

系外惑星系 – 第2の地球を探せ

2016年11月25日 平野 照幸

1 導入

最初の太陽型星まわりの太陽系外惑星（以下、系外惑星）は、1995年にペガサス座51番星のまわりで発見された。その後、観測技術の進歩と研究者人口の増大により現在では3500個程度の系外惑星が確認されている。特に2000年代後半からは宇宙からのサーベイ（後述）の開始により惑星発見数が指数関数的に増加している。最近見つかった惑星の中には主星から適度に離れているために表面に液体の水が存在する可能性のある（「ハビタブルゾーン」内の）地球型惑星なども含まれており、系外惑星は研究者のみならず非常に多くの人々の関心を集めている。ここでは、これまでの主な系外惑星研究の進展を振り返るとともに、特に「変光現象」を利用した惑星探査に注目して解説を行う。

系外惑星の発見法には、視線速度法、トランジット法、直接撮像法、重力マイクロレンズ法、タイミング法、アストロメトリ法、位相光度変化法などがある。このうちトランジット法、重力マイクロレンズ法、タイミング法、位相光度変化法が広義の変光現象を利用した探査法である。見つかった系外惑星の分布を図1に示す。ここでは公転周期の関数として惑星質量をプロットしている。この図が示すように、系外惑星の軌道や物理的性質は一様に分布している訳ではなく、偏りを持って分布している。周期が数百から数千日の巨大惑星（図1の右上）は太陽系にも存在しているが、同じサイズの惑星が周期数日の場所にも存在していることがわかる。このような公転周期10日以内の巨大ガス惑星はホットジュピターと呼ばれ、その起源を解明すべく多くの研究が行われている。また、最近では観測精度の向上に伴い、周期数日から100日程度の小型惑星（図1の左下）も多数見つかってきている。

次節では、系外惑星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ついて概観した後、最近注目されている位相光度変化法についても紹介する。

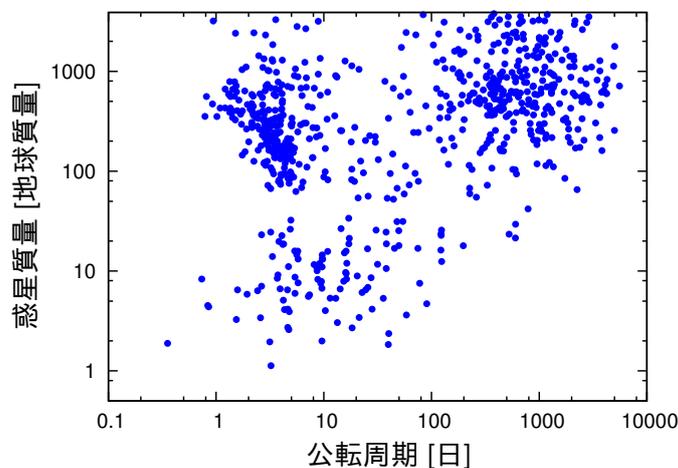


図1 系外惑星の公転周期と質量の分布 (<http://exoplanets.org/>から取得)。

2 系外惑星の主な発見法と観測成果

2.1 視線速度法

最初の太陽型星まわりの系外惑星「ペガサス座 51 番星 b」を含め、初期（2000 年代半ばまで）の系外惑星のほとんどは視線速度法により発見された。視線速度法とは、惑星の重力による主星のふらつきを主星のスペクトル線の周期的ドップラーシフト（視線速度変化）として測定して惑星を間接的に検出する手法である。視線速度の精密測定には波長分解能が $\sim 50,000$ 以上の高分散分光器が用いられ、比較的大型の望遠鏡が必要となる。さらに 1000 分の 1 ピクセルレベルの極めて高い精度で波長較正を行う必要があるが、例えばすばる望遠鏡では可視高分散分光器 HDS のスリットの手前にヨウ素のガスセルを設置して天体の光にヨウ素の吸収線（＝予め波長が厳密に分かっている）をブレンドすることでこれを達成する（ヨードセル法; Sato et al. 2002）。

