

太陽系外惑星探査：見えてきた多様性とその起源

平野 照幸 (東京工業大学理学院 hirano@geo.titech.ac.jp)

最初の太陽系外惑星（系外惑星）が見つかって20年余り経つが、天文学の中でも系外惑星研究の最近の進展は目覚ましい、本稿ではこれまでの系外惑星研究の発展を振り返り、特に本研究の大動脈とも言える視線速度法とトランジット法に焦点を当て、系外惑星系の一般的な特徴について概観する。系外惑星の発見は従来の惑星系形成論に修正をもたらし、さらに新たな理論の発展につながった。ここでは、そうした惑星の形成進化を記述する理論を系外惑星の特徴付けによって検証する取り組みについてもまとめる。最後に系外惑星研究に残された課題と将来計画に触れる。

1. はじめに

太陽系外惑星（以下、系外惑星）の研究は、1995年にはじめてその存在が太陽型星周りに確認されて以降急速に広まった、天文学の歴史でも比較的日の浅い分野である。これまで地上・宇宙からの精力的な観測によって様々な惑星が発見されており、現在では正式に確認されただけでも3,000個以上にのぼる。^{*1} 系外惑星の発見は従来の惑星系形成論を検証する上での貴重な観測事実を提供したのみならず、我々の住む地球が銀河系で唯一生命を宿している惑星かという哲学的な問いにも科学的な答えを与えようとしている。

最初の系外惑星の報告から20年余りが過ぎ、系外惑星の多様性、統計的性質がかなり詳細に明らかになった。また最近では単に惑星発見に留まらず、軌道の詳細形状や惑星の内部構造、大気組成の探査等、見つかった惑星を物理・化学的に特徴付ける試みが積極的になされている。今や系外惑星研究は単なる天文学の一分野を超えて、物理学・化学、さらには生物学の知識を動員する分野横断的な複合科学となったと言えよう。本稿では最近の系外惑星科学の進展を振り返り、これまでの観測で明らかになった事実と残された課題について概観したい。

2. 系外惑星の発見法とその特徴

系外惑星の発見法は、惑星の存在による恒星からの光・スペクトル等の微小な変化を捉える「間接法」と、惑星からの光を直接検出する「直接法」（直接撮像）の2つに大別される。間接法には1) 視線速度法、2) トランジット法、が含まれ（後述）、これらの手法は間接法でも他の手法（重力レンズ法やアストロメトリ法）に比べてこれまで特に多くの系外惑星を発見するのに成功している。本章では系外惑星研究の大動脈とも言えるこれら2つの手法の概要と見つかった惑星系の特徴について述べる。

2.1 視線速度法

視線速度法とは、惑星重力による周期的な恒星のふらつき（視線方向の速度変化）を恒星スペクトル線のドップラー遷移として検出して系外惑星の存在を明らかにする手法である。最初に見つかった太陽型星周りの系外惑星ベガス座51番星^{b1}を含め、系外惑星研究の歴史の最初の10年は視線速度法による惑星発見がほとんどであった。視線速度法により惑星の公転周期に加えて、恒星の視線速度変動の大きさやその時間依存性から惑星の射影質量 $M_p \sin i$ ^{*2}や軌道離心率を知ることができる。視線速度法は短周期かつ質量の大きな惑星に対して高い感度を持つが、木星サイズの巨大惑星であれば現在の観測精度（視線速度精度 $\sim 1 \text{ m s}^{-1}$ ）でも比較的長周期の惑星も検出可能である。^{*3} そのため、系外惑星系が全体としてどのような形状になっているのか、あるいはどのようなタイプの恒星の周りにどのような惑星が多く見つまっているかなど、惑星系の全体像を比較的観測バイアスなく議論することができる。

視線速度法による観測で明らかになった系外惑星系の一般的な特徴には以下のようなものが挙げられる。

1. 公転周期が数日のところに木星サイズの巨大惑星が多数見ついている。^{*4} これは系外惑星の発見当初驚きを持って迎えられた。
2. ただしその後の観測と観測バイアスの評価により、そのような短周期の巨大惑星を持つ系の割合はそれほど多くない（太陽型星の1%程度）ことが判明した。²⁾
3. 図1は視線速度法で観測された惑星の質量のヒストグラムを表す。見つかった惑星の質量分布は30地球質量程度を境に2つのピークに分かれる。質量分布の左端（低質量側）は観測バイアス（小型惑星は発見が難しい）のため検出数が少ないが、バイアスを補正するとこのような比較的低質量の惑星は極めて普遍的に存在する

