

太陽系外惑星の直接観測に向けた バイナリー瞳マスク・コロナグラフの開発



梶 香奈恵

〈JAXA 宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系 〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉

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

太陽系外惑星（系外惑星）の直接観測は、惑星の誕生から進化、多様性、また究極的には地球外生命の兆候にも迫りうる重要な研究テーマである。しかし、主星光と惑星光のコントラストが極めて大きいことが直接観測の障壁となっている。そのためコロナグラフという特殊な光学系を開発する必要がある。筆者は現在、次世代赤外線天文衛星 SPICA などのスペースからの系外惑星の精査を目指し、バイナリー瞳マスク方式のコロナグラフの研究開発を進めている。これまでに可視光波長域での原理検証実験で得た成果は、大きく三つにまとめることができる。すなわち、第一に、従来の単色レーザー光を用いた実験系の安定性を高め、星像差分法を導入した結果、コントラストを2桁（も）改善し、 1.3×10^{-9} を達成した。第二に、これまで単色光で行われていた実験をマルチカラー化し、波長によらずコントラスト改善効果があることを実証した。第三に、より実用的な自立型マスクにおいても優れたコントラスト改善性能があることを実証した。これらの結果はコロナグラフ単体のコントラストとして世界最高水準にあるのみならず、より実際の観測に即した実証であるという点で重要であり、ほかに類を見ない。

1. 系外惑星直接観測の重要性と困難さ

現在、系外惑星は700個以上見つかったが、それらのほとんどは、惑星が主星に及ぼす影響を調べることで、存在が確認されたにすぎない（間接的手法¹⁾）。今後、系外惑星の研究を進めていくためには、惑星そのものを直接観測することが決定的に重要である。なぜなら、直接観測によって初めて系外惑星自体の詳細情報（カラー・光度・スペクトルなど）を得ることができ、そこから系外惑星の温度や組成、多様性、宇宙における地球の位置づけや惑星の進化を議論できるからである。直接観測なら、惑星大気に生命兆候を見いだす可能性すらある。このように、系外惑星の直接観測は人類の宇宙観にも大きな影響を与える重要な研究テーマである。しかし現時点では、直

接観測の成功例は極めて少ない^{2), 3)}など。その理由は、惑星と主星光のコントラストが大きいために、直接観測は通常の望遠鏡では非常に困難だからである。例えば、可視光領域では太陽光と惑星の反射光のコントラストは実に ~ 10 桁であり、惑星の熱放射が卓越する赤外領域でも ~ 6 桁もある。

2. コロナグラフ

高コントラスト観測を実現するには、原理的には、主星の像（PSF: Point Spread Function）を波動光学的に制御することで、惑星位置における主星光を大幅に低減するコロナグラフという光学系が有効である（図1）。ただし主星光を何桁も抑制するコロナグラフの開発は、極めて高い精度を必要とする。挑戦的かつ重要な課題のため、世界

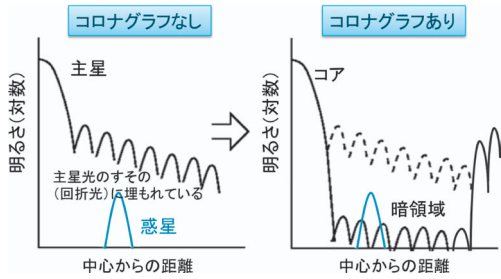


図1 コロナグラフの働き. 図は惑星系のPSF プロファイル. 縦軸は明るさ (対数表示), 横軸は中心からの距離. 左: コロナグラフなし. 右: コロナグラフあり. コロナグラフを用いて中心星の回折光を大幅に低減させることによって, 惑星を検出する.

