

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610041

研究課題名(和文) 光赤外線干渉計のための新しい観測手法の開発

研究課題名(英文) Development of new method for optical and near-infrared interferometer

研究代表者

松尾 太郎 (Matsuo, Taro)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00548464

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、地球型系外惑星の検出・キャラクタリゼーションの手法の開発である。しかし、微弱な惑星光のすぐ傍にある明るい主星光によって、僅かな測定系の較正エラーが惑星光の検出を阻む。本研究では、系統誤差を極限まで排除可能な測定系を実現した。30m口径の望遠鏡に本方式の干渉計を想定する場合に、G型星周りの系外惑星について10時間程度で検出ができ、20日程度でスペクトルを取得できることが分かった。さらに、本研究を発展させて、干渉計の手法を一般的な高精度計測技術に応用することにも成功し、論文として投稿まで至った。本研究は、天文学の一分野に留まらず、広汎な応用の範囲が期待される。

研究成果の概要(英文)： This study is to develop a method for detection and characterization of exoplanets with a near-infrared interferometer. Since spectrum of exoplanet obtained by an interferometer includes the phase modulated by its planet light, this method allows us to reconstruct an image of the planetary system as well as the spectrum of each planet. However, faint planet light is embedded in the bright-scattered light from the host star. Here, I found this method is useful for extraction of the planet signal from high-contrast observation dataset. In case of high-contrast observation on 30m-telescope, super-Earth planets around G-type star can be detected for 10 hours and also characterized for 20 days.

I also proposed a new high-precision wavefront sensor developing this method. A paper on this method has been submitted to a refereed journal.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：赤外線干渉計 太陽系外惑星 波面計測

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 1995年に初めて太陽系外の恒星周りで惑星が発見されて、現在までに1000を超える惑星系が発見された。また、2009年に打ち上げられたKepler衛星によって地球サイズの系外惑星は太陽系の近傍において普遍的な存在であることが確認された。一方の惑星の特徴づけ(ここでは、分光による大気組成の決定を指す)は、主星の極近傍にある木星型惑星(灼熱木星)に留まり、それに比べて半径が10倍小さく、温度も300K程度の、地球生命が居住可能な「地球型」惑星の特徴づけは、灼熱木星に比べてシグナルが極めて小さい。加えて、惑星のすぐ近傍に、可視光では惑星に比べて10の8から10乗、中間赤外線では10の5から7乗の明るい主星が存在する。

(2) あらゆる計測には誤差が必ず付随する。誤差には、ショットノイズに代表される真値の周りでランダムなばらつきを持つ偶然誤差と、測定値に偏りをもたらし系統誤差がある。偶然誤差の低減には、高感度の測定系が、系統誤差に対しては測定系の較正が要求される。ここで、惑星のすぐ傍に明るい恒星光が存在するため、測定系の僅かな較正エラーがシグナルに対して非常に大きな系統誤差を生む。このように、地球型惑星の特徴づけに対して系統誤差が支配しており、いくら大口径の望遠鏡を用意しても偶然誤差が改善されるだけで、計測は困難である。

(3) 系統誤差が生じる原因は、測定系の較正エラーである。この較正エラーは、測定前にいくらキャリブレーションを行なっても、完全に打ち消されるものではない。また、仮に完全な較正に成功しても、測定中に測定系の状態が変化すれば、同様に系統誤差が生じる。角度分解能を上げる天体干渉計における最大の問題点は、**複数台の望遠鏡間の距離(基線長)を変化させながら測定するため、測定系の状態が測定中に変化し、どんな干渉計でも必ず系統誤差が生じる**ことである。

## 2. 研究の目的

(1) 地球型惑星の特徴づけに要求されることは、系統誤差を極限まで抑えて、偶然誤差だけの測定系を実現することである。これが実現できれば、惑星と主星を空間的に分離する程度の口径の望遠鏡が用意できれば、地球型系外惑星の特徴づけが可能になる。このような背景に基づいて、私は光赤外線干渉計において系統誤差を極限まで抑える新しい手法を考案した。

## 3. 研究の方法

(1) 基線長を変化させずに一回の測定から天体の情報を取得できる手法を考案した。

その方法は、シグナルを「分光の情報」として取得し、分光情報から天体の位相を取得するものである。ここで、分光することは、光の干渉を利用して強め合う光(位相)を取り出すことである。天体干渉計でも、干渉を利用して天体からの位相情報を取得するものである。これらの類似性を考慮すれば、天体の干渉計で取得された分光情報には、基線を変化させるのと同じ情報が含まれていることが分かる。本方法論の最大の利点は、同時に分光データを取得できるため、**一回の積分データから系統誤差が排除され、地球型惑星のような非常に弱いシグナルに対してもその重ね合わせから真値を取り出すことが可能になる**ことである。つまり、従来の太陽系外惑星の観測において問題になる主星の散乱光(スペックル)は、積分ごとに惑星のシグナルと分離される。

## 4. 研究成果

(1) 本方式では、同時かつ分光情報を取得することによって、系統誤差を抑えるというアプローチを試みて、実際に、系統誤差に支配された観測データから惑星のシグナルの取得に成功した。

(2) 本方式の基本的な考え方を、一般的な形状計測に応用することによって、系統誤差を極限まで抑えた非常に高精度な形状計測技術を提案することに成功した。本方式は、論文として執筆して、投稿まで至った。本研究は、天文学に留まらず、非常に広範囲な分野への波及が期待される。

