

SPICAが切り拓く サイエンス： 「太陽系・系外惑星」



平野



大坪



佐川

平野 照幸¹・大坪 貴文²・佐川 英夫³

SPICAサイエンス検討会「太陽系・系外惑星班」

〈¹ 東京工業大学 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

〈² 国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈³ 京都産業大学 〒603-8555 京都府京都市北区上賀茂本山〉

e-mail: ¹ hirano@geo.titech.ac.jp, ² takafumi.ootsubo@nao.ac.jp, ³ sagawa@cc.kyoto-su.ac.jp

本稿では「SPICAサイエンス検討会」にて2019年から2020年にかけて検討した、赤外線天文衛星SPICAで狙う「太陽系・系外惑星」のサイエンスを紹介する。我々は、SPICAの中間赤外域での高い感度と高分散分光に特に焦点を当て、他のミッションでは難しい太陽系・系外惑星を対象としたSPICAのユニークな観測を検討した。検討対象は、太陽系惑星・衛星、太陽系小天体、惑星間塵、系外惑星大気、系外惑星から放出される鉱物、など多岐にわたり、現実的な観測シミュレーションに基づいてそれらの観測から何をどこまで制限可能かを詳細に評価した。ここでは、SPICAサイエンス検討最終報告書の中で紹介されているトピックのうちハイライトとなりそうなものを取り上げ、惑星系の起源の解明に向けてSPICAが果たし得る役割を概観する。

1. はじめに

SPICAは、「宇宙が重元素と星間塵により多様で豊かな世界になり、生命居住可能な惑星世界をもたらした過程を解明すること」を主たる科学目的とした赤外線宇宙望遠鏡（ミッション）であるが、「太陽系および系外惑星系」はまさに宇宙における物質が物理的・化学的進化の帰結として最終的に到達する「多様で豊かな世界」の骨格をなすものである。星形成から惑星形成を経て太陽系・系外惑星系が誕生した過程を物質進化的な観点からシームレスに理解するという点で、SPICAによる赤外線観測は特筆すべき潜在能力を秘めている。

我々は、「太陽系・系外惑星」を観測対象とし

たSPICAによるサイエンスを検討するため、各種学会のメーリングリストなどを通じて協力者を募り、2019年春から1年余りをかけてSPICAが目指すべきサイエンスの洗い出しと、各テーマの観測実現可能性を詳細に調査した。表1にサイエンス検討会「太陽系・系外惑星班」として検討に参加した班員一覧を示す。

近年太陽系天体の探査では、大型望遠鏡による地上観測、探査機による詳細な観測に加えて、サンプルリターンによって太陽系天体の物質進化を直接紐解こうとする動きが活発化している。一方、系外惑星探査においては、地上・宇宙からの大規模なトランジット・サーベイによりこの10年で系外惑星の数は爆発的に増大したのに加え、

TESS・PLATOなどの現在または近い将来に進行するミッションにより今後はより近傍の(明るい)恒星系での惑星発見が相次ぐものと期待される[1]。さらに、系外惑星探査は近年発見そのものから軌道・大気などの詳細な「特徴付け」の時代へとシフトしつつあり、「惑星系」の一般的な

描像やその中での太陽系の位置付け(普遍性)の理解は今後10-20年間で飛躍的に進むものと予想される。こうした背景の中、太陽系・系外惑星系の探索において、SPICAの持つ強みとしては、(1) 中間赤外域でのかつてない高感度、(2) 宇宙観測における高分散分光の2つの点が挙げられる。いずれも中間赤外域で特に強いフィーチャー*1を持つガス分子・鉱物の同定に役立ち、可視光や近赤外線観測では難しい低温領域(天体)での物理・化学過程を追跡する上で極めて有益である。太陽系・系外惑星系では、上記2つの視点に特に焦点を当て、SPICAで実現されるユニークなサイエンスを調査した。

我々は、図1に示したように、太陽系・系外惑星系のあらゆる天体を対象として観測実現可能性を検討したが、本稿では頁数の制限もありこのうちいくつかのテーマをハイライトという形で紹介する。ここで紹介するテーマのより詳しい検討結果や、紹介しきれないテーマについては、「SPICAサイエンス検討会最終報告書」を参照されたい。

2. 太陽系のサイエンス

2.1 惑星・衛星大気

太陽系内には大気を持つ惑星・衛星が複数存在

表1 太陽系・系外惑星班の班員構成.

氏名	所属(発足当時)
平野 照幸	東京工業大学
白井 寛裕	宇宙科学研究所
大坪 貴文	宇宙科学研究所
大野 和正	東京工業大学
奥住 聡	東京工業大学
奥谷 彩香	東京工業大学
笠羽 康正	東北大学
川内 紀代恵	東京大学
川島 由依	オランダ宇宙研究所
癸生 川陽子	横浜国立大学
小林 仁美	京都虹光房
小林 浩	名古屋大学
佐川 英夫	京都産業大学
関根 康人	東京工業大学
空華 智子	国立天文台
高橋 葵	アストロバイオロジーセンター
寺居 剛	国立天文台
藤井 友香	東京工業大学
前澤 裕之	大阪府立大学
松尾 太郎	名古屋大学
水木 敏幸	宇宙科学研究所
藪田 ひかる	広島大学
吉田 二美	千葉工業大学

