

西はりま天文台 60cm 望遠鏡を用いたトランジット法による 太陽系外惑星探査

木村真二¹、藤田健太¹、石隈慎一郎¹、白岩真弥¹、豊田英里¹、浦川聖太郎¹、佐藤文衛²、
伊藤洋一¹、時政典孝³、向井 正¹

1) 神戸大学自然科学研究科

2) 国立天文台 岡山天体物理観測所

3) 兵庫県立西はりま天文台

Search for extra solar planets by transit method with Nishiharima Astronomical Observatory 60cm telescope

Shinji KIMURA¹, Kenta FUJITA¹, Shin'ichiro ISHIGUMA¹, Shinya SHIRAIWA¹, Eri
TOYOTA¹, Seitaro URAKAWA¹, Bun'ei SATO², Yoichi ITOH¹, Noritaka TOKIMASA³,
Tadashi MUKAI

1) Graduate School of Science and Technology, Kobe University

2) Okayama Astrophysical Observatory

3) Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo, Hyogo 679-5313, Japan

E-mail: kshinji2@kobe-u.ac.jp, shinji2@wa3.so-net.ne.jp

(Received 2006 July 27)

概要

1995年に初めて我々の太陽以外の恒星の周りを回る惑星、太陽系外惑星が発見されて以来、その数は現在までに170個に達している。太陽系外惑星の検出方法はいくつかあるが代表的なものとしては、ドップラーシフト法とトランジット法がある。我々はすばる望遠鏡でのドップラーシフト法による観測から視線速度に変化の見られる天体を、西はりま60cm望遠鏡を用いて観測し、トランジットの検出を試みている。我々は、西はりま60cm望遠鏡を用いた測光観測において高精度を達成するための手法を確立した。本論文ではこの手法を用いることにより、高い精度(<0.3%)で既知のトランジット天体のトランジット検出に成功したことを報告する。

Abstract

Since the first announcement of a planet orbiting another solar-type star in 1995, 170 extra solar planets have been detected to date. Search methods for extra solar planets involve Doppler shift and transit methods. We aim to find out extra solar planets by these methods. A number of the stars with large radial velocity variations were detected, using the Subaru telescope. We are observing these objects with the 60cm telescope at Nishiharima Astronomical Observatory

(NHAO) to detect the planetary transit. We have established the observational and analysis methods for the high precision-photometric observations with the NHAO 60cm telescope. In this paper, we report that the detection of the known transiting planet has been successful with enough accuracy ($<0.3\%$).

Key words: Extra solar planet – Transit

1. 背景

1-1. 太陽系外惑星

太陽系とは、太陽および太陽の周囲を公転する天体と微粒子、さらに太陽活動が環境を決定する要因となる空間から構成される領域のことをいう。この、太陽を公転する天体の代表的なものとして、我々が存在している地球などのような惑星があるが、惑星とは一般的に恒星の周りを公転している天体のことをいう。我々の太陽系の場合、この恒星とは太陽のことであるが、宇宙には太陽以外にも多数の恒星が存在する。この太陽以外の恒星の周りを公転する惑星のことを太陽系外惑星、または系外惑星という。

歴史的に見ると、太陽系以外にも惑星が存在するのではないかという考えは実際に、探査が始まるよりも以前よりあった。16世紀にはイタリアの宗教家で哲学者のジョルダノ・ブルーノが、太陽も恒星の一つであり、他の恒星も太陽系のような世界があるという説を唱えたが、これは科学的というよりはむしろ彼の信仰、宗教的世界観によるところが大きかった。20世紀中盤からは急速に進歩した望遠鏡技術を用いて本格的に太陽系外惑星探しが始まりいくつか惑星発見の発表もあったが、フォローアップ観測もうまくいかず、1995年に系外惑星は存在しないとされた。

しかし奇しくも同じ年、1995年にペガサス座 51 番星 (51 Pegasi) の周りに惑星が回っていることが発見された (Mayor & Queloz 1995)。これが、世界で初めての主系列星の周りを公転する太陽系外惑星の発見である。この惑星 (51 Pegb) は、0.47 木星質量で、軌道長半径が 0.051AU (ちなみに、水星の軌道長半径は 0.39AU)、4.2日で主星の回りを公転するという我々の太陽系にある惑星からは想像もできない姿をしていた。ちなみに、パルサーの周りを回る惑星 PSR 1257+12 はこれ以前に検出されていた (Wolszczan & Frail 1992)。

