

第2期光赤天連SPICA タスクフォース最終報告書

—新生 SPICA(プラン D)に向けたコミュニティからの提言—

第2期光赤天連 SPICA タスクフォース
(活動期間: 平成 26 年 10 月～平成 27 年 3 月)

平成 27 年 7 月 31 日

第2期光赤天連 SPICA タスクフォース委員一覧

活動期間: 平成 26 年 10 月～平成 27 年 3 月

五十音順:

- ・ 小山 佑世 (幹事, 宇宙科学研究所)
- ・ 竹内 努 (名古屋大学)
- ・ 長尾 透 (委員長, 愛媛大学)
- ・ 野村 英子 (東京工業大学)
- ・ 本田 充彦 (神奈川大学)
- ・ 松尾 太郎 (京都大学)
- ・ 松田 有一 (国立天文台)
- ・ 宮田 隆志 (東京大学)

目次

	エグゼクティブ・サマリー / Executive Summary	3
1	第2期光赤天連 SPICA タスクフォースの活動の背景と活動履歴	6
2	SPICA サイエンスケースのレビュー	8
2.1	SPICA による銀河進化サイエンスのレビュー	8
2.2	SPICA による近傍銀河での星形成と物質循環に関するサイエンスのレビュー	8
2.3	SPICA による恒星形成と惑星系形成に関するサイエンスのレビュー	9
3	SPICA サイエンス検討の今後の方向性に対する提言	11
3.1	SPICA による系外銀河研究の方向性	11
3.2	SPICA による銀河系内研究の方向性	14
4	SPICA の機能拡張やサイエンスの新たな方向性に関する提言	17
4.1	中間赤外線帯での広域撮像観測による銀河進化研究の可能性	17
4.2	20 μm よりも短波長でのトランジット分光観測の可能性	18
4.2.1	JWST におけるトランジット分光	19
4.2.2	SPICA におけるトランジット分光観測の戦略	20
4.3	20 μm よりも短波長での分光観測による様々なサイエンスの可能性	22
4.3.1	20 μm より短波長での SPICA 分光観測による銀河系内天体サイエンス	22
4.3.2	20 μm より短波長での SPICA 分光観測による活動銀河核サイエンス	23
4.3.3	原始惑星系円盤ガスの高分散分光観測による惑星形成過程の解明	24
4.4	210 μm よりも長波長での SPICA 分光観測による銀河進化研究の可能性	27
	参考文献	27

エグゼクティブ・サマリー

光学赤外線天文連絡会の下に設置された SPICA タスクフォース (STF) では、国際連携の体制見直しなどの理由で様々な仕様変更の検討が進められている SPICA に対して、これまで検討されていたサイエンスゴールが口径 2 m 級 (~ 2.5 m) の SPICA でも達成可能なかどうか、むしろ仕様変更を受けて新たなサイエンスの方向性を考えるべきなのかどうか、および仕様変更の方向性についてサイエンスの観点からどのような期待や留意点があるのか、といったレビューを行ってきた。本報告書ではこの議論結果について報告する。

これまで SPICA が掲げてきたサイエンスゴールについて、銀河進化最盛期における銀河成長、近傍銀河における星形成と物質循環、星および惑星系の形成、という 3 つのポイントで SPICA の仕様変更が目的達成に及ぼすインパクトについてレビューした。その結果、高赤方偏移における銀河観測の観点では、口径縮小に伴い視野が拡大される効果および SAFARI のグレーティングへの変更による高感度化を考慮すると、当初目的としていたサイエンスを十分に達成可能であると判断した。また遠方銀河に関する観測戦略を今後具体化する際には、宇宙における星形成が最も活発であった赤方偏移 2 前後の宇宙における星形成バーストの物理と銀河進化における位置付けの解明という観点から、超高光度赤外線銀河 (ULIRG) やサブミリ波銀河 (SMG) の輝線診断を系統的に行ってこうした銀河の物理化学状態およびダスト進化を明らかにするという方針が重要であることを指摘した。近傍銀河観測の観点では、空間分解能の低下により銀河内部を十分に分解して観測することができるターゲットの数が減少することおよびコンフュージョンの影響が増大することが問題となるが、SPICA の運用時点での研究分野の動向も踏まえつつ適切なターゲットを選択することで当初目的としていたサイエンスを遂行可能であると判断した。星惑星系形成の観点では、空間分解能の低下に伴う固有運動測定精度の低下によりカイパーベルトレベルの残骸円盤の太陽系外での初検出を試みるためのターゲット数がかなり少なくなってしまう等の無視できない影響があるが、SPICA がカバーする広い波長域の独自性により他のプロジェクトが実現できないユニークな成果が依然として期待できると判断した。この星惑星系形成研究に関する SPICA の戦略を今後具体化させる際には、特に JWST との機能的競合について更に定量的な検討を深め、SPICA にしかできないテーマに集中することでユニークな成果を挙げられるようにすることが重要であることを指摘した。

また、STF ではむしろ SPICA の仕様変更をチャンスと捉え、これまであまり検討されていなかったが新生 SPICA だからこそ可能になるような新たなサイエンスについても検討を行った。ひとつは、視野が拡大することを踏まえた、SMI を用いた広域での中間赤外線撮像観測による銀河進化研究の可能性である。SMI による撮像観測では波長 $20\ \mu\text{m}$ 帯で Spitzer の感度を 1 桁近く上回ることができ、更に長波長側に探査を拡大させることができる。これは、宇宙の星形成活動がピークを迎える以前の赤方偏移 4 程度まで赤外線銀河を系統的に探査することが SPICA により始めて可能になることを意味する。一方、新たに搭載が検討されている波長 $5\text{--}20\ \mu\text{m}$ での分光装置によるトランジット分光観測により、JWST をもってしても極めて困難だと予想されるような、ハビタブルゾーン内のスーパーアースから地球サイズの惑星の特徴づけが SPICA により始めて実現できると考えられる。また、SMI に波長分解能 $R \sim 20,000 - 30,000$ のモードを追加することにより、JWST では調査不可能な惑星形成領域の物理化学構造が明らかにできると期待される。遠赤外線帯については、 $210\ \mu\text{m}$ までをカバーするとされていた SAFARI の波長域を例えば $230\ \mu\text{m}$ 程度まで拡大させることができれば、宇宙の激動期に迫る赤方偏移まで高電離ガスのトレーサーとして重要な $[\text{OIII}]\lambda 88\ \mu\text{m}$ が捉えられるようになり、巨大ブラックホール成長の議論にも非常に有用であると考えられる。

以上により、SPICA は様々な仕様変更によって空間分解能などが影響を受けることになるが、むしろ視野の拡大や遠赤外域でのグレーティング機能、短波長側でのトランジット分光装置など、SPICA の独自性が更

に向上することが期待され、2020 年代後半においても極めて競争力の高い宇宙望遠鏡として天体物理学の広範な領域に大きなインパクトを与えるプロジェクトであると結論付けた。

Executive Summary

The SPICA Task Force (STF) was organized in October 2014 under the Group of OPTical and InfraRed Astronomers (GOPIRA). The STF was charged with reviewing the scientific strategy of SPICA, since various parameters of the telescope and functions of the focal-plane instruments were significantly revised from the originally-proposed SPICA. Specifically the STF has reviewed the following items: (1) whether the originally-proposed sciences are still achievable even with the reduced aperture size of the telescope to ~ 2.5 m, (2) whether there are new key sciences that well matches the revised SPICA, and (3) what are the requests and recommendations to the revisions of SPICA from scientific viewpoints. This document summarizes the results of the STF discussion.

As for the study of the galaxy evolution at high redshifts, we conclude that the originally-proposed success criteria are achievable with the revised SPICA thanks to the enlarged field-of-view and the new grating function on SAFARI. For brushing up the strategy of high-redshift galaxy observations, we point out that one key science goal is understanding the physics and role of the burst of the star formation at the peak epoch of the galaxy evolution ($z \sim 2$). Specifically, quantifying the physical and chemical properties of gas and dust in ULIRGs and SMGs should be revealed through systematic MIR-FIR spectroscopic diagnostics. A worse spatial resolution results in a smaller number of the targets for spatially-resolved diagnostic studies of nearby galaxies, but the originally-proposed success criteria are still achievable if the target galaxies are carefully selected. The degraded spatial resolution is a challenge toward the accurate measurement of the proper motion of nearby stars and thus the number of optimal targets for detecting extra-solar Kuiper belts, but the unique wavelength coverage of SPICA is extremely competitive in the field of the formation of stars and planetary systems. Specifically for this science topic, we point out that the relative advantage and disadvantage of SPICA with respect to JWST should be carefully quantified when the SPICA observational strategy will be actually decided.

In addition to these originally-proposed sciences, there are some new key sciences that will be possible thanks to the newly designed SPICA capabilities. One is wide-field mid-infrared imaging surveys with SMI to study the galaxy evolution, that will be feasible by utilizing the enlarged field-of-view. The expected SMI sensitivity for imaging observations at $20 \mu\text{m}$ is $\times 10$ better than the Spitzer/MIPS sensitivity (even when the confusion effect is taken into account), and the expected survey speed is much faster than the survey speed of JWST/MIRI. Since SMI can take deep and wide mid-infrared images at the wavelength range ($20\text{--}38 \mu\text{m}$) that is much longer than the Spitzer/MIPS and JWST/MIRI ranges, the SMI imaging survey will make a breakthrough by the extinction-free galaxy survey beyond the peak era of the galaxy evolution. Another possible new key science is the transit spectroscopy to characterize “super earths” and earth-size planets in the habitable zone. This will be possible with a new spectrograph covering $5\text{--}20 \mu\text{m}$, if the instrument is carefully optimized for accurate transit spectroscopies. A possible addition of the high-dispersion mode ($R \sim 20,000 - 30,000$) on SMI will enable us to examine the physical and chemical structure of planet-forming regions, that cannot be assessed even with JWST. At the longer wavelength side, a possible extension of the SAFARI wavelength coverage will be very

exciting since it will bridge the spectral gap between the SPICA and ALMA.

Based on the above considerations, the STF conclude that the revised SPICA will be a very unique and powerful facility thanks to some new instrumental functions (the grating component on SAFARI, a wider field-of-view of SMI, a possible new high-dispersion function of SMI, and a possible new spectrograph covering 5–20 μm), whose merit is much fascinating than the expected demerit (the smaller telescope aperture size and the consequently worse spatial resolution). The STF believes that the SPICA will be a highly competitive facility that will bring brand-new understandings at wide research fields in astrophysics, even at the late 2020's.

