

研究領域の目標・戦略・工程表

光学赤外線天文連絡会

<http://gopira.jp/>

2015年2月2日

Executive Summary

2020 年代以降の光学赤外線天文学分野の発展においては、地上だけに留まることなく、スペースからの観測を実現することが必須と考える。これまで地上をベースに活動してきたグループと、既にスペースをベースに活動してきたグループが手を携えて、2020 年代に最重要と考える科学目標の達成を目指していく。そしてこの観測を通じて新たな革新的な技術の獲得と人材育成を絶やさず進めて行く。

これまで光赤天連は、次世代赤外線天文衛星 SPICA の実現を求めて来た。昨今の事情によりその実現時期の遅延や仕様の変更が検討されているが、SPICA の実現を最優先で望むことには変わりがない。ただし SPICA が何らかの理由により 2030 年代にずれ込むような場合には、コミュニティとしての持続的な成果創成と人材育成の観点から、SPICA の推進に加えて、超広視野初期宇宙探査衛星 WISH（中型計画）、あるいは小型 JASMINE 等（公募型小型計画）を 2020 年代初頭に打ち上げることが重要な意義を持ち得ると考える。

また WFIRST/WACO 等小規模プロジェクトや、EXZIT や HiZ-GUNDAM 等の異分野連携プロジェクトを並行して推進することも上述の基幹ミッションとの相補性の観点から重要と考える。

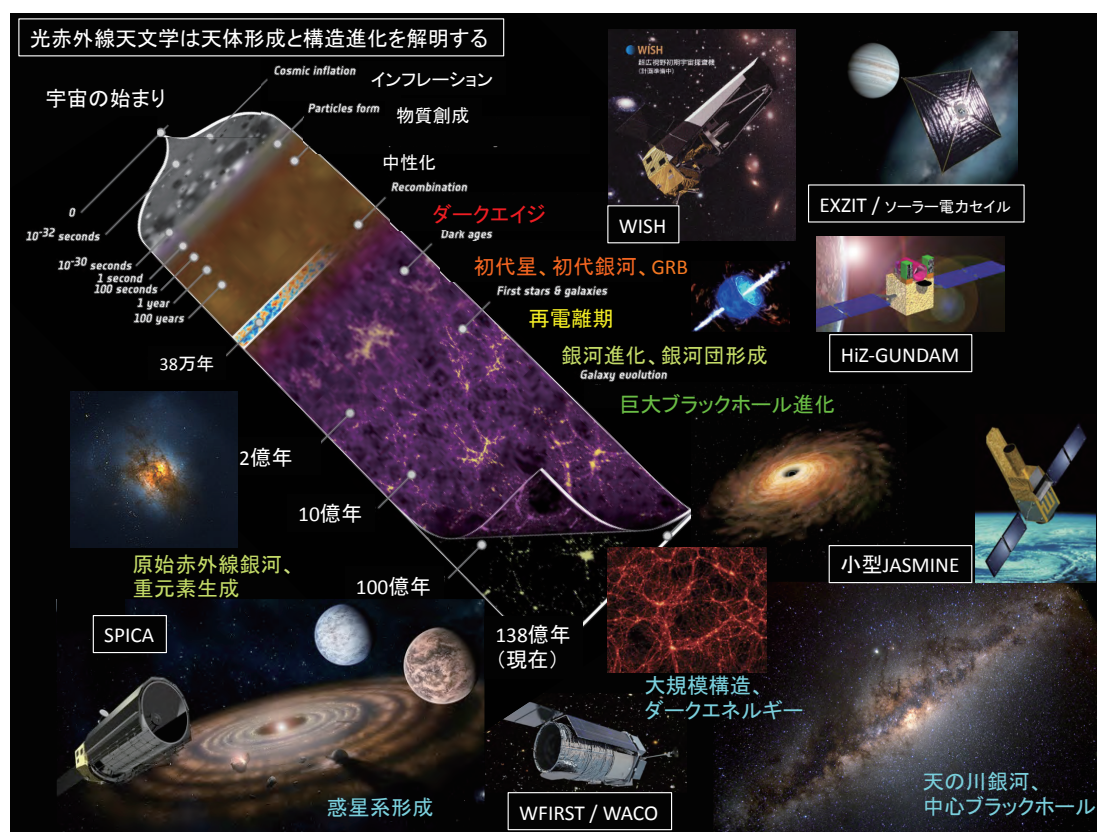


図 1: 光赤外スペース将来プロジェクトと関連するサイエンス

1 光学赤外天文学分野の将来ビジョン

私達の宇宙がどのようにして誕生し、未来はどうなるのか。地球以外の生命が宿る惑星はどこに存在するのか。近年の宇宙物理学・天文学は、望遠鏡や検出器の大型化・高機能化や計算機・ネットワーク技術の発達と相まって、めざましく発展し、20–30年前にはまだ曖昧模糊としていたこれら人類共通の疑問に対しても、近い将来、その回答に手が届きそうである。様々な観測手段が実現・発展し、重力波にも手が届こうとするこの時代においても、可視赤外線波長域の電磁波による観測は、依然、恒星や銀河、星間物質等を精確に診断するためのプローブとして、今後も宇宙物理学・天文学に重要な貢献をもたらすはずである。以下では、今後10–20年のサイエンスの動向を分野別に概観し[1]、日本の光赤外コミュニティがどのようなスペース計画の実施に期待しているかをまとめる。併せて、サイエンスと関連プロジェクトを模式化した図1も参照されたい。

1.1 今後10–20年のサイエンスの動向と日本の戦略

宇宙論分野では、長らく理論が先行する時代が続いていたが、1990年代より状況が一変して様々な発見が相次いだ。近年の貢献を総括すれば、宇宙構造形成の標準モデル、すなわち平坦な宇宙項入りCDMモデルが確立したこととなろう。この流れを受け、2020年代に目指すべき宇宙論のテーマはΛCDMモデルの物理的性質となると考えられる。光赤外分野では、宇宙の大規模構造の基本構成要素

である銀河をより広域にわたり深くサーベイすることが本質的に重要であり、地上では北天のすばる HSC/PFS に続いて登場する南天の LSST が席卷すると考えられ、スペース計画では ESA の Euclid 衛星や NASA の WFIRST 衛星による可視近赤外域における広天域サーベイが究極的なデータをもたらしてくれると期待される。WISH 計画では WFIRST/Euclid と相補的な波長帯での Ia 型超新星および広視野撮像観測による宇宙論研究も進められる。米国の JWST による分光フォローアップとの連携も鍵となるであろう。

初代天体の生成とそれに引き続く宇宙再電離の過程は、巨大ブラックホールの種の生成や宇宙の構造形成と密接に結びついていると考えられており、過去 10 年程度の $z = 7-10$ という最遠方天体の観測により著しく発展はしたものの、口径 8-10m クラスの望遠鏡をもってしても観測限界に近いため、次世代の望遠鏡や観測衛星に対する期待が大きい。2020 年代には、初代天体が形成されたと考えられる $z > 10$ の宇宙を次世代望遠鏡で見通すことで、近傍天体に残された痕跡の探索とも併せ、初代天体の特性をピンポイントに解き明かすこと、および宇宙再電離の歴史とメカニズムを理解することが目標となる。スペース計画では、WISH, WFIRST, Euclid による近赤外域撮像広域サーベイや JWST による近中間赤外域分光が主要なプローブとなり、これに HiZ-GUNDAM や SPICA、EXZIT が補佐的な役割を担うであろう。地上の超大型-大型望遠鏡を用いた深い分光観測にも主要な役割が期待されている。

活動銀河核分野では、過去 20-30 年で観測面が大きく進展し、中心の巨大ブラックホールとその周辺の階層構造に加え、巨大ブラックホールと母銀河の共進化に関する理解が飛躍的に進歩したが、その支柱をなすはずの巨大ブラックホールの誕生・成長過程については、現在も活発に議論されている段階にある。巨大ブラックホールの誕生と進化、活動銀河核の正体と発現・消失、そしてそれら全てが銀河宇宙の中で果たした役割を紐解き、統一的に理解することが、今後この分野の進むべき方向となる。地上超大型-中型望遠鏡と観測効率の高い面分光器・多天体分光器を用いた観測に加え、スペース計画では塵粒子に覆われた巨大ブラックホールの生成現場のプローブとして SPICA 衛星による中間赤外域の分光診断に期待が掛かる。日本の WISH 衛星や Euclid, WFIRST による近赤外域の深い広域撮像探索による貢献も見込まれる。