視線速度法は上で挙げた他の系外惑星探査法に比べて比較的幅広い周期の惑星に対して感度がある。そのため、視線速度法による探査により以下で示すような系外惑星系の一般的特徴が明らかにされた。

1. 公転周期が数日ところに木星サイズの巨大惑星が多数見つかっている。
2. ただしそのような短周期巨大惑星を持つ系の割合はそれほど多くない（太陽型星 1% 程度）（Wright et al. 2012）。
3. 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% 以上が周期 100 日以内に少なくとも一つ惑星を持つ事が報告されている。
4. 公転周期が 5 年から 15 年の範囲に木星型惑星を持つ系は比較的稀（観測バイアスを補正後、太陽型星約 3%）（Rowan et al. 2016）。

この他、巨大惑星の存在頻度については主星金属量とも相関があることが指摘されている。図 2 は巨大惑星の存在頻度を主星金属量の関数としてプロットしたものであるが、主星金属量が大きくなると指数関数的に頻度が高くなるのが分かる。これは、固体物質を材料にした惑星のコアが暴走的に周囲のガスを集積して巨大惑星が形成されるというコア集積モデルの予想と整合的であり、視線速度法によって明らかとなった重要な観測成果といえる。

2.2 トランジット法

2000 年代後半以降、特に多くの惑星を検出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 3 に示したように主星の前を惑星が通過する食を周期的に捉え惑星を検出する極めて単純な手法である。ただし食連星系に比べて恒星の減光はずっと小さく、太陽サイズの恒星の前を木星半径の惑星が通過した場合で約 1%、地球半径の惑星だとおよそ 0.01% の減光となる。図 3 では、惑星トランジットの概念図が示されているが、この単純なトランジットの形状からも (1) 惑星と恒星の半径比 (R_p/R_s)、(2) 恒星半径で規格化した惑星の軌道長半径 (a/R_s)、(3) 軌道公転軸と我々の視線方向のなす角、といった量を制限することが可能である。一方、惑星質量についてはトランジットのみでは測定できないため、別途視線速度測定等が必要となる。

