

共同研究報告書

2025 年 6 月 6 日

研究代表者：

氏 名 佐藤 文衛
所属・職 東京科学大学・教授

研究題目：超高分散分光観測に基づく精密天体視線速度測定技術の開発

1. 成果報告

(1) 研究の実施日程

研究項目	実 施 日 程											
	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月
CMOSカメラの設置・試験・データ検証												
188cm望遠鏡を用いた試験観測												
リレー光学系の製作・試験												
非点収差対策・試験												

(2) 研究成果

本研究の目的は、系外惑星探索などのための精密天体視線速度測定技術の革新を目指して、超高波長分解能分光観測に基づいた同技術の基礎的研究・開発を行うことである。具体的には、①国立天文台ハワイ観測所岡山分室の188cm反射望遠鏡に装備された高分散分光器HIDES-Fに小ピクセルサイズのCMOSカメラを導入して、比波長分解能30万を超える超高波長分解能観測を実現し、②恒星スペクトル吸収線の形状変化と視線速度変化をリアルタイムで計測しつつ、恒星スペクトルと天文コムスペクトルを交互に連続的に取得することによって、分光器の時間的変動に起因する波長較正の誤差を低減する方法を調査・研究する。②については、188cm反射望遠鏡のドーム故障からの復旧が予定より遅れたため観測再開が3月中旬にまでずれ込み、さらに、観測再開後の試験観測でカセグレン焦点からHIDES-Fに光を伝送する光ファイバー伝送系（HEモード）に不具合が見つかったため、188cm望遠鏡を用いた恒星スペクトルの取得・実験は断念した。よって、以下では①について成果を記す。

【HIDES-Fにおける比波長分解能30万の実現】

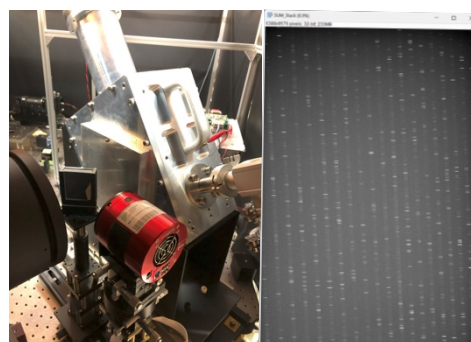
HIDES-Fは最高波長分解能約10万で運用されているが、エシエル回折格子のもつ理論的な限界分解能とカメラ系の結像性能はそれより十分に高く、入射スリット幅を40umとごく狭くした上で、5um以下のピッチでサンプリングすれば光軸近くなら設計上は波長分解能30万に到達するはずである。そこで、本研究費で極小ピクセルサイズ(3.76um)・中面積(36×24mm)の民生用CMOSカメラ(ZWO ASI 6200MM Pro)を購入し、HIDES-FのCCD検出器直前に平面鏡を挿入することによって一部の光束を取り出し、同CMOSカ

メラに結像させる光学系を組み込んだ(図1)。入射光学系には現在実験用に使っている光ファイバー伝送系の一つ(旧HRモード;マイクロレンズ+イメージスライサー込み、スライス幅100 μm)を使用し、イメージスライサー直後に40 μm スリットを設置して、CMOS検出器上で較正光源(Th-Ar、天文コム)のスペクトルを観察した(図2)。すると、予想に反して比波長分解能は20万程度しか達成されなかった。また、有意な非点収差が確認された。一方、光ファイバー伝送系を介さずHe-Neレーザー(632.816nm)を直接スリット位置に取り付け入射させると、CMOSカメラの視野中央で比波長分解能30万が得られたことから、光ファイバー伝送系を用いたときの真のスリット位置と40 μm スリット位置のずれによるF値の増大、および非点収差の存在が波長分解能の低下の原因として疑われた。そこで、次のような追加の実験・調査を行った。