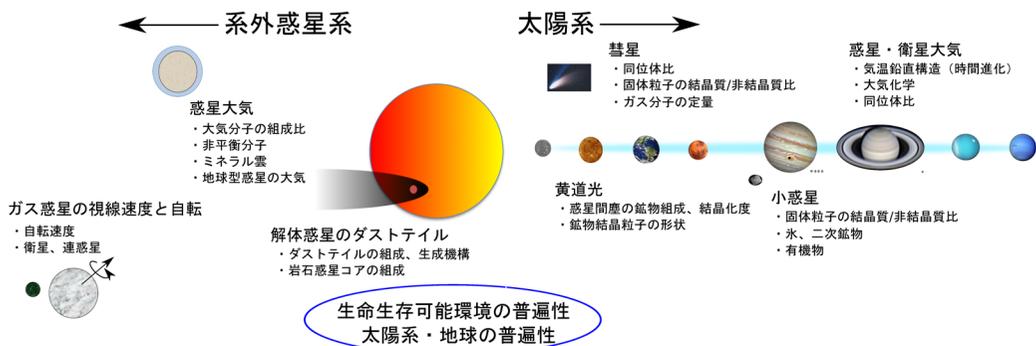


図1 SPICAで目指す「太陽系・系外惑星」のサイエンス.

*1 対象天体に含まれる特定の原子・分子が生み出す、スペクトル中の特徴的な形状を「フィーチャー」と呼ぶ。

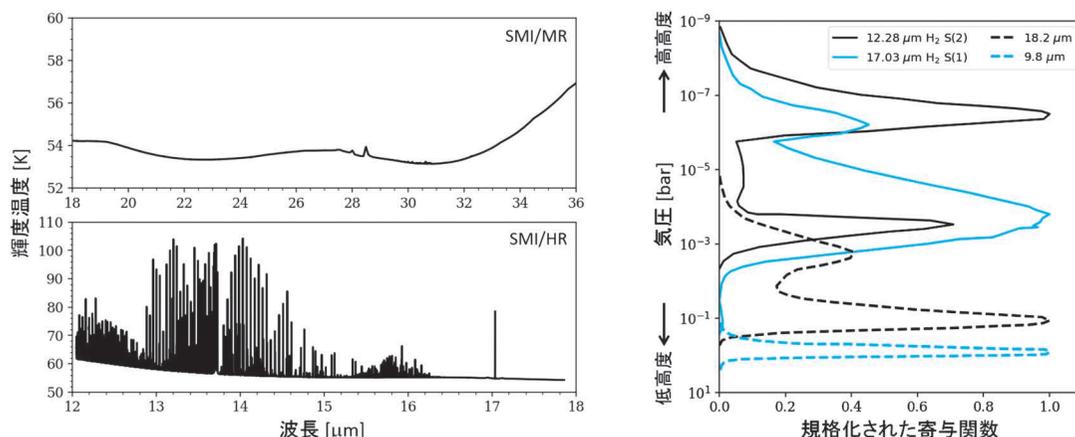


図2 左: SPICA/SMIで観測される天王星スペクトル (観測雑音成分は含まない). 上図が中分散分光装置MR, 下図が高分散分光装置HRでの観測に相当. 右: 天王星大気気温観測に関する各波長での寄与関数. [3]のデータを基に作図.

するが、地球大気と同一の大気を有する天体は存在しない。これは、地球大気の姿が惑星大気の標準ではないことを意味しており、系外惑星の研究が進む現在、それら系外惑星大気の比較参照情報としても太陽系内の個々の惑星大気を精緻に理解しておくことが重要となる。この、「惑星大気を精緻に理解する」という目的に対し、SPICAの観測波長および高感度での高分散分光能力ならではのサイエンスとして、(1) 木星以遠のガス・氷惑星大気気温分布導出、(2) 大気微量成分をトレーサーとした大気化学の解明、(3) 太陽系内天体における同位体比の網羅的観測などが挙げられる。以下では、(1) および (3) について述べる。

気温は惑星大気の物理的性質を知る上で最も基本的な物理量の一つである。特に、緯度や時間(季節)方向の気温変化は惑星大気中に存在する様々な物理現象の駆動要因となっている。木星以遠の惑星の気温分布は、これまで探査機による電波掩蔽観測および探査機や地上・宇宙望遠鏡の赤外分光観測 [2-4] によって調べられてきた。後者は大気自身からの赤外放射を観測するものであるが、赤外領域では外惑星大気の主成分である水素

分子 (H_2) が連続的な吸収を及ぼす。この連続吸収帯で観測される大気放射輝度には対流圏上部の気温が反映される。また、特定の波長では H_2 の電気四重極子による吸収線もしくは輝線が検出される。その吸収線の強度は H_2 の核スピン異性体のオルトとパラの比および気温分布に依存するため、 H_2 のオルトパラ比を常温常圧下での値 (3:1) に仮定することで、四重極放射のスペクトルから気温を推定することが可能となる。

例として、図2の左図にSPICA/SMIの観測波長における天王星大気放射スペクトルを示した。波長分解能 $\sim 30,000$ を実現するSMIの高分散分光装置HRは大気分子のスペクトルを検出するのに最適な観測装置である。図から、波長 $17.03 \mu\text{m}$ に H_2 の四重極放射 S(1) の輝線が明瞭に観測されるのが分かる。波長 $16 \mu\text{m}$ よりも短波長域では、 C_4H_2 , C_2H_2 , C_2H_6 などの分子の輝線が観測される。図2の右図には天王星大気スペクトルの寄与関数を示した。寄与関数とは各波長での放射スペクトルからどの高度(気圧)領域の気温が制約されるのかを表したものである。図中の波線で示したのが H_2 の連続吸収帯の波長を用いた場合であり、対流圏上部 (~ 0.1 気圧) の気温に

