

SPICA 衛星搭載バイナリ瞳マスク コロナグラフの検証実験 —太陽系外惑星の直接検出に向けて—



塩谷圭吾

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部・赤外・サブミリ波天文学研究系

〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: enya@ir.isas.jaxa.jp

SPICA ワーキンググループ

SPICA は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が中心となって基礎開発を進めている、あかりに続く次世代赤外線天文衛星である。太陽系外惑星の直接観測というチャレンジングなテーマに挑むため、SPICA の観測装置の一つとして、コロナグラフを搭載するべく基礎開発を進めている。バイナリ瞳マスク方式のコロナグラフに注目し、原理検証実験を行った結果、 1.1×10^{-7} というコントラストに到達した。この結果は SPICA の要求仕様 (10^{-6}) を満たしたのみならず、コロナグラフ単体での世界記録となった。

1. はじめに

1.1 なぜ系外惑星？なぜ直接観測？

われわれの住む地球を含む太陽系。このような惑星系は、宇宙に唯一のものだろうか？それとも、ありふれたものだろうか？どのようにしてできたのだろうか？そして生命は???

この命題は次世代の宇宙科学が解答すべき、最も重要なものの一つと筆者は思う。太陽系外惑星(以後、系外惑星)は、間接的手法によってなら、すでに 200 個以上が発見されている。Mayor と Queloz は恒星のスペクトルを高精度でモニター観測し、わずかな赤方偏移・青方偏移を計測することで、その周りに惑星が存在し主星を揺さぶっていることを突きとめた(ドップラー法)¹⁾。また主星の明るさをモニター観測し、惑星が視線を横切る際に主星が周期的にわずかに減光する現

象を見つけることから、系外惑星の存在を結論することができる(トランジット法)²⁾。しかしこのような主星の観測に基づく間接的手法では、明るさ、スペクトルなど系外惑星そのものの重要な情報が得られない。そのため系外惑星を主星と空間分解して直接検出および大気分光を行い、惑星そのものの特徴、および惑星系の形成・進化の歴史を「直接観る」ことができれば、その意義は非常に大きい。

1.2 なぜ難しい？

しかし系外惑星を直接観測しようとする、惑星に比べて極めて明るい主星が惑星のすぐそばに存在することが、決定的に深刻な障害となる。太陽系を外部から見た場合の主星と惑星のスペクトルを、図 1 に示す³⁾。可視光波長域では、惑星はおもに主星光を反射することで光っており、主星と惑星の光度比は 10^{-10} にもなる。一方、より波長

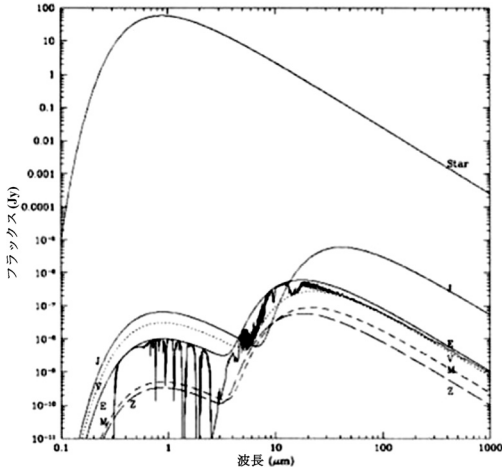


図1 太陽系を外部から観測した場合の、太陽および惑星のスペクトル。

の長い赤外線波長域では、惑星からの熱輻射が主体となるため光度比は大きく緩和されるが、それでも 10^{-6} 程度である。このような膨大な光度比のもとでは、通常の観測装置を用いた場合、惑星光は主星の像のすそに埋もれてしまう。そのため系外惑星の直接検出については、その重要性にもかかわらず、これまでのところ確固たる成功例がない。

