

# 長周期視線速度変動を示す中質量巨星に対する 直接撮像

笠 嗣 瑠

〈総合研究大学院大学物理科学研究科天文科学専攻 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: tsuguru.ryu@nao.ac.jp

SEEDSプロジェクトのサブカテゴリであるSEEDS-RVカテゴリでは、すばる望遠鏡/HiCIAOを用いた直接撮像法と他の惑星発見方法とを組み合わせた観測を行ってきた。このような惑星系は年齢が大きいため直接撮像観測では恒星質量の伴星までしか検出感度がないが、伴星の有無の確認は惑星の発見、惑星系の進化を議論していくうえで重要な要素である。本稿ではSEEDS-RVカテゴリで行われた、長周期視線速度変動を示す中質量巨星に対する直接撮像観測について紹介する。

## 1. 直接撮像法と他の惑星発見方法の 組み合わせ：SEEDS-RV カテゴリ

惑星発見のための観測手法の一つとして視線速度法（またはドップラー法）がある。視線速度法は、分光器で得られた恒星のスペクトルからドップラー効果を用いて恒星の視線速度を測定し、主星が惑星との共通重心を周回する際の周期的な視線速度変動を検出することで、間接的に惑星を発見する方法である\*1。1995年のMayorとQuelozによる主系列星を周る惑星の発見<sup>1)</sup>にはこの視線速度法が用いられた。この視線速度法の特徴は、周期が数日から数年程度の主星近傍の惑星を発見しやすいということである。視線速度法は、主星が惑星との共通重心を周回する際の周期的な振幅を検出する方法であるため、1周期にわたる観測が惑星を発見するために必要である。そのため、これまでの20年間に視線速度法で発見された惑星は500個以上あるが、そのほとんどの周期は10年以内である。

視線速度法と同様に、多くの惑星を発見してい

るトランジット法でも主星近傍の惑星であるほど惑星を発見しやすい。これは惑星が主星前を通過する際の減光を捕らえるというトランジット法の原理から、主星近傍の惑星であるほど通過確率が高いためである。

一方で直接撮像法はその名のとおりに、惑星の光を直接捕らえる方法である。2008年にKalasらによるフォーマルハウトを回る惑星とMaroisらによるHR 8799を回る惑星の発見<sup>2), 3)</sup>が、A型星周りで惑星の直接撮像法による初めての発見である。直接撮像法の特徴は主星から数十AUに位置する遠方の惑星を検出しやすいことである。これは主星近傍であればあるほど主星の光を低減するのが困難であるという技術的な要因による。直接撮像法で発見されたほとんどの惑星は10 AUを超えたところに位置している。

このように主星近傍の惑星に感度がある視線速度法とトランジット法、遠方惑星に感度がある直接撮像法は相補的な方法であり、組み合わせた観測をすることで主星近傍と遠方からそれぞれ天体検出へ迫ることができる。ただしここで注意しなければなら

\*1 詳しい原理については天文月報、2003年第96巻、第4号、190-194頁「ドップラー法による系外惑星検出」（佐藤文衛）を参照。

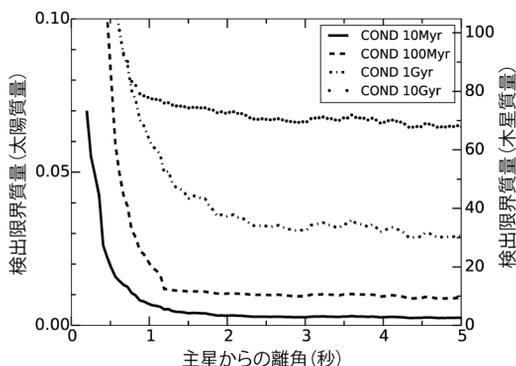


図1 Baraffeらによる大気モデルであるCONDモデル<sup>4)</sup>を用いて、HiCIAOで実際に達成された5 $\sigma$ コントラストを光度から質量に直した図。縦軸が検出限界質量、横軸が主星からの離角である。線の違いは系の年齢の違いを表している。若ければ(1,000万年, 1億年)惑星質量まで検出が可能であるが、十分に年老いた系(10億年, 100億年)では褐色矮星質量までしか感度がないのがわかる。

ないのは、直接撮像法で惑星質量まで検出できるのは主星が若い天体においてのみであることである。これは惑星形成時の熱により、系の年齢が若ければ若いほど惑星が明るいからであり、視線速度法やトランジット法が対象としている主系列星のような十分に年老いた系では、褐色矮星以上の質量の天体のみの検出となってしまう(図1)。