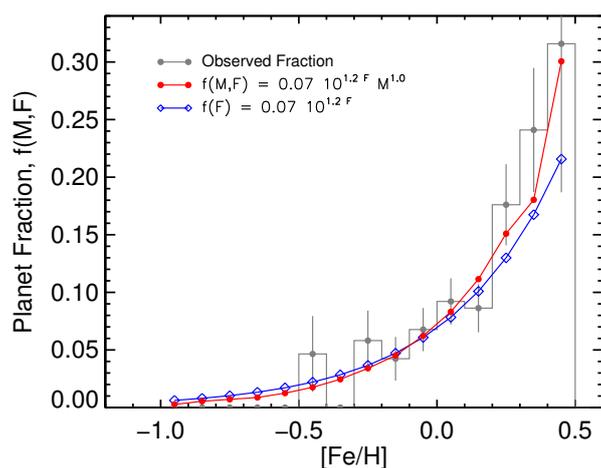


図2 恒星の金属量と惑星の存在頻度 (Johnson et al. 2010)。青・赤の実線は観測された惑星頻度の冪関数による回帰。

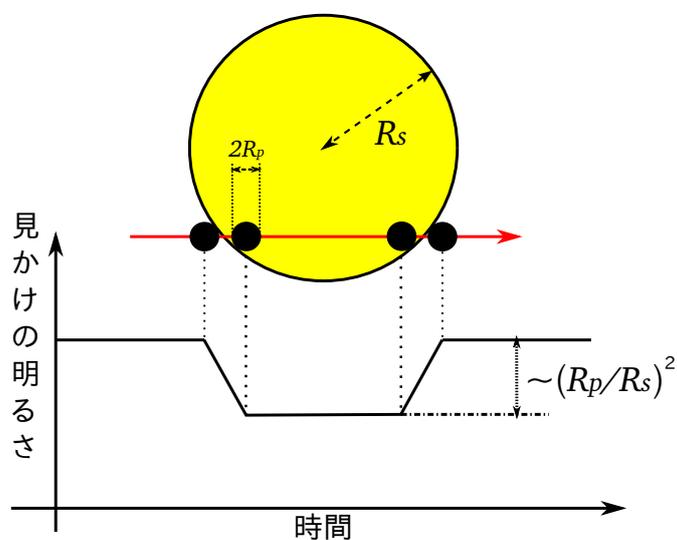


図3 惑星のトランジットと観測される星の光度曲線の概念図。

トランジット法は近年宇宙からのサーベイ観測が精力的に実施されており、他の惑星探査法と比較しても特に多くの惑星・惑星候補を検出している。観測手法ごとにこの一年間 (2015年9月～2016年8月) で確認された惑星の数は、視線速度法が41個、直接撮像法が1個、重力マイクロレンズ法が6個、タイミング法が1個なのに対し、トランジット法では1428個の惑星が確認されている^{*1}。特に、2009年に打ち上げられたNASAのケプラー望遠鏡は、はくちょう座方向の領域にある15万個以上の恒星を4年半の期間モニター観測し、数千個に及ぶ惑星候補を検出した。

ケプラー望遠鏡の発見した惑星系の中には、我々の太陽系によく似た惑星系をはじめとする非常

*1 ただしこの中の多くは数年前からケプラー望遠鏡が検出していた惑星候補が、今年になって正式に惑星として認定されたものである。

表 1 見つかったいる周連星惑星の一覧。ただし周期が確定していないものは除外。

惑星	質量 (木星質量)	公転周期 (日)
HD 202206 c	2.179	1397 ± 19
DP Leonis b	6.05 ± 0.47	10220 ± 730
NN Serpentis c	6.91 ± 0.54	5658 ± 164
NN Serpentis b	2.28 ± 0.38	2829 ± 128
Kepler-16 b	0.333 ± 0.016	228.776 ^{+0.020} _{-0.037}
Kepler-34 b	0.220 ± 0.0011	288.822 ^{+0.063} _{-0.081}
Kepler-35 b	0.127 ± 0.02	131.458 ^{+0.077} _{-0.105}
RR Caeli b	4.2 ± 0.4	4,344 ± 37
Kepler-38 b	< 0.384	105.595 ^{+0.053} _{-0.038}
Kepler-47 b	0.027 ± 0.005	49.514 ^{+0.040} _{-0.027}
Kepler-47 c	0.07 ± 0.061	303.158 ^{+0.072} _{-0.020}
PH1 b	< 0.532	138.506 ^{+0.107} _{-0.092}
Kepler-413 b	0.21 ± 0.07	66.262 ^{+0.024} _{-0.021}
Kepler-453 b	< 0.05	240.503 ± 0.053
Kepler-1647 b	1.52 ± 0.65	1107.592 ± 0.023

にユニークな系が多数含まれている。ケプラー望遠鏡の特筆すべき成果の一つが、近接する連星のまわりでのトランジット惑星（周連星惑星）の発見である（例：Doyle et al. 2011）。それまでトランジット惑星系の外側に伴星が存在するような系は多く報告されていたが、食連星系のまわりでトランジット惑星を発見したのはケプラー望遠鏡が初めてである。食連星まわりのトランジット惑星の存在は、それら 3 つ以上の天体が同一の軌道面内で公転する必要があり、同じ円盤面内で形成され軌道進化してきたことを示唆している。表 1 に示したように、周連星惑星はその後も数多く報告されており、普遍的に存在することが明らかとなった。ケプラー望遠鏡による発見は、連星系での惑星形成・軌道進化という新たな分野を切り開いた。

