

論文の内容の要旨

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

1 はじめに

太陽系外惑星（以下、系外惑星と記す）は、1995年に恒星のペガサス座 51 番星の視線速度に周期的変化があることで初めて発見された。視線速度または惑星の恒星前面通過による減光のように、恒星の光の変化から惑星の存在を確認する間接観測によって、現在までに 1800 個以上の系外惑星が確認されている。一方、恒星の光を除去し、惑星光を撮像・分光する直接観測は、2008 年に最初の検出に成功し、現在までに約 40 個の惑星が観測されている。直接観測の重要性は、間接観測では得にくい惑星のカラーや光度、スペクトルなどが得られ、温度や大気組成という重要な物理パラメータが得られるところにある。系外惑星探査の目標は生命存在の普遍性の調査であり、地球型惑星の直接観測による惑星大気の実験を行うことが必要とされている。しかし、現在までに直接観測による地球型惑星の観測はなされていない。地球型惑星の直接観測で困難な点は、惑星が恒星から望遠鏡の回折限界分解能の数倍という近い場所にあり、可視光では恒星に比べ約 9 桁も暗いことである。そのような高いコントラストの天体を観測するには、恒星の回折光を減光させるコロナグラフと、光学素子の波面誤差によって発生する焦点面のスペckルノイズを抑える補償光学の両方の光学系を用いることが必須である。ハッブル宇宙望遠鏡には補償光学は搭載されておらず、現在までの直接観測は、補償光学を搭載した地上の大型望遠鏡によってほぼ成されており、達成されているコントラストは約 6 桁である。9 桁のコントラストを達成するには、 $\lambda/10000$ rms (λ は、観測波長) 精度の波面制御が要求されるため、これらの光学系は大気揺らぎの無い宇宙空間の望遠鏡に搭載する必要がある。それは、2026 年頃打ち上げの NASA/WFIRST 計画が最初となる予定であり、高コントラスト光学系と手法の開発は近年世界各地で盛んに行われている。本研究は、焦点面波面センシングを用いた高精度な補償光学であるダークホール制御についてのものである。新たに開発したダークホール制御法の 1 つである Speckle Area Nulling (SAN) 法については、原理をまとめるとともに、数値シミュレーションと光学実験によってその有効性を確認し、SAN 法における制御領域の取り方を工夫した Gradual Area Reduction (GAR) 法によるコントラストの増強効果については、光学実験によってその有効性を示し、また、現在の光学実験におけるコントラストの制限要因と改善策をシミュレーションにより示したものである。

2 ダークホール制御

ダークホール制御は、望遠鏡開口と共役な瞳面に設置した可変形鏡と焦点面の検出器を用いて制御を行う方法である。焦点面の制御領域内に残留するスペckル電場に対してその逆の電場が発生するように可変形鏡を制御し、スペckル電場を除去する。従来法のダークホール制御の 1 つには、Speckle Nulling (SN) 法がある。SN 法は、焦点面のスペckルの 1 つずつを明るいスペckルから順番に低減していく方法である。焦点面と瞳面はフーリエ変換の関係にあるため、瞳面に周期的な電場を与えると、焦点面では中心対称な 2 箇所電場が発生する。それらは、その望遠鏡で点光源を観測した時の応答である Point Spread Function (PSF) の分布をもち、その幅がおおよそ λ/D である（ここで D は開口径で、 λ/D はその望遠鏡の回折限界の角度分解能となる）。スペckルの 1 つずつに対して、逆の電場を持つ PSF を発生させることでスペckルを除去できる。複数個の離れた PSF を発生させることで複数個のスペckルを同時に除去可能であるが、制御点の間隔を狭めていき、約 $2\lambda/D$ より近づくと互いの影響で制御が発散する危険が出るため、面積的に一括して制御できる方法ではなく、収束が遅いという課題があった。

そこで、焦点面の広い領域を面積的に一括して制御でき、収束の速い方法である SAN 法を、新たに開発した。焦点面の制御領域内の全ての隣り合ったピクセルに対して PSF を発生させると、PSF の間隔は $0.5\lambda/D$ より狭くかなりオーバーラップした状態になるが、その方が制御は発散しないことを見出したものである。制御領域内の全ピクセルに PSF を発生させるために必要な可変形鏡の制御電圧はサイン波またはコサイン波の重ね合わせとなる。これらによって発生するオーバーラップした PSF の合計が、各ピクセルに加わる変調電場となる。スペckル電場を E_0 とし、サイン波またはコサイン波による変調後のスペckル電

場を $E_0 + \Delta E_1$, $E_0 + \Delta E_2$ とする。±サインおよび±コサインに変調時と無変調時の強度 (I_1^+ , I_1^- , I_2^+ , I_2^- , I_0) の方程式を解いて、変調電場とスペckル電場の比を求めれば、可変形鏡に与えるべき電圧が判明する。SN 法では、 $\Delta E_1 \approx \Delta E_2$ と近似して解を導出していたが、SAN 法では近似せずに厳密解を得た。その表式は、以下のとおりである。

$$E_0 = \frac{I_1^+ - I_1^-}{2(I_1^+ + I_1^- - 2I_0)} \Delta E_1 + \frac{I_2^+ - I_2^-}{2(I_2^+ + I_2^- - 2I_0)} \Delta E_2 \quad (1)$$

