

## 偏光ナル干渉による系外惑星検出法の研究

### 学位論文内容の要旨

我々の太陽系は、恒星である太陽とその周りを公転する 9 つの惑星などから構成されている。我々の太陽系のような惑星系は、果たして特別な存在かどうか長い間議論されてきた。1995 年、ドップラー法と呼ばれる観測手法を用いて、ペガサス座 51 番星という恒星の周りに惑星(系外惑星)が初めて発見された。恒星の周りを惑星が公転するとき、惑星の重力により恒星が動かされ、僅かではあるが周期的な運動をする。ドップラー法とは、高精度な分光観測によりこの僅かな運動をドップラー効果による恒星スペクトル線の周期的な波長の変化として捉える手法である。この観測から、惑星の軌道周期、軌道離心率、軌道長半径、質量等の情報を得ることができる。このような観測手法を用いることにより、現在まで発見された系外惑星の数は 130 個を超えている。

系外惑星探査の次なる段階は、系外惑星の直接検出である。系外惑星からの光を直接捉えることができれば、そのスペクトルから惑星大気の組成に関する情報が得られ、惑星形成理論にも多大な貢献が期待できる。しかしながら、直接検出のためには幾つかの技術的な課題を克服していかなければならない。中でも最も重要な課題は、微弱な惑星が明るい恒星像の裾野(サイドローブ)に埋もれてしまわないための高コントラストイメージングが実現されなければならないことである。このような課題を克服するために、ナル干渉法と呼ばれる技術が提案されている。ナル干渉法とは、恒星からの光波のみを打ち消し合う干渉を生じさせて微弱な惑星光レベルにまで強度を抑制する手法である。

このような研究背景の中、本研究では系外惑星の直接検出を目的とした独自のナル干渉装置を提案し、その開発研究を行った。

第 1 章では、本研究の背景と本論文の構成について述べる。

第 2 章では、中間赤外領域での系外惑星直接検出装置であるナル干渉計において、幾何学的位相変調器(Geometric Phase Modulator, GPM)の導入を提案した。ナル干渉計とは、複数個の望遠鏡で受けた光波間に適切な位相変調を与えて結合することにより、恒星光のみを打ち消し合う干渉を生じさせる手法である。幾何学的位相とは、偏光状態を循環的に変化させたときに得られる位相である。得られる位相シフト量は、ポアンカレ球上で偏光状態の変化が描く閉曲

面が、球の中心に張る立体角の  $1/2$  に等しい。幾何学的位相の特長として、アクロマティックな任意の位相シフトが簡単な光学系<sup>1</sup>で得られることが挙げられる。このような特長は、ナール干渉計を構築する際の大きな利点となる。本研究では、GPM を用いた単色光でのナール干渉実験を行い、 $8 \times 10^3$  の消光比（打ち消し合う干渉状態と強め合う干渉状態の恒星モデル像のピーク強度比）が得られた。

第3章では、可視・近赤外領域での系外惑星直接検出装置である干渉型ステラコロナグラフに偏光干渉の原理を利用する手法を提案した。干渉型ステラコロナグラフとは、恒星像の中心に位相マスクと呼ばれる位相変調素子を挿入し、恒星光をナール干渉状態にして除去する装置である。アクロマティックな位相変調素子を実現するため、偏光干渉の原理を利用した手法を提案した。これは、互いに直交する直線偏光( $0^\circ, 90^\circ$ )の  $-45^\circ$  成分を干渉させることにより、2光波の電場成分の位相が反転する現象を応用したものである。このような位相マスクを実際に作製し、コロナグラフのプロトタイプ光学系を構築した。性能評価のための検証実験を行った結果、単色および白色光で高い消光性能を達成した。また、性能劣化を引き起こす要因についての考察も行った。

第4章では、検出性能の向上を目指した差分型ステラコロナグラフ装置を提案した。系外惑星からの光は、可視域では恒星からの光による反射散乱光であるため、部分偏光していると考えられる。そこで、コロナグラフ装置を偏光ビームスプリッタによって S・P 偏光の2チャンネルとしてその差分をとる。無偏光である残余恒星光ノイズはキャンセルされ、惑星光の偏光成分のみを抽出することができる。プロトタイプ光学系による性能評価から、恒星モデルに比べ  $10^{-5}$  オーダーもの非常に微弱な惑星光モデルを検出できることが示された。

第5章では、干渉型ステラコロナグラフにおいて Pupil Remapping Mirrors を利用する手法について研究した。干渉型ステラコロナグラフは、望遠鏡の入射瞳が円形開口である場合、理想的には恒星像を完全に除去することができる。しかし既存の望遠鏡では、入射瞳には副鏡やスパイダーの影が映り込んでしまい、性能を著しく劣化させる。これを解決するため、Pupil Remapping Mirrors を用いて、このような入射瞳を円形開口へ変換することを提案した。最適なミラー形状の計算を行い、さらに、補償光学（大気揺らぎによる像劣化を実時間で補正する装置）の性能に対するコロナグラフ性能の見積もりを行った。その結果、将来の高次補償光学が実現されれば、高いコロナグラフ性能を達成できることが示された。