1.3 コロナグラフとは？

本稿でいうコロナグラフとは、太陽系外惑星の観測を実現するため、主星光を選択的に低減し、主星と惑星の光度比を大幅に緩和するための特殊な光学系のことである。図2aは、コロナグラフを用いない場合の、主星および惑星の像を表す。図2cはコロナグラフを用いた場合の像に相当する。主星像のすそが抑制された「暗領域」が生成され、惑星が観測可能になっていることを示している。ここで求めるコロナグラフの本質は、図2bのように主星像の中心部を隠すことではないという点に注意されたい。図2bの方式にも、検出器が過度に飽和するのを防ぐなどの実用上の意義はある。しかしこのような幾何光学的な遮蔽によっては、主星光を選択的に低減できない。そのため系外惑

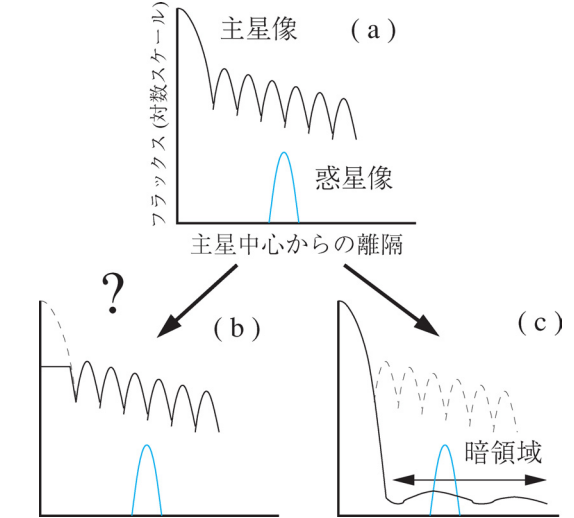


図2 コロナグラフの働き。本稿でいうコロナグラフには、(c)に相当する働きが求められる。

星の直接検出を目指すコロナグラフでは、本稿でも述べるように、波動光学的な相殺現象を巧妙に利用することになる。

1.4 なぜスペース？ なぜ赤外線観測？

大気揺らぎはコロナグラフ観測の大敵である。主星光を波動光学的にぴったり相殺して、何桁も低減するためには、波面のわずかな乱れによる残存誤差が致命的であることは、容易に想像できるだろう。図3の左の写真は本研究の課程で取得した、コロナグラフを用いない場合の点光源の像である。光学理論の教科書にでてくるような、多数の回折リングが確認できる（これはシミュレーションではありません。実験です！）。系外惑星の直接検出を目指すスペースコロナグラフの開発研究は、このような精度の実験系で行っている。一方、図3の右の画像は、2006年に発表された、すばる望遠鏡の新補償光学系（188素子）とレーザーガイド星システムでトラペジウムを撮像した結果である。ここでの解像度は回折限界にも迫る0.06秒角である。この補償光学システムは、点源像のコアを理論的限界に近づけ解像度・感度を高めるという意味において、その価値が非常に大き

