

SEEDSによる直接撮像観測から発見された 太陽近傍の恒星を周回する系外惑星と褐色矮星

葛原 昌幸¹・工藤 智幸²

〈¹東京工業大学 〒152-8551 東京都目黒区大岡山2-12-1 石川台2号館; ²国立天文台ハワイ観測所 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, U.S.A.〉

e-mail: ¹m.kuzuhara@geo.titech.ac.jp; ²kudotm@subaru.naoj.org

2009年の開始以後、SEEDSでは多くの近傍恒星を直接撮像し、系外惑星や褐色矮星の直接撮像探査を行った。その結果、太陽型の恒星であるGJ 504やGJ 758、より質量の大きな恒星であるB型星 κ Andを公転する系外惑星や褐色矮星を発見した。また、発見後に行った追加観測から、これらの天体の特徴づけを行い、SEEDSで発見された系外惑星や褐色矮星はユニークな特徴をもつことを明らかにした。それらの発見は巨大惑星や褐色矮星の形成や進化の研究に対して重要な糸口になると考えられる。本稿では、太陽近傍の恒星の直接撮像観測から発見された系外惑星や褐色矮星の観測的特徴や起源を論じる。また、それらの結果を踏まえて、直接撮像による系外惑星の研究に対して、残された問題や今後の研究への展望を述べる。

1. はじめに

直接撮像観測は系外惑星や褐色矮星を発見するためだけでなく、その特徴を詳しく調べること(特徴づけ)にも有効である。また、その特徴づけを通して、それらの天体の起源や進化について議論を進めることが可能になる。特に、数十AUの軌道を周回する惑星(大軌道惑星)や褐色矮星の伴星の観測は、他の手法では困難である一方、直接撮像法が得意としている。それらの天体の検出と特徴づけに関して直接撮像はこれまで主要な役割を担ってきた。実際に、これまで直接撮像観測で見つかった系外惑星の特徴づけから、その惑星の起源や進化を議論することが進められている。例えば、A型の恒星HR 8799を公転する惑星HR 8799cの大気を分光観測することで、そのC/O比が調べられており、その値に基づいて惑星の起源が議論されている¹⁾。そのほかには、若い恒星である β Picを公転する惑星の軌道が詳しく

調べられており、その惑星は $9.2^{+1.5}_{-0.4}$ AUの軌道長半径をもつと推定されている²⁾。軌道の情報もまた惑星の起源を調べる重要な要素になりうる。このように大軌道惑星や褐色矮星伴星の検出とその特徴づけは、それらの形成過程や進化を制限する重要な手がかりになる。しかし、それらの天体のサンプル数は非常に限られており、特徴についてあまりよくわかっていない。

系外惑星を検出し、それを特徴づけることは、もちろんSEEDSにおいても主要な目標の一つである。SEEDSでは、合計三つの惑星・褐色矮星を新たに直接撮像することに成功した。また、それらの天体はユニークな特徴をもつものであった。本稿では、SEEDSで検出した恒星GJ 504、 κ And、GJ 758を公転する惑星、または褐色矮星伴星について説明する。また、それらの結果を踏まえた今後の系外惑星の直接撮像観測の展望について、簡潔に論じる。

2. GJ 504b

GJ 504は乙女座の方向、約18 pcの距離³⁾に存在する。また、GJ 504は太陽と同じG型のスペクトル型をもつ恒星であるが、その恒星パラメータを分析した結果、質量が太陽の約1.2倍、年齢が $1.6^{+3.5}_{-0.6}$ 億年の若い主系列星として分類された⁴⁾。この年齢は、「恒星の自転周期や活動性がその年齢と相関をもつ関係」⁵⁾に基づいて推定された値である。GJ 504は金属量が比較的高い([Fe/H]=0.28)という特徴もある⁶⁾。SEEDSでは高コントラスト近赤外線カメラHiCIAOと補償光学AO 188を用いて2011年にGJ 504を観測し、本天体から約44 AU離れた場所に、初めて直接撮像で伴星(GJ 504b)を発見した(図1参照)。SEEDSでは2012年までに7度の観測を行い、この伴星が主星に付随した「惑星」であることを確認した。また、*J* (~1.3 μm)、*H* (~1.6 μm)、*K_s* (~2.1 μm)、*L'* (~3.8 μm)バンドのフィルターを用いた多波長観測による測光結果から、惑星の質量は木星質量(M_{Jup})の $4^{+4.5}_{-1}$ 倍(図2参照)であり、他の直接撮像された系外惑星と比べ「低温(約500 K)」で「青