51 Pegb の発見で惑星系への固定概念が消え、観測の対象・手法などが広がり様々な特徴を持った惑星が次々に発見されていった。主星の近傍を短周期 (水星軌道より 1 桁内側) で公転する木星クラスの質量を持った巨大ガス惑星「ホットジュピター」。このような惑星は中心星に近いいため強い熱放射を受け、1000℃を超える高温になっていると考えられている。さらに、軌道離心率が 0.5 以上という歪んだ楕円軌道で公転している「エキセントリックプラネット」。これは、灼熱から酷寒まで激しい気温差の四季を持つと言われている。その他にも、我々の太陽系のようにいくつかの惑星を持つ「多重惑星系」、7.5 地球質量 (Rivera et al. 2005)・5.5 地球質量 (Beaulieu et al. 2006) という低質量の惑星、さらには木星型でも地球型でもない超巨大なコアを持つ灼熱惑星 (Sato et al. 2005) なども発見されている。

1995年に初めて発見されてから 2005年2月10日現在までに、太陽型星における惑星 (ドップラーシフト法で確認されているもの) が 170 個、それ以外も含めると 180 個の系外惑星の存在が確認されている。このように多様な惑星がハイペースで発見されている中、その惑星がどのように形成されたのかという惑星形成論が現在様々なところで議論されている。我々の太陽系でのみでなく、多くの種類の惑星系も含めた形成論を構築するためにも観測によるさらに多くの、そしてさらに多様な太陽系外惑星発見が重要になってきている。

1-2. 検出方法

太陽系外惑星の検出方法としては、ドップラーシフト法、トランジット法、重力レンズ法、アストロメトリ法、直接検出、パルサータイミング法がある。現在までに発見されている系外惑星は、そのほとんどがドップラーシフト法によるものである。ここでは主に、代表的な検出方法であるドップラーシフト法とトランジット法について詳しく述べる。

(a) ドップラーシフト法

我々の太陽系では、「太陽という恒星の周りを惑星が公転している」と言われる。しかし実際は、惑星が恒星の周りを公転していると、恒星も惑星の重力の影響を受けてお互いの共通重心の周りを楕円軌道で公転する。この周回運動の速度が視線方向成分を持っていれば、恒星からの光はドップラー効果を受け、波長が周期的に変動する。つまり恒星からの光の波長は、恒星が近づいてくる時には青い方へ、遠ざかるときには赤い方へシフトするのである。この波長の変動、すなわち恒星の視線速度変化を、分光観測によって得られた星の光のスペクトルに見られる吸収線の微小なずれから検出する方法である。例えば我々の太陽系の場合、太陽の視線速度変化は、木星によるものは13m/s、地球によるものは10cm/sである。この近似曲線から得られた、公転周期(P)、軌道離心率(e)、振幅(K)を(1)式と(2)式に代入することにより、惑星の最小質量($m_p \sin i$)、軌道長半径(a)を求めることができる。

ドップラーシフト法で観測できる恒星の速度は視線方向成分のみである。よって、例えば惑星の軌道が視線方向に対して垂直の状態(フェイスオン)であると視線速度は0に、そこから 30° 傾けば(軌道傾斜角が 30°)観測した視線速度は実際の恒星の速度の2分の1になってしまう。つまり観測値と実際の速度は、惑星の公転面が視線方向と一致している状態(エッジオン)の場合のみ一致するが、それ以外の状態では観測値の方が実際の恒星の速度よりも小さくなる。したがって、視線速度から求められる惑星質量も実際の惑星の質量よりも小さい値となる。具体的には、軌道傾斜角(i)の不定性がかかった最小質量($m_p \sin i$)が求まることになる。さらに、恒星が受ける惑星からの重力は、惑星が重いほど、または軌道長半径が小さいほど大きくなる。よって、現在までドップラーシフト法で見つかっている惑星にはこのような特徴を持ったものが多い。

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{m_p \sin i}{(M_{star} + m_p)^{2/3} \sqrt{1 - e^2}} \quad (1)$$

$$P = \left(\frac{a}{1AU} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{M_{star}}{M_\odot} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