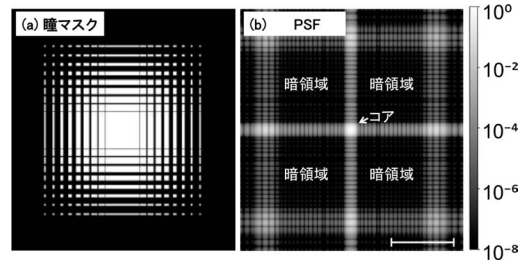


図2 (a): 瞳マスクのデザイン. 透過率は黒が0, 白が1. マスクサイズは2 mm. (b): 瞳マスクから期待される理想的なPSF. スケールバーは $20 \lambda/D$ (λ : 波長, D : 開口の大きさ). PSFのコアのすぐ近くに光を大幅に低減した暗領域が四つできる. この暗領域に惑星を発見したいわけである.

中でさまざまな方式のコロナグラフの開発競争が展開されている.

2.1 バイナリー瞳マスクコロナグラフとは

本研究ではバイナリー瞳マスク方式のコロナグラフを用いた. このコロナグラフは, 透過率0か1 (つまり「バイナリー」) のある工夫されたパターンで「瞳」(光学系の入射開口) の形状をコントロールする「マスク」の工夫により, 明るい主星光のコア付近にコントラストを大幅に低減した, 暗領域と呼ばれる暗い領域を作り出し, 高コントラスト観測を実現するものである (図2). 光には波の性質があるので, 例えば円形開口に入射してきた平行光は回折して, 焦点面で同心円状の明暗の縞模様 (エアリーパターン) を作る. このように, 回折光のパターンは瞳の形状のみで決まる. 瞳と回折パターンとの関係はフーリエ変換の式で表すことができる. ゆえに, 中心星のすぐ近くの回折光が低減されたようなPSFを得たいときには, それが得られるように計算された形状に瞳マスクを変えれば良い (図2a).

この方式の原理的な利点は, 望遠鏡指向誤差に対して極めて強いこと, 波長によらず機能することである. 古典的なリオ型コロナグラフなど (焦点面にマスクを置くタイプ) は, 焦点位置とマスクの位置関係が非常にシビアであるが, 瞳マ

スク方式ならマスクが瞳面を定義するので, そもそも位置関係を気にする必要がないからである. これまでわれわれのグループでは, 産業技術総合研究所との共同研究で, 電子ビーム描画によってガラス基板上にアルミ蒸着でパターン形成したバイナリー瞳マスクを開発した. それを用いた常温大気中・可視光 (He-Neレーザー) コロナグラフ実験では, 1.1×10^{-7} のコントラストを達成した⁴⁾. すなわち, バイナリー瞳マスクコロナグラフの原理は実証されている.

2.2 次世代赤外線天文衛星 SPICA 搭載コロナグラフ

次世代赤外線天文衛星 SPICA (2020年代初頭打ち上げ予定) に, コロナグラフを搭載する計画がある⁵⁾. SPICAは6 K以下に冷却された3 m級望遠鏡を用いて中間赤外線と遠赤外線天文学を行うために最適化された天文ミッションである⁶⁾. SPICA コロナグラフの目的は木星クラスの系外惑星の直接検出および分光である.

この計画の特色は, 第一に可視光領域ではなく中間赤外領域をターゲットにしている点である. 上にも述べたとおり, 可視光では ~ 10 桁もコントラストがあるが, 赤外光では ~ 6 桁であるため, 直接検出に有利である.