い(比較的雲が少ない大気をもつ)」(図3参照)ということも判明した⁴⁾。さらに、メタンの吸収が起きる波長の狭帯域フィルター(CH4L)と、吸収が起きない波長の狭帯域フィルター(CH4S)を利用した撮像を二つ同時に行った結果、CH4SのみでGJ 504bが検出された。これは、GJ 504bの大気にメタンが存在することを示唆する観測結果である⁸⁾。

本発見の特筆すべき点は二つある。一つは惑星の質量の推定結果が光度進化モデルの初期条件不定性に対してほとんど依存していないことである。惑星の質量を推定するには、年齢による光度の変遷、すなわち惑星の光度進化理論と比較する必要がある。しかし、現在有望と考えられるすべてのモデルが、それぞれモデルの中で採用した初期条件に依存した不定性をもっているため、質量推定の結果に不定性が生じるという問題を抱えている⁹⁾。例えば、これまでHR 8799の系¹⁰⁾に代表されるように、多くの系外惑星と呼ばれるものが直接撮像されているが、それらは採用したモデルによっては $13 M_{\text{Jup}}$ を超える(つまり惑星ではなく、褐色矮星と分類)推定値が導かれる。しかし、年齢が1億年以上になると初期条件を変えて

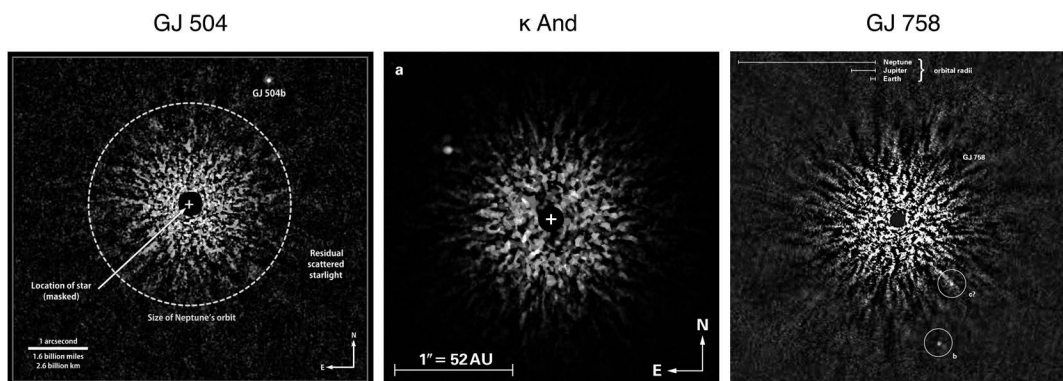


図1 SEEDSで直接撮像された惑星や褐色矮星。(左) 太陽型恒星GJ 504の*JH* 2色合成図; クレジット: NAOJ/NASA's Goddard Space Flight Center. 北西の方向に存在する光源が惑星GJ 504b. その中心星との射影距離は約44 AU. 破線の円は太陽系の海王星の軌道の大きさに相当。(中) B型星 κ Andの直接撮像結果(*JHK_s* 3色合成図; クレジット: NAOJ/Subaru/J. Carson (チャールストン大学)/T. Currie (ハワイ観測所)). 北東の光源が惑星候補天体 κ And b. 中心星との距離は約55 AU.(右) 恒星GJ 758の*H*バンドによる直接撮像結果; クレジット: MPIA/NAOJ. 二つの光源(bおよびc)が検出されたが、追加観測の結果、bは中心星に束縛されており、cは背景星であることがわかった¹⁴⁾. bは中心星から約30 AUの距離に存在。