(b) トランジット法

地球から太陽を観測しているときに、水星や金星、もしくは月が太陽の前面を通過するとそれらが影になり太陽の明るさが一時的に暗くなる。いわゆる掩蔽(食)現象である。これと同じように、恒星の周りを回る系外惑星の公転面が視線方向にほぼ一致していると、惑星が恒星の前面を通過する時に恒星が減光する。このわずかな減光を検出する手法がトランジット法である。現在までにトランジットが検出されている星は次の9個(軌道長半径の小さい順)である。これらのうちトランジット法によって惑星が発見されたものは、OGLE-TR-56, OGLE-TR-113, OGLE-TR-132, TrES-1, OGLE-TR-10, OGLE-TR-111の6個、ドップラーシフト法によって発見されそのあとトランジットも検出されたものは、HD189733, HD149026, HD209458の3個である。

- OGLE-TR-56(Konacki et al. 2003)
- OGLE-TR-113(Bouchy et al. 2004)

- OGLE-TR-132(Bouchy et al. 2004)
- HD189733(Bouchy et al. 2005)
- HD149026(Sato et al. 2005)
- TrES-1(Alonso et al. 2004)
- OGLE-TR-10(Konacki et al. 2005)
- HD209458(Charbonneau et al. 2000)
- OGLE-TR-111(Pont et al. 2004)

仮に、太陽系の外から太陽を観測し前面を木星が通過すると、太陽は約1%減光する。これは、木星の半径が太陽の半径の約10分の1であり、断面積では約100分の1になることから簡単に分かる。逆に言えば、恒星の断面積と減光量から惑星の断面積、つまり直径が分かるということである。

普通、恒星の半径に対する惑星のそれは非常に小さい。現在までトランジット法で検出されている惑星による恒星の減光は小さいもので、最も大きいものでもHD189733の約3%(Bouchy et al. 2005)で、最も小さいものでHD149026の約0.5%(Sato et al. 2005)である。したがってトランジット法で太陽系外惑星を検出するには、少なくとも約1%の測光精度が必要となる。すなわち、トランジットを起こしていない恒星の光の時間変動が標準偏差約1%以下になるように観測・解析する必要があるということになる。さらに、トランジットを起こす確率そのものも非常に低いという難点もある。これについては、後で詳しく述べることにする。

検出はドップラーシフト法よりも難しいが、ドップラーシフト法は恒星を通して惑星の存在を推測したのに対し、トランジット法では影とはいえ惑星そのものをとらえることになるので、その意義は大きい。

1-3. 2つの手法での検出

ドップラーシフト法とトランジット法という2つの手法で太陽系外惑星が検出されると、惑星の存在が揺るぎないものになるばかりか、その惑星のさらに詳細な情報が判明する。惑星がトランジットを起こしていると、恒星のどの位置を通過したかによって軌道傾斜角が決定する。これによってドップラーシフト法で残っていた $\sin i$ の不確かさが消え、惑星の質量が正確に求まる。先に述べたようにトランジット法によって惑星の半径は分かっているので、質量と半径から惑星の密度が求まり、その惑星の組成が推測できることになる。すなわち、地球のような岩石惑星なのか、木星のようなガス惑星なのか、またどのようなコアを持っているかなどの情報が分かるのである。さらに惑星がトランジットを起こしている間、恒星の光の一部は惑星の大気を通過してくることになるので、トランジットを起こしている時とそれ以外の時の恒星の光のスペクトルを比較することによって、惑星大気の組成や厚さなどの情報を得ることもできる。このことによってHD209458bの大気には、酸素や炭素が含まれていることが分かっている(Charbonneau et al. 2002)。

2. 研究意義

2-1. N2K consortium

N2K consortiumとは、日本、アメリカ、チリの天文学者による系外惑星観測計画で、すばる、ケック、マゼランなどの8m以上の最大口径地上望遠鏡を用いて、これまでは観測していない新しい2000個の恒星を分光観測し、数十個以上のホットジュピターをドップラーシフト法によって発見しようとするプロジェクトである。

このプロジェクトでは、F,G,K型の主系列星もしくは準巨星で、11等以上の比較的明るく、金属量の多い星を観測対象天体としている。プロジェクト名は、「新しい2000個の星」を表す「Next 2000(2K)」に由来する(Fischer et al. 2005)。

