

異星の空を覗き込む： 系外惑星大気研究の未来を築く



Stevanus Kristianto Nugroho 訳：宇佐美昂成

〈アストロバイオロジーセンター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: stevanus.nugroho@nao.ac.jp, skristiantonugroho@gmail.com

太陽系外惑星大気の特徴づけは、宇宙望遠鏡および地上望遠鏡における観測技術の飛躍的な進歩によって新たな時代に突入している。その中でも、高分散分光は強力な観測手法として台頭しており、現在までに発見されている極端な惑星環境の一部において、原子・分子種の明確な検出、風のパターンの測定、化学不平衡状態の調査を可能にしている。本稿では、すばる望遠鏡やその他の施設に搭載された高分散分光器を用いた、昼面の温度が2200 Kを超える巨大ガス惑星である超高温木星（Ultra Hot Jupiter; UHJ）の研究について我々の成果を示す。我々の研究は、超高温木星の大気で見られる熱的・化学的プロセスの重要な兆候を明らかにした。具体的には、WASP-33bからの放射における酸化チタン（TiO）、中性鉄（Fe I）、およびヒドロキシラジカル（OH）の初検出、そしてKELT-20bにおけるFe Iとイオン化カルシウム（Ca II）の原子シグナルの検出である。これらの結果は、UHJにおける熱的逆転層の存在、大気循環、およびエネルギー収支に新たな制約を与え、高分散分光が大気物理・化学過程といった詳細な大気プロセスを探るための強力な手法であることを示している。すばる望遠鏡や今後の超大型望遠鏡（ELT）に搭載される次世代機器の登場により、これらの成果は比較太陽系外惑星学の基礎を築き、多様な系外惑星における大気の気候や化学、惑星の形成過程についてより深い理解をもたらすと考えている。

はじめに

今年は、太陽に似た恒星を周回する最初の太陽系外惑星51 Peg bの発見から30周年を迎える [1]。51 Peg bは巨大ガス惑星であり、視線速度法を用いて発見された。しかし我々の太陽系の惑星（例えば木星や土星）とは異なり、わずか4.23日の公転周期で主星のごく近くを周回している。このため、平衡温度は1000 Kを超える。現在では、一般的に「ホットジュピター」と呼ばれている。このような惑星は潮汐固定、すなわち片方の半球が常に恒星の方を向いているため、昼面と夜側の間に大きな温度差が生じると広く考えられてい

る。51 Peg bの発見は画期的で、従来の惑星形成理論に異議を唱えるとともに、特に惑星の軌道移動の観点から惑星系の進化を再検討させた。

系外惑星大気分野は、初のトランジットを起こす太陽系外惑星HD 209458 bの発見の直後に大きな飛躍を遂げた [2]。HD 209458 bは、太陽に似た恒星を周回するホットジュピターであるのに加えて地球から見て周期的に主星の前を通過（トランジット）する公転軌道を持つ。このトランジットと呼ばれる現象中、ごく一部の恒星の光が惑星の大気を透過する。その透過光スペクトルは、惑星大気中の原子や分子による吸収と散乱の痕跡を含んでおり、その化学組成と構造を推測す

ることを可能にする [3, 4].

HD 209458 bの発見以来、トランジットを起こす何千もの太陽系外惑星が発見され、透過分光法は、太陽系外惑星の大気を研究する最も強力なツールの1つとなっている。特にハッブル宇宙望遠鏡 (HST) やスピッツァー宇宙望遠鏡による多数の追観測により、 H_2O や Na [5] を含む主要な大気種の検出が可能になった。

トランジットを起こす系は、昼面放射分光法 [6, 7] と呼ばれる技術を用いて惑星の昼面を研究することも可能にする。この方法は、惑星が見えているときに観測される全フラックスと、二次食 (惑星が恒星の後ろを通過し一時的に隠れるとき) 中に観測されるフラックスとを比較するものである。これら2つの測定値の差分を用いて、惑星の熱放射を分離する。昼面放射分光法は、大気組成と、一般的に温度-圧力 (T-P) プロファイルとして表される垂直温度構造の両方に制約を与えることが可能である。

大気層の熱的な逆転構造

初期の大気研究から明らかになった特に重要な概念の1つは、熱的逆転層の可能性である。これは、地球の成層圏と同様に、高度とともに温度が上昇する大気層である。地球では、このような逆転層は、オゾン (O_3) による太陽紫外線 (UV) 放射の吸収によって生成される。しかし、ホットジュピターの大気では、高温のためオゾンが形成されない。代わりに、理論的研究では、酸化チタン (TiO) や酸化バナジウム (VO) のような他の高温の光吸収体が同様の役割を果たし、恒星の放射を吸収して上層大気を加熱する可能性を示唆している [8, 9].

