

O-4

系外惑星直接観測のための高コントラスト光学系の開発

Development of A High Contrast Optical System for Direct Detection of Exoplanets

○堀江正明¹, 藤井紫麻見², 西川淳³, 大矢正人⁴

Abstract: 太陽系外の地球型惑星を直接観測するためには, 惑星より 9~10 桁も明るい恒星からの光を強力に除去しなければならない. このような観測を可能にするためには, 高精度な波面補償光学と, 恒星の散乱光を減光するコロナグラフシステムが必要不可欠である. 我々は, 高度な波面補正法 (UNI-PAC 法) を用いたコロナグラフシステムの開発と, それを宇宙望遠鏡へ搭載するための改良を行っている.

1. はじめに

この研究の目的は系外惑星の直接観測である. 直接観測が可能になれば, 惑星の大気成分などを特定することができ, より多くの惑星情報を得ることができる. しかし, 惑星は恒星に対して約 10 桁も暗いため, 惑星は恒星の散乱光に埋もれてしまい, 直接観測が困難となる. そこで我々は, 非対称ナル干渉計^[1](unbalanced nulling interferometer, 以下 UNI) と位相振幅補償光学 (adaptive optics for phase and amplitude correction, 以下 PAC) を用いて高精度に波面誤差を補正することにより, 恒星の散乱光を惑星光よりも低くし, 惑星を直接観測できる高コントラスト光学システムを提案し(図 1), 研究, 開発を行っている.

UNI では, 望遠鏡からの入射光を 2 つに分離し, 振幅を非対称にして逆位相で干渉させる. これにより, 波面誤差が相対的に拡大され, その後の PAC で波面を高精度に補正することが可能となる.

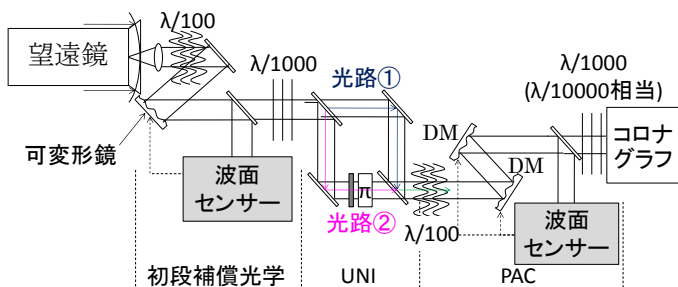


図1 UNI-PAC を使用したコロナグラフシステム

2. UNI 部の鏡面誤差

UNI において 2 つに分離された光は異なる鏡で反射

され再度重なるため, 異なる鏡面誤差を含んでしまい, UNI を通過すると波面精度が下がってしまう可能性がある. 私の研究では, この鏡面誤差を除去するための光学系と, そこに用いる補償光学の制御プログラムの開発を行っている.

3. 鏡面誤差の補正方法

鏡面誤差の問題を解決するために, PAC 部の波面センサーの誤差データを初段補償光学の波面センサーに送り, 初段補償光学の可変形鏡 (deformable mirror, 以下 DM) で波面誤差と鏡面誤差を同時に補正する.

ここでは, 光波を複素電場振幅

$$E(x, y) = E^0(1 + \alpha(x, y))e^{i\theta(x, y)}$$

として考える. E^0 は収差のない一定振幅, $\alpha(x, y)$ は振幅誤差, $\theta(x, y)$ は位相誤差を表す. 補正手順は, 以下のようになる.

1. UNI 部の 2 つの DM をフラットな状態にする
2. 光路①のみの誤差を検出
3. 光路②のみの誤差を検出
4. 光路①と②が干渉した時にそれぞれの誤差を打ち消すように初段補償光学の DM を制御

4. 実験

実験系は, 光源部, 初段補償光学, UNI で構成されている(図 2).

1 : 日大理工・院 (後)・物理、2 : 日大理工・教員・物理、3 : 国立天文台・光赤外研究部、4 : 日大理工・院 (前)・物理

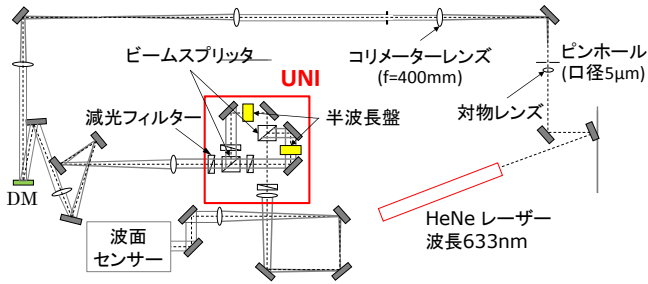


図2 鏡面誤差除去を検証するための実験系

まず、半導体レーザー(波長 $\lambda = 671\text{nm}$)からの光を対物レンズで集光し、ピンホール($5\mu\text{m}$)を通し、ピンホールからの拡散光をコリメーターレンズ(焦点距離 $f=400\text{mm}$)でコリメートすることで、恒星からの光をシミュレートした。その光を用い、鏡面誤差補正プログラムを組み込んだ初段補償光学のDMにより、UNI部を通過するまでに発生する鏡面誤差の除去実験を行った。図3、4は、その結果である。

