

究極の天文観測の実現を目指す 惑星間空間望遠鏡

津村 耕 司¹
松浦 周二²



津村

松浦

〈¹ 東京都市大学 知識工学部 自然科学科 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1〉

〈² 関西学院大学 理工学部 物理学科 〒669-1337 兵庫県三田市学園 2-1〉

e-mail: ¹ tsumura@astr.tohoku.ac.jp, ² matsuuura.shuji@kwansei.ac.jp

究極の高感度を有する将来の光赤外線宇宙望遠鏡は巨大な口径を想定することが多いが、その実現には巨大なコストと長い技術開発期間を要する。他方、小型望遠鏡であっても設置場所を地球から離れた惑星間空間にさえすれば、太陽系内の前景光の低減により、特段の技術開発なく感度を大幅に向上できる。我々は、このような「惑星間空間での天文観測」の実証機として、ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群探査計画OKEANOSに搭載する赤外線望遠鏡EXZITの開発を進めている。本稿では、EXZIT等の探査機搭載望遠鏡を紹介するとともに、将来の光赤外線望遠鏡として構想している惑星間空間望遠鏡（Interplanetary Space Telescope, IPST）について、感度や実現性の検討例を示しつつ紹介する。

1. はじめに

天文観測にとって暗い環境は重要である。肉眼では6等星まで見えると言われているが、現代の街中だと光害により3等星がせいぜいである。これは街明かりという前景光に、暗い天体からの光が隠されてしまうからである。現代社会において光害の影響は大きく、光害により天の川が見えない地域は日本の面積の約半分にも及び、そこに日本人口の9割以上が住んでいる¹⁾。したがって、究極の天文観測を考える場合に、どれだけ大きな望遠鏡を作るかという議論に加えて、どれだけ暗い場所に望遠鏡を設置するかも重要な観点となる。

現在、2030年代以降の将来の大型天文プロジェクトの議論が国内でも始まりつつある。その中で我々は「天文観測にとって最適な暗い環境に行く」という観点から、黄道光に邪魔されない惑

星間空間（太陽系の黄道面内を「横」方向に $R > 5 \text{ au}$ 、もしくは黄道面外の「上」方向に $Z > 1 \text{ au}$ 、ここで R は太陽からの黄道面内の水平距離、 Z は黄道面からの鉛直距離）に赤外線望遠鏡を設置することを検討しており、具体的なプロジェクトのもとに装置開発を進めている。この構想については光学赤外線天文連絡会（光赤天連）による「2020年代の光赤外天文学」²⁾ や「2030年代の光赤外スペース将来計画に向けた検討報告」³⁾ でも、日本が推進すべき有力な将来計画の一つとして言及されている。そこで本稿では、我々が検討・開発を進めている「惑星間空間からの天文観測」について紹介する。

2. 望遠鏡の進化の方向

2.1 信号を増やす

可視光・赤外線での天文観測における信号雑音

比 (S/N比) を高める方法としてまず思いつくのは、望遠鏡の口径を大きくして信号を増やすことである。ガリレオ・ガリレイによる歴史上初めての天体望遠鏡は口径2 cm程度であり⁴⁾、現在の世界最大の地上光学望遠鏡は口径10 m級であることから、望遠鏡の集光面積は400年で6桁近くも向上した。現在では口径30 m級の地上光学望遠鏡計画が3つも進んでおり、これらが完成すればさらに1桁近く集光力が向上する。しかし、感度をさらに桁で向上させるためには、次は口径100 m級の地上光学望遠鏡が必要であるが、過去にESOで検討された100 m望遠鏡計画OWLが見直された例もあり、近い将来にその規模の地上光学望遠鏡が本当に実現可能かどうかは、予算的・技術的な観点から楽観視できない。

可視光・赤外線の出検器の感度を向上させることで、天体からの信号を増やすこともできる。1980年代に可視光の出検器は写真乾板からCCDに急速に置き換えられていった。写真乾板の量子効率率は1%程度なのに対し、CCDの量子効率率は90%を超えるため、ここで2桁程度の感度向上の革命があったことになる。

2.2 雑音を減らす

次に、「雑音(ノイズ)を減らす」というもう一つの方向による感度向上について考える。

熱雑音や読出しノイズなどの出検器起因のノイズは、出検器の冷却や、読出し回路の工夫などにより、多くの天文観測では十分なレベルにまで低減されている。今後も技術開発によりノイズの低減は進むであろう。

出検器のノイズが極めて小さい場合には、背景光のフォトンノイズが支配的となる。図1は、光害を無視した場合の背景光のスペクトルである。一般的な可視光・赤外線による地上観測では、地球大気が支配的な背景光となる。地球大気は、太陽からの紫外線によって励起されたOH分子による放射によって、主に上空およそ90 km付近で明るく輝いている⁵⁾ ことに加え、2 μmより長波長

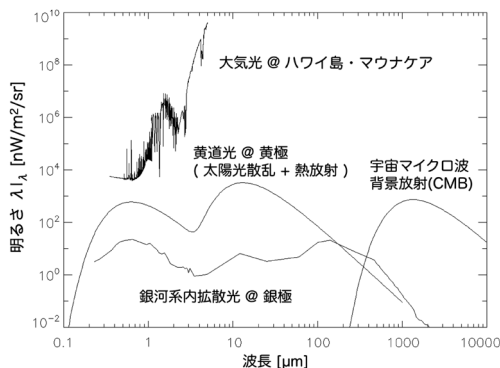


図1 天文観測における背景光スペクトル。

では地球大気の熱放射が支配的となる。そこで天文学者は、地球大気に邪魔されない高感度の天文観測を求めて、望遠鏡を大気圏外の宇宙にまで持って行った。宇宙望遠鏡である。感度だけを考えるならば、近赤外線において、口径30 cmの宇宙望遠鏡は、口径4 mの地上望遠鏡に匹敵する。