感度を持つことが分かる。一方、 H_2 の四重極放射S(1), S(2)の観測(実線)からは、上部成層圏($\sim 10^{-3}$ – 10^{-7} 気圧)の気温推定が可能となる。

SPICA/SMIの高分散分光能力の利点として、波長 $12.28\ \mu\text{m}$ に存在する H_2 のS(2)のラインが従来の観測よりも精度よく検出できるという点が挙げられる。この波長域には C_2H_6 のラインが多数存在しており(図2左図の波長 12 – $13\ \mu\text{m}$ 付近に見られる無数の輝線が該当)、 H_2 のS(2)のスペクトルを抽出する際の問題となっていた[3]。SPICA/SMIでは両分子のスペクトルを正確に分離することができ、S(2)の輝線からより高高度の気温分布が制約可能となる。そして、過去のISOやSpitzer, Herschelの観測にSPICAによる新規観測が加わることで、外惑星大気の気温分布の時間変動に関して新たな知見が得られるという利点も大きい。外惑星の中でも公転周期が長い天王星や海王星は、季節変動の1サイクルを通しての観測が未だ達成されておらず、異なる時期における観測データを可能な限り増やすことが本質的な重要性を持つ。

SMIの高分散分光能力と高感度が不可欠となるのが、大気微量成分の観測である。複雑な有機分子の存在が知られているタイタン大気は、SPICAによる大気微量成分のサーベイ観測に大きな期待が寄せられる観測対象の一つである(詳細はサイエンス検討会報告書を参照されたい)。

タイタン大気に限らず、大気微量成分観測において重要な意味を持つのが、D/Hや $^{18}\text{O}:^{16}\text{O}$ 、 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ などの同位体比であろう。分子の同位体比は、その分子が経験した物理・化学的プロセスによって値が僅かであるが変化する(同位体分別効果)。それゆえ、太陽系天体における各元素の同位体比はその元素を含む分子の起源を少なからず反映していると考えられ、太陽系形成時の環境を理解するための貴重な手がかりとなる。中でもD/Hは、地球の水の起源を調べる重要な指標とされ[5]、図3に示されるように、惑星や小天体のD/Hの比較がこれまでなされている[6, 7]。し

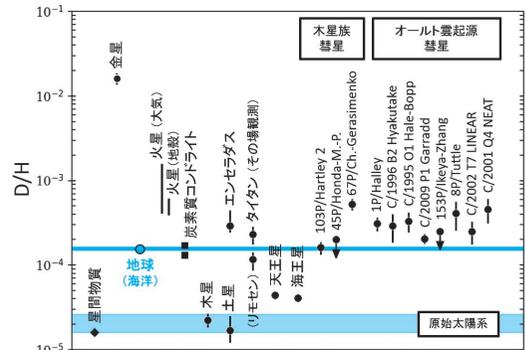


図3 太陽系天体におけるD/Hの分布。[5]に掲載されたデータを基に作図。

かし、惑星大気に関するD/Hの情報は極めて限られた頻度での観測結果であり、空間的・時間的にその天体を代表している保証はない。SPICAの高感度の観測性能をもって高頻度に観測し、より正確なD/Hの値を決定することが求められている。SPICAでは、SMIで検出されるHD R(3)の吸収線(波長 $28.05\ \mu\text{m}$)を利用してD/Hの値が導出される。微弱なHD R(3)のラインではあるが、SPICAの感度であれば十分に観測可能である。例えば、外惑星の中でも最も暗い海王星大気のHD R(3)も10分程度の積分時間で十分なS/Nでの検出が達成される。

また、次節とも関連するが、彗星や小天体における同位体分別は水-岩石-有機物反応においても大きな影響を受ける。SPICAでは赤外スペクトルにおける有機物のフィーチャーが観測可能であり、太陽系全体でのD/H分布の観測を、ミクロスケールでの同位体分別の要因となる有機物の分布と組み合わせることができる。これらの観測により、太陽系天体の形成位置や形成環境物質分布を結び付けた包括的な理解を目指す。

2.2 太陽系小天体

太陽系小天体(太陽のまわりを公転する天体のうち惑星・準惑星・衛星以外を指し、彗星・小惑星・太陽系外縁天体・惑星間塵などが含まれる)は、約46億年前に原始太陽系円盤内で形成された

微惑星の残存物である。現在に至るまでその構成物質が様々な分化・進化してきた惑星・準惑星に比べ、大きめの小惑星を除けば太陽系小天体の多くは比較的变化しておらず、内部に過去の情報を保持していると考えられる。天文学研究では普段は脚光を浴びにくい小天体だが、現在では直接調べられない原始太陽系円盤の奥深くの物理状態や化学進化の情報を提供するものとして重要性が増している。また、太陽系小天体の空間分布は惑星移動による散乱の影響を受けた結果であると考えられ、現在では大きく異なる軌道を持つ彗星・小惑星（外縁天体）・衛星を相互に比較し、物質科学的観点で共通点と差異を明確にすることは、惑星形成・惑星移動過程を制約する手がかりにもなる。

中間・遠赤外域には、分子・氷・有機物・鉱物の特徴的なスペクトルフィーチャーが存在し、SPICAの分光観測は太陽系小天体を構成する様々な物質の組成を効率的にとらえるのに適している。例えば、SMI (12–36 μm) や SAFARI (34–230 μm) がカバーする波長域には、シリケートや水氷、炭酸塩、多環芳香族炭化水素 (PAH)、グラファイトなどのフィーチャーが存在する。以下では、彗星・小惑星・惑星間塵の各天体について、特にSPICAの観測ならではとされるテーマをピックアップして紹介したい。