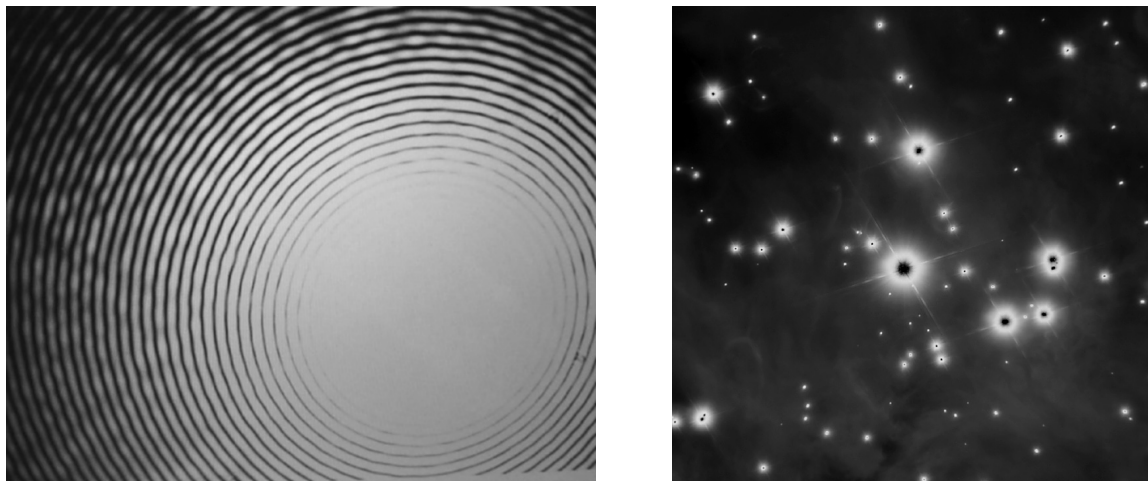


図3 左: 検証実験の過程で取得した, コロナグラフなしの場合の点源像 (ディスプレイを撮影した写真). 右: すばるの新 AO (188 素子) によるイメージ (@国立天文台).

いことは明らかである. しかしこの新しい補償光学をもってしても, 得られる波面の精度は図3の左に示した例にはるかに及ばない.

すでに述べたように, 主星と惑星の光度比は可視域では 10^{-10} という究極的な値になることに對して, 中間赤外域では 10^{-6} 程度にまで (大幅に) 緩和されると考えられる. しかし地上からの中間赤外域の観測は, 大気透過率の窓による制約, 大気および望遠鏡からの膨大な熱輻射が存在するため, 微弱な天体の観測には全く適していない. そのためわれわれは, スペース赤外線望遠鏡である SPICA にコロナグラフを搭載することを目指す.

2. 次世代赤外線天文衛星 SPICA

2.1 SPICA とは?

Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics (SPICA) は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が中心となって基礎開発を進めている, あかり⁴⁾に続く次世代赤外線天文衛星である⁵⁾ (図4). SPICA 望遠鏡の口径は 3.5 m である. あかりの口径が 68.5 cm であることを考えると, あかりから SPICA への飛躍がいかに大きいものであるかが実感できる. また, あかりは全天を広く観測

するサーベイヤー型の衛星であるが, SPICA は通常天文台型の望遠鏡であり, 個々の天体, 天域を目的に応じて観測するのに適している. SPICA 望遠鏡は, 赤外線の感度を大幅に向上させるため, 軌道上にて機械式冷凍機と放射冷却を利用して極低温 (4.5 K) に冷却して運用する. SPICA は JAXA が開発した HII-A ロケットを用いて, 2010 年代の中頃に, 太陽・地球 L2 ハロー軌道に打ち上げを目指している. そして地上からは観測が困難な 5–200 μm の波長域を中心に, 大口径による高解像度, 高感度の赤外線観測を行う.

2.2 SPICA コロナグラフ

SPICA は多目的の赤外線天文衛星であり, 広い波長域をカバーする複数の観測装置を搭載する予定である. そして SPICA の観測装置の一つとしてコロナグラフを搭載するべく, 実験, 開発を進めている^{6)–9)}. SPICA コロナグラフの第一のターゲットは, 太陽系外の木星型惑星である. 予想される主星と惑星の光度比をもとに, 主星像中心に対する暗領域の明るさの比 (コントラスト) の要求仕様を 10^{-6} と設定した. SPICA の観測波長域のなかでも, コロナグラフ観測には, より解

