

# 論文内容の要旨

## 論文題目

Spectroscopic Studies of Transiting Planetary Systems

{分光観測に基づいたトランジット惑星系の研究}

氏名 成田 憲保

2007年12月までに、太陽系外惑星は既に250個以上が発見されている。しかし、これまでに発見された太陽系外惑星系には、まだ太陽系の惑星に似た軌道要素・質量の惑星はほとんどない。むしろ木星のような巨大惑星であるにもかかわらず公転周期がたった数日しかない惑星(ホットジュピター)や、大きな離心率を持った惑星(エキセントリックプラネット)が多く存在している。こうした観測事実から、宇宙に存在する惑星系の多様性が次第に明らかとなってきた。それでは、この多様な太陽系外惑星はどのようにして生まれ、どのような環境にあるのだろうか？ 本研究の目的は、これらの根本的な疑問に対する答えを、観測によって探ることである。

太陽系外惑星系の中でも、特に惑星の公転軌道が我々から見て恒星の前面を通過する(食を起こす)ような惑星系をトランジット惑星系と呼ぶ。このような惑星系では惑星のトランジットを測光観測することで、惑星の大きさや軌道傾斜角など他の観測では得られない多くの情報を得ることができ、より詳細に惑星の性質を知ることができる。さらに、トランジット中のわずかなスペクトルの変化を分光観測することで惑星についてさらなる情報を得ることが可能である。そこで我々は、このトランジット惑星系をターゲットとして、すばる望遠鏡の高分散分光器HDSを用いて、2つの分光観測に基づいた研究を行った。

1つめの研究は「Transmission Spectroscopy」、すなわちトランジット惑星の大気吸収探索である。この観測の原理は図1のように説明できる。まず恒星の放つ光が一定であり、惑星の放つ光が無視できるとする。すると惑星がトランジットしていない時には恒星の光がそのまま観測できるが、惑星がトランジットしている時には惑星が恒星の一部を隠すため全体的に減光する。さらに恒星の光が惑星の外層大気(光学的厚みが小さい領域)を透過してくることから、外層大気中の物質による追加吸収が起こる。これにより、トランジットの中と外のスペクトルを比較することで、トランジット惑星の大気吸収を探し、十分な精度があれば大気の組成などを調べることが可能となる。

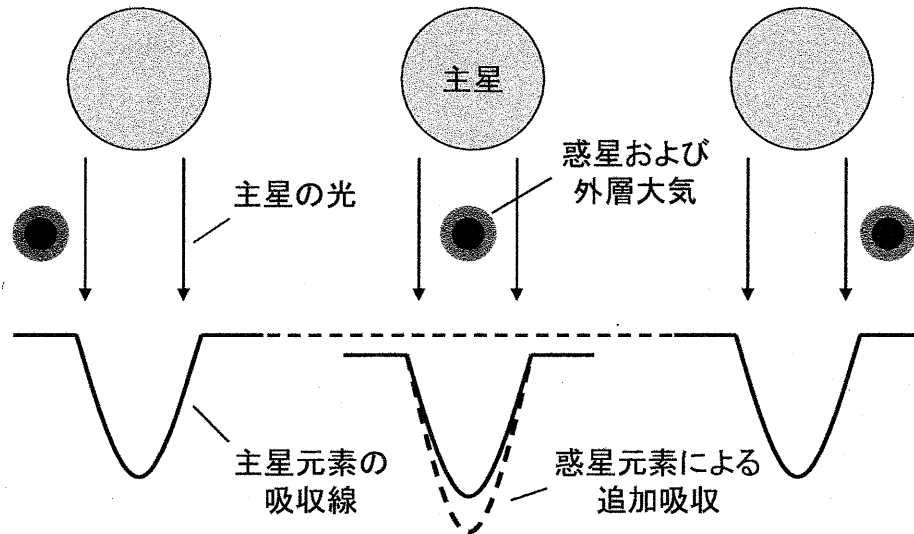


図 1: Transmission Spectroscopy の概念図

2000年に最初のトランジット惑星 HD 209458b (V等級 $\sim 7.7$ 等)が発見されてすぐ、惑星大気モデルの研究者らはナトリウム・カリウムなどのアルカリ金属の吸収線で $\sim 0.15\%$ 以上の追加吸収が期待できることを発表した (Seager & Sasselov 2000, Brown 2001 など)。そして、その後行われたハッブル宇宙望遠鏡の観測では、HD 209458のナトリウム線 ( $5893 \pm 6\text{\AA}$ ) において、 $0.0232\% \pm 0.0057\%$ の追加吸収が確認された (Charbonneau et al. 2002)。

そこで我々はこの結果を追試することを目指して、すばる望遠鏡 HDS で初めてのトランジット観測を行った。本研究では非常に小さなスペクトルの変化をとらえるため、我々は温度変化や望遠鏡の向きなどの変化による HDS の応答の変動を経験的に補正する解析方法を開発し、取得したデータに対して大気吸収探索を行った。この結果、我々は惑星の大気吸収を検出することはできなかったが、 $5893 \pm 6\text{\AA}$ の領域で、大気吸収は $0.12\%$ 以下 ( $3\sigma$ ) という制限を得た。この制限は、1晩の地上観測で得られたものとしては最も強い制限であり、また初期に提案された大気モデルが予言した大気吸収を検出するのに足る精度を達成することができた。

