

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24840049

研究課題名(和文) 太陽系外惑星の精査に向けた赤外線天文衛星搭載コロナグラフの開発

研究課題名(英文) Development of stellar coronagraphs for an infrared space telescope with the goal of characterizing extrasolar planets

研究代表者

櫛 香奈恵 (Haze, Kanae)

独立行政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) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：太陽系外惑星の直接観測という重要で挑戦的な課題に向け、赤外線宇宙望遠鏡搭載コロナグラフを実現するために、可視光波長域から赤外波長域に拡張するための極低温真空チャンバーおよび内部に納める実験系の開発を行なった。さらに、実用化に向けた新しいデザインの自立型瞳マスクを開発し、常温大気中の可視光実験を行った結果、赤外域で系外惑星を観測するための要求を満たす高コントラストを実証した。また、コロナグラフの大敵となる波面誤差についての数値シミュレーションや、ハビタブルゾーン(生命居住可能領域)天体の検出能力等のシミュレーション検討も行なった。

研究成果の概要(英文)：For an important challenge of direct observation of exoplanets using a coronagraph applicable to an infrared space telescope, we developed a low temperature vacuum chamber and an experimental system inside the chamber. Furthermore, we developed new designed pupil masks for practical use and carried out the coronagraph experiments using the masks at visible wavelength. As the result, we achieved a necessary contrast for the direct observation of exoplanets at infrared wavelength. Additionally, we simulated the wavefront error, which is great enemy of a coronagraph, and the detection capability of habitable zone object.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

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

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、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。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（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）。申請者は現在、バイナリ瞳マスク方式のコロナグラフの研究開発を進めており、将来的には、これまでに可視光波長域での原理検証実験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。そのためのプラットフォームとしては、コントラストが可視域よりも有利かつ、コロナグラフの大敵である大気擾乱から完全に流れられる、赤外線宇宙望遠鏡に搭載することを想定した。申請者が開発研究を進めてきたバイナリ瞳マスクコロナグラフなら、実際の望遠鏡に搭載する際の難点を克服し、赤外線宇宙望遠鏡搭載コロナグラフの実現性を高める可能性は大変高いと考えている。

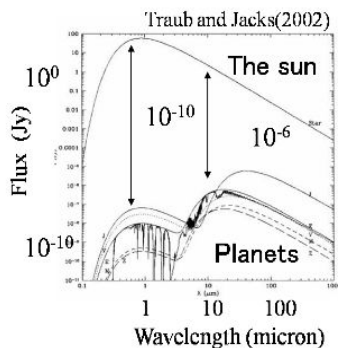


図1: 太陽系天体を外側（10pc の距離）から観測した場合のスペクトル。太陽と惑星のコントラストは可視光領域では ~ 10 桁、赤外領域でも ~ 6 桁もある。

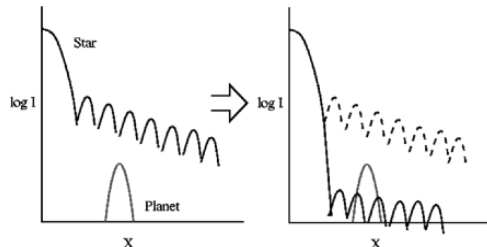


図2: コロナグラフの働き。図は惑星系の PSF プロファイル。縦軸は強度、横軸は動径方向の距離。左：コロナグラフなし。右：コロナグラフあり。コロナグラフを用いて中心星の回折光を大幅に低減させることによって、惑星を検出する。

2. 研究の目的

太陽系外惑星の直接観測という重要で挑戦的な課題に向け、本研究における目標を、赤外線宇宙望遠鏡搭載コロナグラフを実現

するための、1) これまでに類例のない、中間赤外域での高コントラスト実証実験、2) 惑星検出能力等のシミュレーション、と設定した。

3. 研究の方法

それに向けた2年間の取り組みは主に、可視光波長域から（より惑星観測に適した）赤外波長域に拡張するための極低温真空チャンバーおよび内部に納める実験系の開発、であった。

中間赤外域で高コントラストの実証を志向する場合、熱輻射による膨大なバックグラウンドを回避するため、実験系全体を極低温（ $\sim 5K$ ）に冷却する必要がある。そのため、極低温コロナグラフテストベッド（PINOCO：Prototype-testbed for Infrared Optics and Coronagraph）の開発を進めた。PINOCO の外枠には除振台で支えた大型（ $1.5 \times 1.5 \times 0.5m$ ）の真空チャンバーを用いる。冷却には、機械式 GM 冷凍機（住友重機製 SRD208）を利用し、 $5K$ 以下の極低温環境を実現した。これまで可視光実験で用いてきたレンズ光学系に代えてアルミ製軸外し鏡を選定し、検出器に最適化した F 値を計算し、PINOCO 用のアルミ製軸外し鏡のコロナグラフ光学系を開発した（図3）。これにより中間赤外域でもレンズ材料の問題（色収差、多重反射など）の問題から開放され、波長によらず有効な光学系となった。コロナグラフの方式としては、これまでの可視域での検証実験の成功を受け、瞳マスク方式を選択する。ただし、これまで可視域の実験で成功を収めてきたマスクデザインは、原理検証用であったため、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副鏡やその支持機構による遮蔽を考慮していなかった。そこで実用化に向けた瞳遮蔽に対応したデザインで、ニッケルを材料とした金属薄膜による（基板を用いない）自立型瞳マスクを新たに製造開発した。それを用いた初めての可視光実証をおこなった。