^{*1} 観測されたシグナル（視線速度、トランジットなど）を解析して、惑星であると考えられる確率が99%を超えた場合に慣習的に惑星として認定されている。一方、トランジットのみが検出されている系を含めると数千個の惑星候補が見つまっている。

^{*2} i は我々の視線方向と惑星軌道面の法線のなす角度。恒星の視線方向の速度変化から惑星の軌道を決定するため、視線方向に射影した惑星質量のみが観測から得られる。

^{*3} 木星の重力による太陽運動の速度振幅はおおよそ 13 m s^{-1} 。

^{*4} 周期が10日以下の巨大惑星はホットジュピター（ネプチューン）と呼ばれ、観測の容易さからこれまで非常に多くの研究がなされている。

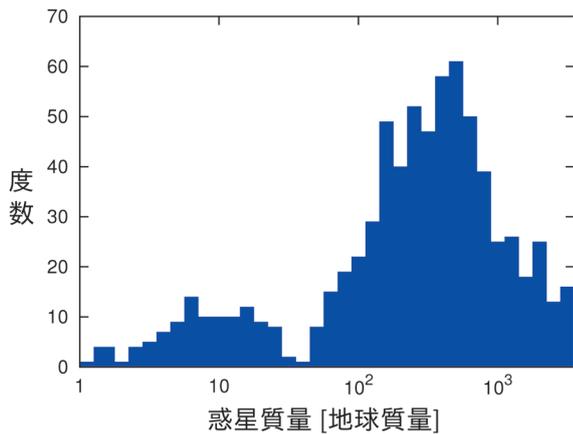


図1 見つかった(質量に制限が加えられている)系外惑星の質量分布。http://exoplanets.org/ から取得。視線速度法でのみ受かっているものに関しては横軸は射影質量 ($M_p \sin i$)。

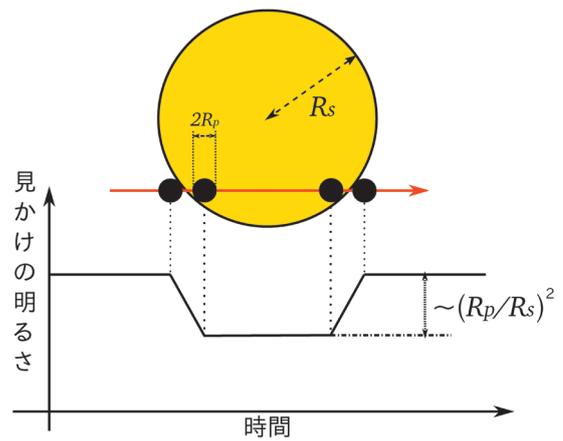


図2 惑星のトランジットと観測される星の光度曲線の概念図。

ことが明らかとなっている。

- 観測バイアスを補正すると、太陽型星 (F, G, K 型主系列星) の 50% 以上は周期 100 日以内に少なくとも一つ惑星を持つことが報告されている。³⁾ しかもそのほとんどは地球質量の数倍から 30 倍程度の質量を持つ、比較的厚い大気を持つ可能性が高い惑星である。より長い周期の惑星やより低質量の惑星の多くは検出限界以下であることを考えれば、これは惑星の存在頻度の下限値に過ぎない。
- 最近の研究では、公転周期が 5 年から 15 年の範囲の木星型惑星^{*5}を持つ系は比較的稀(観測バイアスを補正後太陽型星の約 3%)であることが報告されている。⁴⁾ これは、太陽系のように内側に小型の岩石惑星、外側に巨大なガス惑星を持つ惑星系は銀河系にそれほど多くないことを示唆する。

この他系外惑星系の興味深い特徴が、ホットジュピターなどの巨大惑星は大きな金属量を持つ恒星の周りで高い頻度で発見されているということである。カリフォルニアのグループの視線速度観測によれば、巨大惑星が見つかる頻度は観測バイアス補正後に中心星金属量の関数として指数関数的に大きくなることが分かっている。⁵⁾ この傾向の解釈は様々であるが、惑星形成メカニズムのうち「コア集積」による惑星の形成モデルによれば、重元素を豊富に含む原始惑星系円盤内では惑星コアの材料となる固体物質をより多く集めることができるため巨大惑星が形成されやすいことが知られており、中心星金属量がかつての円盤内の重元素量を示す指標だと仮定すると定性的には説明がつく。

