

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610038

研究課題名(和文)アダプティブ位相マスクによるナル干渉型ステラコロナグラフの開発

研究課題名(英文)Nulling stellar coronagraph with an adaptive phase mask

研究代表者

馬場 直志 (BABA, Naoshi)

北海道大学・名誉教授

研究者番号：70143261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：恒星近傍にある暗い系外惑星を観測する方法として、恒星からの光のみを極端に減光するハイコントラスト撮像法がある。このために、望遠鏡焦点面に位相マスクを置き、瞳像内で恒星光を打消し合う(ナル)干渉状態とし、リオストップ(瞳像面絞り)で恒星光を遮断するのが、位相マスク型ステラコロナグラフである。本研究では、副鏡およびスパイダーがあっても恒星光をほぼ完璧に遮光できる位相マスクを開発した。位相マスクの位相分布は、光軸光を瞳の透過部分で零となるように逐次型位相回復アルゴリズムを用いて数値的に求めた。このようにして得られた位相マスクによれば、10桁以上のコントラスト比を達成できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Phase-mask coronagraph holds the ability to directly detect exoplanets. The problem here is that ordinary telescopes do not have perfect circular apertures but shades of a secondary mirror and spiders. It is known that shades of a secondary mirror and spiders deteriorate significantly the performance of phase-mask coronagraph. There have been proposed several ideas to overcome the deterioration. However, these ideas are based on using theoretically established phase-masks. We developed a new kind of phase mask that would perform the contrast ratio of more than the tenth power of 10 for a circular aperture with shades of a secondary mirror and spiders. The phase distribution of the phase mask is numerically obtained by letting the leaked light outside the transparent part of the pupil. We applied the hybrid input-output algorithm, one of phase retrieval methods, to find the phase distribution of the phase mask. We showed the characteristics of thus obtained phase mask.

研究分野：天文光学

キーワード：光学赤外線天文学 系外惑星 ステラコロナグラフ ナル干渉

1. 研究開始当初の背景

太陽系外惑星を直接検出するために種々のステラコロナグラフが開発され、観測が行われてきた。そして 2008 年には太陽系外惑星の初めての直接検出が報告された (Kalas et al, 2008, Science **322**, 1345; Marois et al, 2008, Science **322**, 1348)。しかしながら、現在まで直接検出できているのは、恒星から遠く離れた大型の惑星のみである。いわゆる第 2 の地球を検出できていない。地球型惑星の直接検出を阻む要因としては、ハビタブルゾーンにある系外惑星は恒星から比較的近傍に位置すること、および、恒星に比べて極めて暗い (強度比で 10^{-10} 程度) ためである。太陽系外惑星の直接検出用に色々なステラコロナグラフが考案されてきたが、地球型惑星を検出する有望な方法として、恒星の光を打消し合う干渉状態とするナル干渉型ステラコロナグラフがある。ナル干渉型ステラコロナグラフで、主要となる素子が望遠鏡焦点面に置く位相マスクである。位相マスクとして、ディスク型 (中心の小円盤にの位相差をつける)、4 分割型 (円を 4 分割し各領域を順に 0、 π とする)、8 分割型、ポルテックス型 (e^{in} 、方位角にしたがって位相が渦状に変化) が提案されてきた。これらのうち、 $4n$ 分割型 (n : 自然数) およびポルテックス型は、望遠鏡が完全な円開口で恒星光が波面の乱れなく焦点面においてエアリー回折像を形成する場合、恒星光を瞳像の外側に押し遣ることができ、リオストップで恒星光をブロックすれば再結像面には惑星像のみが形成されることになる。

しかし、これらの位相マスクは、副鏡やスパイダーを有する通常の望遠鏡の場合には開口が完全な円形とならないために、その消光性能が著しく損なわれてしまう。副鏡やスパイダーの影響を除く方法としては、副鏡の影を除去するような補正光学系 (Murakami & Baba, 2005, Publ. Astron. Soc. Pacific **117**, 295) の導入、コロナグラフの多段化 (Mawet et al, 2011, Opt. Lett. **36**, 1506)、入射瞳面にアポダイザーの挿入 (Carlotti et al, 2014, Astron. Astrophys. **565**, A31) などがあるが、焦点面に位相マスクを単に置くことよりも煩雑となる。