### (3) (1)の補足:

実際の数値シミュレーションによって、(1)の実証を行なった。本研究では、地球型系外惑星の特徴づけを目的として、天体干渉計を測定系として採用している。しかし、日本に現存の天体干渉計の計画はないため、建設が決定した、口径30m望遠鏡(Thirty Meter Telescope: TMT)で干渉計を構成した場合を想定する。つまり、最大の基線長は約30mで、様々な基線長の複数の干渉計を構成することになる。また、より実際の観測に近づけるように、地球大気は大気乱流による位相の乱れを発生させることと、図1に示すように、大気による吸収の両者の効果を考慮する。

以上に基づいて、シミュレーションを行う。対象の天体は、10pcの距離に太陽と同じG型星の周りにある1AUの距離にある模擬地球である。想定する観測システムは、一般的な高コントラスト装置、つまり大気を補正する極限補償光学に主星光だけを低減させるコロナグラフの後に、瞳にマスクを置いた複数の干渉計を構成する。各干渉計では、低分散の分光データが取得される。複数の干渉計で取得された複数のデータは、

重ね合わせてシグナルを高めることにのみ用いられる。

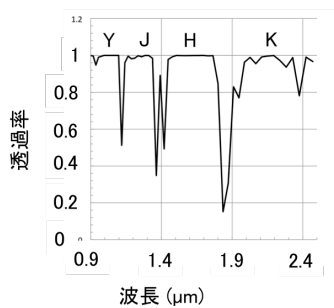


図 1. 数値実験で使用した地球大気の透過率

以上に基づいて、シミュレーションを行う。対象の天体は、10pc の距離に太陽と同じ G 型星の周りにある 1AU の距離にある模擬地球である。想定する観測システムは、一般的な高コントラスト装置、つまり大気を補正する極限補償光学に主星光だけを低減させるコロナグラフの後に、瞳にマスクを置いた複数の干渉計を構成する。各干渉計では、低分散の分光データが取得される。複数の干渉計で取得された複数のデータは、重ね合わせてシグナルを高めることにのみ用いられる。

図 2 は、本数値シミュレーションで一回の積分において取得された生データである。図 2 から分かるように、主星の散乱光が非常に強く、この散乱光は準定常的な光学系の歪みによって発生するため、偶然誤差のように長時間積分で取り除けるものではなく、系統誤差のように振る舞い、惑星光が埋もれたままとなる。

惑星光の埋もれている位置

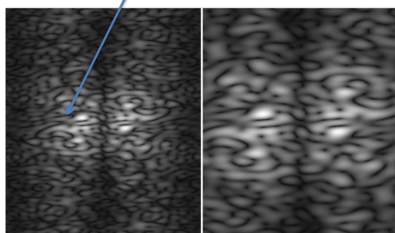


図 2. 実際に取得される生データ

(左は 1.5μm、右は 2.3μm 付近である)

次に、本方式を応用して最終的に導出した結果を図 3 に示す。積分時間は 5 時間である。図 3 の左から分かるように、主星光の大部分はほぼ中心に集中している。その結果、惑星の存在する 1AU の所には惑星光が検出できることが分かる。今回の計算では、5 時間の積分で 10 の見積もりとなった。この位置情報に基づいて、惑星の分光データに再構成したものを図 4 に示す。非常に僅かではあるが、1.27μm にある酸素の吸収線および非常に広い水蒸気の吸収線の検出に成功した。ただし、総積分時間は 20 日間である。以上のように、系統誤差のあるデータから、本方式によって系統誤差を抑えて真値を取り出すことに成功し、

太陽系外惑星の究極的な目標である「G 型星周りで地球型系外惑星の特徴づけ」の可能性を示すことができた。

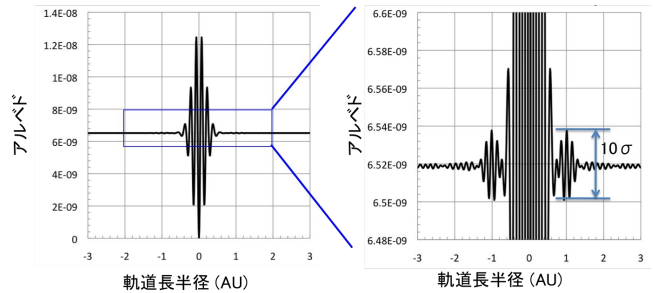


図 3. 主星の光を含めた図 (左) と惑星光の部分だけを拡大した図 (右)

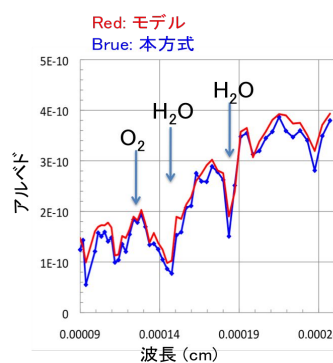


図 4. 惑星の分光情報として再構成した結果。

#### 4. まとめ

地球型系外惑星の特徴づけは、系統誤差を極限まで抑える必要がある。本方式では、同時かつ分光情報を取得することによって、系統誤差を抑えるというアプローチを試みた。実際に、系統誤差に支配された観測データから惑星のシグナルの取得に成功した。また、本方式の基本的な考え方を、一般的な形状計測に応用することによって、系統誤差を極限まで抑えた非常に高精度な形状計測技術を提案することに成功した。本方式は、論文として執筆して、投稿まで至った。本研究は、天文学に留まらず、非常に広範囲な分野への波及が期待される。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)  
今田浩昭, 松尾太郎, 山本広大, 木野勝  
Applied Optics に投稿中. 査読有り

〔学会発表〕(計 1 件)  
松尾太郎, 国際会議: Astronomy in the era  
of TMT

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾太郎 (MATSUO, Taro)  
京都大学・大学院理学研究科・特定准教授  
研究者番号: 00548464