2-2. 本研究の目的

本研究での目的は大きく二つである。一つめは、西はりま天文台 60cm 望遠鏡で太陽系外惑星のトランジットが検出できる測光精度が達成できるかどうかを検証するとともに、より高い精度を達成するための観測・解析方法を確立することである。さらには解析の自動化プログラムの開発も目指す。二つめは、N2K consortiumで検出された惑星系のトランジット検出である。N2K consortiumで惑星を持つことが判明した星、あるいは惑星を持つことが示唆された(視線速度に変化が見られ、連星ではないと判断された)星の情報を論文発表前に入手し、迅速に西はりま天文台 60cm 望遠鏡で測光観測することにより、日本初となるトランジット天体の発見を目指す。さらに前にも述べた通り、現在までにドップラーシフト法とトランジット法という2つ手法で惑星の存在が確認されている星は9個で、その中でもドップラーシフト法で発見された星のトランジットが観測されたものはたったの3個しかないので、この研究でトランジットが発見されれば世界で4例目となる。

3. 検出確率

太陽系外惑星のトランジットを検出できる確率は一般的に低いと言われている。以下では、それが実際にどのくらいの確率なのかを議論する。ただし、惑星はN2K consortiumで検出を目指しているホットジュピターの場合で考える。

3-1. 任意の恒星

ここでは、ある瞬間、任意の星を観測した時に惑星がトランジットを起こしている確率について議論する。

(a) 恒星が惑星を持つ確率

宇宙にある全ての恒星が惑星を持っているわけではないので、まずはそもそもどれくらいの確率で恒星の周りを惑星が回っているのかを見積もる必要がある。これは現段階までに発見されている系外惑星から統計的に議論するしかない。

Marcy et al. (2004)によると、F,G,K,M型の星がホットジュピターを持つ確率は、観測的・統計的に約1%であると言われている。彼らは1330個の主系列星を観測し、11のホットジュピターを検出した。この確率の中には金属量の多少は含まれていないが、任意の恒星でのトランジットを起こす確率なので今回はこの値を採用した。

(b) 惑星の公転面が視線方向に一致している確率

惑星のトランジットを検出するためには、惑星の軌道傾斜角 i が大きく関わってくる。我々観測者から見て、惑星の公転面が視線方向にほぼ一致していなければ、当然惑星が恒星を掩蔽することはない。つまり、惑星軌道がほぼエッジオンになっている必要がある。

上で述べた確率は単純に

$$\frac{i = 0^\circ \text{ (エッジオン)}}{i = 0^\circ \sim 90^\circ}$$

で約1%というわけではなく、惑星がホットジュピターである場合について考えるならばその確率はもう少し大きくなる。惑星の公転周期が3日だと仮定すると、ケプラーの第3法則より軌道長半径は約0.04AUとなる。ただし、軌道離心率は0、すなわち円軌道だと仮定する。一方、恒星の大きさ我々の太陽と同程度だと仮定すると、その半径は約0.0046AUとなる。これらより、

$$\tan \theta = \frac{0.046}{0.04}$$

となる θ を求めると、 $\theta \simeq 83^\circ$ となる。よって、軌道傾斜角が $83^\circ \sim 90^\circ$ (7° 分)の範囲内であればトランジットを検出可能ということになる。以上より求める確率は、

$$\frac{i = 83^\circ \sim 90^\circ}{i = 0^\circ \sim 90^\circ}$$

で約8%となる。

(c) 観測した瞬間にトランジットを起こしている確率

恒星が惑星を持っており、惑星の公転面が視線方向に一致している、つまり3-1-1と3-1-2で述べた2つの条件に当てはまっていたとしても、実際にその星を観測した瞬間に惑星が恒星の前面を通過していないとトランジットを検出することはできない。ここでも3-1-2と同様に周期3日(軌道長半径が0.04AU)の惑星が、太陽程度の大きさの恒星(半径が0.0046AU)の周りを軌道離心率0、すなわち円軌道で公転していると仮定したとき求める確率は、恒星の直径をD、軌道長半径をRとすると、

$$\frac{D}{2\pi R}$$

と表され、DとRにそれぞれ仮定した値を代入すると約4%となる。

(d) まとめ

以上3-1-1、3-1-2、3-1-3をまとめると、ある瞬間、任意の星を観測した時に惑星がトランジットを起こしている確率は約30000分の1というとても低い確率となる。

