

論文内容の要旨

論文題目：High dynamic range observation in optical interferometry

(光干渉計における高ダイナミックレンジ観測について)

氏名 小谷 隆行

本研究は、大きく分けて二つの部分から構成されている。一つは、シングルモード光ファイバーを用いた光干渉計による、高コントラスト天体の観測である。この研究では、光干渉計 CHARA とファイバービームコンバイナー FLUOR を用いて、近接連星系 θ Draconis を観測し、主星とのコントラスト比 61 の伴星を初めて検出した。ここでは、シングルモード光ファイバーを、大気による波面の乱れを取り除く Spatial filter として用いて、高コントラスト天体の観測に成功した。もう一つは、長さ 100m を超えるシングルモード光ファイバーによって、マウナケア山頂の大望遠鏡を結合し、巨大な赤外線干渉計を構築する OHANA (Optical Hawaiian Array for Nanoradian Astronomy) 干渉計の開発である。この研究では、長さ 300m のファイバーの温度特性評価を行い、このファイバーを使って二つの Keck 望遠鏡を結合し、恒星の光で干渉縞を得ることに成功した。これによって高感度・高精度な光赤外線干渉計を容易に実現できる可能性を示した。

1. 光干渉計による近接連星系 θ Draconis の観測とコントラスト比 61 の伴星検出

恒星 51 Pegasi の視線速度測定によって太陽系外惑星の存在が明らかになって以来、系外惑星探査が盛んに行われるようになってきた。しかしこれまでに行われた探査の多くは、視線速度や Transit 観測といった間接的な手法に限られている。高い角分解能を持つ光干渉計は、惑星を直接検出するための有効な手段であるが、大気の乱れによって測定精度が低下するため、系外惑星のような高コントラスト天体

の観測は難しい。系外惑星探査は、伴星と主星のコントラスト比が高い連星系の観測と考えることができるが、これまでに光干渉計で観測された連星系のコントラストは、大気の流れのため、最高でも 28 にすぎない。一方、直接検出が最も容易であると思われる 51 Pegasi b のような巨大ガス惑星、いわゆる「Hot Jupiter」の近赤外でのコントラスト比は 10^4 程度だと考えられており、これまでの光干渉計では検出不可能である。

近年、光干渉計では、大気の流れの影響を取り除く Spatial Filter として、シングルモード光ファイバーが使われるようになり、これを使えば Hot Jupiter のような巨大ガス惑星が直接検出可能であると予測されている。本研究では、系外惑星の直接検出に向けた第一歩として、光干渉計による連星系の観測を行い、コントラスト 100 程度の伴星を検出することを目指した。ターゲットとして、暗い伴星を持つと思われる近接連星 θ Draconis を選び、これをアメリカ・Mt. Wilson にある CHARA 干渉計と、シングルモードファイバーを用いた FLUOR ビームコンバイナーを用いて観測した。

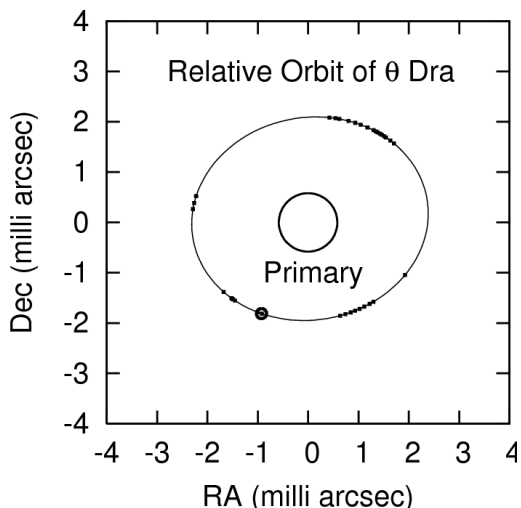


図 1: 再現した θ Draconis の軌道

θ Draconis (= HD 144284) は $V_{\text{mag}} = 4.0$, $K_{\text{mag}} = 2.7$ 、主星は F8 の準巨星、軌道周期 3.07 日の分光連星である。100 年以上前から主星の視線速度の変動が観測されており、近年、近赤外での分光観測により伴星の視線速度測定にも成功している。