第二に宇宙望遠鏡を用いる点である. 宇宙での

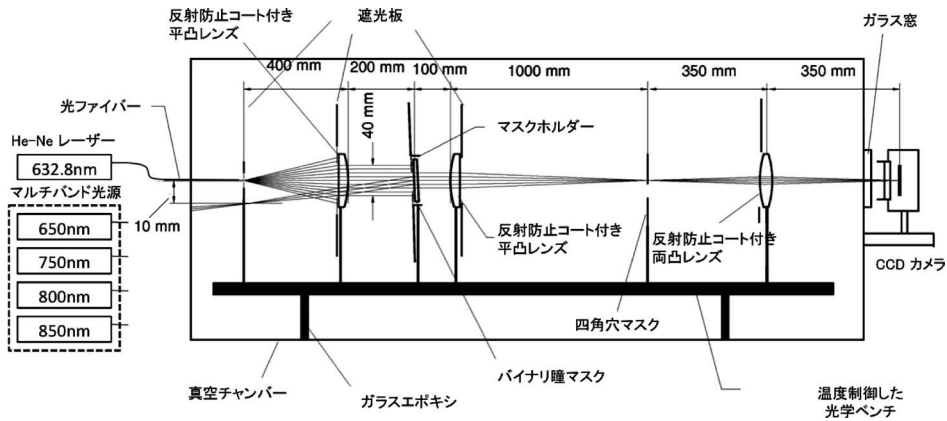


図3 光学系の配置図. 断熱・温度制御機能を備えた大型の真空チャンバーを開発し、その内部に光学系を構築することで、超高コントラストのコロナグラフ実験を実現した。

観測では、地上の望遠鏡のように大気ゆらぎを補正する必要がなく、赤外線の大気吸収もないので、コロナグラフが要求する高コントラストな観測に最適のプラットフォームになる。

第三に極低温の望遠鏡であるという点である。極低温の望遠鏡は赤外領域において高感度を提供する。極低温望遠鏡が太陽と地球のラグランジュポイント (L2) に打ち上げられることによって、高い安定性が期待される。このように、SPICA コロナグラフは系統的な系外惑星観測の絶好の機会になる。

3. 実用化に向けたコロナグラフの開発実証

系外惑星の直接観測に向けてバイナリー瞳マスク・コロナグラフを実際の望遠鏡に搭載するためには、以下が現実的には問題点になる可能性がある。

- 1) 実際に宇宙で観測することを考えるときに、光学系の不完全性によって起こる波面誤差によってコントラストが制限される。
- 2) 実際の観測では、単色レーザー光ではなく、マルチカラー・ブロードバンドである。
- 3) これまで用いてきたガラス基板マスクは、基板透過率による光のロスがある、基板反

射によるゴーストがある、さらに基板屈折率の波長依存性の影響を受ける。

そこで、本研究では、実用化に向けたコロナグラフの開発実証を行った。本研究で行った可視光実証実験は大きく分けて以下の三つである。

3.1 星像差分法実験

星像差分法は、観測対象となる星系と参照星の像等を差し引きすることで、波面誤差のうち安定した成分をキャンセルして、コロナグラフの生コントラストより高いコントラストを得る方法として有用である^{7),8)}。実際の望遠鏡では、光学系の不完全性によって射出光は波面誤差をもつため(例えばSPICAの場合350 nm rms)、レーザー光源のように理想的な入射波面をコロナグラフに供給しない。そのため、コロナグラフの性能は1桁以上悪化すると見込まれている。星像差分法は宇宙望遠鏡で系外惑星を直接観測する場合にも応用でき、高コントラスト観測に役買うことが期待される。本研究では星像差分法を用いることによって、どのくらい高コントラスト観測に寄与するか実証した。星像差分法を最大限に活かすためには、光学系全体の安定性を高めることが肝心である。筆者は光学系全体の温度安定性を高めるため、図3のように、大型で真空排気と温度制御可