1 第2期光赤天連 SPICA タスクフォースの活動の背景と活動履歴

SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) とは、極めて高感度な赤外線撮像分光観測を実現する大型冷却赤外線宇宙望遠鏡計画である。この実現をめざして日欧の国際協力により検討が進められてきており、2000 年には宇宙理学委員会から SPICA WG の設置が承認され、2008 年には大型衛星計画としてミッション定義審査に合格している。こうした検討の進展を受け、幅広く日本の光赤外天文学コミュニティの立場からサイエンスや焦点面装置選定について議論し、SPICA チームに提言を行っていくための SPICA タスクフォース (STF) を設置する必要性が生じた。そこで日本の赤外線天文学コミュニティの組織である光学赤外線天文連絡会 (光赤天連; GOPIRA) の下に、市川隆氏 (東北大) を委員長とする STF が設置されることとなり、2008 年 11 月から活動を開始して SPICA の焦点面装置選定など様々な課題に対して議論と提言が行われた。こうした活動も受けて、SPICA には中間赤外線で 5–38 μm をカバーする MCS (Mid-infrared Camera and Spectrograph) と 35–210 μm をカバーしてフーリエ分光により高いサーベイスピードで面分光を行う SAFARI (SPICA Far-infrared Instrument) が搭載されることになり、これらの装置を口径 3.5 m の大口径冷却望遠鏡に搭載することによって銀河の誕生と進化および惑星系形成過程について総合的に理解することを目指すこととなった。以上を便宜上、SPICA の Plan-A と呼称する。

ところが 2013 年になって、我が国における宇宙科学ロードマップの策定を受けて SPICA を大型衛星計画として進めることが困難となったため、戦略的中型計画として見直した上で SPICA を推進することになった。望遠鏡口径は 3.0 m とした上で欧州との役割分担についても見直し、欧州宇宙機関 (European Space Agency; ESA) の Mid-class mission の 4 つ目の計画 (M4) として応募することも想定して SPICA の実現を目指すこととなった。これを SPICA の Plan-B と呼ぶ。Plan-B では JWST/MIRI との機能重複を避けるため波長 20 μm 以下の機能を外し、日本が開発を担当し 20–38 μm での中分散分光観測を行う SMI (SPICA Mid-infrared Instrument) と欧州が開発を担当し Plan-A でも搭載されることになっていた SAFARI の 2 つの装置が搭載されることとなった。しかし 2014 年になり、Plan-B で進めることも様々な観点から困難であることが判明し、SPICA について更なる計画の見直しが必要になった。このため、日本と欧州の役割分担についても改めて再検討し、口径 2 m 級の冷却赤外線望遠鏡を 2020 年代中盤から後半に打ち上げる計画とした上で、日本側は戦略的中型計画としての遂行を、また欧州側は ESA の Mid-class mission の 5 つ目の計画 (M5) としての採択を、それぞれ目指すこととなった。これを SPICA の Plan-D と呼ぶ。なおこの Plan-D SPICA の検討が進む中で、SPICA への機能追加の可能性として、波長 5–20 μm をカバーして波長分解能 $R \sim 300$ 程度でトランジット分光観測を行う新しい分光装置の搭載および SMI の波長帯の短波長側 (提案としては 14–18 μm) で $R = 30,000$ 程度のスペクトルを取得して多様な分子輝線を観測するという SMI 高分散モード (HRS) についても検討が行われ始めた。

このように、2008 年に設置された光赤天連 STF (第 1 期 STF) が活動を進めていた頃と比べると SPICA 計画には様々な変更があり、改めて広くコミュニティーを巻き込んだ形で現状の SPICA 計画に対するコミュニティーからのレビューや様々な議論が必要であるという認識が持たれるようになった。そこで改めて光赤天連が第 2 期の STF を立ち上げることになり、光赤天連運営委員会による人選の上で、2014 年 10 月から翌 2015 年 3 月までの時限付きタスクフォースとして第 2 期 STF が発足した。メンバーは小山佑世 (宇宙研、幹事、2015 年 4 月から国立天文台)、竹内努 (名古屋大)、長尾透 (愛媛大、委員長)、野村英子 (東京工業大)、本田充彦 (神奈川大)、松尾太郎 (京都大、2014 年 12 月より)、松田有一 (国立天文台)、宮田隆志 (東京大) の 8 名である (敬称略)。光赤天連から第 2 期 STF に課されたタスクは、2020 年代後半に我が国のコミュニティが取り組むべきサイエンスに照らし、SPICA の果たすべき役割と装置仕様策定に関して、コミュニティーの視点か

ら SPICA チームの活動を支援することである。とりわけ、これまで Plan-A あるいは Plan-B SPICA として SPICA チームが検討してきた科学目標についてレビューした上で、それらが口径 2 m 級の Plan-D SPICA でも十分に実現可能か、また 2020 年代後半においてサイエンスが十分な魅力を持っているものとなっているか、といった項目について調査し、更に検討が必要な事項を洗い出した上で SPICA チームに必要な勧告を行うことが任務として課せられた。

以上のタスクを遂行するため、第 2 期 STF は下記の通り計 4 回の STF 会議を開催した。いずれも、STF 委員に加えて光赤天連運営委員長長の川端弘治氏 (広島大)、および SPICA チームからも必要に応じて出席をする形で行われた。

- STF キックオフ会議 (2014 年 10 月 30 日、TV 接続および skype を使用)。SPICA チームからの現状報告、光赤天連運営委員長からの STF 趣旨説明、委員長と幹事の互選、今後のスケジュール確認。
- 第 1 回 STF 会議 (2014 年 11 月 19 日、宇宙科学研究所)。SPICA チームから Plan-D SPICA に関する詳細および欧州側との議論状況に関する説明、STF 委員による SPICA サイエンスのレビューと質疑応答、地上系に関する宇宙科学研究所と国立天文台の間での議論状況に関する報告、今後のスケジュール確認。
- 第 2 回 STF 会議 (2015 年 2 月 3 日、宇宙科学研究所)。11 月 26 日の光赤天連スペース計画シンポジウムを受けた宿題への対応、SPICA チームからの関連会議報告、トランジット分光観測用の分光装置による系外惑星サイエンスの可能性に関する報告と議論、今後のスケジュール確認。
- 第 3 回 STF 会議 (2015 年 3 月 30 日、宇宙科学研究所)。SPICA チームからの現状報告、3 月 2 日の SPICA 広域観測ミニ WS の報告と議論、トランジット分光観測用の分光装置による多様なサイエンスの可能性に関する議論、第 2 期 STF のサマリー方針に関する議論。

これらの会議に加え、2014 年 11 月 26 日に国立天文台三鷹で行われた光赤天連スペース計画シンポジウムでは第 2 期 STF の活動状況の中間報告を行い、コミュニティの研究者から活動方針に対するコメントなどを受けた。また 2015 年 3 月 2 日には、SPICA チームのこれまでのサイエンス検討であまり追求されていなかった赤外線撮像広域観測の可能性について幅広く議論するためのミニワークショップを、第 2 期 STF の主催により国立天文台三鷹にて行った (参加者数 21 名)。

こうした第 2 期 STF の活動を受け、その検討内容のとりまとめを行うことが本ドキュメントの目的である。執筆は、サマリーと 1 章を長尾が、2.1 章を小山と松田が、2.2 章を竹内と宮田が、2.3 章を野村と本田が、3.1 章を小山・竹内・松田が、3.2 章を野村・本田・宮田が、4.1 章を小山と松田が、4.2 章を松尾が、4.3 章を長尾・野村・本田が、4.4 章を長尾・松田がそれぞれ担当した。STF の活動期間内にも SPICA を巡る状況や仕様が刻々と変化したため、十分な検討が行き届かなかった部分もあったが、SPICA チーム外からコミュニティの立場でサイエンスのレビューと今後の方向性に関する提言を行うことができた点は第 2 期 STF の成果であるといえる。欧州側との調整が完了し、SPICA の仕様が完全に固まった際には、望遠鏡時間の使い方やレガシーサーベイの立案、データ公開の方針など、様々な観点から再びコミュニティの立場での幅広い議論が必要になると考えられるが、これらは光赤天連の主導の下で設置されるであろう第 3 期の STF が第 2 期 STF の成果も踏まえて活動を行うものと思われる。

2 SPICA サイエンスケースのレビュー

2.1 SPICA による銀河進化サイエンスのレビュー

SPICA ミッションの科学目的・意義の柱の一つは、「宇宙青年期とよべる時代の銀河の誕生・成長過程の解明」である。これを達成するには宇宙論的体積をカバーする遠方銀河サーベイによる宇宙の塵に埋もれた星形成銀河および AGN の調査が必要となる。具体的には、星形成・AGN 活動のピーク期 ($z = 1 \sim 3$; [21][15] 他) の銀河活動の大部分を担う赤外線銀河の赤外線分光観測を行い、輝線診断を通してその赤外放射の起源と物理機構の解明を目指す。本サーベイのフルサクセスは、(1) 赤方偏移 1 から 3 の範囲で、 $\Delta z = 0.5$ 毎に 50 個以上の超大光度赤外線銀河について、中間・遠赤外線分光観測によるガス輝線診断を行い、大規模星生成現象の実態と変遷を知ること、(2) 赤方偏移 0 から 4 の範囲で $\Delta z = 0.5$ 毎に 100 個以上の赤外線銀河を検出し、星生成率密度と AGN 光度密度の変化を測定し、銀河進化史と巨大ブラックホール成長史の全容を知ることである。エクストラサクセスは、赤方偏移 $z > 3$ の超大光度赤外線銀河について、銀河内の大規模星生成現象を解明するとともに、ダスト特性（組成・結晶度など）を測定し、近傍星間ダストとの相違点を明らかにすることである。

今後の望遠鏡仕様変更で、口径が 2.5 m 程度となる場合でも、上記のサイエンスケースは、達成可能であることがわかった。口径縮小により、感度の低下、およびビームサイズが大きくなってしまう懸念はあるが、その分、視野を大きくとることができる。仮に口径 2 m を想定した場合、同じサーベイ時間で検出される銀河数は、3 m の場合の $1/2 \sim 1/3$ の規模になると予想されるが、フルサクセスは満たすことができる。また、SAFARI のグレーティング分光への仕様変更により、ターゲット観測で感度が数倍増するため、ガス輝線診断をより暗い銀河まで行うことができるようになる。

2.2 SPICA による近傍銀河での星形成と物質循環に関するサイエンスのレビュー

星と星間ガス・ダストは密接に関連しながら進化すると考えられており、これを理解することは現在の多様な宇宙を解釈するうえで必要不可欠である。中間・遠赤外線はダストによる連続波・バンド放射吸収およびガスの微細構造線などが多数存在しており、ガスおよびダストの情報を引き出すのに最適な波長域であるといえる。この波長をこれまででない感度および空間分解能で観測する SPICA は、星形成とガスダスト進化を調べる上で最適な装置となる。具体的な計画として検討されてきた観測は、i) 距離 100 Mpc 以内に存在する約 4000 個の近傍銀河に対して空間分解したスペクトルマップを得る、ii) 10 Mpc 以内の 100 銀河については、星形成活動の典型的スケールである ~ 100 pc を空間的に分離し個々の星形成領域について物理環境条件を明らかにする、iii) これをもつて銀河の金属量 2 桁、星生成率 4 桁の広いサンプルを得、星形成やガス・ダストのパラメータ間の関係を明らかにする、というものであった。

望遠鏡の口径が 3 m から 2 m あるいは 2.5 m に縮小される場合、感度および空間分解能の低下による影響が懸念される。空間分解能が低下する場合、空間分解できる銀河数が減少する、コンフュージョンの影響が増大するという問題があるが、感度の低下も併せて、これらの問題は観測サンプルを適切に選択することで十分対応できると考えられる。この分野は現在活発な研究がなされている分野でもあるので、最新の動向も考慮しながらサンプルを最適化することが望ましい。

SPICA による星形成とガス・ダスト進化の研究は、銀河研究を astronomy から astrophysics へとステップアップするために本質的に重要なものとなりうる。特に金属量の関数としてのダスト-ガス質量比は銀河進化理論における新たな試金石として用いられ、また遠方銀河のガス質量のトレーサーとしても使われ始めてい

る。さらにダスト表面での分子形成反応は、初代星形成以降の宇宙の分子形成を支配する過程であり、銀河進化の鍵となる素過程であることは間違いない。しかし、ダストの役割は、早い時期から重要性は認識はされてはいるものの、深く追求した観測研究はこれまで十分にこなされてこなかった。SPICA のカバーする中間・遠赤外線はこの理解を進める格好の波長であり、2.5 m 程度に口径縮小された場合でも大型冷却望遠鏡による広波長範囲・高感度・高空間分解能の独創性・優位性は保たれると結論できる。

2.3 SPICA による恒星形成と惑星系形成に関するサイエンスのレビュー

これまでの検討により、SPICA によって大きな進展が期待される、星惑星系形成研究のサイエンスケースとして以下が挙げられていた。

- HD 輝線を用いた原始惑星系円盤ガス質量の精密定量
- [OI] 63,145 μm 輝線により探る円盤ガス冷却率および散逸過程
- H_2O ice, gas の観測による円盤水分布進化
- カイパーベルトレベルの残骸円盤の初検出
- 太陽系外縁天体の物理パラメータの決定

これらは遠赤外線での高感度という SPICA の特徴を活かした、他大型プロジェクトによっては実現が難しいサイエンスケースであり、SPICA のユニークさ・重要性を端的に表している。一方、SPICA プロジェクトにおいて、従来の 3 m クラス望遠鏡計画から口径 2 m クラスへ縮小する可能性が生じ、上記サイエンス達成に影響が出る可能性が懸念された。そこで今回、その影響を評価し、口径 2 m クラスの SPICA プロジェクトにおいて有意義なサイエンスが可能かどうかを検証する。

