

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 6 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800114

研究課題名(和文)系外惑星の精査に向けた宇宙望遠鏡搭載コロナグラフ用自立型リング瞳マスクの開発

研究課題名(英文)Development of free-standing ring mask coronagraphs for a space telescope with the goal of characterizing exoplanets

研究代表者

樫 香奈恵 (Haze, Kanae)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：50635612

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：系外惑星の精査という重要で挑戦的な課題に向け、将来の望遠鏡搭載コロナグラフを実現するために、コロナグラフの大敵である望遠鏡の瞳遮蔽の影響を回避したデザインかつ広視野を実現する、より実際的なリング瞳マスクの開発実証を行った。常温大気中の可視光実験を行った結果、広い範囲にわたって系外惑星の赤外観測における要求を満たす高コントラストを実証した。これらの結果は単体の研究成果として査読論文(Haze et al., 2015., PASJ)にまとめ、学会にて発表した。

研究成果の概要(英文)：For an important challenge of direct observation of exoplanets using a coronagraph, we developed ring mask coronagraphs applicable for telescopes with partially obscured pupils. The design of the mask is based on a concentric ring mask and provides the widest dark region and a symmetric point spread function. The coronagraphic images obtained by experiment were mostly consistent with the designs. The high contrast, which was useful for observing Jovian planets located at various distances from the central star in the mid-IR wavelength region, was achieved over an extended field of view (5 - 25 /D). The research outcome were published in a paper (Haze et al., 2015., PASJ) and presented at a conference.

研究分野：数物系科学

キーワード：光赤外天文学 コロナグラフ

1. 研究開始当初の背景

系外惑星の精査は、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る、人類の宇宙観に関わる重要な研究テーマである。しかし、惑星からの放射に比べて極めて大きな主星からの放射（両者の比をコントラストと呼ぶ）が、直接観測の障壁となっている。例えば、可視光領域では太陽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（図1）。そのためコロナグラフという、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選択的かつ大幅に低減する特殊な光学系を開発する必要がある（図2）。申請者はこのような背景のもと、バイナリ瞳マスク方式のコロナグラフの研究開発を重点的に追求し、世界中で競争が展開される中、短期間のうちに顕著な成功を収めてきた。将来的には、これまでに可視光原理実証で得た成果を発展させ、実際の望遠鏡に搭載したいと構想している。

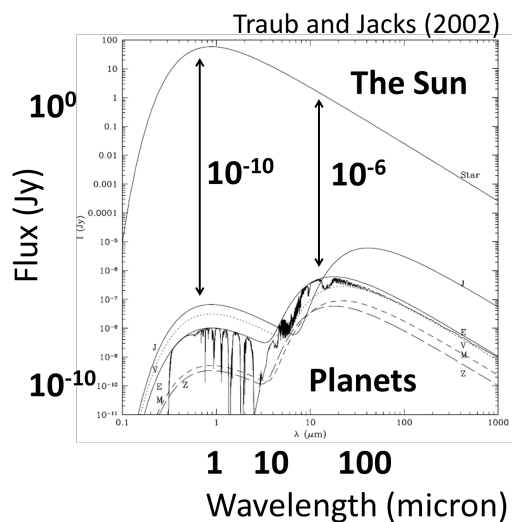


図1: 太陽系天体を外側（10pcの距離）から観測した場合のスペクトル。太陽と惑星のコントラストは可視光領域では ~ 10 桁、赤外領域でも ~ 6 桁もある。

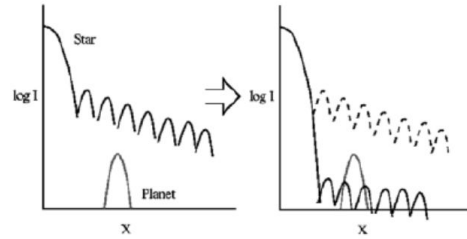


図2: コロナグラフの働き。図は惑星系のPSFプロファイル。縦軸は強度、横軸は動径方向の距離。左: コロナグラフなし。右: コロナグラフあり。コロナグラフを用いて中心星の回折光を大幅に低減することによって、惑星を検出する。

望遠鏡の副鏡などによる瞳遮蔽の存在は、チェッカーボード型やバーコード型（長方形の集合）など従来型のコロナグラフの大敵であった。そのため、以前に提案されたNASAのTPFなどの地球型惑星の直接観測を目指す大型スペース計画は、軸外し望遠鏡にすることで瞳遮蔽の影響を回避している。一方、図3は、申請者らが考案、提示した、革新的なバイナリ瞳マスク形状の設計解の1つ（リング瞳マスク）を示すものであり、マスクのデザインの工夫によって、副鏡などによる瞳遮蔽の存在下でも最適化された解が導出可能となっている。さらにこのマスクは、広い視野にわたって高コントラストを確保した解である点が新しい。主星から離れた未知の系外惑星の効率的なサーベイや、系外惑星形成期の星周円盤などの広がった天体の精査等の新しいサイエンスを切り開く鍵となる。

申請者がこれまでの開発研究を通して確立してきたバイナリ瞳マスクコロナグラフの設計、製造、実証、シミュレーションなどの多面的な成果が、瞳遮蔽を持つ汎用望遠鏡搭載コロナグラフの実現性を高める土台となる。