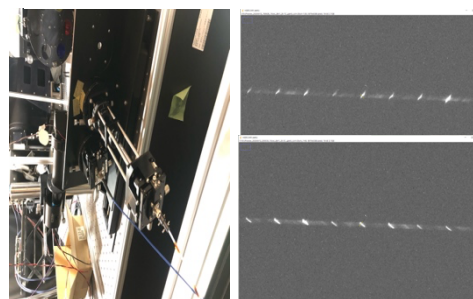
まず、準備として旧HRモードファイバー系へカセグレン焦点を経由せず直接較正光源光を導入する光学系を組み、さらにイメージスライサーから出射したF/30の較正光源光をスライサーから離れた扱いやすい位置に引き出すリレー光学系を製作した(図3)。引き出された焦点位置に40 μm スリットを設置し、正しいF値で光を分光器に入射させ、CMOSカメラで較正光源光を観察した。しかし、波長分解能はやはり30万には到達せず、依然として有意な非点収差が見られた(図4)。また、20 μm 径のピンホール像に対して半値幅が最小になるフォーカス位置付近で測定すると、11 μm 程度の像のぼけが見られた。収差がなければ5 μm 程度の点に見えるはずなので、この非点収差が波長分解能低下の要因であることが明らかになった。

次に、この非点収差への対策として、平行平板ガラスをCMOSカメラ直前(収束光線中)に光軸に対して傾けて置いて追加の非点収差を発生させ、これで現在の非点収差を打ち消すことを試みた。その結果、あるガラス板の向きで非点収差の伸びる方向をスリット長方向に揃えることができ、そのときに波長分解能30万が達成されていることを確認した(図5, 6, 7)。

今後は、188cm望遠鏡を用いて恒星スペクトルを波長分解能30万で観測することを目標に、まず現在明らかになっているHIDES-Fの不具合を解消し、さらにHIDES-Fの通常の観測とCMOSカメラを用いた超高波長分解能観測を効率よく切り替えて行えるよう、各部の自動化やデータ取得パイプラインの整備などを進めていく予定である。

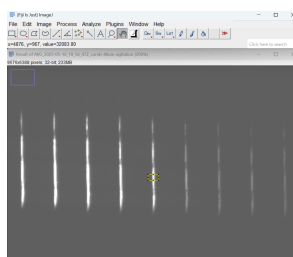


(左) 図1: CCD 検出器(銀色のデュアー)前に設置された平面鏡(中央)と CMOS カメラ(赤)、(右) 図2: CMOS カメラで取得した Th-Ar スペクトル(530-620nm 付近)

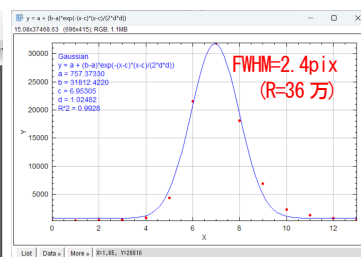


(左) 図3: 入射部に取り付けた焦点引き出しリレー光学系(写真中央)

(右) 図4: 非点収差の現れ方。スリット長方向(縦)に対して像の傾きが変わっている。



(左) 図5: 波長分解能 30 万が達成された天文コムスペクトル



(右) 図6: 図5 中央付近の輝線プロファイル

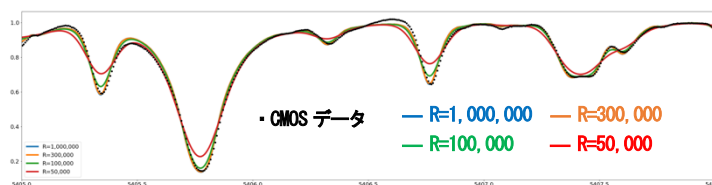


図7: 光ファイバーを直接太陽に向け、波長分解能 30 万で取得した太陽スペクトルの一部(協力: 大宮正士(アストロバイオロジーセンター))。黒点が CMOS での観測点、実線は R=100 万のスペクトルにガウス関数を畳み込んで波長分解能を落としたもの。