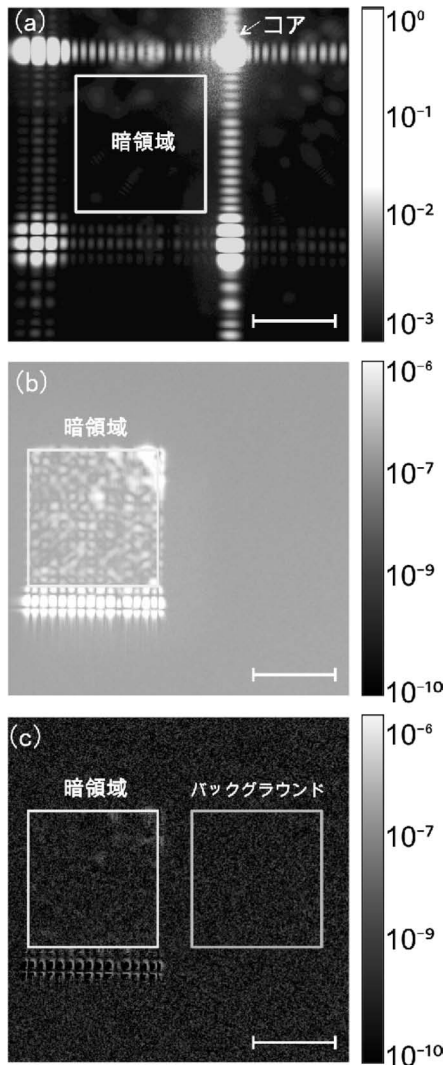


図4 He-Neレーザー実験で得られたコロナグラフ画像。スケールバーは $10\lambda/D$ 。(a): PSFのコア画像。(b): 差分前の暗領域。理論的に期待される格子状の回折パターンが見えた。(c): 差分後の暗領域。差分法によって、世界最高水準のコントラストに到達した。

能な真空チャンバーを開発し、その内部にコロナグラフ光学系を構築した。チャンバーからの熱伝導を抑えるため、光学ベンチは断熱サポート（ガラスエポキシ）の上に乗せた。光学系の熱歪みを低減するため、光学ベンチには温度コントロールをかけ、さらに真空チャンバー全体をアルミ断熱

マット（八重）で覆って保温した。このように擾乱要因を徹底的に追い込んだ結果、温度変化の幅も有意に小さくなり、最大振幅で0.05度以下になった。星像差分法を用いた結果、コントラストは世界最高水準の 1.3×10^{-9} に到達（差分前より2桁改善）した（図4）。この実験で得られたコントラストは、太陽光と惑星光の赤外でのコントラスト要求 $\sim 10^{-6}$ をクリアし、可視でのコントラスト要求 $\sim 10^{-10}$ の高コントラストに迫った。また、SPICA望遠鏡の波面精度はそのままでは生のコントラストを制約する要因となるが、筆者が実証した星像差分法を併用すれば大きく改善できると考える。

3.2 マルチカラー・ブロードバンド実験

これまでの実験では光源としてHe-Neレーザーのみを使っていたが、実際の観測では、バンド幅をもった観測が必要であり、かつ、マルチバンドでの観測が有益である。赤外線の大気透過帯域の制約のない宇宙望遠鏡は、広帯域の分光機能をもつことで、有効性が劇的に向上する。コロナグラフのうち、瞳マスク方式だけが原理的に波長によらず効くので、SPICAにおいても非常に有効と考える。バイナリー瞳マスクコロナグラフが波長によらずに機能することを実証するために、これまで単色レーザー光のみで行っていた実験系に、新たにマルチカラー・ブロードバンド光源（中心波長：650, 750, 800, 850 nm）を導入した（図3）。その結果、650, 750, 800, 850 nmでそれぞれ、 3.1×10^{-7} , 1.1×10^{-6} , 1.6×10^{-6} , 2.5×10^{-6} のコントラストに到達し、バイナリー瞳マスクコロナグラフは実験に用いたすべての波長帯において、通常の望遠鏡に比べて有意なコントラスト改善効果があることを初めて実証した（図5）。ただし、このコロナグラフの設計コントラストは 10^{-7} であり、長波長になるにつれて、コントラストが少し悪化していることがわかった。本実験のレンズに施された反射防止コーティングの残存反射率は波長依存性があり、レンズの反射防止膜