これらの逆転層を引き起こす種が存在するかどうかは、惑星のT-Pプロファイルだけでなく、その放射エネルギー収支、大気循環、および化学にも重大な影響を及ぼす。よって熱的逆転層が形成される条件を理解することは、この分野の中心

的な問題となった。しかし、 TiO と VO の存在を観測的に確認することは、非常に困難であることが示されている。宇宙望遠鏡による測光観測や低分散分光観測 (例: WFC3/HST) は暫定的な証拠を提供したが [10–12], そのようなスペクトル分解能では機器の系統誤差あるいは他の分子種による吸収線が同じ波長に重複してしまうことから、従来のスペクトル分解能では分子の特徴を理解するのに不十分であることが多い。

高分散分光を用いた太陽系外惑星大気の特徴づけ

大きな転機は、地上からの高分散分光観測の開発とともに訪れた。重要なマイルストーンは、超大型望遠鏡 (VLT) [13] の極低温高分散能赤外エシエル分光器 (CRIRES) [14] を用いて、HD 209458bの大気中の一酸化炭素 (CO) を検出したことである。

この検出は、惑星のトランジット中 (または二次食中) とトランジット外 (または食外) の観測で得られるフラックスの差分を利用して惑星の信号を分離する手法とは異なる手法を用いて行われた。それは視線速度の差 (ドップラーシフトの変化) を利用した手法である。主星に近接した惑星の場合、惑星の視線速度はたった1回のトランジット中であっても、数十から数百 km/s 変動する可能性がある。このドップラーシフトの変動により、惑星の信号を、比較的静止している (恒星および地球大気由来のスペクトル線から分離することができる (図1を参照)。高分散分光は高いスペクトル分解能により、吸収の特徴を個々の分子線に分解することができる。個々のスペクトル線からの信号は弱いものの、 CO , H_2O , TiO のような分子は、数千から数百万もの多数のスペクトル線を持っているため、これらの総合的な情報に対してモデルスペクトルとの相互相関をとることで、信号対雑音比 (S/N比) を大幅に向上させ、信頼度の高い検出を達成することができる。高分

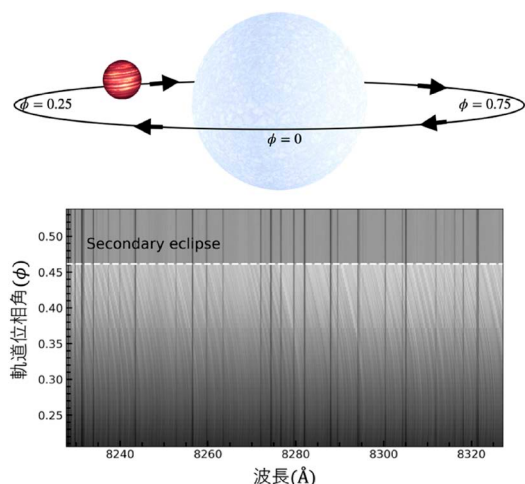


図1 主星の近くを公転する惑星が公転する際にスペクトルがドップラーシフトする仕組みを示す模式図。惑星のドップラーシフトにより時系列スペクトルに特徴的な傾斜した明るい軌跡が生じる。図において軌道位相角0.47以下の範囲に見られる右下がりの白い傾斜線が、惑星由来のスペクトル線（惑星ライン）に相当する。対照的に、静止した垂直の暗い線は地球大気吸収線に対応し、波長が固定されたままとなる。Secondary eclipseは二次食を指す。

分散分光は、分子種の確実な検出や、地上からの温度勾配の調査を可能にするだけでなく、風や自転などの大気力学の研究、そして低分散分光では困難または不可能な非トランジット惑星の大気研究への道も開くと考える [13, 15, 16]。この技術はこの分野に革命をもたらし、太陽系外惑星大気分光法の新時代を切り開いた。