2. 研究の目的

本研究では、従来から用いられてきた静的堅牢な位相マスクではなく、フレキシブルに位相を変えることのできるアダプティブ位相マスクを開発し、地球型系外惑星像を直接かつ明確に検出できるようにすることである。アダプティブ位相マスクを用いることで、観測条件・環境の変化に柔軟に対応できるとともに、時間的変調も可能となり、雑音成分から系外惑星像を分離して検出できるようになる。特に、アダプティブ位相マスクを導入することで地球型惑星の直接検出を狙えるようになるであろう。

本研究で開発する位相マスクは、副鏡やスパイダーの影が開口形状に入り込む実際の望遠鏡での使用に耐えるものとする。このような位相マスクで、太陽系外惑星に第 2 の地球を見つけることができるになれば、天文学的、惑星科学のおよび生物学的意義は極めて大きなものとなるであろう。

3. 研究の方法

アダプティブな位相マスクにおいては、位相分布をどのようにして与えるべきかが重要となる。このために、測定可能な最終像面の強度分布から位相推定を行う。強度分布からの位相推定において有名な方法が Gerchberg & Saxton (1972, Optik **35**, 237) によって提案された (G-S 法)。彼らの方法は、X 線回折像から試料の実像を再生することに応用されてから再び脚光を浴びるようになった (Miao et al, 1999, Nature **400**, 342)。この方法をベースとして位相再生を行い、ナル干渉の機能を位相マスクに与える。

位相マスクの導出においては、通常の中型・大型望遠鏡の開口のように円形開口に副鏡とスパイダーの影が有るものとした。したがって、位相マスクの位相分布は、恒星光 (光軸光) を瞳の透過部分で零となるように逐次型位相回復アルゴリズムを用いて数値的に求めことになる。計算では、 1024×1024 の FFT (高速フーリエ変換) を用い、開口の外径および内径をそれぞれ 64 および 20 ピクセルとした。スパイダー形状は十字型とし、幅を 5 ピクセルとした。ここで、G-S 法を用いると、恒星光を極端に低減できるが、その一方で、惑星光 (非光軸光) も大幅に低減されてしまい、系外惑星撮像に適した位相マスクとはならなかった。

このために、G-S 法の改良型と見なせるハイブリッド・インプットアウトプット (HIO) 法 (Fienup, 1982, Appl. Opt. **21**, 2758) を用いることにした。HIO 法の適用に当たっては、フィードバック定数の取り方によって多義の位相マスクパターンが得られる。いずれにせよ、求められた位相マスクによれば、10 桁以上のコントラスト比が得られる。多義の位相マスクからの選択においては、系外惑星をどの位置 (恒星からの離角) で検出するかが一つのパラメーターとなる。

4. 研究成果

上述の方法で得られた位相マスクの一例を図 1 に示す。ここでの HIO 法による逐次計算において、初期位相分布はオール零で、フィードバック定数を 0.19、反復回数を 10000 回とした。また、開口形状が 4 回対称なので、各イテレーションにおいて 4 回対称制限を課している (制限を課さなくとも同様の解が得られる場合が多い)。図 1 の位相を表すグレイスケールは 0 (黒) から 2 (白) となっている。この位相分布はかなり複雑なパターンであるが、これを望遠鏡の焦点面に置くと、

光軸光（恒星光）に対し瞳像面では図2のようになる。ここでは、ダイナミックレンジを上げるために、強度ではなく振幅の絶対値が示されている。この振幅分布から、恒星光の瞳の透明部分への漏れ光はほとんど無く、瞳の外側や副鏡およびスパイダーの影の内部に押しやられていることが分かる。

