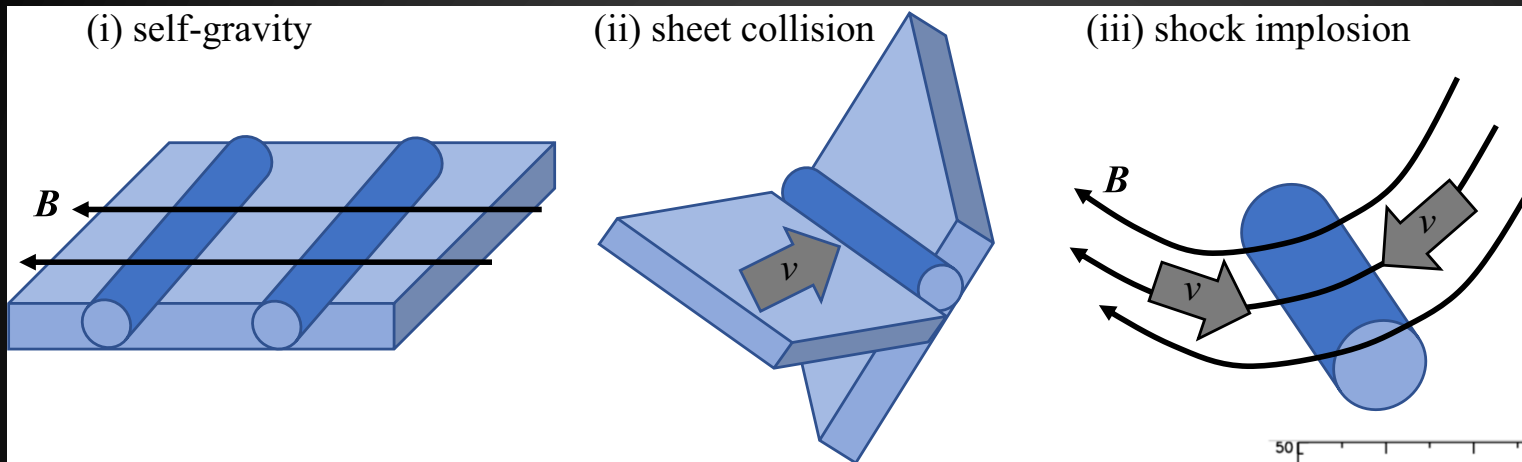
spica-planetformation@googlegroups.com

spica\_planets@eps.sci.titech.ac.jp

↓  
**本講演**

# 星形成・星間媒質のサイエンス： B-BOPによる分子雲フィラメントの磁場測定

分子雲フィラメントの3つの形成シナリオ：



©SPICAサイエンス  
検討会報告書

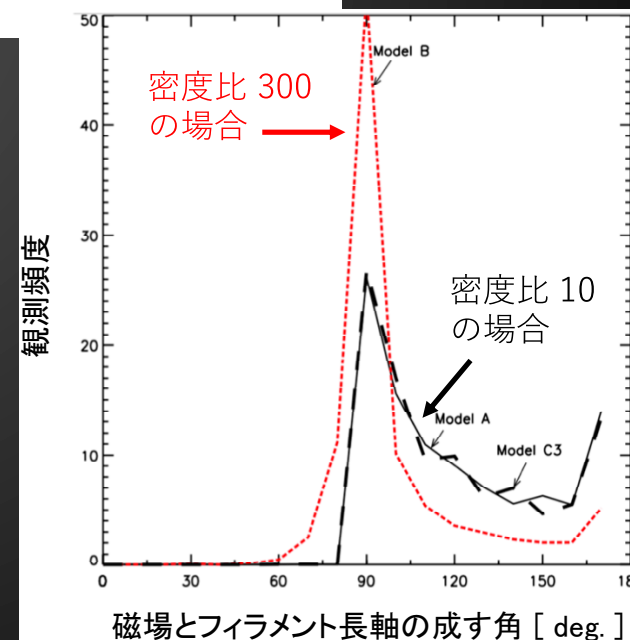
SPICA/B-BOP (遠赤外偏光観測) により形成機構を制限できる可能性がある (Tomisaka 2015):

磁場とフィラメントのなす角の分布関数からフィラメントの表面と中心部の密度比  $r$  が測定可能 (右図)

→  $r$  が小さい場合は, (ii) もしくは (iii) による形成

→  $r$  が大きい場合は, (i) による形成

**フィラメント形成の理解 = 星形成の開始条件の理解**



# B-BOPによる分子雲コアの磁場測定

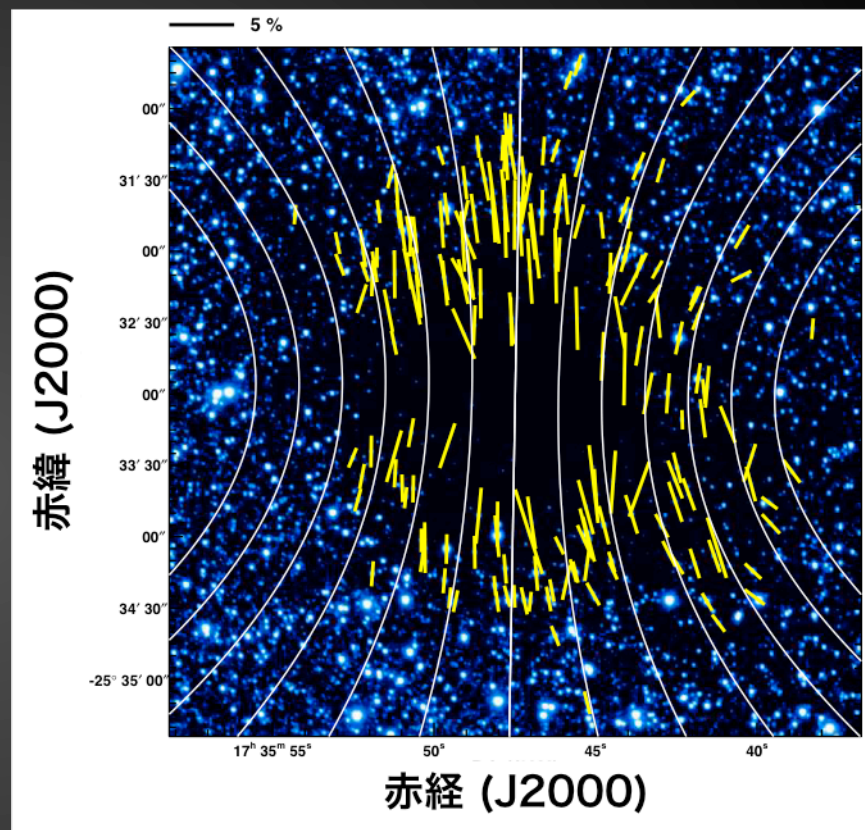
星間物質が重力収縮する際の凍結磁場の湾曲を調べることで、分子雲コアの形成と進化を理解

→ 等方的な収縮の場合砂時計型の磁場構造が形成される(右図)

SPICA/B-BOPでは、その高感度と広視野を生かして、多数の分子雲コアに対して湾曲が顕著な領域( $5 < A_V < 20$ )の磁場強度の大規模なマッピングが可能となる

→ 質量磁束比(の動径分布)

