

SPICAで探る^{*1} 惑星形成過程の物質進化



本田



野村



野津

本田 充彦¹・野村 英子²・野津 翔太³ SPICAサイエンス検討会・惑星形成班

〈¹ 岡山理科大学生物地球学部 〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町 1-1〉

〈² 国立天文台科学研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈³ 理化学研究所坂井星・惑星形成研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: ¹ hondamt1977@gmail.com, ² hideko.nomura@nao.ac.jp, ³ shota.notsu@riken.jp

SPICAのカバーする中間-遠赤外線帯域は、分子の振動回転遷移輝線や、固体物質のfeature（分光的特徴）が存在し、宇宙の物質進化研究において欠かせない波長帯である。SPICAの超高感度観測は、惑星形成過程を通じて、その材料物質であるガス・ダストの進化過程の観測的理解を新たな段階に導くと期待される。本稿ではSPICAサイエンス検討会・惑星形成班での検討内容を踏まえ、SPICAを用いた惑星形成分野の多様なサイエンスケースの中から、原始惑星系円盤の水輝線・水氷・宇宙鉱物学・HD輝線観測の話題などを中心に、その概要を紹介する。

1. はじめに

著者の一人である本田がSPICAのサイエンス検討に関わったのは2003年ごろからと記憶している。当時は大学院生でSPICAの意義も十分理解できておらず、ましてやその後の「あかり」、Spitzer, Herschel等々の衛星の成果を予測することも困難であった。しかしながら、遠赤外線では観測できないH₂O氷の44 μm featureや、地球のマンタル物質であるカンラン石の69 μm featureの重要性は当初から認識していた[1]。20年近く経った今もそのユニークさは変わっていない

ことから、SPICA計画の先見性を再確認しつつある。さらに、20年の歳月は、H₂Oガス輝線によるスノーライン探査の可能性やHD輝線による正確なガス定量という、SPICAのもたらすサイエンスに新しい重要な視点を我々に気づかせてくれた。

本稿では2019年から始動したSPICAサイエンス検討会・惑星形成班（班員構成は表1を参照）での検討内容も踏まえ、まず2章ではこれまでの惑星形成分野の研究の進展を振り返った上で、SPICA赤外線観測による物質進化研究の重要性と方向性を述べる。その後3章から6章では、検討会で議論された多様なサイエンスケース（図1

*¹ 本記事の投稿後、ESA側のコスト超過が明らかになり、計画の見直しが検討されたが、最終的にESA Cosmic Vision M5選抜に向けた検討を打ち切るという判断が、10月にESA, JAXA, 提案機関であるオランダSRONで合意された。しかし本記事の内容は、この分野におけるスペース中間・遠赤外線観測のサイエンスを検討した結果を示すものとして価値があると考え、掲載することを決めたものである。

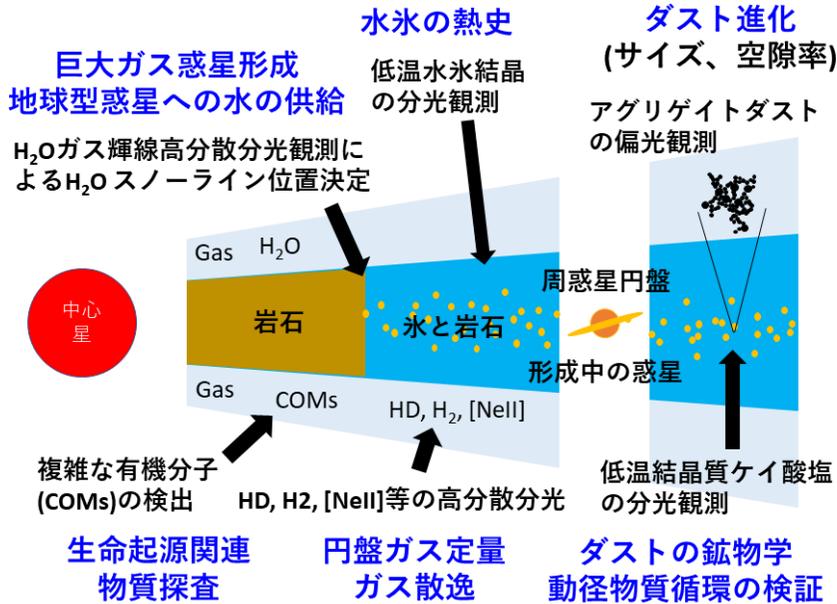


図1 惑星形成班の検討したSPICAサイエンスの概要.

表1 惑星形成班の班員構成.

