

学 位 論 文 題 名

Stellar Speckle Spectroscopy
for High Spatial Resolution
and its Observational Data Analysis

(高空間分解能のための天体スペckル分光法および観測データ解析)

学位論文内容の要旨

大口径望遠鏡の特徴は、その集光力と高空間分解能特性であるが、地上観測においては大気の揺らぎのため、空間分解能は口径にかかわらず1秒角程度に制限されてしまう。現在建造中の8-10メートル級望遠鏡を含めた大口径望遠鏡の高空間分解能特性を引き出す観測法やデータ処理法の開発が、現在、緊急の課題となっている。天体スペckル干渉法は、特に可視や赤外領域において、望遠鏡の回折限界像を得るための最も有力な方法となっている。この方法では、大気揺らぎが凍結する数十ミリ秒の短時間露光で得られる星の像、すなわち、スペckル干渉パターンを多数枚統計処理することによって星の回折限界像を得る。スペckルパターンに含まれる微細構造の典型サイズが、望遠鏡の回折限界サイズ λ/D (D : 望遠鏡口径) 程度なので、このような再生が可能となる。

天体スペckル干渉法の高空間分解能特性を分光に応用したのが、天体スペckル分光法で、本論文は、この新しい天体分光法に関するものである。この方法によって、回折限界における天体の分散像(スペクトル)を再生することができ、大口径望遠鏡と組み合わせれば、従来達成できていなかった高空間分解能で分光が可能となる。すなわち、スペckル分光法によって、従来の分光法では得られなかったような天体の分光情報が得られることになり、天体の物理的、化学的過程の解明に役立つ。これまで、天体スペckル分光法を実現するための幾つかの方法が提案されてきた。しかし、そのいずれに対しても、シミュレーション実験の結果のみが報告されているだけで、実際の観測データを使った研究はなされていなかった。本論文は、シミュレーション実験に基づいて提案された方法を基礎に、実際の観測データを解析した結果をまとめたもので、スペckル分光データから回折限界スペクトルの再生が現実的に可能であることを実証している。本論文は全6章から構成されている。

第1章では、研究の背景、意義及び目的を述べ、論文の構成を概述している。

第2章では、研究に関連する理論的背景のレビューを行なっている。

第3章では、広帯域・低分散用に設計されたスペckル分光カメラ1号機の観測データ解析およびその解析結果について記述している。1号機を使った観測は、国立天文台岡山天体物理観測所188cm望遠鏡にて行われた。このスペckル分光カメラは、分光チャンネルと参照チャンネルの2チャンネルからなり、参照チャンネル側のスペckル像と分光チャンネル側の分散スペckル像が同時撮影できる。参照側スペckル像に含まれる瞬間ごとの大気揺らぎ情報を使うことによって、分散スペckル像より回折限界スペクトルを再生することができる。1号機によって得られたスペckル分光データは、天体スペckル干渉法におけるデータ処理法の一つであるShift-A

nd-Add (SAA) 法によって処理された。まず、参照スペックル像に SAA 処理を適用することによって物体の回折限界像を再生する。SAA アルゴリズムは、データフレームのシフトと加算からなるので、参照スペックル像に対するこのような操作は、対応する分散スペックル像にも同様に働き、回折限界における分散像すなわちスペクトルが再生される。この段階において、再生フレーム上で強いバックグラウンド成分が再生回折限界像に重畳してしまうが、これを推定し有効に除去することが、これまで未解決の問題であった。本論文では、参照スペックル像の重心が合致するようシフトされたデータフレームの平均 (疑似長時間露光フレーム) に、上記の SAA 処理を施すことで、有効なバックグラウンドの推定を行っている。このバックグラウンド除去アルゴリズムを、スペックル像のシミュレーションデータおよび観測データに適用し、その正当性を確かめた後、単独星および連星のスペックル分光データに適用している。特に、0.5 秒角離れた二重星 ADS 16836 の広帯域スペクトルの分離に成功したことにより、広帯域のスペックル分光が実際に可能であることを実証している。

第4章では、狭帯域・中分散スペックル分光の観測データの解析について記述している。まず、第3章で確立されたデータ処理アルゴリズムを、アリゾナ大学ステュワード天文台のグループから処理依頼されたスペックル分光データに適用している。このデータは、ステュワード天文台のディファレンシャル・スペックルカメラをキットピーク米国国立天文台 4 m 望遠鏡に取り付けて得られたもので、スペックル分光カメラ 1 号機で得られる広帯域・低分散のデータに対して、狭帯域・中分散のデータである。しかし、本質的な変更なしに今回開発した SAA 処理アルゴリズムが適用され、 ϵ Her と P Cyg のスペクトルを、4 m 望遠鏡の回折限界で再生している。それぞれの再生スペクトルには、大気揺らぎの影響下では判別できなかった $H\beta$ 吸収線および $H\beta$ 輝線がはっきりと現われており、狭帯域・中分散のスペックル分光が実際に可能であることを明かにしている。

第4章の後半では、1号機の改良機として狭帯域・中分散用に設計されたスペックル分光カメラ 2号機の観測データ解析について記述している。この2号機を 188 cm 望遠鏡に取り付けて、 $H\alpha$ 付近のスペックル分光データを取得している。狭帯域データであることから、データ処理法として SAA 以外に、新たに相関法を導入している。単独星 α Per と γ Cas のデータが両方法によって処理され、それぞれが良好な整合性を有することが示されている。また、このように再生された α Per のスペクトル・プロファイルが、従来のスリット分光によるプロシオンのプロファイルと比較されている。ほぼ同じスペクトル型を持つ両者は、 $H\alpha$ 吸収線に関し、整合性のあるプロファイルを示した。すなわち、従来のスリット分光法で行われてきたスペクトルの定量解析が、スペックル分光法によって再生されたスペクトルを使って、十分可能であることを示している。次に、2号機で得られた連星のスペックル分光のデータ処理を行っている。その結果、約 0.3 秒角離れた 2 つの星のスペクトルを $H\alpha$ 吸収線と共に再生することに成功している。両星の位置角と $H\alpha$ 吸収線の相対的な位置は、良好な整合性を示している。すなわち、スペックル分光の最大の特長である高空間分解能特性を、明白な形で実証している。