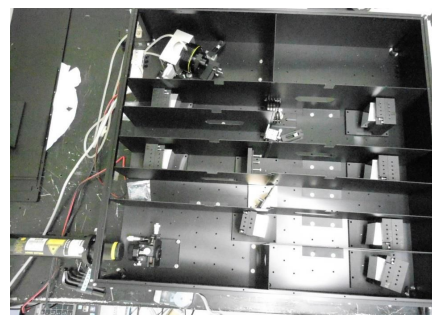


図3: 本科研費で製作したアルミ製軸外し鏡のコロナグラフ光学系。

4. 研究成果

本研究では、極低温真空チャンバーおよび内部に納めるアルミ製軸外し鏡のコロナグラフ光学系を開発した。さらに、実用化に向けた新しいデザインの自立型瞳マスクを開発し、常温大気中の可視光実験を行った結果、赤外域で系外惑星を観測するための要求を満たす高コントラストを実証することができた(図 4)。また、コロナグラフの大敵となる波面誤差についても数値シミュレーションを用いて、望遠鏡の波面精度要求を検討した。その波面誤差を補正する収差補正鏡のシミュレーション設計および開発を行なった。さらに、ハピタブルゾーン(生命居住可能領域)天体の検出能力等のシミュレーション検討も行なった。

以上の成果により、赤外実験に向けた実証開発を着実に進め、赤外線宇宙望遠鏡搭載コロナグラフの実現性を高めた。本研究成果は、これまでに類例のない、中間赤外域での高コントラスト観測を実現するために必要不可欠で、単体の研究成果としてもユニークで重要である。これらは、単体の研究成果として国内外のコンファレンスにて発表した。とくに、瞳遮蔽対応瞳マスクコロナグラフの成果については、申請者が第一著者として論文を作成中であり、6月中に査読雑誌に投稿する予定である。

今後は、赤外線宇宙望遠鏡搭載コロナグラフを実現するため、これまで開発を進めてきた、極低温真空チャンバーPINOCOを用いた、これまでに類例のない、中間赤外域での高コントラスト実証実験をおこなう。実験結果と数値シミュレーションと突き合わせて実験時における波面誤差を逆算し、誤差要因について考察し、徹底的な改善を行う。このように、申請者が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製造、実証、シミュレーションなどの多面的な成果を土台として、実際の衛星に搭載する際の難点を克服し、実現性を高める。

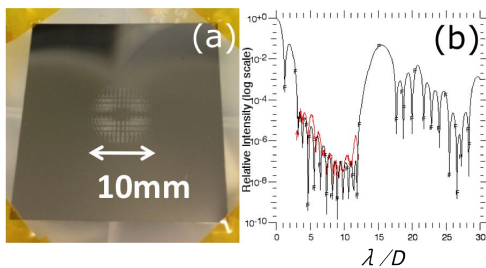


図4: (a) は本科研費で製作したニッケル製自立型瞳マスク。開口部の大きさは10mm。(b) は(a)のコロナグラフマスクを用いた場合のPSFプロファイル。縦軸は強度、横軸はPSF中心からの距離(; 波長、D: 開口部の大きさ)。実験値(赤)は理論値(黒)にせまる高コントラストに到達した。

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 2 件)

Haze, K.; Enya, K.; Kotani, T.; Kaneda, H.; Oyabu, S.; Ishihara, D.; Oseki, S.; Abe, L.; Tamamuro, T.; Laboratory Experiments using Binary Pupil Masks for SPICA Coronagraphic Instrument, ASP Conference Series, 査読無, in press

Haze, K.; Enya, K.; Kotani, T.; Abe, L.; Nakagawa, T.; Matsuhara, H.; Sato, T.; Tamamuro, T.; A laboratory experiment for a new free-standing pupil mask coronagraph, Space Telescopes and Instrumentation 2012: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Proceedings of the SPIE, 査読無, vol. 8442, 2012, pp.15, DOI: 10.1117/12.925845

[学会発表](計 7 件)

Haze, K., et al., Laboratory experiments with the free-standing binary-pupil mask coronagraphs for SPICA, "Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity" The 5th Subaru International Conference, 2013年12月8-12日, ハワイ

Haze, K., et al., Study of Exoplanet using TMT-MICHI with a coronagraph, TMT Science and Instrumentation Workshop, 2013年10月16-17日, 東京

櫛香奈恵, 他, SPICA 望遠鏡搭載に向けた瞳遮蔽対応コロナグラフマスクの実証, 2013年秋季天文年会, 2013年9月10-12日, 宮城

Haze, K., et al., Laboratory experiments for binary-pupil mask coronagraphs for the SCI, From Exoplanets to Distant Galaxies: SPICA's new window on the Cool Universe, 2013年6月18-21日, 東京

櫛香奈恵, 太陽系外惑星の直接観測に向けたバイナリ瞳マスクコロナグラフの開発, 日本学術会議「第3回先端フォトニクスシンポジウム」, 2013年4月26日, 東京

櫛香奈恵, 他, SPICA 望遠鏡搭載に向けた自立型リング瞳マスクコロナグラフの開発, 2013 年春季天文年会, 2013 年 3 月 20-23 日, 埼玉

櫛香奈恵, 他, SPICA 望遠鏡搭載に向けた自立型瞳マスクコロナグラフの開発, 2012 年秋季天文年会, 2012 年 9 月 18-22 日, 大分

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 : 5 0 6 3 5 6 1 2