2.2 トランジット法

系外惑星探査において視線速度法と並んで多くの惑星系を発見しているのがトランジット法である。トランジット法は図2に示したように、観測者から見て惑星が恒星の前を通過するという特殊な場合に恒星光の周期的な減光

(=トランジット)を捉えることで惑星を検出するという単純明快な探査法である。惑星がこのような軌道をしている確率は一般に惑星の軌道長半径 a と恒星半径 R_s の関数として R_s/a で近似される。そのためトランジット法は特に短周期の惑星に対して高い感度を持つ。^{*6} トランジットの観測から惑星の公転周期に加えてトランジットの深さ、継続時間などから惑星の半径 (R_p)、軌道長半径(正確には a/R_s) などの情報が得られる。

惑星のトランジットは視線速度法で発見されたホットジュピター HD 209458b に対してはじめて報告されたが、その後地上・宇宙からの大規模なトランジット探査が世界中で展開され(例: HATNet, superWASP サーベイ, CoRoT ミッション, など)、最近ではほとんどのトランジット惑星系で惑星トランジットが最初に検出され、その後の視線速度観測等による追観測によって惑星であることが確認されている。特に 2009 年に打ち上げられたトランジット探査専用のケプラー宇宙望遠鏡は、約 4 年半にわたってはくちょう座方向の領域にある 15 万個以上の恒星をモニター観測し、数千個に及ぶ惑星候補を検出している。ケプラー望遠鏡は、2つの恒星(食連星)の周りを公転する「周連星惑星」(例: ケプラー 16ABb⁶⁾)や、太陽の 6 倍以上の半径を持つ巨星の周り、恒星半径の約 2.5 倍という恒星面に極めて近いところを公転する巨大惑星(ケプラー 91b⁷⁾)など、極めてユニークな惑星を多数発見しており、我々の世界観を大きく変容させるほどになっている。また、ケプラー望遠鏡を含む宇宙からのトランジット観測は地球サイズの小型惑星の検出にまで感度がある^{*7}ため、地球型惑星の分布や特徴まで明らかにしつつある。

トランジット法について特筆すべきは、惑星が恒星面を通過するために視線速度法では得られなかった惑星・恒星についての追加情報が得られる点である。例えば、惑星が大気を持つとトランジットの際に一部の恒星光は惑星大気

*5 木星の周期は 11.86 年。

*6 またトランジットシグナルは惑星半径 R_p の 2 乗に比例するため、巨大な惑星ほど受かりやすい。この点は視線速度法と同様である。

*7 太陽の前を地球が通過した場合およそ 10^{-4} の減光を引き起こす。

上層を透過してくる。その際、惑星大気に特定の波長の光を吸収する原子・分子が含まれていると惑星大気を透過してきた光はその成分が失われている。また惑星大気の光学的厚み(見かけ上の惑星半径)の波長依存性は大気の温度圧力プロファイルや雲の状態等に強く依存するため、トランジット中の恒星光の分光観測により惑星の大気成分・状態を詳しく調べることが可能である。この方法論は透過分光法と呼ばれ、ホットジュピター・ホットネプチューンを中心として現在では様々な系で惑星大気が調べられている。この他トランジット惑星系では、惑星がトランジットとは逆に恒星の背後に隠れる現象(二次食)を調べることでも惑星大気を探ることができたり、トランジット中に恒星の視線速度を測定することでトランジット惑星の軌道傾斜角を制限するといったことが可能である。特に後者の惑星軌道傾斜角については、惑星の形成進化を議論する上で貴重な観測量となるため次章で改めて説明する。

3. 系外惑星の起源：惑星系の特徴付けによるアプローチ

古典的な太陽系形成論(コア集積モデル=京都モデル)では、巨大ガス惑星(木星・土星)は原始惑星系円盤内で水などの固体材料が豊富にある中心星から数天文単位離れた場所で集積した固体コアがガスを暴走にかき集めることで形成され、一方で岩石惑星(水星・金星・地球・火星)は惑星コアの材料が乏しい比較的中心星近くで形成されると考えられてきた。ところが2.1節の1.から5.で示したような系外惑星系の特徴は、長年信じられてきた惑星形成論が必ずしも万能ではなく、修正が必要であることを示唆している。系外惑星の起源をめぐる主要な議題にはしばしば以下のものが含まれる。