この進歩に触発され、私は共同研究者とともに、特にすばる望遠鏡の高分散分光器（HDS）と赤外ドップラー装置（IRD）を使用して、ホットジュピターなどの主要な大気種を特定するための高分散分光の強みを最大限活かした研究に取り組んできた。以下では、これらの極端な惑星大気における化学、力学、およびエネルギー収支を解き明かす一連の発見に焦点を当てる。

WASP-33bの大気におけるTiOの検出

私たちの研究の主要な動機の一つは、超高温木星（UHJ、平衡温度が2200 Kを超えるホットジュピター）の大気における酸化チタン（TiO）の存在と、熱的逆転層を駆動する可能性を明らかにすることであった。この目的に最適なターゲットの一つが、昼面温度が3000 Kを超えるほどの強力な恒星光を浴びる惑星 WASP-33b である [17, 18]。その主星は明るく、高速で自転を行う δ Scuti 型 A 型星であり、恒星のスペクトル線が少ない上に高い S/N が得られる昼面放射分光法に理想的な対象である。

私たちはすばる望遠鏡の高分散分光器（HDS）[19] を使用して、WASP-33b の二次食直前までの約10時間にわたる高分散放射分光観測を実施した。当時、HDS は8 m 級望遠鏡で利用可能な分光器の中で最高のスペクトル分解能を有しており、他のどの地上大型望遠鏡に搭載された分光器よりも吸収（または放射）バンドを詳細に分解できた。この性能を最大限に活用するため、最高の波長分解能が得られるモードで観測を行い [20]、6170–8817 Å の波長範囲と $R=165,000$ の分解能を達成した。この範囲は、TiO の強いスペクトル線の多くをカバーしつつ、惑星対恒星のフラックス比が増加する長波長側までカバーできるよう最適化されたものである。

しかし、この波長域のスペクトルは恒星と地球大気由来の多数の吸収線に支配されており、適切に除去しなければ惑星信号は容易に埋もれてしまう。したがって、相互相関を実行する前にこれらの寄与を取り除くことが不可欠である。恒星スペクトルは時系列スペクトルから中央値を差し引くことで効果的に除去できる。一方、地球大気スペクトルはより変動が大きく、エアマスや湿度の変動により強度が変化するため、より詳細な補正が必要となる。

これらの地球大気スペクトルを補正するために、

私たちはデトレンドアルゴリズムを使用した。その基本原理は、地球大気スペクトルの強度変動がスペクトル全体で相関しており、このスペクトル全体の共通傾向を主成分分析（PCA）などの手法で特定・除去できるというものである。私たちは、トランジットサーベイの光度曲線から系統的傾向を除去するために開発されたSysRem [21] というアルゴリズムを採用した。SysRemは機能的にはPCAに類似しているが、各データポイントの不確かさを組み込んでおり、地上ベースの分光データでは特に重要である。このアルゴリズムは地上大気由来のノイズの除去に有効に機能し、高分散分光観測による太陽系外惑星の様々な大気種の検出を可能にした [22–30]。

ここで地球大気補正後のデータに相互相関を適用する前に、比較に使用される惑星スペクトルモデルの精度を慎重に考慮する必要がある。相互相関はデータをモデルスペクトルと照合することで機能するため、その結果はモデルの品質、特に関連する全遷移に対する正確な波長（エネルギー）位置と遷移強度を含む分子線リストの精度に大きく依存する。

TiOに関しては、従来文献で入手可能な分子線リストを HARPS[31] で観測されたバーナード星の高分散スペクトルと比較した際、一部波長域で不正確であることが報告されている。しかし、TiOは数百万もの分子線を有するため、個々の分子線の信頼性を評価するのは困難である。そこで私たちは同一装置、条件で得られたバーナード星のHDSスペクトルとTiOの分子線リストがよく一致するスペクトル次数のみを選択した。これらの「良質なスペクトル次数」を使用し、TiOモデルスペクトルのグリッド全体に相互相関解析を適用した。

その結果、WASP-33bの昼面におけるTiO放射のスペクトルを明確に検出し、成層圏の存在を示す強力な直接証拠を得た（図2参照）[24]。これは高分散分光観測によるTiOの初検出であるのみ