3-2. 本研究での確率

ここでは、本研究におけるトランジット検出確率を見積もる。先述の通り、本研究ではN2K consortiumにおいて惑星を持つと判明した、もしくはそれが示唆された星を対象に観測を行なった。したがって、3-1-1の恒星が惑星を持つ確率は100%と考えられる。さらに、ドップラーシフト法によって惑星が検出されると惑星の公転周期が分かるので、トランジットを起こす時間を予想することができる(円軌道を仮定した場合、視線速度の極大時と極小時の中間がトランジットセンター時間になる)。このことから、3-1-3の観測した瞬間にトランジットを起こしている確率も100%になると考えられる。よって3-1-2の惑星の公転面が視線方向に一致している確率のみを考えればいいわけだが、本研究の場合、この確率も上の3-2-2よりも大きくなる。先述の通り、いくら惑星が主星の周りを公転していても軌道傾斜角が 0° 、つまりフェイスオンでは視線速度変化は0m/sである。そして、N2K consortiumでは視線速度変化は4~5m/sの精度で観測が行なわれた。つまり、これより視線速度変化が小さくなるような軌道傾斜角で惑星が公転していると、そもそも検出できないことになる。そこで、最低どのくらいの軌道傾斜角が必要かを求めるために、(1)式の $P, M_{star}, m_{\odot}, e$ にそれぞれ、N2K consortiumで発見されたHD149026という惑星系のパラメータを代入し、軌道傾斜角 i を変数としたときの視線速度 K を求めた。具体的には、(1)式に、 $P = 2.88, M_{star} = 1.3$ [太陽質量], $m_p = 0.36$ [木星質

量], $e = 0$ を代入し $K = 43.324 \sin i$ を得た。これより、軌道傾斜角は最低 7° 以上は必要であることが分かった。したがって求める確率は

$$\frac{i = 83^\circ \sim 90^\circ}{i = 7^\circ \sim 90^\circ}$$

で、約 12 分の 1 となる。言い換えれば、12 個の星を観測できれば 1 個はトランジットを検出できるということになり、3-1 の任意の星の時と比べてはるかに確率が高くなる。

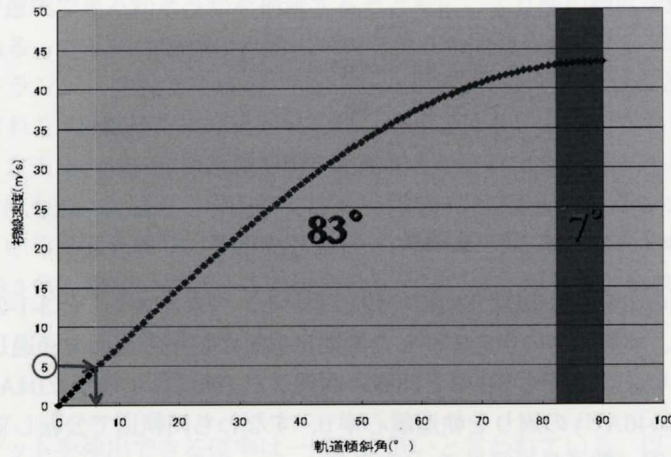


Fig. 1. 本研究におけるトランジット検出範囲内になるための軌道傾斜角。背景の薄い領域 N2K consortium (ドップラーシフト法) で惑星が検出される軌道傾斜角で、そのうち背景の濃い領域がトランジット検出可能な軌道傾斜角。

4. 観測

4-1. 分光観測 (ドップラーシフト法)

N2K consortium による視線速度変化検出のための分光観測は、すばる望遠鏡 (口径 8.2m) に検出器として HDS (High Dispersion Spectrograph: 可視高分散分光器) を取り付けて行なった。観測は 2004 年の 7 月、8 月、12 月の 7 夜に加えて 2005 年にも数回行なった。観測波長は可視 (3500~6100 Å) で、波長分解能は 55000。また、5500 Å で S/N が 150、積分時間は N2K consortium での典型的な天体 (V 等級が 8.5 等) で約 60 秒であった。これらのことから、速度分解能 4~5 m/s を達成した。観測対象は V 等級で 10 等以上と明るく、100 pc 以内の比較的地球から近い天体とし、一晩で 100 天体以上を観測した。現在までに数百~千天体を観測している。

4-2. 測光観測 (トランジット法)

トランジット検出のための測光観測は、西はりま 60cm 望遠鏡に検出器として ST-9 という CCD カメラを取り付けて行なった。ST-9 の素子数は 512×512 ピクセルで、ピクセルスケールは $1.4''/\text{ピクセル}$ である。観測は、2004 年の 9 月から 11 月までの 7 夜、2005 年の 5 月から 10 月までの 9 夜、2006 年の 1 月の 1 夜の合計 17 夜行なった。基本的に一回の観測は一晩のみ行なった。観測波長は R バンド (6500 Å) で、観測視野はレジャーを取り付けることによって $12' \times 12'$ とした。観測対象は先に述べたように、N2K consortium での