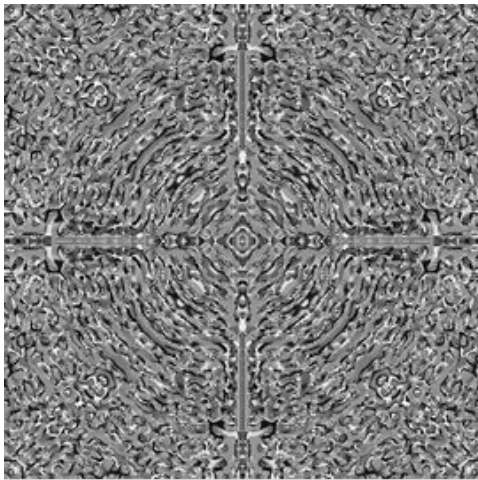


図1 位相マスクの位相分布パターン

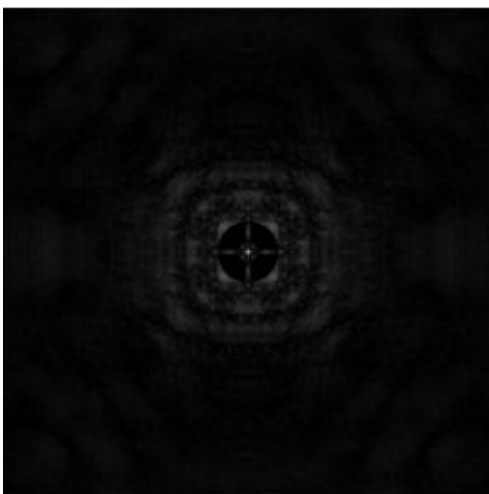


図2 光軸光に対する瞳像の振幅分布

瞳像面に開口形状と同じ絞り（リオストップ）を置くことで、恒星光をほぼ完璧にブロックできることになる。リオストップ透過後の結像面での振幅の絶対値分布は図3のようになる。強度の最大値は、位相マスクが無い場合の最大強度を1とした場合と比べて 2.6×10^{-13} （規格化強度）となっており、恒星光を十分に除去できていることが分かる。この PSF（点拡がり関数）の角度平均プロファイルを図4に示す。横軸は光軸からの角距離を λ/D （波長/口径）単位で表している。縦軸の規格化強度からは、いずれの角距離においても 10^{-14} 以下となっている。特に恒星近傍となる $1/D$ 以内でも極端に減光されている。

一方、非光軸光（惑星光）の透過特性の例

を図5に示す。この例は、系外惑星が恒星から $1/D$ の角距離に方位角45度で存在する場合である。規格化強度の最大値は、0.17である。系外惑星が方位角0度で角距離 $1/D$ に存在する場合の規格化強度は0.14である。このように、角距離 $1/D$ で恒星との強度コントラストが 10^{-10} 程度の系外惑星を検出できる。