$z \sim 3$ までの比較的近傍の銀河に関しては、近年の精力的な観測により、銀河の諸量（星生成率、星質量、形態、金属量、数密度、空間分布）の進化が得られ、宇宙の構造形成と結びついた銀河形成のシナリオが検証されてきた。2020 年代には、同種の観測研究をより遠方の銀河へ発展させることに加え、高い感度と高空間分解能を駆使したマッピング観測を行うことで、銀河の性質やその進化を引き起こす物理メカニズムの解明を目指すことが新たなフロンティアとなるであろう。また、ごく近傍の銀河の詳細研究に基づいて、銀河成長プロセスにおける星生成と物質進化との関係を明らかにし、宇宙の多様化における銀河の働きを理解することも重要となる。地上では TMT や ALMA を用いた高空間分解・高感度の観測や、すばる HSC/PFS 等による比較的早い段階でのサーベイ型観測実施に期待が寄せられている。スペース計画では、SPICA による中間・遠赤外線撮像・分光に加え、WISH, WFIRST, Euclid による広視野高空間分解能近赤外撮像や JWST による近赤外域分光が主要な役割を担うほか、天の川銀河の中心核バルジの研究では日本の位置天文衛星である小型 JASMINE の貢献が期待される。

宇宙の物質進化を担う最も基本的な要素である恒星の研究においては、2020 年前後に Gaia 衛星のデータがリリースされることで、劇的な革新がなされると期待されている。すなわち、天の川銀河系内の太陽から約 10kpc 以内にある恒星の距離や絶対光度が高精度で導出されることで、様々な構成種族に対する恒星進化理論を多角的に検証することが可能となるほか、銀河系内の局所的な HR 図を繋ぎ合わせることで、HR 図上のどの位置の恒星がどのように活動してどう進化するのかを直接推定可能となり、未解決問題である質量放出、連星進化、元素の起源に対する理解が大きく進展するであろう。赤外域の高空間分解観測や、可視・近赤外域の広視野・高感度サーベイの実現により、銀河中心領域や銀河ハローの研究も大きく進展すると期待されている。さらに、2010 年代後半に稼働する重力波

望遠鏡の主要なターゲットと考えられている連星中性子星合体の発生頻度と r プロセス元素の起源の検証により新たなブレークスルーが得られる可能性もある。スペース計画では JASMINE による高精度位置光度計測や、JWST/SPICA による高感度近・中間・遠赤外線分光、そして WISH, WFIRST, Euclid による可視近赤外撮像探査が目指すべきミッションとなる。地上では超大型望遠鏡と補償光学を組み合わせた高空間分解・高感度観測や高波長分解スペクトル観測、大・中口径望遠鏡を用いた変動天体の時間軸での系統的観測、LSST やすばる HSC/PFS に代表される深サーベイへの期待が大きい。

恒星と共に銀河系の主要な構成要素をなす星間物質においては、太陽系内のサンプルリターンミッションやロケット／国際宇宙ステーションを利用した実験的な天文学と連携して、物質自体の素性を正確に理解し、それらの生成・進化過程を周囲の環境と対照させながらひも解くことが主要なテーマになると考えられる。地上で観測が困難な中間・遠赤外線域の観測に特に期待が寄せられており、スペースの SPICA や JWST が主要な貢献をすると期待される。

星と惑星は本来別種の天体であるが、星生成と惑星系形成は密接な関係にある。星生成に関しては、これまでの研究で太陽程度の質量の星の生成過程はおおまかには明らかにされてきたが、大質量星や褐色矮星の生成過程、および初期質量関数の星生成条件との関連性に関する理解はいまだ不十分であり、それらの物理過程の探求が 2020 年代の目標となる。惑星系形成に関しては、その形成メカニズムおよび生命系誕生の初期条件の解明が主たる目標となろう。また、現在までに 1800 を超える系外惑星が確認され、太陽系だけにとどまらない普遍的な惑星系形成論の構築が試みられている系外惑星分野においても、星・惑星系形成と融合した惑星形成・進化論や、詳細観測を通じた惑星表面で起こる物理現象の理解、そして居住可能性の理解と生命現象の探査が今後のキーサイエンスとなる。この研究に深く貢献するスペース計画としては SPICA や JWST による近・中間・遠赤外線分光がまず挙げられるほか、WISH, WFIRST, Euclid などによる広視野・高空間分解の近赤外線撮像や、WFIRST の高コントラスト撮像分光にも期待が掛かる。小型 JASMINE による高精度位置モニターも次世代のプローブとしてユニークな貢献が期待される。地上の超大型望遠鏡による近・中間赤外線観測や ALMA との親和性が高いことも付記しておく。

最後に、我々の太陽系の研究について概観する。これまでもニースモデルに代表される太陽系の形成過程の理解を最大の柱としつつ、生命起源物質の起源の理解を主目的とした始原天体の研究や、惑星間塵から巨大惑星までの多様な活動性について、探査衛星ミッションとも連携した観測が行われてきた。2020 年代もこの流れでの研究の進展が期待されており、光赤外域のスペース計画では、惑星探査機に搭載する小口径望遠鏡 EXZIT による惑星間塵の観測のほか、SPICA を用いた海王星以遠天体や系外黄道光の高空間分解観測、WISH 等を用いた高空間分解近傍始原天体探査に期待が掛かる。また、系外惑星の観測においても感度が向上することから、比較惑星学的な観点での発展も期待される。

1.2 日本の光赤外コミュニティが進める計画と独自性、相補性

この節では、本書にて採り上げる各ミッションに対し、前節で掲げたキーサイエンスがどう関係しているか、そして日本のコミュニティがどういった独自性を出そうとしているかを簡潔にまとめる。

- SPICA では、6K 以下に冷やされた中口径鏡による中間・遠赤外線観測を大きな武器として、 $z > 1$ から最遠方に掛けての塵粒子に覆われた活動銀河核の存在を電離ガス観測から明確にとらえ、銀河における巨大ブラックホール生成現場の本格的な探査に世界に先駆けて取り組む。また、固体物質の役割を通じた銀河形成過程のメカニズムの解明や、惑星系形成過程における生命現象の探査、星間媒質まで含んだ宇宙鉱物学の進展への大きな寄与も期待される。未踏の波長域の高感度の分光観測には、様々な研究分野から期待が寄せられている。
- WISH は波長 $5\mu\text{m}$ までの感度を活かし、WFIRST/Euclid では到達が困難な赤方偏移 $z = 10$ を超える最遠方における銀河サーベイを、世界で初めて実施し、多数の初期銀河を検出する。これ

により初期宇宙の研究分野を大きく切り拓いていく。また一連の広視野近赤外観測により、巨大ブラックホールの種とその進化、初代星の超新星・ガンマ線バースト (GRB)、銀河の質量集積過程の全容の解明をはじめ様々な分野の研究にも広く貢献する。

- HST, JWST に続く米国のスペース基幹望遠鏡である WFIRST は、その深い近赤外サーベイ能力を活かして宇宙の加速膨張の起源の解明を主目的としており、WISH とは波長や実施時期において相補的な関係にある。また、重力マイクロレンズ効果を介した系外惑星の重点的な探査により、系外惑星の形成過程の解明も目指しており、日本のコロナグラフ開発での貢献にも期待が掛かる。
- 欧州主導の Euclid も WFIRST と同様に宇宙の加速膨張の起源の解明を主目的とするが、ほぼ全天をカバーすることや可視域でもサーベイする点で WISH や WFIRST と相補的である。
- 小型 JASMINE は、天の川銀河を対象とした巨大ブラックホールと銀河バルジの共進化の解明を主目的としているが、高頻度且つ高精度の位置測定が鍵となる高エネルギー天体連星系、系外惑星系などのユニークな物理解明にも期待が寄せられる。
- EXZIT は、惑星間ダストが希薄となる領域まで探査機を投入し、そこから黄道光の影響の無い、究極精度の近赤外域の宇宙背景放射の観測を行うことで、宇宙初期天体を探ることを最大の目的とする、世界的にもユニークなプロジェクトである。惑星探査機へ搭載するなどの手段が有効であることから、異分野連携のプロジェクトの試金石的な位置付けで推進する。
- HiZ-GUNDAM は、2020 年代の他の GRB 衛星計画で見落とされている高赤方偏移の GRB 探査に最適化した衛星をコンパクトに実現し、宇宙初期天体を探ることに重点を置いたユニークなプロジェクトである。距離推定情報を含む GRB のアラートを即時に提供することで、これまでより数段効率的な研究を促進すると期待される。X 線・ガンマ線による GRB の発見と連動する観測が有効なため、多波長連携で推進する中核として位置付けられる。

このように、それぞれのミッションがその規模に応じ、2020 年代に主要となるサイエンステーマに深く結びついている。では、我々光赤外コミュニティがどのような戦略でこれらのスペース計画を推進すべきであるか、その考え方も含めて次章以降にまとめる。

2 光学赤外天文学分野の戦略

本章では、我々光学赤外線天文連絡会（略称・光赤天連）が考えるスペース戦略と関連の深いミッションについて述べる。ここで、本工程表提出の意志表明を行った後に事務局から寄せられたコメントに関連し、光赤天連の物理・天文分野での位置付けについて簡単に説明しておきたい。光赤天連は、光学赤外線天文学に関わる研究者および大学院生からなる自主組織であり、宇宙電波懇談会や高エネルギー宇宙物理連絡会、宇宙線研究者会議、太陽研究者連絡会、理論天文学宇宙物理学懇談会などと並ぶ国内の宇宙・天文学研究者コミュニティの一つである（2014年9月の会員数294名）。国立天文台や日本天文学会から定期的に各種委員の推薦依頼を受けると共に、日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会から当該分野に属する国内中規模プロジェクトの自主検討を依頼される [2] など、我が国の光学赤外線天文学分野を代表する組織として広く認知されている。なお SPICA 等の計画が、日本学術会議大型計画マスタープラン 2014 [3] の重点大型研究計画として選定されている。