しかしながら、伴星の存在は視線速度法やトランジット法によって発見された惑星系の進化を議論する際に重要な存在である。視線速度法による観測で長期的な視線速度変動が検出された場合、観測された天体は長周期の遠方惑星をもつ候補であるが、さらに遠方の伴星が存在した場合でも同様の視線速度変動が観測されてしまう。またトランジット法での惑星探索においては、惑星半径に相当する僅かな減光が検出されたとしても、通常の観測では分解されない位置に伴星が存在した場合、実は伴星が食連星であり、食連星の大きな減光が主星の明るさで薄められることによる、偽検出の可能性がある。惑星系の進化について議論する場合、理論側から伴星からの摂動によって惑星

の軌道が歪められることが指摘されている。伴星の有無を直接撮像法で確認することは惑星の発見のためにも重要であるとともに、惑星系の進化を議論していくうえでも重要な観測である。

SEEDS-RVカテゴリではこのようなモチベーションから視線速度法やトランジット法で観測された惑星系または惑星系候補天体に対して直接撮像観測を行ってきた。これまでの研究成果として、逆行惑星系の成り立ちの起源を示唆する伴星の発見<sup>5), 6)</sup>、離心率の大きい惑星の成り立ちを探るための伴星の有無の確認、ケプラー宇宙望遠鏡で発見された惑星候補天体に対する伴星の発見が挙げられる。

本稿ではSEEDS-RVカテゴリで観測された、長周期視線速度変動を示す中質量巨星に対する直接撮像観測の結果について報告する。

## 2. 長周期視線速度変動を示す中質量巨星

視線速度法を用いた惑星探索において、長周期の緩やかな視線速度変動の検出は、遠方惑星を発見するための第一歩である。惑星形成理論では、5 AUを超える巨大ガス惑星の頻度は減少すると予測されており<sup>7)</sup>、理論を検証するために遠方惑星の発見と存在頻度の算出が要請されている。しかし遠方惑星の発見では、観測期間の短さから遠方惑星の周期に達しないという問題と、さらにもう一つの問題が存在している。

それは視線速度変動からでは原因となる天体の質量と軌道長半径が縮退してしまうことである。10 AUを超える遠方の天体が引き起こす視線速度変動は10年程度の観測期間ではほぼ直線の視線速度変動として検出される。この傾きの大きさを $v$ とし、視線速度変動の原因天体の質量を $M_p$ 、軌道長半径を $a$ 、軌道傾斜角を $i$ 、重力定数を $G$ とすると

$$\dot{v} \sim M_p \sin i \frac{G}{a^2} \quad (1)$$

のように書くことができる。式(1)からわかるように、例えば10 AUに位置する5木星質量の惑星が引き起こす視線速度変動と100 AUに位置する0.5太陽質量の伴星が引き起こす視線速度変動は同じ $v \approx 10$  m/s/年として検出される。

この縮退を解くためには直接撮像法によって伴星の存在の有無を確認すれば良い。直接撮像法のための観測装置、すばる望遠鏡/HiCIAOでは主星から1秒角のところで $10^{-5}$ のコントラストを達成することができ、恒星質量の伴星や褐色矮星は容易に検出することができる。視線速度法での惑星探索の対象となっている天体は100 pc程度の比較的太陽系近傍に位置しており（これは明るい天体でないと視線速度法の惑星探索を実施できないため）、1秒角は天体における射影距離にして100 AUに相当する。つまりHiCIAOを用いた長周期視線速度変動を引き起こしている天体に対する観測では、遠方惑星と同じような視線速度変動を引き起こす100 AU程度に位置している伴星を検出することができる。さらに、伴星が検出されなかった場合でも直接撮像での検出限界質量から、原因天体の質量と軌道長半径を制限することができ、視線速度変動を引き起こしている原因天体の真の姿を明らかにすることができる。

岡山天体物理観測所では、188 cm望遠鏡/HIDESを用いた中質量巨星（1.5-5太陽質量）に対する視線速度法による惑星探索が10年以上にわたって行われてきており、30個を超える惑星がこれまでに発見されている。さらにいくつかの天体は長周期の直線的な視線速度変動が検出されており、遠方巨大ガス惑星の候補である。中質量巨星周りの主星近傍（ $a < 0.6$  AU）の巨大ガス惑星は太陽型星周りとは異なり、ほとんど存在せず<sup>8)</sup>、惑星の軌道分布が異なるということが示唆されている。中質量巨星周りの遠方惑星の発見