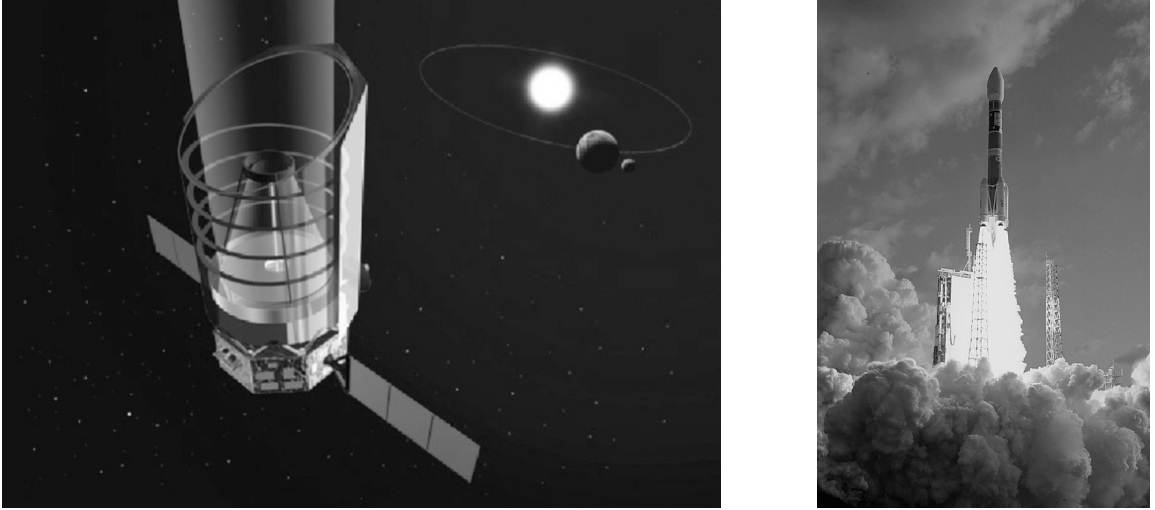


図4 軌道上の SPICA の想像図 (左) および HII-A ロケット (右, @JAXA).

像度の高い短波長側が適している。そのため SPICA コロナグラフでは、Si:As 検出器を用いて 5-27 μm を主な観測波長とする。撮像モードとともに波長分解能が 200 程度の分光モードを搭載する。

系外惑星の直接観測を目指す開発競争は世界中で展開されている。地球型惑星の検出をめざすコロナグラフ衛星としては、TPF-C, TOPS など、干渉計を用いる衛星では DARWIN, TPF-I, また日本の JTPF などが将来に向けて計画されている。SUBARU+HiCHAO など、地上望遠鏡にコロナグラフを適用する計画も多く進められている。(これらの計画については、例えば Abe ほか¹⁰⁾およびその参考文献を参照)。また、SPICA とほぼ同世代となるスペースミッションとしては JWST が挙げられるが、JWST では望遠鏡主鏡にセグメント鏡を用いるため、コロナグラフの性能には限界がある。SPICA では TPF などのミッションよりも ~1 世代早く、スペース赤外観測の利点を活かし、JWST よりも高性能のコロナグラフによって、系外惑星系の形成・進化を直接観て解明することを目指す。

3. バイナリ瞳マスクコロナグラフの検証実験¹¹⁾

3.1 コロナグラフ方式の選択

従来、主に理論的研究によって、原理的には系外惑星の直接検出に足りる能力をもつ、さまざまな方式のコロナグラフが提唱されてきた。具体的には、もっとも古典的なリオ型およびその改良版、入射瞳の形状を制御するバイナリ瞳マスク法、位相反転素子を利用する位相マスク法、ノッチフィルターを用いる方法、2枚の鏡で瞳の強度分布を変換する方法 (PIAA) などがある (例えば Guyon¹²⁾ のサマリを参照)。しかし入射波面の精度、光学デバイスの特性、測定系の性能などの限界のため、高性能のコロナグラフの実証は容易ではなく、本研究を開始した時点では実証が理論に追いついていないという状況にあった。そのためわれわれが研究を始める際の検討で、まずは実現可能性を最優先した結果、バイナリ瞳マスク方式を選択した¹³⁾⁻¹⁵⁾。