氏名	所属 (2019年の班発足時のもの)
本田 充彦	岡山理科大学
野村 英子	国立天文台
野津 翔太	ライデン大学/日本学術振興会
相川 祐理	東京大学
荒川 創太	東京工業大学
石原 大助	宇宙科学研究所
小林 浩	名古屋大学
田崎 亮	東北大学/日本学術振興会
橘 省吾	東京大学
茅原 弘毅	大阪産業大学
中川 貴雄	宇宙科学研究所
藤井 悠里	名古屋大学
藤原 英明	国立天文台
松本 侑士	ASIAA
武藤 恭之	工学院大学
百瀬 宗武	茨城大学
森 昇志	東京大学

参照)の中からいくつか代表的なものを簡単に紹介する. 紙面の都合上本稿で紹介しきれなかったサイエンスケースの詳細については, サイエンス検討会最終報告書をぜひ参照されたい.

2. 研究背景

惑星形成分野は, この数十年で理論的・観測的にも最も理解が進んだ分野の一つと言っても過言ではないだろう. 観測的には主に1980年代以降, 惑星形成現場である原始惑星系円盤の発見や, 惑星材料物質の残骸円盤(デブリ円盤)の発見が赤外線や電波観測からもたらされた[2]. その後1995年の初検出に続く多種多様な太陽系外惑星の発見ラッシュにより, 惑星系の普遍性・多様性を人類が知ることとなった. また2000年代に入ると, 原始惑星系円盤の詳細観測がすばる望遠鏡を含む口径8 m級の光・赤外線望遠鏡により進んだ[3]. さらに2010年代にはアルマ望遠鏡のミリ波・サブミリ波での高解像度観測により, リング構造などの様々な構造が検出され, 従来考えられていた「軸対称で滑らかな円盤」とはかけ離れた円盤の描像が示されつつあるほか, COや有機分子の輝線の観測を通じ円盤化学進化の理解も進みつつある[4, 5]. 理論的にもこれらの観測結果を踏まえ, 1980年代に構築された太陽系形成論[6]に基づく

理論モデルを発展させ、最新の系外惑星や円盤観測の結果も取り入れ、それらを統一的に理解する汎惑星系形成モデルの構築も進められつつある。

そのような状況の中で、「惑星はどのようにできたのか」という一般的な問いは深化し、「太陽系は一般的か」や「地球型惑星にはどのように水がもたらされたのか」、「生命を宿す水惑星の物質的多様性はどのようにもたらされたか」といった新たな問いが投げかけられている。これらの問いに答えるためには、SPICAによる中間赤外線・遠赤外線観測が欠かせない。というのも、中間赤外線・遠赤外線帯には物質化学的情報をもたらすと期待される様々な分子の振動回転遷移輝線や、水氷やシリケートといった固体物質の格子振動に由来した分光的特徴(feature)が豊富に存在するからである。SPICAの観測を通じ、惑星の材料であるガスとダストそれぞれに深い知見を与え、惑星形成過程の豊富な物質進化の理解を深めることが期待される。これらは、系外惑星系や太陽系の様々な特徴を、形成から現在の姿まで統一的に理解する上でも重要である。

次章以降では、SPICAを用いた惑星形成分野のサイエンスケース(図1参照)の中から、原始惑星系円盤の水輝線・水氷・宇宙鉱物学・HD輝線観測の話題について、その概要を紹介する。いずれもSPICAの圧倒的な感度・高波長分解能が生かされ、かつその多くはTMTやALMAといった他波長帯かつ地上望遠鏡の観測では実現が困難なサイエンスである。

3. 水輝線高分散分光観測で迫る原始惑星系円盤のH₂Oスノーライン

原始惑星系円盤内部において、中心星近傍は中心星からの光で高温となりH₂O分子は円盤中に漂うダスト表面から脱離して気体となる。一方遠方では光が弱く低温となり、H₂O分子はダスト表面に凍結する。(なお後で述べるように、円盤内縁では質量降着による加熱も重要である。)この境界

のことをH₂Oスノーラインと呼ぶ[6](図1も参照)。太陽系形成論では2.7天文単位の位置とされ、これは現在の太陽系では火星と木星の間に存在する小惑星帯の位置に相当する。H₂Oスノーラインの内側では、惑星の材料であるダストが主に岩石(シリケート)から構成されるため、地球型の岩石惑星が形成すると考えられている。一方外側ではダスト粒子が氷を纏うことで固体物質総量が増加し、さらに岩石ダスト粒子に比べ破壊されにくくなるため、氷惑星やガス惑星の固体コアを形成すると考えられている。最近の研究ではH₂Oスノーライン付近にダストが濃集することで、局所的に微惑星・惑星が形成されたと考えるモデルなども提案されている。このH₂Oスノーライン外側で形成される氷微惑星や彗星は、地球型惑星の水・有機物の起源との説もある。また理論計算に基づく、中心星や円盤の物理構造の進化と共にスノー