第5章では、高分散のスペックル分光を実現するためのシステムの提案がなされている。高分散分光においては、単位波長当たりの光量が相当不足するので、十分な SN 比が得られるよう工夫する必要がある。提案する新しいシステムでは、tip-tilt 鏡による実時間 SAA 処理によって、回折限界分解能を保った状態で、それを分光器に送り込む。すなわち、回折限界像を結像させてから、分光すると考えてもよい。従って、空間分解能を劣化させることなく長時間露光が可能となり、必要なだけ光量を増やすことができる。また、分光器にスリットを用いれば、広がった天体の回折限界像上の各点のスペクトルを高分散で独立に取り出すことができる等の長所が生じる。このようにして、提案する新しいシステムを使えば、高分散・高空間分解能の分光が可能となる。

最後に、第6章では、本論文の結論として、これまで得られた研究成果の総括を行っている。

学位論文審査の要旨

主 査 ・ 教 授 田 中 啓 司
副 査 教 授 大 場 良 次
副 査 教 授 大 塚 喜 弘
副 査 教 授 朝 倉 利 光
副 査 助 教 授 馬 場 直 志

学 位 論 文 題 名

Stellar Speckle Spectroscopy for High Spatial Resolution and its Observational Data Analysis

(高空間分解能のための天体スペckル分光法および観測データ解析)

近年、観測技術の進展とともに、天体に関する新しい知見が数多く見いだされてきている。さらに多くの観測事実を得るために、欧米で8～10メートルの大型望遠鏡の建造が進められている。これは、天文学の根本的課題として、宇宙のより遠くをより詳細に観測するためである。大型望遠鏡においては、集光力が口径の2乗に比例して増すため、遠くの暗い天体、すなわち膨張宇宙論に従えば宇宙の初期の姿を見るのに適している。また、理論的空間分解能は、口径とともに良くなるため、天体を詳細に観測するにも大型望遠鏡が優れている。しかし、地上においては地球大気の影響のため、通常の観測法では空間分解能が大きく制限され、大型望遠鏡の潜在的な高空間分解能を活かすことが難しい。このため、ハッブル宇宙望遠鏡が地球大気による像劣化を回避して鮮明な天体像を得るために打ち上げられた。しかし、その口径は2.4メートルであり、地上に建造されている大型望遠鏡の理論的空間分解能よりも劣っている。一方、天体スペckル干渉法が、大気ゆらぎで天体の高空間分解能情報を得る方法として提案されていた。これは、像面で得られるランダムな干渉パターンから、望遠鏡の回折限界分解能で天体像再生を可能とする方法である。しかし、天体の物理的、化学的過程を詳細に解明するには、結像だけでなく高空間分解能を有した分光観測が不可欠である。

本論文は、天体スペckル干渉法の高空間分解能特性を活かして天体分光を行う方法を、実際の観測に適用し、データ解析を行って、その有効性を実証した一連の研究成果をまとめたものである。本論文の研究成果をまとめると以下の通りである。

- ①天体スペckル分光データ解析にshift-and-add法を適用する場合、バックグラウンド成分の推定が懸念事項であったが、著者独自の着想による疑似長時間露光フレームの利用により、有効な推定法を開発した。このバックグラウンド除去アルゴリズムを、スペckル像のシミュレーションデータおよび観測データに適用し、良好な再生像が得られることを示した。
- ②プリズムを用いた広帯域低分散用スペckル分光カメラを使用して観測を実施し、0.5秒角離れた2重星ADS 16836のスペckルを分離して検出することに成功した。すなわち、可視域の全域にわたる広帯域スペckル分光法が有効であることを初めて実証した。
- ③狭帯域中分散用スペckル分光カメラを用いて、望遠鏡の回折限界空間分解能で星のスペckルの吸収線や輝線を再生した。まず、米国キットピーク国立天文台4 m望遠鏡にアリゾナ大学シュワート天文台のディファレンシャル・スペckルカメラを取り付けて得ら

れたデータの解析を行い、PCygおよび ϵ HerのH β 線近傍のスペクトル再生に成功した。これらにより、輝線及び吸収線がスペックル分光によって高空間分解能で再生できることを実証した。次に、高効率な狭帯域・中分散分光用に開発したスペックル分光カメラを国立天文台岡山天体物理観測所188cm望遠鏡に取り付けて観測を行い、H α 線近傍で α Perと γ Casのスペクトル再生に成功した。ここでは、データ処理に相互相関法を導入し、従来のスリット分光法で達成されていたようなスペクトルの定量解析が、スペックル分光法によっても可能で、かつ高空間分解能であることを示した。

④角距離で0.26秒離れている二重星ADS12973のスペクトルを分離再生し、それらのH α 吸収線が両星の相対位置に相応してシフトしていることを示した。すなわち、天体の対物スペクトルが高空間分解能で得られることを明確に示した。

⑤高分散スペックル分光を実現するために、実時間 tip-tilt 波面制御に基づく新しい天体分光法を提案した。これは、空間分解能を劣化させることなく、スペクトルの長時間露光を可能とするもので、有益な提案である。

これを要するに、著者は、スペックル干渉法を利用する高空間分解能を有した天体分光法を確立したものであり、天文光学と応用物理学の進歩に寄与するところ大である。よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。