2.3 位相光度変化法

ケプラー望遠鏡等による宇宙からの超高精度測光観測は、惑星トランジット以外にも微小な恒星の変光現象を明らかにした。例えば、図 4 はケプラー望遠鏡が発見した Kepler-13Ab と呼ばれるホットジュピターを持つ恒星の光度曲線を表しているが、周期的に起こるトランジット以外の部分でも下のパネルで示したように星がわずかに変光している様子が見取れる。実はこの変光は惑星の周期と同じ周期で起こっており、このような伴天体の公転と同期した周期的変光を「位相光度変化」と呼ぶ。惑星による位相光度変化には以下の 3 つの効果が含まれる。

1. 相対論的ビーミング 特殊相対論の効果（慣性系ごとに時間・見込む立体角の違い）によって、恒星が共通重心のまわりを公転するのに同期して増光と減光を繰り返す現象。
2. 潮汐変形による変光 (Ellipsoidal Variation) 惑星の重力が大きいと主星はその潮汐力によってわずかに変形する。場合によっては主星はラグビーボール状になり、それが惑星の公転に伴って回転するように見えるために周期的に変光が観測される。対称性から、公転 1 周期につき 2 度の増減を繰り返す。
3. 惑星の反射光・放射光 主星からの光の一部は惑星によって反射されて観測者に届く。このと

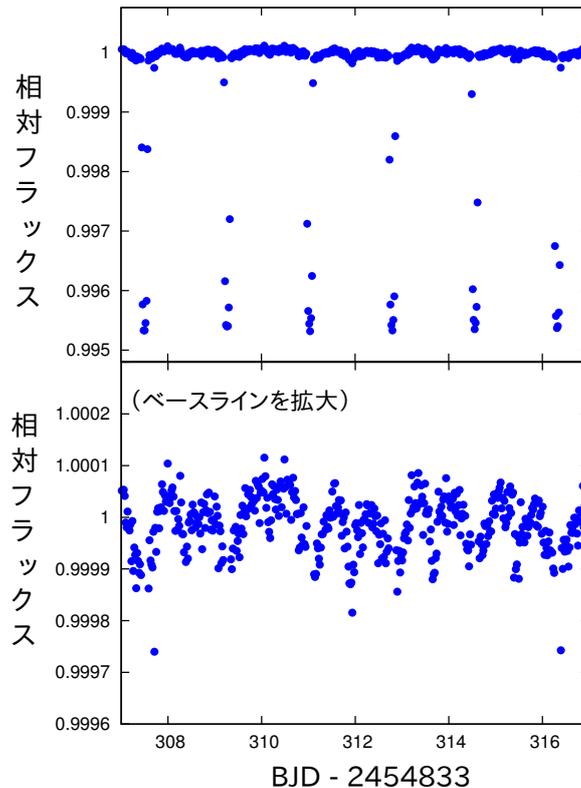


図4 ケプラー望遠鏡で観測された、Kepler-13の規格化された光度曲線の一部。周期的に見える約0.5%の減光がトランジットを示す。下のパネルはベースライン(1付近)を拡大したもの。

き月と同様に満ち欠けをするため主星+惑星の光は惑星の公転と同期して増減する。

これら(いずれかまたは全て)の現象を利用して、系外惑星の存在を間接的に確認する方法を位相光度変化法と呼ぶ。例えばKepler-13系の場合では、光度曲線(図4)を惑星の周期で折り畳むと図5の左のパネルのようになる。ドットが各フラックス点で大きい黒丸はそれをピンニングしたものである(位相0または1がトランジット中心に対応;ただし図ではトランジット部分は除去)。図5の右のパネルでは、変光を位相光度変化の成分ごとに表したものが赤(上記1.),青(上記2.),緑(上記3.)の破線で示されている。図から明らかのように、3つの位相光度変化の成分は異なる位相依存性を持つため、観測された光度変化をうまくモデル化することによってそれぞれの成分を取り出すことが可能である。