この方式の原理はシンプルである。やや専門的な表現をするならば、スカラーフラウンホッフ回折が成り立つ場合、一般に入射光の瞳面

での2次元分布関数 $A(x, y)$ と、像面での電場分布 $E(\xi, \eta)$ とは、以下のようにフーリエ変換の関係にある。この関係を利用して、像面に暗領域が生成されるよう瞳面の分布関数を最適化する。

$$E(\xi, \eta) = \hat{A}(\xi, \eta) = \iint A(x, y) \times \exp[-2\pi i(\xi x + \eta y)] dx dy .$$

定性的には「星像の形状は光学系の入射開口の形に依存するので、入射口の設計を工夫することで、主星像のすそを落とす」と理解すればよい。

バイナリ瞳マスク方式のコロナグラフは、原理的に波長によらず機能すること、望遠鏡のポインティング誤差の影響を受けにくいこと、光学系がシンプルになること、などの特徴があり、堅牢性において優れている。実証試験においては、第一にマスクの形状精度をどれだけ高められるかが勝負どころとなる。同時にマスクをとりまく実験系における誤差要因を、いかに低減できるかが重要である。

3.2 バイナリ瞳マスクの開発

本研究で設計した、2通りのバイナリ瞳マスク(マスク1, マスク2)の形状を図5の上段に示す。図で白い部分が透過部を、黒い部分が遮光部を表す。これらの設計解は線形計画法に基づき、最適化のためのソフトウェア LOQO を用いて決定した^{16), 17)}。図からわかるように、設計したマスクは長方形の透過部の集合からなっている。このようなマスクは、バイナリ瞳マスクのなかでも、特にチェッカーボードマスクと呼ばれるものである。これらのマスクは、光学系の瞳面に配置する。マスク1は通常の軸対称望遠鏡において、副鏡および副鏡支持機構によって瞳にできる影を回避できる設計になっている。マスク2はそのような遮蔽がない場合に対応する。これらのマスクの設計では、コントラストとして 10^{-7} を要求した (SPICA の要求である6桁のほか、1桁のマージンを設けた)。図5の下段は、これらのマスクによって期待

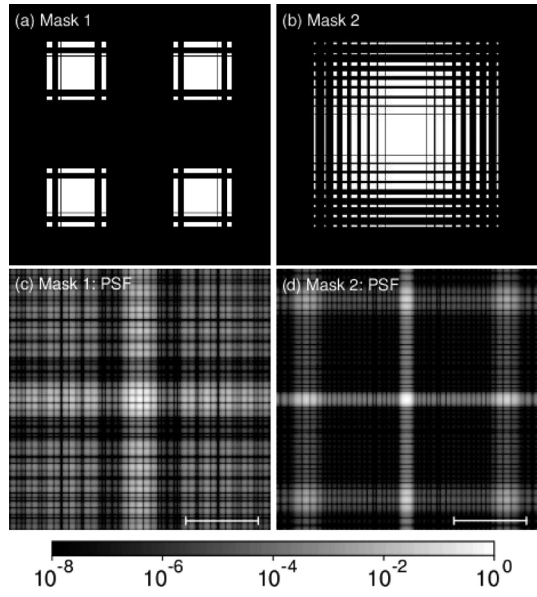


図5 マスクの設計解。上段はマスクの形状を示す。白い部分が透過部、黒い部分が遮光部に相当する。下段は期待される点源像。最適化条件として課したコントラストには 10^{-7} 。スケールバーは $20\lambda/D$ (λ は観測波長、 D はビーム径) に相当する。

される点源像を、シミュレーションで求めた結果である。像のコアの周りに、四つの暗領域ができていることがわかる。

実験に用いたマスクは、産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門と共同で製作した(図6)。まず直径30mm, 厚さ2mmの基板にアルミ

