OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Toward Accurate Spectroscopic Characterization of Exoplanetary Atmospheres: A Retrieval Study of the Benchmark Brown Dwarf Binary Luhman 16AB
Author(s)	山, 響
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105672
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　山　響　）	
論文題名	Toward Accurate Spectroscopic Characterization of Exoplanetary Atmospheres: A Retrieval Study of the Benchmark Brown Dwarf Binary Luhman 16AB （分光観測による太陽系外惑星大気の高精度な特徴づけに向けて：ベンチマーク褐色矮星連星 Luhman 16AB のリトリーバル解析）

論文内容の要旨

これまでに6000個を超える太陽系外惑星が発見されており、その大気の性質を観測的に特徴づける研究が急速に進展している。近年では、地上大型望遠鏡における極限補償光学と高分散分光器の組み合わせにより、系外惑星の高分散分光観測が可能となり、詳細な大気の特徴付けが実現している。特に、観測スペクトルから大気物理状態を推定する逆問題フレームワークであるリトリーバル解析では、分子検出のみならず、その存在量や温度-圧力構造（T-P profile）を推定できる。このようなリトリーバル解析は、現在では系外惑星大気を特徴づける方法として広く用いられている。

分子存在量から推定される大気の元素組成は、巨大ガス惑星の形成過程を理解する上で重要な手がかりとなる。中でも、巨大ガス惑星大気の炭素-酸素（C/O）比は、ガス惑星形成過程として提唱されているコア（ペブル）集積モデルと、星形成に類似した重力不安定モデルとで異なる振る舞いを示す可能性が指摘されている。しかし、既存の観測結果からは、形成過程の違いがC/O比に明確に反映されているのかについては、未だ統一的な理解には至っていない。

このような議論を進展させる上で、巨大ガス惑星と同様の大気を持つ褐色矮星は重要な比較対象となる。褐色矮星は星形成に類似した過程で形成されると考えられており、また、系外惑星より明るく高S/Nのスペクトルが得られるので、そのC/O比は重力不安定モデルで形成されるガス惑星の基準となりうる。一方で、これまでにC/O比が測定された褐色矮星のサンプル数は限られている。さらに、C/O比の比較で問題となる、リトリーバル解析における大気モデルの違い（大気不透明度の計算に用いる分子吸収線データベースやT-P profileパラメタリゼーションの違い）に起因した系統誤差については、ほとんど検証されていない。

本研究では、VLT/CRIRESで取得されたベンチマーク褐色矮星連星Luhman 16ABの高分散近赤外スペクトルをリトリーバル解析した。Luhman 16ABは太陽系近傍に存在し明るいため、高S/Nのスペクトルが利用でき、さらに質量や距離などの別の観測による制約も豊富である。そのため、Luhman 16ABはC/O比の基準として重要であると同時に、大気モデルに起因する系統誤差の検証や、新たな解析手法の試験に最適である。

まず、power-law型のT-P profileを用いた解析を行い、CO吸収線データベースの選択による分子存在量およびC/O比推定への影響を定量評価した。次に、Gaussian processに基づく柔軟なT-P profileを開発し、大気熱構造の非パラメトリックな推定と、温度不定性のよりコンサバティブな評価を可能とした。その結果、両天体ともに推定されたC/O比は0.67程度で、太陽値よりわずかに大きいことがわかった。また、CO吸収線データベース間で約7%の系統的な誤差を生じ、大気モデルに起因する系統誤差の主要因であることが明らかとなった。一方、T-P profileのパラメタリゼーションや光度変動による系統誤差は、相対的に小さいことが分かった。本研究の結果は、Luhman 16ABを褐色矮星やガス惑星におけるC/O比測定の重要な基準として位置づけるとともに、高分散スペクトルに対する柔軟なT-P profileの有用性を示している。さらに、褐色矮星と巨大ガス惑星の大気組成をロバストに比較するためには、特に分子吸収線データベース選択の影響を含む系統的な誤差の検証が不可欠であることを示している。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　山 響　）		
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　教授	住　貴宏
	副 査　教授	松本 浩典
	副 査　教授	寺田 健太郎
	副 査　教授	松尾 太郎
	副 査　准教授	増田 賢人

論文審査の結果の要旨

博士論文: Toward Accurate Spectroscopic Characterization of Exoplanetary Atmospheres: A Retrieval Study of the Benchmark Brown Dwarf Binary Luhman 16AB （分光観測による太陽系外惑星大気の高精度な特徴づけに向けて：ベンチマーク褐色矮星連星 Luhman 16AB のリトリーバル解析）の審査結果の要旨は次のとおりである。本研究は、近年急速に発展している系外惑星および褐色矮星大気研究における中心的課題である高分散分光データのリトリーバル解析の高精度化と、その系統的不確実性の定量的評価を目的とした研究である。これまでに 6000 個を超える系外惑星が発見され、大気組成の精密測定は惑星形成過程の理解に直結する重要課題となっている。とりわけ巨大ガス惑星大気の炭素-酸素比（C/O 比）は、コア（ペブル）集積モデルと重力不安定モデルという異なる形成シナリオを区別する可能性を持つ指標として注目されている。しかしながら、リトリーバル解析に内在するモデル依存性、とりわけ分子吸収線データベースや温度-圧力構造（T-P profile）のパラメタリゼーションに起因する系統誤差については、これまで十分な検証がなされていなかった。

本研究は、太陽系近傍に位置し高い S/N の分光データが得られるベンチマーク褐色矮星連星 Luhman 16AB の VLT/CRIRES 高分散近赤外スペクトルを対象に、詳細なリトリーバル解析を実施した。Luhman 16AB は質量や距離などに関する独立の観測制約が豊富であり、褐色矮星大気研究のみならず、巨大ガス惑星との比較における基準天体として極めて重要な対象である。まず、power-law 型 T-P profile を用いた従来型の解析により、CO 吸収線データベースの違いが分子存在量および C/O 比推定に与える影響を体系的に評価した。さらに、Gaussian process に基づく柔軟な T-P profile を新たに導入し、熱構造を非パラメトリックに推定する枠組みを構築した。この手法により、温度構造の不定性をより保守的かつ客観的に評価することを可能とし、高分散スペクトルに対するリトリーバル解析の信頼性向上に寄与した点は特に高く評価できる。解析の結果、Luhman 16AB の両成分において C/O 比は約 0.67 と推定され、太陽値よりわずかに高い値を示すことが明らかとなった。また、CO 吸収線データベースの選択により約 7%の系統的差異が生じることを定量的に示し、分子吸収線データの不確実性がリトリーバル解析における主要な系統誤差要因であることを初めて明確に示した。一方で、T-P profile のパラメタリゼーションや光度変動に起因する影響は相対的に小さいことも示され、系統誤差の支配要因を整理した点も本研究の重要な成果である。

本論文は、褐色矮星をガス惑星大気組成比較の基準天体として位置づけるとともに、今後の高分散分光観測および大気リトリーバル解析において不可欠となる系統誤差評価の枠組みを提示したものであり、系外惑星科学および褐色矮星研究の発展に大きく寄与する成果であると認められる。以上のことから、本論文は学術的価値が高く、独創性および発展性を十分に有しており、博士（理学）の学位に値するものと判断する。