

氏 名 笠木 結

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2475 号

学位授与の日付 2024 年 3 月 22 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Unveiling Atmospheric Features of Faint Substellar  
Companions from High-Resolution Near-Infrared Spectra

論文審査委員 主 査 藤井 友香  
天文科学コース 准教授  
深川 美里  
天文科学コース 教授  
泉浦 秀行  
天文科学コース 准教授  
山村 一誠  
宇宙科学コース 准教授  
中島 紀  
アストロバイオロジーセンター 講師

# 博士論文の要旨

氏 名：笠木 結

論文題目：Unveiling Atmospheric Features of Faint Substellar Companions from High-Resolution Near-Infrared Spectra

Since the first discovery in 1995, over 5,500 exoplanets have been detected. As the number of discovered planets grows, so does the number of exoplanets suitable for atmospheric characterization. The current primary targets for atmospheric characterization are hydrogen-rich atmospheres, typical of gas giant planets or brown dwarfs because these are more easily observed than smaller, fainter planets. Spectral analysis of these atmospheres is a window into various physical and chemical properties of the atmosphere, advancing our understanding of not only atmospheric processes but also the formation and evolution processes of the planet.

Among several characterization methods, spectroscopic observations of directly imaged planets have enabled robust detections of molecular species. However, the challenge lies in their low contrast against host stars and such observations have been limited to the low wavelength resolution ( $R \sim 20-100$ ) so far. This limitation makes it difficult to fully understand atmospheric properties, as low- or medium-resolution spectra can lead to degeneracies in the Temperature-Pressure (T-P) profile, the effect of clouds, and the abundances of molecular species.

Recently, with the development of near-infrared high-resolution spectrographs and the establishment of observation techniques combined with Adaptive Optics (AO), the high-resolution spectra of such faint targets have become available. In this thesis, we developed a novel analysis method for the high-resolution spectra taken by IRD (InfraRed Doppler,  $R \sim 70,000$ ) and REACH ( $R \sim 100,000$ ) on the Subaru Telescope, aimed at unveiling the atmospheric features of exoplanets and brown dwarfs. REACH is the combination of IRD and the Subaru Coronagraphic Extreme AO (SCEXAO). As this is the first attempt to analyze a REACH spectrum for a very high-contrast system with a faint companion, we observed a companion L dwarf, HR 7672B. Brown dwarfs are key objects to fill the gap in physical and atmospheric properties between giant planets and stars. Moreover, brown dwarfs orbiting main-sequence stars, like HR 7672B, have an important role in characterization because their fundamental properties, such as dynamical mass, age, and metallicities, can be inferred from their host star.

Firstly, we introduce PyIRD, a new reduction pipeline for IRD and REACH, developed as a Python-based open-source code. The most important feature is that it is optimized for extracting faint target spectra. A major challenge in achieving a higher signal-to-noise ratio for faint target spectra is the large systematic noise from the

detector's readout channels. PyIRD achieved an improvement in noise removal compared to the standard reduction process typically used for bright stellar spectra. This readout noise removal is particularly effective with REACH data, probably because its narrow aperture does not prevent accurate noise modeling. Additionally, we found periodic noise that significantly appears in faint target spectra observed by REACH. We found a wavelength dependence in the noise periodicities and estimated that this noise arose from instrumental effects; however, further investigation is required to determine its exact cause.

We then developed an atmospheric retrieval model and applied it to the spectra of an L dwarf, HR 7672B. The retrieval is a method to fit a spectrum by flexibly adjusting parameters such as molecular abundances, P-T profile, and other physical properties. Our model framework is based on the ExoJAX spectrum code, and we developed three additional models: a cloud model for the L dwarf's atmosphere, a model accounting for the contamination of the host star's speckle light, and a telluric transmittance spectrum model. We applied this model to the spectrum in the wavelength range less affected by periodic noise, corresponding to the J band and a shorter wavelength range in the H band. For the longer wavelength range in the H band, which suffers from significant periodic noise, we developed an additional fourth model utilizing the Gaussian Process to remove the noise.