2.1 戦略の概要

今後の宇宙観測では、光赤外波長域においても、地球大気の影響を受けないスペースからの計画がより重要性を増していくことは論を待たない。光赤天連では 2014 年度中に 9 月および 11 月の 2 回シンポジウムを開催し、スペースの将来計画について議論を行った。また、8 月に宇宙研で開催されたシンポジウムでもスペース計画の展望が議論された。このようにコミュニティを上げてのスペース将来計画の議論が活発化した背景には、3 年後に JWST の打ち上げが迫ったこの時期に、光赤天連が次世代の基幹ミッションとして支援してきた SPICA プロジェクトに変革が生じ、国内のスペース計画を再定義する機運が高まったことが挙げられる。本書で示す工程は、SPICA プロジェクトの打ち上げ予定時期によって分岐する 2 通りの工程としている。また、SPICA 以外のミッションもそれぞれ流動的な面を孕んでおり、戦略にはそれぞれミッションがカバーするサイエンスの範囲や、打ち上げ時期に応じた相補性など、相応の弾力性を持たせなくてはならない。

我が国では、約 10 年前に実現した赤外天文衛星 AKARI で培われたスペースでの極低温冷却技術为背景に、「無冷媒極低温冷却コンセプト」、即ち望遠鏡を常温で打ち上げ、スペースにおいて冷凍機で極低温に冷却するという画期的なアイデアの SPICA 計画を立案した。これによって従来は不可能だった大口径スペース冷却望遠鏡の実現性が見えてきたのである。我々は SPICA の実現を通して、2020 年代の中間・遠赤外波長での世界の天文学を主導する立場を獲得する。これが以前から変わらぬこのコミュニティの基本戦略である。また 1 章で述べたように、宇宙の「激動期」における銀河進化や惑星系形成 過程における含水鉱物学のインパクト等は、稼働を始めた ALMA や 2018 年に打ち上げ予定の JWST 等でも解明不可能であり、SPICA のもたらす相補的な科学的価値に対する期待は一層増すばかりである。

しかし、昨今の情勢変化を受け、SPICA の国際協力の枠組みや望遠鏡の仕様、打ち上げ時期の見直しは日欧のグループで鋭意進められている。SPICA の実現が、何らかの理由により 2030 年前後以降にずれ込むような場合には、コミュニティとしての持続的な成果創成と人材育成の観点から、SPICA の推進に加えて、WISH（中型計画）や小型 JASMINE 等（公募型小型計画）を 2020 年代初頭に打ち上げることが重要な意義を持ち得る。スペースプロジェクトでは米国の JWST が 2020 年代前半の近・中間赤外線域の高感度観測を席卷すると予想されることから、いち早い実現により JWST とのシナジーを積極的に図ることは大事である。また WFIRST/Euclid 等の海外主導のミッションに小規模プロジェクトとして参画することや、EXZIT や HiZ-GUNDAM 等の異分野連携プロジェクトを並行して推進することも、上述の基幹ミッションとの相補性の観点から重要と考える。以下では、これらのミッションの関連付けや優先順位、および地上望遠鏡や他波長のプロジェクトとの関係について述べる。

2.1.1 ミッション間の関連付けと優先順、隣接プロジェクトとの関係

まず、大規模プロジェクトに分類される、SPICA と WISH に関して述べる。先にも述べたように、日本と欧州で推進してきた SPICA が、光赤天連が支持しているスペース基幹プロジェクトであることは変わらない。SPICA は、極低温の大口径望遠鏡を放射冷却と冷凍機とで実現するという、世界でも他に例のない日本独自の技術を駆使した、中間・遠赤外域の究極の感度を実現するプロジェクトである。2008 年には光赤天連が独自にタスクフォースを設置して支援するなど、コミュニティにも深く根ざしたプロジェクトでもある。SPICA による中間赤外域の観測能力は、主鏡径など未定の部分はあるものの、今後 10-20 年のスケールで計画されている他のプロジェクトでは追従不可能であり、基幹プロジェクトとしての安定感は抜群である。しかし、現在、先に述べたように SPICA 計画の見直しが進められている段階にあり、実現可能な観測性能・仕様の見通しを得るまで、もう少し待つ必要がある。

一方、WISH は日本が主導する国際プロジェクトで、2020 年代初頭に実現した場合、初代天体候補をいち早く同定し、JWST が稼働している間に分光観測ターゲットとして供給することが可能になるなど、天文学に大きなインパクトをもたらすと期待される。また、WISH の推進には主に国内の遠方銀河研究チームが関与しており、地上のすばる望遠鏡で育った人材がスペースへ本格的に関与するきっかけになるという点でも意義がある。規模やサイエンスの恩恵を受ける分野の広さを考慮しても、SPICA に続く高い優先度でのプロジェクトと位置付けられることから、何等かの理由で SPICA の打ち上げが遅れる場合には、WISH の 2020 年代初頭の打ち上げを最優先度のプロジェクトへと移行する。衛星計画に長期のブランクが発生することによる人材の流出や若手教育の欠落を避けるためにも意義は大きい。

次に、小型衛星計画及び小規模プロジェクトのカテゴリに入るミッションについて述べる。基幹ミッションだけでは賄えないフレッシュなサイエンスを実現するため、そして人的交流や人材育成を有機的・継続的に推進するために、より小規模なミッションを臨機応変に採り入れていくべきと考えており、その例として小型 JASMINE や WFIRST, HiZ-GUNDAM などの推進が挙げられる。

小型 JASMINE は、近赤外域の透過力を活かした天の川銀河バルジの天体の距離測定に加え、高頻度の位置計測モニターを武器としたユニークなミッションであり、世界を見渡しても類似のプロジェクトは無いと言ってよい。国立天文台の JASMINE 検討室が主体となって準備を進めており、2014 年 2 月締切のイプシロン搭載宇宙科学ミッション（小型科学衛星）にミッション提案を行うなど、プロジェクトの検討は順調に進んでいる。なお、WISH の 2020 年代初頭の打ち上げが実現した場合には、光赤外コミュニティ内での推進体制の構築が困難となる可能性があることから、光赤天連としては WISH の実現を優先に考えるものの（3.2 節も参考されたい）、WISH が最終的に採択されるまでの段階では、小型 JASMINE の小型計画へのミッション提案を支持する。

WFIRST は、2.4m 鏡の深くて広い近赤外サーベイ能力を活かした遠方サーベイ及び高精度の系外惑星トランジット観測を行う米国主導のミッションであり、日本も WACO と呼ばれるコロナグラフの開発等に参画している。Euclid は、広視野 1.2m 鏡を用いた可視近赤外域の全天サーベイを行う欧州主導のミッションであり、日本は現時点ではプロジェクトには関わっていないが、Euclid 側からコミュニティに対してすばる HSC を用いた協力の呼びかけがあり、協議中である。

先に挙げた WISH と、これら WFIRST、Euclid は、いずれも広視野のサーベイに向けた特徴を持つが、観測波長域やバンド数、観測限界、打ち上げ時期（ないし現時点でのミッションのフェーズ）、及び日本からのプロジェクト参画者の数に差異があり、日本として最もインパクトの大きいものは日本主導の WISH である。WFIRST は米国主導の、HST、JWST に続く NASA のスペース基幹望遠鏡であり、順調なら 2024 年頃に打ち上げられる可能性がある。WISH が 2020 年代初頭に実現した場合は、WFIRST による遠方銀河サーベイのインパクトの一部は削がれる可能性があるが、依然相補性が高いことから、WFIRST と WISH の連携にも期待が強い。国際的なフラッグシップの計画へ日本

が参画することは、将来のスペース計画を見据えたとき重要な意義を持つ。特に、WFIRST では日本のコロナグラフ開発の技術に期待が寄せられていて、その実証機となる点は着目すべきであり、将来の系外惑星ミッションを国際協力で実施する足掛かりとしたい。Euclid は既に ESA で予算化され、2020 年頃の打ち上げが見込まれており、日本が開発には関わっていないが、日本のすばる HSC を用いた連携研究の提案が寄せられており、実現した場合には日本コミュニティが実体的に参加するという条件の下、議論が進められている段階にある。さらに、この分野では、NASA の小型プロジェクトとして提案された SPHEREx による全天分光サーベイの動向も注視する必要がある。いずれにせよ、WISH の 2020 年代初頭の打ち上げが実現した場合には、日本の光赤外コミュニティの WFIRST や Euclid、SPHEREx 等へのハードウェアとしての参画は、例えば系外惑星分野と WACO 開発のみなどといった限定的なものにならざるを得ない。さらなる順位づけは、すばる望遠鏡の将来計画を含む関連分野の動向とも密接に絡んでいるため、今後のコミュニティの議論をまちたい。