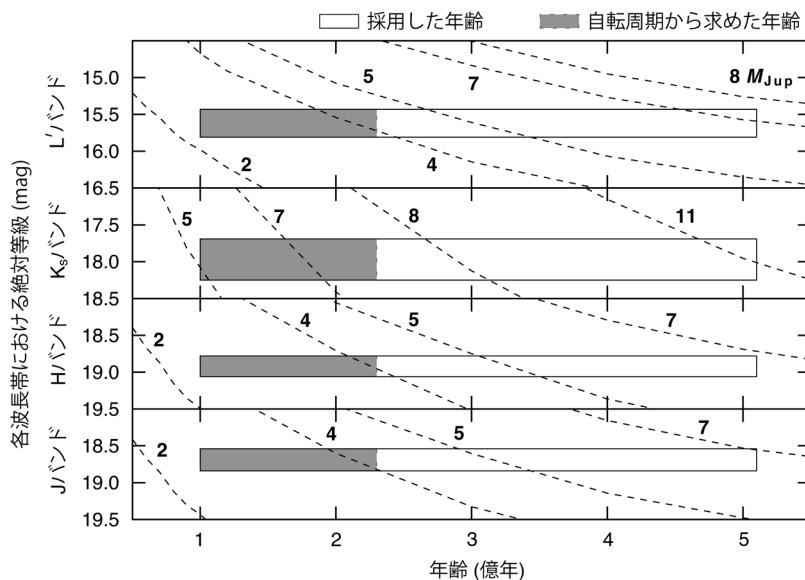


図2 GJ 504bの質量推定⁴⁾. J ($\sim 1.3 \mu\text{m}$), H ($\sim 1.6 \mu\text{m}$), K_s ($\sim 2.2 \mu\text{m}$), L' ($\sim 3.8 \mu\text{m}$) の波長での絶対等級を惑星の光度進化モデル⁷⁾と比較することで質量を導出. 図の破線は惑星光度の時間進化モデルを示し, その破線の横の数字は各モデルに対応する惑星の質量を示す. 各パネルの中のボックスの縦幅は 1σ の測定光度に対応し, 横幅は推定された年齢の範囲に対応する. その中の灰色で塗りつぶした範囲は恒星の自転周期から年齢を推定する方法 (Gyrochronology⁵⁾)を用いて推定されたGJ 504の年齢範囲である.

計算しても各モデルによる不定性は小さくなることが示唆されている⁹⁾. われわれの年齢推定からは, GJ 504の年齢は1–5億年と導出された. したがって, 光度進化モデルの不定性を加味しても, GJ 504bの質量は褐色矮星質量には届かない可能性が高い. この点はGJ 504bの惑星としての妥当性を支持することにつながるだろう.

また, 本発見におけるもう一つの大きな意義は惑星形成理論に疑問を投げかけたという点である. 6節でより詳細に議論するが, GJ 504bの起源に対しては依然として謎が残ったままである. GJ 504bの発見は, 惑星形成論の観点からも, 今後の観測および理論の両面の発展に一石を投じる成果の一つだろう.

3. κ And b

κ AndはB9型の恒星であり, その質量は太陽の2.4–2.8倍と推定されている^{11), 12)}. また, 太陽からの距離は約52 pcである³⁾. SEEDSでは,

2012年にすばる望遠鏡を用いて, この天体を観測した結果, その主星から約55 AUの距離に惑星候補天体 κ And bを検出した¹¹⁾. κ And bの主星に対するコントラストは約11等 (H バンド)である. さらに同年, LBTとKeck望遠鏡を用いた追加観測からも, κ And bの確認に成功した¹²⁾. κ And bは, JHK_L' , および M' ($\sim 4.8 \mu\text{m}$)のフィルターに加えて, $4.05 \mu\text{m}$ での狭帯域フィルターで検出された. それらの測光観測から得られた κ And bのSpectral Energy Distributionに対して低温天体の大気モデルをフィットさせた結果, κ And bの有効温度は $1900 \pm_{200}^{100}$ Kとして導出された¹²⁾.

この恒星は, 2千万年から5千万年の年齢をもつColumba Associationのメンバーの可能性がある^{11), 12)}. その年齢を仮定し, κ And bの光度を進化モデル⁷⁾と比較した結果, 質量は $13 \pm 1 M_{\text{Jup}}$ として導出された¹²⁾. 一方, この恒星をプレイアデス星団の経験的な等時曲線と比較した結果,