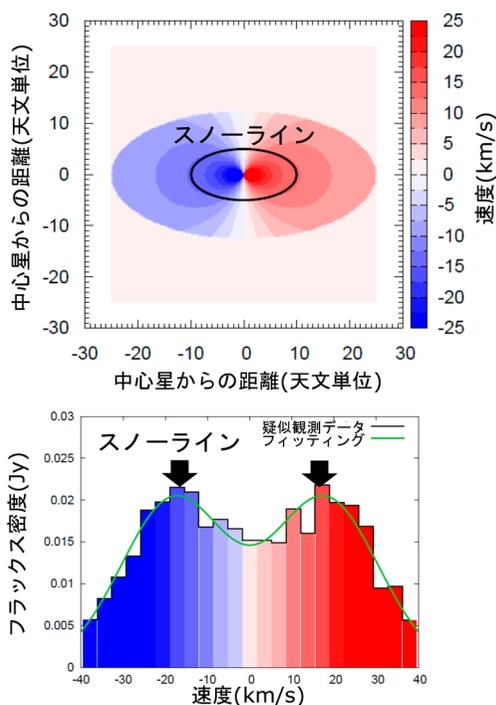


図2 SPICAの高分散分光観測で円盤回転をトレースすることにより、スノーラインの位置を同定する。

ラインの位置も変化する [7]. よって惑星形成段階で H_2O スノーラインの位置やその進化を知ることは、微惑星・惑星形成過程や地球上の水の起源を解明する上で不可欠である.

一方でこれまで多くの惑星形成の理論研究で、円盤の温度モデルから H_2O スノーラインの位置が計算されてきたが、依然として不定性が大きい. 古典的な円盤モデルでは、円盤内の乱流が円盤降着を駆動し、降着時に発生したエネルギーが円盤ガスを効率よく加熱する. 一方で近年の磁気流体数値計算により、乱流源として期待されていた磁気回転不安定は十分に発達せず、円盤は層流であることが示された. そのような層流円盤では降着加熱が非効率であり、古典的な乱流円盤に比べて H_2O スノーラインの位置は大きく異なると考えられる [8]. このように H_2O スノーライン位置は円盤内側領域の降着機構をも反映しており、 H_2O スノーラインの位置を知ることで円盤の加熱機構や円盤進化の駆動機構が明らかになると期待できる.

H_2O スノーライン位置の観測的な同定を目指す際、まずは H_2O ガスや氷の直接空間分解観測が考えられる. しかし円盤において、 H_2O スノーラインの位置は中心星から数~十天文単位 [7] であり、これを直接空間分解するには高い空間分解能が要求され、簡単ではないのが現状である.

一方で円盤はほぼケプラー回転しているため、円盤から放射される輝線はドップラーシフトを受け広がっている. この輝線の速度プロファイルを高分散分光観測により取得し解析することで、輝線放射領域の中心星からの距離の情報を得ることが期待される (図2参照). 近年、Spitzer (中間赤外線)・Herschel (遠赤外線) 宇宙望遠鏡などを用いて、円盤から放射される水輝線が検出されている [9]. しかし、これらの輝線は主に円盤表層の高温部や H_2O スノーライン外側の円盤外縁低温部に存在する H_2O ガスから放射されたものであり、円盤赤道面の H_2O スノーライン位置を観測から直接同定するには至っていない.

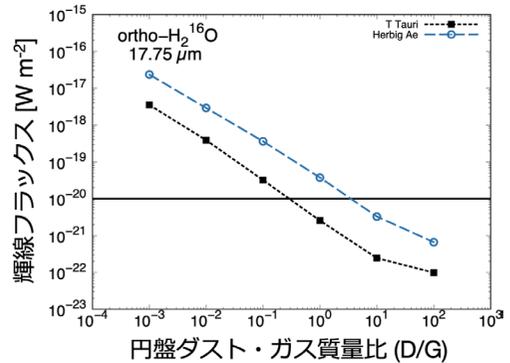


図3 円盤ダスト・ガス質量比 (D/G) を様々に変えた場合の、ortho- H_2^{16}O 17.75 μm 輝線のフラックスの変化. 黒色点線がT Tauri星, 青色破線がHerbig Ae星の場合を表す. (野津らのモデル計算結果に基づく.) なお、SPICA/SMIのHRSの検出感度は5 σ , 1時間積分の場合、 $10^{-20} \text{ W m}^{-2}$ 程度 (図中黒色実線).