最後に、多波長・異分野連携のミッションについて述べたい。現代の天文学では、電波から TeV ガンマ線に至る多波長連携により、天体現象を理解することが必須と言える。さらに 21 世紀の天文学として、重力波、ニュートリノ、宇宙線のような非光子観測の情報が、宇宙物理学を担う重要な要素となっていくことは論を待たない。様々な研究コミュニティが共通のサイエンス目標を掲げ、波長や手段の壁を越えて実施するプロジェクトや、異分野が融合して新たな研究分野を開拓するプロジェクトでは、革新的な研究の進展が起こり得る。光赤天連としても、分野横断的なプロジェクトの重要性は理解しており、本工程表に示している EXZIT および HiZ-GUNDAM が対応するプロジェクトであると認識している。

EXZIT では、黄道光の影響を受けない環境で宇宙赤外線背景放射を観測するためには、外惑星域の探査技術を開発する宇宙工学分野との連携が重要である。また、黄道光の観測と惑星間ダスト直接計数の同時実施や探査する小惑星の周辺ダスト観測に関して、惑星科学分野との融合が新展開をもたらすと期待される。したがって、宇宙工学（探査機技術開発）を推進する分野との連携を推奨する。HiZ-GUNDAM は、GRB を用いた初期宇宙探査のために X 線観測と近赤外線観測の融合が効果的である。また、Time Domain Astronomy の推進や、重力波対応天体の監視、突発天体を主軸としたマルチメッセンジャー天文学の発展を重要課題としており、その影響は多岐にわたる。したがって、光赤天連では、高エネルギー宇宙連絡会や宇宙線研究者会議 (CRC) などと協力して本プロジェクトの提案・実現方法を議論していくつもりである。これらのプロジェクトは、観測対象が比較的限られることから、可視赤外、電波、X 線・ガンマ線といった既存の分野分けに従った場合、分野を代表するプロジェクトとはなりにくい性格を持つ。しかし、その観測結果の波及効果まで見据えた場合、全体としてもたらされる成果は、分野を代表するものとなる可能性もあるため、多分野で連携・協力して、他のプロジェクトと相補的に推進すべきと考える。

2.2 各ミッション候補の概要

本節では各ミッションの概要について述べる。本工程表の提出に際して事務局より依頼があった、物理学を含むより広い分野における位置付けに関する第三者的資料の提出に関連して、例えば SPICA は日本学術会議が提言したマスタープラン 2010 及び 2011 に続き、マスタープラン 2014 [3] においても推進すべき重点計画に位置付けられているほか、米国の Astro2010 (Decadal Survey) [4] においても米国の SPICA への参加が強く推薦されると評価されていることを挙げておきたい。また、Astro2010 では WFIRST が優先すべき 4 つのスペースミッションの 1 つに挙げられていることも付しておく。この他、研究分野内の位置付けについては、以下の各ミッションの項で記載する。

2.2.1 SPICA

目的： SPICA は多様で豊かな宇宙を生んだ二大過程である「銀河成長と惑星系形成」を解明することを目的とする赤外線天文衛星である。中口径の望遠鏡を宇宙空間に設置し、日本がリードしてきた冷却技術を活用し、望遠鏡と観測センサー全体を極低温（6K）に冷却する。このことにより、中間・遠赤外線領域において、従来実現されてきた観測と比較して大幅に高感度、高解像度の観測を目指す。

SPICA の主な仕様

望遠鏡形態	口径	観測モード	波長範囲	波長分解能	視野	空間分解能
極低温冷却望遠鏡 (6 K)	2~3 m	撮像・分光	20-210 μm	$R \sim 1000, \sim 20$	4, 25 arcmin ²	(回折限界)

宇宙科学ロードマップカテゴリ： 戦略的に実施する中型計画

研究領域内での位置づけ： 光赤外分野の三つの主要課題の内、二つをカバーする。1)「宇宙初期からの天体形成」特に銀河と巨大ブラックホールの形成・進化（物質進化）および2)（太陽系外惑星の性質解明）、惑星系形成過程の解明である。

サイエンス成果が与えるインパクト： 宇宙の「激動期」（ $z=1-3$ ）のダストに隠された銀河形成活動が現在の数 10 倍も高かった理由はなにか、その物理と銀河進化における固体物質の生成と役割が解明される。惑星系形成過程における、TNO の重要性や生命の存在環境の証拠となる水・二酸化炭素を含む鉱物学が明らかになる。

主要キー技術とその位置づけ・開発状況・海外とのベンチマーク： SPICA は従来の赤外線望遠鏡と異なり冷媒を用いず、機械式冷凍機を用いて望遠鏡・観測装置を 6 K 以下に冷却する。これは JAXA の戦略的開発要素の一つで、J-T 冷凍機は世界最高性能（特に観測装置のための 1 K 級冷凍機は他に開発例がない）である。また遠赤外線での史上最高感度を実現するための TES ボロメータアレイ検出器がオランダ SRON を中心に開発されており、雑音等価電力 $\text{NEP} = 2 \times 10^{-19} \text{ W Hz}^{-1/2}$ を既に達成した（検出器数個レベルの技術実証だが世界一）。

準備・検討体制： ESA および欧州各国等との国際協力のもとで推進している。国内においては JAXA は衛星システムや機械式冷凍機を担当し、大学コンソーシアム（名大、東大、東北大等）が観測装置の開発を担当する。

準備状況： SPICA は日本学術会議の大型計画マスタープラン（2014）の重点大型研究計画 27 件の一つとして選定された。また文部科学省科学技術学術審議会のロードマップ 2014 の新たな 10 計画の一つである（aa 評価）。当初、SPICA 計画は、ESA および欧州各国等との国際協力のもと、日本主導で計画を進める案（Plan-A）を検討してきた。しかしながら、Plan-A での日本側の経費負担が大きく、実現が困難であると判断され、平成 25 年 5 月、JAXA および ESA の役割分担を見直した案（Plan-B）に移行する方針が ESA/JAXA 間で合意された。Plan-B は、ミッション構成は従来から変更せず、ESA 側の負担を増大し（Cosmic Vision M-class）、JAXA 経費を戦略的中型ミッション規模に軽減する案である。しかしながら Plan-B の準備を ESA-JAXA で進める中で、従来のミッション構成が従来と同じまま（Plan-B）では、想定される資金枠では、実行が困難であることが明らかになってきた。そのため、平成 26 年 5 月以降、想定される日欧の予算枠（前述）で実行可能な案を探る方針（ミッション再定義）を合意し、日欧で計画の再度の見直しを行っている。ESA の Cosmic Vision M5 に応募し、平成 29 年度に日欧においてプロジェクト化し、平成 38 年度（2026 年度）打上げを目指す。

2.2.2 WISH

目的： スペースからの観測ではじめて達成可能な高感度・高解像度で広視野の近赤外線での深宇宙探査を行い、主たる目的として、宇宙年齢が数億年の時代に相当する赤方偏移 $z = 8 - 15$ の銀河を多数検出し、その光度・数密度・スペクトルエネルギー分布の進化を解明して、これらの天体の形成過程や宇宙再電離過程の研究を行うことを主たる目的とするものである。とくに、赤方偏移 $z = 10$ を

越える時代の「初代銀河」と呼ぶことのできる天体の観測は、このミッションではじめて本格的な研究を進めることができる課題である。この主目的に加え、第二の中心的研究課題としては、宇宙の標準光源である Ia 型超新星の系統的な観測から宇宙の加速膨張と暗黒エネルギーの性質の解明にも挑む。これらの目的達成に必要な、これまでにない高感度の広視野赤外線撮像データを取得することにより、初代銀河ブラックホール、初期宇宙ガンマ線バーストや初代星超新星の発見、高赤方偏移の高光度超新星、銀河の形成と進化の研究をはじめ、我々の銀河系の構造まで様々な天文学研究の推進を目指すものである。

WISH の主な仕様

望遠鏡形態	口径	観測モード	波長範囲	波長分解能	視野	空間分解能
広視野光学望遠鏡	1.5m	撮像、分光 (opt.)	1-5 μm	$R \sim 4, \sim 500$	850arcmin ²	回折限界、0.155"/pixel

宇宙科学ロードマップカテゴリ： 戦略的に実施する中型計画

研究領域内での位置づけ： 主目的は、宇宙初期（宇宙年齢数億年）における天体形成（光赤外主要課題のうち、「宇宙初期からの天体形成の解明」）である。その他主要な課題として、Ia 型超新星観測による宇宙膨張史の解明（同、「宇宙の加速膨張と暗黒エネルギー」）に挑み、また、これまでにない広視野深宇宙赤外線探査により、様々な分野で研究をリードするデータを取得する。広視野を活かした観測で銀河系構造や系外惑星探査に挑むことも可能である。