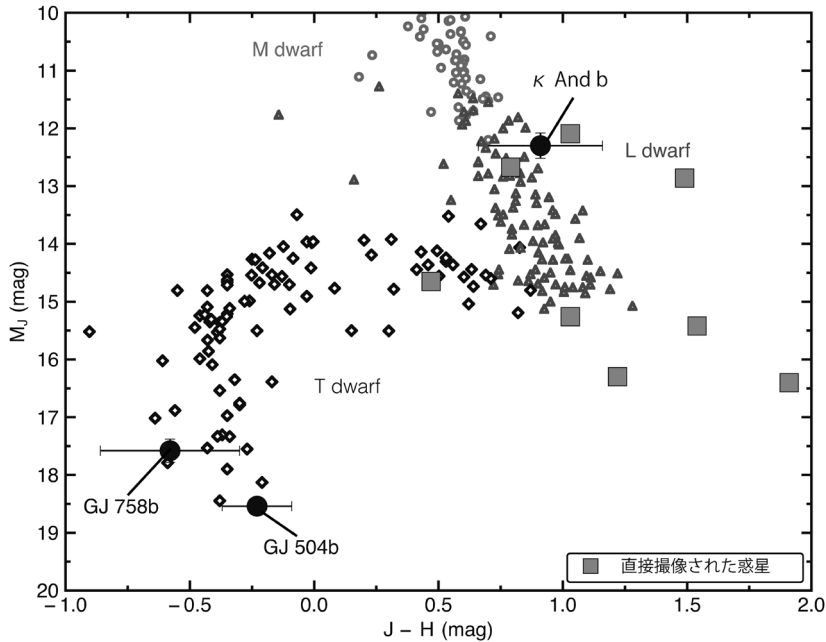


図3 SEEDSで直接撮像した系外惑星・褐色矮星伴星 (GJ 504b^{4), 8}; κ And b^{11), 12}; GJ 758b^{13), 14}) の色等級図 (JH vs. J バンドの絶対等級). 比較のために, M型矮星 (○), L型矮星 (▲), T型矮星 (◇) の色等級データ^{15), 16)}, および2013年までに直接撮像により発見された系外惑星およびその候補天体の色等級データ (HR 8799 bcde^{10), 17)-19)}, β Pic b²⁰⁾, 2M 1207b²¹⁾⁻²³⁾, 1RXJ 1609b^{24), 25)}, AB Pic b²⁶⁾) を示す. GJ 504bやGJ 758bはほかの直接撮像惑星やL型矮星と比較して青く, メタンが豊富で比較的雲が少ない極低温のT型矮星と近い色をもつ^{4), 14)}. 距離の値にはHipparcosによる視差測定結果³⁾を一部採用している.

主星の年齢は1.5億年以下と推定された¹²⁾. この年齢推定も考慮し, さらに κ And bの光度や温度を進化モデルと比較した結果, κ And bの質量は最終的に $14^{+25}_{-2} M_{\text{Jup}}$ と導出された¹²⁾.

このような大きな軌道, さらに惑星と褐色矮星の境界の質量をもつ伴星は, これまでも複数検出されてきた (例えばAB Pic b²⁶⁾). しかし, それらの伴星の主星は κ And Aよりも小さな質量をもつ. 褐色矮星が公転する若い恒星であるHIP 78530の系²⁷⁾が κ Andの系と類似しているが, 主星と伴星の距離は約710 AUと大きい. したがって, 大質量の恒星から数十AUの距離を公転する惑星に近い質量をもつ伴星と言う点で, κ And bはほかの類似天体と比較してユニークである. このことから, κ Andの系は質量の大きな恒星における惑星や褐色矮星の形成を理解するた

めに有益なサンプルであると言える. なお, SEEDS以外のチームによって, Palomar望遠鏡を用いた κ And bの観測が行われている²⁸⁾.

4. GJ 758b

GJ 758は太陽から約16 pcの距離³⁾に存在する. 太陽と比べて高い金属量をもち⁶⁾ ($[\text{Fe}/\text{H}] = 0.22$), G9型の主系列星であるGJ 758は, SEEDSにおいて2009年に観測された¹³⁾. そしてその結果, 伴星が存在していることが確認された. その伴星 (GJ 758b) は, 主星から約1.9'' (~29 AU)の距離に存在しており, 主星とのコントラストはHバンドで約14.5等である¹³⁾. GJ 758に対してはKeck, Gemini, およびすばる望遠鏡を用いた追加観測が実行された. その際, メタンの吸収に関連したフィルターや約1.3–4.8 μm の範囲の広

