

## 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<sup>1,2</sup>, 大矢正人<sup>1,2</sup>, 西川淳<sup>2</sup>, 田村元秀<sup>2</sup>, 藤井紫麻見<sup>3</sup>

\*Masaaki Horie<sup>1,2</sup>, Masahito Oya<sup>1,2</sup>, Jun Nishikawa<sup>2</sup>, Motohide Tamura<sup>2</sup>, Shiomi Fujii<sup>3</sup>

Abstract: In an unbalanced nulling interferometer (UNI) of our coronagraph system, the incidence light is divided into two, and they interfere by a reverse phase with different amplitude. Thereby, phase errors are magnified and we can correct a wavefront with higher precision. But phase errors of the incident wave will be magnified together with the wavefront errors inside UNI. Now, I am developing a control algorithm of the adaptive optics which removes the wavefront errors inside the interferometer by operating the phase of the light to a suitable value before dividing. In a simulation, wavefront accuracy improved by about 3 times with this technique, and also a comparable effect was acquired experimentally.

### 1. はじめに

我々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、太陽系のような惑星は恒星に対して約 10 桁も暗いため、惑星は恒星の回折光と波面誤差による散乱光に埋もれてしまい、通常は直接観測が困難となる。我々は、非対称ナル干渉計(unbalanced nulling interferometer, 以下 UNI)<sup>[1],[2],[3]</sup>と位相振幅補償光学(adaptive optics for phase and amplitude correction, 以下 PAC)<sup>[1],[3]</sup>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。

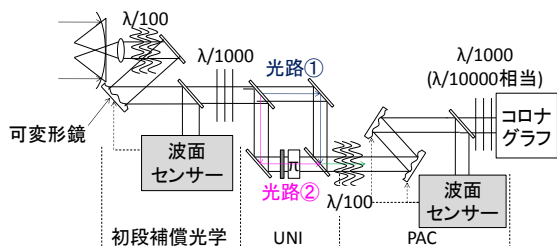


図1 UNI-PAC を使用したコロナグラフシステム

### 2. UNI 内部の波面誤差

UNI では、望遠鏡からの入射光を 2 つに分離し、振幅に差をつけて逆位相で干渉させる。これにより、位相誤差が拡大され、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。しかし、UNI において 2 つに分離された光は異なる鏡で反射されるなど、異なる波面誤差を含んでから再度重なるため、入射波に干渉計内部の波面誤差も加算されてから拡大されてしまう(図 2)。

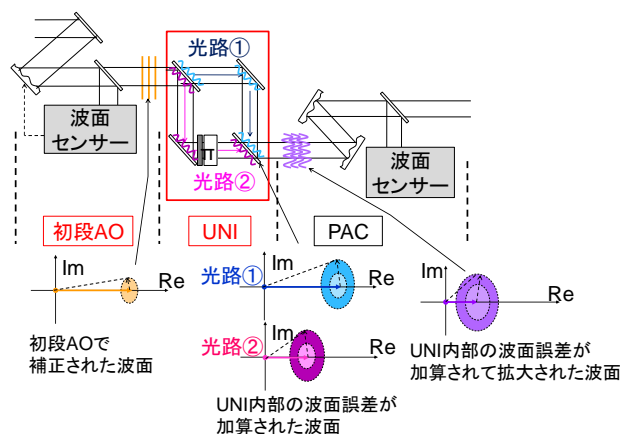


図 2 UNI 内部の波面誤差

### 3. 補正方法

図 3 のように、Arm1 と Arm2 の波面誤差を PAC 部の波面センサーで計測し、そのデータを元に補正値を算出する。

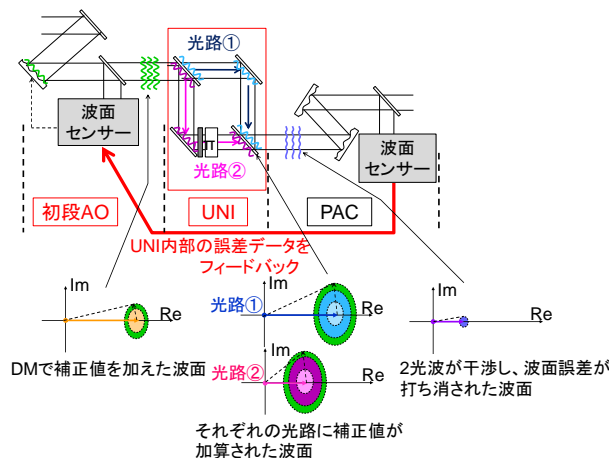


図 3 UNI 内部の波面誤差の補正方法

1 : 日大理工・院・物理 2 : 国立天文台・光赤外研究部 3 : 日大理工・教員・物理

その補正值を初段補償光学の DM に送り，分離される前の光の位相を適切な値に操作し，それらが分離のち再干渉する際に同じ波面形状となって UNI 内部の波面誤差を除去する。