結論から言えば、星惑星系形成の上記サイエンスケースにおいて、ターゲット天体はほぼ点源であるため、口径縮小による factor 2 程度の点源感度の悪化はあるものの、科学的意義が無くなる程の影響はないことがわかった。以下に詳しく説明する。

「HD 輝線を用いた原始惑星系円盤ガス質量の精密定量」は、HD 輝線を用いることで従来のダスト連続波や CO 輝線、 H_2 輝線による円盤ガス質量の観測的定量に比べて、系統的な誤差要因の少ない新しい計測手法として注目されている ([4])。しかしながら、これまでは Herschel/PACS による近傍の T Tauri 型星 TW Hya (距離 56 pc) の観測例しかなく、ガス散逸過程を統計的に理解することが難しかった。SPICA では Herschel に比べて約 10 倍の感度向上が期待されていたため、多数の近傍星形成領域 (140 pc) の円盤からの検出が期待できる。口径縮小による factor 2 程度の点源感度悪化を考慮しても、なお近傍星形成領域を Herschel での TW Hya 観測と同等レベルを達成可能であり、ターゲット数を大幅に増加でき、初めて統計的な議論ができると期待できる。

「[OI] 63,145 μm により探る円盤ガス冷却率および散逸過程」では、口径縮小の場合でも近傍星形成領域の円盤からの 63 μm 輝線の検出は半数は可能と予想する。一方で 145 μm の検出は半分を下回ると予想されるが、まだ統計的な議論が可能なレベルであり、期待されるサイエンスの達成は十分可能であろう。

「 H_2O ice, gas の観測による円盤水分布進化」は、63.3 μm の水蒸気輝線の観測が口径縮小の影響を受けるが、依然多数の天体で検出可能と予想する。63.3 μm の水蒸気輝線は Herschel/PACS により Taurus 分子雲中の T Tauri 円盤 12 天体 (アウトフロー天体も含む)、Herbig Ae 円盤 2 天体で検出されており、 $10^{-17} \text{ W m}^{-2}$ 程度のフラックスである (e.g., [8])。ただし TW Hya では検出されておらず、モデル計算予想 ([32]) では 63.3 μm において $8.48 \times 10^{-18} \text{ W m}^{-2}$ なので、これを典型的な星形成領域である 140 pc 先に外挿すると約 $1.4 \times 10^{-18} \text{ W m}^{-2}$ となる。とはいえ、まだ検出は十分可能なレベルであり、多波長での H_2O 輝線の

検出とモデリングにより、スノーラインの位置の推定などのサイエンスが遂行可能である。一方で H_2O ice $44\ \mu\text{m}$, $62\ \mu\text{m}$ feature の検出は連続光とのコントラストのみが問題であり、口径縮小の影響をあまり受けないと思われる。むしろ幅広い波長域 ($35\text{--}70\ \mu\text{m}$) をきちんとカバーし、連続光レベルを捉える事が重要で、それさえ達成可能であれば円盤氷の熱史の統計的な描像が SPICA で初めて得られると期待できる。

「カイパーベルトレベルの残骸円盤の初検出」は、実現できれば我々の太陽系のカイパーベルトの一般性を検証できる、大変意義深いサイエンスである。このサイエンスケースは、コンフュージョンリミットを超える必要があるため、1年以上の時間間隔で2回以上の観測を行い差分を取ることで銀河背景光の影響を除去し、初めてカイパーベルトレベルの非常に淡い残骸円盤を検出するという野心的な観測計画である。口径縮小の影響は、感度面よりもむしろ空間分解能の低下による固有運動の検出の困難に由来する。 $3\ \text{m}$ クラスから $2\ \text{m}$ クラスへの縮小により、観測可能ターゲット数は MW($85\ \mu\text{m}$) で 19 個から 8 個へ。SW($47\ \mu\text{m}$) で 43 個から 20–30 個にそれぞれ減少する。ただし、カイパーベルトレベルの残骸円盤を初めて捉えるという新規性、およびそれにより我々の太陽系カイパーベルトの一般性を検証する意味でも、少数ターゲットでも意義深い成果となると期待されるため、科学的重要性を著しく損ねるものではないと思われる。

「太陽系外縁天体の物理パラメータの決定」は、TNO (Trans Neptun Object) のサイズ分布を調べる観測計画である。Herschel では 150 個程度の TNO の観測があるが、感度の限界により衝突進化を経ていない $100\ \text{km}$ 以上の天体に限られているため、残骸円盤の観測と直接比較すべき衝突進化を経た天体サイズ ($100\ \text{km}$ 以下?) の情報は少ない。SPICA の高い感度を活かすことで、このサイズの天体の個数分布を描き出すことができる。口径縮小による感度悪化により、検出限界サイズが $30\ \text{km}$ から $50\ \text{km}$ 程度に悪化するが、それでも科学的意義を著しく損ねるものではない。

3 SPICA サイエンス検討の今後の方向性に対する提言

3.1 SPICA による系外銀河研究の方向性

SPICA による遠方銀河の分光観測は、他のミッションでは遂行できない、ユニークかつ先駆的研究分野である。赤方偏移ごとに星形成銀河の一般的な性質を知るためには、多数の銀河を観測し統計を稼ぐことに加え、少なくとも、各時代の典型的な明るさ（例えば光度関数の折れ曲がりで定義される L^* ）を持つ銀河まで含むような光度範囲をカバーする必要がある。しかし、SPICA の感度を持ってしても、 $L_{IR} < L^*$ の銀河について物理機構の解明に必要とされる複数の輝線を検出できるのは、 $z < 2$ の宇宙に限られる（図 1）。 $z > 2$ については、分光でガス輝線診断ができるのは例外的に明るい超大光度赤外線銀河のみに限定されてしまうため、 L^* よりも十分暗い銀河までを狙った測光観測サーベイ（つまり物理よりも探索）にまずは重点をおくという選択肢もある（4.1 節参照）。一方、銀河進化は環境にもよることが知られており、銀河団が入るくらいの体積（ $V > 10^7 \text{ Mpc}^3$ ）をカバーできるサーベイが望ましい。

このような銀河進化研究の現状を踏まえ、ここでは SPICA による銀河進化研究のための分光サーベイ戦略、特に広視野サーベイ戦略について考察する。系外銀河研究における SPICA の科学目標は大きく分けて

1. 銀河成長・物質進化過程の解明
2. ダストに隠された銀河成長最盛期
3. 星生成と物質進化の相互作用

とまとめられる。特に、広視野分光サーベイで大きな成果が上がると期待されるのが 2 のダストに隠された銀河成長最盛期についてのサイエンスである。この戦略を考えるうえで、SPICA チームから提示されたサーベイ案である、MIR: $R = 50$ で 10 平方度、FIR: ターゲット型のグリズム分光という 2 つの要素を念頭に置く必要がある。

SPICA によるレガシーサーベイ戦略を模式的に表したものが図 2 である。 $R \sim 3$ 程度で広い領域（ $\sim 50 \text{ deg}^2$ ）を観測する浅いサーベイから、 $R \sim 20$ 程度で狭い領域を深く観測するサーベイまでをすばる望遠鏡 Hyper Suprime Cam (HSC) の探索と比較して表している。これを元にして、SPICA による広域サーベイによるサイエンスミニ WS などを通じて提案された重要なサイエンステーマを考慮した最適サーベイ提案を議論する。

星形成バースト銀河出現の「時間」と「環境」と「原因」

銀河進化において近年注目されているのが“宇宙の正午”という概念である。赤方偏移 1-3 の宇宙では、星形成率、ブラックホール降着率、そして銀河の平均的ダスト減光が最大になることが知られている（[15]; [12]; [20] 他）。特に SPICA で期待されるダスティな銀河の種族に注目すると、 $z > 2$ における星形成密度へのダスティスターバースト（以下 DSB）の寄与の変遷を解明することが重要なテーマとして見えてくる。たとえば、DSB の出現環境、原始銀河団での超過（楕円銀河の形成現場）、DSB のトリガーは銀河合体またはガスリッチバーストか、AGN 活発化との関係は、など明らかにすべき物理は非常に多い。

ここ 10 年で注目されているのが、星形成銀河の星質量と星形成関係がタイトな相関を持つことである。これは星の進化になぞらえて「星形成銀河の主系列」と呼ばれている。この傾きは 1 よりも小さく、銀河のスケーリングで予想される自明な（対数）線型関係ではないことも注目される。つまり、成長した銀河ほど単位星質量当たりの星形成効率は落ちていく。比較的ゆったりした永年の進化をしている銀河は、このトラック上

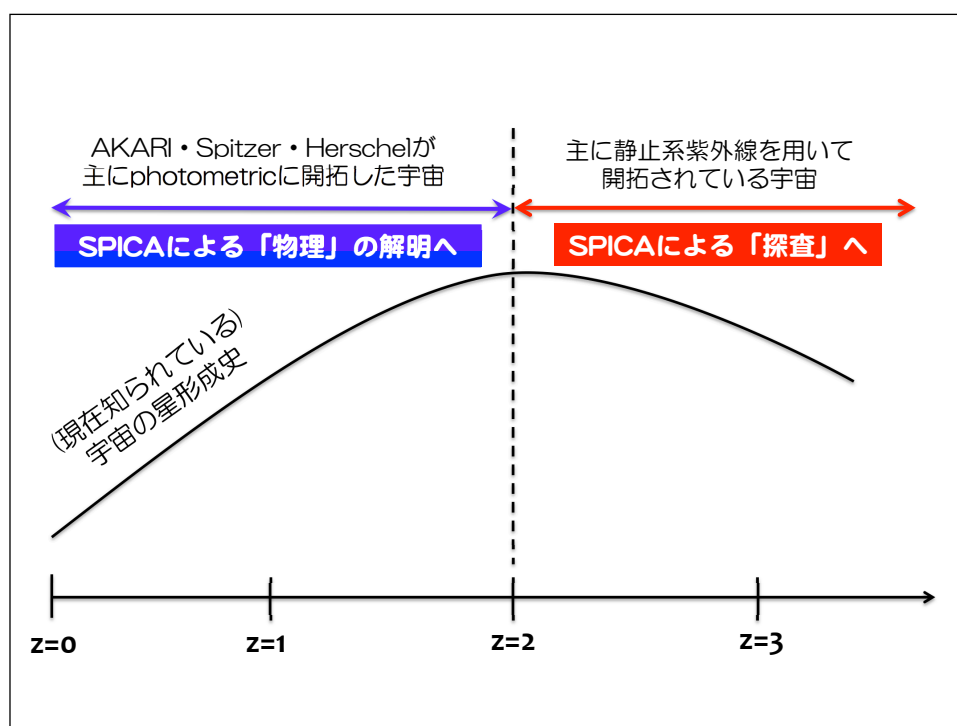


図1 SPICA サイエンスの (新しい) イメージ図。

を星質量が大きくなり、星形成効率が落ちる方向に動いていくと考えられている。ところが、よく知られていることだが赤外線銀河 ($\sim$ DSB) はこのトラック上に乗らない。これらの種族では、星質量に比べ星形成率が何桁も高くなっている。そこで、永年進化をしている銀河が合体等のトリガーによりバースト的星形成にモードが変わることで主系列を離れ、その後ガスの枯渇とともに星形成を停止して主系列よりも下に移動してゆくというシナリオが考えられる。星形成を停止した銀河はこの図上からは消えてしまうが、古典的に知られている銀河の色-等級図ではレッドシーケンスに乗っていくことになる。

また、“宇宙の正午”の銀河で起きている物理過程を詳細に解明することも重要である。近赤外域での多天体分光装置による大規模な近赤外分光サンプルの構築によって、星質量-金属量-星形成率関係や輝線比診断による AGN の活動性/銀河の物理状態が明らかになってきている。ところがダストで覆われた銀河では、減光が強いため近赤外分光による観測は困難になる。たとえば赤外銀河の金属量が可視光セレクト銀河の星質量-金属量関係よりもずっと低く表れる現象が知られており、これは金属量診断のための輝線がダストによる強い減光を受けているためであると解釈されている ([30] など)。金属量診断のためにもダストの影響を受けない方法が不可欠であり、SPICA による分光診断が本質的重要性を持つ。