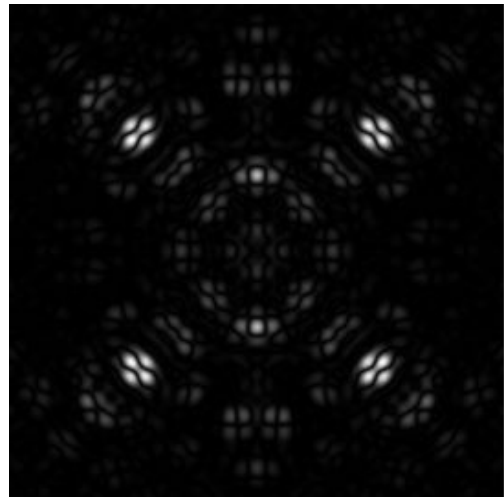


図3 恒星光の結像面振幅分布

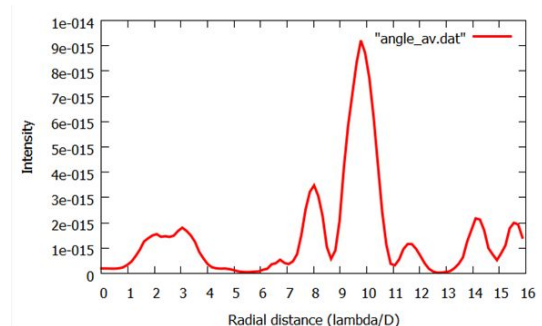


図4 恒星光の角度平均強度分布

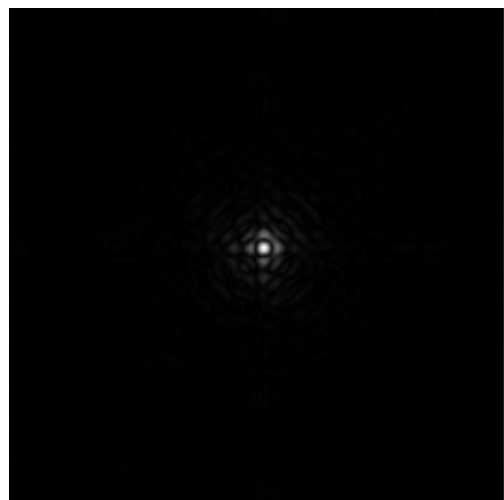


図5 惑星光の結像面振幅分布

図1のような複雑なパターンの位相マスクを如何にして作製するかが問題となるが、液晶にはそのポテンシャルがあると考えられる。液晶素子により、位相マスクを構成すれば電子制御可能となり種々の位相分布パターンを実現できる。前述の通り、強度コントラスト 10^{-10} を達成する位相マスクは一義的ではない。状況に応じて位相分布を変えることのできるアダプティブな位相マスクが望ましいのである。

位相マスクを時間的にもアダプティブにすることで、スペckル雑音と系外惑星像を判別できるようになるであろう。位相マスクの変調により、恒星光と惑星光は結像位置が異なるため、相違したPSF変調となるからである。実用化に向けての更なるチャレンジは液晶素子の広帯域光化である。暗い系外惑星を検出するには広帯域光化は必須となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

N. Baba, N. Murakami, N. Miura, and M. Tamura, "Numerically designed phase-mask for stellar coronagraph," Proc. SPIE **9605**, 96051V1~6 (2015) 査読無.
DOI: 10.1117/12.2186498

F. Oshiyama, N. Murakami, O. Guyon, F. Martinache, N. Baba, T. Matsuo, J. Nishikawa, M. Tamura, "Central-obscuration removal plates for focal-plane phase-mask coronagraphs with a centrally-obscured telescope," Publ. Astron. Soc. Pacific **126**, 270-279 (2014) 査読有.
DOI: 10.1086/675807

N. Murakami, J. Nishikawa, M. Tamura, E. Serabyn, W. Traub, K. Liever, D. Moody, J. Trauger, O. Guyon, F. Martinache, N. Jovanovic, G. Sigh, F. Oshiyama, H. Shoji, M. Sakamoto, S. Hamaguchi, K. Oka, and N. Baba, "Recent progress on phase-mask coronagraphy based on photonic-crystal technology," Proc. SPIE **9143**, 914334-1~8 (2014) 査読無.
DOI: 10.1117/12.2054790

〔学会発表〕(計9件)

村上尚史、西川淳、R. Galicher, P. Baudoz, 小室祐介、赤岩夏海、馬場直志、田村元秀「広帯域極限高コントラスト観測を目指した3層8分割位相マスクの開発」, 日本天文学会2016年春季年会、2016年3月15日、首都大学東京(東京都八王子市)

赤岩夏海、村上尚史、西川淳、田村元秀、馬場直志「瞳再配置光学系による位相マスク

コロナグラフの実証実験」, 日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月9~11日、甲南大学(兵庫県神戸市)

三浦則明、大石明、桑村 進、馬場直志、花岡庸一郎、北井礼三郎、上野悟、仲谷善一、一本潔「太陽補償光学系の開発と補償効果のシミュレーション(2)」, 日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月9~11日、甲南大学(兵庫県神戸市)

馬場直志、村上尚史、三浦則明、田村元秀「ステラコロナグラフ用位相マスクの数値的デザイン」, 日本天文学会2015年春季年会、2015年3月19日、大阪大学(大阪府豊中市)

N. Baba, Y. Nakai, and N. Murakami, "Towards direct imaging of exoplanets," (invited talk), International Conference on Optics and Photonics (ICOP2015), Feb. 21 (2015), Kolkata (India).

6. 研究組織

(1)研究代表者

馬場 直志 (BABA, Naoshi)
北海道大学・名誉教授
研究者番号: 7 0 1 4 3 2 6 1

(2)連携研究者

田村 元秀 (TAMURA, Motohide)
東京大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 0 0 2 6 0 0 1 8

村上 尚史 (MURAKAMI, Naoshi)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 8 0 4 5 0 1 8 8

三浦 則明 (MIURA, Noriaki)
北見工業大学・工学部・教授
研究者番号: 3 0 2 0 9 7 2 0