3 Speckle Area Nulling 法の数値シミュレーション

SAN 法を、その原理に基づいてシミュレーションし、その動作を確認するとともに、従来の SN 法との比較によって本法の優位性を示した。512×512 ピクセルのアレイを用意し、望遠鏡開口は直径 128 ピクセル、コロナグラフの焦点面には電場の位相を $0-4\pi$ まで滑らかに変調させる渦位相マスクを設置、再結像された瞳の絞りは直径 120 ピクセル、可変形鏡の 1 素子は 6 ピクセル四方 (絞りの直径の内側に 20 素子)、とした。焦点面スケールは、 $1\lambda/D$ が 4.3 ピクセルとなる。制御領域は、光軸中心から横が $0.93\sim 5.2\lambda/D$ 、縦 $\pm 5.1\lambda/D$ の四角形の領域などとして、シミュレーションを行った。評価方法は、コロナグラフマスクを通さない恒星像の強度の最大値と制御領域内のスペckルの平均強度とのコントラストで表す。初期の波面誤差は、位相誤差 $\lambda/40\text{rms}$ 、振幅誤差 3% とした。制御領域に依存するが、初期コントラストは 10^{-5} のオーダーである。10 回の制御で、SN 法では約 1 桁、SAN 法では約 2 桁低減した。SN 法では、約 35 回の制御でコントラストは収束するが、SAN 法では、約 20 回の制御で収束する。SAN 法は SN 法に比べて収束までの制御回数が約半分で、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た。

4. Speckle Area Nulling 法の実証実験

SAN 法の動作を確認するために実証実験を行った。実験では、波長 671nm の DPSS レーザーを光源とし、望遠鏡開口を模擬した 3.5mm の絞りを開口瞳とした。瞳を再結像した場所に、140 素子 (12×12) の可変形鏡を設置した。その後、コロナグラフを渦位相マスクコロナグラフとし、直径 3.0mm の絞りで瞳の外周に集中した光を除去する。可変形鏡の 1 素子は 0.3mm 四方で、絞りの直径の内側に 10 素子入るように設計した。焦点面スケールは、 $1\lambda/D$ は 3.2 ピクセルである。制御エリアは、焦点面の光軸中心から $0.62\sim 5.0\lambda/D$ の半月状のエリアで、初期コントラストは 5.3×10^{-6} である。SAN 法による 16 回の制御によって 3.6×10^{-7} まで 0.068 倍に低減し、動作が確認された。

更なるスペckル低減の方法として、制御回数ごとに制御領域を狭めていく Gradual Area Reduction (GAR) 法を提案し適用した。焦点面の光軸中心から $2.2\sim 3.4\lambda/D$ の半月状のエリアで評価すると、GAR 法の追加によって、 3.6×10^{-7} から 1.5×10^{-7} まで 0.40 倍低減した。この領域での初期コントラストは、 3.5×10^{-6} なので、トータルで 0.042 倍になっている。

以上のように、光学実験によっても、SAN 法の動作を実証した。また、GAR 法の追加で制御領域は狭まるがコントラスト向上が可能であることを実証した。

5. 今後の展望

本研究の実験で 9 桁のコントラストに到達しなかったのは、初期波面誤差と可変形鏡の素子数に大きな要因があると考えられる。今回用いたものより 10 倍良い表面精度を持つ可変形鏡を用いれば、初期コントラストが 2 桁改善する。また、可変形鏡の素子数を増やすと、制御領域が広がり、制御領域の境界付近の明るいスペckルの漏れ込みによる影響が改善するため、ダークホール内のコントラストが上がることも分かってきた。可変形鏡の素子数が 60×60 で、初期波面位相誤差が $\lambda/600\text{rms}$ 、振幅誤差が 0.1% としてシミュレーションすると、光軸中心から $1.9\sim 7.0\lambda/D$ の四角形の評価領域で、初期のコントラストが 1.3×10^{-8} に対して 10 回の制御で 5.8×10^{-10} までスペckル強度が低減される。これは、地球型惑星検出可能なコントラストである。NASA Jet Propulsion Laboratory にある可変形鏡は上記のような条件を満たすものであり、SAN 法を適用した実験の可能性を議論しているところである。

本研究では円形開口と渦位相マスクコロナグラフを主に用いたが、副鏡による遮蔽がある望遠鏡開口や、他の種類のコロナグラフを用いた場合の Speckle Area Nulling 法の特長も調べ、それによって将来の NASA/WFIRST や TPC-C などさまざまなミッションでの有効な活用法を探ることが必要である。すばる望遠鏡

などの地上望遠鏡への適用も可能で、主鏡や副鏡などの光学系がもつ初期の大きな波面誤差や、副鏡や副鏡支持構造によって発生する、変動しない回折パターンの除去に有効と考えられる。また、Gradual Area Reduction 法は、望遠鏡、コロナグラフ、ダークホール法、などに依存せず、広く適用可能であり、多くの場面に適用されることが期待できる。