

氏 名 樋 香奈恵

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1488 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Development of binary shaped pupil mask coronagraph
for the observation of exoplanets

論文審査委員 主 査 准教授 田村 元秀
教授 松原 英雄
准教授 片坐 宏一
准教授 川田 光伸
教授 山下 卓也 国立天文台

論文内容の要旨

Direct observation of extra-solar planets (exoplanets) is essential to understand how planetary systems were born, how they evolve, and ultimately, to identify biological signatures on these planets. However, the enormous contrast in flux between the central star and its associated planets is the primary difficulty in direct observation. Thus, 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 reasons for using this type of coronagraph are that it is robust against pointing errors, it can, in principal, make observations over a wide range of wavelengths and it is relatively simple. We conducted a number of coronagraphic experiments in a vacuum chamber using a checkerboard mask, which is a type of binary-shaped pupil mask, without active wavefront control.

1. We evaluated how much the PSF subtraction contributed to the high contrast observation by subtracting the images obtained through the coronagraph. We improved the temperature stability by installing the coronagraph optics in a vacuum chamber, controlling the temperature of the optical bench, and covering the vacuum chamber with thermal insulation layers. With a He-Ne laser at a wavelength of 632.8nm, a contrast of 2.3×10^{-7} was obtained for raw coronagraphic images and a contrast of 1.3×10^{-9} was achieved after subtraction of the PSF. Thus, an improvement of around two orders of magnitude in contrast was achieved by subtracting the PSF.

2. We also carried out multi-color/broadband experiments using Super luminescent Light Emitting Diodes (SLEDs) with center wavelengths of 650nm, 750nm, 800nm and 850nm in order to demonstrate that the binary-shaped pupil mask coronagraph could, in principal, be used for observations over a wide range of wavelengths. We

achieved contrasts of 3.1×10^{-7} , 1.1×10^{-6} , 1.6×10^{-6} and 2.5×10^{-6} for the bands centered at 650 nm, 750 nm, 800 nm and 850 nm, respectively. The results show that the contrast within each wavelength band has been significantly improved compared with those obtained using non-coronagraphic optics.

3. However, the checker-board mask with a glass substrate has the problems of transmission losses, ghosting from residual reflectances and a slightly different refractive index for each wavelength. Therefore, we developed a new free-standing sheet metal mask without the need for a substrate. As a result, with the He-Ne laser and a free-standing mask, a contrast of 1.0×10^{-7} was achieved for the raw coronagraphic image by areal averaging of all the observed dark regions. Speckles are the major limiting factor. A similar significant improvement in contrast was demonstrated with a free-standing mask as with a substrate mask.

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. We performed the tasks necessary to make the coronagraph fit for practical use. In conclusion, we carried out verification tests on the binary-shaped pupil mask coronagraph for actual coronagraphic observations.

博士論文の審査結果の要旨

我々の住む太陽系、そして地球や木星のような惑星はどのように形成され、進化してきたのか？この問いに答えるには、様々な年齢の恒星系の様々な太陽系外惑星の研究を進める必要がある。すでに700個を超える数の太陽系外惑星の存在が報告されるようになったが、そのほとんどは、惑星の公転運動による主星の速度変化を測定するドップラー法や、惑星による主星の食に伴う光度変化を検出するトランジット法などの間接的な検出である。一方、太陽系外惑星を主星と分離して直接に撮像・分光する直接観測は、惑星の質量や大気温度・組成の情報を得る上で非常に有効である。

