

学位論文題名

Study on methods of objective spectroscopy for
exoplanet detection with nulling coronagraph

(ナル干渉型コロナグラフによる太陽系外惑星の対物分光法に関する研究)

学位論文内容の要旨

人類のような知的生命体は宇宙において地球上のみに存在するのかという問いに答えるためには、地球のような惑星(第2の地球)を太陽系の外に見出すことが肝要である。しかし、太陽系外惑星を直接検出する装置の開発は、極限的な計測装置となるため容易ではない。我が国および欧米先進国で熾烈な装置開発の競争が行われているが、未だ地球型惑星を直接検出できる装置を実現出来るに至っていない。本研究で、太陽系外惑星の直接検出とその対物分光スペクトルを得る方法を実験的に考察する。太陽系外惑星の分光スペクトル情報は惑星の大気成分を探るために必要であり、第2の地球と見なせるか否かの判定に必須となる。太陽系外惑星の対物分光スペクトルを得る2つの方法を本論文で提案し、実験によって検証する。

本論文は6章から成っている。第1章は、太陽系外惑星検出の歩みについて述べながら本研究の背景と目的を書いている。第2章で、太陽系外惑星の検出法を間接検出法と直接検出法とに大別して解説する。直接検出法においては、本研究に直接係わるナル干渉型(恒星の光を打消し合う干渉状態とし、恒星近傍の暗い惑星を検出できるようにする)コロナグラフの方法を述べる。

第3章で、本研究の実験で使用している4分割偏光マスク型コロナグラフの原理および実験結果を示す。広帯域での分光を可能とするには、ナル干渉型コロナグラフにおいて、アクロマティックな性能が要求される。このために、本研究では偏光干渉によりアクロマティックなナル干渉を実現する。4分割偏光マスクは、強誘電性の液晶で作られており、4つの象限においてそれぞれ半波長板として機能する。これらの半波長板の光軸方向は対角象限で同じである。入射直線偏光は、半波長板の作用として直線偏光方向が回転させられる。隣り合う象限からの出射光の直線偏光方向は互いに 90° ずれるようになっている。これにより、アナライザー透過後に π の位相差が生じることとなり、打消し合う干渉状態となる。理論的には、恒星光は打消し合う干渉により再結像瞳の内側で零となり、リオストップで瞳外側の光を遮断すると恒星光は再結像に関与しなくなる。しかし、実際には光学系の不完全さなどにより、再結像面でスペckル雑音が生じてしまう。この恒星光によるスペckル雑音が微弱な太陽系外惑星像を凌駕し、太陽系外惑星の直接検出を妨害する。地球型惑星の場合、恒星に対する強度比は極端に小さく恒星光のスペckル雑音が圧倒的となる。本章の最後の節で、実験で使用した4分割偏光マスクの消光性能を述べる。

第4章および第5章は、本研究の核心部分である。第4章で、偏光差分による太陽系外惑星の対物スペクトル検出法とその実験結果について記載する。太陽系外惑星からの光は、親星である恒星の反射・散乱光で、一般に部分偏光していると考えられる。一方、恒星光は無偏光(ランダム偏

光) と見なすことができる。したがって、部分偏光している成分のみを抽出できると、太陽系外惑星からの光を検出したことになる。恒星 - 惑星系からの光の直交 2 偏光成分 (p 偏光、s 偏光) を同一の光学系によって観測する。恒星光は無偏光であるため、2つの偏光で同一の像パターンを形成する。ここで、対物分光用の分光素子 (本研究では反射型ブレードホログラフィック回折格子またはプリズムを使用) を導入すると、p 偏光および s 偏光の対物スペクトルが得られる。恒星光に対する対物スペクトルは両偏光で同じになるはずである。一方、太陽系外惑星の対物スペクトルは部分偏光により、p 偏光と s 偏光ではスペクトルに強度差が生じる。したがって、2つの直交する偏光成分の差分をとることで、太陽系外惑星の対物スペクトルを得ることができる。

偏光差分により、恒星光の雑音スペクトルを低減できるが完全に取り除くことはできない。この差分残差が太陽系外惑星の対物スペクトル検出を阻害する。そこで、本研究で、単なる偏光差分ではなく偏光度 (偏光差分をその点での強度で除算) を計算することで、惑星モデルの対物スペクトルを抽出した。ここにおいて、本実験系で入射偏光成分の切り替えに使用している液晶リターダーの分光透過率の補正を行った。これにより、単なる偏光差分からは見出せなかった惑星モデル光のスペクトルを取り出せるようになった。

第 5 章で、スペクトル差分に基づいた太陽系外惑星の対物分光法の考究と実験結果を述べている。偏光差分法は、太陽系外惑星からの光が部分偏光している場合に有効であるが、偏光度は軌道位相角 (地球 - 恒星 - 惑星の角位置関係) や惑星の大気組成に依存し、太陽系外惑星からの光は必ずしも部分偏光している訳ではない。このため、偏光に依らず太陽系外惑星の対物スペクトルを検出する方法を考えた。その原理はスペクトル差分に基づく。太陽系外惑星からの光は、惑星大気の原因により主として吸収線を伴う。恒星光の大部分は恒星の反射・散乱光であるため、そのスペクトルは大局的には恒星スペクトルと同一となるが、惑星大気によるスペクトル線が重畳する。したがって、恒星光と惑星光とのスペクトル差分で、惑星特有のスペクトル線を抽出できることになる。