帯域フィルターが観測に適用された¹⁴⁾。それらの観測した波長域での測光結果を、低温天体大気の理論モデルスペクトルと比較することで、大気の特徴づけが試みられた¹⁴⁾。その結果、GJ 758bの大気の有効温度はおよそ600 Kと見積もられた。この推定値は、GJ 504b同様に、これまで検出されている伴星の中でも非常に低い。また、これらの観測の結果、GJ 504b同様にGJ 758bの大気中にメタンが存在する可能性が示唆された。モデルスペクトルとの比較では、大気の金属量が、 $[Fe/H] \sim 0.5$ と太陽に比べて高い可能性も示唆されている。しかし、金属量の推定は表面重力の推定と縮退する可能性に注意する必要がある¹⁴⁾。

GJ 758の年齢推定範囲の幅は広い。特に恒星進化モデルを用いた年齢推定では、GJ 758は7億年より若い年齢から約40億年と高い年齢も可能性がある²⁹⁾。恒星進化モデルとベイズ統計を用いた手法²⁹⁾では、GJ 758の年齢は約7億年が最適値であると導出されているが、その場合GJ 758bの質量は木星の約10倍になる¹³⁾。一方、GJ 504にも適用した「恒星の活動度」から推定した年齢は約50億年から90億年になるが、その値はGJ 758のリチウムの吸収線が弱いことと整合性がある¹⁴⁾。これらのGJ 758に対する年齢推定結果を総じて評価すると、50-90億年という年齢が妥当である可能性が高い。この場合の伴星の質量は約30-40 M_{Jup} と推定される¹⁴⁾。このように、年齢の推定値の不定性によって、GJ 758bの質量推定値の不定性も大きくなってしまふ。以下で述べるように、年齢の推定手法の改良は系外惑星の研究の課題の一つと言える。

5. 惑星系の年齢推定とその課題

恒星の年齢推定は直接撮像による観測結果を評価するうえで非常に重要であるが、難しい課題である。散開星団やMoving Groupなどの星団に属する恒星の年齢は比較的高い精度、確度で推定できる。一方、GJ 504のような孤立した恒星に対

しては年齢推定が難しくなる。その場合、恒星進化モデルの適用がまずは考えられるが、主系列星に対する恒星進化モデルによる年齢推定は、その有効温度、表面重力、金属量などの各導入パラメータの値やその不定性に強く依存する。GJ 504に対しては、恒星進化モデルを用いたベイジアン解析による年齢推定からは、68.2%の上限値で年齢は7.6億年以下と推定されている²⁹⁾。一方、恒星進化モデルを用いて約45億年の年齢をGJ 504に対して導出している研究³⁰⁾もある。仮にGJ 504の年齢が太陽程度である場合、GJ 504bの質量は約25 M_{Jup} になる³⁰⁾。

このように、恒星進化モデルを利用した場合、年齢推定の不定性が大きくなることがあるが、この問題はこれまで直接撮像された系外惑星にもあてはまる。例えば、HR 8799の系の年齢として一般的に用いられている年齢範囲は3千万年から1.6億年である¹⁰⁾が、恒星進化モデルを用いた結果では約1千万年から20億年と幅の広い推定値³¹⁾が得られている(同論文³¹⁾では、進化モデルと星震学を組み合わせた方法も用いているが、ここで示した値は進化モデルのみを適用した結果)。HR 8799の系の年齢が10億年近く、もしくはそれ以上の場合、HR 8799の惑星の質量は褐色矮星級になる^{10), 31)}。

この問題点を回避するために、GJ 504の年齢推定において、われわれは恒星の「自転周期や活動度」を指標⁵⁾として年齢推定を試みた。恒星の自転周期や活動度はその年齢とともに変化を続けるため、それらを指標とすることで、主系列星の年齢推定の精度を恒星進化モデルを利用した場合と比較して向上させることができる⁵⁾。

最近でも、年齢推定方法を改良するための研究が一般的に行われている。例えば、大質量星に関しては自転に依存した混合や重力減光の影響を考える必要が生じるが、それらの影響を考慮した恒星進化モデルの適用が試みられている³²⁾。その推定のもとでは、 κ Andの年齢が数千万年である

可能性が十分ある。一方、自転を考慮していない恒星進化モデルを用いた場合には、 2.2 ± 1.0 億年という推定値が得られており²⁸⁾、自転を考慮するかしないかで、恒星進化モデルを用いた年齢推定値が変動する。このように、各々の推定値、またはその推定方法に潜在する不定性の影響が現状のところ問題となっている。ここで議論したように、年齢をはじめとしたターゲットとなる恒星の特性をよりよく知ることも、直接撮像による研究を今後進めるために重要な課題と言える。