2. 研究の目的

これまでの研究を発展させ、瞳遮蔽を持つ幅広いプラットフォームにコロナグラフの搭載を実現し、系外惑星を精査することが本研究の骨子である。そのため、本研究における目標を、これまでに類例のない、コロナグラフの大敵である望遠鏡の瞳遮蔽の影響を回避したデザインかつ、広視野を実現する、より実際的なリング瞳マスクの実証実験とした。

3. 研究の方法

それに向けた2年間の取り組みは主に、バイナリ瞳マスクコロナグラフの一種である中心遮蔽対応型リングマスクの製作および可視光高コントラスト実証であった。

コロナグラフの要であるマスクは、可視光よりもコントラストにおいて有利な赤外域への応用も想定して、高精度の電鍍法等を適用することで、金属薄板による（基盤を用いない）自立型にて開発した。これまでの開発研究から、自立型マスクの製造では、仮基板上に成長させたマスクを剥離するプロセスが、1つの関門であることがわかっている。図3で示す通り、自立型リング瞳マスクはそのデザイン上、細長い円弧がブリッジ状の構造となるため、設計形状を製造することが難しい。所望のマスク形状を与えたとき、コロナグラフ像を導出するソフトウェアはすでに開発済みである。あとはサイエンス面から定めたマスク性能を保ちつつ、実現性を判断してマスク形状を微調整するプロセスを繰り返して設計を確定した。さらに製造プロセスの調整、最適化をおこない、製造上のパラメータを獲得し、マスクを製作した。

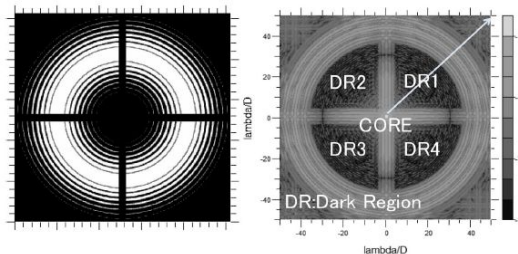


図3：リング瞳マスクの設計解（左）と期待される像（右）。広視野かつ、コロナグラフの大敵と考えられていた望遠鏡の副鏡などによる瞳遮蔽の影響を回避した、より実際的な解。ただし、この設計形状を製造するために、デザインの最適化、製造パラメータの獲得が不可欠であった。

平成25年度までに獲得した実験系、シミュレーション法をベースとし（Haze 2012 [博士論文]など）、本研究用に改修を加え、可視光高コントラスト実証を行った。可視光で実験するのは、常温大気中で可能であるという点で、赤外域での実験より簡便だからである。それでも波面誤差の影響については、可視域の方が中間赤外域に比べて～10倍厳しい試験を課すことになり、むしろ原理実証には大変有効である。

4. 研究成果

本研究では、最適化された瞳遮蔽対応型リング瞳コロナグラフマスクを開発し、それを用いて常温大気中の可視光実験を行った結果、5 - 25 /Dの広い範囲にわたって系外惑星の赤外観測における要求を満たす高コントラスト（ $\sim 10^{-6}$ - 10^{-5} ）を実証した（図4）。また実際の望遠鏡に搭載する際にコントラスト性能を悪化させるマスクの傾けによる瞳遮蔽の影響などを考慮した星像シミュレーションを行い、実験結果と比較し評価した。

以上の成果により、瞳遮蔽を持つ幅広いプラットフォーム（SPICA, JWST, TMTなど）へのコロナグラフ搭載の実現性を高めた。本研究結果は、単体の研究成果としてもユニークで重要であり、申請者が第一

著者として査読論文 (Haze et al. 2015, PASJ) にまとめ、学会にて発表した。

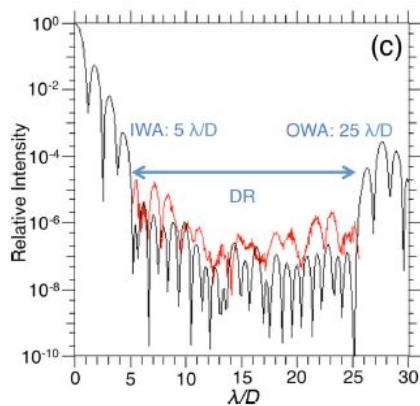


図4: リング瞳マスクコロナグラフのPSFプロファイル(Haze et al. 2015, Fig.5(c))。黒線: 設計値。赤線: 実験で得られた値。IWA: Inner Working Angle, OWA: Outer Working Angle, λ : 波長, D: 口径。広範囲でコントラストが低減されることを実証した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

Haze, K.; Enya, K.; Abe, L.; Takahashi, A.; Kotani, T.; Yamamuro, T.; Experimental demonstration of binary shaped pupil mask coronagraphs for telescopes with obscured pupils, PASJ, Volume 67, Issue 2, 2015, id.2810 pp., DOI : 10.1093/pasj/psu161

[学会発表](計 1 件)

櫛香奈恵, 他, 瞳遮蔽対応バイナリ瞳マスクコロナグラフの開発, 日本天文学会 2016年春季年会, 2016年 3月 14-17日, 東京都

6. 研究組織

(1)研究代表者

櫛 香奈恵 (HAZE Kanae)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
宇宙航空プロジェクト研究員
研究者番号: 50635612