大気圏外からの天文観測においても、他に様々なノイズ源が存在する。例えば遠赤外線観測では、望遠鏡自身からの熱放射が支配的なノイズ源となる。そこで、現在検討が進められている次期赤外線宇宙望遠鏡SPICAでは、口径2.5 mながらも望遠鏡全体を8 Kにまで冷却することで、Herschel宇宙望遠鏡(口径3.5 m、望遠鏡温度80 K)と比べて2桁の感度向上を目指している⁶⁾。

一方で、望遠鏡からの熱放射が無視できる可視光や近赤外線での宇宙からの観測では、黄道光が最も明るい背景光となる。そこで、黄道光に邪魔されない環境での天文観測を目指すことで、感度を桁で向上させる余地がここには残っている。

3. 黄道光

3.1 惑星間塵と黄道光

太陽系内には小惑星同士の衝突や彗星の活動により放出されたダスト(惑星間塵)が漂っている。近地球での惑星間塵の密度はおよそ 10^{-19} kg/m³であり⁷⁾、それらは地球に年間 5×10^7 kgも降り積もっている⁸⁾。可視光・近赤外線では惑星間塵

による太陽光の散乱によって、中間・遠赤外線では惑星間塵からの熱放射によって、太陽系全体が淡く光っている。これが黄道光である*1。

地上から観測される黄道光の輝度は、太陽系内での各位置における惑星間塵からの放射（太陽光の散乱および熱放射）を視線方向に積分したものとなる。このため、ダスト密度が低い黄道面外や外惑星領域（>3 au）における黄道光環境を地球から調べるのは困難である。

3.2 Pioneer 探査機による黄道光観測

そんな中で注目すべきは、NASAの外惑星探査機Pioneer 10/11号による黄道光の観測である^{9,10}。Pioneer 10号は1972年に打ち上げられ、世界初の木星探査機となり、その翌年に打ち上げられたPioneer 11号は世界初の土星探査機となった。これら2機の探査機にはImaging Photopolarimeter (IPP)¹¹という装置が搭載されており、440 nmと640 nmの可視光2バンドで黄道光を観測しながら太陽系を外側に向けて飛行した。その観測の結果、太陽から遠ざかるにつれて黄道光は $R^{-2.5}$ で暗くなり、3.3 auを超えたあたりで検出限界以下となった⁹。この観測から、小惑星帯(2.2-3.2 au)を越えれば、黄道光に邪魔されない理想的な環境が広がっていることが想像できる。

太陽系の外惑星領域には、木星探査機Galileoや土星探査機Cassiniなど、Pioneer以降も数々の探査機が飛行しているが、これらの探査機は惑星観測を主目的としており、観測装置も明るい惑星の近接観測に最適化された設計となっているため、そのような装置で暗く淡い黄道光を観測することはできない。実際に津村はCassiniがキャリブレーション目的で深宇宙を観測したデータを重ね合わせて黄道光を検出する解析を試みたが、残念ながら黄道光は検出できなかった。一方でPioneer探査機に搭載されたIPPは、まさに黄道光の

明るさの日心距離依存性を観測することが主目的の1つとして設計された装置であるため、1970年代の装置でも、黄道光の観測が実現できたのである。Pioneer以降、外惑星領域で黄道光を検出できる感度での観測を実現したのは、冥王星探査機New Horizonsによる一例のみである¹²。

3.3 COBE衛星による黄道光観測

近地球からの黄道光観測で大きな成果をあげたのはCOBE衛星である。COBEといえば宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の観測で有名である。COBEに搭載されたFar-Infrared Absolute Spectrophotometer (FIRAS)によるCMBスペクトルの観測¹³およびDifferential Microwave Radiometer (DMR)によるCMBの空間的ゆらぎの観測¹⁴により、ジョン・マザーとジョージ・スムートが2006年にそれぞれノーベル物理学賞を受賞した。しかしCOBEにはもう1つ、赤外線での背景放射観測を目的としたDiffuse Infrared Background Experiment (DIRBE)¹⁵という装置が搭載されていた。DIRBEの主目的は後述する赤外線背景放射の観測であったが、その前景光除去のため、DIRBEの観測に基づいて詳細な黄道光モデルが作られた¹⁶。図2は、この黄道光モデルにより与えられた惑星間塵の密度分布である。

黄道光の輝度は、各々のダスト粒子による放射強度を視線方向に積分することで得られるが、当然ながら観測者の位置に依存する。図3は、惑星間空間の様々な位置から見た黄道光の輝度を津村がこのモデルに基づき計算したものである。これによると、黄道面内では木星軌道(5.2 au)まで行けば黄道光は近地球の数%程度になる(図3上)。また、黄道面外では1 auも行けば木星軌道と同等の黄道光環境となる(図3下)。惑星探査機は黄道面内を航行することが多く、現在までに黄道面を離脱した探査機は1990年に打ち上げら

*1 黄道光という用語は前者の散乱光成分のみを指し、後者の熱放射成分を含まないこともあるが、本稿では散乱光成分と熱放射成分を合わせて黄道光と呼ぶことにする。

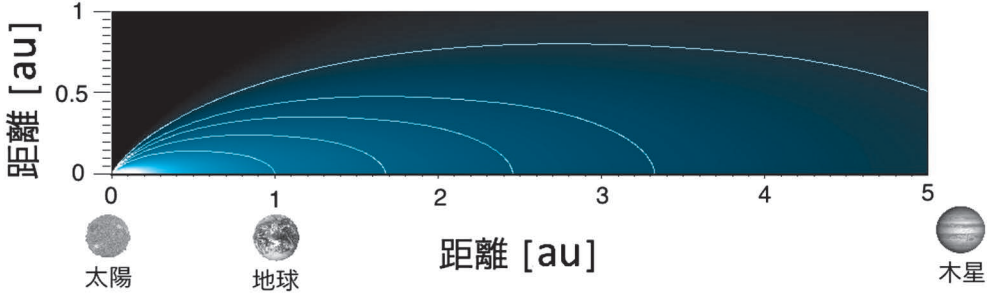


図2 DIRBEの観測に基づくモデル¹⁶⁾における惑星間塵の密度分布. 色は密度の対数を表しており, 色が薄い方がダスト密度が濃い. 線は地球軌道上でのダスト密度の1, 0.5, 0.3, 0.2, 0.1倍を示している.