6. 大軌道惑星や褐色矮星の起源

直接撮像観測で検出された大軌道巨大惑星の起源はよくわかっていない。それらの惑星のほとんどは軌道が数十AUと大きく、古典的なコア集積モデルで形成されたと考えるのは難しい³³⁾。一方、重力不安定過程³⁴⁾では円盤が直接分裂して短いタイムスケールで大軌道惑星が形成されるため、直接撮像惑星との整合性は良い。しかし、重力不安定モデルにも問題点がある。

GJ 504bの場合では、その主星の金属量が高い点が問題になるかもしれない⁴⁾。主星の金属量が高い場合、惑星形成の母体となった原始惑星系円盤の金属量も高かった可能性がある。その場合、円盤の不透明度が増すことで冷却が非効率になり、円盤の分裂も抑圧される可能性がある³⁵⁾。また、重力不安定が起きるような円盤では、惑星が内側移動するタイムスケールが非常に短いことも問題になる³⁶⁾。その場合、数十AUという軌道にとどまっていられる可能性は非常に小さいということになる。

κ And bは低質量の褐色矮星に匹敵する質量をもつが、重力不安定で形成された可能性が考えられている¹²⁾。GJ 758bも質量が褐色矮星級に大きく、重力不安定で形成されたと考えるのが自然かもしれない。しかし、その主星の金属量は比較的高く、この点はGJ 504の場合と同様に円盤の分裂を阻害する方向に働くかもしれない。 κ And b、GJ 758bの両方の場合においても、伴星の内側移

動のタイムスケールが非常に短いということが問題になる点はGJ 504の場合と同じである。

一方、コア集積過程に基づいて形成されたと考えるのはどうであろうか？ 今回紹介したそれぞれの伴星の主星からの距離において「その場形成」される可能性は低く³³⁾、コア集積モデルで形成された場合は何かしらの過程を経て外側に移動する必要がある。そのような移動過程のうち、有力なものは複数の惑星の重力的な相互作用で惑星が散乱される「惑星散乱³⁷⁾」であろう。しかし、惑星散乱では、外側に移動した天体と同程度かそれ以上の質量をもつ惑星が惑星系の内側に存在することが条件になる³⁷⁾。GJ 504bの場合、木星の数倍か、それ以上の質量をもつ伴星が内側に存在する必要がある。しかし、SEEDSで行った直接撮像観測ではそのような伴星はみつからなかった。より高い感度の観測が行われれば、そのような内側伴星が存在するかどうかかわかるかもしれない。主星の金属量が高いとコア集積過程による巨大ガス惑星の形成は活発になるはずである³⁸⁾、この点は惑星散乱に必要な条件である「複数の惑星の形成」という点で有利にはたらくかもしれない。

κ And bやGJ 758bは質量が大きく、コア集積過程による形成は考えにくいだが、円盤の特徴によっては形成されるかもしれない³⁹⁾。いずれにせよ、観測された位置での「その場形成」は難しく、それらの伴星は形成後に外側に移動することが必要になるだろう。散乱移動を起こすためには、すでに見つかっている伴星と同等かそれ以上に質量の大きな伴星が内側に存在することが必要になるが、その可能性については疑問が残る。

SEEDSで発見された天体も含めて、直接撮像された惑星や褐色矮星の形成起源は、はっきりしていない。今後の観測の進展によって、その解明が進むことを期待したい。特に、近年運用が開始された、千以上の多素子の補償光学装置である極限補償光学（7節参照）を用いた観測で、さらに

内側にほかの伴星が存在するかどうかを調べることが必要であろう。また、直接撮像された惑星や褐色矮星の軌道を制限することも重要である。さらにその起源を明らかにするために、惑星大気のC/O比などの組成を分光観測から調べることも近年注目されており、それらの指標は惑星の形成位置や形成過程を調べるのに利用されている¹⁾。現在行われている、または将来行われる直接撮像探査で、大軌道惑星のサンプルは増加することが見込まれる。その結果、多くの大軌道惑星に対して分光観測を行うことが可能になる。それによる惑星の特徴づけから、大軌道惑星の起源を明らかにする多くの糸口が得られるかもしれない。