以上のように、DSB 銀河進化シナリオの検証が SPICA サーベイの急務であることは言を待たない。PAH の $7\mu\text{m}$ フィーチャーを念頭に置き、標準的赤外 SED モデルを用いて評価すると、たとえば $z \sim 3$ で星形成率が $\sim 40 M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ までの銀河を 1 時間の積分で 5σ で検出可能である (後述: 図 4)。懸案となるのは空間解像度で、SPICA の口径がどの値で決定するかによってこのサーベイの威力が大きく影響されることは言及しておかなくてはならない。

レガシーサーベイの一例

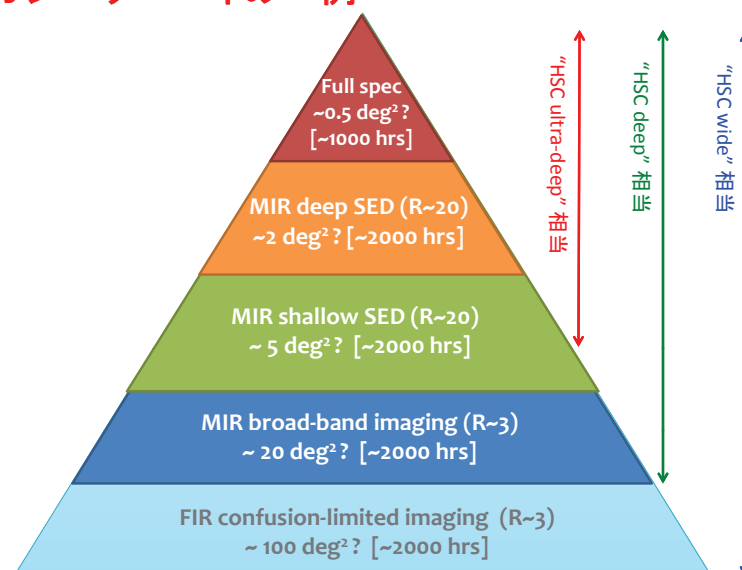


図2 SPICAによるレガシーサーベイ戦略の模式図。 $R \sim 3$ 程度で広い領域($\sim 50 \text{ deg}^2$)を観測する浅いサーベイから、 $R \sim 20$ 程度で狭い領域を深く観測するサーベイまでをすばる望遠鏡HSCの探索と比較して表している。

サブ/ミリ波輝線銀河探索 (CO/[CII] Tomography) と SPICA

SPICAのカバーする波長域を考えれば、サブミリ波/ミリ波観測とのシナジーは自明である。宇宙の星形成史におけるダスティ銀河の役割を考える際、より高赤方偏移になれば赤外線銀河の種族はサブミリ波での主たる観測対象(サブミリ波銀河: 以下SMG)になる。

サブミリ波では、SIXER (SCUBA-2 Imaging Exploration of the Epoch of Reionization) というプロジェクトが始動している。これは $850 \mu\text{m}$ での広域サーベイで、 33 deg^2 、medium-deep ($\sigma = 3 \text{ mJy/beam}$) を目指している。目標は発見からコンプリートなフォローアップへの橋渡しとなることで、このため4つの有名深探索領域 (XMM-LSS, ECDF-S, E-COSMOS, ELAIS-N1) を観測する。サイエンステーマはHerschel (HerMES) が探索できなかった $z \sim 7$ までのSMG探索(ダストで隠された星形成史、金属量進化、銀河計数、ダスト減光則)、超大質量ブラックホールと母銀河の共進化、低赤方偏移銀河の低温度ダストの検出、そして $z \sim 1$ 銀河サンプルによる“宇宙の正午”の解明などである。

SPICAとのシナジーとしては次のような可能性が考えられる。

- **連続光撮像 (SMI):** SMIによる低分散 ($R \sim 50$) での中間赤外線高感度撮像/低分散分光によって、PAH/silicateを用いたSIXER SMGの赤方偏移を推定する。またPAH/連続光比によってAGN診断を行う。
- **中間/遠赤外線分光 (SMI, SAFARI):** Spitzer/IRSは感度に限りがあり、Herschel/PACS分光はあまりに波長範囲がせまかった。ほぼ未開拓の中間(遠)赤外線広帯域分光は、サブ/ミリ波サーベイとの相補性の観点から魅力的である。SIXER SMG(そこそこ明るくそこそこ多い)に対する輝線診断

(metallicity, UV hardness, e^-/H density) を行う。

さらに、LST 計画とのシナジーの可能性も考えられる。上記と同様、こちらでも SPICA による中間/遠赤外線分光輝線診断を行える利点がある。また中間赤外からミリ波に至るまでの(所々サブ/ミリ波に大気吸収があるものの)連続的なスペクトルを高波長分解能($R \sim 10^2\text{--}10^3$)で達成できる。これによって星間物質由来の主要輝線を全て検出し、電離領域-PDR-分子雲に至るまでのシームレスな物理診断を行えることは極めて画期的である。

以上のように、SPICA 広視野サーベイはサイエンスの見地からみて有機的かつ画期的なテーマを提供することが分かった。とはいえ、SPICA での広視野サーベイは様々なサーベイとのシナジーという点で需要はあるが、それだとやや自明すぎて説得力に欠けるきらいがある。詳細な議論は後述するが、広くコミュニティの支持を得て SPICA 計画を進めるためには、MIR 広視野サーベイ“だからこそ”見つかるような種族が宇宙にどのくらい存在するのか、それは果たして面白いのかという疑問に答えておく必要がある。実は、図 4 で示されているように、そのような天体は相当数宇宙に存在する。そして、それらは赤外線光度関数の luminous end のような「極端な」種族には限らない。むしろこれまで多くの研究がおこなわれてきた静止系紫外線で主に検出されている種族と連続的につながるような天体である。このように、SPICA の広視野サーベイは、銀河進化研究の本来の目的である「銀河進化の平均像」を解明するための最適な手段を提供する。SPICA チームの提示するサーベイ戦略は実はサイエンス面で最適化されていることが分かる(図 3)。

SPICA 広視野サーベイへの戦略

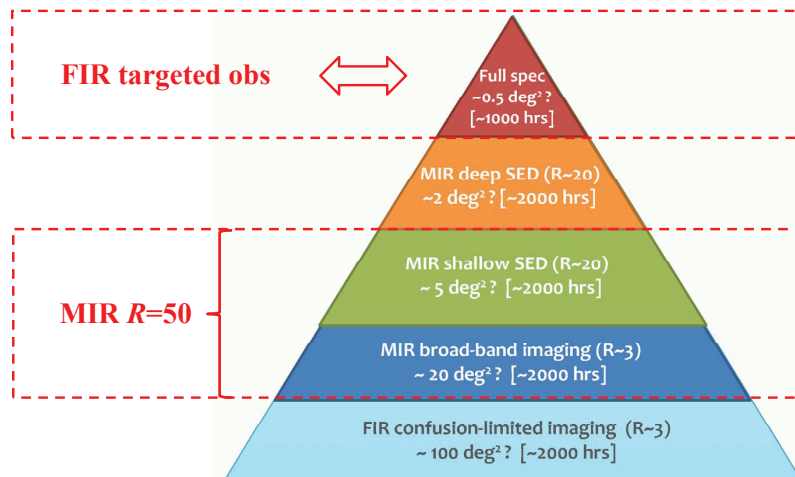


図 3 SPICA によるレガシーサーベイの「最適」戦略。

3.2 SPICA による銀河系内研究の方向性

本節では、SPICA を用いた銀河系内天体、特に星・惑星形成分野における観測戦略の妥当性について議論する。SPICA が打ち上げられる 2020 年台後半までには、ALMA, TMT, JWST 等の他波長の観測施設を用

いた観測の進展により、現在よりも更に惑星形成研究が進展していると予想する。具体的には、0.1 秒角を切るような惑星形成現場の高解像度観測による、原始惑星系円盤内での形成中の惑星・周惑星系円盤の直接検出が可能となり、惑星形成過程の詳細が見えてくるだろう。また、様々な分子の円盤内での分布も明らかとなり、ガスの散逸過程や分子をプローブとした原始惑星系円盤の温度・圧力構造等の理解も進展すると予想する。

そのような中で、SPICA はカバー波長が基本的に波長 $20\ \mu\text{m}$ より長波長側であり、JWST や TMT などの次世代巨大プロジェクトのカバー波長と差別化されており、直接の競合はない。したがって、他波長ではできない、中間・遠赤外で可能なユニークなサイエンスの追求が本質的に重要であることは自明である。ただし、口径が限られていること、および長波長側ということで回折限界空間分解能も $1''$ を超える等、空間分解能が限られているため、多くの天体は残念ながら点源状であると考えられる。よって、SPICA の銀河系内天体に対する観測戦略は比較的シンプルであり、点源天体を感度リミットで集めたサンプルに対する統計的研究を進めることが、主要サイエンスとなると考えられる。

そのような観点から、先の節でも提示した、現在提案されている以下の3つの観測提案は、サイエンス的にも明快かつ SPICA の特徴を活かしており、2020 年台後半においても重要であると思われる。

- HD 輝線を用いた原始惑星系円盤ガス質量の精密定量によるガス散逸過程の理解

円盤ガスの散逸過程を理解することは、巨大ガス惑星の形成過程の理解において本質的である。2020 年代後半までに ALMA が CO 等のガス輝線や、ダスト連続波の観測で一定の成果を挙げると予想されるが、CO 等のガスはダスト凍結の不定性、ダストはガスダスト比の不定性の問題があり、ガスの主要成分である H_2 の質量の絶対精度の向上は難しいと予想する。SPICA による HD の観測は、ダスト凍結やガスダスト比の不定性の影響を受けることがないため、円盤ガス質量の絶対精度を高めることができる。ガス質量という基本的な物理量をきちんと抑えることの重要性、および冷却望遠鏡による高感度という SPICA の特徴も活かしており、2020 年代後半になっても色褪せないサイエンスであると考えられる。したがって、戦略としてはシンプルであり、近傍星形成領域に存在するできるだけ多数のサンプル (>100 天体以上) のレガシープロジェクトを進めることとなるであろう。

- H_2O ice, gas の観測による円盤スノーラインの探査および氷熱史描像の確立

H_2O は、主要な分子というだけでなく、惑星にどのように水がもたらされるのかという観点から、生命発生環境の一般性を考える上でも重要な分子である。また、 H_2O が固体氷となる境界をスノーラインと呼ぶが、これが地球型惑星と巨大ガス惑星の領域を分けたと理論的に考えられており、スノーラインが円盤のどこに存在するか（理論予想通りか）を検証することは系外惑星系の形成条件を観測的に規定する上でも重要である。しかしながら、地球大気の豊富な水蒸気のため、地上からの観測は非常に限られ、またスペースからの観測でも Herschel の観測は限定的であった。JWST は中間赤外域の H_2O 輝線の検出に力を発揮すると思われるが、スノーラインの検出に至るかどうかは未知数である。というのは、JWST を持ってもスノーラインの直接空間分解は難しく、かつ $R \sim 3,000$ 程度ということもあり速度分解も難しいと予想されるからである。一方で、複数の中間赤外水蒸気輝線の検出と、それらの輝線強度比のモデリングを通しての間接的なスノーラインの位置への制限は JWST でも進むと予想される。ただし、Spitzer 宇宙望遠鏡で検出されている強度の強い中間赤外域の H_2O 輝線の励起温度は軒並み $1,600\ \text{K}$ を超えており、スノーラインのような低温領域のトレーサーとはならない可能性がある [32]。

そのような状況で、SPICA では SAFARI による遠赤外域の水蒸気輝線観測が可能となる。遠赤外 H_2O 輝線は励起温度が低いため、その輝線強度比のモデリングを通じて低温 (dust 温度にして $\sim 140\ \text{K}$ 前後) のスノーラインの位置への強い制限を与えることができる。また、SMI の中間赤外高分散分光モー

ドが実現すれば、ラインプロファイルの議論によりスノーラインの位置への制限が可能となる (4.3.3 節参照)。これらは、SPICA により可能となるユニークかつ重要なサイエンスとなりうる。

また、 H_2O 氷の $44\ \mu\text{m}$ の観測も、低温領域の H_2O 氷の熱史を探る上で、これまで観測的に探ることができなかった描像をもたらしてくれると予想する。

