

固有運動の加速に着目した巨大惑星と褐色矮星伴星の直接撮像

葛原 昌 幸

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

e-mail: m.kuzuhara@nao.ac.jp

2000年から2020年は8 m級望遠鏡において補償光学を利用した直接撮像探査により、恒星の数十 au を公転する褐色矮星や木星の数倍以上の質量をもつ巨大惑星の発見が大きく進んだ。しかし同時に、それらの天体の存在率はおおよそ10%以下である可能性も示唆された。これは、新しい惑星や褐色矮星質量の伴星を発見するには大量の望遠鏡時間を投入する必要があることを意味する。そこで、我々はこの低い検出率を克服するために、Gaiaと1990年代に活躍したHipparcosの高精度アストロメトリデータに着目した。この二つの宇宙望遠鏡のデータから導出される恒星の固有運動の加速はその恒星を公転する伴天体の存在を示す指標として利用できる。その探査の結果、我々は褐色矮星以下の質量をもつ伴天体を複数発見することに成功した。本稿では我々の進めている固有運動の加速に着目した褐色矮星と巨大惑星の探査について報告する。

1. 惑星と褐色矮星伴星の直接撮像

系外惑星や褐色矮星は非常に暗く、恒星との明るさのコントラストが極めて大きい。それらが太陽のような恒星を公転している場合、中心星に対するコントラストは一声 10^{-4} から 10^{-7} 以下になる(例: [1])。したがって、それらの検出には高い角度分解能に加えて、高いダイナミックレンジを達成することが求められる。そのために鍵になる観測機能が地球大気によって乱れた波面を補正して、スペースで得られるようなクリーンな星像を実現する補償光学である。補償光学装置がすばる望遠鏡やKeck望遠鏡などの8 mを超える大きさの主鏡を搭載した地上大望遠鏡において利用可能になったことで、太陽系外の巨大惑星を直接撮像することが現実的になった。さらに、通常の補償光学よりも波面補正能力を2倍以上向上させた極限補償光学も8 m級望遠鏡で2015年あたりから利用されるようになってきた。これらの技術的

進歩はHR 8799や β Picなどの恒星を公転する巨大惑星の検出に結びついた(例: [2, 3])。日本のすばる望遠鏡でも通常の補償光学装置であるAO188を利用して、系外惑星を直接撮像により探査する計画であるSEEDS計画が2009年に始まり、GJ 758やGJ 504, そして κ Andの周囲で褐色矮星質量の伴星や巨大惑星を検出したことを報告している [4]。

これらの探査は、太陽系には存在しないような質量が木星の数倍以上かつ軌道長半径が数十 au の巨大惑星を発見するのと同時に、そのような巨大惑星や褐色矮星の存在頻度も決定した。例えば、極限補償光学装置をGemini南天望遠鏡で利用した探査計画では、約300の恒星を観測して新規に発見した巨大惑星と褐色矮星質量の伴星はそれぞれ一つずつであった [5]。さらに同探査から、軌道長半径が10-100 auの範囲で質量が木星質量(M_{Jup})の5倍から13倍の範囲の巨大惑星の存在率は9.4%と推定されている(褐色矮星の存

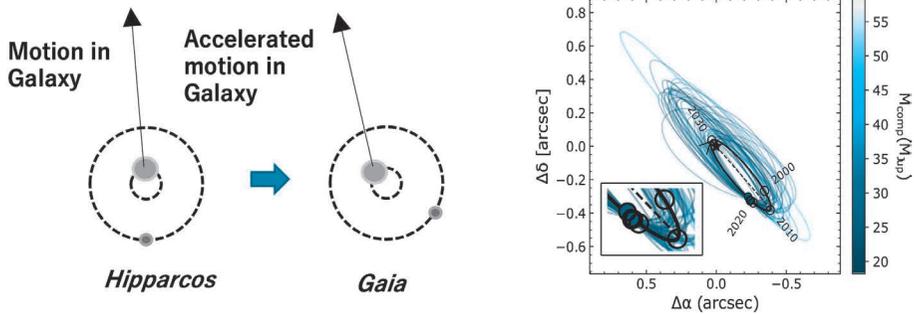


図1. (左) 伴天体による固有運動加速の原理図。主星（大きな円で図示）の固有運動が伴星（小さな円で図示）の重力的な影響により加速する様子を示す。(右) HIP 21152Bの天球面上の軌道[6]。図中の(0, 0)の座標に存在する中心星に対するHIP 21152Bの位置は塗りつぶしの丸で示されている。白抜き丸は2000, 2010, 2020, 2030年でのHIP 21152Bの予測される位置。楕円はフィッティングから導出されたHIP 21152Bの軌道として可能性のある解をランダムに抽出したもの。軌道には質量の違い(右側のカラーバー)を反映した色がついているがカラーの図はweb版を参照。画像クレジット: アストロバイオロジーセンター。