サイエンス成果が与えるインパクト： 銀河宇宙史の解明に残された究極のフロンティアである赤方偏移 8-15 の銀河を多数検出することによりその光度・数密度・スペクトルエネルギー分布の進化を解明し、これらの天体の形成過程や宇宙再電離過程の研究を展開する。とくに、赤方偏移 $z = 10$ を越える時代の「初代銀河」と呼ぶことのできる天体の観測は、WISH ではじめて本格的な研究を進めることができる課題であり宇宙構造形成研究のみならず人類の宇宙史観の確立に大きなインパクトが期待される。Ia 型超新星では、他プロジェクトに比して $z = 1.5$ を超える高赤方偏移で高精度の測定を行い、宇宙膨張史の研究に大きなインパクトが期待される。これまでにない広視野深宇宙探査は様々な分野で新たな研究の進展を促すと期待される。

主要キー技術とその位置づけ・開発状況・海外とのベンチマーク： WISH の特徴は、広視野かつ高解像度で波長 5 μm までの観測が可能なところであり、また、これをできるだけ既存の要素技術を用いて実現することである。現在までに高い成立性を持つミッション及び衛星システムの概念検討を行っている。2020 年代の広視野深宇宙観測計画 (Euclid, WFIRST, HSC/PFS, LSST) とは波長の観点で 2 μm （地上とは 1 μm ）を境に相補的であり、また、Hubble と Spitzer および AKARI の組み合わせと同様に、これらの計画と親和的でもあり併せて大きな成果が期待できる。JWST 望遠鏡とは深さと視野の広さの関係で相補的であり、主目的の $z \sim 15$ の銀河については WISH サーベイではじめて天体を検出できる可能性が高い。WISH の撮像感度は JWST の低分散分光及び TMT など地上 ELT の分光感度とも良くマッチしており、ユニークな詳細観測のターゲットを供給するという点で非常に親和性が高い。

準備・検討体制： 2008 年度から JAXA 宇宙研・理学委員会の WISH Working Group として開発研究を進めており、東北大、国立天文台、大阪産業大、東京大、東工大、京都大、JAXA などの研究者が主体的に参加している。米国スミソニアン研究所、フランスマルセイユ天文研究所、カナダの研究者との国際協力を進めており、2014 年の NASA MoO にも提案を行っている。国内外の研究者から非常に強い科学的支持を得ているミッション計画である。

準備状況： JAXA 宇宙研戦略開発研究経費を中心に、これまで約 1.2 億円程度の予算で検討を進めており、2012 年度までの検討の成果はすでに「WISH ミッション提案書・第一版」としてひろく配布している。平成 27 年 2 月締め切りの「戦略的中型ミッション」に応募する予定である。

2.2.3 JASMINE

目的： 小型 JASMINE は、近赤外線 (H_w バンド：1.1 ~ 1.7 μ m) の波長域における撮像観測を高頻度 (約 100 分に 1 回) で行い、天球面上での天体の位置の時間変動 (時系列データ) を 10 μ as クラスの高精度で測定する (位置天文観測) 計画である。時系列データやそこから導出される年周視差、固有運動等を世界の研究者コミュニティにカタログとして提供する。可視光で見通すことが困難な銀河系中心方向の数平方度の領域のサーベイ (プロジェクト観測) と、高頻度測定を活かせる興味ある特定天体に対する観測 (公募観測) を行う。以上のように観測された時系列データをもとに、以下のような科学目的の達成を目標としている。

- 主な科学目的 (ミッション要求・システム要求に直接つながるもの)：巨大ブラックホールと銀河バルジの共進化の解明を目指し、銀河系 (天の川銀河) を対象として、(i) 銀河形成標準理論の検証につながる巨大ブラックホールの合体形成説の観測的検証、(ii) 巨大ブラックホールへの物質供給機構を決定づける銀河系中心核バルジの重力場解析を行う。
- 副次的科学目的：銀河系内天体で、短時間変動現象を伴い近赤外線で明るく物理的に興味がある、いくつかの特定天体 (例えば、高エネルギー天体連星系、恒星が低質量な系外惑星系、星形成領域、活動恒星など) に対象を特化し、これらの天体の物理的解明を行う。

宇宙科学ロードマップカテゴリ： 公募型小型計画

研究領域内での位置づけ： 光赤外分野の中では、位置天文観測という他の国内のスペースミッションにはない切り口で天の川銀河の研究を行うものである。小型 JASMINE の科学的意義そのものは、2012 年~2013 年にかけて行われた光赤外天文学連合による中規模計画の評価、および学術会議天文学・宇宙物理学分科会による中規模計画への評価でも、高い評価を得ている。具体的には、光赤外天文学連合からは次のようなコメントを頂いている。「本観測は、『赤外線観測』による位置天文学であり、銀河系バルジの星の距離を直接に測定できるものであり、意義は高い。今後、ESA/Gaia 計画が、全天の位置天文観測を行うが、銀河系バルジは星間ダストによる減光の影響のため、観測することができない。本計画は、世界的に見ても他に例がなくユニークであると同時に、Gaia とも相補的である。さらに Gaia の打上 (2013 年) から、あまり遅れることなく、本ミッションも打ち上げられることが望ましい。JAXA の小型衛星計画として実現すべき計画である。」

サイエンス成果が与えるインパクト： 小型 JASMINE の科学目的の一つであり、半世紀にわたり未解決の問題である巨大ブラックホールの形成は、その研究内容に関しては社会的反響も大きく一般の人の関心も高い。さらに、銀河形成論に関しても研究者はもとより広く一般の人が関心を持っている。このような問題に対して、位置天文学的アプローチで行うことは非常にユニークであり、これが可能なのは小型 JASMINE しかなく、非常に科学的価値がある。また、位置天文のカタログは、天文学、天体物理学の幅広い分野での基本情報となるため、高エネルギー天文学 (X 線連星やガンマ線連星の解析など) など他の分野への科学的成果にも貢献できる。

主要キー技術とその位置づけ・開発状況・海外とのベンチマーク：

- 主要キー技術と戦略の中での位置づけ：標準バスの機能要求案は標準バスの仕様を逸脱せず、ミッション機器についてもなるべく確実な技術で構築するように工夫はしている。しかし、目標の測定精度の実現のためには慎重に開発を進めないといけない主要なキー技術として、次の 5 つが挙げられる。(i) 光学系の設計・製作、(ii) 迷光対策、(iii) 熱制御、(iv) 構造・熱安定性、(v) 構造・振動擾乱。以上のキー技術は、他の光赤外スペース計画にとっても共通する技術要素である。小型 JASMINE で培われる上記の技術的ノウハウや経験は、他の光赤外のスペース計画の開発にとっても貢献できると位置づけられる。
- 開発状況：以上のキー技術は、戦略的開発経費により検討を続けてきており、選定された場合の開発フェーズに対しても、具体的な開発・検証計画とリスク対策を十分に検討している。小

型 JASMINE の多くのコンポーネントは BBM、EM、PFM の順に試作・テストするが、(i)～(iv) のコンポーネントについては BBM の前に部分試作モデルを作り、問題点の洗い出し、対策を行う。具体的な複数候補の実現案のトレードオフも検討済みである。特に、最優先すべき (iii) と (iv) については、すでに BBM レベルの試験を開始している。

- 海外の類似のミッションとの比較：小型 JASMINE は、近赤外線帯での観測を行うため、銀河系中心付近に対しては、観測運用を開始した ESA の Gaia(可視光観測) に比べては 3 桁以上多くの個数の星を高精度で測定することが可能である。さらに、Gaia には無い高時間分解能という特徴を活かして短周期変動を伴う天体現象の理解を進展させることができる。小型 JASMINE 計画のユニークさ、必要性が世界でも認識されており、国際天文学連合の Commission8 (世界的な位置天文観測研究者のコミュニティ組織) からは、正式な推薦書を受け取っている。

準備・検討体制：国立天文台のプロジェクト室である JASMINE 検討室が中心となり検討を行っている。衛星開発経験者として技術開発を専門とする支援員も雇用している。さらにミッション検討に関しては、京都大学のメンバーがコアメンバーとなり、また科学的成果に関しては、国内 15 機関の多分野にわたる 25 名程度の研究者でサイエンスワーキンググループを構成して検討を行っている。衛星システムに関しては、JAXA 研究開発本部、宇宙研の工学の先生の協力を得ている。

準備状況：イプシロン搭載宇宙科学ミッション（小型科学衛星）の公募（2014 年 2 月締切）に対して既にミッション提案を行うことができた。最終候補には残らなかったが、明確な課題を与えられるとともに、一定の評価を得ている。その課題の解決の見込みもたってきており、次の公募に備えて準備を行ってきている。なお、2009 年度から今年度まで、主に宇宙研の競争的資金である戦略的開発経費により小型 JASMINE の技術的検討を行っている。科学的成果の検討は、科研費基盤 A（郷田代表）により、2011 年度より検討を行ってきた。