これらのサイエンスは 2020 年台後半においても、SPICA 以外で成されることは難しい重要なサイエンスであり、その重要性は変わらない。

- カイパーベルトレベルの残骸円盤の初検出による太陽系カイパーベルトの一般性検証

太陽系は一般的か? という命題は、様々な観点から検証されつつあるが、その一つに我々の太陽系のカイパーベルトの一般性の検証がある。太陽系のカイパーベルトの fractional luminosity $f_d = \frac{L_{disk}}{L_*} \sim 10^{-7}$ レベルと大変暗く、現状では SPICA 以外の観測では難しいと考えられる。SPICA もコンフュージョンリミットにより、観測可能なターゲット数には限界があるが、限られた天体数とはいえ、カイパーベルトの一般性検証は、2020 年代後半になっても大変魅力的なサイエンステーマであることは明らかである。

SPICA の観測波長は基本的に波長 $20\ \mu\text{m}$ より長波長側であるが、波長 $20\ \mu\text{m}$ より短波長側の機能については、JWST との機能的競合をよく考える必要がある。波長 $5\text{--}28.3\ \mu\text{m}$ において、JWST は MIRI という観測装置を持っており、波長分解能 $R = 3,000$ 程度で、視野 $3.5'' \times 3.5''$ の IFU 分光が可能である。よって、低～中分散分光機能は、感度的、空間分解能的に SPICA で勝ることは難しいと予想する。JWST 等で実現できない、高分散分光などの優れた機能仕様を実現することが、SPICA の $20\ \mu\text{m}$ より短波長側の機能が活きる道であると考えられる。

4 SPICA の機能拡張やサイエンスの新たな方向性に関する提言

4.1 中間赤外線帯での広域撮像観測による銀河進化研究の可能性

SPICA の最大の特長は、冷却望遠鏡として中間赤外～遠赤外線域でかつてない感度を達成できることである。特に天体コンフュージョンの影響が小さい分光観測においては、従来の赤外線宇宙望遠鏡と比べて飛躍的な感度上昇が見込めることは上述のとおりである。一方で撮像観測については、すでに (SPICA 以上の口径をもつ) ハーシェル望遠鏡によって、遠赤外線での広視野撮像サーベイ、あるいは深撮像サーベイが大規模に行われていることから ([11][26] 他)、単純に考えれば SPICA は分光観測に特化すべきであると考えられるかもしれない。しかし、たとえば $20\ \mu\text{m}$ – $50\ \mu\text{m}$ 帯という波長域は、過去のスペース赤外線観測の未開拓ゾーンであり、日本が主導する SMI を用いてこの波長帯で世界をリードする広視野深撮像サーベイを行う可能性は十分に検討されるべきである。

より具体的には、静止系 $8\ \mu\text{m}$ 帯を狙った観測により、赤方偏移 4 を超える宇宙までダストに埋もれた銀河を探索できることに注目したい。図 4 には、口径 2 m の SPICA を想定した場合に、各時代の銀河について SPICA で到達できる感度を示した。この図からいくつか重要な事実が読み取れる。まず、現在の「赤外線セレクト銀河」といわれる銀河サンプルは、赤方偏移 ~ 2 の宇宙で ULIRG クラスの銀河を検出するのが限界であり、それより遠方では例外的に明るい $10^{13} L_{\odot}$ クラスの銀河を除いて個々の銀河のダスト放射を検出することはできていない。それに対して SPICA では、 $20\ \mu\text{m}$ 帯では既存の Spitzer 望遠鏡の感度を 1 桁近く上回り、さらに同一の指標を用いて赤方偏移 ~ 4 まで赤外線銀河の「探索」が可能になる。これはまさに Section 3.1 で述べたポイントであり、赤方偏移 ~ 2 を超える宇宙の赤外線銀河を SPICA で「探し出す」ことができれば、2030 年代以降の時代の銀河天文学に大きな遺産を残すことができるだろう。

SPICA がキーサイエンスとして狙う「遠方銀河のサーベイ」という観点で、我が国のコミュニティを見つめなおしたとき、その最大の特徴は、やはり今世紀に入ってからすばる望遠鏡による広視野サーベイに基づいた成果が挙げられるだろう。実際に、我が国の遠方銀河コミュニティは、2014 年より本格的に運用を始めたすばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam (HSC) に代表されるように、さらなる超広視野サーベイの道に活路を見出しているという現実がある。しかしながら、SPICA チームがこれまで提示してきた 1 平方度の「宇宙論的サーベイ」は、この流れのなかで必ずしも相補的な位置づけになっていなかったように思われた。^{*1}

しかし実際には、HSC をはじめとする地上望遠鏡による遠方銀河探索で得られる情報は、主に静止系紫外線の情報のみであり、SPICA による赤外線観測とは本来相補的なものである。そこでタスクフォースでは、すばる望遠鏡等の将来計画等とタイアップした『広視野サーベイ』によるサイエンスを検討し、我が国の遠方銀河研究者を積極的に取り込んで SPICA サイエンス検討チームの肉付けをはかるべきである、という提言を行ってきた。2015 年 3 月 2 日には、タスクフォースがコミュニティを代表する研究者らに声をかけ、SPICA による広視野サーベイについての懇談会 (ミニワークショップ) を開催し、コミュニティからのインプットをいただいた。そこでは、集まっていた皆さんが現在進めている (あるいは計画されている) 研究・プロジェクトの概要を紹介していただき、今後の方向性と SPICA への期待を述べていただいた。

合計 21 名の参加者を迎えて行われた本ワークショップでは、塵に埋もれた銀河種族が、いつ、どこで、どのように現れるのか、という興味は全員に共通しており、特に赤外線域での星形成/AGN のエネルギー源の切

^{*1} 最近の仕様変更によって SMI はスリット・スキャンタイプの分光マッピングを約 10 平方度にわたって行うという計画が提示されており、地上の大規模サーベイとの連携という観点でイメージが持ちやすくなった。2015 年 5 月現在、SMI の最新の仕様ではスリット・スキャンにおけるスリット位置の正確な把握のために約 $10' \times 10'$ 視野の撮像機能の搭載も検討されており、さまざまなサイエンスに応用できる魅力的な赤外線望遠鏡という観点でこの機能の有効活用は十分に検討するべきであろう。

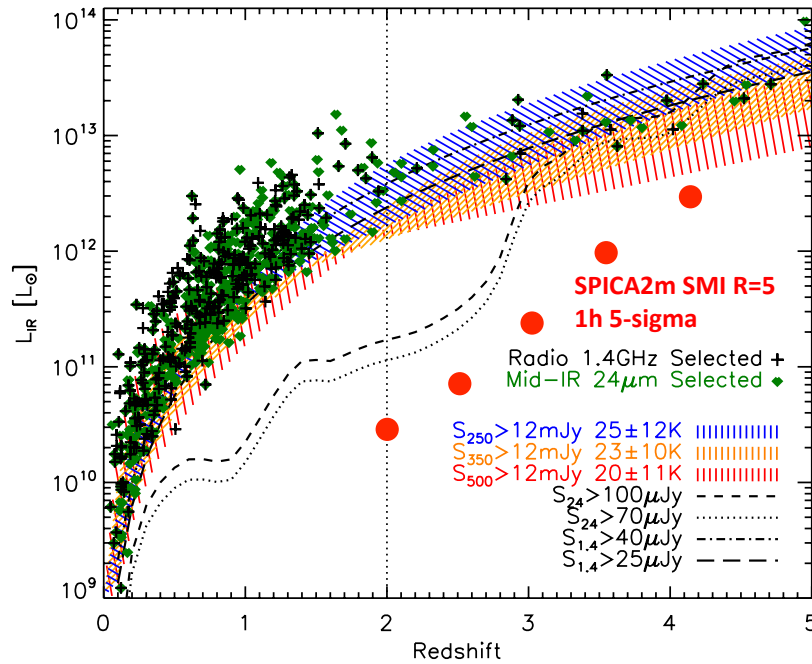


図4 口径2 mを仮定した場合に、静止系8 μm を狙ったSMIの撮像観測によって到達できる感度(1時間、5 σ)を[7]の赤外線銀河のSEDテンプレートを利用して赤外線光度に変換し、[6]の図に重ねたもの。赤方偏移 ~ 2 ではSpitzerの感度を1桁近く上回り、赤方偏移3を超える宇宙の銀河でもLIRGクラスの銀河のダスト放射を個別に検出できることは特筆すべき事実である。

り分けという点にはやはり高い関心が集まっていることが分かった。そして、SPICAでの「広視野」サーベイについては、様々なサーベイとのシナジーという点で期待が寄せられていることも確認された。ただし、参加していただいた方々の意見を踏まえれば、たとえば中間赤外線の広視野サーベイ「だからこそ」見つかる種族が宇宙にどのくらい存在し、それらが果たして面白い種族であるのか、という質問に明確な回答が与えられる必要があるだろう。すなわち、SPICAによる広視野撮像サーベイが、漠然とした「宝探し」であるような印象を持たないように気をつける必要がある。一方でこの点については、今後のALMA等の進展で新しい需要が発生する可能性は十分にあると考えられ、今後もALMAの研究者と密に連携し、SPICAの科学的価値を高めていく努力が必要である。

また、現在提案されている分光マッピングという手法についてはその必然性を明確に、かつ定量的に示す必要があるだろう。たとえば、シンプルな撮像をまずはじめに行った上で、検出された天体を個別に分光フォローアップしていくという戦略に比べて、スリットスキャンという方法が観測効率・実現できるサイエンスの観点で本当に優れているのか、注意する必要がある。撮像だけでは分からない新しい情報が分光観測から詳細に分かるのは当然であるが、分光観測といえども物理量を導き出す際には様々な仮定や不定性があり、こういった不定性をどう克服していくべきかについても十分な議論を重ねておくべきである。

4.2 20 μm よりも短波長でのトランジット分光観測の可能性

1995年に初めて太陽系外惑星が発見されて、これまでに2000を超える惑星が報告されている。また、2009年に打ち上げられたKepler衛星によって、多数の地球サイズの惑星が発見され、近傍宇宙において地球型系

外惑星は普遍的な存在である事が分かって来た。このように、太陽系外惑星の研究分野は急速に発展し、後述するように、SPICA の打ち上げが予想されている 2028 年には宇宙における生命科学に関する課題がその中心にあるだろう。本節では、高感度の SPICA 望遠鏡にトランジット専用の分光器が搭載される場合に、太陽系外惑星科学がどのように進展するか、先に打ち上げが予定されている JWST を視野に入れながら議論する。

4.2.1 JWST におけるトランジット分光

JWST は 4 つの観測装置から構成されており、汎用の分光装置が搭載されている。このうち、NIRSpec の限界等級は 11 等 (J) なので、先に述べた TESS や PLATO によって発見が期待される近傍の明るい恒星周りの惑星の分光観測には不向きである。そこで、それ以外の 3 つの観測装置、NIRISS、NIRCam、MIRI/LRS を利用して、0.6-12 μm の広帯域のスペクトルを計 4 回（このうち 2 回は NIRCam）の観測から取得することが考えられている。これが実現されれば、一次食および二次食から惑星大気に含まれる主要な分子（二酸化炭素、水蒸気、一酸化炭素、メタン、アンモニア）の組成比を精度よく導出されることが期待される。対象天体は、100-200 の木星型から氷型惑星（4 地球半径以上）、20-30 の小さな海王星（2-4 地球半径）である。数十回のトランジット観測が必要な地球型系外惑星については、軌道上での装置のキャリブレーション次第で観測の実現可否が分かると考えられている ([3])。従って、HST や SST が対象とした木星型惑星だけでなく、小さい半径を含めた様々な惑星に対する特徴づけができることが期待されている。