彗星は、もともとは太陽から5–30 au程度の領域で形成され、巨大惑星の移動に伴い太陽系外縁部へ散乱されたと考えられており [8]、原始太陽系の特に巨大惑星形成領域での種々の進化過程の結果を保存した天体であると言える。SPICAの彗星観測では、(1) ガス分子の組成、(2) 窒素を含むガス分子の同位体比、(3) シリケートの結晶質／アモルファス比、(4) シリケートの鉱物組成、(5) 水氷の結晶質／アモルファス比などに注目した観測が提案されている。

彗星ガスはこれまで幅広い波長域で観測され、彗星核から直接放出された親分子とその同位体、それらが紫外線で壊された各種ラジカル・原子・

イオンなどが検出されている。しかし、有機分子が観測されている天体数は数十個程度で、原始太陽系でどこまで化学進化が進んだかは、サンプルを増やした統計的議論が必要である [9]。有機分子などの結果は、主として地上の近赤外線高分散分光観測で得られたものだが、含有量の少ない分子種や輝線強度が弱い分子種 (C_2H_2 や NH_3 、同位体など) の検出は地球大気の影響を強く受けやすい。大気吸収のせいか、 C_2H_6 の形成過程の中間生成物である C_2H_4 もこれまで未検出である [10]。

そこで、SPICAの中間赤外線高分散分光が威力を発揮すると期待されている。例えば、SMI/HRで検出が予想される彗星の分子種を図4に示した。 C_2H_6 以外は1時間積分でSMI/HRの5 σ 検出レベルを超えており、さらに1–2桁低い(暗い)彗星でも十分観測可能である。SPICAであれば、これまで地上観測では検出が難しかったマイナーな分子種および同位体の定常的な検出が可能となるだけでなく、 C_2H_4 などの新しい分子種の検出も期待される。ガス分子以外のサイエンスについてはサイエンス検討会報告書を参照されたい。

小惑星は地球近傍やメインベルトから太陽系外縁部まで幅広い領域に存在しているが、彗星同様、現在の空間分布は惑星移動の影響を受けた結

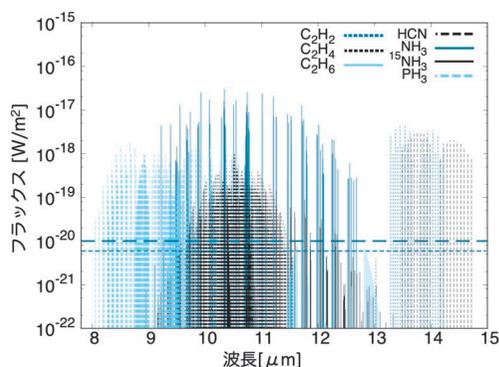


図4 8–15 μm 領域に見られる彗星有機分子輝線。日心距離1 au、日心距離1 auにおける彗星を仮定した。横破線はSMI/HRの感度(太線: 5 σ , 細線: 3 σ 検出レベル)を表している。

果である。ここでは木星のラグランジュポイント(L4, L5) 上にある木星トロヤ群小惑星に着目したい。木星トロヤ群は木星軌道付近の微惑星が木星に捕獲されたものだと考えられてきたが [11], ニース・モデルなどによると, より遠方の外縁天体と同じ起源を持つ天体が巨大惑星の移動に伴い散乱されたものであるとの示唆もあり [8], その形成場所と起源については議論が続いている。木星トロヤ群天体の比較的揮発性が高い有機物や氷などの性質が分かれば, 雪線以遠での物質進化過程を理解する鍵となるが, 現時点で我々はその物質的情報をほとんど持っていない。

そこで SPICA では, (1) シリケートの結晶化度, (2) 水質変成に関連する氷や二次鉱物(炭酸塩)の有無, (3) 有機物の分子構造や組成などに着目し, 木星トロヤ群小惑星の形成場所を制約する観測が提案されている。木星トロヤ群最大の天体 624 Hektor の有効直径は約 250 km 弱であるが, SPICA であれば, 木星軌道付近の直径 10 km 未満の天体でも 1 時間積分で上記スペクトルを十分検出可能である(図 5)。JWST/MIRI も 5–28 μm の分光観測を行うが, 木星軌道上の天体の表面温度は ~ 150 K 程度で > 20 μm にそのスペクトルのピークがくるため, JWST より長波長側で感度が高い SPICA での観測が適している。

太陽系の惑星間空間には, 他にも彗星・小惑星から供給された粒径 sub- μm から mm サイズの惑星間塵が広く分布している。中間赤外域では, 惑星間塵が太陽エネルギーを吸収して熱再放射する黄道放射が卓越した拡散光であり, 過去の赤外線衛星の全天サーベイ観測 [12, 13] で, 惑星間塵は供給源の違いによって異なる特徴的な空間分布を持つことが知られている。しかし, その鉱物学的性質の違いについての詳細研究は進んでいない。

SPICA は供給源の異なる惑星間塵の鉱物学的研究を可能にするが, その中でも特に「鉱物組成・結晶化度」「鉱物結晶粒子の形状」の 2 つに着目している。黄道放射スペクトルに見られる様々な