第6章では、本研究の結論として、得られた性能評価のまとめを行った。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 馬 場 直 志  
副 査 教 授 大 場 良 次  
副 査 教 授 山 下 幹 雄

学 位 論 文 題 名

## 偏光ナル干渉による系外惑星検出法の研究

太陽系は、恒星である太陽とその周りを公転する 9 つの惑星などから構成されている。太陽以外の恒星の周りに惑星（系外惑星）が初めて 1995 年に発見されたのは、ドップラー法と呼ばれる観測手法を用いてであった。恒星の周りを惑星が公転するとき、惑星の重力により恒星が動かされ、僅かではあるが周期的な運動をする。ドップラー法とは、高精度な分光観測によりこの僅かな運動に起因する恒星スペクトル線の周期的な波長の変化として捉える手法である。このような観測手法を用いることにより、現在まで発見された系外惑星の数は 130 個を超えている。しかし、これらは系外惑星を直接とらえたのではない。

系外惑星からの光を直接捉えることができれば、そのスペクトルから惑星大気の組成に関する情報が得られなど、惑星形成の真相に迫れる。しかしながら、直接検出のためには幾つかの技術的な課題を克服していかなければならない。中でも最も重要な課題は、微弱な惑星が明るい恒星像のサイドローブに埋もれてしまわないための高コントラストイメージングが実現されなければならないことである。このような課題を克服するために、ナル干渉法と呼ばれる技術が提案されている。ナル干渉法とは、恒星からの光波のみを打ち消し合う干渉を生じさせて微弱な惑星光レベルにまで強度を抑制する手法である。

本研究で、系外惑星の直接検出を目的とした独自のナル干渉装置を提案し、その実証実験を行った。

第 1 章では、本研究の背景と本論文の構成について述べている。

第 2 章では、中間赤外領域での系外惑星直接検出装置であるナル干渉計において、幾何学的位相変調器(geometric phase modulator; GPM)の導入を提案した。ナル干渉計とは、複数個の望遠鏡で受けた光波間に適切な位相変調を与えて結合することにより、恒星光のみを打ち消し合う干渉を生じさせる手法である。幾何学的位相とは、偏光状態を循環的に変化させたときに得られる位相である。幾何学的位相の特長として、波長に依らない任意の位相シフトが簡単な光学系で得られることが挙げられる。このような特長は、ナル干渉計を構築する際の大きな利点となる。本研究で、GPM を用いた単色光でのナル干渉実験を行い、 $8 \times 10^3$  の消光比を得ている。

第 3 章では、可視・近赤外領域での系外惑星直接検出装置である干渉型ステラ

コロナグラフに偏光干渉の原理を利用する手法を提案した。干渉型ステラコロナグラフとは、恒星像の中心に位相マスクと呼ばれる位相変調素子を挿入し、恒星光をナル干渉状態にして除去する装置である。アクロマティックな位相変調素子を実現するため、偏光干渉の原理を利用した手法を提案した。これは、互いに直交する直線偏光( $0^\circ, 90^\circ$ )の $-45^\circ$ 成分を干渉させることにより、2光波の電場成分の位相が反転する現象を利用したものである。このような位相マスクを実際に作製し、コロナグラフのプロトタイプ光学系を構築した。性能評価のための検証実験を行った結果、単色および白色光で高い消光性能を達成した。また、性能劣化を引き起こす要因についての考察も行っている。

第4章では、検出性能の向上を目指した差分型ステラコロナグラフ装置を提案した。系外惑星からの光は、可視域では恒星からの光による反射散乱光であるため、部分偏光していると考えられる。そこで、コロナグラフ装置を偏光ビームスプリッタによってsおよびp偏光の2チャンネルとして、その差分をとる。無偏光である残余恒星光ノイズはキャンセルされ、惑星光の偏光成分のみを抽出することができる。プロトタイプ光学系による性能評価から、恒星モデルに比べ $10^{-5}$ オーダーもの非常に微弱な惑星光モデルを検出できることが示された。

第5章では、干渉型ステラコロナグラフにおいて **pupil remapping mirror** を利用する手法について研究をおこなった。干渉型ステラコロナグラフは、望遠鏡の入射瞳が円形開口である場合、理想的には恒星像を完全に除去することができる。しかし既存の望遠鏡では、入射瞳には副鏡やスパイダーの影が映り込んでしまい、性能を著しく劣化させる。これを解決するため、**pupil remapping mirror** を用いて、このような入射瞳を円形開口へ変換することを提案した。最適なミラー形状の計算を行い、さらに、補償光学の性能に対するコロナグラフ性能の見積もりを行った。その結果、将来の高次補償光学が実現されれば、高いコロナグラフ性能を達成できることが示された。

第6章では、本研究の結論として、得られた性能評価のまとめを行っている。

これを要するに、著者は太陽系外惑星の直接検出のために、偏光ナル干渉に基づいた天体干渉計用および大型望遠鏡用の装置開発を行い、実験および数値シミュレーションにより提案した装置の有効性を示した。本研究によって得た知見は天文光学および応用物理学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。