JWST におけるトランジット分光の問題点

JWST の大口径により photon noise を抑えることで精度の向上が期待される。その一方、JWST の各装置はトランジット分光専用ではなく汎用であることから、その到達できる精度に問題があることが指摘されている。一般に、高精度測光には、PSF を複数でサンプリングすることが必要である。理由は、望遠鏡の指向誤差や光学系内の変化によるデフォーカスによって検出面で光子があたる位置が変化し、検出器のピクセル間の感度ムラやピクセル内の感度ムラが存在するために天体からの光量が見かけ上変化する。一般的に、2 ピクセルサンプリング以下になると、ピクセル内の感度ムラの影響が大きくなり、それ以上ではピクセル間の感度ムラによって測光精度が制限される。例えば、SST は PSF のサンプリング数が少ないため、ピクセル内の感度ムラの影響が顕著に見られ、地上望遠鏡では可視赤外線スペース望遠鏡に比べて指向精度が悪いため、像をデフォーカスによって大きくしてもピクセル間の感度ムラの影響が見られる ([9])。JWST は、指向精度は 6-8mas と非常に良いが、各装置は様々な機能を搭載する理由から PSF の半値全幅に対して、NIRISS を除いて、1 から 2pixel 程度である。その結果、NIRISS を除いて、その測光精度は 10 の -3.5 乗程度に制限される ([3])。この精度の改善には、多数回の重ね合わせが要求され、各装置で取得できる観測帯域幅は制限されていることから広いスペクトルの取得には膨大な時間が必要となる。ただし、測光精度を制限している誤差がランダムであるという仮定が成立するときである。

複数の装置で計 4 回のトランジットからスペクトルを生成することも問題である。トランジット分光は、恒星と惑星の両者を同時に取得して分光するものである。ここで、トランジット中あるいは前後で恒星の彩層活動が変化すれば、食の深さは変化し、惑星からのシグナルを正しく導出できない。特に、可視光から近赤外においてその影響は顕著である。複数回にわたる食の観測においても同じである。すなわち、トランジット観測の間に恒星の彩層活動が変化することにより、得られる複数のスペクトルの間でオフセットが生じる。彩層活動の変化は系統誤差を生む原因となり、惑星の大気組成を正しく導出できない。

以上まとめると、JWST は、木星型惑星からスーパーアースサイズの様々な惑星についての特徴づけが期待される。その一方で、JWST は複数の汎用の分光装置から構成されるため、トランジット一回あたりの観測ではその測光精度が系統誤差によって制限され、ミニネプチューンより小さい惑星の観測には、複数回の観

測による測光精度の向上が要求される。また、各装置での観測帯域は狭いため、広帯域のスペクトルの導出には、複数の観測装置によるトランジット観測が必要である。しかし、主星の彩層活動の影響によりスペクトルを正しく導出できない。これらを考慮すると、JWST における小さい惑星の観測は、観測時間および系統誤差の観点から不定性が大きいことが予想される。従って、SPICA で開拓すべき新たな領域は、ハビタブルゾーンにあるスーパーアースから地球サイズの惑星の特徴づけであろう。これは、太陽系外惑星科学の最大テーマである。

4.2.2 SPICA におけるトランジット分光観測の戦略

SPICA は JWST に比べておよそ 10 年後の打ち上げであり、また非常に高価な望遠鏡である。従って、SPICA のトランジット分光観測は、JWST でできないユニークな天体を対象にし、かつ科学的意義が非常に高くなければいけない。それは、先に述べた、ハビタブルゾーン内外にあるスーパーアースから地球サイズの惑星の特徴づけによるハビタビリティの観測研究である。これは、単に惑星科学の延長ではなく、宇宙における生命という新たな視点をもたらし、私たち人類の生命観に大きな影響を与えるものである。なぜなら、様々な特徴を有する水星・金星・地球・火星との比較が可能となり、生命を育む地球がどのように誕生したのかという大きな問いに迫ることができるからである。本節では、SPICA でのトランジット分光の戦略と、その実現において鍵となる点について述べる。

観測戦略

ハビタブルゾーンにある惑星は、これまで HST や SST が対象にしてきた温度の高い惑星と異なり、温度 300K 程度の惑星である。また、スーパーアースから地球サイズの惑星は質量にして 100 倍程度小さい。このような惑星の大気のスケーラビリティは小さいため、一次食での惑星大気の追加吸収は非常に小さく、検出が非常に困難である。例えば、M 型星周りでの地球型惑星の追加吸収は、10 の⁻⁵乗から⁻⁶乗の非常に高い精度が要求される。その一方で、二次食での食の深さは大気のスケーラビリティに関係なく、恒星と惑星の温度および半径によって決定する。ここで、M 型星のような温度の低い主星では、その惑星との温度差は小さく、要求される精度は緩和される。図 5 は、現在検出されているトランジット惑星系の 10 μm での食の深さと、その惑星の半径の関係を調べたものである。図に示すように、木星、海王星、地球サイズの惑星で、それぞれ、食の深さは 10 の⁻²乗、⁻³乗、⁻⁴乗程度である。このように、地球サイズの惑星に対しては、一次食に比べて食が深くなるため、より実現可能性が高いことが分かる。ただし、ハビタブルゾーンにある惑星の温度 T 300K 程度の熱放射を捉えることのできる 5 から 10 μm より長い波長での観測が必要になる。また、5 から 20 μm の観測波長帯には、水蒸気、メタン、オゾン、アンモニア、二酸化炭素などのハビタビリティに関係する主要な分子の吸収線が存在する。これらの分子の吸収線は、波長方向に広い構造を持つ。以上まとめると、二次食により惑星の熱放射を観測し、その分光によって惑星の温度および大気組成を導出する。観測波長の帯域は 5 から 20 μm 、必要な波長分解能は 100 程度である。

科学的意義

小さな惑星の 2 次食による大気分光が実現されれば、太陽系外惑星科学にどのような科学的な波及効果がもたらされるだろうか？その概略を図 6 に示す。図 6 は、惑星の有効温度と質量の関数でどのような大気が保持されるかを示したものである。惑星が重くなれば、原始惑星円盤からの急速な降着が進み、H/He の大気を保持するようになる。一方、軽い惑星の周りでは、有効温度によってその大気が多様になることが分かる。例えば、55Cnc e のような、表層の温度が 1500K を超えるような惑星は、固体物質が蒸発し、シリケート大気によって覆われ、シリケートの吸収線の検出が期待される ([17])。より低温になれば、ハビタブルゾーン内外の

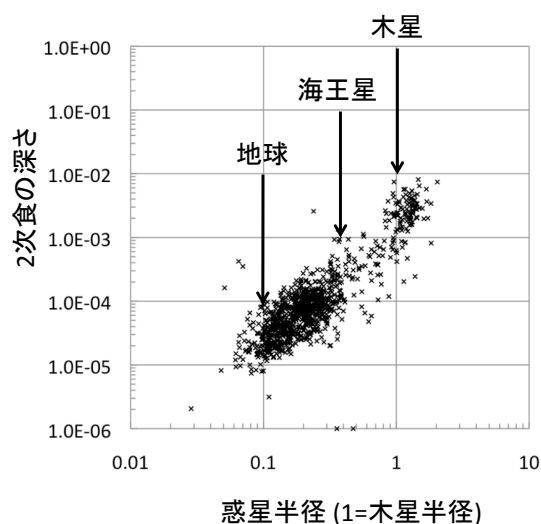


図5 現在発見されている惑星の半径と2次食の深さ

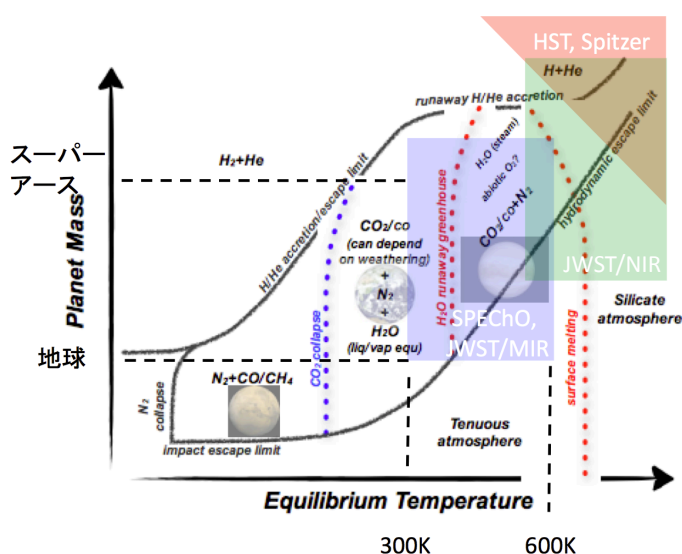


図6 惑星大気の種類 ([19]) と各衛星計画で特徴づけが可能な領域

特徴を示す大気になる。ハビタブルゾーンの内側では、水蒸気の蒸発によって温室効果に正のフィードバックが形成され、惑星表層が高温となる。この時の大気は二酸化炭素/一酸化炭素が支配的な大気であろう。逆に温度が非常に低いと、温室効果をもたらす二酸化炭素が液化し、惑星表層は凝固し、メタンや一酸化炭素の大気になるだろう。ちょうど良い温度で、地球のような大気が形成されると考えられる。ここで、SPICA は2次食の観測から大気組成だけでなく有効温度を決定することができる。また、SPICA の時代には、TESS や PLATO で発見された近傍の明るい恒星の視線速度法による追観測で質量も精度よく求められているだろう。従って、SPICA の観測によって各惑星がどこにプロットされるかが決定され、同時に大気分光によってその組成比が導出される。この図に示す理論的な予想に対して SPICA は観測的に答えを出し、生命を育む大気についての我々の理解が大きく進むことが期待される。

観測個数と観測時間

ハビタビリティの理解には、ハビタブルゾーンの内外の様々な温度の軽い惑星を網羅的に観測し、その大気の特徴を調査することが重要であろう。ケプラー衛星の観測結果に基づけば、晩期型星周りにある周期 50 日以下の地球サイズ (0.5-1.4 地球半径) の惑星は 50% の確率で存在することが分かっている ([10])。これは、トランジットする幾何学的確率を考慮しても、20pc 以内に 50 の惑星がトランジットすることが期待される。このうち、ハビタブルゾーンにある惑星は 5 個程度存在すると考えられる。各惑星に対して 100 から 200 時間の観測が必要なので、近傍の M 型星周りの地球サイズの惑星に対して特徴づけを行なう場合に、10000 時間程度が必要になるだろう。ただし、SPICA が連続的に観測できる黄道極近傍だけに限定する場合には、そのサンプル数は 1 個程度に留まる。今後、全天の惑星に対してどのようにアプローチしていくかの観測戦略を検討する必要があるだろう。

実現に向けて必要なこと

SPICA での実現において、次の三つの点を考慮する必要がある。一つ目は、波長帯域 5 から 20 μm を一度に取得することである。前節で述べたように、5 から 20 μm の波長帯域を時間方向に分けて取得する場合、恒星の彩層活動によるノイズの混入、および観測時間の肥大化を招く。二つ目は、望遠鏡の指向誤差による測光精度の悪化をできるだけ小さくするように、PSF のサンプリング数を高くすることである。幸い、地球型惑星のような惑星の特徴づけは低い波長分解能でよいので、大フォーマットの検出器を用意せずに PSF のサンプリング数を高くすることができる。最後の点は、観測帯域 5 から 20 μm での観測とは別に、恒星の彩層活動をモニターすることである。恒星の彩層活動による光度変動は、波長が長くなるにつれて小さくなる。そこで、その変動の影響が大きい可視光から近赤外線複数のバンドで観測できれば、観測帯域 5 から 20 μm での彩層活動によるノイズ混入を見積もることができる。その結果、トランジットの多数回観測による精度向上も可能となる。

4.3 20 μm よりも短波長での分光観測による様々なサイエンスの可能性

SPICA の搭載機器は波長 20 μm 以上の長波長側をカバーしている。これは先に運用を開始する JWST のほうが短波長側の感度が高いことと、冷却望遠鏡という遠赤外域での高感度を活かすという、住み分けを考慮した結果である。ただし、波長 20 μm より短波長側は分子分光の観点からは大変魅力的であり、SPICA でその波長を完全に切り捨てるのはもったいないという考えもある。特に JWST では $R = 3,000$ 程度の分光機能しかなく、SPICA に高分散分光機能を搭載すれば、それは JWST に比べても大変ユニークな機能となりうる。また、SPICA は打ち上げが 2020 年代後半となり、JWST 打上後約 10 年なので、JWST が運用していない可能性もある。その場合には、低分散観測機能も大気の影響を受けないスペース観測が可能なユニークな機会を 2020 年台後半に提供できることになる。以下に、低分散分光機能、高分散分光機能で期待されるサイエンスについて述べる。