#### 4. 実験

DM の制御プログラム上で波面の位相を算出<sup>[4]</sup>している箇所に補正值を加え，Arm1 と Arm2 の光波が干渉した際に，UNI 内部の波面誤差が除去されるように DM を制御した。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ている。

補正值がない場合，Arm1, Arm2, 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，補正值を加えると Arm1, Arm2 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，補正值がない場合と比較して精度が約 3 倍向上することが確認でき，UNI 内部の波面誤差を含む波面が補正されることが確認できた(図 4)。

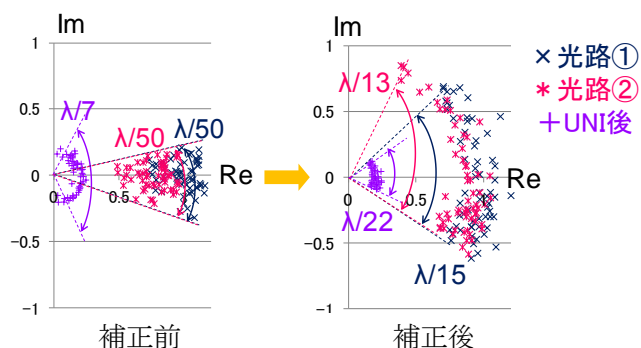


図 4 補正值による波面の変化

#### 5. 結果と考察

UNI 内部の波面誤差を除去するための補正值を算出し，補正シミュレーションを行った。その結果，波面精度が約 3 倍向上することが確認でき，実験でも同程度の効果を得た。また，分離された 2 光波の虚軸成分を揃えることにより，位相誤差がさらに約 4 倍補正されることが新たなシミュレーションによって確認でき(図 5)，実験での検証も進めている。

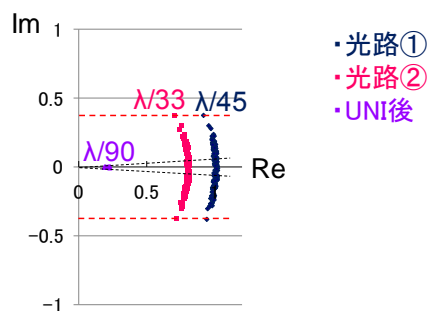


図 5 2 光波の波面誤差の虚数部を合わせた場合

これらの実験で，初段補償光学により UNI 部の鏡面誤差を補正できることが確認できた。今後は，非対称ナル干渉計における波面誤差の拡大率を高く設定して波面補正精度を高め，コロナグラフシステム全体の実験において，より高いコントラストを狙う。また将来的には，4 分割位相マスク<sup>[5]</sup>による非対称ナル干渉計へも対応する。

#### 6. 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, 1389-1398 (2008).
- [2] Naoshi Murakami, Kaito Yokochi, Jun Nishikawa, Motohide Tamura, Takashi Kurokawa, Mitsuo Takeda, and Naoshi Baba “Polarization interferometric nulling coronagraph for high-contrast imaging”, *APPLIED OPTICS*, Vol. 49, No. 16, D106-D114 (2010).
- [3] Kaito Yokochi, Naoshi Murakami, Jun Nishikawa, Lyu Abe, Motohide Tamura, Alexander V. Tavrov, Mitsuo Takeda, and Takashi Kurokawa, “Speckle level suppression using an unbalanced nulling interferometer in a high-contrast imaging system”, *OPTICS EXPRESS*, Vol. 19, No. 6, 4957-4969 (2011).
- [4] W. H. Southwell, “Wave-front estimation from wave-front slope measurements”, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 70, No. 8, 998-1006 (1980).
- [5] Naoshi Baba, Naoshi Murakami, Tsuyoshi Ishigaki, and Nobuyuki Hashimoto, “Polarization interferometric stellar coronagraph”, *OPTICS LETTERS*, Vol. 27, No. 16, 1373-1375 (2002).