本研究では、CHARA 干渉計の W1E2 基線 (251 m), W2E2 基線 (152 m) を使用し、8 晩にわたって K-band ($1.95\text{-}2.3\ \mu\text{m}$) で合計 34 点の visibility point を取得した。

得られた visibility から天体の軌道・物理要素を導出するためには、理論モデルを作成し、得られた visibility にモデルフィットする必要がある。伴星が存在しないと仮定した単一星モデルと、連星モデルの両方でモデルフィットした結果、連星モデルの方がより得られたデータに一致することがわかった。

このモデルフィットにより、 θ Draconis は主星とのコントラスト比 61 の伴星を持つことを初めて明らかにした。これは光干渉計で観測された中で、最もコントラスト比の高い連星である。図 1 は、導き出された軌道パラメーターから再構築した θ Draconis の軌道である。

また、干渉計のデータと、これまでに行われた視線速度のデータを同時に解析することによって、連星系の全ての軌道・物理パラメーターを決定し、連星の力学的質量を初めて決定することに成功した。その結果、主星は 1.23 ± 0.23 太陽質量の F8 準巨星、伴星は 0.47 ± 0.04 太陽質量の K7 主系列星と同等することができた。また、求められた主星の視直径・有効温度は、過去に行われた間接的な観測方法による結果と一致していた。さらに、主星の明るさ・有効温度・力学的質量を、恒星の進化モデルと比較することにより、主星の年齢は約 3 Gyr ということがわかった。この結果により、近赤外でのコントラスト 10000 を持つと思われる、51 Peg b のような Hot Jupiter の直接検出に一歩近づいたと言える。

2. OHANA 干渉計の開発

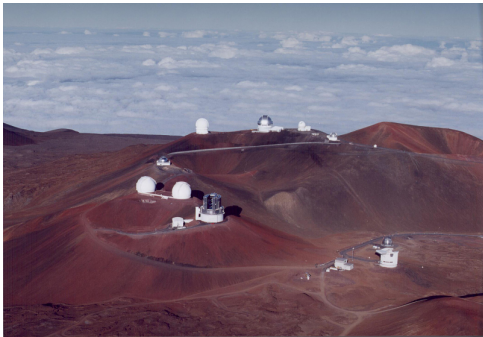


図 2：マウナケア山頂の大望遠鏡群
(撮影：国立天文台)

OHANA(Optical Hawaiian Array for Nanoradian Astronomy) 計画は、すばる望遠鏡を含むマウナケア山頂の大望遠鏡をシングルモード光ファイバーで結合し、最長基線 800m の巨大な赤外線干渉計を構築する計画であり、2000 年から開発を行っている。図 2 は OHANA で使用する予定の、マウナケア山頂の大望遠鏡群の写真である。山頂には口径 3m 以上の大望遠鏡が 7 台あり、これらをファイバー結合する。

OHANA は、①光の可干渉性を保持したまま長距離光伝送が可能、②既存の補償光学を備えた大望遠鏡を使うことができる、③Spatial filter により大気の流れの影響を取り除くことができる、といったシングルモードファイバーの

特徴により、容易に高感度・高角分解能な大規模赤外線干渉計を構築することができる。OHANA によって、これまで観測できなかった AGN(Active Galactic Nucleus) や YSO(Young stellar Object) といった暗い天体の中心領域を超高角分解能で観測することができ、これらの天体の理解が大きく進むと考えられている。