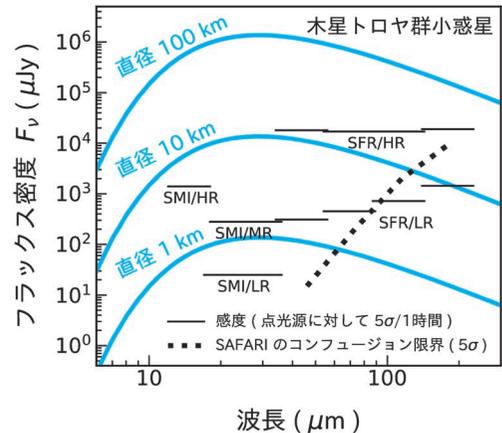


図5 木星トロヤ群小惑星の予想フラックス強度分布。SPICAでは, 1時間程度の積分時間で直径 10 km 未満の天体のスペクトルフィーチャーを十分な精度で取得することが可能である。

フィーチャーの形状は, 惑星間塵の鉱物組成や結晶化度, 結晶粒子形状に依存する(図 6)。従来の赤外線衛星で黄道放射スペクトルが得られている波長 10 μm 付近は, 多数のフィーチャーが混在し, 惑星間塵の性質を定量的に決めることが困難であった。SPICA では, SMI/LR (17–36 μm), SAFARI/SW (34–56 μm) で黄道放射スペクトルが取得可能であり, 惑星間塵の主要結晶粒子であるエンスタタイトやフォルスセライトのフィーチャー強度比やピーク波長がとらえやすく, 鉱物組成比や結晶粒子形状を制限することが可能となる。

また, 大気圏で採集した惑星間塵の実験室測定や「あかり」の観測では, 惑星間塵中に球形状からかけ離れた特異形状のエンスタタイトの存在が示唆されている [14, 15]。SPICA で結晶粒子形状をとらえられれば, 原始太陽系においてどのような環境下でガス・ダスト間の蒸発・凝縮が起こったかまで推定できるのではないかと期待している。

3. 系外惑星のサイエンス

3.1 系外惑星大気

惑星大気の探査は, 系外惑星の最も基本的な「特徴付け」の一つである。歴史的には, 「透過光

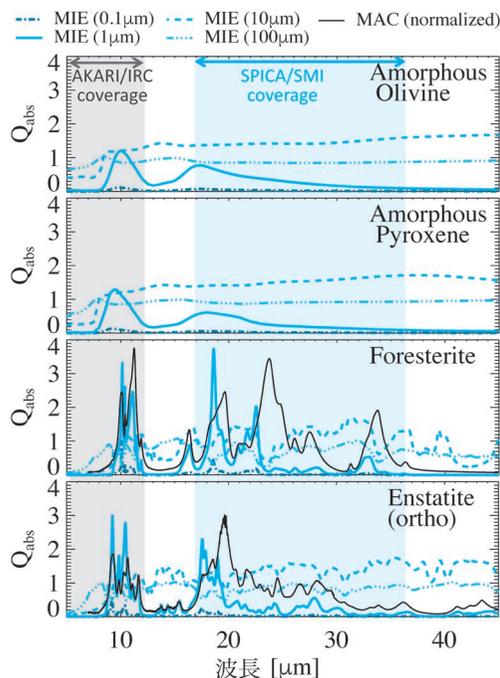


図6 上から順に、アモルファスオリビン、アモルファスパイロキシン、結晶質フォーステライト、結晶質オルソエンスタタイトの吸収効率スペクトル。それぞれ半径0.1, 1, 10, 100 μm の球状のミー粒子を仮定した理論値を異なる線種で示した。黒実線は様々な粒子形状を含む結晶質鉱物サンプルの実験室測定値。

分光法」による可視光高分散分光を用いた巨大惑星上層大気のアリカリ金属の検出、宇宙望遠鏡を用いたトランジット／二次食分光測光観測（低分散分光）による特定の分子の吸収フィーチャーの検出などが主流[16, 17]であったが、最近では大型望遠鏡を用いた近赤外高分散分光観測によって巨大惑星の「放射光」中に含まれる特定分子のラインを直接検出して惑星大気環境（構造）を制限するという手法もしばしば利用されている[18, 19]。系外惑星大気は、原始惑星系円盤内で惑星が大気を獲得したときの周辺環境（特に中心星からの距離や中心星のスペクトル特性）を反映していると考えられており[20]、現在観測される系外惑星の形成進化史を探る上で重要な手がかりとなる。

SPICAによる中間赤外域での分光観測は、系

外惑星大気を探る上でも非常に強力でユニークなツールとなる。系外惑星大気の探査におけるSPICAの強みは、以下の3点に集約されるだろう。

1. 可視・近赤外域ではフィーチャーが弱い特定分子の検出
2. 高分散分光による分子線の正確な検出と、惑星視線速度・自転などの物理情報の制限
3. 「放射光観測」における比較的低温の惑星のフラックスコントラストの劇的な改善