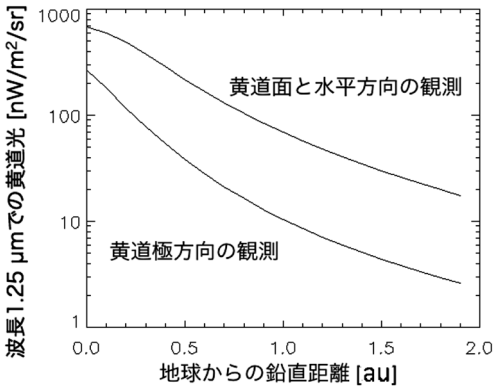
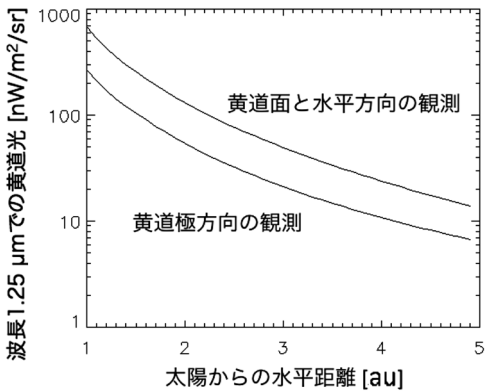


図3 太陽系内での黄道光の変化のモデル計算. 上図は黄道面内を水平方向に, 下図は鉛直方向に移動した場合に, 黄道面内の反太陽方向と黄極方向を観測した場合の黄道光の変化を表している.

れたNASA/ESAの惑星間空間探査機 Ulysses のみであり*2, 太陽の極軌道に入るために木星スイングバイを行っている. Ulyssesには黄道光を観測できる装置が搭載されていなかったため, 人類はまだ鉛直方向の黄道光分布を実測できていない.

3.4 赤外線背景放射の観測

黄道光に影響されない天文観測においては, 点源に対する感度が向上するだけではなく, 面輝度の絶対測定ができるという観点から, 質的に新しい観測も拓かれる. 星や銀河などを観測する場合, 周囲の空の明るさを指し引くことで, 観測対象である星や銀河などからの光を背景と分離できる. この場合, 観測対象の星や銀河と比べて背景が極めて明るくても, 望遠鏡口径を大きくしたり, 積分時間を伸ばすなどして, 検出した光子の統計を増やせば, 観測天体を背景から分離して検出することは原理的に可能である. 一方で, その背景の空の明るさ, すなわち背景放射を観測対象とする場合, 明るい前景放射と背景放射との分離は困難となる¹⁷⁾. そのような状況の中, 我々は可視光・近赤外線での背景放射の観測に取り組んできた¹⁸⁾.

点光源の観測では, 感度は望遠鏡の集光面積 S に比例するが, 背景放射のような面輝度観測の場合は, 望遠鏡の視野(立体角) Ω を乗じた $S\Omega$ に比例する. したがって, 視野を大きくすること

*2 Pioneer 11号と Voyager 1号は土星スイングバイで, Voyager 2号は海王星スイングバイでそれぞれ黄道面から外れる軌道を飛んでいるが, これらはすでに黄道光の影響がない外惑星領域に達した後の話であるため, ここでは考えない.

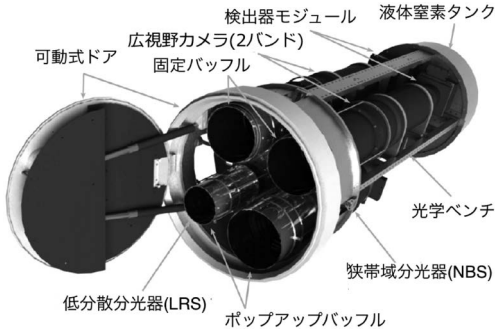


図4 ロケット実験CIBERの観測装置¹⁹⁾. 4台の観測装置が液体窒素によって冷却され、2009年から2013年にかけて赤外線背景放射の撮像と分光観測を行った。

で、小口径でも面輝度に対する感度が良い望遠鏡を実現できる。そこで我々は、NASAの観測ロケットに口径10 cm程度の望遠鏡を4台搭載して打ち上げ観測を行うCIBER¹⁹⁾ (図4)を進め、2009年から2013年にかけて4回の打ち上げ観測を実施した。搭載装置の1つ、低分散分光器 (Low Resolution Spectrometer, LRS)²⁰⁾では、0.7-1.8 μm での面輝度分光観測を実施した。LRSの口径は5 cmながらも視野が5.3度もあるため、Hubble宇宙望遠鏡 (口径2.5 m, 視野2.7分角)の5.5倍以上の面輝度感度を有する。LRSの観測データから黄道光²¹⁾や銀河系内拡散光²²⁾をモデルや相関解析により分離した結果、系外銀河の積算光や銀河系内の前景放射では説明できない様な背景放射の超過成分を検出した²³⁾。また、同じくCIBERに搭載された広視野カメラ (口径11 cm, 視野2度)²⁴⁾の観測からも、予想外に大きな背景放射の空間的ゆらぎが検出された²⁵⁾。この背景放射の超過成分の起源は未だ謎であるが、銀河衝突により剥ぎ取られたダークハロー浮遊星²⁶⁾、LIGOにより重力波で検出されたようなブラックホールの元となった原始ブラックホールへのガス降着²⁷⁾、未知の素粒子の崩壊に伴う放射光²⁸⁾などが起源として提案されている。