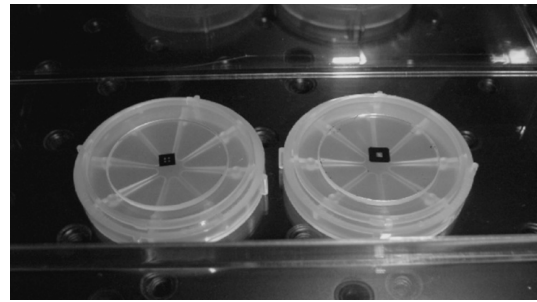


図6 電子ビーム描画による微細加工によって製作したマスク1(左)およびマスク2(右)。

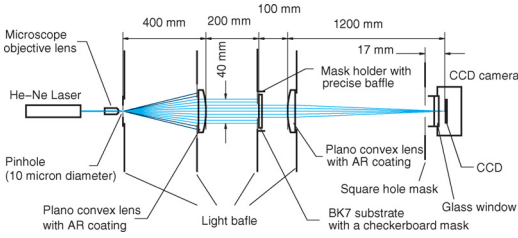


図7 実験に用いた光学系.

ニウムを厚さ 100 nm まで蒸着した. そして通常のフォトリソグラフィーに比べて格段に高い精度での微細加工ができる, 電子ビーム描画とエッチング/リフトオフの手法を用いて, 開口部を形成した. マスクは小型であり, ビーム径 (開口部の外接円の直径) が 2 mm に相当する.

3.3 計測

実験に用いた光学系を, 図7に示す. 図からわかるように, 光学系はたいへんシンプルである.

He-Ne レーザー (波長 632.8 nm) を, スペーシャルフィルター, ピンホールを通すことで波面精度の高い球面波を得る. そして平凸レンズを用いて平行光とし, バイナリ瞳マスクを通過させる. その後, やはり平凸レンズを用いて結像させ, CCDカメラで撮像する. 高精度の実験を実現するため, クリーンルーム仕様の暗室のなかに空気圧式除振台を設置して, すべての光学系はその上に展開した.

暗電流によるノイズを低減するため, CCD は 0°C に冷却して用いた. CCD のダイナミックレンジ限界を超えた高コントラストの点源像を計測するため, 0.03-1,800 秒までの露出時間と, 1/100 の減光フィルターを組み合わせ用いた. さらに CCD カメラの内部散乱を低減するため, 暗領域の評価の際には暗領域以外の明るい部分を隠す遮光板を, 厚さ 25 μm のステンレス (SUS304) 薄板を用いてワイヤー放電加工によって製作して用いた (図7の square hole mask に相当. 図8も参照).

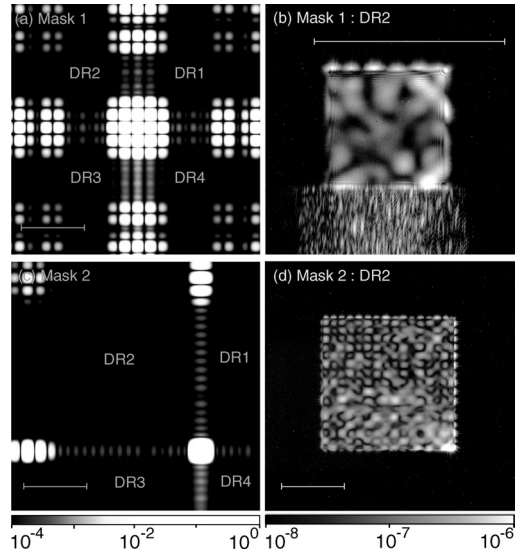


図8 実験で得られたコロナグラフ画像. 右列はカメラ内散乱を防ぐため, 遮光板を用いて暗領域のみを撮像した結果である. スケールバーは $10\lambda/D$ (λ は観測波長, D はビーム径) に相当する.

3.4 結果

マスク 1, マスク 2 による, コロナグラフを効かせた場合の点源像を図8に示す. 左列は像のコアの部分を評価するため, 遮光板なしで計測した結果である. 設計解である図5と見比べれば, これらの像が設計と驚異的な一致を示しており, コロナグラフが点源像のコアの形状を非常によくコントロールできていることがわかる (繰り返しになりますが, これはシミュレーションではありません. 実験です!). コアから下方に伸びる回折パターンが, 他の3方向へのものに比べて明るくなっているのは, CCD の読み出しに起因する偽の特徴であり, 本質的な意味はない.

