

スーパーアースを含んだ多惑星系の視線速度法による観測 Guillem Anglada-Escud et al.(2012) レビュー

総合研究大学院大学 M1 鬼塚昌宏

1 背景

系外惑星の観測方法には惑星が恒星の前を横切るときの周期的な減光を検出するトランジット法、惑星が回ることによる恒星のゆれをドップラーシフトとして検出する視線速度法などがある。視線速度法について考えると、質量 M_* の恒星のまわりを質量 M_p の惑星が半径 a の円軌道で公転しているとき、恒星は速度

$$v_* \simeq M_p \sqrt{\frac{G}{M_* a}} \quad (1)$$

でゆれることになる。例えば、太陽系において地球の公転による太陽のゆれは 8cm/s となる。

式 (1) から恒星の質量が小さいほど、惑星の質量が大きいほど、また軌道半径が小さいほどゆれの速度が大きくなり、発見しやすくなることがわかる。また、軽い星ほど光度が小さくなるためハビタブルゾーン (水が液体の状態で存在できる温度領域) の半径が小さくなる。例として質量 $0.3M_\odot$ の M 型星のまわりを質量 $5M_\oplus$ のスーパーアースがハビタブルゾーン内の軌道半径 0.1AU で回っている場合、中心星のゆれは 3m/s となる。

この視線速度変化を検出するためには、吸収線スペクトルの波長を高精度に決定することが必要となる。よく使われる波長較正法は大きく分けて 2 つあり、1 つはヨウ素セル法、もう 1 つは同時較正法と呼ばれる。

ヨウ素セル法は望遠鏡で取り入れた星のスペクトルに、波長の目盛としてヨウ素の吸収線を刻み込む方法である。この方法は簡便・安価に高精度を達成でき、既存の望遠鏡に後付けすることも容易である点がメリットとなるが、光をヨウ素セルに通す過程でスペクトルが壊れてしまうため、精度は同時較正法には原理的に劣る。

同時較正法は望遠鏡からの光を分光器へ入れながら、Th/Ar ランプなどの標準光源からのスペクトルも同時に光ファイバーで分光器へ取り入れる方法である。この標準光源で較正しながら星のスペクトルを求める。ヨウ素セル法と違い星のスペクトルを壊すことがないためとても高精度な分光が可能だが、環境変化を最小限に抑えるために真空容器を必要とするなど、製造費・維持費ともに高価で、専用の望遠鏡を新造する必要があることが欠点となる。

2 対象天体

対象天体の GJ 667C は質量 $0.310 \pm 0.019M_\odot$ で M1.5 型のスペクトルをもち、連星系である GJ 667AB と共通の固有運動をもっている。太陽からの距離は 6.8pc 、年齢は $2\text{-}10\text{Gyr}$ である。2009 年に 7 日周期の惑星候補が発見された。さらに Bonfils et al.(2011) にて別の 28 日周期の候補が報告されたが、有意に惑星として認められなかった。今回は解析プログラムを改良し、同じ観測データから惑星を検出した。観測に使用した機器は 3 つ。1 つ目は European Southern Observatory (ESO) の La Silla Observatory の 3.6m 望遠鏡の高分散分光器 HARPS で、同時較正法を採用している。2 つ目は Las Campanas Observatory の 6.5m Clay Magellan Telescope に搭載された分光器 PFS で、ヨウ素セル法を採用。最後に Keck Observatory の分光器 HIRES で、こちらもヨウ素セル法である。なお、惑星候補の検出は HARPS のみで行い、他の検出器のデータは値の有意性を高めるために使用している。

3 解析

視線速度変化は星のスペクトルのテンプレートを作成し、そのテンプレートと観測データの波長の差から計算して求める。Bonfils et al.(2011) では星のスペクトル型からテンプレートを作成した。この方法はスペクトル型がわかればテンプレートを作れるため、暗い星でも視線速度を求めることができる。したがって、たくさんの星を見るサーベイ観測に向いていると言える。