2.2.4 WFIRST

目的：WFIRST (Wide Field Infra Red Survey Telescope) は、2010 年発表の「Astro2010 Decadal Survey」で、大型衛星計画の 1 位に選ばれた NASA の口径 2.4m の近赤外広視野サーベイ望遠鏡である。主目的は、20 世紀後半の宇宙物理学上最大の発見である、宇宙の加速膨張（暗黒エネルギー、修正重力）と系外惑星の起源の解明で、2024 年頃の打ち上げ予定。最大の特徴は、近赤外線 (YJH-band) で 0.28 平方度と言う圧倒的な広視野である。これにより非常に深く高い空間分解能で 2000 平方度にわたる銀河サーベイが可能になり、弱い重力レンズ現象、赤方偏移空間歪み、バリオン音響振動実験及び Ia 型超新星探査によって宇宙の加速膨張の起源が、暗黒エネルギーなのか修正重力なのかの検証を行う。また、重力マイクロレンズによる系外惑星探査により、系外惑星の分布をほぼ全てのパラメータ空間で測定して系外惑星の形成過程を解明する。さらに、高いコントラストを実現するコロナグラフを搭載して近傍の系外惑星を直接観測し、大気成分などを解明する。また、そのユニークな近赤外広視野性能を活かした公募観測も行われる。

WFIRST 広視野カメラの主な仕様

観測モード	波長範囲	波長分解能	視野	空間分解能
撮像・分光	0.7-2.0 μ m	$R \sim 100$ (IFU), ~ 600 (grism)	0.281deg ²	0.11"/pix

WFIRST コロナグラフの主な仕様

観測モード	波長範囲	波長分解能	コントラスト	IWA	OWA	空間分解能
撮像・分光	0.4-1.0 μ m	$R \sim 70$	10^{-9}	0.10-0.25" @ 400nm	0.75-1.8"	17 mas

宇宙科学ロードマップカテゴリ：多様な小規模プロジェクト群

研究領域内での位置づけ：宇宙物理学上の最も重要な二つの課題、宇宙の加速膨張、系外惑星の観測は地上観測も活発に行われている。WFIRST は、これをスペースから圧倒的精度と統計量で観測する決定版である。

サイエンス成果が与えるインパクト：宇宙の加速膨張の起源は何なのか？暗黒エネルギーか、それともアインシュタインの重力理論に修正が必要なのか？ 宇宙の起源に迫る。これまで多くの系外惑星が発見されているが、比較的軽く主星に近いものに限られており、惑星系形成過程はまだ良く理解されていない。WFIRST で惑星の分布を完全に測定する事で、惑星系形成過程の理解は一気に進む。コロナグラフによる惑星大気の詳細観測はこれとは相補的で、生命探査につながる非常に重要な観測である。

主要キー技術とその位置づけ・開発状況・海外とのベンチマーク：NASA は、米国国家偵察局 (NRO) から、打ち上げを取り止めたスパイ衛星の 2.4m 高精度望遠鏡を譲り受けた。これを再利用する事で、大幅なコストとリスクの低減がなされている。主要検出器の広視野カメラは、Teledyne 社製、4k × 4k ピクセル HgCdTe 赤外線アレイ H4RG-10 を 18 枚使用した視野 0.28 平方度とかつてない広視野近赤外望遠鏡である。これはハッブル望遠鏡の近赤外カメラの 200 倍である。この次世代検出器 H4RG-10 の実験室での実証試験は無事終了している。コロナグラフ搭載はまだオプションであるが、すでに 2 つのデザインにダウンセレクトされ、急速に実証開発研究が進み、前向きに検討されている。日本は地上で多くのコロナグラフの経験を持ち、NASA から貢献が期待されている。特に日本独自の技術による高精度マスクの作成や偏光機能の製作が検討されている。これは、将来の究極目標である地球型惑星の直接観測に向けた技術実証試験の役割も担う。

準備・検討体制：NASA 主導で、日本、カナダ、欧州各国が部分参加する形で国際協力のもと推進している。国内においては WFIRST 連絡会（代表：山田亨（東北大）、幹事：住（阪大）、約 30 名）を設立し、各分野からの有志で参加への検討を進めている。また、JAXA/ISAS に WACO(WFIRST/AFTA Coronagraph) ワーキンググループ（主査：田村（東大）、幹事：村上（北大）、約 13 名）を設立し、小規模ミッション枠（国際協力）でコロナグラフ装置の一部を担当する事を目標に、実証開発研究を行っている。

準備状況：WFIRST は、米国 Decadal Survey で大型衛星計画の 1 位に選ばれた、HST、JWST に次ぐ NASA 最優先の基幹宇宙望遠鏡で、2013 年、2014 年にそれぞれ 10MUSD、56MUSD の研究開発費が付いており、その実現性は高まっている。2015 年 1 月には Science Definition Team (SDT) による最終検討書が提出され、2016 年には最終判断が下される。日本からは、2010 年からの初期 WFIRST SDT 及び、2013 年からの 2.4m バージョン SDT にも代表者が参加しており、NASA 関係者と密接に連絡を取り合っている。2015 年 1 月の SDT レポートにも日本の潜在的興味の表明を記載する準備を行った。日本の貢献としては、コロナグラフ装置の一部の提供、Ka-band でのデータダウンリンク基地局の使用、すばる/HSC,PFS 観測による赤方偏移の較正、データ解析、アーカイブ、地上近赤外マイクロレンズ観測による WFIRST 観測領域の最適化などが検討されている。WACO WG は、H26 年度戦略的開発経費を受けて、コロナグラフ装置の開発をすでに進めている。また、WFIRST プロジェクトチームが所有する 4 枚の H4RG-10 を使用した地上近赤外マイクロレンズ観測のために科学研究費補助金の応募も行っている。

2.2.5 Euclid

日本からは Euclid プロジェクトへの直接の貢献はまだ無いが、今後の参加の可能性についてコミュニティで検討している段階であるため、限定的に掲載するものである。

目的：2020 年頃打ち上げ予定の ESA の口径 1.2m の可視光近赤外広視野サーベイ望遠鏡であり、可視光で 0.54 平方度と言う圧倒的な広視野を利用して、全天の 4 割近く (15000 平方度) にわたる銀河サーベイを行い、弱重力レンズ、バリオン音響振動により宇宙の加速膨張の起源を探る。

Euclid の主な仕様				
観測モード	波長範囲	波長分解能	視野	空間分解能
可視光撮像	0.55-0.90 μm	single wide band	0.541deg ²	0.1"/pix
IR 撮像・分光	0.92-2.0 μm	$R \sim 300$ (1.1-2 μm slitless),	0.541deg ²	0.3"/pix

宇宙科学ロードマップカテゴリ：（申請予定は無し）

準備状況・検討体制など：ESA 主導で、米国が部分参加する形で推進している。2012 年 6 月に Euclid Consortium Leader の Yannick Mellier 氏が来日し、日本にすばる・HSC 観測での協力およびプロジェクト参加の依頼があった。HSC 関係者やすばる SAC およびコミュニティで議論が進められている。
その他：研究領域内での位置づけやサイエンス成果については、§2.1.1 を参照のこと。

2.2.6 EXZIT

目的： 宇宙創成以来の天体形成過程の解明を目指し、 $z > 10$ の宇宙再電離期やその原因となった宇宙で最初の星やブラックホールが発した電離紫外線を、赤方偏移した「近赤外線の宇宙背景放射」として捉える。具体的には、初期天体特有の水素再結合線や吸収端構造（ライマン・ブレイク）をスペクトル検出する。過去の COBE、IRTS、AKARI といった衛星やロケット実験 CIBER により、近赤外線の宇宙背景放射は既知の系外銀河光の総計よりも数倍明るいことが発見されたが、その「赤外超過の謎」を宇宙初期天体による寄与とともに解明する。当該波長では前景放射である黄道光（惑星間ダストによる太陽光散乱）が極めて明るく、その差引き系統誤差が宇宙背景放射の測定精度を制限している。この状況を打破すべく提案した EXZIT (EXo-Zodiacal Infrared Telescope) は、惑星間ダストが希薄な深宇宙へ投入する探査機に望遠鏡を搭載し、黄道光の影響のない究極の精度の宇宙背景放射観測を実現する。また、惑星間ダストの研究にも飛躍的な進展が期待できる。

宇宙科学ロードマップカテゴリ： 戦略的に実施する中型計画

研究領域内での位置づけ： 宇宙初期の天体形成過程の解明を目指すことでは WISH や HiZ-GUDAM と共通の課題に取り組むが、これらでは個別に分解しきれない低光度天体群が発する光をもれなく捉えうる宇宙背景放射を観測する。将来のスペース望遠鏡の方向性の観点では、これまでは良い測定環境を求めて地上からスペースへと向かったように、新たに「深宇宙・惑星間空間からの天文学」を開拓する重要な役割を担う。さらに特筆すべきこととして、本計画は「ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群小惑星の探査」という宇宙工学ミッションを主体とした、探査工学、惑星科学、天文学の異分野が連携する世界にも例をみない極めてユニークなミッションである。天文学としては「小規模ミッション」にあたる計画であるが、将来の科学ミッションの試金石となるであろう。

