

UNI-PAC 法を使用したコロナグラフシステムについて

日本大学 理工学研究科 物理学専攻
宇宙物理学研究室 博士前期課程 1 年 深瀬雅央

1. 系外惑星探査

系外惑星探査を行なうことは人類の起源に迫ることである。我々が住む地球とそれを含む太陽系の起源や、生命の誕生などは系外惑星を通して解明することができる。

系外惑星の探査方法は大きく分けて間接観測と直接観測の二つに分けられる。間接観測には代表的なものに視線速度法、減光観測法があり、視線速度法は惑星の公転による主星の揺らぎを観測する手法である。公転している惑星の重力相互作用により、主星は揺らぎ、この時、主星から発せられた光はドップラー効果により波長が変化する。この波長の変化を観測することにより、揺らぎしているとされる惑星の質量と軌道を求められる。もう一つの減光観測法は、地球から見て惑星が主星の手前を通過する際の減光を観測する手法である。視線速度法では、主星が観測対象だったが、減光観測法では惑星による減光を観測することにより、惑星の半径や大気組成を調べることが可能だ。

直接観測は、その通り惑星からの光を直接捉えるものである。直接観測の長所は惑星の光を分光観測することにより、その惑星の組成を詳しく調べられることにある。組成から惑星の起源や、生命の活動の痕跡を調べられれば我々の太陽系の起源に迫れる。しかし、仮に太陽系を遠方 (10pc) から観測した時、太陽系最大の惑星である木星ですら太陽の明るさの 10 のマイナス 9 乗であり、太陽との離角が 0.5 秒角と非常に小さい。このことから考えても、系外惑星の観測には高い精度の観測機器が要求される。

系外惑星の直接観測で最も厄介な問題が、主星からの散乱光が生む波面誤差である。惑星光は波面誤差よりも暗いため、如何に望遠鏡の分解能や感度を高くしても惑星光だけを検出することは難しい。そこで、系外惑星探査では主星の光を除去することによって散乱光を抑え、惑星光を捉える試みがなされている。

最もポピュラーな方法は主星を覆い隠す「コロナグラフ」という手法である。これは皆既日食時にちょうど月に隠された太陽を想像してもらえるとわかりやすい。皆既日食時には太陽が隠されているにもかかわらず、太陽の大気・コロナが暗い空に輝いて見える現象が起こる。これは普段はコロナ光が太陽表面からの光よりも暗いために見えなかったものが、表面が隠されたために観測できるようになったためである。系外惑星探査でも同様に、主星光を消すことにより、散乱光も抑え、暗い惑星光を捉えられるようになる (日食の様に手前にマスクを置いて隠す方法と、光の位相をずらして互いに打ち消させる方法などがあるが、ここでは割愛する)。

もう一つがナル干渉計である。干渉計は二つの光を干渉させた時の強めあい・弱めあいを観測し、位相差や振幅を調べるものである。他方、ナル干渉計は取り込んだ光の特定の部分

を打ち消すことを目的としている。原理は、まず単光源からの光を二つに分け、片方の光路では位相を π （半波長）だけずらして、再度分けた光を重ねる。重なった時に、片方は位相が π だけずれているので、互いに打ち消し合い振幅を弱めることができる。ただし、それでは全体的に減光してしまうので、主星光だけを打ち消す場合に、重ねる際に像面を少しずらして重ねている。

2. UNI-PAC 法

以下は筆者が行なっている研究の概要を説明する。

前章で系外惑星探査の一端について述べた。コロナグラフやナール干渉計、高性能望遠鏡の活躍により 1995 年の発見以来、系外惑星の発見数は年々増え、現在では 777 個（2012 年 8 月 1 日時点）の系外惑星が見つかっている。しかし、その大半が木星型惑星で、地球型惑星も発見はされているが可視光による直接観測にまでは至っていない（※1）。直接観測するには先に述べた散乱光による波面誤差を抑える必要がある。しかし地球型惑星は木星型よりも小さいため、その明るさは更に小さくなり、波面誤差を抑えるためにさらに高い精度が求められる。既存のナール干渉計やコロナグラフでは完全に除去することができず、コロナグラフに関しては従来の二桁高い精度が要求される。これを回避するために非対称ナール干渉計（Unbalanced Nulling Interferometer、以下 UNI）と位相振幅補正（Phase and Amplitude Correction、以下 PAC）補償光学を組み合わせた「UNI-PAC 法」（図 1）を開発している。