7. まとめ、直接撮像観測の展望

SEEDSでは、GJ 504, κ And, GJ 758を公転する巨大惑星や褐色矮星を検出するに至った。GJ 504bは $4^{+4.5}_{-1}$ M_{Jup} の質量をもち、これまで直接撮像された系外惑星と比較しても質量が小さい。また、その大気は有効温度が約500 Kと極めて冷たく、メタンをもつことがわかった。 κ And bは $14^{+2.5}_{-2}$ M_{Jup} の質量をもち、太陽の2.4-2.8倍の質量の大きな恒星を公転する。GJ 758bは約30-40 M_{Jup} と比較的大きな質量をもつが、その大気の温度は非常に低い。このような特性は、これまで検出された巨大惑星や褐色矮星の伴星と比較しても非常に特徴的である。一方、それらの直接撮像された惑星の物理的な特徴の推定を確立するためには、主星の年齢の評価やその改良が重要である。われわれが行った観測からは、それらの天体の起源を明らかにすることはできなかった。惑星大気に注目した観測を今後行うことで、それらの起源を明らかにするための重要な糸口が得られるかもしれない。SEEDSによる発見は、巨大惑星や褐色矮星の起源を明らかにするための重要なサンプルを提供し、直接撮像による研究を進めるうえでも重要な基礎になるものと期待できる。

極限補償光学を利用した次世代直接撮像装置が

8 m級望遠鏡で本格運用されることで、系外惑星の直接撮像研究は今後数年間でさらなる進展を遂げると期待できる。極限補償光学を搭載しているVLT望遠鏡のSPHEREや、Gemini望遠鏡のGPIの成果がすでに出ている^{19), 40)}、GPIでは中心星から0.5"の距離で 10^{-6} に迫るコントラストが達成されているが、これは従来の一般的な補償光学を用いた場合よりも約1桁良い性能である⁴⁰⁾。地球から30 pcの距離にある恒星の場合、0.5"は15 AUに相当する。したがって、コア集積理論で巨大惑星が形成される領域、またはそれに極めて近い領域に存在する巨大系外惑星の探査が可能になる。また、次世代の高コントラスト装置は撮像と分光を同時に可能にする面分光器を採用する。これは惑星の「発見」と「特徴づけ」を同時に行うことを可能にする。このように次世代の直接撮像装置はわれわれの巨大惑星に対する知見を大きく拡大する可能性をもつ。これによって、巨大惑星の形成・進化的理論の観測的検証に対しては、より強い制限が与えられるだろう。

すばる望遠鏡では現在、GPIやSPHEREと同様に極限補償光学を採用するSCEXAO計画⁴¹⁾が進められている。SCEXAOの開発、およびその改良が進んできており、2016年にはGPIやSPHEREに匹敵する、またはそれ以上の性能を発揮しているかもしれない。さらに現在、SCEXAOと組み合わせで利用される面分光器CHARIS⁴²⁾の開発が進められている。これによって、すばる望遠鏡でもGeminiやVLT望遠鏡のように極限補償光学と面分光による系外巨大惑星の探査が可能になる。CHARISのファーストライトは2016年を予定されており、SCEXAOとCHARISによる惑星探査が2016年、または2017年には開始できるかもしれない。GPI、SPHEREの観測は南天で行われている。したがって、すばる望遠鏡は北天での探査を優位に進めることができるだろう。これら次世代の探査によって、系外巨大惑星の研究はますます進むことが期待できる。それらの成果は、JWSTやTMTなどの

望遠鏡を用いた直接撮像による系外惑星の研究の重要な試金石になることだろう。このように、直接撮像による系外惑星の研究の進展から今後も目が離せない状況が続くことだろう。

謝 辞

本稿は国際的な学術誌で出版済みの査読論文^{4), 8), 11)-14)}に基づいております。本稿の内容の詳細についてはそちらをご覧ください。本稿で紹介した成果は、SEEDSチームやすずばる観測所などの多くの方々の貢献のおかげで得られたものです。この場を借りて心より感謝申し上げます。また、編集委員の町田正博さんから原稿の改定に関して有益な助言をいただきました。本稿では、データ取得のためにフランスのCDSが運営するVizieRとSIMBADを一部利用しております。執筆者の葛原は日本学術振興会の特別研究員（課題番号：25-8826）として支援を受けております。