トランジット惑星系は、惑星の半径や密度のみならず大気や軌道傾斜の情報も制限できるという点で非常に重要であるが、一般に系外惑星が観測者から見て主星の前をトランジットする確率はそれほど高くない*2。すなわち、仮に主星に近いところを公転する惑星であっても運が良くないとトランジット探査では検出されない。一方、惑星がトランジットしていなくとも十分に大きい惑星であれば恒星の光度曲線に影響を与え、位相光度変化として検出される。位相光度変化から取り出される惑星パラメータには、惑星質量、離心率、軌道長半径、アルベドなどが含まれる。これらはいずれも惑星系を特徴付ける基本的な物理量であるが、測光観測のみから求めることが出来るという

*2 トランジット確率は惑星の軌道長半径を a 、恒星半径を R_s として、一般に R_s/a で近似される。

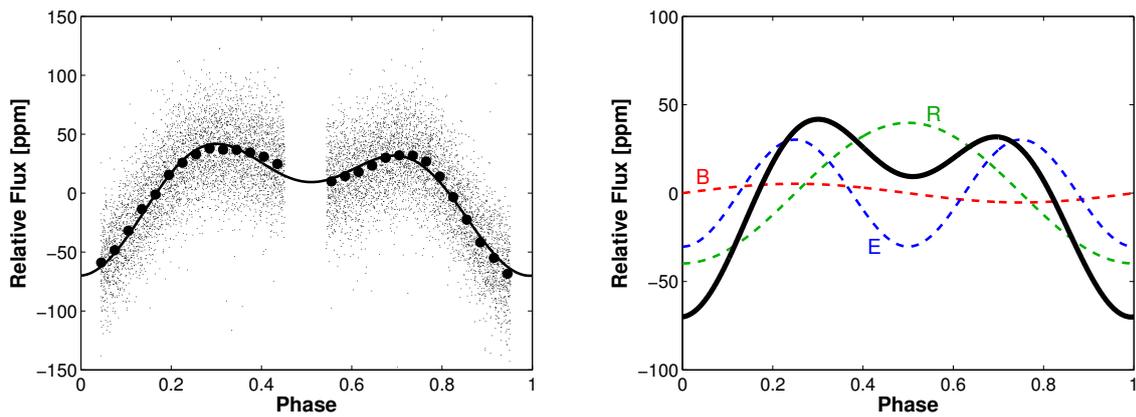


図5 (左) 光度曲線を惑星の周期で折りたたんだ際に見られる Kepler-13b の位相光度変化 (黒の実線: Shporer et al. 2011)、(右) 観測された位相光度変化に対するベストフィットモデル (黒実線) と 3 つの各成分 (赤・青・緑の破線)。