在率はさらに低く、 $0.8^{+0.8}_{-0.5}\%$ [5]。これらの探查結果は、現状の直接撮像観測用装置の性能で検出可能な巨大惑星や褐色矮星伴星の存在率を統計的に導出することに成功したが、同時にそのような天体が発見される確率が非常に低いことも意味する。したがって発見しサンプルを増やすという目的のためには、通常のブラインド探查は貴重な望遠鏡時間の節約という観点からは効率的ではないと言える。

2. 直接撮像による発見確率を上げる

より効率的な直接撮像による惑星や褐色矮星の発見が実現できれば、それらの特徴づけを行うためのサンプルを増大させることが可能になり、またその特徴を比較することで惑星や褐色矮星の研究が大きく前進することが期待できる。では、より高い検出確率を実現するためにはどうすべきだろうか？まず考えられるのは、感度やコントラストの面で観測装置を大幅に改良する必要があるだろう。装置の改良は日進月歩であり、系外惑星を直接撮像するためには必要不可欠な要素である。一方、効率的な探查方法を構築することもまた重要な課題である。そこで我々は、系外惑星や褐色矮星伴星の存在を示す指標として「固有運動

の加速」に着目した探查を行ってきた。恒星は固有運動と呼ばれる独自の速度情報を持って銀河系内を運動している。もしもある恒星を何かしらの伴天体が公転する場合はその恒星の固有運動は伴天体の重力的な影響により加速する。したがって、その加速は伴天体を示す指標として利用可能である(図1参照)。さらに、褐色矮星や惑星によって引き起こされる固有運動の加速は非常に小さい値であるが、2013年のGaia望遠鏡の打ち上げによりその測定が現実的なものとなった。特に、Gaia望遠鏡と1990年代に活躍したHipparcos望遠鏡の測定データを比較することで約25年のベースラインで固有運動の加速を導出することができるが、この長期ベースラインは直接撮像観測に適した伴天体の存在を裏付ける指標に適している。

我々の共同研究者であるTimothy Brandt氏はHipparcosとGaiaの異なるカタログを比較することで生じる系統誤差を処理し、太陽近傍の恒星の固有運動の加速のカタログを出版している [7, 8]。我々は、その固有運動加速のカタログから、惑星や褐色矮星質量の伴星を保持する可能性が高くなおかつ直接撮像に適した特性(具体的には距離や年齢)を持つ恒星を選定し、それらをすばる

望遠鏡の極限補償光学装置SCEXAOと近赤外面分光器CHARISを用いて観測している。その探査は2018年から開始されたが、これまで二つの褐色矮星伴星と惑星質量に迫る伴天体、さらには多くの恒星質量の伴星を新たに発見した。固有運動加速の測定を直接撮像観測に利用するもう一つの長所は、その情報を検出した伴天体の軌道決定にも適用できることである。これにより、本稿で説明するように最終的には検出した伴天体の質量を力学的に決定できるようになるため、直接撮像観測で通常利用される光度進化モデルによる質量決定の不定性の影響を取り除くことができる。また同時に、光度進化モデルによる質量決定の方法を検証することも可能になる。

本稿の残りの部分で、まずは我々の探査におけるターゲット選定について簡単に説明した後、それにより得られた研究成果のハイライトを紹介したい。

3. ターゲット選定

本研究では、HipparcosとGaiaの測定から作成された固有運動加速のカatalog [7, 8] を利用して惑星や褐色矮星に相当する質量の伴天体を保持する恒星を選出する。固有運動加速 (a_{ad}) の大きさと伴天体の質量 (M_B) の関係は、

$$M_B \propto \rho^2 \frac{(a_{\text{ad}}^2 + a_{\text{RV}}^2)^{3/2}}{a_{\text{ad}}} \quad (1)$$

として表せる [9]。ここで、 a_{RV} は視線速度における加速を示し、 ρ は中心星と伴天体の間の離角を示す。 a_{RV} が不明の場合が多いが、 $a_{\text{RV}}=0$ とすると式(1)は伴天体の最小質量と等価である。このように、 a_{ad} と ρ がわかれば M_B (の最小値)が予測できる。 ρ は伴天体が直接撮像されるまでは決定できないので、ターゲット選定ではパラメータとして扱う。ターゲット選定では、図2で示すように ρ の関数として期待される M_B が直接撮像観