これに対し、今回の解析では観測した星専用テンプレートを作成した。この方法では、より質の高いテンプレートができるが、詳細なスペクトルが必要であるために明るい星でないとテンプレートを作ることができない。したがって、個々の星のより詳細な分析に向いていると言える。

視線速度変化を求めたのち、そのデータをフーリエ変換してピリオドグラムを求め、そのピークから惑星の数と周期を制限する。その際、False Alarm Probability(FAP) を求め、 $FAP < 1\%$ のときに惑星候補と認めた。その後多惑星のケプラー運動でフィッティングし、惑星の質量や軌道などを計算した。

得られたピリオドグラムを図1に示す。一番大きなパワーは Planet b によるもので、これは周期 7.20 日、最小質量 $5.2M_{\oplus}$ の惑星候補である。このシグナルを引くと次に大きなものは 1.8m/s/yr の Trend で、これは GJ 667AB からの重力作用による。これも引くと次のピークは Planet c によるもので、周期 28.2 日、最小質量 $4.5M_{\oplus}$ である。このシグナルも引くと、Planet d のピークが出る。周期 74.8 日で、最小質量 $5.7M_{\oplus}$ であった。これを引くと $FAP < 1\%$ となるシグナルが存在しないため、検出された惑星数は3つとなった。それぞれのフィッティング結果は図2の通りである。