→ 観測される現在の磁場と砂時計モデルを比較することで、分子雲コア形成時の初期条件(半径, 密度, 磁場)を制限可能

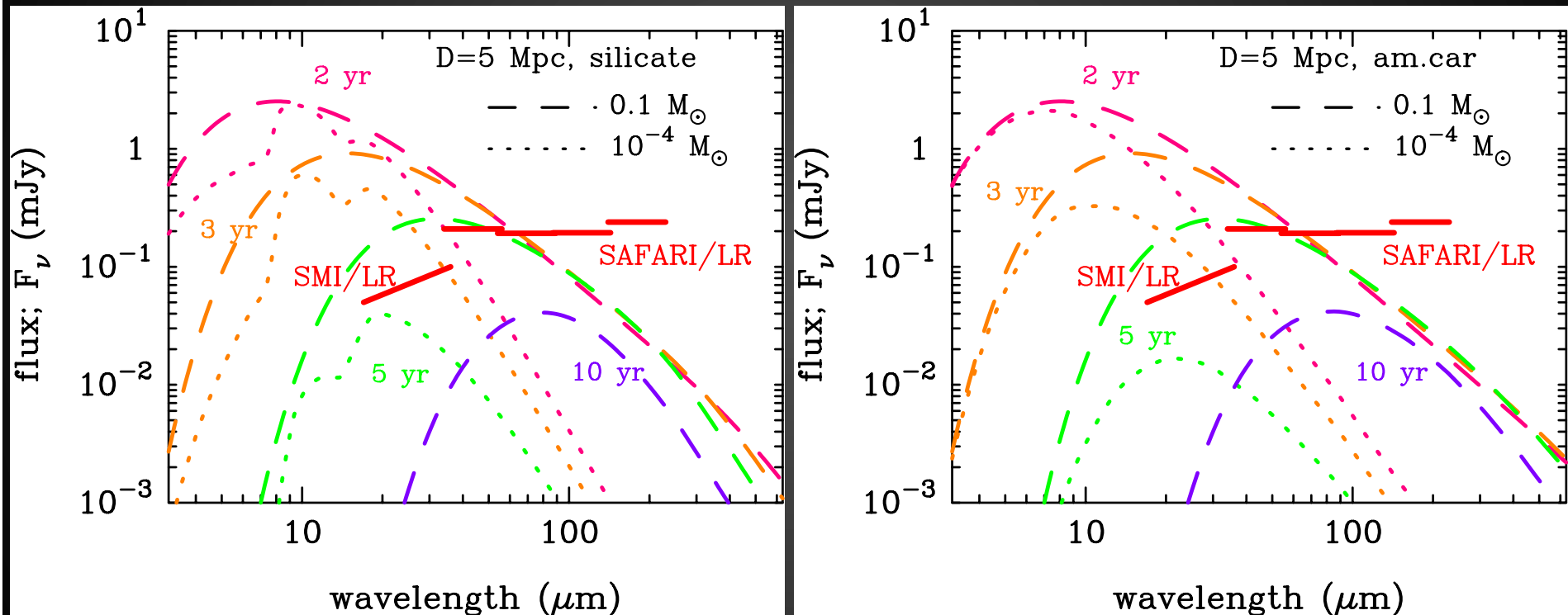


SPICAサイエンス検討会報告書(Kandori et al. 2017)

およそ1500時間のSPICA/B-BOP観測で、 $\sim 500\text{deg}^2$ の領域のサーベイが可能

# 超新星爆発時のダスト形成量の時間 進化・衝撃波によるダスト破壊効率の定量

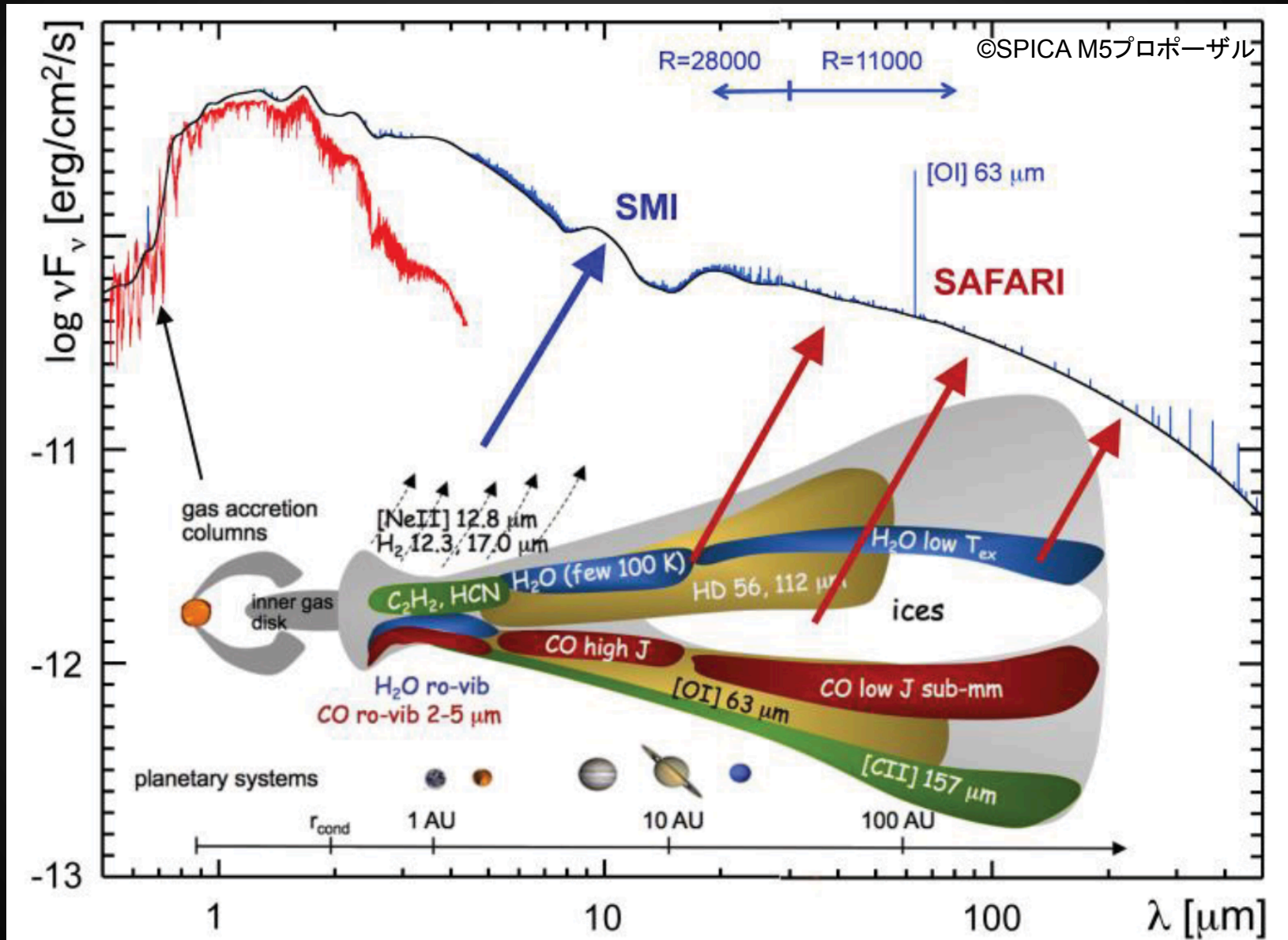
超新星爆発後数年でのダストの形成量は、観測値 ( $10^{-4} M_{\odot}$ ) と理論計算値 ( $0.1 M_{\odot}$ ) で大きな食い違いがある