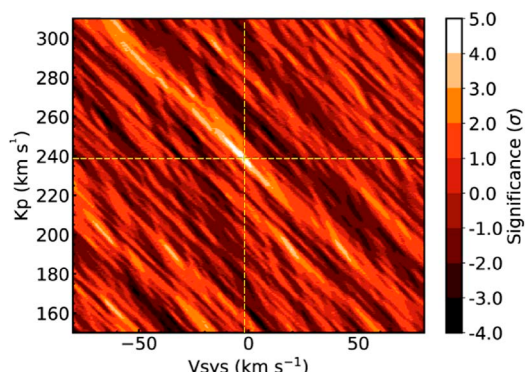


図2 惑星のドップラーシフトの半値全幅 (K_p) と惑星が属する恒星系の太陽重心に対する速度 (V_{sys}) の値の範囲を仮定して相互相関法より足し合わせたTiOの検出有意性の図。図中の点線は予想される惑星の K_p と V_{sys} において最も有意なシグナルが得られた位置を示している。カラーバーのグリッド間隔は 1σ である。(Nugroho et al. 2017[24] の図に和訳を加えて改変)

ならず、可視高分散分光観測を用いて太陽系外惑星大気中の複雑な分子バンドを持つ化学種の初の検出例でもあった。この成果は、TiOのような高高度の光吸収体が一部のホットジュピター大気で観測される熱的逆転層の形成に寄与するという仮説をさらに強固なものとする。また、TiOのような密で構造的な分子バンドを有する分子種の解析において、可視高分散分光観測が宇宙の低分散観測を強力に補完する技術として有効であることも示した。

WASP-33bの鉄原子の放射シグナルの検出

WASP-33は δ -Scuti型星であり、そのスペクトルには強い非対称振動が見られる。これらの振動が引き起こす変動は、特に透過分光観測において惑星大気と恒星光球の両方に存在する化学種の検出に大きな障壁となる。例えば、惑星からのFe I線は軌道運動によってドップラーシフトするが、WASP-33は視線方向の自転速度 ($v \sin i$) が 86 km/s と非常に速いため、恒星のFe II線と重な

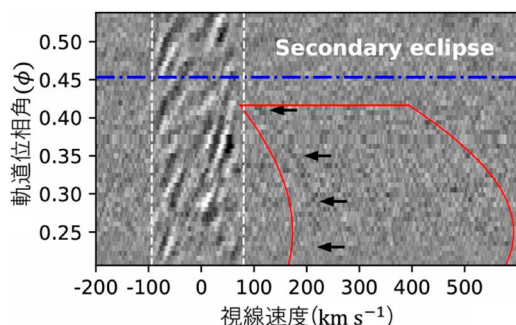


図3 左図: デトレンドアルゴリズムSysRem [21] を用いて地球大気吸収線を除去した後の観測スペクトルに対してFe Iの相互相関関数 (CCF) を計算した図。垂直方向の2本の破線で挟まれた領域はWASP-33の自転によるシグナルを示している。水平方向の一点破線は二次食 (Secondary eclipse) の時刻を示す。4本の矢印は検出された惑星信号の位置を強調表示しており、惑星のドップラーシフトが主星の自転速度に比べ大きく、主星由来のシグナルと分離可能であることがわかる。主星のシグナルによる影響を避けるため、実線で囲まれた領域を利用することで、主星と惑星の分離に成功した。(Nugroho et al. 2021[27] の図に和訳を加えて改変)

る可能性がある。幸いにも、HDS / すばる望遠鏡での観測中、惑星のドップラーシフトは恒星に対して100 km/sを超えており、惑星の信号を恒星線から明確に分離することができた。これにより、WASP-33bの昼面におけるFe I放射線の検出を可能にした (図3および4[25])。注目すべき点は、これらの観測がTiO検出に使用したものと同一データセットから得られたことであり、このデータセットの持つ優れたシグナル検出力と豊かな情報量を示している [24]。

この検出は、変動する恒星を周回する太陽系外惑星大気中の原子線を高分散昼面放射分光で初めて検出したものであり、低分散分光では極めて困難または不可能な成果である。さらに、この検出は強力な恒星光を浴びる超高温木星の理論的予測と私たちの以前の研究結果に一致し、Fe Iが恒星光の多くを吸収することによりWASP-33bの大