A. 短周期巨大惑星の起源 図3に示したように、太陽系外では短周期巨大惑星(ホットジュピター・ホットネプチューン)が多数見つまっているが、惑星コアとなる固体材料が乏しい中心星近傍で巨大ガス惑星を作る

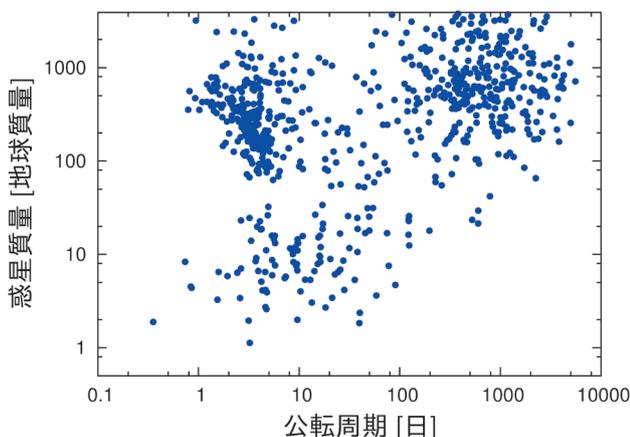


図3 系外惑星の周期と質量の分布。図の左上に塊で存在しているのがホットジュピターで、低質量領域($M_p < 10$ 地球質量)で幅広い周期で分布しているのがスーパーアース。http://exoplanets.org/から取得。

のは極めて困難である。ホットジュピターの起源をめぐるのは最初のホットジュピターであるペガサス座51番星bの発見から長い間論争が続いている。

B. 中間サイズの惑星の幅広い分布 ホットジュピターを持たないほとんどの系では、スーパーアース^{**}や海王星程度の中間サイズの惑星が周期数日から100日くらいの範囲に幅広く分布し(図3;さらに長周期は主に観測バイアスのため分布がよく分かっていない)、かつそれらはしばしば複数惑星系として見つまっている。このようなサイズの惑星が中心星の比較的近くで形成され、さらに幅広い分布を持つというのは古典的な惑星形成論では説明が難しく、何らかの機構が必要である。本章ではこうした系外惑星の起源をめぐる未解決問題(ここでは特にA.)を、見つまっている惑星系の特徴付け(キャラクターゼーション)によって観測的に切り込んでゆく試みを紹介し、明らかになった観測事実とそこから得られる示唆を述べる。

3.1 短周期巨大惑星の起源

中心星から0.1天文単位以下の場所を公転する短周期巨大惑星の起源はまだ完全には解明されていない。原始惑星系円盤内で惑星コアの材料となる固体物質は、中心星から見て水が液体から固体へと相転移する雪線と呼ばれる境界以遠に多く存在するため、コア集積モデルによればガスをまとった巨大惑星は基本的に雪線以遠でないといふと形成が難しい。そのため現在中心星付近で見つまっている短周期巨大惑星は外側で形成された後に何らかの機構で内側に落ちてきたのではないかと考えられている。

惑星を内側に移動させる機構についてはペガサス座51番星bが見つかった当初から様々なモデルが提案されている。主要なものとしては以下のものがある。

イ. タイプII惑星移動 原始惑星系円盤内である程度惑星が周囲のガスを集めて成長してくると、惑星周辺のみガス密度の低い領域(ギャップ)ができる。その際ガス惑星はギャップに束縛されて次第に成長を止めるが、円盤自体は時間進化をして中心星は円盤ダストやガスを徐々に降着させるため惑星はギャップごと徐々に中心星方向に移動(タイプII移動)する。⁸⁾そのため、円盤が最終的に晴れ上がった後に巨大惑星が中心星近傍に取り残されるというシナリオである。

ロ. 惑星同士の重力散乱 円盤内で惑星が複数形成されると、円盤が晴れ上がった後にそれらの運動は単純なケプラー運動ではなくなる。特に巨大惑星が3つ以上系に存在する場合、有限時間内に惑星の軌道が不安定化することが知られている。その場合一部の惑星は軌道離心率が跳ね上がったたり、系外に弾き飛ばされたりする。特に大離心率の軌道になると惑星は近点(最も惑