図8の右列は, 遮光板を用いて暗領域のみを高感度 (1,800 秒露出) で計測した結果である. マスク 1 の暗領域の下側に見える多数の針状のパターンは, マスク 1 の遮光板のホルダーによる散乱の結果であり, ここでは無視してよい. DR1~DR4 の四つの暗領域全域を平均したコントラストは,

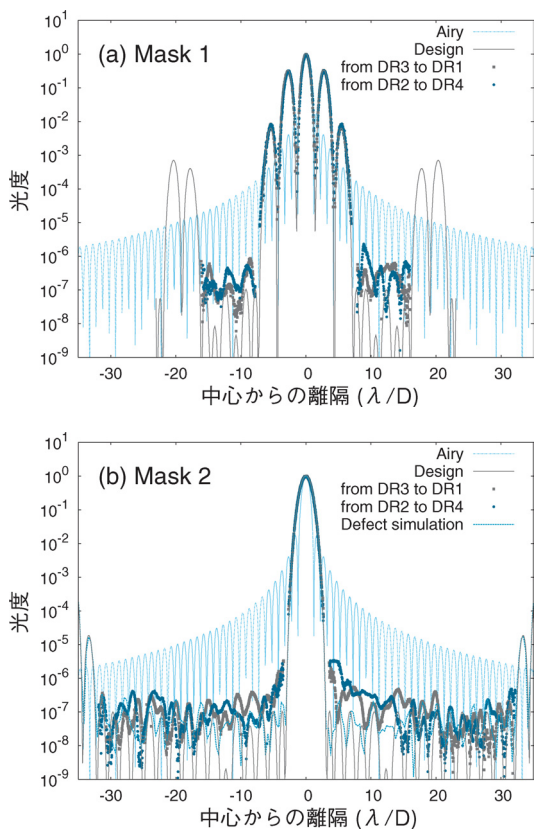


図9 実験で得られたコロナグラフ画像のプロファイル。比較のための Airy ディスクのプロファイルをつけた。

マスク 1 では 2.7×10^{-7} 、マスク 2 では 1.1×10^{-7} である。これらの値は SPICA のコロナグラフが要求する 10^{-6} をクリアしているのみならず、(本稿執筆現在) コロナグラフ単体での世界記録となっている。図 9 は、計測した点源像のプロファイルである。

マスク 1 の暗領域には不規則な形のパターンが見られ、コントラストはこのパターンによってリミットされている。実験系においてマスクをシフトさせるとパターンの形状が変化する(すなわちマスクに付随しない)ことなどから、このパターンを生成する主要因は波面誤差など光学系の不完全さに起因するものと考えられる。他方マスク 2 の暗領域では、マスク 1 で見られたのと同様の不

規則なパターンに加えて、特にコアから離れた領域に格子状のパターンが生じている。ここで不規則なパターンは、やはり光学系の不完全さに起因するものと考えられる。一方、格子状のパターンは、そもそも図 5 の設計解においても見られるものである。そして格子状のパターンは、マスクのシフトや回転などの際にマスクに付随する。これらのことから、マスク 2 による検証実験のコントラストは設計限界に迫っており、光学系の不完全さとともに、設計限界そのものがコントラストをリミットしている主要因になっているといえる。

4. 今後の展望

本稿で紹介した可視光を用いた原理検証実験の成功を受け、次に行うべき課題として、いくつかの斬新な開発研究の構想をあたためている：2007 年度には Mid Infrared Low-temperature Coronagraph Testbed (MILC-T/ミルクティー) の開発を開始し、低温・真空環境下で中間赤外線コロナグラフの世界初の実証を目指す。また High-dynamic-range Optical Coronagraph Testbed (HOCT/ほくと) を開発し、SPICA 向けの波面補償アルゴリズムの確立を目指す研究も開始しつつある。大気揺らぎの影響を受けない SPICA コロナグラフにおいても、望遠鏡鏡形状の製造誤差を相殺するため、波面補償は不可欠だからである。