本研究では、OHANA で使われる長さ 300m の J,K バンドシングルモード光ファイバーの温度特性について調べ、干渉計に対する影響を調べた。OHANA では、ファイバーの大部分は屋外に設置され、一部は屋内に設置される。このような状況では、ファイバーはマウナケア山頂の温度変化（一晩で約 5 °C の変化）や、局所的な温度差の影響を受ける。ファイバーの素材はガラスであり、温度変化に敏感であると考えられるが、干渉計に対する影響はよくわかっていなかった。本研究では、マウナケア山頂の温度環境を実験室で再現し、①干渉縞の中心位置、②分散の差、③偏光状態、がどのように変化するかを調べた。

実験では、片方のファイバーに温度差を与え、干渉縞の位置の変化を測定した。その結果、ファイバーの長さが変化することによって干渉縞の位置は大きく変化するが、マウナケア山頂の温度変化ならば、位置の変化は簡単に追尾可能であることを示した。また、温度変化により、光路長の差が波数に対して非線型な依存性を持つ、分散の差が発生する。その結果、干渉縞の位相が全波数で一致せず、見かけのコントラストが大きく低下することがわかった。これは干渉計の感度・測定精度の悪化を招く。そこで本研究では分散の影響を補償するための新しい手法を提案し、実験によってその有効性を確認した。一つは、ファイバーと似た分散特性を持ったガラス板を光路中に挿入する方法、もう一つはファイバーの長さを物理的に引っ張って伸ばす方法である。どちらの方法も、ほぼ分散の影響を打ち消すことに成功

した。

また、ファイバーの温度が変化しても、ファイバーを透過した光の偏光状態はあまり変化しないことを示した。これらの実験によって、マウナケア山頂にファイバーを敷設しても、問題がないことを示した。

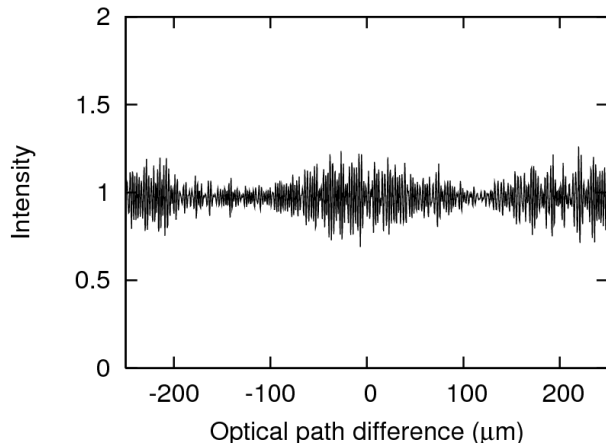


図3：恒星 107 Her の干渉縞（フィルター処理後）

2005年6月には、長さ300mのKバンドファイバーを使い、二つのKeck望遠鏡を結合して干渉計観測のデモンストレーションを行って、恒星107Herの干渉縞を観測することに成功した。図3に、得られた干渉縞を示す。107 Herの予想される visibility は0.99であるが、観測されたのはわずか0.26であった。これは

Keck望遠鏡の補償光学内にある、波面センサーへ可視光を分離するダイクロイックミラーの材質が、Keck I と Keck II とで異なっており、そのために生じた分散の差が原因である。このダイクロイックミラーは簡単に交換可能であり、交換後には高い visibility を得ることができると思われる。また、光の利用効率については、悪天候のため精密な測定ができなかったが、最低でも0.5%の効率があることが測定された。晴天時に予想される効率は2%であり（検出器の量子効率・ビームコンバイナーの効率を含める）、ファイバーを使わないKeck干渉計の効率は1%であるため、ファイバーを使った干渉計のほうが潜在的には有利である可能性が示された。

ファイバーの温度特性を調べ、実際にそのファイバーを使って2台のKeck望遠鏡を結合した実験の成功によって、将来の最長基線800m・7台同時干渉を目標とした、マウナケア大干渉計の構築に大きく貢献したと言える。

本研究によって、シングルモード光ファイバーを使えば、従来よりもはるかに高精度・高感度な干渉計を実現することができることを示した。