スペクトル差分を使えるようにするために、同時撮像分光系を構築した。そして撮像データを基に、恒星スペクトルのみから成る対物スペクトルを計算する。このスペクトル合成の計算には電波望遠鏡の像合成に使われているクリーンアルゴリズムを援用した。クリーンアルゴリズムの使用により、シフトバリエーションなナリ干渉型コロナグラフ光学系に適用可能となる。スペクトル合成においては、4分割マスクの各象限を透過した恒星対物スペクトルを各象限に対する参照スペクトルとした。この計算によって作り出されたスペクトルと、実際に検出された対物スペクトルの差分をとると、惑星スペクトルにおいて恒星スペクトルと異なるところが抽出できる。また、恒星スペクトルから差分スペクトルを引くことで惑星スペクトルを再生できることを実験的に示した。

第 6 章で、本研究のまとめを述べている。

本研究で、太陽系外惑星の対物スペクトルを観測する 2つの異なった方法を提案し、実験的にこれらの方法の有効性を示した。太陽系外惑星の対物スペクトル検出は惑星像の直接検出にも役立つこととなり、今後の地球型惑星の直接検出と特性化に大きく寄与すると期待できる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 馬 場 直 志

副 査 教 授 森 田 隆 二

副 査 教 授 折 原 宏

学 位 論 文 題 名

Study on methods of objective spectroscopy for exoplanet detection with nulling coronagraph

(ナル干渉型コロナグラフによる太陽系外惑星の対物分光法に関する研究)

1995年に太陽系外の惑星が間接的手法により発見されて以来、太陽系外惑星を直接検出するために種々の技術開発が為されてきた。そして、2008年秋に太陽系外惑星の直接検出の報告があった。しかし、見つかった惑星は恒星から大きく離れた重い惑星であり、地球型の惑星とは異なる。人類のような知的生命体は宇宙において地球上のみに存在するのかという問いに答えるためには、地球のような惑星(第2の地球)を太陽系の外に見つける必要がある。しかし、地球型惑星を直接検出する装置の開発は、極限的な計測装置となるため容易ではない。本研究では、太陽系外惑星の対物分光スペクトルを得る2つの方法を提案し、実験でこれらの方法の有効性を検証している。

本論文は6章から成っている。第1章では、太陽系外惑星検出の歩みについて述べながら本研究の背景と目的が書かれている。第2章では、太陽系外惑星の検出法を間接検出法と直接検出法とに大別して解説している。直接検出法においては、本研究に直接係わるナル干渉型(恒星の光を打消し合う干渉状態とし、恒星近傍の暗い惑星を検出できるようにする)コロナグラフの方法を詳述している。

第3章では、本研究の実験で使用している4分割偏光マスク型コロナグラフの原理および実験結果が示されている。広帯域での分光を可能とするには、ナル干渉型コロナグラフにおいて、アクロマティックな性能が要求される。このために、本研究では偏光干渉によりアクロマティックなナル干渉を実現している。理論的には、恒星光は打消し合う干渉により再結像瞳の内側で零となり、リオストップで瞳外側の光を遮断すると恒星光は再結像に関与しなくなる。しかし、実際には光学系の不完全さなどにより、再結像面でスペckル雑音が生じてしまう。この恒星光によるスペckル雑音が微弱な太陽系外惑星像を凌駕し、太陽系外惑星の直接検出を妨害する。

第4章および第5章が、本研究の核心部分である。第4章では、偏光差分による太陽系外惑星の対物スペクトル検出法とその実験結果について書いてある。太陽系外惑星からの光は、親星である恒星の反射・散乱光で、一般に部分偏光していると考えられる。一方、恒星光は無偏光(ランダム偏光)と見なすことができる。したがって、部分偏光している成分のみを抽出できると、太陽系外惑星からの光を検出したことになる。恒星-惑星系からの光の直交2偏光成分(p偏光、s偏光)を同一の光学系によって観測するようにしてある。

偏光差分により、恒星光の雑音スペクトルを低減できるが完全に取り除くことはできない。この差分残差が太陽系外惑星の対物スペクトル検出を阻害する。そこで、本研究では、単なる偏光差分ではなく偏光度(偏光差分をその点での強度で除算)を計算することで、惑星モデルの対物スペクトルを抽出している。これにより、単なる偏光差分からは見出せなかった惑星モデル光のスペクトルを取り出せるようになっている。

第5章ではスペクトル差分に基づいた太陽系外惑星の対物分光法の考究と実験結果が述べられている。偏光差分法は、太陽系外惑星からの光が部分偏光している場合に有効であるが、太陽系外惑星からの光は必ずしも部分偏光している訳ではない。このため、偏光に依らず太陽系外惑星の対物スペクトルを検出する方法を考えている。その原理はスペクトル差分に基づいている。太陽系外惑星からの光は、惑星大気原子・分子により主として吸収線を伴う。惑星光の大部分は恒星の反射・散乱光であるため、そのスペクトルは大局的には恒星スペクトルと同一となるが、惑星大気によるスペクトル線が重畳する。したがって、恒星光と惑星光とのスペクトル差分で、惑星特有のスペクトル線を抽出できることになる。

スペクトル差分を使えるようにするために、同時撮像分光系を構築している。そして撮像データを基に、恒星スペクトルのみから成る対物スペクトルを計算している。このスペクトル合成の計算には、電波望遠鏡の像合成に使われているクリーンアルゴリズムを援用している。計算によって作り出されたスペクトルと実際に検出された対物スペクトルの差分をとることで、惑星スペクトルにおいて恒星スペクトルと異なるところが抽出できるようになっている。

第6章で、本研究のまとめを記載してある。

これを要するに、著者は、太陽系外惑星の対物スペクトルを観測する2つの異なった方法を提案し、実験的にこれらの方法の有効性を示した。太陽系外惑星の対物スペクトル検出法の開発は惑星の特性を調べる上で必須であるとともに、極限的な光計測技術の開発という点からも、応用光学ならびに応用物理学に貢献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。