は、主星質量の違いによる惑星の軌道分布の違いについて明らかにし、惑星形成理論を検証して観測からフィードバックするために重要となる。

このような背景から、長周期の視線速度変動を示す6天体の中質量巨星に対して、視線速度変動の原因天体を明らかにするために、直接撮像観測をSEEDSプロジェクト内で行った。

### 3. 視線速度観測と直接撮像観測

#### 3.1 岡山天体物理観測所HIDESによる視線速度観測

岡山天体物理観測所188 cm/HIDESを用いて2001年から2014年にかけて、中質量巨星5天体（ $\gamma$ Hya, 18 Del, HD 5608, HD 14067, HD 109272）に対して視線速度観測を行った。この観測では高精度の視線速度測定を実現するため、ヨウ素セルを用いた観測を行った<sup>\*2</sup>。これにより、全期間にわたる長期的な視線速度の精度としてはおおよそ4 m/sが達成された。

観測により周期がおおよそ2年から4年の木星質量の惑星が3天体（18 Del, HD 5608, HD 14067）で発見された<sup>8)-10)</sup>。これらの天体ではすでに惑星による周期的な変動とともに、長周期の視線速

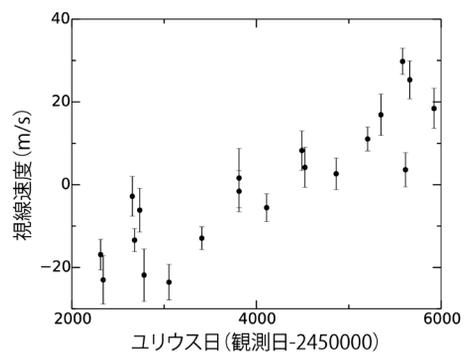


図2 観測された $\gamma$ Hyaの視線速度。  $v = 4.1 \pm 0.2$  m/s/年で視線速度が増加している。

\*2 詳しい説明については天文月報、第96巻、第4号、190-194頁「ドップラー法による系外惑星検出」（佐藤文衛）を参照。

度変動が見られることが報告されている。さらに今回、 $\gamma$ HyaとHD 109272では直線的な視線速度変動が観測された(図2)。

### 3.2 すばる望遠鏡 HiCIAOによる直接撮像観測

岡山で視線速度変動が検出された5天体に加え、すでに視線速度変動が報告されている $\iota$ Draを加えた6天体に対して、2011年から2014年にかけてSEEDS戦略枠の中ですばる望遠鏡/HiCIAOを用いた直接撮像観測が行われた。観測ではADI (Angular Differential Imaging) という高コントラストを達成するための観測手法が用いられた。ADIは天体の日周運動によって視野が回転してもイメージローテーターでの補正をわざと行わない観測手法である。天球面上の天体は日周運動によって検出器上で回転するが、望遠鏡由来のノイズは検出器上では同じ場所に固定される。これによってノイズと主星近傍の天体を分離することができ、高コントラストを達成することができるのである。2011年と2012年に1回目の観測が行われ、伴星候補天体が検出された4天体については2014年に追観測が行われた。これは偶然入り込んだ背景星かどうか確認するためである。伴星ではない背景星であった場合、期間において観測するとターゲットの固有運動に対して背景星はほとんど動かないとみなせるため、主星と伴星候補天体の位置関係は変化する。伴星であった場合、主星との位置関係は数年程度ではほとんど変化しないので背景星と見分けることができるのである。

観測の結果、3天体 ( $\gamma$ Hya, HD 5608, HD 109272) で伴星が発見され(図3)、残りの3天体 ( $\iota$ Dra, 18 Del, HD 14067) では主星近傍に天体が存在しないことが確認された(図4)。検出された伴星はそれぞれ光度からモデルを用いて質量を算出し、恒星質量をもつ伴星であるということが確認された。天体が検出されなかった系においても検出限界質量を見積もったところ、すべての系で1秒角以遠では褐色矮星よりも重い天体は存在が排除された。