1. については、中間赤外域には水・アンモニアなどの分子線が豊富なほか、HCN, C_2H_2 など惑星の遠紫外線照射環境を探る上で重要な分子の特徴的なフィーチャーが存在する。またこれらの分子を詳しく調査することで、系外惑星の大気循環についての情報を得ることができる。2. に関しては、一般に低分散分光観測によるトランジット分光測光では似たような波長帯に吸収フィーチャーを作る大気モデルが複数存在することから特定の分子の存在を系統誤差なく正確に制限することが困難とされてきた[21]。高分散分光観測では相互相関解析によって分子の吸収帯（ライン）の詳細な構造を検出可能であるため、系外惑星大気に対してより正確な知見が得られる。宇宙からの「高分散分光」は、JWSTなどの他のミッションにはない極めて強力な武器となる。3. の放射光観測については、中心星のフラックスの影響をいかに最小限に抑えて惑星光スペクトルのみを抽出するかが一般に課題とされる。ホットジュピターなどの平衡温度1,000 Kを超える短周期巨大惑星の場合、近赤外域（波長1–3 μm ）で中心星に対する惑星のフラックス比が 10^{-4} を超え、多数の分子・原子線を用いた相互相関解析によって惑星スペクトルの寄与を検出可能になる。一方、より低温領域（長周期）の惑星（平衡温度500 K以下）については近赤外域でも中心星に対するフラックス比は極めて低く（太陽型星まわりで 10^{-5} 以下）、惑星大気の探査は困難である。SMI/

HR ($R \sim 30,000$) のカバーする波長 $12\text{--}18\ \mu\text{m}$ 帯ではこうした比較的低温度の惑星のコントラストも改善し、太陽型星まわりの巨大惑星（平衡温度 $500\ \text{K}$ ）やM型矮星まわりの海王星型惑星（平衡温度 $250\ \text{K}$ ）の場合でいずれも中心星に対する惑星のフラックスは 10^{-4} 以上となる。ハビタブルゾーンや雪線周辺を含む低温領域に存在する系外惑星の大気探査は、今後 $10\text{--}20$ 年で系外惑星科学が取り組むべき主要なテーマの一つであろう。

SPICA サイエンス検討報告書では、SMI/HR による透過光（トランジット）分光、放射光分光観測をそれぞれ検討し、実在する系と仮想的な系をいくつか想定して観測実現可能性をシミュレーションした。例えば、図7はGJ 1214bと呼ばれる中期M型矮星まわりの海王星型惑星のトランジット観測を想定した場合の、SMI/HR波長域の透過光スペクトル（波長に対するトランジットの深さ）を示している。シミュレーションでは、現実的な装置のスループットとノイズ（恒星フラックス由来の白色ノイズと赤外黄道光ノイズ）を仮定して模擬的な観測データを作成し、相互相関解析によって系外惑星大気に含まれる各分子が検出可能かを見積もった。結果として、図7に示される CO_2 以外の分子については10回のトランジット観測で 4σ 以上の検出が期待されるが、 CO_2 は検出が難しいことなどが分かっている。

一般に惑星大気の探査において、透過光分光・放射光分光どちらが有利かは恒星フラックスに対するそれぞれのフィーチャーの深さを調べればよく、GJ 1214bのように比較的低温度の惑星や表面重力の小さい（スケールハイトが大きい）惑星では透過光観測が有利になりやすい。スペースの都合で割愛するが、サイエンス検討報告書では透過光、放射光観測ともに様々なタイプの惑星系を想定して系統的な調査を実施しており、系外惑星大気組成／構造の制限の他に、系外惑星大気にし

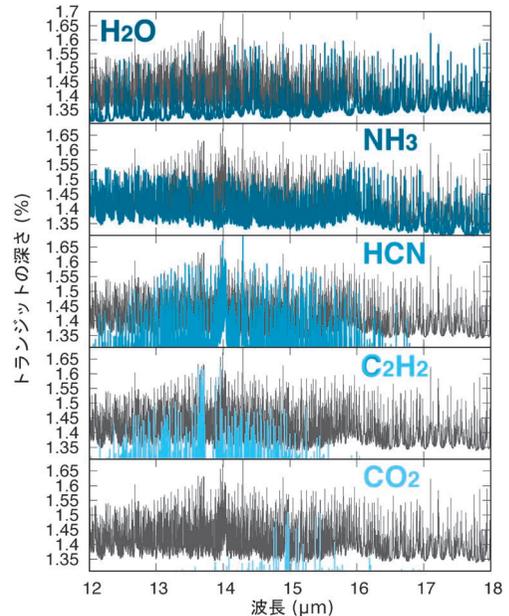


図7 GJ 1214bの理論的透過光スペクトル。黒線が全ての分子の寄与を足し合わせた、観測される透過光スペクトル。各分子の透過光スペクトルへの寄与が各カラーで示されている。各分子の鉛直分布については[22]に基づいている。

ばしば見られる（特に鉱物でできた）「雲」[17]の同定や、巨大惑星の放射光観測による「惑星の」視線速度の高精度測定についても評価している。詳しい内容は報告書を参照していただきたい。

3.2 解体惑星のダストテイル

近年、主に宇宙からのトランジット惑星探査により公転周期が1日未満の「超短周期惑星」が多数発見されている。さらに超短周期惑星の中の数例は、トランジットごとに異なる減光率を示しており、岩石コア成分が蒸発しつつある惑星（解体惑星）であると解釈されている[23, 24]。解体惑星は蒸発した岩石コアの鉱物成分が惑星のまわりに彗星に似たダストのテイルを形成し、通常の惑星トランジットとは異なる形状の減光曲線となることが知られている*2。解体惑星がどのようにして今の

*2 ダストテイルの存在は、トランジット前後にダスト前方散乱による恒星の増光が観測されることによっても示される。

姿になったのかについては諸説あるが、現在観測されているダストテイルは、むき出しになった惑星岩石コア（一般に1地球半径以下）から、X線および極紫外線を含む中心星からの強力な照射などによって放出されたダスト成分が宇宙空間で再凝縮することによって形成されていると考えられている。