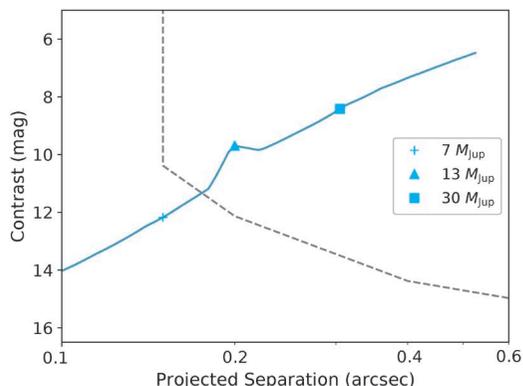


図2. 固有運動の加速に対応した伴天体の期待されるコントラストと直接撮像装置の検出限界の比較(模式図)。横軸は中心星からの離角 (projected separation= ρ) を示し、縦軸は中心星と伴天体のコントラストを示す。破線は [10] の論文に基づいたSCEXAOとCHARISの観測で期待される検出限界に相当する。実線はある質量と年齢の伴天体が固有運動において加速を導くときに、その天体がどれくらいのコントラストになるかを示す。本文中の説明のように伴天体の予測される質量は離角に依存しているので、コントラストも離角に依存する。質量からコントラストへの変換には光度進化モデルが利用される(例: [11])。実線の上の+、▲、■の印は図中の右に示した質量に相当する離角とコントラストに対応する。破線よりも実線が上にあるパラメータの伴天体は検出可能である。

測装置の検出限界と比較して検出可能かどうかを検討する。直接撮像観測では光度進化モデルを利用して惑星や褐色矮星の質量を光度やコントラストに変換する。それらの天体の光度は重力収縮により保たれており質量以外のパラメータにも依存し、中でも重要なのが年齢である(参考: [4])。したがって、これらの天体の光度を推定するにはその年齢も事前に推定しておく必要がある*1。また、その年齢が若いときの方が光度が大きいため、より若い系を観測した方が検出は一般的に容易になる。そこで、我々の探査では年齢決定の精

*1 惑星や褐色矮星はその主星の年齢や所属する運動学的星団や散開星団の年齢と等しいと仮定できる。

度や確度も重視してターゲットを選定している。最終的に、目的とする候補天体の質量、年齢、観測装置の検出限界の三つを評価して観測ターゲットを選定する。その際に、視線速度や高空間分解能の撮像データが文献や天文データアーカイブに存在する場合は、固有運動の加速を引き起している天体が恒星の伴星であるかどうかを事前に判別するために利用する。我々はこのようにして選定したターゲットをすばる望遠鏡の共同利用プログラムを通して観測し、以下で報告するように興味深い発見を得た。

4. ヒアデス星団の太陽型星を公転する褐色矮星の直接撮像による初発見

本章で述べる研究成果についての詳細や参考文献については [6] を参照されたい。HIP 21152 はヒアデス散開星団に所属する F5 型の恒星である。ヒアデス散開星団の年齢として、[6] の研究では 7.5 ± 1.0 億年を採用した。我々は HIP 21152 を 2020 年に SCEXAO と CHARIS を用いて初観測し、HIP 21152 から約 0.4 秒角の離角に伴星 (HIP 21152B) を検出した (図 3)。

HIP 21152B が背景星でなく、その中心星に重力的に束縛されていることは、2020 年の 12 月に改めて行った SCEXAO と CHARIS による観測、同じく 2020 年 12 月に行った Keck 望遠鏡の NIRC2 による観測、さらに 2021 年 10 月に行った SCEXAO と CHARIS による合計 4 回の直接撮像観測で確かめた。直接撮像観測とは別に、岡山 188 cm 望遠鏡の HIDES を用いて HIP 21152 の視線速度測定を 2020 年 2 月から 2 年間行った。2011 年の 12 月から約 1 年間の期間で HIDES を用いて取得していた HIP 21152 の視線速度測定データも利用した。これらの直接撮像と視線速度測定データを Hipparcos と Gaia の固有運動の測定データに組み合わせて、HIP 21152B の軌道を推定した (図 1 参照)。さらにその結果に基づいて、HIP 21152B の質量を $27.8^{+8.4}_{-3.4} M_{\text{Jup}}$ と力学的に決定