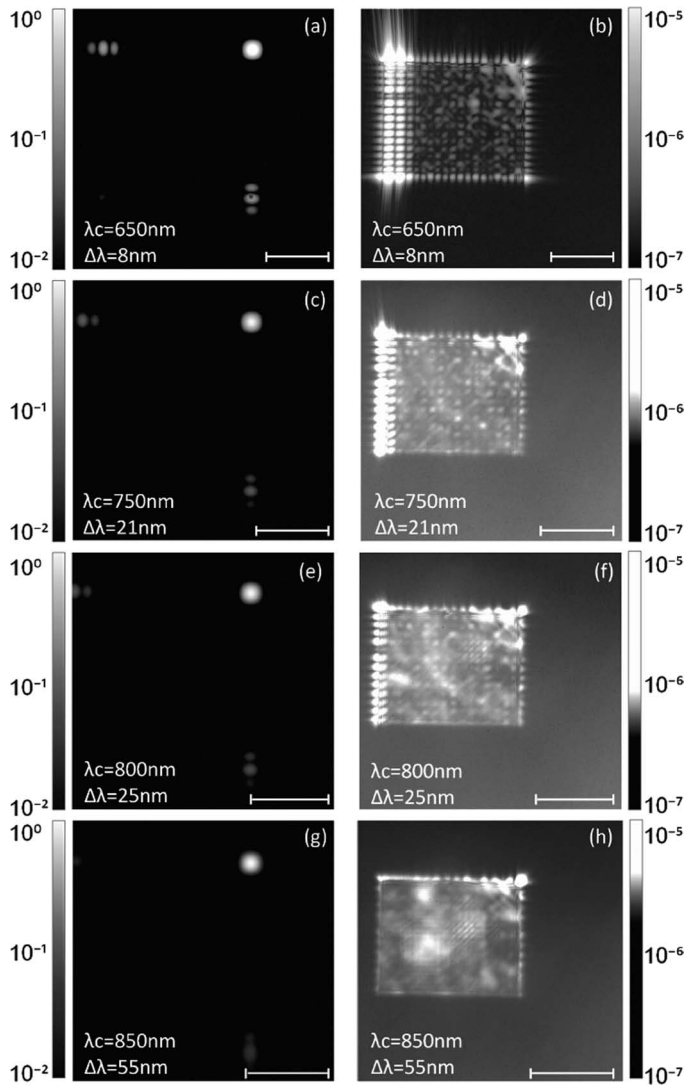


図5 ブロードバンド・マルチカラー実験で得られたコロナグラフ画像。(a), (c), (e), (g) はそれぞれの波長帯でのコア画像。(b), (d), (f), (h) はそれぞれの波長帯での暗領域。スケールバーは $10\lambda/D$ 。波長によらず効くというバイナリー瞳マスクの性質を初めて実証することができた。

が長波長では性能が低下している。その結果、反射光が増加して、ゴーストの一因となっており、暗領域（の平均値）が設計よりも明るくなっていると考える。この問題点は、レンズをミラーに置き換えれば原理的には解決するはずである。

3.3 自立型瞳マスク実験

これまでの可視域の実験で成功を収めてきたガラス基板マスクは、基板透過率による光のロスが

ある、基板残存反射率によるゴーストがある、さらに基板屈折率の波長依存性の影響を受ける、そもそも赤外線波長を通さない、という問題点がある。このため、従来のガラス基板マスクは、バイナリー瞳マスクの原理的な利点である、波長によらず機能するという性質を制限していた。そこで、われわれはこれまでに世界でも類例を見ない、基板を用いない金属薄膜製の自立型マスクを

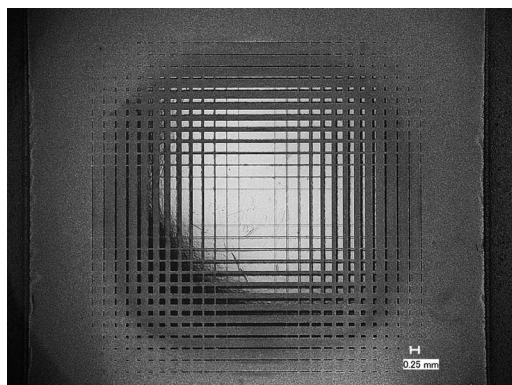


図6 銅の薄膜で作られた、基板を用いない新しい自立型マスク。透過領域のマスクサイズは1辺が10 mm, 厚さは2 μm . 波長依存性がないので赤外観測にも応用できる。