^{**} 正確な定義は未だ存在しないが、地球以上で地球の10倍程度以下の質量を持つ惑星はスーパーアースと呼ばれる。

星と中心星が近づく場所) 周辺で中心星と潮汐相互作用をはじめ。潮汐相互作用は軌道エネルギーを散逸させ、惑星軌道は比較的短期間 (10^7 年程度以下) で近点距離をほぼ一定に保ったまま徐々に円軌道化する。⁹⁾ このようにしてホットジュピターを作るシナリオはスリングショットモデルと呼ばれる。

ハ. 古在機構 雪線以遠で形成された惑星のさらに外側に惑星とは異なる軌道傾斜角を持つ伴星 (恒星) もしくは巨大惑星が存在すると、それら天体からの永年摂動が作用し、内側の惑星の軌道を振動させる。古在機構と呼ばれるこの作用により系全体の角運動量を保存したまま内側と外側天体で角運動量の受け渡しが行われる。その際、軌道傾斜角とともに軌道離心率も振動するため、場合によっては内側の惑星が大離心率の軌道となり最終的には上記ロ. のシナリオと同様に短期間に潮汐相互作用によって惑星の軌道長半径が減少する。¹⁰⁾

これらシナリオは観測的にはそれぞれ異なる予言をするため、短周期巨大惑星の起源を観測的に探ることが可能である。

3.2 惑星の軌道傾斜角測定

短周期巨大惑星の起源を探る上で、惑星の軌道傾斜角の測定が有効である。ここで言う軌道傾斜角とは、系外惑星の軌道公転軸と中心星の自転軸のなす角度であるとする。上記イ. の円盤内での惑星移動の場合、惑星はほぼ同じ公転面内で移動し現在観測される惑星の軌道公転軸は中心星自転軸とほぼ平行になっていると考えられる。一方、上記ロ. やハ. による惑星移動の場合、惑星同士の重力散乱や古在機構はもとの惑星軌道面を大きく変化させるため、惑星の公転軸と中心星自転軸の向きが大きくずれている可能性がある。

系外惑星の軌道傾斜角は、トランジット惑星が発見されて以来しばしばロシター効果と呼ばれる現象を用いて調べられてきた。図4に示したように、トランジット中は自転によって広がったスペクトル線の一部が隠されることによって見かけ上の視線速度変動が起こる。この見かけ上の変動パターン (時間依存性) は星の自転軸と惑星の公転軸が相対的にどのような関係になっているかに依存するため、トランジット中の恒星の視線速度測定から惑星の天球面上での軌道傾斜角 λ を求めることができる。¹¹⁻¹³⁾

太陽系の8つの惑星の公転軸は太陽の自転軸と約 7° 以内でよく揃っている。一方系外惑星に目を向けてみると、短周期巨大惑星は必ずしも中心星の自転と同じ方向に公転しているわけではなく、ある割合で2つの軸がずれていることがロシター効果の観測により判明した。図5は我々のグループの結果を含むこれまでのロシター効果による軌道傾斜角 λ の測定結果を中心星温度の関数としてプロットしている。おおよそ3分の2程度の系は λ が 0° 付近で惑星の公転軸が中心星自転軸と揃っている傾向にあるが、残りの3

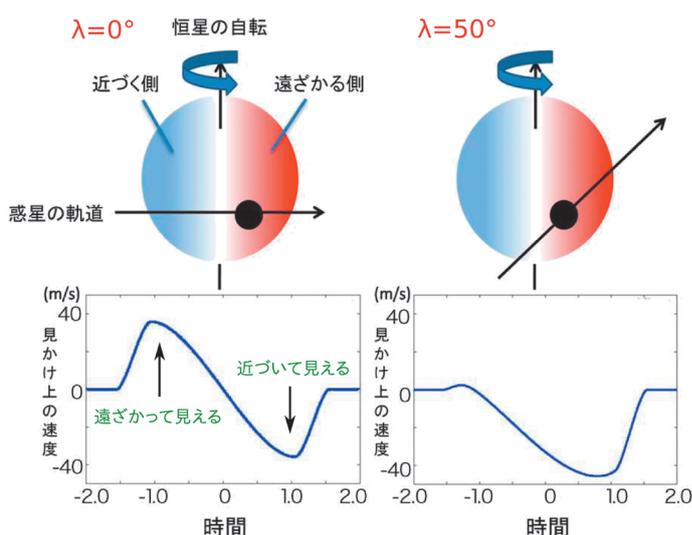


図4 ロシター効果の概念図。自転している恒星面のうち視線方向に近づく側を惑星が隠した場合、恒星は見かけ上遠ざかるように見える。逆に遠ざかる側を惑星が隠すと見かけ上恒星が近づいて観測される。この見かけ上の視線速度変動の時間変化から軌道傾斜角 λ を測定できる。左側は星の自転軸と惑星の公転軸が揃っているケース、右側はずれているケース。「遊星人」第23巻2号p. 134より転載。