そんな中最近、本稿の著者の一人である野津らの研究 [10-12] により、アインシュタインの放射A係数が小さく、励起温度が比較的高い水輝線が高分散分光観測を通じた円盤赤道面の H_2O スノーラインの位置同定に適していること、さらにこれらの特徴を持つ水輝線がSPICA (SMI, SAFARI) の波長帯に多数存在することが示された. そこでこれらの研究成果に基づき、SPICAでは中間赤外線水輝線の高分散分光観測を行い、得られた円盤赤道面内縁から放射される水輝線のプロファイルの解析を通じ、 H_2O スノーラインの位置を同定することを目指す.

想定される観測計画としては、まずSMIの高分散分光観測装置HRS (波長分解能 $R \sim 29,000$) を用い、ortho- H_2^{16}O 17.75 μm 輝線など H_2O スノーライン同定に適した輝線の観測を多数の円盤に対して行い、得られた輝線プロファイルの解析から赤道面の H_2O スノーライン位置を導出する. またSAFARIのHR ($\lambda \lesssim 40 \mu\text{m}$ で $R \sim 10,000$, 長波長側で波長分解能が落ち、 $\lambda > 100 \mu\text{m}$ で $R < 4,000$) の観測を通じて、 H_2O スノーライン同定に適した多数の水輝線 (ortho- H_2^{16}O 37.98 μm

輝線など)の放射の検出が期待される。SAFARIの波長分解能は H_2O スノーラインの詳細位置決定には不十分であるが、輝線の線幅から H_2O スノーライン位置に制限をつけたり、輝線の強度比から円盤の温度構造に制限をかけたりなど、SMIの観測結果と合わせ円盤物理構造に制限を加える事が期待できる。なお、これらの水輝線は比較的強度が小さく、過去のSpitzerによる観測では感度が足りず検出できていなかった。

ここで、野津らは[13, 14]の円盤モデル計算を応用し、円盤ガス質量、ダスト・ガス質量比、中心星光度、ダストサイズ分布など物理構造を様々に変えた円盤モデルのもとでSPICAの観測可能性の詳細検討を行っている。その結果、近傍(140 pc程度)の天体については幅広い物理構造・年齢の天体においてこれらの水輝線の検出・ H_2O スノーライン位置決定が可能であると分かった(図3参照)。

最終的にはSPICAを用いて様々な物理構造・年齢の天体に対して水輝線の観測を行い、 H_2O スノーラインの位置を決定する。また得られた結果を理論研究の結果と比較することにより、 H_2O スノーライン位置の時間進化過程を観測的に解き明かし、円盤進化と惑星形成過程に強い制限を加える。

なお、 H_2O スノーライン同定に適した水輝線はサブミリ波帯にも存在し、ALMAを用いた観測もここ数年試みられている[15]。しかし輝線強度に対する感度の不足から、ALMAでは近傍の明るいHerbig Ae星や年齢がより若い(Class I)星など、あくまで一部の限られた天体の観測が期待されるのみである[11]。それに対してSPICAではその高感度を生かし、T Tauri星など中心星質量が太陽程度以下の天体も含めて、様々な年齢・円盤物理構造の天体に対して H_2O スノーライン位置のサーベイ観測が可能であると考えられる。

4. 原始惑星系円盤の水氷の熱史解明

前章では原始惑星系円盤での水蒸気の分布を探ったが、SPICAでは水氷に関しても大きな貢献ができる。円盤では水は氷として低温領域に大量に存在していると考えられている。惑星形成過程において水の氷の重要性は多く指摘されている(H_2O スノーライン以遠での巨大ガス惑星形成、水氷によるダスト合体集積の促進、地球型惑星への水の供給など、3章も参照)。しかし惑星形成現場である原始惑星系円盤における水氷の存在量や分布については、観測の情報が不足しているのが現状である。これは、水氷の観測が様々な理由により難しいからである。これまでは近赤外域の $3\mu\text{m}$ 帯のOH振動モードの観測がよく使われてきた。しかしながら、波長 $3\mu\text{m}$ のfeatureを熱放射featureでとらえるには、ダストの温度が高くなる必要があり($\geq 1,000\text{K}$)、そのような温度では水氷は固体ではなく気体になってしまう。よって、水氷の $3\mu\text{m}$ featureは基本的に吸収featureとしてしか観測されないが、その場合は背景光源が必要であり、中心星や円盤内縁高温領域を光源として円盤が自己吸収を起こしうるedge-on円盤での観測が主であった[16]。これに対して、円盤