我々はより良い感度で詳細に赤外線背景放射の

観測を行なう後継のロケット実験CIBER-2²⁹⁾の準備を進めている (2019年打上げ予定)。CIBER-2では約10倍の検出感度向上により赤外線背景放射ゆらぎの起源に関する仮説を検証し、さらに黄道光が特に明るいゆえ過去に観測例がほとんどない可視光波長をカバーすることで確度の高い背景放射スペクトルの測定を行なう。しかし、CIBER-2においても黄道光の差引き誤差は無視できない。20年以上も議論が続いている赤外線背景放射の起源についての論争に決着をつけるには、黄道光に邪魔されない惑星間空間からの天文観測が必要であろう。

4. 惑星間空間からの天文観測の検討

4.1 これまでの経緯

黄道光の外からの天文観測では従来と比べて劇的な感度の向上が期待できる。これは、より良い環境を求めて地上から宇宙へと進出した天文観測の進化の自然な延長である。ここでは、その実現に向けた歩みを紹介したい。

我々が知る限り、国内で最初に惑星間空間からの天文観測が提案されたのは、1994年の光赤天連 (当時は光天連) シンポジウム「2020年の光赤外天文学」である³⁰⁾。すばる望遠鏡の建設が進むとともに「あかり」衛星 (当時はIRIS計画) が検討され、日本の光赤外天文学が新しい時代へ向かう中、野心をもった多くの研究者らがもっと先にある大風呂敷計画を見せあった。その内容は2016年に光赤天連がまとめたほぼ同タイトルの「2020年代の光赤外天文学」²⁾と比べて無邪気で希有壮大であった。スペースの計画としては大口径望遠鏡を太陽-地球L2点に設置するSPICAの原案 (H2/L2計画) が提案されたが、それとは違う路線で当時名古屋大学の大学院生であった度会英教氏 (現JAXA) や松浦らが指導教官の松本敏雄先生と相談のうえ発表したのが、黄道面外軌道に口径1 mの赤外線望遠鏡を投入するという案であった。その名はExtra-Zodiac Infrared Tele-

scope, 黄道面を脱出する意味を込めて略称の“EXZIT”とした(松浦は将来を語り合った度会氏の思いがこもったこの名を現在検討中の探査機計画で使っている). この提案には続きがあり, 将来は「すばる」を太陽-地球L2点か月面へというオチがあったことをつけ加えておく.

実際のところ, 遠方の惑星間空間に近地球衛星並の大きな望遠鏡を投入することは技術的に容易ではないが, 背景放射の観測では比較的小型の望遠鏡でも視野を広くとれば高い感度が得られるため, これを惑星間空間での天文観測を開拓する第一のミッションとするのが良いだろう. この考えに沿って, 松浦は1995年の宇宙放射線シンポジウムにて赤外線背景放射の観測に特化した「黄道面脱出望遠鏡」を提案した³¹⁾. これは, Ulyssesと同様な木星スイングバイによる黄道面外軌道に赤外線望遠鏡を投入する単独ミッションである. 深宇宙で有効な放射冷却により口径30 cmの望遠鏡を30 Kまで冷却し, 波長1-20 μmの広域マッピング観測を行なう提案であった. その後, 惑星科学者らと議論しながら黄道面脱出望遠鏡の検討を進め, 2000年と2001年には「黄道面脱出ミッション勉強会」³²⁾と銘打ち, 宇宙工学の研究者らも加えた多彩な顔ぶれでサイエンスケースや探査機の実現性を検討した(図5). この会は多くの

研究者が分野の垣根を越えて惑星間空間環境を利用するひとつのミッションを検討する珍しい試みであり, 実現への機運を盛り上げるのに重要な役割をはたした. しかし, 当時の深宇宙探査機ではアイソトープ電源が常套手段であり, これを用いない日本の探査機は深宇宙への道が閉ざされた状況であった(少なくともそう感じた).

ところが, 宇宙科学研究所の将来計画として, 巨大な薄膜の帆に太陽電池を備えた宇宙ヨットを用いて外惑星域を探査するソーラーセイル計画が「はやぶさの次」として持ち上がっているとの話³³⁾を, 黄道面脱出ミッションの検討で協働した惑星科学者の矢野創氏(JAXA)や長谷川直氏(JAXA)らから伝え聞いた. その時は目の前が晴れ上がる気がした. そこから一も二もなく計画への参加を申し出, 探査機に赤外線望遠鏡を搭載し黄道光や宇宙背景放射を観測する提案をした. これはのちにJAXA宇宙科学研究所の戦略的中型計画として提案されたソーラー電力セイル, 現在はOKEANOS(Oversize Kite-craft for Exploration and Astro-Nautics in the Outer Solar system, 図6上)³⁴⁾と名付けられた計画である. OKEANOSは木星トロ

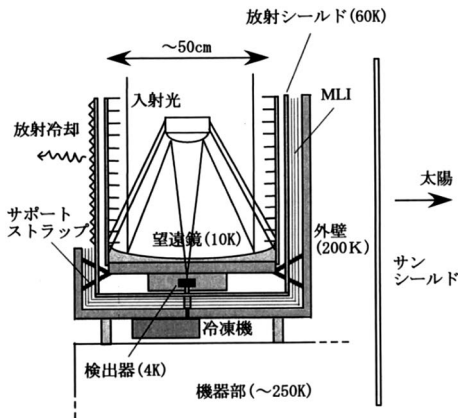


図5 2000年当時に検討した赤外線望遠鏡(「第1回黄道面脱出ミッション勉強会」集録³²⁾より).