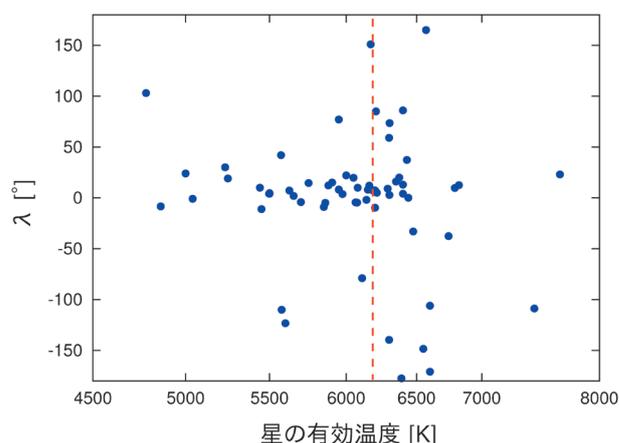


図5 中心星の有効温度と惑星の軌道傾斜角 λ の関係。http://exoplanets.org/から取得 (λ の決定誤差が $\sim 25^\circ$ 以上のもは除外)。有効温度が6,200 K程度 (縦の破線) を境に、高温の星の周りで傾いた軌道の惑星が多く見られる。

分の1程度の系は逆に2つの軸が有意にずれていることが分かっている。特に比較的高温の中心星の周りでずれている傾向が強く、低温の星では揃っている傾向にある。

系外惑星の軌道傾斜角測定の結果をめぐっては現在でもその解釈が分かれている。大きく傾いた軌道を説明するには上記ロ. やハ. といった機構が必要であるためそういった短周期巨大惑星はそれらの機構によって内側に運ばれてきたと考えるのが自然であるが、一見惑星公転軸と中心星自転軸が揃っている系 ($\lambda \approx 0^\circ$) についてももともとずれていたものが中心星との潮汐相互作用によって徐々に揃った可能性があることが指摘されている。⁹⁾ 一方、イ. による円盤との相互作用による巨大惑星の移動を主張するグループ

⁹⁾ 特に表面温度の低い星では恒星内部に対流層が発達しているため潮汐相互作用が大きく、もともとずれていた2つの軸を揃えようとする傾向が強い。¹⁴⁾

も負けじと軌道を大きく傾ける機構を提唱している。^{*10} 短周期巨大惑星の起源に関して、支配的な惑星移動機構を決定するにはさらなる観測と理論的進歩が必要であることは間違いないが、一つ言えることは軌道傾斜角の多様性は多くの系外惑星系が太陽系とは全く異なる進化過程を辿った可能性が高いことを示唆している。

3.3 短周期巨大惑星を持つ系に付随する長周期天体の探査

短周期巨大惑星の起源を観測的に調べる上で惑星の軌道傾斜角以外に鍵となるのが短周期惑星とは別の外側天体の存在である。というのも、ロ、ヤハ、の惑星移動機構の中で大離心率の軌道を生成するには重力的な摂動を与えた巨大な天体の存在が不可欠であるからである。

この点に関して、ケック望遠鏡を用いた短周期巨大惑星を持つ系の外側天体を調べるサーベイ結果が最近報告された。クヌツツオン (Knutson)、ンゴ (Ngo) らのグループは、ケック望遠鏡による長期間の視線速度観測と高コントラスト観測^{*11}を併用することで、広範囲のパラメータ域(外側天体の質量、軌道長半径)でその存在を制限した。長期間の視線速度モニタリングでは短周期巨大惑星を持つ系のうち51%±10%で1-13木星質量の別の巨大惑星が中心星から1-20天文単位の範囲に存在することが明らかになっている。¹⁶⁾

