

論文審査の結果の要旨

氏名：大 矢 正 人

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名：系外惑星直接観測のための高精度補償光学

審査委員：（主査） 教授 藤 井 紫麻見

（副査） 教授 岩 本 弘 一

自然科学研究機構国立天文台助教 西 川 淳

地球のような生命を持つ惑星が宇宙に普遍的に存在するのか、それとも非常にまれな存在であるのかという疑問は、人類にとって大変興味深い。この疑問に答えるために、太陽系外の惑星探査は 20 世紀中頃から行われてきたが、惑星はその公転中心にある恒星（主星）に比べて大変暗いため、観測が困難であった。1990 年代から、主星の詳しい観測により惑星の存在が示唆されるようになった。例えば大型の惑星が主星に近い軌道を公転していれば、主星の周期的な運動が観測できる。これを利用して 1995 年、ペガサス座 51 番星に初めて太陽系外惑星が発見された。また 2009 年 3 月に打ち上げられた観測衛星ケプラーでは、惑星が主星の前面を通過する際に減光する現象を観測して、千個を超える太陽系外惑星を発見した。これらの観測は間接的に惑星の存在を示唆するもので、質量や軌道、公転周期などはわかるが、惑星からの光を直接観測することはできず、その温度や生命活動の証拠を含む化学組成などの情報は得られない。

そこで、コロナグラフという太陽の光球を隠して周囲のコロナを観測する装置を恒星に適用して、主星の光を減光して惑星の光を直接観測する手法がとられるようになった。この方法により、主星から遠く離れた巨大なガス惑星が 2008 年からこれまでに約 40 個発見されている。しかし、主星から離れて温度が低いガス惑星では生命の存在可能性は低い。生命が存在するには水が液体として存在することが必要と考えられ、そのような温度となる主星からの距離の範囲はハビタブルゾーンと呼ばれている。生命探査のためには、ハビタブルゾーンにある地球型惑星を直接観測することが必要とされている。

太陽系を遠くから見た時、地球の光度は太陽光度の約 10 億分の 1 であり、これを 9 桁のコントラストとも記述する。地球型の系外惑星を直接観測するためには、このコントラスト比を克服しなければならない。また、直接観測のターゲットとなる恒星の典型的な距離として、しばしば 10 パーセク（年周視差が 0.1 秒角となる距離で、32.6 光年）が用いられる。太陽系をこの距離から見た時、地球は太陽から角距離で 0.1 秒角離れた位置に見える。口径 2m の望遠鏡を用いて可視光で観測する時、波長(λ) / 口径(D) で決まる角度分解能(λ/D) はおよそ 0.05 秒角であり、主星の至近距離に惑星が写ることになる。このように、主星に近い場所で高いコントラストを得るためには、大気揺らぎのない宇宙空間にある望遠鏡を用いることを前提とし、主星の光を消去するコロナグラフに加えて、光学系の波面誤差によって発生するスペックル（斑点状）ノイズを低減するために、超高精度の補償光学が必要である。9 桁のコントラストを得るためには、波長の 1/10000 rms の波面精度が必要とされている。

補償光学とは、もともと地上望遠鏡で大気揺らぎを補正するために考案された光学的技術である。望遠鏡の焦点後方のリレー光学系において、望遠鏡の入射瞳と共役な場所に設置した変形可能な鏡（可変形鏡）に光を反射させる。入射した光は大気の揺らぎにより波面が乱れているが、その乱れを波面センサーにより測定して、これをちょうど補正するように鏡を変形すれば、乱れない波面が射出する。その結果、最終焦点像面では斑点状だったものが中心に集中し、高解像度の画像が得られるとともに、恒星周辺に分布していた光も低減される。地上では口径 8m クラスの望遠鏡が使えるため角度分解能的には有利だが、大気揺らぎが早いため、波面制御補正精度は波長の 1/100 rms のレベルであり、現在の望遠鏡で達成できるコントラストは約 6 桁である。