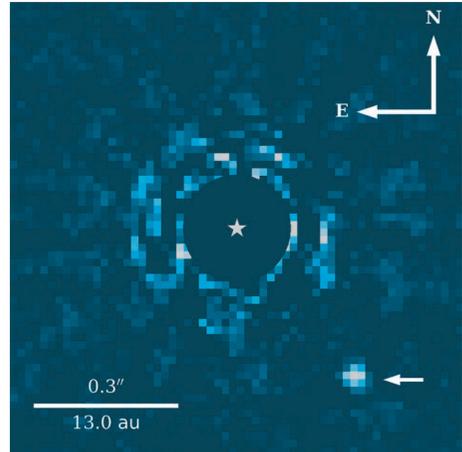


図 3. 褐色矮星 HIP 21152B の直接撮像画像。図中の矢印は HIP 21152B の星像を指す。中心星 (位置は星印で示す) 付近はコロナグラフに加えてソフトウェアによってマスクがされている。画像クレジット: アストロバイオロジーセンター。

した。HIP 21152B の年齢 (ヒアデス星団の年齢と等しいと仮定) と観測データに基づいて見積もられたその光度を光度進化モデル [11] と比較することで HIP 21152B の質量は $33\text{--}42 M_{\text{Jup}}$ と推定される。このように、光度進化モデルに基づいた推定は HIP 21152B の質量をわずかながら過剰評価していることがわかった。

CHARIS は面分光器であるため撮像と同時に分光も可能である。図 4 に HIP 21152B の近赤外スペクトルを示す (データは [6] から引用)。HIP 21152B のスペクトル型は $T1.5^{+0.5}_{-1.0}$ と推定され、L 型から T 型に遷移する境界のスペクトルを持つことがわかっている。L 型から T 型へのスペクトル型の遷移は温度だけでなく、その大気中のダスト (雲) の量と強く関連することが一般的に示唆されている (例: [12])。直接撮像された HR 8799 の惑星も同様に L から T 型に遷移する境界のスペクトルに似た特徴を持つことが知られており (例: [2])、その類似性という観点からも HIP 21152B は興味深い天体である。

HIP 21152B はヒアデス星団の太陽型星を公転

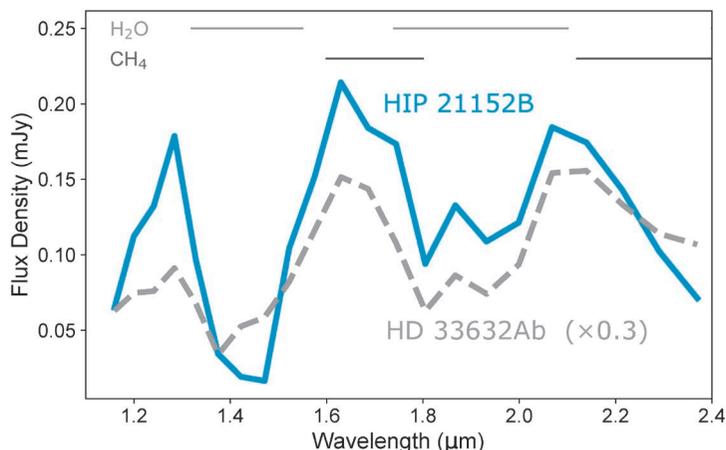


図4. 褐色矮星 HIP 21152B (実線) と HD 33632Ab (破線) の近赤外スペクトル。大気中に存在すると期待される水蒸気とメタンのガスによる吸収の波長帯をそれぞれ図中の上部に横線で示す(吸収波長帯はジュネーブ大学提供のウェブツール [13] を参考にして表示)。HD 33632Ab のスペクトルのフラックス密度は表示のために本来の値から0.3倍している。

する初めての褐色矮星の発見である。そのため年齢推定に関しては精度と確度の両面で信頼性が高く、加えてその質量は力学的に推定されておりその点でも確度が高い。これらの特徴は他の直接撮像された惑星や褐色矮星を評価する際の比較対象となる基準(ベンチマーク)として期待できるものである。例えば、力学的に推定された質量と光度から推定された質量を比較することで光度進化モデルの検証が可能となる。また、力学的に質量が導出されている褐色矮星の中ではHIP 21152Bは最も惑星に近い質量を持つ。この特徴は、上で説明したようにスペクトルの特徴がL型とT型の境界ということに加えて、直接撮像された惑星に対する比較対象として重要な点である。このように、HIP 21152Bの発見は系外惑星や褐色矮星の研究における重要なベンチマーク天体を新たに見つけ出したという点で高い意義がある。