4.3.1 20 μm より短波長での SPICA 分光観測による銀河系内天体サイエンス

SPICA には中間赤外域 (波長 5-20 μm) において波長分解能 R が数百の系外惑星トランジット観測用の分光装置が搭載される可能性が検討されている。この機能は JWST/MIRI (波長 5-28.3 μm , $R = 1,000 - 3,000$) がカバーする観測機能と大きくバッティングしている。したがって、このトランジット分光装置を用いた銀河系内天体のサイエンス (系外惑星トランジットを除く) は、JWST/MIRI で多くはすでにやられている可能性

が高く、JWST の落穂拾いのサイエンスにならざるを得ない。

しかしながら、あえてこのトランジット分光装置のメリットを挙げると、以下が挙げられる。

- JWST 打上後約 10 年の時間差を活かした、時間変動天体の観測

具体的には超新星、新星、mass-loss 天体、YSO (Young Stellar Object)、残骸円盤などの時間変動天体の分光モニタリング観測が考えられる。程度によるが、地上観測からは難しい高精度測光・分光がスペースからは可能なため、より小さな変動も捉えることができ、新しいサイエンスを開拓する可能性がある [1]。

- JWST は明るい天体 ($F_{\nu} > 10$ Jy) は飽和するので、明るい天体の観測

JWST ではその高感度故に、従来のメインターゲットであった比較的明るいソースが飽和して観測できない可能性が高い。一方で SPICA は JWST 比で 5–10 倍程度の集光力の差があるためその分だけ飽和限界は高く、明るいソースの観測が可能である。よって、このレベルの明るい天体を観測し、MIR でスペクトルカタログ作成などの研究が考えられる。

- JWST と比較して広い視野

JWST/MIRI は IFU を積んでおり、その視野は $3.5'' \times 3.5''$ 程度と比較的狭い。一方で SPICA の装置は比較的広い視野、もしくはスリット長を確保できると考えられる。したがって、星形成領域や近傍系外銀河での氷バンドのマッピングなどが考えられる。特に、銀河系内や LMC 程度の PDR 領域のマッピングを考えると、空間分解能はそれほどクリティカルではなく、広視野が重要な場合も多い。そのようなサイエンスケースにおいて、有効な装置となるであろう。

4.3.2 20 μm より短波長での SPICA 分光観測による活動銀河核サイエンス

前節でも述べられている通り SPICA のトランジット分光装置がカバーする波長域は 5–20 μm であり、JWST/MIRI のカバーする波長域と重複している。感度だけを考えるとこの波長域では JWST/MIRI の感度の方が上回り、観測開始時期も SPICA よりも JWST の方が数年以上早いため、この波長域だけに注目する場合には系外天体のサイエンスを SPICA のトランジット分光装置で推進するメリットはない。しかし、この波長域と更に長い波長帯のデータを組み合わせることで可能になるサイエンスを考えると、カバーする波長域の広さと長波長側での SPICA の感度の高さを組み合わせることでユニークなサイエンスが展開できると期待される。

この代表的なターゲットは赤方偏移がおよそ 1–3 にある超高光度赤外線銀河 (ULIRGs) であり、ULIRGs のエネルギー源が爆発的な星形成活動なのか塵に深く覆われた活動銀河核なのかを診断していく上でトランジット分光装置と SMI (およびターゲットによっては SAFARI) の組合せが非常に威力を発揮すると考えられる。広い波長をカバーした低分散スペクトルにより ULIRGs のエネルギー源を診断することができることは近傍宇宙では既に確立した手法であり (e.g., [16])、静止系波長で $\sim 5\text{--}14$ μm の広い波長帯について連続的に低分散スペクトルを取得することが要求される。この波長帯は観測波長に換算すると赤方偏移 1, 2, 3 のそれぞれで $\sim 10\text{--}28$ μm , $\sim 15\text{--}42$ μm , $\sim 20\text{--}56$ μm に相当する。JWST/MIRI は 28 μm 程度までしかカバーしていない上に、20 μm より少し長波長側で SMI の感度が MIRI を上回るため、JWST/MIRI による低分散分光観測で ULIRGs のエネルギー源の診断を進めていくことは、赤方偏移が 1 程度を超えると困難である。赤方偏移が 3 程度よりも遠方では、このサイエンスは波長 20 μm 以下のトランジット分光装置を要求しないが、宇宙における星形成活動および巨大ブラックホール活動性がともに極大を迎えていた赤方偏移 $\sim 2\text{--}3$ の宇宙で ULIRGs のエネルギー源を診断するためにはこのトランジット分光装置が本質的に重要である。なおこの赤方偏移帯で ULIRGs のエネルギー源を診断することは SPICA の主要サイエンスとしても着目されて

いるトピックであり、[NeV]14.3 μm や [OIV]25.9 μm といった微細構造輝線を用いて赤方偏移 $\sim 1\text{--}3$ の宇宙で ULIRGs のエネルギー源を系統的に診断していくことが検討されている。トランジット分光装置を用いた診断方法は微細構造輝線による診断方法とは完全に相補的であり、トランジット分光装置による個別天体観測が必要である代わりに強度が微弱な微細構造輝線を捉える必要がないため、微細構造輝線による診断が困難な低光度のターゲットに対する研究を進めることができると期待される。

4.3.3 原始惑星系円盤ガスの高分散分光観測による惑星形成過程の解明

原始惑星系円盤からの赤外線輝線の典型的な線幅は $10\text{--}20\text{ km s}^{-1}$ であり、輝線を効率よく検出するには $R > 15,000$ の波長分解能が必要となる。本節では、惑星形成領域の物理・化学構造を明らかにすることを目的とした、SPICA/HRS ($R = 20,000\text{--}30,000$) を用いた円盤ガス観測を提案する。

原始惑星系円盤ガスの散逸時間

原始惑星系円盤内のガスはダストの運動・成長を制御し、また、円盤内のガス・ダスト比は微惑星形成に影響を及ぼす。一方で円盤ガスは木星型惑星の材料であり、また、惑星軌道進化を制御する。よって、円盤ガスがいつ、どのような機構で散逸するかは惑星形成を理解する上で非常に重要な問題であるが、理論的にはまだ不明な点が多々ある。

星間分子ガスの主要成分は水素分子であるが、水素分子は等核分子で輝線が弱い。よって分子ガス質量は一般的に、ダストや一酸化炭素の観測より間接的に求めることが多い。しかし原始惑星系円盤の場合、ダストは合体成長するためその吸収係数に不定性が大きく、また、ダストが円盤内で移動するためガス・ダスト比は一定に保たれない。一酸化炭素も中心星からの紫外線照射で光学的に薄い領域では解離し、円盤外縁の冷たい赤道面付近ではダストに凍結するため、必ずしもガス質量のトレーサーとして用いることができない。従って円盤ガスの測定には、水素分子遷移線の観測を行う必要がある。

原始惑星系円盤からは宇宙望遠鏡や地上望遠鏡により、 H_2 , HD 輝線がこれまでに観測されている。Spitzer, Herschel 宇宙望遠鏡により TW Hya 周囲の円盤から H_2 , HD 輝線が観測されており、 $\text{H}_2\text{ S}(1)$ (17 μm), HD $J = 1 - 0$ (112 μm), $2 - 1$ (56 μm) の強度はそれぞれ 1.2×10^{-17} , 6.3×10^{-18} , $< 8.0 \times 10^{-18}\text{ W m}^{-2}$ である ([24][4])。 H_2 と HD の存在量比は $\text{HD}/\text{H}_2 \sim 10^{-5}$ 程度であり、HD 分子輝線はガスが豊富な円盤でも光学的に薄く質量の測定が可能であるが、ガス散逸が進むと観測が困難となる。一方 H_2 分子輝線はガスが豊富な円盤では光学的に厚いが、ガス散逸が進んだ円盤に対しては光学的に薄くなり、その質量の測定に適している。

$\text{H}_2\text{ S}(1)$ (17 μm), $\text{S}(2)$ (12 μm) は地上望遠鏡でも観測可能だが、大気吸収の影響がなく、感度の高い宇宙望遠鏡の方が、散逸しつつある原始惑星系円盤中の微量なガスの統計的観測には適している。また、SPICA/HRS の波長分解能は JWST/MIRI よりも一桁ほど高いため、連続光のノイズの影響が小さい、感度の高い観測が可能である。波長分解能と感度の高い観測を行うことで、円盤内縁部から放射される高速度成分の有無を調べて、円盤ガス散逸が内縁あるいは外縁からおきているのかについて議論することも可能になると考えられる。

原始惑星系円盤の H_2O スノーラインの測定

原始惑星系円盤中の H_2O スノーラインは、 H_2O の気相と固相の境界領域のことであり、岩石惑星とガス惑星形成領域の境界とも考えられている。これは、 H_2O スノーラインの外側では H_2O 氷の分だけ固体質量が増加するため、より大きな質量の固体コアが形成され、コアへの暴走的なガス降着がよりやすくなるからである。また H_2O スノーラインの位置の測定は、地球などの岩石惑星の水の起源を考える上でも重要である。

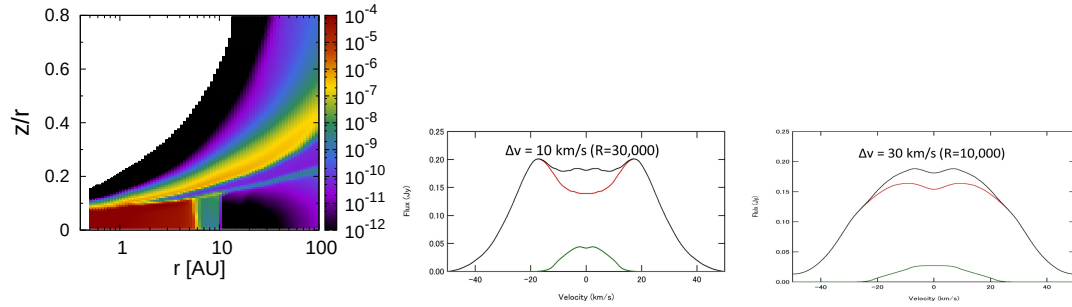


図7 (左) 原始惑星系円盤内の H_2O ガスの分布。(右) 円盤からの $17.8 \mu\text{m}$ H_2O 輝線観測のシミュレーション。 $\Delta v = 10 \text{ km s}^{-1}$ ($R = 30,000$: SPICA/HRS) であればスノーラインの位置の同定が可能であるが、 $\Delta v > 30 \text{ km s}^{-1}$ ($R < 10,000$: JWST/MIRI) では難しい。

原始惑星系円盤からの H_2O 輝線の観測は、近赤外線からサブミリ波の波長帯にかけて、Spitzer, Herschel 宇宙望遠鏡や地上望遠鏡により行われている (e.g., [5][8][14])。 H_2O は非対称コマ分子であり、複雑なエネルギー準位と遷移状態をもつ。多数存在する遷移線の中でスノーラインの測定に適しているのは、比較的励起エネルギーが高く ($E_u \sim 1,000\text{K}$)、アインシュタイン係数が小さい ($A_{ul} < 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) 遷移線であると考えられる ([25])。これは、 H_2O ガスはスノーラインの内側だけでなく、円盤外縁にも存在するためである (図7)。励起エネルギーの低い遷移線は円盤外縁の赤道面付近の低温の H_2O ガスをトレースし、励起エネルギーが高くかつアインシュタイン係数が大きい遷移線は円盤外縁表層部の高温 H_2O ガスをトレースするため、輝線の大部分は円盤外縁からの放射が占めてしまい、スノーラインの同定には適さない。 $12\text{--}18 \mu\text{m}$ 帯にも例えば $17.8 \mu\text{m}$ ラインなど、スノーラインをトレースするのに適した遷移線が存在する (図7)。

H_2O 遷移線は他の波長帯にも存在するが、近赤外線のは励起エネルギーが高すぎ、またダスト吸収が強いので、スノーラインの測定に適さない。サブミリ波のものは強度が弱く、ALMA を用いても統計的観測は難しい。遠赤外線のは比較的強度は強いが、高感度の高分散分光装置は現在のところ予定されていない。従って、中間赤外線 H_2O 遷移線がスノーラインの統計的観測に最も適している。