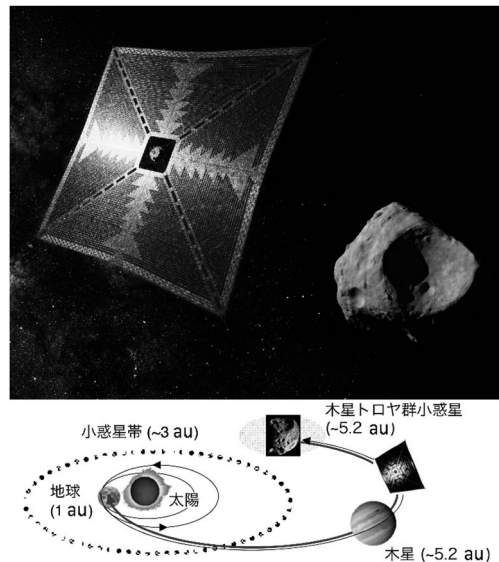


図6 ソーラー電力セイル探査機OKEANOSの外観図(上)と, 予定されている軌道(下).

ヤ群小惑星探査機であるため天文観測を目的とする赤外線望遠鏡のみに多くのリソースをさくことはできないが、まず隗より始めよということで、あらためてEXZIT (Exo-Zodiacal Infrared Telescope) と名付けた小型望遠鏡の搭載検討を開始した³⁵⁾。

4.2 EXZIT/OKEANOS

OKEANOSは「はやぶさ」³⁶⁾「はやぶさ2」³⁷⁾に続く小惑星探査ミッションとして提案されている計画であり、2020年代中頃の打上げを目指している。「はやぶさ」ではS型小惑星Itokawa、「はやぶさ2」ではC型小惑星Ryuguが探査対象となったが、OKEANOSではより始原的な木星トロヤ群のD型小惑星を探査することで、太陽系の起源、特に太陽系形成時に木星などの巨大惑星の大移動が本当にあったかどうかを、小惑星でのその場分析により物質科学的に実証することを目的としている^{38, 39)}。OKEANOSは「はやぶさ」と同じく工学実証機という位置付けではあるが、宇宙工学・惑星科学・天文学の融合ミッションである。

木星は太陽から5 auも離れているため、太陽光の強度は地球の1/27となり、従来の太陽電池パドルで宇宙機全体の電力をまかなうのは難しい。そこで、IKAROS⁴⁰⁾によって日本が世界に先駆けて成功させた宇宙での膜展開技術を発展させ、一辺が約40 mの巨大な薄膜太陽電池を宇宙空間で帆のように展開することで、木星でも電力をまかなう。木星までの航行には、「はやぶさ」・「はやぶさ2」でも活躍したイオンエンジンを用いる。

EXZITはOKEANOS探査機への搭載を前提に検討を進めている口径約10 cmの可視・近赤外線望遠鏡である。黄道光および赤外線背景放射の分光観測を実現するため、0.4-1.6 μmの波長帯にて、Linear Variable Filter (LVF) と呼ばれる場所により透過波長帯が異なるフィルターを用いて簡便に分光観測を行う設計である。EXZITの開

発においては、CIBERやCIBER-2で培ってきた宇宙用小型広視野望遠鏡の開発の経験を活かす。

OKEANOS探査機は打ち上げから約1年後の地球スイングバイにて木星に向かう軌道に乗る(図6下)。ここから木星到着までの約3年間でクルージングフェーズと呼ばれる期間である。EXZITではこの期間中に1 auから5 auにかけて太陽からの距離に対する黄道光の輝度やスペクトルの変化を調べることで、惑星間塵の密度や組成の3次元分布を明らかにする。さらに黄道光が十分暗くなって以降は、史上初の黄道光に邪魔されない環境下での赤外線背景放射の直接観測を行う⁴¹⁾。

4.3 黄道面脱出の可能性

我々は当初のEXZITのコンセプトである黄道面外軌道をとる探査機による天文観測の可能性も模索している。図3で示した通り、黄道面外に1 au飛び出せば、木星軌道と同等な黄道光環境が得られる見込みである。また、この場合地球にも太陽にも近いので、電力的にも通信的にも、木星軌道より宇宙機の運用は楽である。さらに、未だ誰もなし得ていない、惑星間塵・黄道光の鉛直方向の分布を初めて測定することもできる。

黄道面を脱出するひとつの方法は、前述したようなUlyssesのように木星スイングバイを用いるものである。前出の「黄道面脱出ミッション勉強会」³²⁾で提案された別の方法は、黄道面内の人工惑星軌道にはじまり、金星と地球の複数回スイングバイで軌道傾斜角を徐々にあげ、黄道面外に0.5 au程度まで離脱するというものである。のちに太陽物理コミュニティでも同様な軌道から太陽の極域を観測する案が検討され⁴²⁾、ESAが2020年に打ち上げ予定のSolar Orbiterによって達成される見込みである⁴³⁾。

もう一つの可能性はJAXAの公募型小型計画として検討が進められているDESTINY+である。DESTINY+は、ふたご座流星群の母天体である小惑星Phaethonにフライバイする工学ミッションである⁴⁴⁾。Phaethonフライバイ後は他の小惑