5. 恒星 HD 33632A を公転する褐色矮星の発見

本章の詳細な説明や参考文献は発見論文である [14] を参照されたい。我々の固有運動の加速に着目した探査から、実際に褐色矮星質量の伴星を

発見した最初のターゲットはHD 33632Aである。HD 33632Aは太陽から約27 pcの距離にあるF8型星であり、約900 au離れたところにM型の恒星(HD 33632B)を伴っていることが知られている。

我々は2018年の10月に初めてHD 33632AをSCEXAOとCHARISを用いて観測した。また、その際に取得したデータから伴星HD 33632Abを発見した(図5)。その同年にKeck望遠鏡のNIRC2を用いた観測を行い、さらに2度の観測を2020年にSCEXAOとCHARISを用いて行った。その約2年間にわたる合計4度の観測で、HD 33632Abは主星に重力的に束縛されていることを確認した。さらにHIP 21152Bへ適用したものと同様の軌道解析から、HD 33632Abの質量を $46.4^{+8.5}_{-9.5} M_{\text{Jup}}$ と力学的に導出した。発見論文 [14] の発表時ではGaiaの二回目のデータ公開(Gaia DR2)に基づいた固有運動加速 [7] のデータを利用していたが、3回目のデータ公開に対応するEDR3に基づく固有運動加速 [8] のデータを利用した場合の質量測定は後続の論文 [15] で報告されており、 $50^{+5.6}_{-5.0} M_{\text{Jup}}$ と決定されている。また、その力学的質量測定の結果は光度進化モデルを用いた推定との整合性がよい [15]。

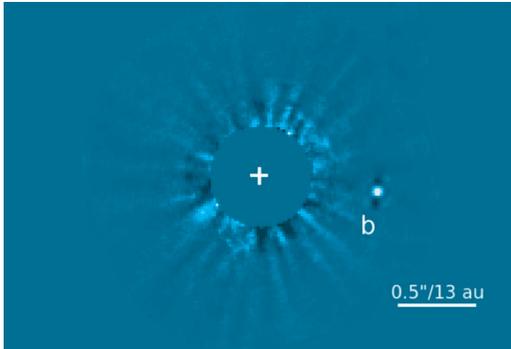


図5. 褐色矮星伴星HD 33632Abの直接撮像画像。中心星（位置は十字で示す）付近はコロナグラフに加えてソフトウェアによってマスクがされている。伴星の像は“b”の文字で示されている。画像クレジット：T. Currie, テキサス大学サンアントニオ校/国立天文台。

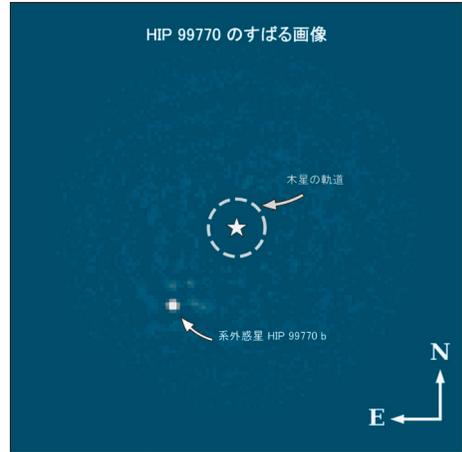


図6. HIP 99770bの直接撮像画像。中心星（位置は星印で示す）付近はマスクがされている。画像クレジット：T. Currie, すばる望遠鏡/テキサス大学サンアントニオ校

HD 33632Abの発見は、直接撮像観測を高精度アストロメトリに組みわせて褐色矮星質量の伴星や惑星を発見する方法の有効性を示した点で意義がある。図4にHD 33632Abのスペクトルを示す（データは [14] から引用）。またHIP 21152B同様にHD 33632AbもL型とT型の境界のスペクトル型を持つため、LからT型へのスペクトル型の遷移と低温天体の大気の関係の研究する際のベンチマーク天体にもなりうる。

6. 恒星HIP 99770を公転する惑星質量天体

我々は、地球から約41 pcの距離にあるA型の恒星であるHIP 99770に対するSCEXAOとCHARISを用いた直接撮像観測を2020年の7月に初めて実行し、さらに2021年の11月まで合計6回の観測を行い、伴天体HIP 99770bを確認するに至った [16] (図6参照)。その合計6回の観測の中にはKeck望遠鏡のNIRC2による1回の観測も含まれる。以下でHIP 99770bの特徴やその発見の意義について述べるが、その詳細について