サイエンス成果が与えるインパクト： 最初の天体形成や宇宙再電離期の理解は、宇宙創成や宇宙の晴上がり期と並ぶ宇宙論の最重要課題と考えられており、国内外の将来のスペース天文ミッションの多くがこの課題に取り組むものである。また、過去にない精度での拡散光観測により、銀河系や銀河間空間の知られざる姿を浮き彫りにする。例えば、CIBER の結果が示唆する系外銀河ハロー浮遊星を定量すれば、ダークマター構造形成論における「失われた伴銀河」や「見えないバリオン」の問題解決に貢献できる。宇宙背景放射の光子数密度は、活動的銀河からの TeV ガンマ線との対生成による銀河間吸収過程に関わるため、宇宙線・素粒子分野に広く影響を与える。さらに、惑星間ダストの理解は観測の困難さから近年は置き去りにされてきた分野であるが、その進展は太陽系科学や惑星系形成の研究に不可欠である。

主要キー技術とその位置づけ・開発状況・海外とのベンチマーク 原子力電池をもたない我が国が惑星領域の探査を進めるには、他国に先行して IKAROS により実証したソーラーセイル技術が必須である。その本格的な応用としての工学ミッションであるソーラー電力セイルの開発が JAXA を中心に進められている。ソーラー電力セイルに搭載する EXZIT は、惑星間空間航行中に宇宙背景放射と黄道光の日心距離変化の観測を行なう。EXZIT の仕様を下表にまとめる。このような仕様の小型近赤

外線装置は、IRTS、AKARI、CIBER/CIBER-2 等の開発実績により技術的成熟度が高く、今後の技術課題は搭載環境が主である。高感度赤外観測のため放射冷却により 80-100 K まで冷却するが、その技術要素は SPICA での開発や「はやぶさ 2」搭載 NIRS3 の実績が参照できる。探査機の姿勢安定度や深宇宙での通信量制限は主要な課題であり、今後も重点的にシステム検討を行なう。なお、外惑星探査機だけでなく惑星間ダストが希薄な黄道面外に到達する人工惑星に EXZIT を搭載する代替案も検討していることを付記しておく。惑星探査の機会が多い米国では、EXZIT より後発で同様の搭載検討がなされた例があるが、実現の見通しは立っていない。他国には同様の提案はない。

EXZIT の主な仕様						
望遠鏡	波長範囲	波長分解能	視野	空間分解能	質量	搭載探査機
口径 10 cm 温度 < 100 K	0.6–2 μ m (option 2–10 μ m)	$R \sim 20$	4×0.2 deg ²	1 arcmin	~10 kg	ソーラー電力セイル / 他 黄道面外ミッション

準備・検討体制: ソーラーセイル WG による開発体制のもと工学ミッションとして準備をすすめ、惑星間ダストの計数やトロヤ群小惑星探査に関わる惑星科学コミュニティのメンバーと協同で搭載機器を検討している。EXZIT の搭載検討は、ロケット実験 CIBER/CIBER-2 の開発メンバーを中心とする、宇宙研、東北大、国立天文台の研究者で行なっている。今後、CIBER/CIBER-2 チームをはじめとする海外の共同研究者との協力体制を強化する。

準備状況: ソーラーセイル WG 発足当初より、外惑星間空間への機器投入の貴重な機会を利用した科学観測として EXZIT の搭載提案を行ない、探査機システムとともに仕様や要素技術の検討を行なっている。これまでに科研費や ISAS 搭載機器基礎開発経費などにより、光学系や熱構造検討および要素技術実証を実施してきた。ソーラー電力セイルを含む探査技術実証の計画は、日本学術会議大型計画マスタープラン 2014 において総合工学分野の重点大型研究計画として選定された。ソーラー電力セイルは、2020 年代の打上げを目指し、JAXA 宇宙科学研究所の戦略的中型ミッションとして提案予定である。

2.2.7 HiZ-GUNDAM

目的: GRB を用いて宇宙暗黒時代の終焉と天体形成の幕開けの観測を目標とした HiZ-GUNDAM プロジェクト [10] では、初期宇宙における星形成、宇宙再電離、重元素合成の歴史的な変遷をガンマ線バースト (GRB) を利用して観測し、初期宇宙形成史の解明に寄与することを目標としている。数ある GRB の中から、年間 10 例程度の高赤方偏移イベントを抽出し、それらの情報を元に地上や宇宙の大型望遠鏡と共同で効果的に精密分光観測を行う。

宇宙科学ロードマップカテゴリ: 公募型小型計画

主な仕様と観測戦略:

1. 高赤方偏移で発生した GRB を広視野 X 線検出器で発見し、発生時刻と大まかな発生方向を第一報のアラート情報として地上観測者へ通報する。
2. X 線の情報を元に自律的に衛星姿勢を変更し、近赤外線望遠鏡で追観測を実施する。
3. 近赤外線の詳細な発生方向を同定し、測光観測によって赤方偏移と明るさを測定した上で、第二報のアラート情報を通報する。

フォローアップ観測を行うすばる望遠鏡や TAO, TMT, JWST の分光感度、ToO への対応時間を考慮すると、測光感度が 20 等級 (AB) の近赤外線望遠鏡で観測を行い、GRB 発生から少なくとも 15 分以内にミッションを遂行することが要求される。そのため、HiZ-GUNDAM には口径 30 cm の近赤外線望遠鏡で、0.4–1.7 μ m 帯を 4 バンドに分けた測光観測を行うことを検討している。すべての GRB に対してこのような感度での観測を地上望遠鏡で実現するには、複数台の 3~4 m 級の専用望遠

鏡を世界中に配置する必要があるため、スペースにおいて 30cm 級の近赤外線望遠鏡を実現する意義は極めて高い。

研究領域内での位置づけ：HiZ-GUNDAM プロジェクトで掲げる科学目的を達成するためには、地上・スペースの大型望遠鏡と連携することが重要である。したがって、実現時期は TMT が稼働する 2020 年代前半が効果的である。この時期には、中国・フランスが検討を進めている SVOM 衛星が実現する可能性もあるが、望遠鏡の観測波長帯域が 400–950 nm であることから、原理的に $z > 6.8$ の GRB を検出することはできない。それに対して HiZ-GUNDAM は 1.7 μm までの近赤外線観測することから、 $z = 13$ までの GRB を観測対象としている。したがって、宇宙再電離や第一世代星を起源とするような GRB 天体を観測するために、HiZ-GUNDAM は重要な位置づけであり、SVOM と同時期であったとしても実施すべきミッションと位置づけている。

サイエンス成果が与えるインパクト：宇宙再電離時期の特定や宇宙最初の重元素合成についての知見を得られると期待できる。また、高赤方偏移 GRB の検出数から、初期宇宙における星形成の遍歴が得られるだろう。これらは、「宇宙で最初の星はいつ誕生したのか？」や「この宇宙はどのように進化してきたのか？」という根本的な疑問に対して、観測的にアプローチできることに相当し、TMT が掲げる GRB 初期宇宙探査という大きな目標を、強力に推進することができる [8]。

初期宇宙の探査はキューサーなどでも行われているが、いわゆる Gunn-Peterson テストでは、中性水素の割合が 10^{-3} よりも高くなると吸収線構造が飽和し、測定が不可能になってしまうことが問題視されている。また、宇宙マイクロ波背景放射の場合は、視線方向に積分された情報となるため、明確な時代の特長が難しく、複数回の電離状態を探るなどは不可能である。一方、GRB にはいくつかのメリットが存在する。例えば、GRB の残光はシンクロトロン放射でありスペクトルの形状がシンプルなため、ライマン α 吸収端の構造を測定する際の不定性が少ないことや、GRB は突発天体であるため、自らの放射で周囲を電離してしまう効果が小さいことなどが挙げられる。また、GRB の母銀河は比較的矮小であることが多く、十分に進化した銀河を対象とするよりも、無バイアス性の高い探査が可能となる点も重要であり、銀河やキューサー探査とは相補的な利点が多い。

主要キー技術とその位置づけ・開発状況・海外とのベンチマーク：可視光・近赤外線望遠鏡と広視野 X 線撮像検出器が共存するミッションとなる。近赤外線望遠鏡は CIBER-2 ロケット実験と類似した光学系を採用しているため、要素技術を CIBER-2 で確立し、HiZ-GUNDAM へ継続することを考えている。X 線検出器については、金沢大学が中心となって開発を進めている。

準備・検討体制：HiZ-GUNDAM は、2009 年より具体的な検討と基礎開発を開始しており、2012 年に宇宙科学研究所に小型科学衛星ワーキンググループ（旧称）を設置している。

準備状況：2010 年度に三菱財団自然科学研究助成、2013 年度からは科研費基盤 A の助成を受けて検討・開発を進めている。

3 光学赤外天文学分野の工程表

本章では、前章までに述べた背景に基づき策定した本分野のスペース工程表を掲げる。工程表は、基幹プロジェクトである SPICA の打ち上げ時期により分岐があり、ケース 1 とケース 2 に分かれている。