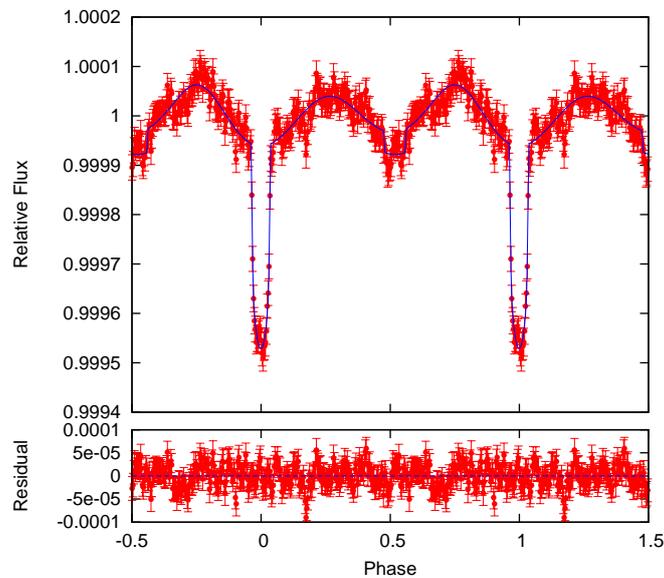


図6 Kepler-91b の位相光度変化 (Sato et al. 2015)。2 周期分を示してある。下のパネルはモデルフィットからの残差。

点で有用である。

日本のグループも位相光度変化法を用いた惑星系の探査を実施している (例: Hirano et al. 2015)。図6は、Kepler-91 と呼ばれるケプラー望遠鏡で観測された巨星の光度曲線をトランジット惑星の周期 (約 6.25 日) で折り畳んだものである。アルファベットの w を上下逆にした特徴的な位相光度変化が見られ、この折り畳まれた光度変化をトランジットを含めてモデル化することで、Kepler-91b は質量が 0.64 ± 0.05 木星質量、半径が 1.41 ± 0.04 木星半径の少し膨らんだガス惑星であることが明らかとなった (Sato et al. 2015)。位相光度変化のうち潮汐変形による変光は、主星半径の 3 乗にほぼ比例するため、半径の大きい早期型星や巨星などの進化した星でそのシグナルが大きくなる。一般に早期型星や進化した星ではトランジットのシグナルが小さく、視線速度法

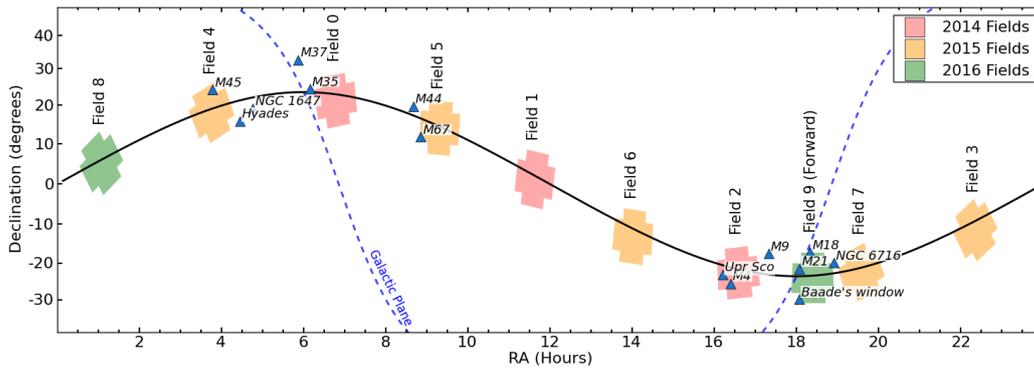


図 7 これまでの K2 の探査領域 (<https://keplerscience.arc.nasa.gov/K2/Fields.shtml>)。 「+」マークがケプラー望遠鏡の観測視野を表す。

による探査も相対的に難しいことから、位相光度変化法による惑星探査が今後発展することが期待されている。

3 最新の系外惑星探査

多くの特筆すべき成果を収めたケプラー望遠鏡であるが、2013年に姿勢制御装置の故障により従来のミッション（はくちょう座方向の一つの領域のモニター観測）が継続不能となった。その後1年ほどかけて生き残った機器を使って行える探査が検討され、最終的に太陽の輻射圧を利用して姿勢を制御し、黄道面に沿った領域をモニター観測する「K2」と呼ばれるミッションが採択・開始された。K2では一つの領域をモニター観測してトランジット惑星を探査し、約80日ごとに領域を変えていくという手法が採られている。最終的にはこれを2018年から2019年ごろまで継続することになっている。

図7は、K2がこれまで観測した領域（赤経、赤緯）を示す。ケプラー望遠鏡は当初のミッションで非常に多くのユニークな惑星系を検出するのに成功したが、一方でそれらユニークな系の大半は暗く（ $V > 14$ ）地上からの追観測には不向きなものが多かった。K2については短いサーベイ期間を考慮して比較的明るい天体に対象が絞られており、追観測が容易に実施できるものが数多く含まれる。