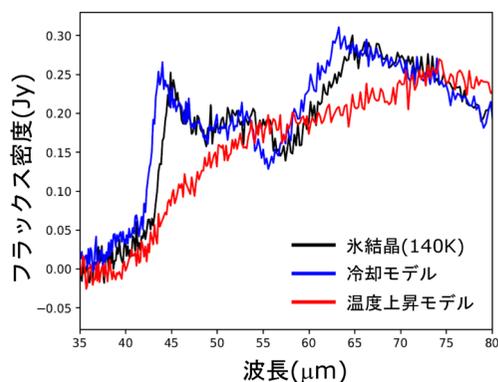


図4 T Tauri星周りの原始惑星系円盤からの遠赤外線スペクトルシミュレーション。スペクトル形状から氷の熱史が分かる。Kamp et al. (2018)[18]を元に作成。

散乱光に刻まれるアルベド効果を用いて、近赤外散乱光で水氷の分布をとらえる試みも行われているが[17]、感度的な問題からまだ数例しか成功しておらず、統計的な議論からは程遠い状況である。

実は、水氷は遠赤外線線の44 μm, 63 μm付近に格子振動モードによる比較的強いfeatureが存在する。これらの波長の光を出す熱放射は十分に低温であるので、遠赤外線線のfeatureは放射featureとして円盤の向きに大きな制限も無く観測されている。しかし、遠赤外44 μm帯は、1990年代のISO以来、SpitzerやHerschelなどの宇宙望遠鏡では観測できなかった、いわば20年以上取りこぼされてきた観測波長帯であり、SPICAにより数十年ぶりにようやく観測可能となる。

では、遠赤外線水氷featureから何が分かるのだろうか？ このfeatureのピーク波長は結晶状態（非晶質／結晶質）に敏感で、それらから水氷

ダストの熱史についての示唆を得ることができると考えられており、それらがそのまま取り込まれたものであれば、円盤の水氷も非晶質であると期待される（図4温度上昇モデルに対応）。しかしながら、原始惑星系円盤では様々な加熱イベントや物質循環が期待されており、それらの効率が高ければ、多くの結晶質水氷が観測されると予想される。最近の原始惑星系円盤からのモデルスペクトル計算[18]に基づく、一旦昇華し再凝集して結晶化した場合（図4冷却モデルに対応）では結晶質水氷が卓越することが示唆されている。このように、SPICA/SAFARIの分光観測から、遠赤外featureを用いて円盤水氷の熱史や存在量を求めることができると考えている（図4参照）。SPICAの圧倒的な高感度により、数百天体以上のT Tauri星に対して高S/Nの遠赤外線スペクトルサーベイを検討している。これにより、円盤に

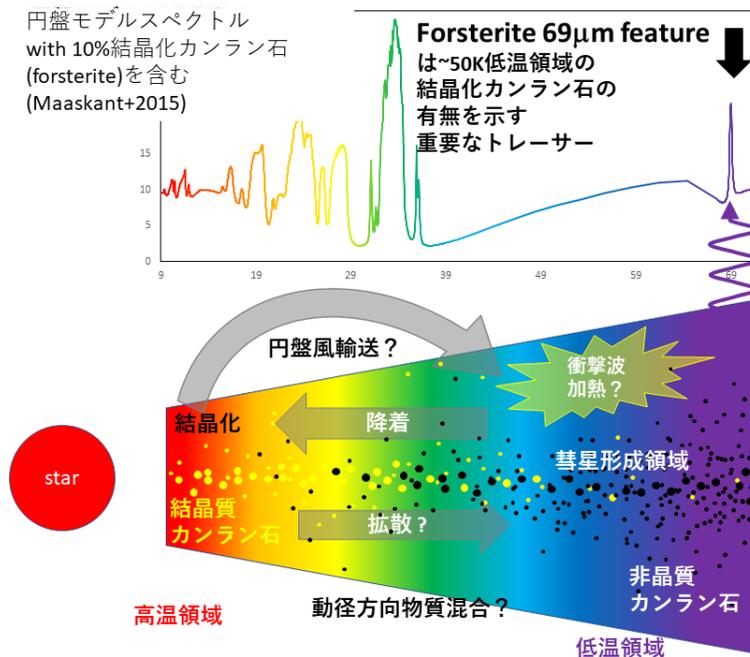


図5 原始惑星系円盤のモデルスペクトルと、円盤低温領域の結晶質カンラン石の起源として提案されている各種プロセス。SPICA遠赤外線分光観測により、forsterite 69 μm featureを観測し、円盤低温領域の結晶質カンラン石の一般性を検証する。