↑ シリケートダスト(左)・非晶質炭素(右)の異なる経過時間, ダスト質量ごとの放射光スペクトル(講演Z230aを参照)

→ 赤外分光によって様々な天体のダスト放射を観測し, 時間進化を追うことで爆発後のダストの形成時期を制限し, 星間ダストの起源としての超新星の役割を理解

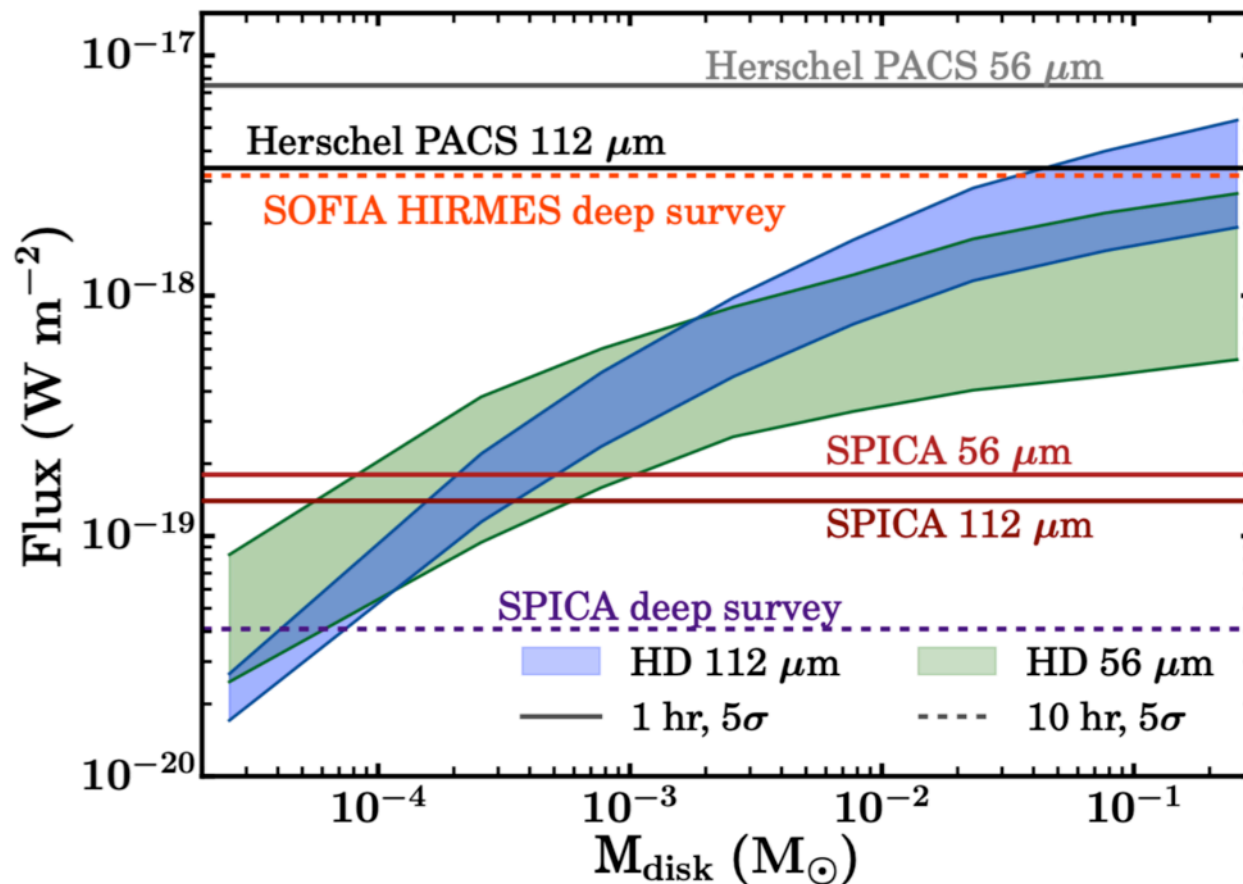
# 惑星形成のサイエンス





# HD・H<sub>2</sub>輝線による原始惑星系円盤のガス 定量: ガス分布の進化, 散逸機構の解明

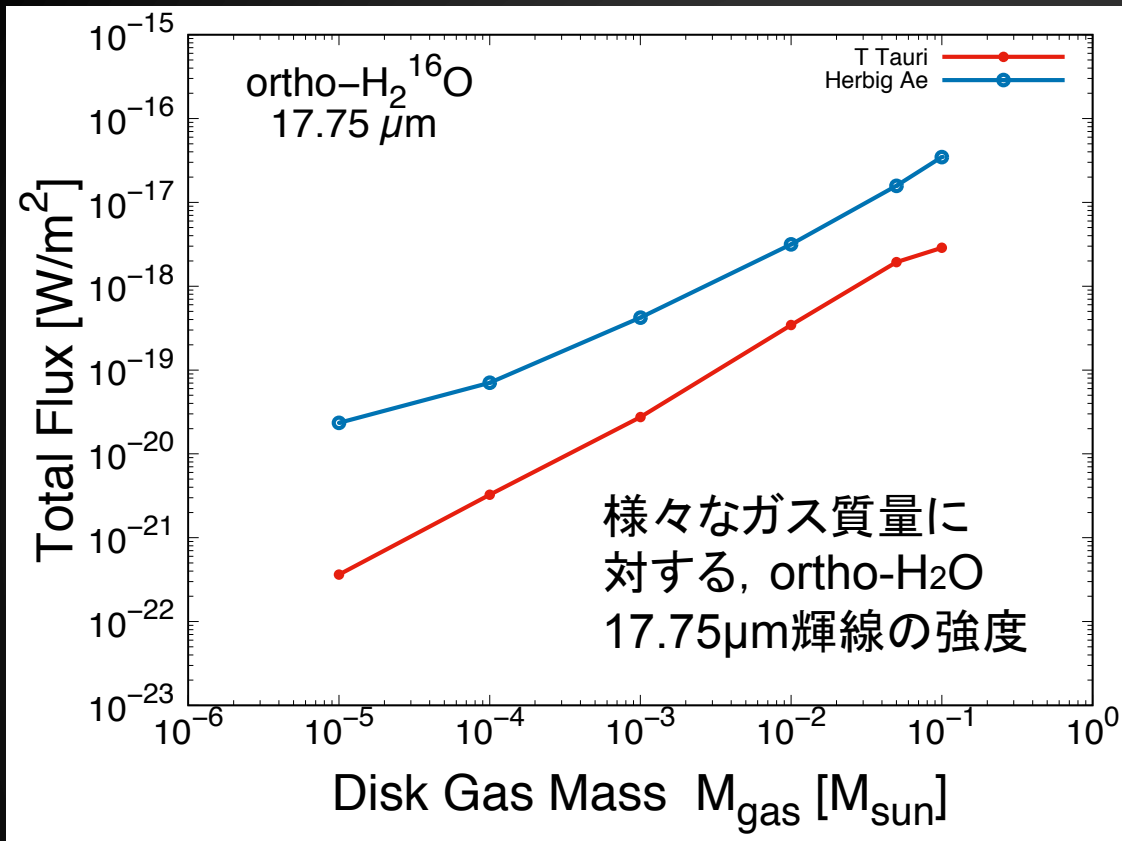
赤外域のH<sub>2</sub>, HD輝線から直接原始惑星系円盤中のガス質量を見積もる  
→ これまではダストやCO等の観測による間接的なガス定量が主流だったが、  
これらの量の相関に不定性があった