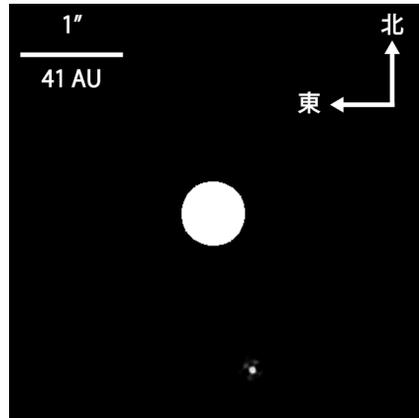


図3 HiCIAOで観測された $\gamma$ Hya。主星から1.6秒角離れた右下に伴星 $\gamma$ Hya Bが検出された。

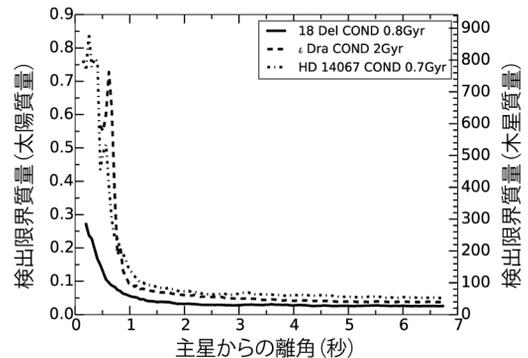


図4 天体が検出されなかった系での検出限界質量。線の違いは天体の違いによる。縦軸は検出限界質量、横軸は主星から離角。

## 4. 視線速度変動を引き起こしている天体の正体とその影響

直接撮像観測結果から何が視線速度変動を引き起こしているのかを明らかにする。伴星が検出された場合でも、あまりに遠方にある伴星は観測されている視線速度変動を引き起こすことができない。そこで観測された伴星が視線速度変動を引き起こしうるのか検討した。

主星と検出された伴星との角距離は天球面上に射影した射影距離であり、実際の主星と伴星の距離ではないためそのままでは検出された伴星が視

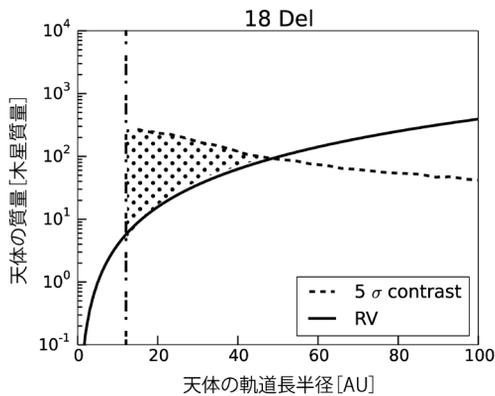


図5 直接撮像観測で天体が検出されなかった18 Delの視線速度変動を引き起こしている天体の軌道長半径と質量の領域を制限した図。実線は視線速度変動から要請される力学的な最小質量。点線は直接撮像観測で達成された $5\sigma$ コントラスト。一点鎖線は視線速度観測の期間から排除される内側の線。これらの線に囲まれる水玉模様の範囲に視線速度変動を引き起こしている天体が存在すると考えられる。

線速度変動を引き起こしうるのか検討できない。しかし、観測されている視線速度変動と射影距離から軌道要素の不定性も含めた力学的な最小質量を算出することがTorresによって導かれている<sup>11)</sup>。つまり、このTorresによるモデルを用いて力学的な最小質量を算出し、光度から算出された伴星の質量がこの力学的な最小質量を上回っていれば、検出された伴星は観測されている視線速度変動を引き起こせることを意味する。この結果、検出されたすべての伴星で光度から求められた質量が力学的な最小質量を上回っており、観測されている視線速度変動を引き起こしている原因であることが確認された。

天体が検出されなかった系では検出限界質量と力学的な最小質量、視線速度観測の期間を組み合わせ、視線速度変動を引き起こしている天体の軌道長半径と質量を制限した(図5)。その結果、視線速度変動を引き起こしている可能性として惑星は棄却され、褐色矮星または恒星質量の伴星であるということがわかった。SCEXAOなどの次

世代直接撮像装置でより内側でより深い観測を行うことで、褐色矮星が伴星かを見分けることができると期待される。

このようにして今回観測した6天体の視線速度変動の原因となっている天体を特定または制限することができた。6天体のうち4天体(*i*Dra, 18 Del, HD 5608, HD 14067)では惑星がすでに発見されているので、視線速度変動を引き起こしている天体が惑星に影響を与えているのかを検討する。