しかしながら、太陽系に似た古い年齢（10億年以上）の惑星系では、主星とその極めて近傍に位置する惑星の光度には莫大な違いがある（光度比は、可視光波長域で約 10^{-10} 、中間赤外線波長域で約 10^{-6} に達する）ため、現在の直接観測は若い惑星の検出にとどまっており、その報告数も数十例と、間接法に比べると非常に限られている。従って、より一般的な恒星のまわりの多様な惑星系を調べるためには、この莫大な主星からの光をできるだけ低減しつつ惑星の光を浮かび上がらせる、高性能のコロナグラフの開発が不可欠である。また、これまでの直接観測の多くは地上観測であったが、大気揺らぎの無い宇宙からの観測によって、これまでになく高コントラスト観測を実現できる可能性がある。本研究は、太陽系外惑星を将来の宇宙赤外線望遠鏡によって直接観測するのに最適なコロナグラフの検討および室内実験による可視光波長での技術実証を行ったものである。

本論文は、1. 序章、2. 実験及び結果、3. 議論、4. まとめと結論の4章からなる。

第1章においては、本論文で取り扱ったバイナリ型瞳マスクを用いたコロナグラフについて、その採用の動機付けとなった次世代赤外線天文衛星 SPICA への搭載性に関する利点も含めて説明している。

第2章においては、以下の3つの室内実験とその結果について説明している：

A) 一般に、スペース望遠鏡におけるコントラスト低下の原因は光学系の波面誤差 (WFE) である。WFE を抑制する手法の一つとして差分測定法がある。差分測定法は、星像 (PSF) の差し引きを行い、WFE のうち時間と共に変化しない静的成分を除去する手法である。本研究では、コロナグラフを用いた室内実験により、PSF 差分測定法の効果を定量的に測定した。その際、光学系を真空槽に収め、光学ベンチの温度制御、真空槽の熱遮蔽などを行い、高コントラスト評価のための温度安定性に細心の注意を払った。その結果、基盤蒸着型バイナリ形状瞳コロナグラフと可視光単波長 (632.8nm) のレーザー光源を用いた差分測定法によって、 1.3×10^{-9} のコントラストを得ることに成功し

た。差分測定法を用いないコントラストは 2.3×10^{-7} であり、約 2 桁の改善である。これは、光学系の波面誤差をリアルタイムで補正する補償光学を用いない室内実験におけるコロナグラフのコントラストとしては世界最高レベルのものである。

B) 本実験で採用したバイナリ形状瞳コロナグラフの特徴は、多波長で使用可能な点にある。そこで、(A) の実験と同様の設定で、光源として高輝度発光ダイオードを用い、650nm、750nm、800nm、850nm の可視光広帯域 4 波長を用いた室内実験を行った。得られたコントラストは、それぞれ 3.1×10^{-7} 、 1.1×10^{-6} 、 1.6×10^{-6} 、 2.5×10^{-6} であり、これらは狭帯域のコントラストに匹敵し、広帯域のコロナグラフの有効性を示すものである。さらに、(A) と同様の差分法を用いて、1 桁から 2 桁のコントラスト改善を確認した。また、コントラストの波長依存性の原因を考察した。

C) 基盤蒸着型マスクの問題として、基盤の透過率による光量損失、ゴースト発生、屈折率波長依存性などが挙げられる。これらを克服し、赤外線観測にも応用可能な、蒸着基盤を用いない金属加工の自立型バイナリ形状瞳コロナグラフを用いた実験を行った。この自立型バイナリ形状瞳コロナグラフと可視光単波長 (632.8nm) のレーザ光源を用いた測定によって、約 1×10^{-7} の非差分コントラストを得ることに成功した。この値は基盤蒸着型マスクのコントラストと同等のものであり、赤外線観測に利用可能なマスクであることが示された。また、数値シミュレーションを行い、測定されたコントラストの値と、波面誤差、マスクの形状誤差、および、マスクの位置誤差との関係を議論した。

以上のように本研究において、太陽系外惑星の直接観測に重要となるバイナリ型瞳マスクの様々な長所を、数値シミュレーションだけではなく、よく制御された室内実験により定量的に技術実証したことが、第一に高く評価される。次に、次世代赤外線天文衛星に搭載する上での幾つかの技術的課題を克服する上で、バイナリ型瞳マスクが有望であることも示すことができた。これにより審査委員会は、博士論文として十分な価値を有し、合格であると判定した。