おける水氷の存在量や熱史の無バイアスな統計的議論が初めて可能となる。これらは、惑星への水の供給史を理解する上でも重要な手掛かりとなるだろう。

5. 円盤鉱物学と動径物質循環の一般性検証

地球型惑星は主にケイ酸塩鉱物（シリケート）から成り、宇宙塵の主な成分の一つでもある。星間空間のシリケートは、宇宙線による非晶質化によりほぼ完全に非晶質（アモルファス）なシリケートであることが分かっている [19]。一方で我々の太陽系の彗星塵には結晶質シリケートのカンラン石（olivine; $Mg_xFe_{2-x}SiO_4$; 地球マントルの主要物質）が含まれていることが1980年代の中間赤外線分光観測から分かっており、スターダスト計画による彗星塵のサンプルリターンからも確認されているが [20]、この起源が謎とされてきた。というのは、始原物質である星間空間のシリケートが非晶質なのであれば、それが結晶化する必要があるが、それには約1,000 K以上もの高温過程を経なければならないからである。太陽系において彗星が形成された領域は $T \sim 50$ K もの低温領域であり、だからこそ彗星は様々な揮発性物質の水（e.g. H_2O , CO_2 , CO ）を含む。高温起源物質である結晶質シリケートと、（極）低温の揮発性氷の彗星における奇妙な同居は、原始太陽系星雲において高温領域の物質と低温領域の物質が何らかの形で混合したことを強く示唆する。そこで、理論的に高温領域から低温領域までの動径方向の物質輸送・混合をもたらす様々なプロセスが提唱された（図5参照）。例えば、内側から外側への何らかのプロセスによる拡散や、アウトフローや円盤風などによる外側への輸送、また、そもそも低温

領域での局所的な衝撃波などによるその場形成説なども提唱されており、混沌としている状況にある。

一方で1990年代-2000年代にかけて赤外線天文衛星 ISO や地上中間赤外線観測によって、我々の太陽系外の原始惑星系円盤に星間空間には見られない結晶質シリケートが存在しているという観測的証拠が多数見つかった [21]。ここで注意しておきたいのは、これらの観測はあくまで原始惑星系円盤の中間赤外線を放射する温かい領域（ $T \sim$ 数100 K程度）に、結晶化シリケートが存在していることが分かっただけであり、彗星ができたような $T \sim 50$ K もの低温領域に結晶質シリケートが存在しているかは、観測的にはまだ自明ではないという点である。 $T \sim 50$ K の熱放射は波長～60 μm 程度にピークを持つため、遠赤外線を用いた観測をする必要がある。さらに幸運なのは、主要な結晶質シリケートのカンラン石は波長69 μm に feature を持つので、この69 μm feature の観測を多くの原始惑星系円盤に対して行えば、惑星形成過程で彗星形成領域に結晶質シリケートが一般的に存在する／伝搬するのかが検証できることになる。つまり太陽系で起きた（と信じられている）ことが一般的かどうかを検証できるのである。

このような観点から遠赤外線観測衛星である Herschel を用いた観測も行われたが [22]、感度的な限界から、まだ統計的に十分な研究はできていない*2。そこで SPICA の出番である。SPICA は Herschel と比べても2桁向上する圧倒的な高感度を生かすことで、数100天体かそれ以上の原始惑星系円盤の高品質な遠赤外線スペクトルを提供できると期待されている。特に T Tauri 型星のサンプルを観測できるので、まさに太陽質量程度の星

*2 実は著者の本田は「あかり」FTSを用いて原始惑星系円盤からの69 μm feature の観測を行ったが、検出には至らなかった。ご協力いただいた関係者にこの紙面を利用してお詫び／感謝するとともに、SPICA でぜひリベンジできればと思う。

の惑星形成における一般性の検証につながり、極めて重要である。これにより、太陽系で起きたと思われる低温領域と高温領域の物質混合が他の惑星系形成過程でも起こり得るかを明らかにすることができる。また、この観測結果から結晶質シリケートの形成と低温領域への外側輸送過程を制約し、原始惑星系円盤での物質循環・混合過程の一般性・普遍性を明らかにすることができると期待している。

また、本稿では紙面の関係から省略したが、これらの鉱物の feature は、そのピーク位置や輝線幅などから、Fe/Mg 比や温度などの情報が推測可能であることが分かっている。カンラン石の Fe/Mg 比からは、ダストが岩石母天体で一度変成を受けた二次的なダストかどうかなどの履歴も推測することができる。このように鉱物の詳細情報を天文観測から得られることから、このような研究を「宇宙鉱物学」と呼ぶこともある。固体物質の分光的特徴は、電波などでは得にくい情報であり赤外線観測が重要になる分野であることを最後に強調しておきたい。

6. HD 輝線観測による円盤ガス質量の統計的研究

SPICA による原始惑星系円盤観測のメインテーマの一つに、HD 輝線観測による円盤ガス質量のより正確な測定による、ガス惑星形成と円盤ガス散逸の理解がある。円盤内のガスは、木星のようなガス惑星の主成分であり、また、円盤ガスが存在すると、重力相互作用により、惑星の軌道が大きく進化することが知られている。したがって、円盤ガス質量を統計的に調べ、円盤ガスがどのくらいの時間尺度で、どのように散逸するかを調べることは、ガス惑星がいつ形成され、またどのように軌道進化したかを理解する上で、非常に重要である。太陽系の木星は、水のスノーラインの外側を公転しているが、太陽系外惑星の中には、木星のような巨大なガス惑星が、太陽系の水星軌道