HD輝線: SAFARIによる観測→光学的に厚い円盤の観測

H<sub>2</sub>輝線: SMI-HRSによる観測→光学的に薄くなった散逸期の円盤の観測

# H<sub>2</sub>Oスノーラインの探査



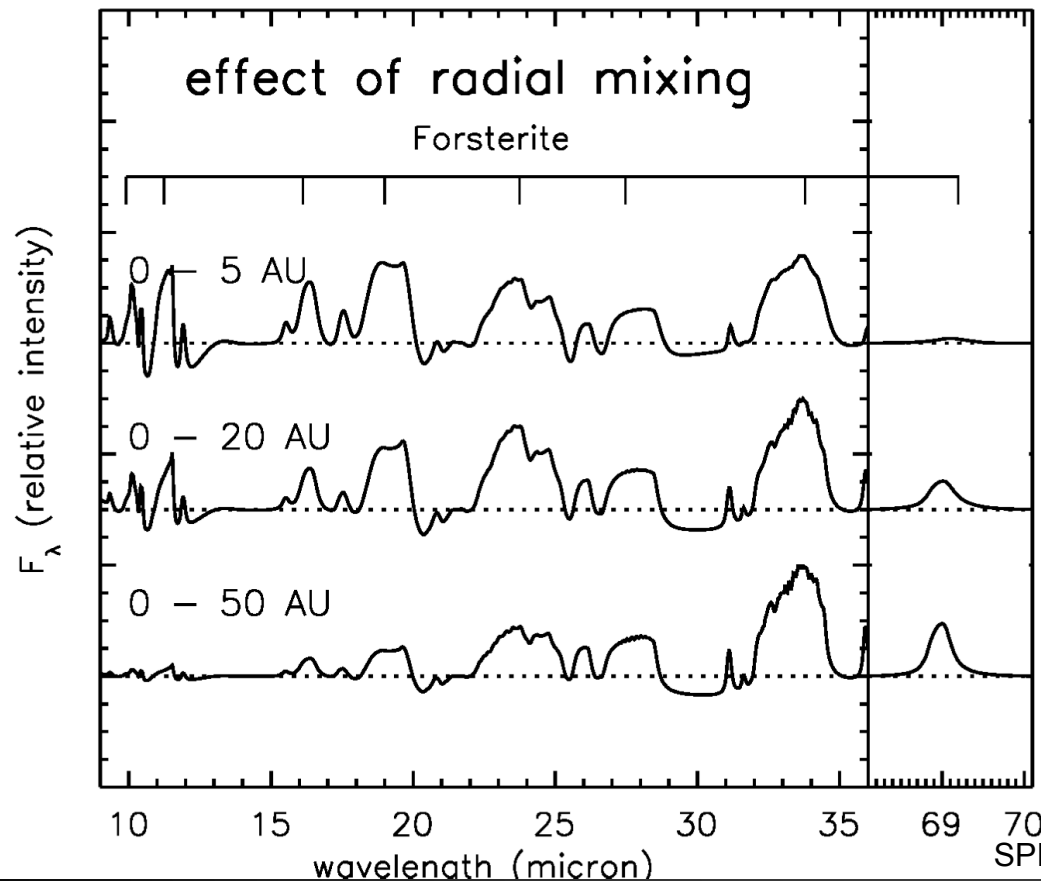
SPICAサイエンス検討会報告書 (Z225b, Z226b参照)

様々な構造, 年齢の円盤に対してSMI-HRS観測を実施し, H<sub>2</sub>O 17.75μm輝線のプロファイルの解析からスノーラインを同定

→ スノーラインの進化を理解し, 微惑星・惑星形成過程や地球の水の起源を探る

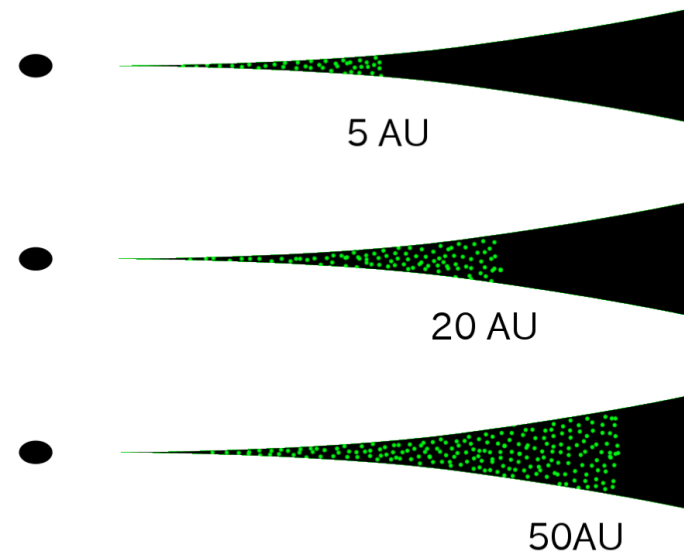
- これまでSpitzer等で検出されてきたH<sub>2</sub>O輝線は円盤表層の高温部または, 円盤外縁低温部由来で, スノーライン付近に由来するH<sub>2</sub>O輝線は検出されていない
- SPICA/SMIでカバーされるortho-H<sub>2</sub>O 17.75μm輝線はスノーラインの同定に適している (Notsu et al. 2016, 2018)