新たに開発した(図6). 自立型マスクは、可視光観測よりも星と惑星のコントラストにおいてたいへん有利な赤外観測にも応用できる。一方、基板上マスクに比べて、平坦性が悪い、マスク部が厚い、振動耐性が弱い、そのほかおそらく形状精度が悪い、という欠点が懸念されるので、筆者らは新たに開発した自立型マスクを用いてコロナグラフ実験を行い、コントラスト性能を実証した。自立型マスクを用いたHe-Neレーザー実験によって、 1.0×10^{-7} のコントラスト性能を達成した。よって自立型マスクも基板マスク(PSFのコントラストは 1.1×10^{-7})のように十分コントラスト改善効果があるマスクであることが実証された。

以上の成果は、コロナグラフ単体のコントラストとして世界最高水準であるのみならず、より実際の観測に即した実証であるという点で重要でありほかに類を見ない^{9), 10)}。

4. まとめと将来の応用

筆者はこれまでバイナリー瞳マスクコロナグラフの開発研究を進め、コントラスト性能など、コロナグラフ単体の実証で世界最高水準に到達した。ここで得られたコントラストは、SPICAを用いて赤外域で系外惑星観測を行うのに十分な値である。SPICA衛星では冷凍機などによる振動擾乱が一般にコロナグラフに悪影響を及ぼすと考えられていたが、望遠鏡指向誤差に対して極めて強いバイナリー瞳マスク方式を用いれば、コントラスト性能に対する影響は原理的に無視できる。さらに、赤外線の大気透過帯域の制約のない宇宙望遠鏡は、広帯域の分光機能をもつことで、有効性が劇的に向上する。コロナグラフのうち、瞳マスク方式だけが原理的に波長によらず効くので、SPICAにおいても非常に有効と考える。またSPICA望遠鏡の波面精度(350 nm rms)は、そのままでは生のコントラストを制約する要因となるが、筆者が実証した星像差分法を併用すれば大きく改善できると考える。

謝辞

本稿は、2009と2011年に筆者らが発表した投稿論文および博士論文に基づいています。本研究の共同研究者である、塩谷圭吾氏、小谷隆行氏、松原英雄氏、中川貴雄氏、ABE Lyu氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 天文月報105, 1-4月号, 2012—「特集: トランジット惑星をめぐるサイエンス」
- 2) Kalas P, et al., 2008, Science 322, 1345
- 3) Marois C., et al., 2008, Science 322, 1348
- 4) Enya K., et al., 2007, A&A 461, 783
- 5) Enya K., et al., 2010, ASR 45, 979
- 6) Nakagawa T, et al., 2010, Proc. SPIE 7731, 18
- 7) Trauger J. T., Traub W. A., 2007, Nature 446, 771
- 8) Biller B., et al., 2009, PASP 121, 716
- 9) Haze K., et al., 2009, ASR 43, 181
- 10) Haze K., et al., 2011, PASJ 63, 873

Development of Binary Shaped Pupil Mask Coronagraph for the Observation of Exoplanets

Kanae HAZE

Department of Space Astronomy and Astrophysics Institute of Space and Astronautical Science Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

Abstract: Direct observation of extra-solar planets is essential. However, the enormous contrast in flux between the central star and its associated planets is the primary difficulty. The development of stellar coronagraphs, which can improve the contrast between the star and the planet, is needed. Of the various kinds of coronagraph, we have focused on a binary-shaped pupil mask coronagraph. The adoption of a binary-shaped pupil mask coronagraph for SPICA is considered. We demonstrated that subtraction of the PSF is potentially beneficial for improving the contrast of a binary-shaped pupil mask coronagraph, that this coronagraph can provide a significant improvement in contrast with multicolor/broadband light sources, and that the new free-standing mask for practical use provides superior performance of improving contrast. This study is unique and important in that it includes not only the tasks necessary to make the coronagraph fit for practical use, but also tests to verify its use for actual coronagraphic observations.