はサイエンス誌の論文 [16] を参照されたい。カタログ [8] に基づくHIP99770のもつ固有運動加速の信号の有意性は 2.2σ と大きくないが、加速を生み出している伴天体が中心星から0.5秒角に存在し、視線速度の寄与を無視した場合の伴天体の質量（式(1)参照において）は $11 M_{\text{Jup}}$ と導出された。伴天体HIP 99770bは実際の観測から中心星の南東方向のおよそ0.4秒角のところに検出された。合計6回の直接撮像観測と固有運動加速のデータに対する軌道解析から、HIP 99770bの力学的質量は $16.1^{+5.4}_{-5.0} M_{\text{Jup}}$ と導出された*2。また、軌道長半径は $16.9^{+3.4}_{-1.8} \text{ au}$ と決定された。スペクトル型はHIP 21152BやHIP 33632Ab同様にL型とT型の境界のスペクトル型を持っていることが、CHARISによって取得した分光データを分析することでわかった。さらに、分光データの分析から有効温度は $1400^{+200}_{-200} \text{ K}$ と決定されている。

HIP 99770の年齢は約4千万年、もしくは1.15億年から4.14億年の間と推定されている。その場合に、HIP 99770bの光度を光度進化モデルを

*2 マルコフチェーンモンテカルロ法を用いたフィットの際に伴天体の質量に対して一様分布の事前分布を仮定した場合。

用いて質量に換算すると $8 M_{\text{Jup}}$ もしくは $11\text{--}32.5 M_{\text{Jup}}$ となり、どちらも力学的質量の値と近い（後者はエラーの範囲内で一致している）。観測が今後進むことで軌道決定の精度が向上し、力学的質量の導出精度の改善も見込まれる。その結果、HIP 99770の年齢推定の検証も可能になる。HIP 99770bの力学的質量はエラーの範囲内では一致しているが、惑星の一般的な定義である重水素が燃焼を起こさない天体質量の上限である $13 M_{\text{Jup}}$ よりもわずかに大きい。ただし、原始惑星系円盤から惑星が形成される過程と重水素の燃焼を起こす質量に明確な関係性があるわけではないはずである^{*3}。

[16]の論文では重水素の燃焼が開始する質量とは別の観点で、HIP 99770bとその中心星の質量比に基づいてHIP 99770bを惑星と呼ぶべきかどうかを議論している。その質量比の値はおよそ0.01であり、それは他の系外惑星とその中心星の質量比に近い。形成される惑星の質量の大小が中心星の質量の大小（厳密にはその周囲の原始惑星系円盤の質量）と相関する可能性 [17] を考慮すると、質量比の方が惑星を指し示す指標として適切であるかもしれない。いずれにせよ、HIP 99770bの発見は、固有運動加速を指標として発見された伴天体の中で惑星質量に漸近する天体として初めての発見である点で大きな意義がある。

7. それ以外の成果と今後の展望

上記三つの成果以外にも我々の観測プロジェクトはいくつかの重要な成果を得ている。我々の探査では、ターゲット選定の段階では伴天体候補の質量が確定できないため、実際に撮像を行うと（中心星から比較的離れた距離を公転する）M型星質量の伴星ということがありえる。そのような天体はスナップショットを得るだけで判別可能なことが多いので、観測時間を大きく圧迫すること

はないが、ターゲットとしての優先度は下がる。しかし、複数回の撮像を行い、Hipparcos-Gaiaの固有運動加速のデータと組み合わせることで、検出した伴星の軌道や質量の力学的な推定が可能になる。その結果、最終的には褐色矮星質量の伴星を検出した場合と同様に、恒星の年齢推定の方法や恒星の測光・分光データからその質量を推定する方法を検証することが可能になる。これまでに我々はSCEXAOとCHARISを用いて、HIP 109427, HD 91312, HIP 5319の恒星の周囲でM型星質量の伴星を検出しており、そのデータを上記の目的に利用した [18–20]。これらの3天体に対する解析からは、力学的に導出された質量は測光や分光学的なデータから推定した質量と整合性のある結果が基本的には得られているが、条件によっては矛盾する場合も得られている。これらのターゲット以外からも同様の伴星が検出されており、それらの観測データも含めてより統計的な検証ができれば、恒星の光度進化モデルや年齢の推定方法をより強く制限できるだろう。褐色矮星や惑星の質量に相当する伴天体やその候補天体の発見もなされている。