# 円盤鉱物学



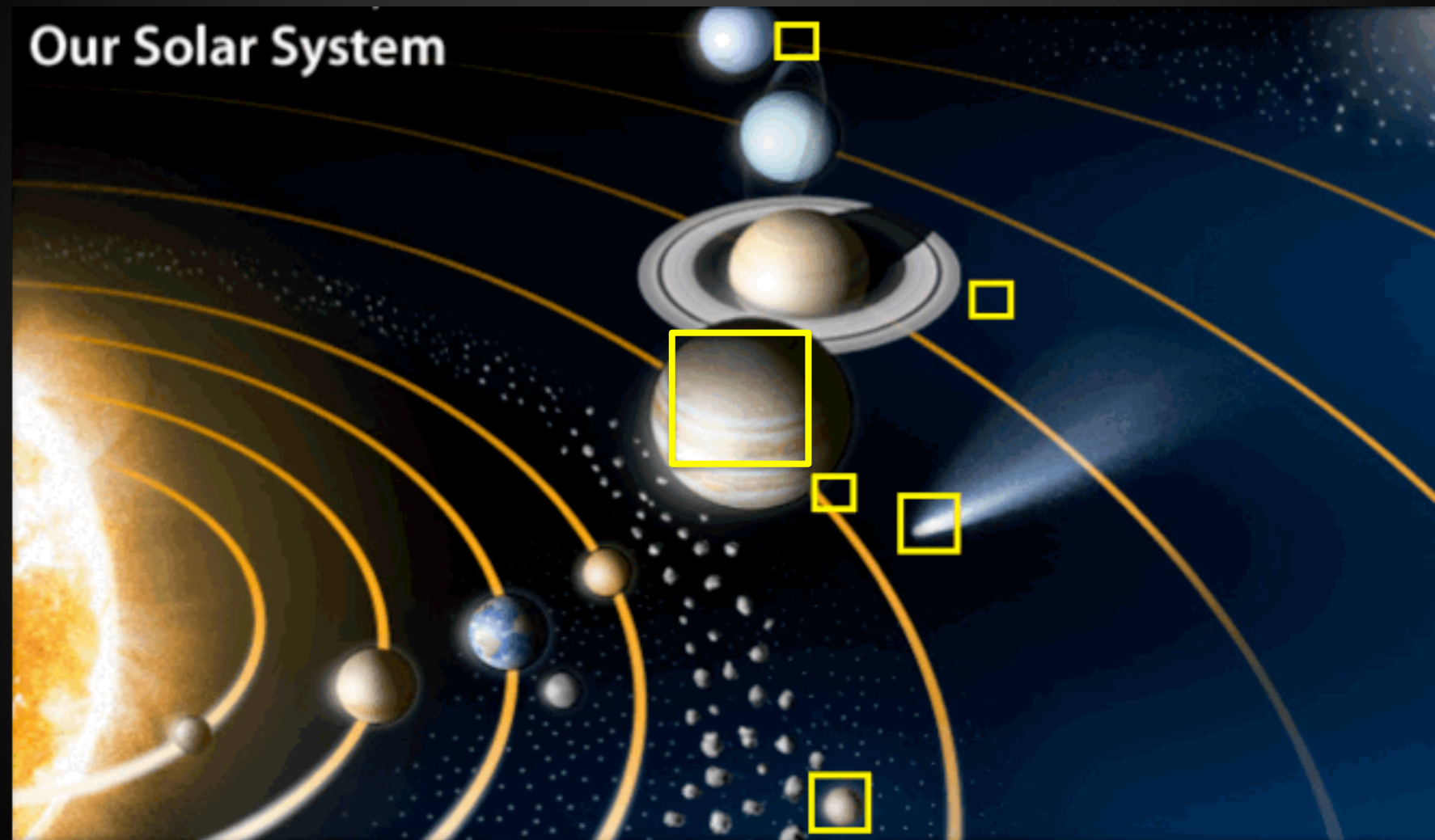
SPICAサイエンス検討会報告書(Maaskant et al. 2015を改変)

## RADIAL MIXING



原始惑星系円盤で観測されている結晶質シリケートは高温の内側領域で生成され、外側に運ばれたと考えられている  
様々なタイプの円盤に対して結晶質シリケートのfeatureを調べることで、円盤内での物質輸送の普遍性を理解できる→上の図はフォルステライトの伝搬状況ごとの赤外線フラックスの比較(69 $\mu$ m付近のピークが変化)

# 太陽系觀測

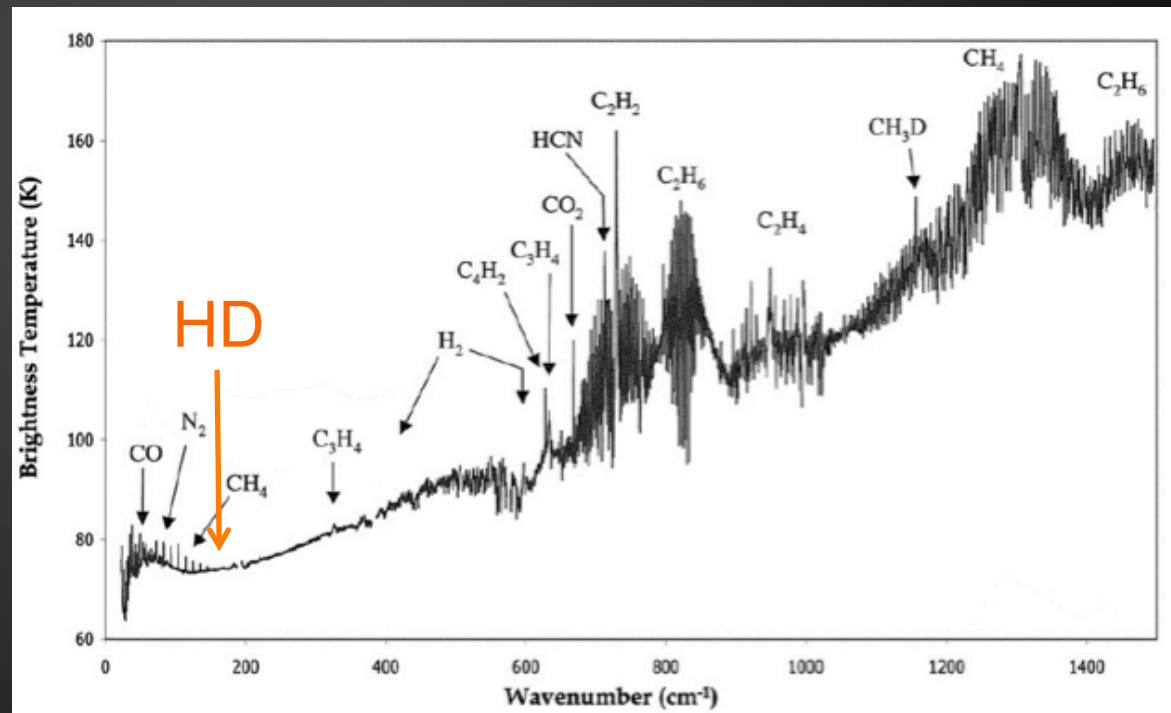


# 太陽系天体の同位体比の包括的観測

- 太陽系天体に存在する各元素の同位体比は太陽系形成時の環境・起源を反映していると考えられる
- 特にD/H比は、太陽系の様々な天体に対して高精度に測定することで地球の水の起源や太陽系の形成環境に対する包括的な理解が得られる (SPICA/SAFARIでカバーされる $56\mu\text{m}$ 付近には、HDのライン(回転)が存在)

観測対象:

- ✓ 惑星
  - ✓ 衛星
  - ✓ 彗星
  - ✓ トロヤ群
- etc



↑ タイタンの赤外線スペクトル(Cassini; Coustenis+ 2007 )

# C<sub>2</sub>H<sub>x</sub>系ガスの探査

- 太陽系天体におけるC<sub>2</sub>H<sub>2</sub>やC<sub>2</sub>H<sub>6</sub>等のガスの組成比を精密に測定することで、太陽系のものとなった分子雲・原始惑星系円盤の化学進化を制限可能
- SPICA/SMI-HRでカバーされる10-20 $\mu$ m帯に、多数の炭化水素のライン
- タイタン等の衛星では大気を定期的に観測する(=時間変化を追う)ことで、hydrocarbonの空間分布がどのように季節変化するのかが把握できる