3.1 ケース 1: 2020 年代中・後期に SPICA を実現

我々は SPICA のいち早い実現を最優先課題と掲げており、SPICA の 2020 年代中・後期の打ち上げと観測運用開始を目指す。その実現に向け、コミュニティ全体で開発やサイエンス検討に取り組む。これをケース 1 と定義し、図 2 に工程表を掲げる。SPICA や他の大規模プロジェクトではカバーされないサイエンス分野の小型衛星ないし小規模プロジェクトでの実現の可能性があるプロジェクトについて、当該分野の研究者や学生が中心となって多波長・異分野まで含めたチームを形成し、実現に向けて機動的に取り組むことを側面から支援する。小型 JASMINE や WFIRST, Euclid, HiZ-GUNDAM, EXZIT がそれに該当する。状況次第では、プロジェクト同士の交流や合流を促すこともあり得る。

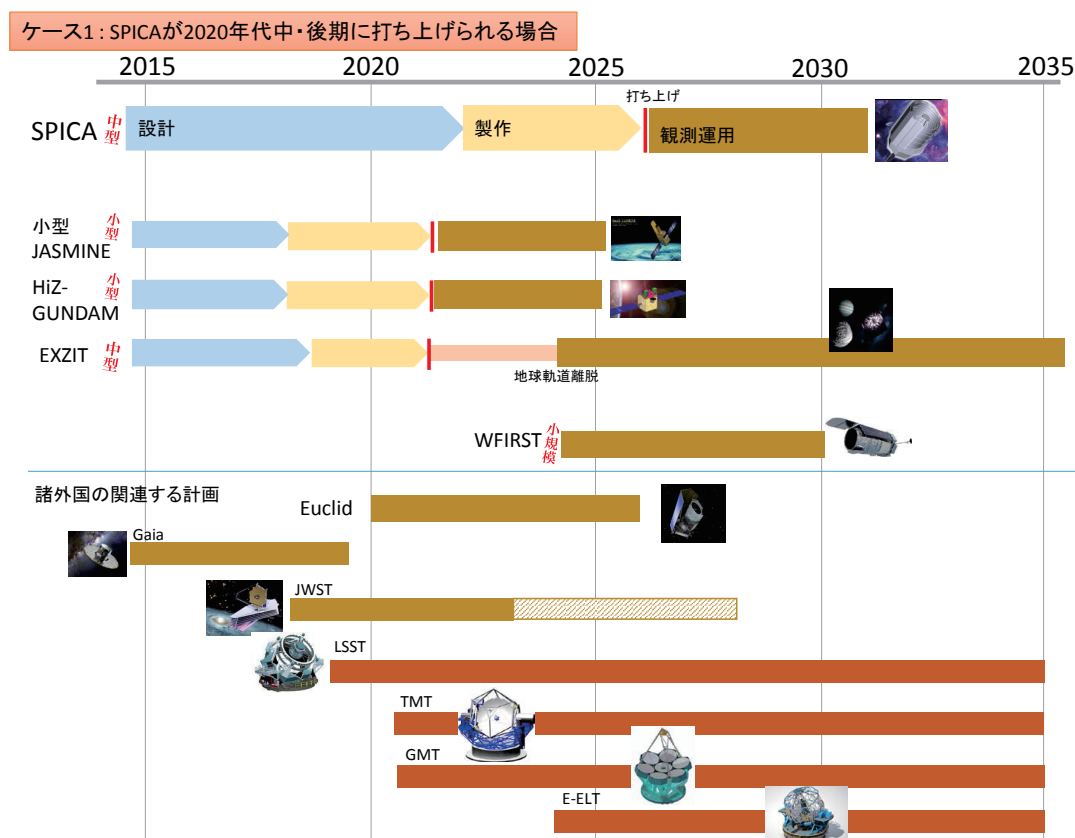


図 2: 工程表ケース 1: 2020 年代中・後期に SPICA 打ち上げ。ミッション名の後ろに赤字で記した符号は JAXA のプロジェクト・カテゴリを表しており、「中型」が戦略的に実施する中型計画 (300 億円程度)、「小型」が公募型小型計画 (100-150 億円程度)、「小規模」が多様な 小規模プロジェクト群 (カテゴリ A/B/C) を指す。EXZIT についてはは親計画である 工学ミッション「ソーラー電力セイル」のカテゴリを表している。

3.2 ケース 2: 2020 年代初期に WISH を実現し、2030 年代に SPICA を実現

何らかの事情により、本分野の基幹プロジェクトである SPICA の実現が 2030 年代まで遅れることになった場合には、WISH を 2020 年代前半に実現することが本分野の最優先目標となる。SPICA の設計は WISH の製作・観測運用と並行して実施し、WISH の観測運用の後期から SPICA 衛星の製作が本格化するスケジュールとなる。これをケース 2 と定義し、図 3 に工程表を掲げる。小型衛星や小規模プロジェクトの扱いはケース 1 とほぼ同等であるが、小型 JASMINE は WISH の 2020 年代前半の実現の目途がついた場合には、WISH と協力して実現する方向を目指すほか、WFIRST や Euclid への参画は WFIRST/WACO のみといった限定的なものとなる。

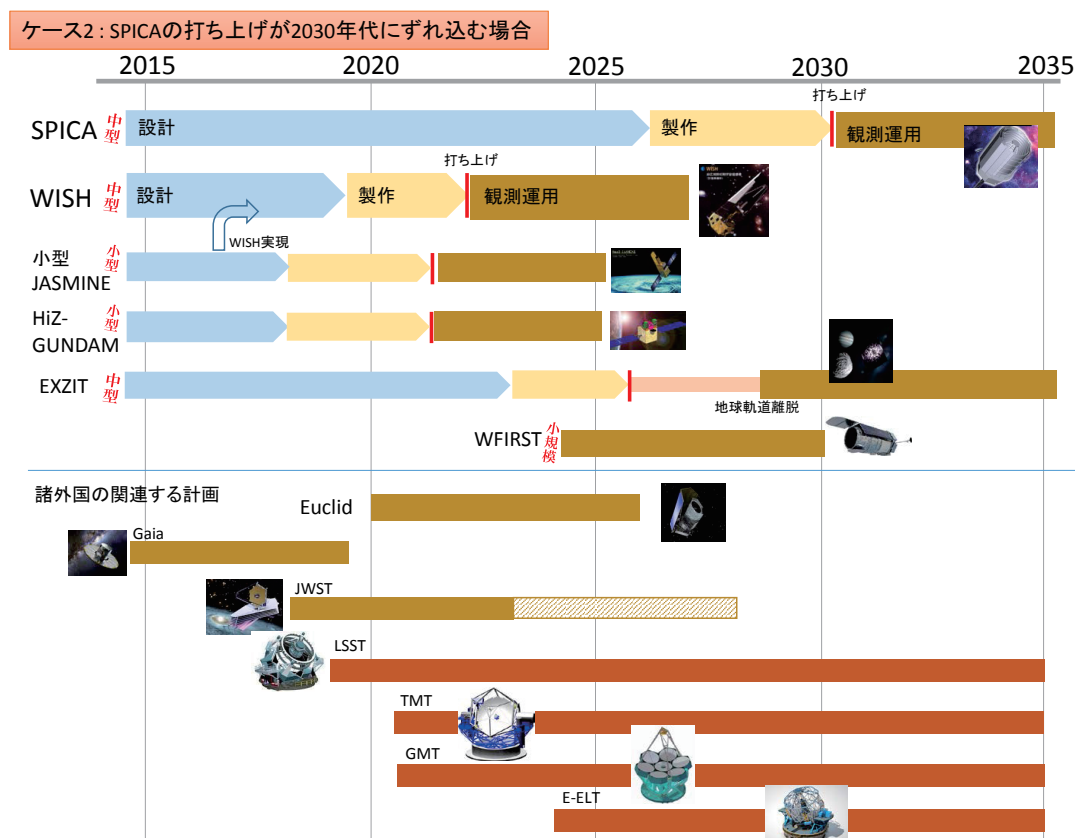


図 3: 工程表ケース 2: 2030 年代に SPICA を実現

参考文献

- [1] 2020 年代の光赤外天文学: 光学赤外線天文連絡会 将来計画検討報告書, 編集代表 松原英雄, in prep. (2015 年刊行予定)
- [2] 「天文学・宇宙物理学中規模計画の展望」 2014 年 9 月、日本学術会議・物理学委員会・天文学・宇宙物理学分科会、第 3 章、<http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/kiroku/3-140912.pdf>.
- [3] 「第 22 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン(マスタープラン 2014)」 2014 年 2 月、日本学術会議・科学者委員会・学術の大型研究計画検討分科会、<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t188-1.pdf>.
- [4] Astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey, http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA_049810.
- [5] Ueda, Y., Akiyama, M., Ohta, K., & Miyaji, T., 2003, ApJ, 598, 886
- [6] Akiyama, M., Ueda, Y., Ohta, K., Takahashi, T., & Yamada, T., 2003, ApJS, 148, 275
- [7] Kawai, N., et al., Nature 440, 184-186 (2006)
- [8] <http://tmt.mtk.nao.ac.jp/intro-j.html>
- [9] Totani, T., et al., PASJ, Volume 66, Issue 3, 6313 (2013)
- [10] Yonetoku, D., et al., Proceedings of the SPIE, Volume 9144, id. 91442S 12 pp. (2014)
- [11] Zemcov, M., et al., ApJS, 207, 31 (2013)