我々は現在も直接撮像探査から得られたデータの解析を継続しており、今後も面白い天体が継続的に発見されることが期待できる。HIP 21152BやHD 33632Abも含めて発見された天体については、分光観測によるフォローアップをすることで、それらの発見天体を特徴づけることができる。例えばすばる望遠鏡のREACH[21]を利用することで波長分解能が10万程度の高分散分光観測が可能になる。それにより、すでにHR 8799の惑星に対して行われているように、吸収線の理論モデルと観測された複数の吸収線の自己相関関数から自転速度を測定することができる [22]。巨大惑星や褐色矮星伴星の自転に対する観測的な制限がまだ乏しいため、サンプルを増やす意義は

*3 $13 M_{\text{Jup}}$ の質量を超えると急に一般的な過程で惑星が形成されなくなることは想像しにくい。

大きい。また高分散分光は大気を構成する物質の組成を調べるのにも有効であり、その情報は検出天体の起源を明らかにするヒントにもなる [23]。さらに、地球大気の影響で観測が難しい $3\ \mu\text{m}$ よりも長い近赤外の波長帯や中間赤外線波長帯の分光や測光観測を JWST を用いて行うことができれば、高精度アストロメトリと地上直接撮像観測の連携から検出した褐色矮星や巨大惑星の大気の詳細により迫ることが可能となる。

地上からの直接撮像や視線速度の観測を継続することで、軌道に対する制限はより強くなる。HIP 21152B や HD 33532Ab の離心率の測定はいまだ誤差が大きい [6, 15] が離心率の情報は形成起源を考えるヒントになるため、継続的な観測を通して誤差を小さくしていく必要がある。軌道決定の改善は質量測定の誤差を小さくすることにもつながり、最終的には進化モデルの制限を含めた様々な問題に対して重要である。

Gaia のデータ公開と更新は今後も継続される。それによって、固有運動の測定値の改善や、Hipparcos と Gaia の間のベースラインがより長くなることが期待できる。その結果、最終的に固有運動加速の測定精度が改良されることでより小さい質量の伴天体の検出や軌道決定につながる。また、Gaia から現在公開されているアストロメトリデータは固有運動や距離などの限られたものになっているが、データ公開が更新されるたびに公開される情報の種類も増えていく。2025 年の末までに期待されている 4 回目のデータ公開には、アストロメトリで検出された系外惑星のリストも含まれる予定である [24] (詳細は本特集の福井氏の記事を参照)。それらの新たに公開される種類のアストロメトリのデータからも、直接撮像に適したターゲットを選出できるかもしれない。

直接撮像用の装置の改良はすばる望遠鏡だけでなく、世界中の様々な望遠鏡で進んでいる。また条件が合えば、JWST や Roman などの宇宙望遠鏡の利用も効果的だろう。Gaia のデータ公開と

直接撮像用の装置開発の進展の相乗効果によって、褐色矮星や巨大惑星のサンプルが今後ますます増加していくはずである。発見の後は、特徴づけの研究が進むことで、褐色矮星や巨大惑星の大気の物理的／化学的特性の理解が深まる。多量で多様なサンプルを調査対象とすることで、より統計的かつ包括的な研究が展開されるだろう。固有運動加速に着目した直接撮像の探査は、国際的には我々のグループだけでなく、すでに複数の研究チームが開始している。事実、HIP 21152B はヨーロッパとアメリカの研究チームによって独立に検出されている [25, 26]。さらに、太陽型星 AF Lep を公転する質量が約 $3 M_{\text{Jup}}$ の惑星の検出が複数のチームによってなされている [27-29]。我々は固有運動加速を利用したターゲット選定に基づいた直接撮像探査を海外のチームと協力して進めることも開始している。これらの観測計画を通して、褐色矮星や巨大惑星に対する我々の知見が大きく開拓されるだろう。宇宙望遠鏡による高精度アストロメトリと最新技術の深化によって駆動される 2020 年代後半の系外惑星と褐色矮星の直接撮像観測に大いに期待したい。

謝辞

この記事執筆する機会を与えてくださった 2022 年度の天文月報編集委員の福井暁彦さんに感謝します。本稿で紹介した研究成果は高精度位置天文用宇宙望遠鏡である Gaia と Hipparcos のデータがなければ得られなかったものです。両宇宙望遠鏡のプロジェクトに携われたすべての関係者の方に深く感謝します。また、すばる望遠鏡の直接撮像用装置 SCEXAO と CHARIS の観測が本稿で紹介した研究において大きく活躍しております。両装置の開発および運用チームの方々を中心に、コロナ禍の中ですばる望遠鏡の観測や運用に携われたすべての方にも深く感謝致します。ほかにも上記研究成果を得るにあたって貢献していただいたすべての関係者の方にお礼を申し上げた