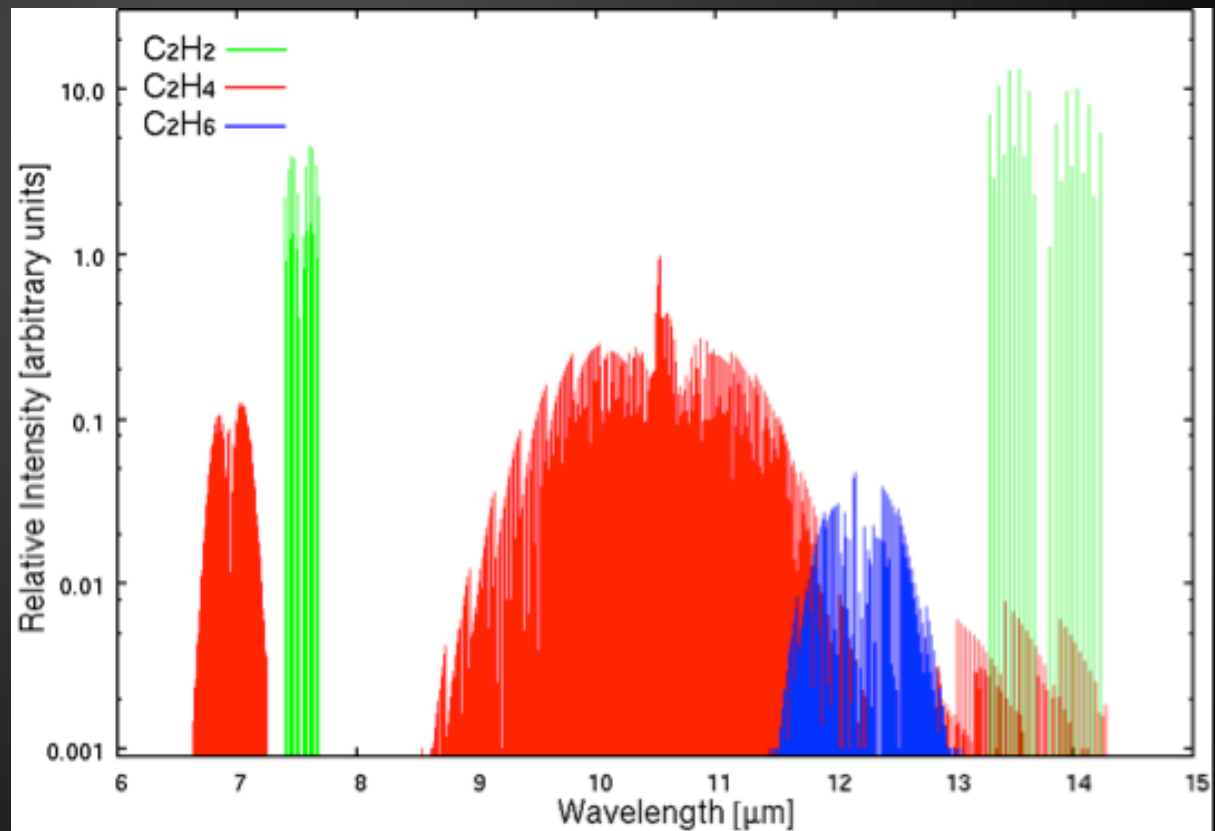
観測対象:

✓ 彗星 (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>は未検出)