よりもさらに太陽（恒星）に近い場所を公転するものもある。このようなガス惑星は、木星軌道程度の場所で形成された後、軌道進化の結果、恒星に近づいた可能性が示唆されている。円盤ガス散逸を調べることは、このような系外惑星の多様性の起源を理解する上でも、大いに役立つ。

ここで、円盤ガスの主要成分は水素分子 (H_2) である。よって、水素分子からの放射を観測すれば、円盤ガスの有無が分かる。しかし厄介なことに、水素分子のような等核分子からの放射は非常に弱い。そこで、円盤ガス質量の測定は、従来、放射強度の強い一酸化炭素 (CO) ガスやダスト放射の観測により行われてきた。一般的に、密度の比較的薄い分子雲内では、水素分子と CO やダストは、ほぼ一様に分布しており、CO やダスト放射の観測により、比較的よい精度でガス質量を測定することができる。一方で、原始惑星系円盤は分子雲に比べて密度が非常に高い。そのため、円盤内でダストは衝突合体して成長し、やがて惑星となる。その際、ダストは円盤赤道面に沈殿したり、ガスとの摩擦力により、半径方向に移動する。すなわち円盤内では、水素分子とダストの分布は一様に保たれない。また CO ガスも、円盤外縁赤道面付近の低温高密度領域では、ダストに凍結する。さらに最近の様々な観測により、円盤内

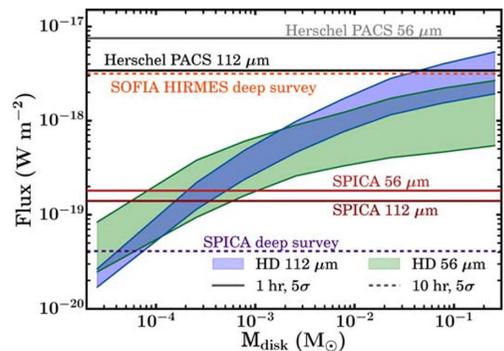


図6 SPICA により HD 放射を高感度観測することで、木星質量以下のガス円盤が検出可能になる [25].

では、低温領域以外でも、水素分子に対するCOの存在比が、分子雲に比べて低いことが示唆されている。さらに円盤表層では、中心星からの強い紫外線によりCO分子が解離する。すなわち、円盤内では水素分子とCOの分布も一様ではない。よって、COやダスト放射の観測による円盤ガス質量の測定は非常に精度が悪く、精度よく円盤ガス質量を測定するには、別のトレーサーが必要となる。

その最有力候補が、HD放射である。HDは水素分子の重水化物である。水素分子とは異なり等核分子ではないので、比較的放射が強い。また、宇宙において、重水素(D)は水素(H)の0.001%程度のみ存在し、円盤内でも水素分子とHDの存在比は一様に保たれる。しかし、COやダストはミリ波・サブミリ波といった波長帯で放射し、地上から観測可能であるのに対し、HDは主に遠赤外線波長帯で放射する。遠赤外線波長帯では、地球大気中の水蒸気が放射を吸収してしまうため、宇宙からの放射は地上で観測できない。したがって、SPICAのような宇宙望遠鏡が必要となる。

SPICA/SAFARIの波長帯は、HD $J=1-0$ 112 μm , $J=2-1$ 56 μm の2本の遷移線を含んでいる。SPICAの1世代前の遠赤外線望遠鏡であるHerschelにより、原始惑星系円盤からHD $J=1-0$ 放射が初検出された[23]。しかしHerschelの感度では、3天体からの検出にとどまり、それらの観測から見積もられた円盤ガス質量は、太陽質量の数%程度であった[24]。SPICAはHerschelに比べ、約100倍感度が高い。モデル計算によると、SPICAの高感度観測により、太陽質量の0.02%程度の円盤からの放射を検出することが可能となる[25]。木星の質量は太陽質量の約0.1%であるから、木星を形成できないくらいガス散逸した円盤を検出できる計算になる(図6)。SPICAにより、様々な物理状態を持つ500~1,000天体の円盤を高感度サーベイ観測することで、ど

のような状態の円盤でガス惑星を形成でき、また、軌道進化が可能か、といった情報を得ることができる。SPICAは高空間分解能の観測は不得意であるが、大型電波干渉計ALMAなどを用いた高空間分解能観測と組み合わせることで、系外惑星の多様性の謎にも迫ることが期待される。