SPICA コロナグラフによって太陽系外惑星の直接検出を実現するまでの過程は、コロナグラフだけでなく望遠鏡や冷凍機、衛星の姿勢擾乱補償システムの開発なども含めた総力戦、長期戦である。サイエンス面での検討ともあわせて、総合的に開発研究を進めていく。

……本研究に興味をもたれた方は、ぜひお気軽に筆者までご連絡、ご相談いただければ幸いです。実験開発が好きな方/やってみいたい方、とまかく系外惑星を目指したい方、MIRC-T づくりを究めたい方、HOCT 伝承者になりたい方、……な

ど、志を共有し、万難排して自らの手で分野を切り開くべく共に仕事をする、とくに若い力を歓迎いたします。

謝 辞

本稿で紹介した電子ビーム描画によるマスクは、佐藤平道氏、若山貴行氏、中桐伸行氏（産業技術総合研究所）と共同で製作したものです。田中深一郎氏（東京大博士課程）、Abe Lyu 氏（国立天文台）、中川貴雄氏（宇宙航空研究開発機構）は、検証実験の共同研究者です。これの方々には、深く感謝いたします。さらに、本稿に関連する共同研究者の片坐宏一氏（宇宙航空研究開発機構）、Olivier Guyon 氏（ハワイ観測所）、田村元秀氏、西川 淳氏、村上尚史氏（国立天文台）、伊藤洋一氏、藤田健太氏（神戸大）、宮田隆志氏、酒向重行氏（東京大天文センター）、SPICA ワーキンググループの皆様全員に、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Mayor M., Queloz D., 1995, Nature 378, 355
- 2) Henry G. W., et al., 2000, ApJ 529, L41
- 3) Traub W. A., Jucks K. W., 2002, Am. Geophys. Union Monogr. Ser. 130, 369
- 4) Murakami H., 2004, Proc. of SPIE 5487, 330
- 5) Nakagawa T., SPICA working group, 2004, Adv. Sp. Res. 34, 645
- 6) Enya K., et al., 2006, Proc. of SPIE 6265, 97
- 7) Abe L., et al., 2006, Proc. of IAU Colloq. 200, 329
- 8) Enya K., et al., 2006, Proc. of IAU Colloq. 200, 467
- 9) Tamura M., 2000, in ISAS Report SP 14

- 10) Abe L., et al., 2007, C. R. Acad. Sci., in press
- 11) Enya K., et al., 2007, A&A 461, 783
- 12) Guyon O., et al., 2006, ApJS 167, 81
- 13) Jacquinot P., Roizen-Dossier B., 1964, Prog. Opt. 3, 29
- 14) Vanderbei R. J., et al., 2003, ApJ 590, 593
- 15) Kasdin N. J., et al., 2005, Proc. of SPIE 5905, 128
- 16) Tanaka S., et al., 2006, PASJ 58, 627
- 17) Vanderbei R. J., 1999, Optimization Methods & Software 21, 485

Laboratory Experiment of Checkerboard Pupil Mask Coronagraph for SPICA —Toward the Direct Detection of the Exo-planets—

Keigo ENYA and SPICA Working Group

Department of Infrared Astrophysics, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, Japan

Abstract: SPICA is the next generation infrared space-borne telescope mission led by Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) following AKARI. To realize the detection of the exo-planets, we are developing a mid-infrared coronagraph as one of the SPICA instruments. We have performed a laboratory experiment of coronagraph with a shaped pupil mask. Achieved contrast is 1.1×10^{-7} which satisfies the requirement of SPICA (10^{-6}) and is one of the highest contrasts demonstrated by a coronagraph.