2つめの研究はトランジット惑星系に見られる「Rossiter-McLaughlin 効果」(以下、ロシター効果)の測定である。ロシター効果は、惑星がトランジット中に、惑星が徐々に移動しながら恒星の自転速度成分を隠してしまうことによって、見かけ上、恒星が近づいたり遠ざかったりして観測される効果である (図2)。このロシター効果による視線速度のずれは、恒星の自転軸と惑星の公転軸のなす角度  $\lambda$  (図3) などのパラメータを用いて記述することができる (Ohta, Taruya, & Suto 2005)。

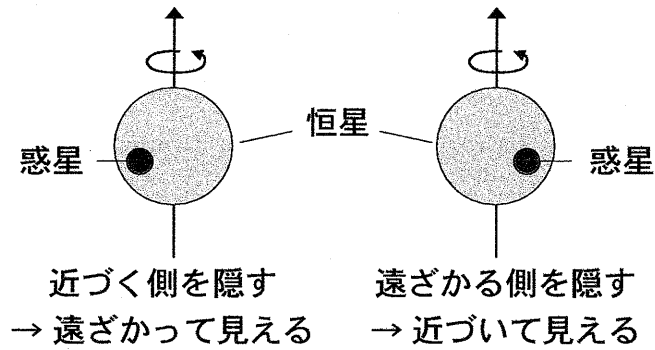


図 2: Rossiter-McLaughlin 効果の概念図

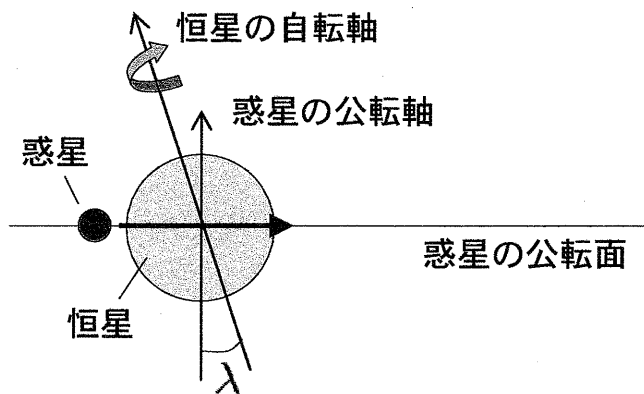


図 3: 恒星の自転軸と惑星の公転軸のなす角度  $\lambda$  の概念図

ところで、現在の標準的な惑星形成理論では、惑星は原始星をとりまく原始惑星系円盤の中で形成されると考えられている。しかしホットジュピターについては、最初にコアが誕生した(原始星から離れた)場所から現在の軌道へどのように進化してきたのか、まだ完全には明らかになっていない。例えば、原始惑星系円盤と惑星の相互作用を考えるモデルでは、最終的な惑星の軌道長半径の分布はおおまかに説明できる (Ida & Lin 2004 など) もの、離心率の分布を再現することはできていない。一方、巨大惑星同士の重力散乱や遠く離れた伴星からの擾動を考えるモデルでは大きな離心率を生み出すことはできるものの、これらのモデルを強く支持する観測的証拠はまだ得られていない。

そこで登場するのが、ロシター効果の観測量  $\lambda$  である。すなわち、円盤との相互作用による軌道進化モデルでは  $\lambda$  は小さくなることが予想されるが、他の惑星や伴星との相互作用によるモデルではある程度の割合で惑星が大きな  $\lambda$  を持つことが理論的に予言されている。そのため  $\lambda$  という量は惑星の進化の過程を反映しており、特にホットジュピターがどのように形成されたのかについて知る手がかりを与えてくれる。

我々は2004年に発見された暗い(V等級~11.8等)トランジット惑星系 TrES-1のロシター効果の検出を目指して、2006年にすばる望遠鏡とMAGNUM望遠鏡を用いた同時分光測光観測を行った。その結果、我々はTrES-1のロシター効果の検出に成功するとともに、この系の $\lambda$ に対して $\lambda = 30^\circ \pm 21^\circ$ という制限をつけた。この制限から、我々はこの系で惑星が順行して公転していることを確認した。これは世界で3例目のロシター効果の検出および $\lambda$ への制限であったが、TrES-1はそれまでに観測がなされていた2つの惑星系(V等級~7.7等)に比べ著しく暗く、約2%の明るさしかない。つまり本研究は、V等級が~12等の暗いトランジット惑星系でもロシター効果の測定が可能であることを示した初めての結果となった。

近年トランジットを利用した太陽系外惑星探しは世界中で活発になってきている。今後は地上および宇宙からの観測でより多くのトランジット惑星系が発見されるだろう。本博士論文で行った「Transmission Spectroscopy」と「ロシター効果の測定」という2つの分光観測によるトランジット惑星系の研究は、今後の新たなターゲットに対しても方法論を適用していくことが可能である。将来より多くのターゲットに対してこれらの研究を継続していくことで、太陽系外惑星はどのようにして生まれ、どのような環境にあるのかという疑問に対し、より明確な答えを得ることができるだろう。