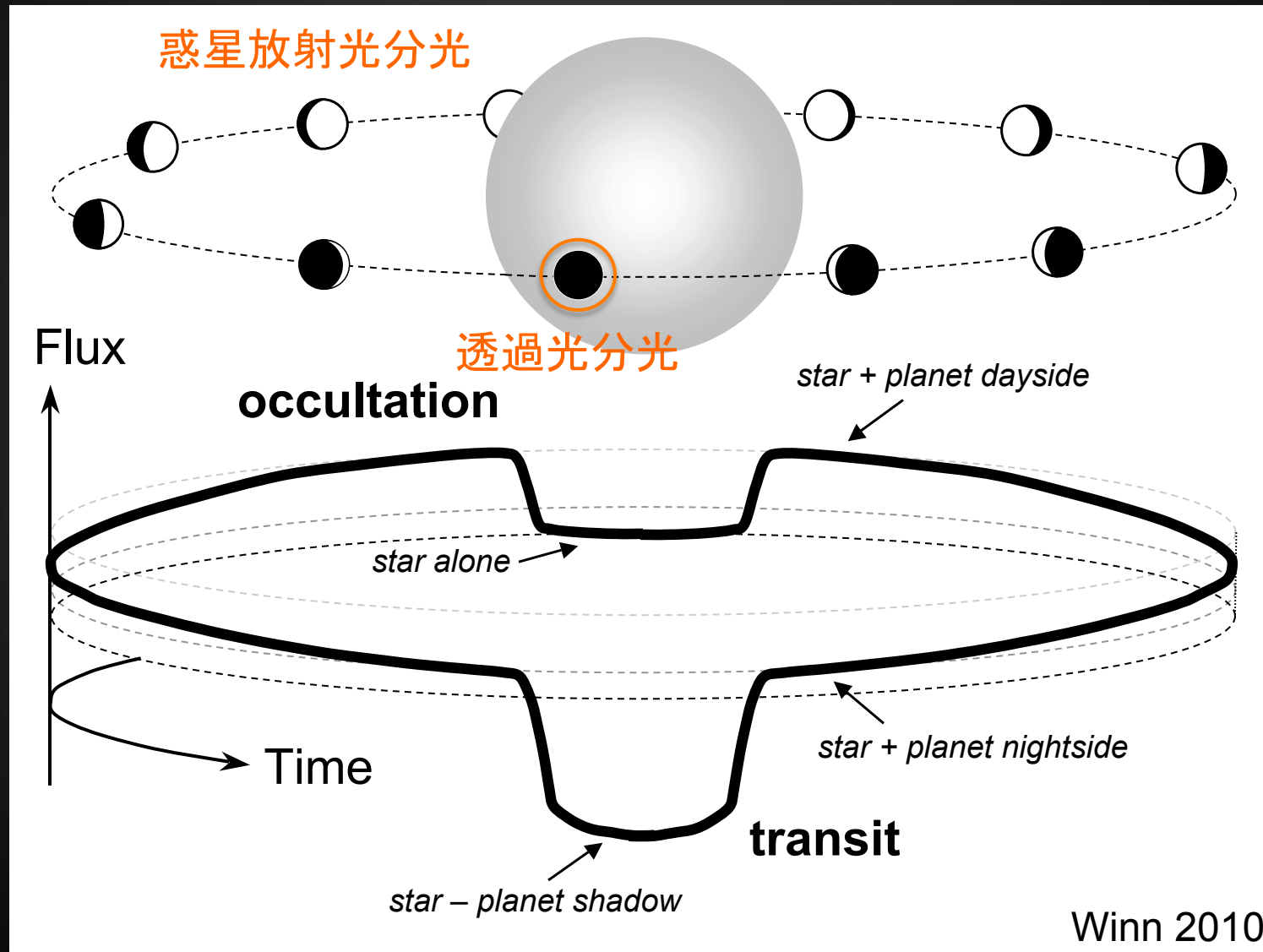
✓ 衛星

✓ トロヤ群

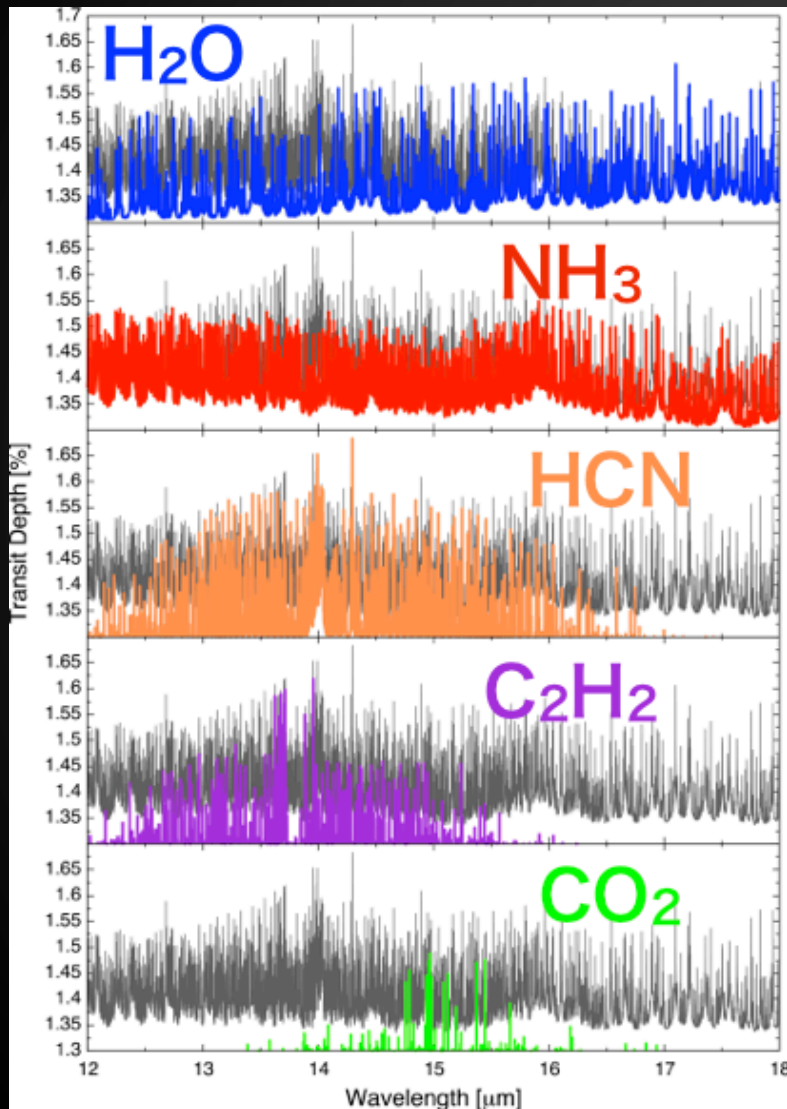
etc



# 系外惑星觀測

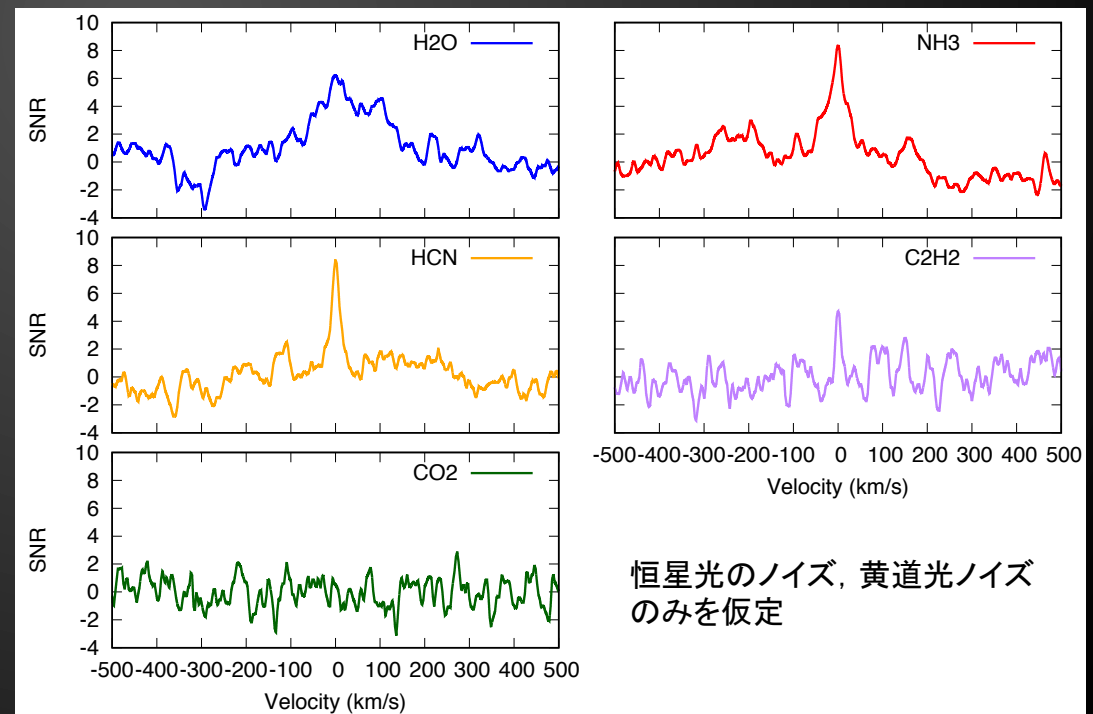


# 透過分光観測による系外惑星大気の探査: 大気組成の制限に基づく、惑星の形成進化史の解明



← GJ 1214bのトランジットの深さの波長依存性 (Kawashima & Ikoma 2018をもとに作成): SMIでカバーされる領域には多くの分子のバンドが存在