典型的 T タウリ型星の H_2O スノーラインは円盤半径 2 AU 程度、典型的 Herbig Ae 型星の場合は 10 AU 程度で、ALMA や TMT (中間赤外線) でもその直接撮像観測は難しい。しかし、十分に波長分解能の高い観測を行えば、輝線プロファイルよりその放射領域を測定することが可能である (e.g., [27])。これは、円盤からの輝線プロファイルは、主に円盤のケプラー回転速度によるドップラーシフトをトレースするためである。スノーライン内側からの H_2O 輝線は光学的に厚いが、図7に示したように、 H_2O ガスが豊富な領域ではスノーラインの位置は鉛直方向の高さに大きく依存しないため、光学的に厚くても赤道面付近のスノーラインの位置をトレースできると考えられる。円盤からの $17.8 \mu\text{m}$ H_2O 輝線の観測シミュレーションを図7に示す (中川氏・左近氏提供)。波長分解能が $R = 20,000 - 30,000$ あればダブルピークの位置の同定は可能であるが、 $R = 10,000$ 以下では難しい。すなわち本研究は JWST/MIRI では不可能であり、SPICA/HRS で初めてできるサイエンスである。

また SPICA/HRS による高感度観測は、おうし座分子雲程度 (距離 140 pc) の近傍の星形成領域であれば、T タウリ型星まわりの円盤のスノーラインの検出も可能にする。Herbig Ae 星まわりの円盤であれば、オリオン座分子雲 (距離 420 pc) でもスノーラインの検出が可能である。すなわち、SPICA/HRS により H_2O スノーラインの統計的観測が十分に可能になると考えられる。

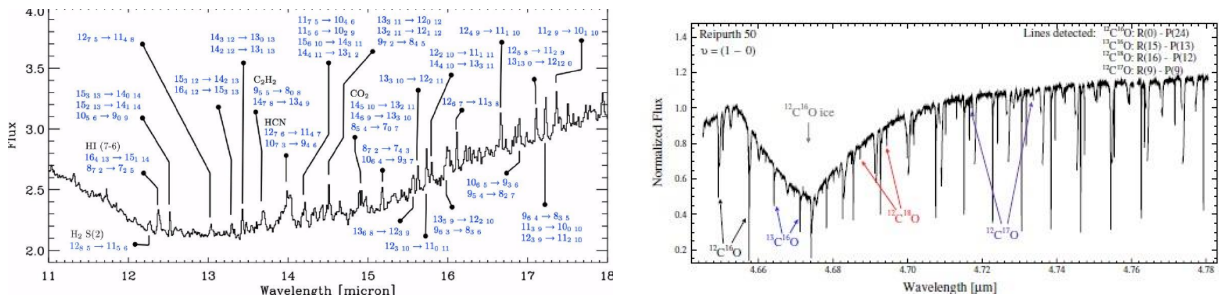


図8 (左)Spitzer 宇宙望遠鏡による 12–18 μm 帯における原始惑星系円盤からのガス輝線の観測 ([28])。 (右)VLT/CRIRES による 4.7 μm 帯におけるエッジオン円盤からの CO 氷および CO ガスの吸収線の観測 ([31])。SPICA/HRS では同様の観測を 12–18 μm 帯で様々な分子種に対して行い、氷とガスの組成比を測定することが可能になる。

原始惑星系円盤ガスの C/O 比 – 系外惑星大気との関連 –

太陽系外で発見された短周期巨大惑星は、 H_2O スノーラインの外側で形成された後、恒星付近まで移動したと考えられているが、その観測的検証はまだない。ところで近年の系外惑星大気の観測により、大気中の C/O 比に関する議論が可能になりつつある (e.g., [18])。惑星大気の元素組成は、大気形成時の原始惑星系円盤ガスの元素組成を反映していると考えられる。従って、系外惑星大気の C/O 比と円盤内の C/O 比の分布を調べることで、惑星が円盤内のどの領域で形成されたかに制限が与えられる可能性がある。

円盤内で炭素や酸素の多くを含む分子として、CO, CO_2 などがある。酸素のみを含む分子には H_2O , OH など、炭素のみを含む分子には CH_4 , C_2H_2 , HCN などがある。これらの分子は、各々のスノーラインの外側ではダストに凍結する。ダストに凍結した分子がダストと共に円盤の内側に移動すると、各々の分子種のスノーラインを境にして、円盤の半径方向に C/O 比の分布が生じる (e.g., [29])。

上述の分子の遷移線は原始惑星系円盤からは 12–18 μm 帯や 3 μm 帯で観測されている (e.g., [28][22][13]; 図8)。これらの分子のうち、 CO_2 や CH_4 , C_2H_2 は双極子放射が禁止されており、赤外線でのみ観測が可能である。他の分子はミリ波・サブミリ波などでも観測可能であるが、高温の惑星形成領域からの放射をトレースするには、高温の赤外線遷移線の観測が適している。

また一部のエッジオン円盤では、氷の吸収の観測も可能である。実際、「あかり」ではエッジオン円盤から 3–4.5 μm 帯で H_2O や CO_2 氷の吸収が観測されている ([2])。SPICA/HRS は高分散かつ広波長帯を同時に観測することが可能であるため、ガスの遷移線と氷のブロードなフィーチャーの同時観測、すなわち、ガスと氷の組成を同時に測定することが可能である。図8に VLT/CRIRES によるエッジオン円盤からの 4.7 μm 帯における CO 氷と CO ガスの吸収線の観測例を示す ([31])。SPICA/HRS では、様々な分子に対して同様の観測を行い、氷とガスの組成を求めることが可能になると考えられる。

Spitzer 宇宙望遠鏡により 12–18 μm 帯で観測された分子の多くは、この波長帯内で複数の分子輝線を放射する。波長分解能 $R = 20,000 - 30,000$ の観測を行えば、これらの分子線の分離が可能であり、輝線比や輝線プロファイルから放射領域の情報がある程度わかる。JWST/MIRI では一部の分子線は分離不可能である (e.g., [28])。また 15 μm CO_2 遷移線は、地上からは観測不可能であり、この波長帯の原始惑星系円盤ガスおよび氷の観測には、SPICA/HRS が最も適している。

4.4 210 μm よりも長波長での SPICA 分光観測による銀河進化研究の可能性

現在、SAFARI は長波長側で 210 μm までカバーする仕様になっている。微細構造輝線の赤方偏移で考えると、[OI]63 μm 輝線は $z < 2.33$ 、[OIII]88 μm 輝線は $z < 1.39$ 、[CII]158 μm 輝線は $z < 0.33$ 、[NII]205 μm 輝線は $z < 0.02$ で観測することができる。一方、ALMA の band 10 は 320 μm よりも長波長側をカバーしており、もし band 11 が実現すれば、190 μm からカバーできるようになるため、SAFARI から ALMA へ観測可能波長域が連続的になると期待される。しかし地上から観測できるのは大気の窓が開いている僅かな波長範囲に限られており、仮に ALMA の band 11 が実現したとしても 210–220 μm および 240–280 μm は大気吸収が強すぎて観測が非常に困難な波長域である。また、band 10 で観測可能な天候が実現するのは年間を通して 10% 程度であり、band 11 ではそれ以下であると考えられるため、SAFARI がカバーする 210 μm よりも長波長側を ALMA でカバーすることは基本的には困難であり、また可能なのは限られた赤方偏移・天域・明るさの銀河のみになる。

ただし、もし SAFARI の観測可能波長域を 230 μm まで伸ばすことができれば、系外銀河の微細構造輝線に関する観測の可能性が一気に広がる。[NII]205 μm 輝線は電離ガスのトレーサーとして重要な輝線であり、また金属量への強い依存性が利用されることもある輝線だが ([23])、SAFARI が 210 μm までしかカバーしない場合には $z < 0.02$ という非常に近傍の限られた天体しか観測することができない。しかし仮に SAFARI の観測可能波長域を 230 μm まで伸ばせば $z < 0.12$ の範囲で [NII]205 μm 輝線が観測可能になり、ターゲット候補が一気に多くなる。また高電離ガスのトレーサーであり AGN 活動性の指標にもなり得る [OIII]88 μm 輝線についても、SAFARI の観測可能波長域を 210 μm から 230 μm まで広げられれば観測可能な赤方偏移範囲を $z < 1.39$ から $z < 1.61$ まで拡大させることができ、宇宙の星形成率密度および巨大ブラックホール成長がいずれもピークだった時代 ($1 < z < 3$) の宇宙での銀河と巨大ブラックホール形成に迫ろうとする SPICA のサイエンス目的を達成させるために非常に有用な変更となることが期待される。

参考文献

- [1] Ábrahám, P., Juhász, A., Dullemond, C. P., et al. 2009, *Nature*, 459, 224
- [2] Aikawa, Y., Kamuro, D., Sakon, I. et al. 2012, *A&A*, 538, 57
- [3] Beichman, C., Benneke, B., Knutson, H., et al. 2014, *PASP*, 126, 1134
- [4] Bergin, E. A., Cleaves, L. I., Gorti, U. et al., 2013, *Nature*, 493, 644
- [5] Carr, J. S. & Najita, J. R., 2008, *Science*, 319, 1504
- [6] Casey, C. M., Berta, S., Béthermin, M., et al. 2012, *ApJ*, 761, 140
- [7] Chary, R., & Elbaz, D. 2001, *ApJ*, 556, 562
- [8] Dent, W. R. F., Thi, W. F., Kamp, I. et al. 2013, *PASP*, 125, 477
- [9] Desert, J.-M., Lecavelier, E. A., Hebrard, G. et al. 2009, *ApJ*, 699, 478
- [10] Dressing, C. D., & Charbonneau, D. 2013, *ApJ*, 767, 95
- [11] Elbaz, D., Dickinson, M., Hwang, H. S., et al. 2011, *A&A*, 533, A119
- [12] Fan, X., Strauss, M. A., Schneider, D. P., et al. 2001, *AJ*, 121, 54
- [13] Gibb, E. L. & Horne, D., 2013, *ApJ*, 776, L28
- [14] Hogerheijde, M. R., Bergin, E. A., Brinch, C. et al. 2011, *Science*, 334, 338
- [15] Hopkins, A. M., & Beacom, J. F. 2006, *ApJ*, 651, 142

-
- [16] Imanishi, M., Dudley, C. C., Maiolino, R., et al. 2007, *ApJS*, 171, 72
 - [17] Ito, Y., Ikoma, T., Kawahara, H., et al. 2015, *ApJ*, 801, 144
 - [18] Konopacky, Q. M., Barman, T. S., Macintosh, B. A., & Marois, C., 2013, *Science*, 339, 1398
 - [19] Leconte, J., Forget, F., Charnay, B., et al. 2013, *A&A*, 554, 69
 - [20] Madau, P., & Dickinson, M. 2014, *ARA&A*, 52, 415
 - [21] Madau, P., Ferguson, H. C., Dickinson, M. E., et al. 1996, *MNRAS*, 283, 1388
 - [22] Mandell, A. M., Bast, J., van Dishoeck, E. F. et al. 2012, *ApJ*, 747, 92
 - [23] Nagao T., Maiolino R., Marconi A., Matsuhara H., 2011, *A&A*, 526, A149
 - [24] Najita, J. R., Carr, J. S., Stom, S. E. et al. 2010, *ApJ*, 712, 274
 - [25] Notsu, S. et al., in prep.
 - [26] Oliver, S. J., Bock, J., Altieri, B., et al. 2012, *MNRAS*, 424, 1614
 - [27] Pontoppidan, K. M., Blake, G. A., van Dishoeck, E. F. et al., 2008, *ApJ*, 684, 1323
 - [28] Pontoppidan, K. M., Salyk, C., Blake, G. A. et al., 2010, *ApJ*, 720, 887
 - [29] Pontoppidan, K. M., Salyk, C., Bergin, E. A. et al. 2014, in *Protostars and Planets VI*, ed. H. Beuther, R. Klessen, C. Dullemond, and Th. Henning, (Tucson: Univ. Arizona Press), p.363
 - [30] Rupke, D. S. N., Veilleux, S., & Baker, A. J. 2008, *ApJ*, 674, 172
 - [31] Smith, R. L., Pontoppidan, K. M., Young, E. D., Morris, M. R. & van Dishoeck, E. F. 2009, 701, 163
 - [32] Zhang, K., Pontoppidan, K. M., Salyk, C., & Blake, G. A. 2013, *ApJ*, 766, 82