参考文献

- 1) Konopacky Q. M., et al., 2013, *Science* 339, 1398
- 2) Millar-Blanchaer M. A., et al., 2015, *ApJ* 811, 18
- 3) van Leeuwen F., 2007, *A&A* 474, 653
- 4) Kuzuhara M., et al., 2013, *ApJ* 774, 11
- 5) Mamajek E. E., Hillenbrand L. A., 2008, *ApJ* 687, 1264
- 6) Valenti J. A., Fischer D. A., 2005, *ApJS* 159, 141
- 7) Baraffe I., et al., 2003, *A&A* 402, 701
- 8) Janson M., et al., 2013, *ApJ* 778, L4
- 9) Spiegel D. S., Burrows A., 2012, *ApJ* 745, 174
- 10) Marois C., et al., 2008, *Science* 322, 1348
- 11) Carson J., et al., 2013, *ApJ* 763, L32
- 12) Bonnefoy M., et al., 2014, *A&A* 562, A111
- 13) Thalmann C., et al., 2009, *ApJ* 707, L123
- 14) Janson M., et al., 2011, *ApJ* 728, 85
- 15) Dupuy T. J., Liu M. C., 2012, *ApJS* 201, 19
- 16) Faherty J. K., et al., 2012, *ApJ* 752, 56
- 17) Skemer A. J., et al., 2012, *ApJ* 753, 14
- 18) Metchev S., et al., 2009, *ApJ* 705, L204
- 19) Zurlo A., et al., 2016, *A&A* 587, A57
- 20) Currie T., et al., 2013, *ApJ* 776, 15
- 21) Ducourant C., et al., 2008, *A&A* 477, L1
- 22) Mohanty S., et al., 2007, *ApJ* 657, 1064
- 23) Chauvin G., et al., 2004, *A&A* 425, L29
- 24) de Zeeuw P. T., et al., 1999, *AJ* 117, 354
- 25) Lafrenière D., et al., 2008, *ApJ* 689, L153
- 26) Chauvin G., et al., 2005, *A&A* 438, L29
- 27) Lafrenière D., et al., 2011, *ApJ* 730, 42
- 28) Hinkley S., et al., 2013, *ApJ* 779, 153
- 29) Takeda G., et al., 2007, *ApJS* 168, 297
- 30) Fuhrmann K., Chini R., 2015, *ApJ* 806, 163
- 31) Moya A., et al., 2010, *MNRAS* 405, L81
- 32) Brandt T. D., Huang C. X., 2015, *ApJ* 807, 58
- 33) Dodson-Robinson S. E., et al., 2009, *ApJ* 707, 79
- 34) Durisen R. H., et al., 2007, *Protostars and Planets V* 607
- 35) Cai K., et al., 2006, *ApJ* 636, L149
- 36) Baruteau C., et al., 2011, *MNRAS* 416, 1971
- 37) Chatterjee S., et al., 2008, *ApJ* 686, 580
- 38) Benz W., et al., 2014, *Protostars and Planets VI* 691
- 39) Tanigawa T., Tanaka H., 2015, arXiv: 1510.06848
- 40) Macintosh B., et al., 2014, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 111, 12661
- 41) Jovanovic N., et al., 2015, *PASP* 127, 890
- 42) Groff T. D., et al., 2014, *Proc. SPIE* 9147, 91471W

SEEDS Direct Imaging Discoveries of Exoplanet and Brown Dwarf in Orbit around Nearby Stars

Masayuki KUZUHARA¹ and Tomoyuki KUDO²

¹ Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan;

² Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, U.S.A.

Abstract: Since its campaign began in 2009, SEEDS has surveyed a number of nearby stars via the direct imaging technique. As a result, SEEDS has discovered substellar companions (exoplanet or brown dwarf companion) orbiting the Sun-like stars, GJ 504 and GJ 758, and the more massive star, κ And. In addition, the follow-up observations provide the characterizations of those discoveries, revealing the uniqueness of detected companions. Those discoveries should become important clues to explore the exoplanet/brown-dwarf formation and evolution. This article introduces the exoplanet/brown-dwarf companions that the SEEDS direct imaging observations found around the nearby stars. Their properties and possible origins are especially discussed. Furthermore, based on our obtained results, we present the remaining problems and future prospects for exoplanet studies carried out with direct imaging observations.