↓ 10回のトランジット観測を仮定した場合の検出可能性のシミュレーション (GJ1214b)。CO<sub>2</sub>を除く多くの分子を検出可能





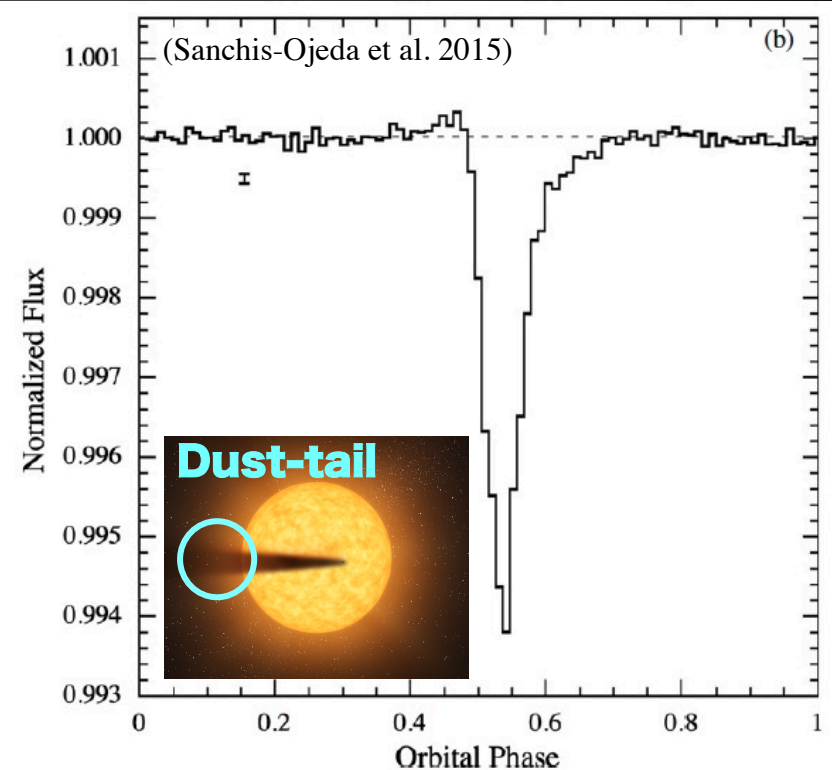
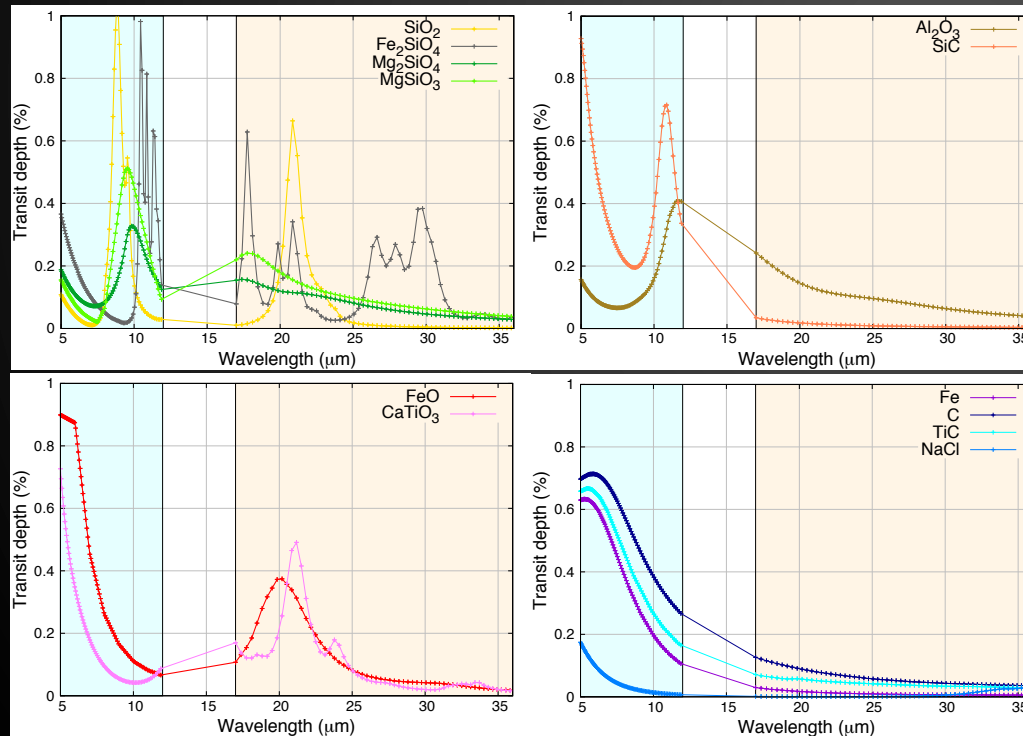
# “蒸発惑星”のダストテイルの観測

- 蒸発惑星とは周期1日以下で公転する超短周期惑星のうち、惑星コアを構成する岩石成分が蒸発してダストのテイルを形成している惑星のこと → e.g., K2-22b
- 蒸発惑星のダストテイルに対し透過分光観測を実施することで、ダストテイルの岩石成分を直接制限することが可能 → 惑星コアの組成を直接制限できる極めて貴重な機会

→ 詳しくは、Z222a(奥谷)を参照

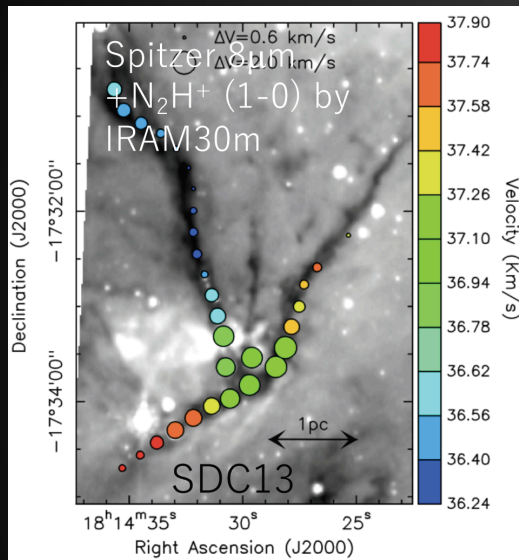
**K2-22b:**  $P = 9.15$  hr,  
 $a = 0.009$  au ( $\sim 3.3 R_*$ )  
 $T \sim 1700$ K

JWST/MIRI SPICA/SMI JWST/MIRI SPICA/SMI

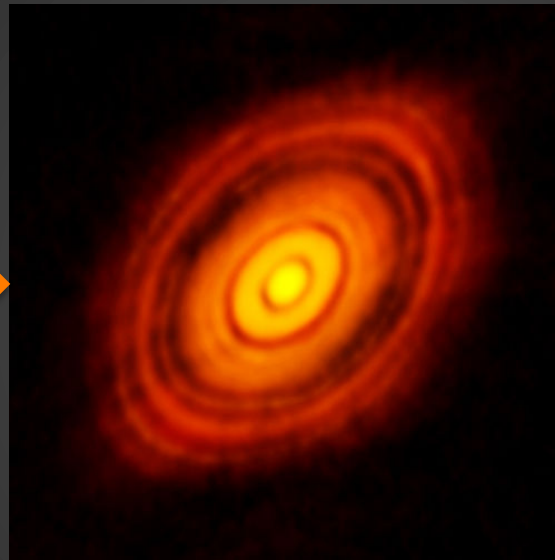


# まとめ

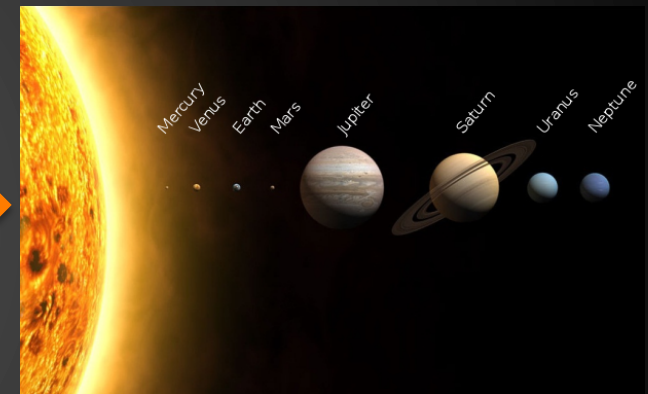
SPICAは、分子雲から惑星系までの進化を、それらの主要な構成要素であるガス・ダスト分子の観測を通して詳細に明らかにする



分子雲フィラメント



原始惑星系円盤



惑星系

SPICAの特徴(赤外域での超高感度, 高い波長分解能, 偏光モード)はこうした天体に対して極めてユニークな観測を可能にする(多くは他の望遠鏡では不可能)