地球型系外惑星の直接観測を狙う宇宙望遠鏡においては、大気揺らぎはなく、時間変化のない光学系の波面誤差が補正の対象である。しかし、目標精度が波長の 1/10000 rms と非常に高いため、本光路と別の光路に設置する通常の波面センサーは、光路間の差異のため用いることはできず、焦点面検出器で測定するスペックル強度に基づいて可変形鏡を制御し波面補正を行う方法が開発されてきた。

像面と瞳面はフーリエ変換の関係にあり、スペックルノイズを低減できる像面の範囲は、瞳面に設置した可変形鏡のアクチュエーター数で決まるナイキスト周波数より中心側に制限されるため、波面制御の結果得られる高コントラストの領域は暗い穴（ダークホール）のように見える。そのため、上記のような制御法はダークホール法と呼ばれている。光学モデルを必要としない従来のダークホール法には、スペックル・ナリング(SN)法があるが、ダークホールを生成するために多数回の制御が必要であり、課題となっていた。本論文は、新たに考案したダークホール法である、スペックル・エリア・ナリング(SAN)法について原理を述べ、少数回の制御で高いコントラストのダークホールが生成できることを、光学実験によって示している。また、他の方法にも応用できる制御領域の取り方である、グラデュアル・エリア・リダクション(GAR)法についても、シミュレーションおよび光学実験によって有効性を示している。そして、光学実験におけるコントラストが制限されたことについて、推定される要因と解決方法をシミュレーションにより示している。

本論文の内容は以下のとおりである。

まず、系外惑星探査の歴史、現状、などの研究背景を記述し、続いて、SAN法の原理を定式化して述べている。波数の違う多数のサイン波またはコサイン波を重ね合わせた波面を可変形鏡によって発生させることで、焦点面の制御領域全体の電場を面積的に変調し、変調時と非変調時の強度から解を求め、制御領域全体のスペックルノイズを除去する、新しいアルゴリズムとなっている。また、SN法の解の求め方では近似が使われていたが、本論文では近似を使わない厳密解が求められている。

次に、上記の原理に基づいて、SAN法の数値シミュレーションを行い、SN法と比較している。可変形鏡と渦位相マスクコロナグラフおよび焦点面検出器を想定し、初期波面誤差を与え、SAN法に沿った操作をした結果の制御領域内の平均強度を評価している。その結果、SAN法はSN法に比べて収束までの制御回数が約1/2と少なく、最終コントラストも約1桁良い、有効な方法であることが示されている。

その次は、SAN法およびGAR法の光学実験について述べている。レーザー光源、可変形鏡、渦位相マスクコロナグラフ、焦点面検出器などから成る実験光学系が用いられている。焦点面のあるエリアで評価したとき、SAN法による制御でコントラストが1桁以上改善し、動作が確認されている。また、別に発案した制御回数ごとに制御領域を狭めていくGAR法を適用することにより、さらなる減光を確認している。

さらに、本研究の実験で十分なコントラストが得られなかった要因として初期波面誤差と可変形鏡の素子数を挙げ、NASAの保有する可変形鏡程度の小さい波面誤差と十分な素子数がある場合の効果をシミュレーションし、十分な素子数の可変形鏡であれば、10回程度のSAN法による制御で9桁を超えるまでにスペックル強度が低減され、地球型惑星の検出が可能になることを示している。また、今後の可能性として、開口形状やコロナグラフの種類を変えた場合のSAN法の特性を調べることにより、NASAのミッションへの有効な活用法を探ること、すばる望遠鏡などの地上望遠鏡では、変動しない回折パターンの除去への適用が可能であること、GAR法はどのような望遠鏡・コロナグラフでも広く適用可能であることを述べている。

これらの結果は国際会議でも発表され、今後は海外の研究機関とも共同で開発を行い、系外惑星探査にグローバルに貢献していくことが期待される。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士(理学)の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成27年9月10日