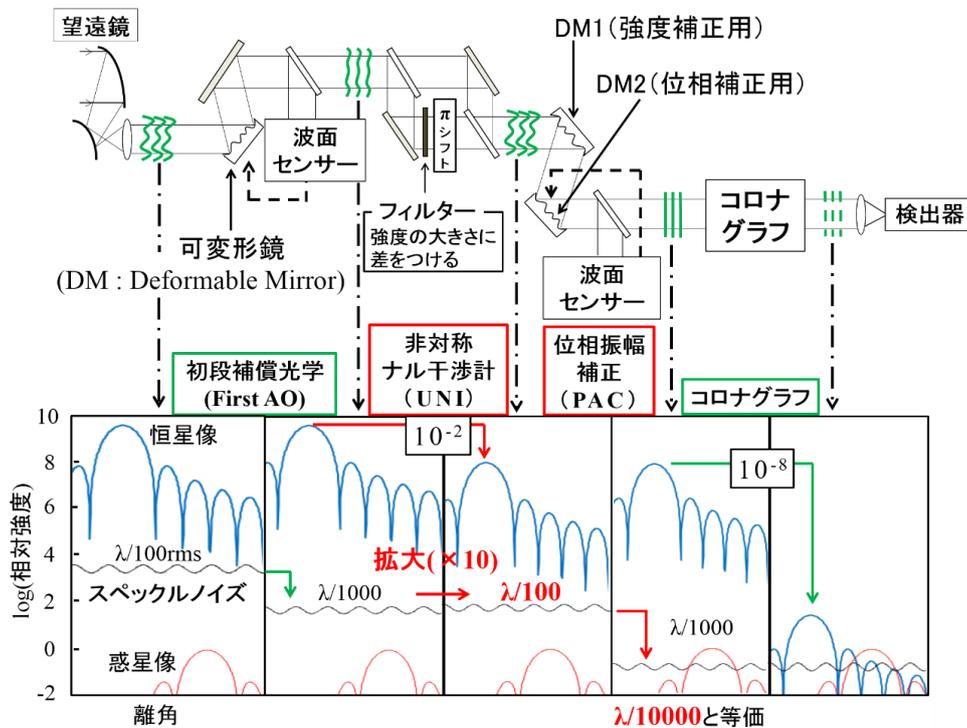


図.1 高コントラスト干渉光学系のレイアウトと各プロセスの効果

本法の本質は UNI である。ナル干渉計では光軸上の主星光を大きく減光することができるが、電場位相を打ち消してしまい相対的な量である波面誤差が非常に大きくなってしまふ。波面誤差は ϵ/E^0 で表され、 ϵ が誤差成分、 E^0 が波面誤差のない電場振幅である。ナル干渉計では電場振幅 E^0 をほとんど0にしてしまふため波面誤差が無限に近くなるのがわかる。これは位相特異点となって現れ、波面誤差の測定・補正ができなくなってしまう。そこで UNI ではナル干渉計の二つの光路の一つに、位相を π だけずらすフィルターを挿入し、電場振幅 E^0 を残すように非対称に主星光を打ち消す。これにより波面誤差は有限に抑えられ、再測定・再補正が可能な波面の出力が可能となる。

また UNI を通すことにより初段の補償光学で $\lambda/1000\text{rms}$ にまで抑えられた誤差が測定値では $\lambda/100\text{rms}$ となるが、初期波面換算では $\lambda/1000\text{rms}$ 相当であることを留意してもらいたい。

UNI により波面誤差の再測定が可能になったので、PAC を用いて波面誤差の再測定・再補正を行なう。ここで、PAC は測定値 $\lambda/100\text{rms}$ の波面誤差を $\lambda/1000\text{rms}$ に再補正したことになるが、これは初期波面換算で $\lambda/10000\text{rms}$ に等しく、従来の補償光学系の限界を超えて波面誤差を補正したことになり、コントラストは二桁高いものに相当する。これによりコロナグラフに要求される精度を下げることになる。

このように UNI-PAC 法を採用することにより波面誤差 $\lambda/10000\text{rms}$ を実現するための波面精度が全光学系を通して緩和される。

系外惑星探査は天文学において最もホットな分野であり、まだまだ未発見の領域も多い。UNI-PAC 法の開発を進め、系外惑星探査や太陽系の起源に迫れる一助になれるよう、努めたい。

※1 2012年6月に赤外線観測衛星スピッツァーによって赤外線による地球型惑星の観測がなされた

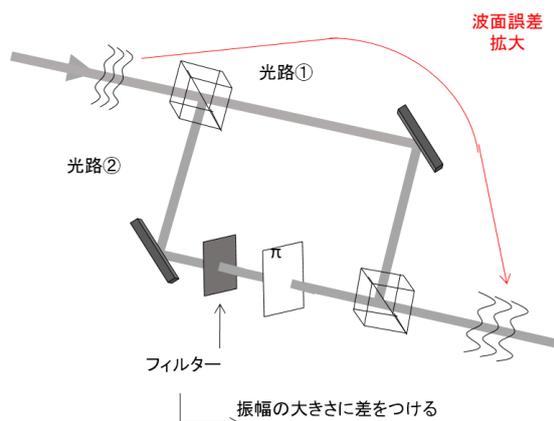


図.2 非対称ナル干渉計

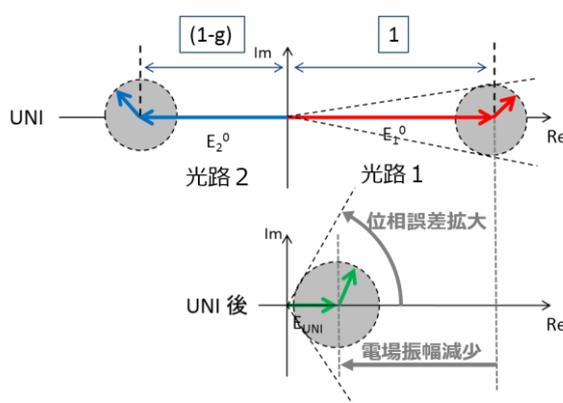


図.2 UNI による電場の変化