と思います。すべての共同研究者の方々の協力なしには本稿で紹介する記事の研究の実現はあり得ませんでした。中でも早い段階でGaiaとHipparcosの両方の測定に着目し固有運動の加速データの有用性に気がつき、それを実際に研究に応用できるところまで落とし込んだカリフォルニア大学サンタバーバラ校のTimothy D. Brandt氏に感謝いたします。本稿で紹介した成果はBrandt氏が構築された固有運動加速のカタログ [7, 8] と軌道解析ソフトウェア“orvara” [30] が多く利用されています。大学院生のときにBrandt氏と共同研究を開始するきっかけを得られたのは著者の人生における最大の幸運の一つです。ありがとうございます。

参考文献

- [1] Burrows, A., et al., 2001, *Rev. Mod. Phys.*, 73, 719
 [2] Marois, C., et al., 2008, *Science*, 322, 1348
 [3] Lagrange, A. M., et al., 2010, *Science*, 329, 57
 [4] 葛原昌幸, 工藤智幸, 2016, *天文月報*, 109, 257
 [5] Nielsen, E. L., et al., 2019, *AJ*, 158, 13
 [6] Kuzuhara, M., et al., 2022, *ApJ*, 934, L18
 [7] Brandt, T. D., 2018, *ApJS*, 239, 31
 [8] Brandt, T. D., 2021, *ApJS*, 254, 42
 [9] Brandt, T. D., et al., 2019, *AJ*, 158, 140
 [10] Currie, T., et al., 2020a, *SPIE Conf. Ser.*, 11448, 114487H
 [11] Baraffe, I., et al., 2003, *A&A*, 402, 701
 [12] Kirkpatrick, J. D., 2005, *ARA&A*, 43, 195
 [13] <https://dace.unige.ch/opacity/> (2023.4.20)
 [14] Currie, T., et al., 2020b, *ApJ*, 904, L25
 [15] Brandt, G. M., et al., 2021, *AJ*, 162, 301
 [16] Currie, T., et al., 2023, *Science*, 380, 198
 [17] Mordasini, C., et al., 2012, *A&A*, 541, A97
 [18] Steiger, S., et al., 2021, *AJ*, 162, 44
 [19] Chilcote, J., et al., 2021, *AJ*, 162, 251
 [20] Swimmer, N., et al., 2022, *AJ*, 164, 152
 [21] Kotani, T., et al., 2020, *SPIE Conf. Ser.*, 11448, 1144878
 [22] Wang, J. J., et al., 2021, *AJ*, 162, 148
 [23] Zhang, Y., et al., 2021, *A&A*, 656, A76
 [24] <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/release> (2023.4.20)
 [25] Bonavita, M., et al., 2022, *MNRAS*, 513, 5588
 [26] Franson, K., et al., 2023a, *AJ*, 165, 39
 [27] Franson, K., et al., 2023b, *arXiv e-prints*, arXiv:2302.05420
 [28] De Rosa, R. J., et al., 2023, *A&A*, 672, A94
 [29] Mesa, D., et al., 2023, *A&A*, 672, A93
 [30] Brandt, T. D., et al., 2021, *AJ*, 162, 186

Direct Imaging of Giant Planets and Brown Dwarf Companions Focusing on Proper Motion Accelerations

Masayuki KUZUHARA

Astrobiology Center and National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: A lot of successes have been made in direct imaging of giant planets and brown dwarfs at orbital distances of tens of au from their parent stars. This has been achieved by high-contrast direct imaging observations using adaptive optics in 8-m class telescopes. However, the occurrence rate of these objects is less than 10%, suggesting the requirement of a huge amount of telescope time to discover new giant planets and brown dwarf companions. We overcome the low detection rate of blind surveys by initiating a direct imaging survey that employs a new concept of target selection; we focus on astrometric measurements from the Gaia and Hipparcos space telescopes. Any acceleration in the proper motion of a star observed by those space telescopes indicates the presence of a companion orbiting that star. Thus, our survey has used the acceleration information as a signature of a planet or brown dwarf, leading to discover multiple substellar companions. Here we report on the progress of our direct imaging campaign that focuses on the proper motion acceleration to explore giant planets and brown dwarfs.