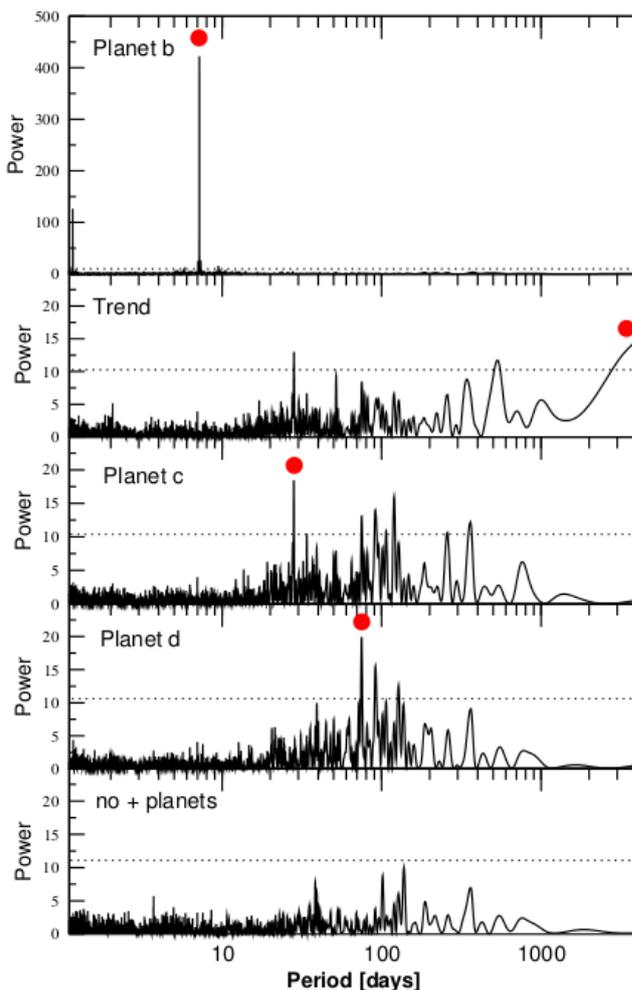


図 1: 得られたピリオドグラム

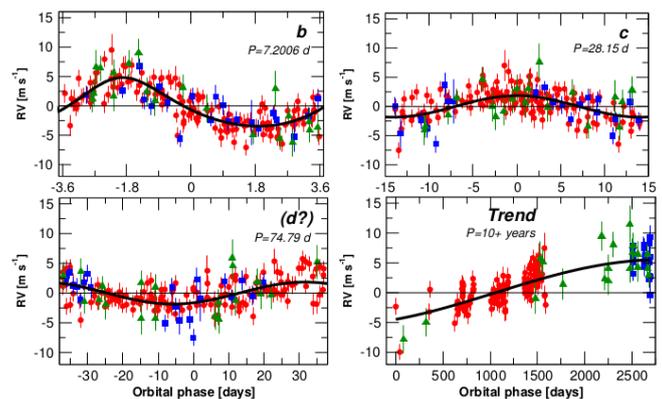


図 2: 視線速度変化

太陽系と GJ 667C におけるハビタブルゾーンと各惑星の軌道を表したものが図3である。ハビタブル

ゾーンの内縁は惑星の雲量によって、外縁は大気中の CO₂ の量によってそれぞれ定義される。ここから、GJ 667Cc はハビタブルゾーン内にあることがわかる。また、GJ 667Cd も大気中に CO₂ が多ければハビタブルとなる。なお、実際に液体で存在できるかどうかは惑星のアルベドや内部構造にもよるが、それらは現在のところ不明である。