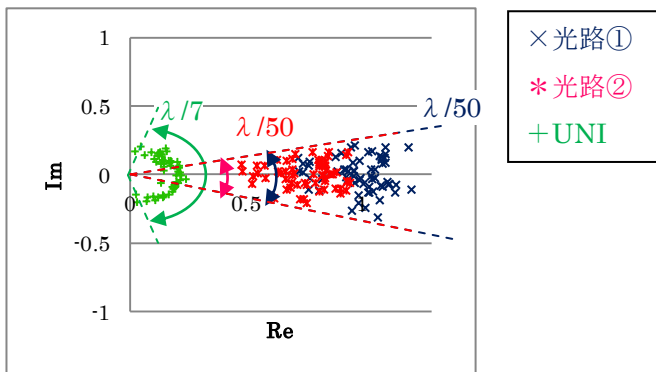


図3 補正値を用いない場合の波面の複素振幅誤差

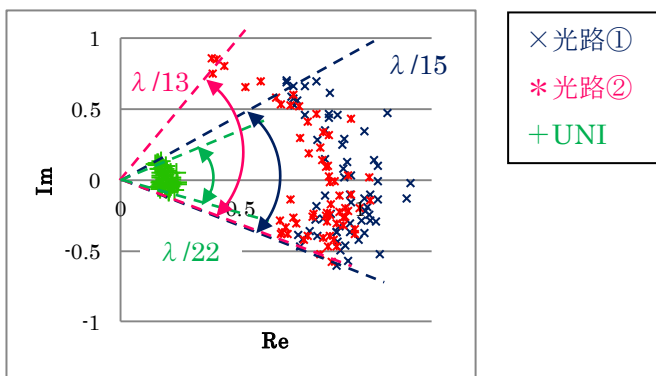


図4 補正値を用いた場合の波面の複素振幅誤差

5. 考察

補正値がない場合(図3), 光路①, 光路②, UNIの波面

誤差は、それぞれ $\lambda/50\text{rms}$, $\lambda/50\text{rms}$, $\lambda/7\text{rms}$ であった。一方、補正値を加えると(図4), その影響で、光路①, 光路②の波面誤差は増加し、それぞれ $\lambda/15\text{rms}$, $\lambda/13\text{rms}$ となるが、その2光波が干渉すると波面誤差が $\lambda/22\text{rms}$ に補正され、補正値がない場合と比較して精度が2.8倍ほど向上することが確認できた。これにより、後の光学系(PAC, コロナグラフ)での、これまで以上の波面補正精度が期待できる。

6. 今後の課題

現時点のUNI-PAC コロナグラフシステムは非常に大きく、宇宙望遠鏡への搭載が困難である。そのため、システム全体をより小型にする必要がある。そこで現在、天体像の結像面に天体像を4つの領域に分割し、(0, π , π , 0)の位相シフトを与えるマスク(4分割位相マスク^{[2][3]})によりナル干渉を起こす、新たなUNI部を開発する予定である。この手法を用いれば、今までのUNIのように光路を2つに分ける必要がなく、コロナグラフの大幅な小型化が期待できる。

今後は、光路分割型UNIと4分割型UNIの性能を比較しながら、より実用的なコロナグラフシステムの開発を進めていく。

7. 参考文献

- [1] J.Nishikawa, L.Abe, N.Murakami, and T.Kotani, "Precise wavefront correction with an unbalanced nulling Interferometer for exo-planet imaging coronagraphs", *Astronomy & Astrophysics* 489, pp1389-1398, 2008
- [2] D. Rouan, P. Riaud, A. Boccaletti, Y. Clénet, A. Labeyrie: "The Four-Quadrant Phase-Mask Coronagraph. I. Principle", *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 112, No.777, pp1479-1486, 2000
- [3] P. Riaud, A. Boccaletti, D. Rouan, F. Lemarquis, A. Labeyrie: "The Four-Quadrant Phase-Mask Coronagraph. II. Simulations", *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 113, No.787, pp1145-1154, 2001