一方高コントラスト観測から、観測した短周期巨大惑星を持つサンプルのうち観測バイアス補正後に48%±9%が外側(中心星から50-2,000天文単位)に恒星質量天体を持つことが報告された。これは、星団に属さない通常の星(散在星)の同じパラメータ域での伴星保有率(束縛された系に2つ以上の恒星がある割合:24%±1%)と比較して高い割合と言える。さらに長期間の視線速度モニタリングの結果と組み合わせると短周期の巨大惑星を持つ系のうち72%±16%の系ではずっと外側に巨大惑星または恒星質量天体が存在することが示される。¹⁷⁾ 短周期巨大惑星の高い外側天体保有率は、それらがより複雑な環境で形成され進化してきたことを示しており、形成機構として上記ロ、もしくはハ、による惑星移動を支持するものとなっている。

4. 残された課題と将来展望

3章では、特に太陽型星周りの短周期巨大惑星の形成機構について見てきた。一方で、2.1節で紹介した系外惑星で見られている特徴4.についてはこれまであまり観測による起源の解明が進んでいない。理論的には、中間サイズの惑星の幅広い周期分布を説明するために全く新しい惑星形成モデルも提唱されはじめている。ペブル集積モデルと呼ばれる、cmサイズの固体材料を円盤外側から内側に運

んできてある場所で惑星を急成長させるといったモデル¹⁸⁾がその例である。しかしながら、スーパーアースや海王星サイズの惑星は質量・半径ともに小さく、ホットジュピターのようにトランジット観測等によって特徴付けを行うのが容易ではないため、大局的な分布のみではなく惑星の個々の性質(軌道傾斜や大気組成等)からそういったモデルを観測的に検証するには今のところ至っていない。

4.1 低温度星の探査へ

スーパーアース・海王星型惑星などの小型惑星の特徴付けを行うには低温度星周りで惑星を探査するのが有効である。ここで低温度星(M型星や褐色矮星)とは、太陽よりもずっと低温で質量や半径がともに太陽の半分以下の恒星を指す。質量半径が小さいために、その周りに惑星があった場合同じサイズの惑星であっても太陽型星に比べて恒星に及ぼす影響が大きく、視線速度法・トランジット法ともにより小型の惑星にまで検出限界が広がる。

低温度星は観測技術の発達している可視光で暗く観測が難しいため低温度星周りの惑星探査はこれまで限定的にしか行われていない。特に恒星質量・半径が急激に小さくなる有効温度3,500 K以下の(中期以降の)M型星に関しては惑星発見数そのものが少なく、分布や特徴などあまり分かっていない。しかしながら低温度星を探査するメリットは大きく、例えばMEarthと呼ばれるM型星を対象にした地上からのトランジットサーベイにより発見された中期M型星周りのスーパーアースGJ 1214bでは、地上と宇宙からの数多くの追観測によって大気に厚い雲を持つことなどはじめて詳細にスーパーアースの特徴が明らかにされた。またごく最近では有効温度が2,500 K程度の極低温度星の周りでもトランジット惑星が発見されており、¹⁹⁾ 今後そうした恒星の周りではどのような惑星の分布になっているかに注目が集まっている。

こうした状況を踏まえ、日本でもすばる望遠鏡を用いて視線速度法による低温度星周りの惑星探査を行う計画(InfraRed Doppler project: IRD)が進行中である。低温度星は近赤外で明るくなるため、我々は近赤外の高分散分光器を新たに導入して100個程度の中期・晩期M型星を長期間視線速度観測することで、地球型惑星を含む多くの惑星の発見を目指している。この計画では、(1)小型惑星の分布から低温度星周りの惑星形成理論を検証する、(2)太陽系近傍にある低温度星周りのハビタブルゾーン^{*12}内にある惑星を発見する、といったことを目標にしている。またこうした近赤外での観測手法を確立することで新たに低温度星周りの小型惑星の特徴付けまで可能となる。例えば、低温度星は雪線も中心星に非常に近いため、雪線の前後でもトランジット惑星が見つかる可能性が高い。そうした小型惑星に対し2.2節や3.2節で述べたような大気や軌道の

^{*10} その例が、高温の星では内部重力波と呼ばれる現象により自発的に恒星表面の速度場が変化し惑星の存在とは無関係に恒星自転軸の向きが変化した、¹⁵⁾とするものである。

^{*11} 補償光学(Adaptive Optics)と呼ばれる手法を用いて、通常は大気のゆらぎ等により広がった天体像を補正して極めてシャープにすることで、より天体の近く(〜0.1秒角)まで高解像度で見る観測手法。