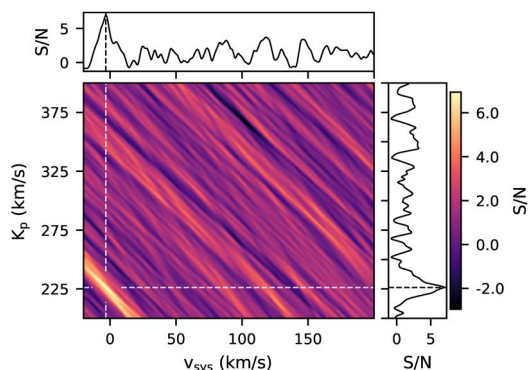


図4 Fe Iの最適モデルのS/Nマップ (縦軸、横軸は K_p および v_{sys} 値の範囲)。破線はマップ内で $S/N \approx 6.9$ のピークを示す。上段および右パネルは、それぞれ $K_p = 226.0$ km/sおよび $v_{\text{sys}} = -3.2$ km/sにおける相関関数 (CCF) を示す。カラーバーはS/Nを示す [25]。

気に熱的逆転層が存在することを強く裏づけている [11, 24]。

太陽系外惑星大気におけるOHの初検出

超高温木星の熱構造は、大気の加熱に寄与する光学的不透明度と、大気を冷却する赤外線不透明度のバランスによって支配される。Fe I, Fe II, Na I, Ti Iなどの金属原子は恒星からの相当量の紫外線や可視光を吸収するため、TiO/VOが存在しなくても観測可能な熱的逆転層を引き起こす可能性がある [32]。一方、 H_2O , CO , CH_4 , HCN などの赤外線冷却の機能を果たす分子は近・中間赤外領域に多くの回転スペクトルを持ち、高温のガス中では効率的に赤外線を宇宙空間へ放出するため、大気が冷却される。しかし、これら分子が不足すると、大気からの赤外線放射が減少し、吸収された恒星からの光が宇宙空間へ放射されず、大気がより高温になる可能性がある [33, 34]。極端な温度によって引き起こされる熱解離は、超高温木星における赤外線冷却分子の存在量を減少させ、 H^- による吸収と相まって、超高温木星の低分解能スペクトルで観測される弱い H_2O のスペ

クトルフィーチャーを説明できる可能性がある [11, 35].

最近の研究で、私たちはIRD /すばる望遠鏡 [36, 37] を使用して、超高温木星 WASP-33b の近赤外線昼面を観測した。この観測により、WASP-33b の昼面におけるヒドロキシラジカル (OH) の放射を検出した (図5参照) [27]。一方、 H_2O は弱いシグナル検出となった。このOHの検出、 H_2O の弱い検出は、WASP-33b の極めて高温の大気中で H_2O の解離が進行していることを強く示唆しており、理論的予測と一致しているため、特に重要な結果である [33, 34]。そしてこの発見は、太陽系外惑星大気のエネルギー収支における各化学種の役割を詳細に理解するために、高分散分光観測で吸収・放射の特徴を理解することの重要性を示しており、「太陽系外惑星の大気でOHが初めて検出された」事例である。さらに、IRDによる高分解能観測は、検出されたOH信号の個々の振動バンドを分解することも可能にす

る。追跡調査として、私たちは太陽系外惑星の放射スペクトルにおける非熱平衡効果を探すための新しい方法を開発した。最初のOH検出に使用したデータに加え、IRDでの追加2夜分の観測を分析することで、最も強い2つのOH振動バンドを検出し、それらの相対強度が熱平衡状態を仮定した予想と一致することを発見した [42]。

KELT-20bにおける原子シグナル

WASP-33bにおける複数の分子種検出の成功を踏まえ、我々は高分散透過分光光スペクトル解析を用いて、比較的低温な大気を持つ超高温木星 KELT-20b の大気中の原子種を調査した。WASP-33b に対して適用した昼面の放射光分光とは異なり、透過分光では昼面、夜面の両領域における上層大気の探査が可能になる。また、この惑星はA型星を周回しており、主星からの強烈な紫外線放射が惑星の上層大気を著しく変化させることが予想されるため、上層大気におけるイオン化された原子種の検出の主要なターゲットである。