伴星が惑星に及ぼす影響として古在機構が挙げられる。古在機構は遠方の天体による摂動で内側の天体の軌道離心率の大きさが振動する(角運動量が保存するように軌道離心率と軌道傾斜角が周期的に変化する)現象である。3天体(*i*Dra, HD 5608, HD 14067)の惑星は軌道離心率が0.1を超え、*i*Dra bでは0.713と非常に大きい<sup>12)</sup>。惑星は原始惑星系円盤の円盤内で形成されるため、円盤中のガスとの相互作用によって太陽系の惑星のように軌道離心率が小さい円軌道となることが予想されている。この理論からの予想と観測されている軌道離心率の大きい惑星との矛盾を解決する方法の一つが古在機構による軌道離心率の増大である。これは惑星が形成された後に伴星からの摂動によって古在機構が働き、軌道離心率が大きくなったというモデルである。今回、視線速度変動を引き起こしている天体からの摂動による軌道離心率の振動の周期を計算したところ、すべての系で年齢よりも周期のほうが短いということがわかった。古在機構の軌道離心率の増大の周期が天体の年齢よりも短いということは、伴星からの摂動によって軌道離心率の増大が起こりうることを示している。軌道離心率の大きさの原因としては惑星同士の重力散乱も挙げられるが、この三つの軌道離心率の大きい惑星は、視線速度変動を引き起こしている天体による摂動の影響、すなわち古在機構によって軌道離心率が大きくなったと説明することが可能である。

## 5. ま と め

本稿では直接撮像法と他の系外惑星発見法の組み合わせにどのような意義があるのかについて説明してきた。惑星質量の天体まで検出はできないが、惑星系または惑星候補をもつ天体に付随する伴星は惑星の検出や惑星系の進化に大きな影響を及ぼす。SEEDS-RV カテゴリは他の系外惑星発見法の組み合わせと直接撮像観測の組み合わせを目的としたカテゴリである。

本稿で詳しく説明した、長周期の視線速度変動が見られる中質量巨星に対する直接撮像によって6天体中3天体で伴星が発見された。発見された伴星は観測されている視線速度変動を説明しうることがわかり、褐色矮星質量以上の天体が存在しない系では観測されている視線速度変動は褐色矮星か低質量星によるものであることがわかった。また、すでに発見されている軌道離心率が大きい惑星の由来は、この視線速度変動を引き起こしている天体による古在機構で説明できる。

長周期の視線速度変動が観測されている天体はこの6天体以外にも十数天体が岡山の視線速度探索で見ついている。これらに対して直接撮像観測を行い、長周期の視線速度変動が惑星由来なのか伴星由来なのかを明らかにすることで、遠方の惑星の存在頻度を将来的に議論したいと考えている。

## 謝 辞

本研究は筆者らが投稿中の論文<sup>13)</sup>に基づくものです。

本稿の執筆にあたり助言をいただいた田村元秀氏と成田憲保氏に感謝します。また本稿で紹介し

た研究は、SEEDSプロジェクトと岡山惑星探索の方々との共同研究です。みなさまのおかげで本研究をすることができました。ありがとうございました。

## 参考文献

- 1) Mayor M., Queloz D., 1995, *Nature* 378, 355
- 2) Kalas P., et al., 2008, *Science* 322, 1345
- 3) Marois C., et al., 2008, *Science* 322, 1348
- 4) Baraffe I., et al., 2003, *A&A* 402, 701
- 5) Narita N., et al., 2010, *PASJ* 62, 779
- 6) Narita N., et al., 2012, *PASJ* 64, 7
- 7) Mordasini C., et al., 2012, *A&A* 541, 97
- 8) Sato B., et al., 2008, *PASJ* 60, 539
- 9) Sato B., et al., 2012, *PASJ* 64, 135
- 10) Wang L., et al., 2014, *PASJ* 66, 118
- 11) Torres G., 1999, *PASP* 111, 169
- 12) Kane S. R., et al., 2010, *ApJ* 720, 1644
- 13) Ryu T., et al., 2016, *ApJ* accepted (arXiv:1603.02017)

### Direct Imaging for Intermediate-Mass Giants with Long-Term Radial Velocity Trends in SEEDS-RV Category

Tsuguru RYU

*GUAS, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: In SEEDS-RV category that is subcategory of SEEDS project, we conducted direct-imaging observations using Subaru/HiCIAO camera combined with other planet discovery methods. Even though a detectable mass in direct-imaging for an observed target in other planet discovery methods is just a stellar companion, confirmation of the presence of the stellar companion is important to discover a planet and discuss the evolution of the planetary system. We report direct-imaging observations for intermediate-mass giants with long-term radial velocity trends in SEEDS-RV category.