我々は2014年からK2で得られた恒星の光度曲線の解析とその後の追観測を実施している。K2はNASAでの正式な解析・追観測チームがないため、我々は独自に惑星を検出するパイプラインを作成し、K2の各観測領域で30-50個程度の惑星候補を検出している。図8はこうして検出された惑星候補の一つに対して、岡山188cm望遠鏡/MuSCATカメラを用いてトランジット追観測を実施したものである。この系は可視・近赤外分光観測などから主星が有効温度3200 K程度の低温度星であることが判明し、さらにすばる望遠鏡による高コントラスト撮像などから惑星の偽検出の可能性を排除して短周期（約2.26日）のスーパーアース（半径は地球半径の約2.3倍）であることを確認した（K2-28b; Hirano et al. 2016）。低温度星は半径が小さく、小型惑星であっても相対的に大きなトランジットシグナルを生み出すため、K2-28系では今後のさらなる追観測によって惑星大気等の探査が進むと期待されている。

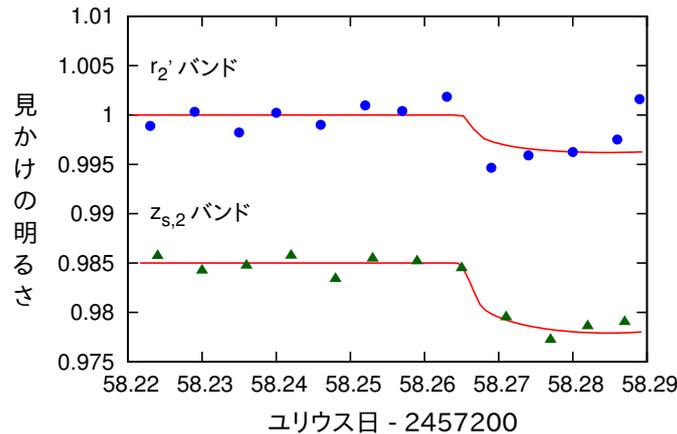


図 8 岡山 188cm 望遠鏡/MuSCAT による K2-28b のトランジット追観測 (<http://www.oao.nao.ac.jp/public/research/k2-28b/>)。

K2-28 に限らず、最近では特に低温度星 (M 型矮星・褐色矮星) のまわりでの惑星探査が活発に行われている。この一年間で系外惑星関連の特に大きなニュースとしては、(1) 有効温度約 2500 K の極低温度星 (TRAPPIST-1) のまわりでの複数のトランジット惑星の発見 (Gillon et al. 2016)、(2) 太陽から最も近い恒星 (三重連星) の一つのプロキシマ・ケンタウリのまわりでの地球型惑星の発見 (Anglada-Escude et al. 2016)、といったものが挙げられる。これらはいずれも低温度星に特化した惑星探査の成果であり、低温度星に対するコミュニティの関心の高さを表している^{*3}。今後こうした発見は続くものと予想される。

参考文献

1. Anglada-Escudé, G., et al. 2016, *Nature*, 536, 437
2. Doyle, L. R., et al. 2011, *Science*, 333, 1602
3. Gillon, M., et al. 2016, *Nature*, 533, 221
4. Hirano, T., et al. 2015, *ApJ*, 799, 9
5. Hirano, T., et al. 2016, *ApJ*, 820, 41
6. Johnson, J. A., et al. 2010, *PASP*, 122, 905
7. Rowan, D., et al. 2016, *ApJ*, 817, 104
8. Sato, B., et al. 2002, *PASJ*, 54, 873
9. Sato, B., et al. 2015, *ApJ*, 802, 57
10. Shporer, A., et al. 2011, *ApJ*, 142, 195
11. Wright, J. T., et al. 2012, *ApJ*, 753, 160

^{*3} 低温度星まわりではハビタブルゾーンが主星に近く、比較的短い時間でハビタブルゾーン内の惑星の発見確認ができるため特に重要なターゲットとされている。