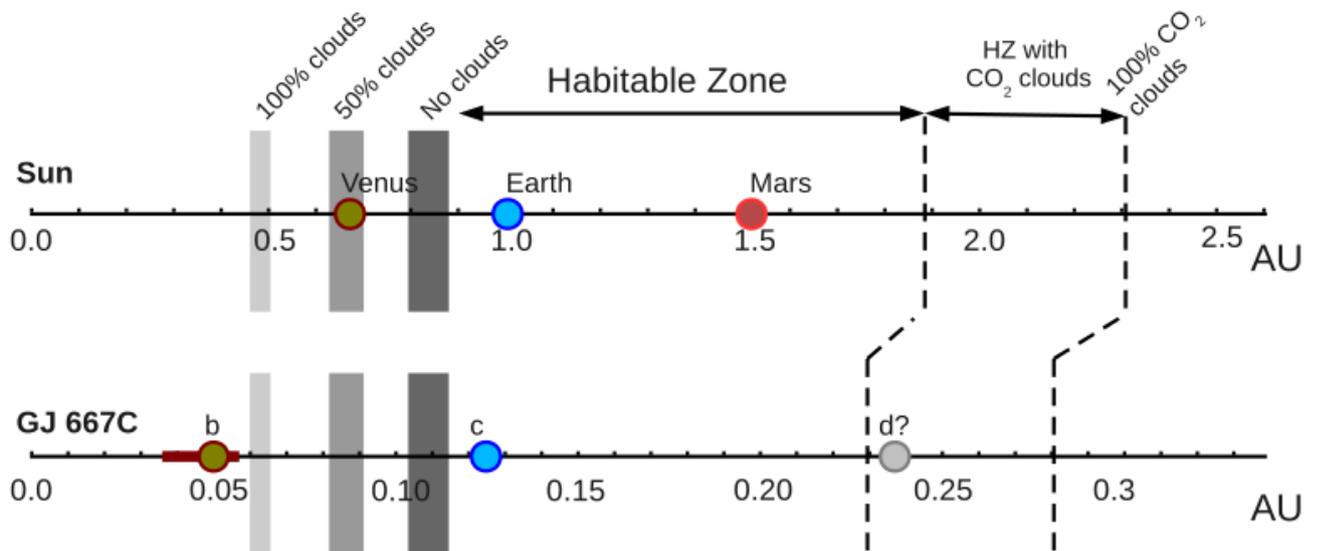


図 3: 太陽系と GJ 667C でのハビタブルゾーンと惑星の配置

GJ 667Cd には「？」とついているが、これは主星表面の活動が自転によって周期変動しているように見えることによる偽検出の可能性があることを意味している。主星表面の活動の周期性を解析するために、3つの指標を使う。1つ目は CaII H+K S-index in the Mount Wilson system (S-index) で、CaII HK 線 (H:3938, K:3933) の強度を表す。これは磁場によって発生する彩層からの放射に由来する。2つ目は Bisector span (BIS) で、スペクトル線の左右非対称の度合いである。黒点や羊斑が星の上で回転することによって変動する。3つ目は波長校正されたスペクトルと、星のスペクトル型に対して作られたテンプレートとの cross-correlation function (CCF) の半値幅 (FWHM) で、スペクトル幅の時間変動が視線速度の変動に影響を与えていないかを確認する。

解析結果は図 4 に示す。S-index と FWHM において周期 105 日のピークが見られた。これは GJ 667C の自転周期に由来するとみられる。GJ 667Cd は、Delfosse et al.(2012) において周期が 75 日ではなく 106 日であった。このことから GJ 667C の自転を偽検出したのではないかと、ということで GJ 667Cd には「？」がつけられている。

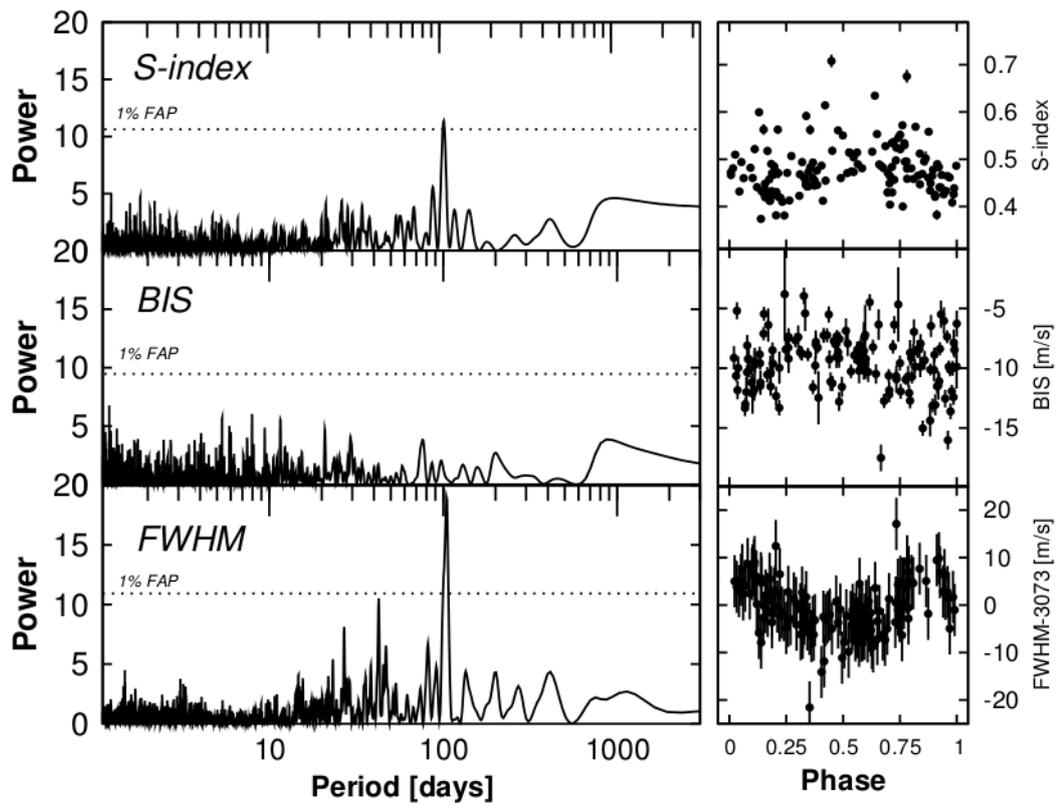


図 4: 左:S-index,BIS,FWHM のピリオドグラム 右:ピークの周期で畳み込んだ変動