^{*12} いわゆる生命居住可能領域で、地球が太陽から受け取るフラックス(エネルギー)とほぼ同じフラックスを星から受け取るような軌道範囲。

特徴付けを行い、近年提唱されている理論モデルの予想との比較をすることによって、これまで理解が進んでいなかった太陽型星周りで幅広い軌道分布を持つ小型惑星の起源についても解明につながると期待される。

4.2 将来の探査計画

世界的に見て天文学の中でも太陽系外惑星探査は極めて競争の激しい分野である。ケプラー望遠鏡はハビタブルゾーン内にある地球型惑星を発見するなど特筆すべき数々の成果を取めたが、現在でもK2ミッション^{*13}として観測を継続しており低温度星周りのトランジット惑星をはじめとして²⁰⁾今後も重要な発見をもたらすと予想される。欧米では他にもユニークな系外惑星探査が実施・計画されており、アストロメトリ法を用いて長周期の惑星を探るGaia(2013年末から稼働中)や、全天トランジット探査のTESS(Transiting Exoplanet Survey Satellite; 2017年打ち上げ予定)、重力レンズ法による惑星探査を行うWide Field Infra-Red Survey Telescope(WFIRST; 2020年代半ば打ち上げ予定)、などがその例である。本稿では視線速度法とトランジット法による惑星探査に特化して解説したが、系外惑星探査にはそれぞれ長所短所がある。様々な手法を組み合わせることではじめて惑星の全体像の理解、さらにはその起源を解き明かすことができると言えよう。

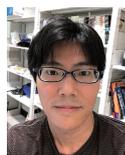
参考文献

- 1) M. Mayor and D. Queloz: Nature **378** (1995) 355.
- 2) J. T. Wright, *et al.*: Astrophys. J. **753** (2012) 160.
- 3) M. Mayor, *et al.*: arXiv: 1109.2497.

^{*13} 本来はケプラー望遠鏡は同じくちょう座領域の観測を継続する計画であったが、姿勢制御装置の故障により2014年からは黄道面に沿った複数の領域を約80日ずつ順番に観測してトランジット惑星を探る新しいミッション(K2)として稼働している。

- 4) D. Rowan, *et al.*: Astrophys. J. **817** (2016) 104.
- 5) J. A. Johnson, *et al.*: Publ. Astron. Soc. Pacific **122** (2010) 905.
- 6) L. R. Doyle, *et al.*: Science **333** (2011) 1602.
- 7) J. Lillo-Box, *et al.*: Astron. Astrophys. **562** (2014) A109.
- 8) D. N. C. Lin, *et al.*: Nature **380** (1996) 606.
- 9) M. Nagasawa, *et al.*: Astrophys. J. **678** (2008) 498.
- 10) D. Fabrycky and S. Tremaine: Astrophys. J. **669** (2007) 1298.
- 11) J. N. Winn, *et al.*: Astrophys. J. **631** (2005) 1215.
- 12) Y. Ohta, *et al.*: Astrophys. J. **622** (2005) 1118.
- 13) T. Hirano, *et al.*: Astrophys. J. **742** (2011) 69.
- 14) J. N. Winn, *et al.*: Astrophys. J. **718** (2010) L145.
- 15) T. M. Rogers, *et al.*: Astrophys. J. **772** (2013) 21.
- 16) H. A. Knutson, *et al.*: Astrophys. J. **785** (2014) 126.
- 17) H. Ngo, *et al.*: Astrophys. J. **800** (2015) 138.
- 18) J. Moriarty and D. Fischer: Astrophys. J. **809** (2015) 94.
- 19) M. Gillon, *et al.*: Nature **533** (2016) 221.
- 20) T. Hirano, *et al.*: Astrophys. J. **820** (2016) 41.

著者紹介



平野照幸氏：専門は系外惑星の観測。主にトランジット法による惑星の検出、観測による惑星形成論の検証に興味がある。

(2016年5月14日原稿受付)

Search for Extrasolar Planets: Diversity and Its Origin Teruyuki Hirano

abstract: Last 20 years have witnessed the rapid progress in extrasolar planetary science. This article reviews the diversity and general property of exoplanets, revealed by previous dedicated exoplanet surveys, by the Doppler and transit techniques in particular, from both space and ground. The diversity and the property of detected exoplanets lead to a revision in the classical planet formation and evolution scenarios and induced their further progresses. Here, I summarize the observational techniques to test the classical and new planet formation and evolution theories. I also introduce world-wide campaigns on the exoplanet search in the next decade.