7. まとめに代えて

SPICAがもたらす中間-遠赤外線波長帯におけるHerschelからの2桁の感度改善は、明らかに「違う」世界を我々に見せてくれることは間違いない。惑星形成班によるサイエンス検討では、紹介した内容以外にも以下のテーマの検討を行ったが、紙面の関係で省略させていただいた。詳細については最終報告書の方もぜひご覧いただきたい。

- デブリ円盤の太陽系黄道光雲レベルまでの探査(太陽系の黄道光雲の一般性検証)
- 円盤の遠赤外線偏光観測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)
- 高精度SED観測による形成中の惑星の周惑星円盤からの熱放射検出

さて、どんな将来計画もそうだが、まだSPICAは絵に描いた餅に過ぎない。しかし将来SPICAが実際に観測を始めた時には、物質進化という新たな側面を切り口に、惑星形成分野の理解が格段に進むことが強く期待される。この約20年の紆余曲折の末、より深化したSPICAの意義を再認識しつつ、個人としてはSPICAの実現とその果実を味わうところまで研究者として現役でいたいと思う。本稿でSPICAサイエンスの魅力を十分に伝えきれなかったかもしれないが、百聞は一見に如かずである。実際に日本から、SPICAからすごいデータが出てくれば、世界が変わるであろう。その瞬間を目撃し、すばる望遠鏡やALMAで感じたあの興奮をもう一度味わうことを願っている。

謝 辞

本稿のために図を作成していただいた Pablo Riviere-Marichalar 氏に感謝します。本稿の著者の野津翔太は、日本学術振興会海外特別研究員制度、および理化学研究所基礎科学特別研究員制度の支援を受けています。また、本研究は科学研究費補助金(17H01103, 18H05441)より支援を受けています。

参考文献

- [1] Takami, M., et al., 2010, *Adv. Space Res.*, 45, 1000
- [2] Williams, J. P., & Cieza, L. A., 2011, *ARA&A*, 49, 67
- [3] 橋本淳, 日下部展彦, 2016, *天文月報*, 109, 325
- [4] 相川祐理, 2017, *天文月報*, 110, 247
- [5] 武藤恭之, 2019, *遊星人*, 28, 190
- [6] Hayashi, C., et al., 1985, *Protostars and Planets II* (The University of Arizona Press, Chicago), 1100
- [7] Oka, A., et al., 2011, *ApJ*, 738, 141
- [8] Mori, S., et al., 2019, *ApJ*, 872, 98
- [9] van Dishoeck, E. F., et al., 2014, *Protostars and Planets VI* (The University of Arizona Press, Chicago), 835
- [10] Notsu, S., et al., 2017, *ApJ*, 836, 118
- [11] Notsu, S., et al., 2018, *ApJ*, 855, 62
- [12] 野津翔太, 2018, *遊星人*, 27, 120
- [13] Antonellini, S., et al., 2015, *A&A*, 582, A105
- [14] Antonellini, S., et al., 2016, *A&A*, 585, A61
- [15] Notsu, S., et al., 2019, *ApJ*, 875, 96
- [16] Terada, H., & Tokunaga, A. T., 2017, *ApJ*, 834, 115
- [17] Honda, M., et al., 2016, *ApJ*, 821, 2
- [18] Kamp, I., et al., 2018, *A&A*, 617, A1
- [19] Kemper, F., et al., 2004, *ApJ*, 609, 826
- [20] Matzel, J. E. P., et al., 2010, *Science*, 328, 483
- [21] Honda, M., et al., 2003, *ApJ*, 585, L59
- [22] Maaskant, K. M., et al., 2015, *A&A*, 574, A140
- [23] Bergin, E. A., et al., 2013, *Nature*, 493, 644
- [24] McClure, M. K., et al., 2016, *ApJ*, 831, 167
- [25] Trapman, L., et al., 2017, *A&A*, 605, A69

Exploring the Chemical/Mineralogical Evolution during the Formation of Planetary Systems with SPICA

Mitsuhiko HONDA¹, Hideko NOMURA² and Shota NOTSU³

Faculty of Biosphere-Geosphere Science, Okayama University of Science, 1-1 Ridaicho, Kita-ku, Okayama, Okayama 700-0005, Japan

²Division of Science, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

³Star and Planet Formation Laboratory, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198, Japan

Abstract: With the unprecedented high-sensitivity in the mid- to far-infrared, SPICA will bring us new insights of the chemical/mineralogical evolution of the material during the planet formation. Here we briefly report the key science cases of the formation of planetary systems that SPICA will reveal, the location of the water snowline, water ice thermal history, astromineralogy of the protoplanetary disk, and the precise disk mass determination using HD lines.