星へのさらなるフライバイも検討されており、ここで軌道傾斜角の高い小惑星を選ぶことで黄道面離脱を実現する可能性を模索している。DESTINY+の本来の目的は、小型衛星バスでの深宇宙探査を実証することで、深宇宙探査の低コストで高頻度での実施を目指すというものである。その枠組みの中、我々はDESTINY+の衛星バスにEXZITのような望遠鏡を搭載して、黄道面離脱を実現するようなミッションの検討を継続的に進めている⁴⁵⁾。まだ構想段階にすぎないが、黄道面脱出の意を込めて「DESTINY-Z」と呼んでいる。

5. 究極の天文観測を目指す惑星間空間望遠鏡 (IPST) 構想

5.1 JWSTに匹敵する感度

現時点で具体的に検討を開始しているEXZITなどは、小口径で目的や機能も限定的な装置である。しかし、そういった装置の開発を基盤として、将来的に惑星間空間からの汎用的で実現可能な「究極の天文観測」を目指したい。その中で我々が現在検討を進めているのは、当初のEXZITと同様に、口径1 m級の赤外線望遠鏡を惑星間空間 ($R > 5 \text{ au}$, もしくは $Z > 1 \text{ au}$) まで持って行く「惑星間空間望遠鏡 (Interplanetary Space Telescope, IPST)」構想であり、日本が推進すべき有力な将来計画の一つとして取り上げられている³⁾。

惑星間空間望遠鏡の利点を半定量的に考えてみよう。半径 r の望遠鏡の波長 λ における回折限界は $\sim \lambda/2r$ 程度なので、回折限界望遠鏡で点源を観測した場合、立体角 $\Omega \sim (\lambda/2r)^2$ の範囲の背景光の明るさが背景光ノイズとしてきく。したがって背景光の光子数 N_{sky} は、背景光の明るさを I_{sky} , 望遠鏡の開口面積を $S \sim \pi r^2$ とすると

$$N_{\text{sky}} = I_{\text{sky}} \cdot S \cdot \Omega / h\nu \sim I_{\text{sky}} \cdot \lambda^3$$

となり、望遠鏡の口径によらない。図7は宇宙か

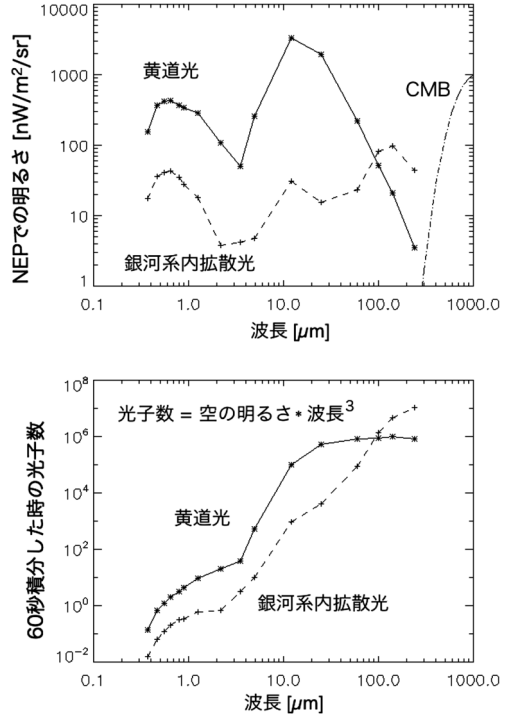


図7 黄道光が最も弱くなる北黄極 (NEP) で計算した背景光 (黄道光と銀河系内拡散光) のスペクトル (上) と、回折限界望遠鏡で点源を60秒積分した場合の背景光の光子数 (下)。

らの天文観測において支配的な背景光 (黄道光と銀河系内拡散光) による光子数を表している。波長 $5 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 100 \mu\text{m}$ の中間赤外線帯では黄道光ノイズリミットの観測となるため、惑星間空間望遠鏡のメリットが大きい。波長 $\lambda \leq 5 \mu\text{m}$ では背景光の光子数が少ないため、JWST⁴⁶⁾ のような十分に大きな宇宙望遠鏡による観測ならば、観測対象によるフォトンノイズリミットの観測となりうる。ただし、広がった天体が観測対象ならば、 $\lambda \leq 5 \mu\text{m}$ の観測においても黄道光が効いてくるため、惑星間空間望遠鏡のメリットがある。また、 $\lambda \geq 100 \mu\text{m}$ の観測では、黄道光ではなく銀河系内拡散光が支配的な背景光となるため、銀河面を脱出しない限りこの背景光からは逃れられない。

図8は、背景光に黄道光を含む場合 (一般の宇宙望遠鏡を想定) と含まない場合 (惑星間空間望

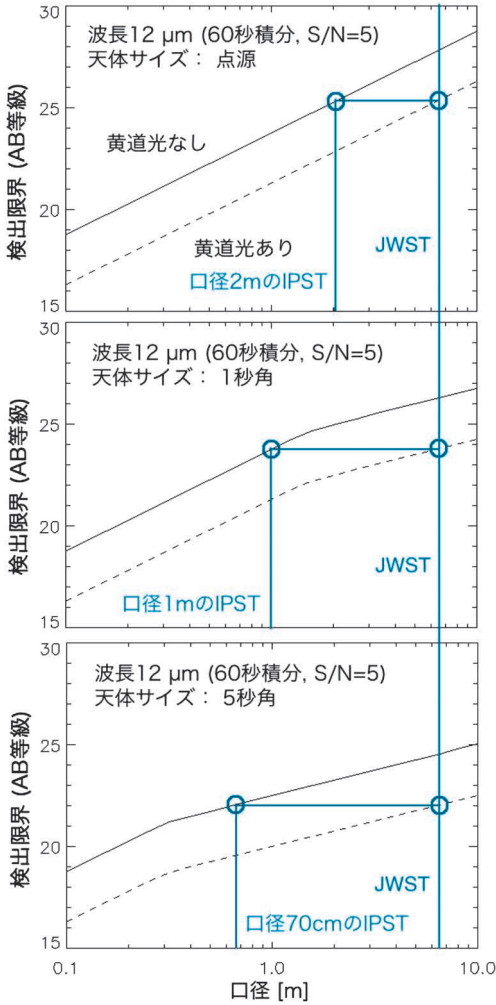


図8 波長12 μmにおける検出限界と望遠鏡口径との関係。観測対象の大きさを点源(上)、1秒角(中)、5秒角(下)それぞれの場合において、背景光に黄道光を含む場合(点線)と含まない場合(実線)で比較した。