これまで系外惑星探査において、惑星のバルク組成^{*3}（鉱物）を直接的に検出するという試みはほとんど行われていない。系外惑星のバルク組成の推定は、一般に視線速度観測とトランジット観測から得られる惑星質量と半径を境界条件として内部平衡の式を理論的に解くことで間接的に行ってきた。しかしながら、太陽系の惑星を見ても明らかのように、惑星はコア、マントル、大気がそれぞれが多様な組成を持ち得るため、同じ惑星半径と質量を与える組成の組み合わせは無数に存在し、バルク組成の解には縮退が残る [25]。近年では、惑星を持つ中心星の炭素/酸素比などの組成や、透過分光法などによって得られた惑星大気組成を基にしてバルク組成をより現実的に制限する試みもあるが、いずれも組成そのものを直接的に制限するものではない。

解体惑星のダストテイルの観測は、これまで全くと言っていいほど知られていなかった系外惑星のバルク組成の直接的な制限を可能にする。上記3.1節で述べた透過分光法による惑星大気の制限と同様に、ダストテイルのトランジット減光率の波長依存性を詳しく調べることで、ダストテイルを構成する主たる成分（鉱物）を同定することができるためである。図8では、地球型惑星と炭素をバルクの主成分とした惑星（炭素惑星） [26] の場合で、ダストテイルの透過分光観測によりどのような鉱物が観測されるかを模式的に示している。惑星のバルク組成は、(1) 惑星形成時の物質環境、(2) 惑星の軌道進化の歴史、などを色濃く

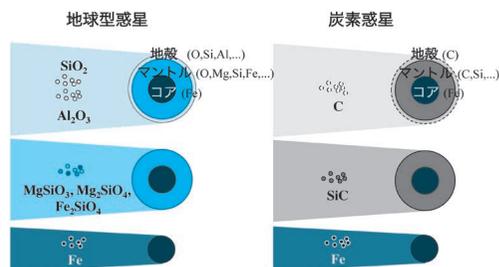


図8 地球型惑星（左）と炭素惑星（右）の場合の、地殻（上段）・マントル（中段）・コア（下段）に起源を持つダストテイルで観測される鉱物の例。

反映していると考えられ、惑星の形成・進化モデルを検証する上で極めて貴重な観測的な制限となる。

一般に鉱物は中間赤外域に多くの吸収フィーチャーを持つため、SPICA/SMIやJWST/MIRIなどによる宇宙からの赤外分光観測は強力なツールになる。ダストテイルのある空間構造・粒子サイズなどを仮定した場合（可視光域でのトランジット減光率は2015年に発見された解体惑星であるK2-22bの場合を想定して0.6%）に得られた、 $4\mu\text{m}$ から $37\mu\text{m}$ の透過分光スペクトル（トランジット減光率の波長依存性の理論曲線）の例を図9に示す。波長 $12\mu\text{m}$ までの短波長側（灰色の領域）が、JWST/MIRIが十分な感度を持つ波長域、 $17\mu\text{m}$ 以遠（水色の領域）がSPICA/SMIによる低分散分光観測で高感度が達成される波長域である。図から明らかのように、ダスト成分ごとに異なる吸収フィーチャーが存在し、逆にこれらのフィーチャーを観測的に詳細に調べることでダストテイルを構成する成分を制限することが可能となる。JWSTがカバーする短波長側だけでも特徴的なフィーチャーを持つ鉱物は存在するが（例： SiO_2 ）、異なる鉱物が同じような波長に吸収ピークを持つ場合もあり、鉱物の正確な同定にはSPICA/SMIによる長波長側の観測を組み合わせることが不可欠である。また、図では示していな

*3 ここでは、「バルク」は主に惑星中心コア、マントルなどからなる固体成分を指す。

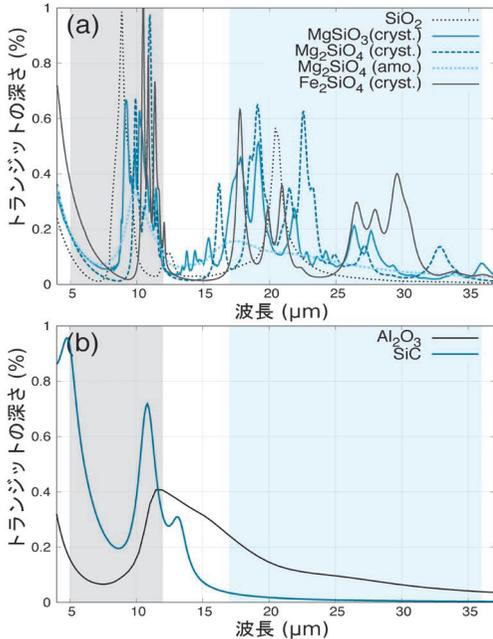


図9 解体惑星ダストテイルの透過光スペクトルの例 ([27]の図5を改変). パネル (a) ではSPICA/SMI (背景青色), JWST/MIRI (背景灰色) の両方の波長域にフィーチャーが観測される鉱物を, パネル (b) ではJWST/MIRI波長域にのみフィーチャーが存在する鉱物のスペクトルをプロットしてある.

いが, FeO, CaTiO₃などの鉱物はSPICA/SMIがカバーする長波長側にも吸収フィーチャーを持つ. 具体的な系を想定した場合のより詳しい観測実現可能性についてはサイエンス検討報告書にて詳しく述べられているが, 距離100–200 pc以下の近傍に位置する可視光域で1–2%以上の減光率を持つ解体惑星のダストテイルについてはSPICA/SMIによるダストテイル組成の制限が実現可能であると推定されている [27].