ガリレオ国立望遠鏡の分光器 HARPS-N と カラレ・アルト天文台の分光器 CARMENES で得られた透過光スペクトルを用いて、KELT-20b の大気中の中性鉄 (Fe I)、イオン化鉄 (Fe II)、ナトリウム二重線 (Na I D)、およびイオン化カルシウム (Ca II) のシグナルを検出した [26]。特に Ca II H と K 線は、大気の最上層を探査するプローブであり、これらの検出はおそらく脱出が進行中の、高温で膨張した上層大気存在を示唆している。興味深いことに、Fe I シグナルは特徴的な二重ピーク構造を示し、惑星の静止フレームに対して青方偏移していた (図6を参照)。この特徴は、Fe I が光学的に不透明な高度での強い赤道風を示唆している可能性がある。KELT-20b 大気における原子検出の成果は異なる種に対して異なる大気層と力学構造を探査していることを示唆している。これらの発見は KELT-20b の大気の複雑な原子組成を明らかにするだけでなく、その垂直方向の力学構造

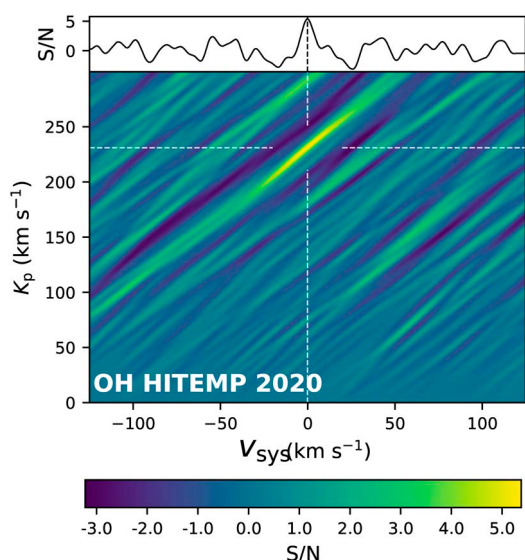


図5 HITEMP 2020 分子線リストを用いて作成した OH の S/N マップ [38–41]. 破線はマップ内の最高ピークを示し、S/N は ≈ 5.4 である。上段は $K_p = 230.9 \text{ km/s}$ における CCF を示す。カラーバーは S/N を示す [27].

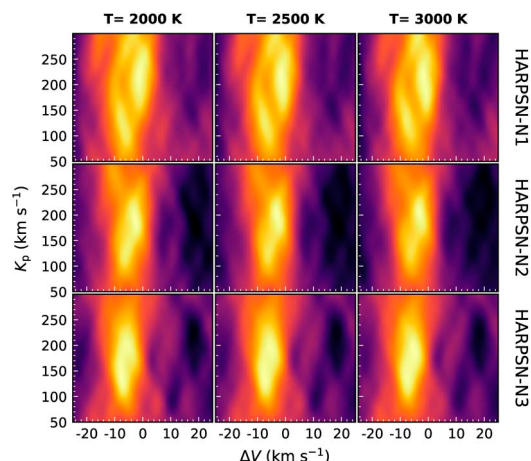


図6 Fe IのS/Nマップ(モデル温度: 2000 K, 2500 K, 3000 K. 横軸は K_p , 縦軸は系全体の速度に対するドップラーシフト(ΔV)で図2の V_{sys} とは異なるパラメータである. 予想される惑星信号の位置付近を除いたマップの標準偏差を採用している. 各行は異なるHARPS-Nデータセットを用いた相互相関の結果を示す. 本論文で示された他の検出信号と比較して特異的な二重ピークまたはダイヤモンド形状の信号が確認できる [26].

に関する重要な知見を与える. このような観測は, 早期型星を周回する太陽系外惑星大気, 温度プロファイル, 化学的組成, 風のパターンを含む多次元的な特性を制約する上で特に価値がある.

将来展望

これらの発見は, 極端な温度によって特異な化学的・力学的挙動を示す超高温木星大気の全体像を構築するための広範な取り組みの一部である. 私は, この研究を複数の方向に展開している. 特に高分散分光器を用いて, 超高温木星大気の3次元特性(様々な高度, 緯度, 経度における化学組成, T-Pプロファイル, 風など)の解明に取り組んでいる [43–46]. さらに, これらの技術を土星型惑星, サブネプチューン, スーパーアースといった, より低温または小型の惑星にも適用している [30, 47].