望遠鏡を想定)における検出限界を比較したものである。中間赤外線の観測において、口径6.5 mのJWSTと感度が同じになるために必要な惑星間空間望遠鏡の大きさは、観測対象が点源の場合は口径2 m、観測対象が1秒角の大きさを持つ場合は口径1 m、5秒角の場合は口径70 cmとなる。すなわち、口径1 m級の惑星間空間望遠鏡が実現できれば、JWSTと感度で互角に戦えるということである。

ある。さらに小口径ゆえに広視野の望遠鏡が実現可能なため、JWSTの感度でWFIRST⁴⁷⁾のようなサーベイ観測という、NASAの2つのフラッグシップミッションの利点を併せ持つ観測が可能となる。ただし小口径ゆえに空間分解能は期待できないため、そこは地上大型望遠鏡に託すことにして、惑星間空間望遠鏡では高感度広視野サーベイ観測や分光観測に特化して棲みわけることが必要だろう。

5.2 将来構想

EXZITが搭載されるOKEANOSは、JAXAの戦略的中型2の枠で検討が進められている「工学実証機」である。したがって、同じ工学実証機であった「はやぶさ」の後に本番の理学ミッションとしての「はやぶさ2」があったように、OKEANOSが成功した後は、本番の理学ミッションがあるべきである。OKEANOSは工学実証機ゆえに理学機器に割り当てられたリソースは限定的で、かつ小惑星探査に重点が置かれているが、「本番の木星ミッション」を惑星間空間望遠鏡とすることができれば、技術的には惑星間空間望遠鏡を日本主導で実現できると考えている。

軌道としては、木星まではOKEANOSと同じ(図6下)で、木星スイングバイでUlyssesのように太陽の極軌道に入るのが良いだろう。例えばOKEANOSでは、小惑星着陸機100 kgを含む約140 kgの重量の理学観測機器を搭載して木星に向かう計画となっている。一方で、赤外線天文衛星「あかり」では、有効口径68.5 cmの赤外線望遠鏡が30.6 kg、近・中間赤外線カメラIRC (2-26 μm)が4.0 kg、遠赤外サーベイヤー FIS (50-180 μm)が5.5 kgの合計約40 kgで観測装置が構成されていた。「あかり」の場合はクライオスタットが430 kgと重かったが、惑星間空間望遠鏡の場合は太陽から遠いので放射冷却のみで十分に装置を冷却できる。このように考えると、単純な比較はできないが、100 kgのリソースがあれば、口径1 m級の中間赤外線宇宙望遠鏡を、我々が見通せる近

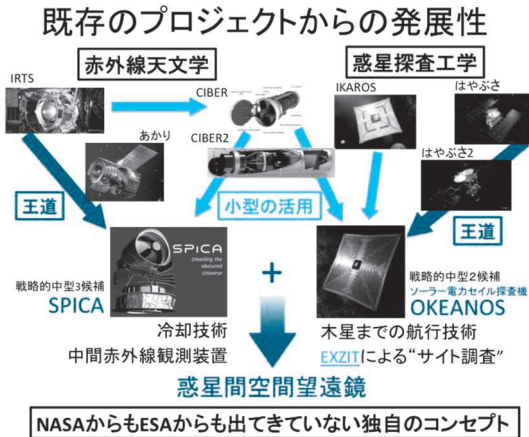


図9 過去および現在の宇宙ミッションから惑星間空間望遠鏡へのながれ。

い将来に実現する道筋が見えてくる。

加えて、JAXAの戦略的中型3の枠で検討が進められている次世代赤外線宇宙望遠鏡SPICAでは、日本は中間赤外線装置SMI⁴⁸⁾を担当しており、惑星間空間望遠鏡で最もゲインが大きい波長帯とマッチする。

さらに世界に目を向けてみると、NASAは2030年代の将来計画を検討する“2020 Decadal Survey”の中で、2030年代以降の大型計画を具体的に検討中であり⁴⁹⁾、またESAは“Cosmic Vision”において、2030年頃までに実施する大型計画を進めている。しかし惑星間空間からの天文観測というアイデアはそれらの中では挙げられておらず、日本独自のアイデアと技術で世界をリードできる可能性がある。米国や欧州と比べて予算規模が小さい日本が将来においてもプレゼンスを維持し続けるために、惑星間空間望遠鏡の実現は重要であろうと考える(図9)。

6. ま と め

黄道光から逃れるために惑星間空間に望遠鏡を設置するという考えは、地球大気からの悪影響から逃れるために望遠鏡を大気圏外に持って行ったという望遠鏡の進歩の、自然な延長線上にある。

本稿では、将来における究極の天文観測を目指す宇宙望遠鏡の提案として惑星間空間望遠鏡IPSTを紹介した。その第一歩として木星トロヤ群小惑星を探索するOKEANOS搭載EXZITIによる天文観測を実現し、将来は大型の惑星間空間望遠鏡計画へと発展させたい。