From the joint analysis of the J and H band spectra, we successfully identified H<sub>2</sub>O and FeH as major absorbers. The resolution of this spectrum is the highest ever for this target, effectively resolving the degeneracies that lower-resolution spectra fail to address by providing the posterior probabilities of each parameter. Our findings indicate the necessity of an additional continuum opacity source to reproduce the observed spectra: In a clear sky model that excludes cloud opacity from the retrieval, Collision-Induced Absorption (CIA) opacity is necessary, while in a cloudy model that allows clouds to be set at any altitude, clouds serve as a continuum at higher altitudes than CIA. The retrieved T-P profile from the cloudy model suggests potential cloud formation by TiO<sub>2</sub> and/or Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The abundances of H<sub>2</sub>O and FeH are higher than expected in chemical equilibrium, which might indicate a quenching condition for FeH. Given that only a limited number of brown dwarfs have been thoroughly characterized, applying this new method to various brown dwarfs and exoplanets promises to shed light on the formation and evolution processes of substellar companions.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 笠木 結

Title  
論文題目 Unveiling Atmospheric Features of Faint Substellar Companions from High-Resolution Near-Infrared Spectra

褐色矮星や系外惑星の大気構造は、その天体の形成過程や大気中の物理・化学過程の重要なトレーサーと考えられ、分光観測による大気の特徴付けの研究が進んでいる。これらの天体のうち直接撮像されたもののほとんどは、これまで低分散スペクトルのみ得られてきたが、すばる望遠鏡における補償光学と高分散分光器 IRD を組み合わせた装置 REACH によって、主星のそばの（相対的に暗い）褐色矮星や惑星の高分散スペクトルの取得が可能になってきた。本論文では、その観測データを初めて解析している。

本論文では、まず第 1 章で、研究対象となる褐色矮星・系外惑星分野の現状の研究を概観し、本研究の位置づけを説明している。その後、第 2 章では、暗い天体の観測において読み出しノイズの影響が無視できなくなることをふまえ、IRD や REACH を用いた暗い天体の観測に適した一次処理パイプライン PyIRD を作成し、性能評価を行なった。これは、半自動的に生データからのスペクトル抽出を一貫して行うもので、従来の IRAF をベースとしたデータ処理手法とは異なり、ピクセルを偶奇で分けて読み出しノイズパターンをモデリングすることで補正の精度を向上させたほか、散乱光のモデリングにガウス過程を用いるなどの工夫が見られる。実際に IRD と REACH で得られたデータの処理において従来の処理結果と比較し、PyIRD による処理の方が露光ごとのばらつきが抑えられていることを確認した。また、REACH で暗い天体を観測した際に H バンド長波長側で現れる特有の周期的なノイズを発見し、その特徴付けを行うことで、原因の絞り込みを行っている。

第 3 章では、実際に REACH で得られた褐色矮星 HR 7672B のデータを解析し、大気組成と温度構造についての制限を得た。一次処理には上記の PyIRD を用いている。大気構造の推定には大枠としては ExoJAX という既存のリトリバルフレームワークを使用しているが、今回の観測に合わせた独自の要素として地球大気の透過光と主星光の漏れ込みを考慮してパラメータとして追加し、これらを同時にフィットするという解析を初めて行なった。主星光の漏れ込みは、データにみられる主星光の Paschen  $\beta$  を用いて評価している。今回の解析では H<sub>2</sub>O と FeH を検出し、大気中の雲の存在を仮定した場合としていない場合それぞれで混合比の推定値を出し、FeH についてはクエンチングによって熱平衡からずれている可能性を議論した。また、上述の REACH の周期ノイズをリトリバルに取り込む方法を提案している。

本論文において開発された IRD や REACH のデータの半自動的に一次処理パイプラインは、今後の暗い天体の観測に広く有用であると考えられる。また、新しい装置である REACH のデータ解析の中で発見し特徴付けた周期的なノイズの存在は、今後の同様の装置やポストプロセス手法を開発する上で重要な知見となっている。高コントラスト高分散

分光観測に適した解析手法を初めて実装、評価し、データの一次処理から大気組成の推定まで一連の枠組みを構築したことは、今後の同様のターゲットの大気観測を展開する上での基盤を提供していると考えられることから、学位の授与に値すると判断した。