すばる望遠鏡や将来のELT級望遠鏡に搭載さ

れる次世代高分散分光器は, 太陽系外惑星大気研究に新たなフロンティアを開くであろう. これにより, 微小な信号の検出, 多様な惑星の特徴づけ, そして大気化学と惑星形成・進化の関係解明が可能になる. ELT時代では, 効率が最重要となる. 可視光と近赤外線領域を同時にカバーする高スループット・超高分散分光器が, 理想的な地上観測機器となるだろう.

4000 Åより短い波長への観測範囲の拡張は, Fe I, Fe II, Mg I, Ti I, Si I, V I, Ca II, TiO, VO, AlO [26, 44, 48, 49]といったホットジュピターの主要な原子・分子種の検出に不可欠である. さらに5 μm まで拡張することで, HCN, CH₄, SiO, SO₂, C₂H₂など, より低温の大気の特徴づけるために特に重要な分子の観測が可能になる [50].

可視光と近赤外線の同時観測は実用面でも大きな利点がある. 恒星活動をリアルタイムで観測できること(M型矮星や若い星周辺での惑星の誤検出排除に不可欠) [51–53] や, 惑星形成過程の重要な指標となる耐熱性物質と揮発性物質の比率測定が可能になることなどが挙げられる [54, 55]. さらにこの広範な波長範囲によって, 単一の観測で垂直的な化学勾配や大気力学を探索することができる [56, 57].

超高スペクトル分解能($R \approx 300,000$)の達成も重要である. これにより地球大気による吸収線の影響を最小限に抑えるだけでなく, 雲層上部の探査, 不均一な大気中の狭い線幅を持つスペクトル線の分解, そして自転・風・局所的な化学情報を含む微細な線形変動の検出をも可能にする [26, 58, 59].

総じて, 太陽系外惑星大気の特徴評価の未来は非常に明るいものである. 観測能力とモデル化技術の急速な進歩により, 私たちは前例のない精度と幅広い手法を駆使できる時代に突入している. 過去の経験と専門知識を活かし, 私はこの発展にコミュニティと共に貢献し続け, 太陽系外惑星大気の特徴づけ研究での日本のリーダーシップ確立