参考文献

- 1) Falchi, F., et al., 2016, Science Advances, 2, e1600377
- 2) 光赤外天文学将来検討委員会, 2016, 「2020年代の光赤外天文学将来計画検討報告書」
- 3) 光学赤外線天文連絡会20年後までのスペースミッションを考えるワーキンググループ, 2018, 「2030年代の光赤外スペース将来計画に向けた検討報告」
- 4) Dupré, S., 2003, Journal for the History of Astronomy, 34, 369
- 5) Reed, E. I., & Blamont, J. E., 1967, Space Research, 7, 337
- 6) Roelfsema, P. R., et al., 2018, PASA, 35, 30
- 7) Leinert, Ch., et al., 1998, A&AS, 127, 1
- 8) Love, S. G., & Brownlee, D. E., 1993, Science, 262, 550
- 9) Hanner, M. S., et al., 1974, JGR, 79, 3671
- 10) Matsumoto, T., et al., 2018, AJ, 156, 86
- 11) Pellicori, S. F., et al., 1973, Applied Optics, 12, 1246
- 12) Zemcov, M., et al., 2017, Nature Communications, 8, 15003
- 13) Mather, J. C., et al., 1990, ApJ, 354, L37
- 14) Smoot, G. F., et al., 1992, ApJ, 396, L1
- 15) Hauser, M. G., et al., 1998, ApJ, 508, 25
- 16) Kelsall, T., et al., 1998, ApJ, 508, 44
- 17) 津村耕司, 2014, 天文月報, 108, 345
- 18) 松本敏雄, 2005, 天文月報, 98, 710
- 19) Zemcov, M., et al., 2013, ApJS, 207, 31
- 20) Tsumura, K., et al., 2013, ApJS, 207, 33
- 21) Tsumura, K., et al., 2010, ApJ, 719, 394
- 22) Arai, T., et al., 2015, ApJ, 806, 69
- 23) Matsuura, S., et al., 2017, ApJ, 839, 7
- 24) Bock, J. J., et al., 2013, ApJS, 207, 32
- 25) Zemcov, M., et al., 2014, Science, 346, 732
- 26) Cooray, A., et al., 2012, Nature, 490, 514
- 27) Kashlinsky, A., 2016, ApJ, 823, L25
- 28) Kohri, K., et al. 2017, Physics Letters B, 772, 628
- 29) Shirahata, M., et al., 2016, Proc. SPIE, 9904, 99044J
- 30) 光学天文連絡会, 1994, 「2020年の光赤外天文学: 地上とスペースからの観測: 平成6年度国立天文台ワークショップ: 第4回西はりま天文台ワークショップ」
- 31) 松浦周二, 1995, 「黄道面脱出赤外線望遠鏡」, 宇宙放射線シンポジウム集録(宇宙科学研究所)
- 32) 黄道面脱出ミッション勉強会, 2000-2001
- 33) 川口淳一郎ほか, 2003, 「ソーラー電力セイルによる外惑星探査実証ミッションについて」, 第25回太陽系

科学シンポジウム集録, 13

- 34) Mori, O., et al. 2016, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, 14, Pk_1
- 35) Matsuura, S., et al. 2014, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, 12, Tr_1
- 36) Kawaguchi, J., et al., 2008, Acta Astronautica, 62, 639
- 37) Tsuda, Y., 2013, Acta Astronautica, 91, 356
- 38) 中村良介ほか, 2012, 遊・星・人, 21, 253
- 39) Okada, T., et al. 2018, Planetary and Space Science, 161, 99
- 40) Mori, O., et al. 2010, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, 8, To_4_25
- 41) Iwata, T., et al., 2017, JSAAS Int. Symp. on Space Technology and Science (Matsuyama, Ehime), 31, 2017-k-21
- 42) 常田佐久, 2013, 学術の動向, 18(11), 79
- 43) Müller, D., et al., 2013, Solar Physics, 285, 25
- 44) Sarli, B.V., et al., 2018, J. of Astronaut Sci., 65, 82
- 45) 松浦周二ほか, 2014, 「DESTINY応用: 黄道面外からの宇宙背景放射観測ミッション」, 第58回宇宙科学技術連合講演会講演集2B05
- 46) <https://www.jwst.nasa.gov/> (2019.2.22)
- 47) <https://wfirst.gsfc.nasa.gov/> (2019.2.22)
- 48) Kaneda, H., et al., 2016, Proc. SPIE, 9904, 99042I
- 49) Nature Astronomy Editorial, 2018, Nature Astronomy, 2, 595

Interplanetary Space Telescope Aiming to Realize the Ultimate Astronomical Observation

Kohji TSUMURA¹ and Shuji MATSUURA²

¹ Department of Natural Science, Faculty of Knowledge Engineering, Tokyo City University, Tokyo, 158-8557, Japan

² School of Science and Technology, Kwansai Gakuin University, Sanda, Hyogo 669-1337, Japan

Abstract: Large aperture space telescopes for future visible-infrared astronomical observations with an ultimate sensitivity have been studied, but realization of such a telescope requires long-term technology development and resultant high cost. On the other hand, even a small telescope can achieve great improvement in sensitivity if the telescope is sited at deep interplanetary space out of the Earth orbit due to mitigation of the zodiacal light. We are currently developing an infrared telescope EXZIT to be onboard the OKEANOS spacecraft for Jupiter Trojan asteroid exploration by solar power sail, as a precursor mission of astronomical observation from interplanetary space. In this article, we introduce astronomical telescopes onboard planetary probes including EXZIT, and we present some examples of sensitivity estimate and mission study of the Interplanetary Space Telescope (IPST).