4. まとめ

本稿では, SPICAによる赤外線観測の中で「太陽系・系外惑星」に関する観測ハイライトを紹介した. SPICAの持つ中間赤外域での「超高感度」と「高分散分光」は, 太陽系や系外惑星系の探査においても多くのブレイクスルーをもたらすと期待され, JWSTを含む他の地上・宇宙観測の大型ミッションでも困難な極めてユニークな観測機会を提供してくれる.

今回SPICAサイエンス検討会として太陽系・系外惑星のサイエンスを包括的に検討したが, 「太陽系」と「系外惑星」の観測が互いに相補的であることを再確認したことは一つの収穫と言える. 太陽系天体は「数は限られているが詳細な分析が可能で, 情報の解像度が格段に高い」一方で, 系外惑星系は「数は無数に存在するが, 個別の天体で得られる情報量は少ない」という一般的な特徴がある. したがってこれらの観測を相補的に利用し, お互いの方法論やサイエンス目標を共有することで, 宇宙に存在する「惑星系」の全体像や太陽系の位置付けの正確な理解が進むものと期待される. SPICAは, 2021年にESAのM5ミッション最終選抜が実施され, 最終的に2020年代後半の打ち上げの可否が決定されることになっている. 仮にこの選抜で打ち上げが承認されずとも, 今回の検討がもたらした新しい知見や枠組みは, 将来的なミッションやサイエンスの検討で十分に生かされるはずである*4.

謝辞

本記事は, SPICAサイエンス検討会「太陽系・系外惑星班」の検討内容がベースになっています. サイエンス提案や観測実現可能性の検討で多

*4 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.

大な貢献をしていただいた全ての班員の皆様（表1）にこの場を借りて感謝いたします。本稿に使用されている図の一部は班員の奥谷彩香氏，川内紀代恵氏，川島由依氏，小林仁美氏，高橋葵氏，寺居剛氏に提供していただきました。SPICA特集記事を提案し，執筆の機会を与えていただいた天文月報編集委員（兼「近傍銀河・銀河系班」班長）の江草実氏をはじめ，サイエンス検討会班長団の皆様，またそのとりまとめにご尽力いただいた長尾透，野村英子両氏には深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Ricker, G. R., et al., 2015, *J. Astron. Telesc. Instrum. and Syst.*, 1, 014003
- [2] Conrath, B. J., et al., 1998, *Icarus*, 135, 501
- [3] Orton, G. S., et al., 2014, *Icarus*, 243, 494
- [4] Fletcher, L. N., et al., 2016, *Icarus*, 264, 137
- [5] Genda, H., 2016, *Geochemical J.*, 50, 27
- [6] Hartogh, P., et al., 2011, *Nature*, 478, 218
- [7] Altwegg, K., et al., 2015, *Science*, 347, 1261952
- [8] Morbidelli, A., et al., 2005, *Nature*, 435, 462
- [9] Dello Russo, N., et al., 2016, *Icarus*, 278, 301
- [10] Kobayashi, H., et al., 2017, *ApJ*, 837, 155
- [11] Marzari, F., & Scholl, H., 1998, *Icarus*, 131, 41
- [12] Kelsall, T., et al., 1998, *ApJ*, 508, 44
- [13] Kondo, T., et al., 2016, *AJ*, 151, 71
- [14] Bradley, J. P., et al., 1983, *Nature*, 301, 473
- [15] Takahashi, A., et al., 2019, *PASJ*, 71, 110
- [16] Snellen, I. A. G., et al., 2008, *A&A*, 487, 357
- [17] Kreidberg, L., et al., 2014, *Nature*, 505, 69
- [18] Brogi, M., et al., 2012, *Nature*, 486, 502
- [19] de Kok, R. J., et al., 2013, *A&A*, 554, A82
- [20] Öberg, K. I., et al., 2011, *ApJ*, 743, L16
- [21] Swain, M. R., et al., 2014, *ApJ*, 784, 133
- [22] Kawashima, Y., & Ikoma, M., 2019, *ApJ*, 877, 109
- [23] Rappaport, S., et al., 2012, *ApJ*, 752, 1
- [24] Sanchis-Ojeda, R., et al., 2015, *ApJ*, 812, 112
- [25] Seager, S., et al., 2007, *ApJ*, 669, 1279
- [26] Kuchner, M. J., & Seager, S., arXiv e-prints, arXiv: astro-ph/054214
- [27] Okuya, A., et al., 2020, *ApJ*, 901, 171

SPICA Sciences on the Solar System and Exoplanets

Teruyuki HIRANO¹, Takafumi OOTSUBO², Hideo SAGAWA³, SPICA “Solar-System and Exoplanets” Working Group

¹*Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan*

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

³*Kyoto Sangyo University, Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto, Kyoto 603-8555, Japan*

Abstract: This article introduces the SPICA sciences on the “solar system and exoplanets” that we studied between 2019–2020. Focusing on the remarkable advantages of SPICA (i.e., the high sensitivity and high spectral resolution in the mid-infrared) over other missions, we investigate unique science cases that can be achieved by SPICA. Targets of our studies include planets, satellites, and small bodies in the solar system, exoplanetary atmospheres, and dust tails of disintegrating exoplanets. Here, we highlight several topics presented in the “SPICA science study book”, and review how mid-infrared observations by SPICA will allow us to uncover the origin of planetary systems.