を支援したいと考えている。

参考文献

- [1] Mayor, M., & Queloz, D., 1995, *Nature*, 378, 355
- [2] Charbonneau, D., et al., 2000, *ApJ*, 529, L45
- [3] Brown, T. M., 2001, *ApJ*, 553, 1006
- [4] Charbonneau, D., et al., 2002, *ApJ*, 568, 377
- [5] Sing, D. K., et al., 2019, *AJ*, 158, 91
- [6] Charbonneau, D., et al., 2005, *ApJ*, 626, 523
- [7] Seager, S., et al., 2005, *ApJ*, 632, 1122
- [8] Hubeny, I., et al., 2003, *ApJ*, 594, 1011
- [9] Fortney, J. J., et al., 2008, *ApJ*, 683, 1104
- [10] Knutson, H. A., et al., 2008, *ApJ*, 673, 526
- [11] Haynes, K., et al., 2015, *ApJ*, 806, 146
- [12] Evans, T. M., et al., 2017, *Nature*, 548, 58
- [13] Snellen, I. A. G., et al., 2010, *Nature*, 465, 1049
- [14] Kaeuff, H.-U., et al., 2004, *Proc. SPIE*, 5492, 1218
- [15] Brogi, M., et al., 2012, *Nature*, 486, 502
- [16] Brogi, M., et al., 2016, *ApJ*, 817, 106
- [17] Collier Cameron, A., et al., 2010, *MNRAS*, 407, 507
- [18] De Mooij, E. J. W., et al., 2013, *A&A*, 550, A54
- [19] Noguchi, K., et al., 2002, *PASJ*, 54, 855
- [20] Tajitsu, A., et al., 2012, *PASJ*, 64, 77
- [21] Tamuz, O., et al., 2005, *MNRAS*, 356, 1466
- [22] Birkby, J. L., et al., 2013, *MNRAS*, 436, L35
- [23] Birkby, J. L., et al., 2017, *AJ*, 153, 138
- [24] Nugroho, S. K., et al., 2017, *AJ*, 154, 221
- [25] Nugroho, S. K., et al., 2020a, *ApJ*, 898, L31
- [26] Nugroho, S. K., et al., 2020b, *MNRAS*, 496, 504
- [27] Nugroho, S. K., et al., 2021, *ApJ*, 910, L9
- [28] Gibson, N. P., et al., 2020, *MNRAS*, 493, 2215
- [29] Gibson, N. P., et al., 2022, *MNRAS*, 512, 4618
- [30] Rafi, S. A., et al., 2024, *AJ*, 168, 106
- [31] Hoeijmakers, H. J., et al., 2015, *A&A*, 575, A20
- [32] Lothringer, J. D., & Barman, T., 2019, *ApJ*, 876, 69
- [33] Lothringer, J. D., et al., 2018, *ApJ*, 866, 27
- [34] Parmentier, V., et al., 2018, *A&A*, 617, A110
- [35] Arcangeli, J., et al., 2018, *ApJ*, 855, L30
- [36] Tamura, M., et al., 2012, *Proc. SPIE*, 8446, 84461T
- [37] Kotani, T., et al., 2018, *Proc. SPIE*, 10702
- [38] Rothman, L. S., et al., 2010, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 111, 2139
- [39] Brooke, J. S. A., et al., 2016, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 168, 142
- [40] Yousefi, M., et al., 2018, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 217, 416
- [41] Noll, S., et al., 2020, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 5269
- [42] Wright, S. O. M., et al., 2023, *AJ*, 166, 41
- [43] Herman, M. K., et al., 2022, *AJ*, 163, 248
- [44] Maguire, C., et al., 2023, *MNRAS*, 519, 1030
- [45] Ramkumar, S., et al., 2023, *MNRAS*, 525, 2985
- [46] Ramkumar, S., et al., 2025, *A&A*, 695, A110
- [47] Ridden-Harper, A., et al., 2023, *AJ*, 165, 170
- [48] Hoeijmakers, H. J., et al., 2018, *Nature*, 560, 453
- [49] Hoeijmakers, H. J., et al., 2019, *A&A*, 627, A165
- [50] Gandhi, S., et al., 2020, *MNRAS*, 495, 224
- [51] Krolikowski, D. M., et al., 2024, *AJ*, 167, 79
- [52] Allan, A. P., & Vidotto, A. A., 2025, *MNRAS*, 539, 2144
- [53] Allart, R., et al., 2025, *A&A*, 700, A7
- [54] Lothringer, J. D., et al., 2021, *ApJ*, 914, 12
- [55] Chachan, Y., et al., 2023, *ApJ*, 943, 112
- [56] Seidel, J. V., et al., 2023, *A&A*, 678, A150
- [57] Seidel, J. V., et al., 2025, *Nature*, 639, 902
- [58] Gandhi, S., et al., 2020b, *MNRAS*, 498, 194
- [59] Rukdee, S., 2024, *Scientific Reports*, 14, 27356

Peering into Alien Skies: Building the Future of Exoplanet Atmospheric Studies

Stevanus Kristianto NUGROHO

Astrobiology Center, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: The characterisation of exoplanet atmospheres has entered a transformative era, driven by breakthroughs in both space- and ground-based observations. Among these, high-resolution spectroscopy has emerged as a powerful technique—enabling the unambiguous detection of atomic and molecular species, the measurement of wind patterns, and the investigation of chemical disequilibrium in some of the most extreme planetary environments known. In this article, I summarise our contributions to the study of ultra-hot Jupiters (UHJs)—gas giants with dayside temperatures exceeding 2500 K—using high-dispersion spectrographs on the Subaru Telescope and other facilities. Our work has revealed key signatures of thermal and chemical processes at play in UHJ atmospheres, including the first detections of titanium oxide (TiO), iron (Fe I) and hydroxyl radical (OH) in emission from WASP-33b, and atomic features of Fe I and Ca II in KELT-20b. These results offer new constraints on temperature inversions, atmospheric circulation, and the energy budget of UHJs, and demonstrate the power of high-resolution spectroscopy to probe atmospheric processes in detail. With the advent of next-generation instruments on Subaru and upcoming ELTs, these efforts will lay the groundwork for comparative exoplanetology and a deeper understanding of climate, chemistry, and formation histories across a diverse range of worlds.