観測・解析結果から系外惑星を持つことが示唆される星(以下、N2K天体とする)十数個、または、過去の研究で系外惑星を持つことが知られているがトランジット観測が十分に行なわれていない星2つ(transitsearch candidates site[<http://www.ucolick.org/%7elaugh/>]から西はりま60cm望遠鏡での観測に適した星をピックアップ。以下、transitsearch天体とする)とした。天候に恵まれず観測データを取得できなかった天体もあるが、それを除いても本研究では7天体を観測した。これは先述の確率論から考えても十分トランジット検出の可能性があるとと言える。ドップラーシフト法によって惑星が検出、もしくは示唆されれば、周期解析からトランジットを起こすであろう予想時刻が分かる。このトランジット予想時刻に観測を行なうことで、効率的な観測を試みた。また、比較的明るい星が対象となったので積分時間は1秒から5秒ほどであった。さらに、ST-9はUSBによる転送が可能のため転送時間が非常に早い。これらのことから、この観測では一晩に約1000フレームから2000フレームと多数のライトフレームを取得できた。なおダークフレームに関してであるが、ダークは検出器の温度変化や回路の安定性などによって変動する場合があるので、一晩の観測で何度も取得する。フラットフレームについては、ドーム内の白いスクリーンに当てた光を一樣な光源とみなしてそのスクリーンを撮像し、感度のムラを認識するドームフラットという方法を用いた。ただし、西はりま天文台60cm望遠鏡のドーム内にはスクリーンはないので、ドームの内側の壁に光をあててそれを撮像することでドームフラットとした。以上のことから本研究での観測では基本的に、ライトフレームを50枚取得し、続けてダークフレームを5枚取得するというセットを一晩繰り返し、最後にフラットフレームを50枚と、そのためのダークフレームを20枚取得するという順に観測を行なった。

5. 解析

太陽系外惑星をトランジット法で検出する場合、恒星の絶対的な光度は必要なく時間的な光度変化がとらえられればよい。このような場合、相対測光という解析手法を用いる。恒星の時間的な変化をとらえるという対象の天体だけを測光すればよいと思ってしまうが、これでは時々刻々と変化する大気の変動によって、時間的に一定の光度を持つ恒星でもその光度が変動してしまう。そこで、対象天体の光度を、同時に同じ視野内に撮像した恒星の光度で割ることで大気の変動をキャンセルするというのが相対測光である。ここでは本研究で行なった解析の詳細を順をおって述べる。なお解析は、IRAF(the Imaging Reduction and Analysis Facility) software package を用いて行なった。

6. 結果

6-1. 精度の確認

系外惑星のトランジットを検出するためには、約1%の測光精度が必要であることは前述した通りである。その測光精度が西はりま60cm望遠鏡での観測において達成されるかどうかを、既知のトランジット天体を観測することで確認した。ここでは、その結果を光度曲線と共に示す。以下の表1は精度確認のために観測を行なったトランジット天体の詳細である。

(a) HD189733

HD189733の減光率は3%で、現在までにトランジットが検出されている天体の中で最大である(Bouchy et al. 2005)。よって、最低限の精度の確認には最適な天体である。以下に観測画像と光度曲線を示す。トランジット時間外での標準偏差は0.29%であった。

- HD189733

Table 1. 精度確認のための観測対象トランジット天体

天体名	HD189733	HD209458
主星スペクトル型	G5(K1-K2) ¹	G0V
R 等級 [等]	7.8	7.15
周期 [日]	2.22	3.52
軌道傾斜角 [°]	85.3	86.1
主星半径 [太陽半径]	0.76	1.12
軌道長半径 [AU]	0.0313	0.045
惑星質量 [木星質量]	1.15	0.69
惑星半径 [木星半径]	1.26	1.32

¹ カタログでは G5 とされているが、Bouchy et al. (2004) の研究では K1-K2 と示された。

- 観測日:2005 年 10 月 12 日
- 座標:RA=20h00'44",Dec=+22° 42'39"
- 積分時間:3.5 秒
- 取得フレーム数:1450 枚
- リファレンス:HD345459
- リファレンスの R 等級=8.2 等

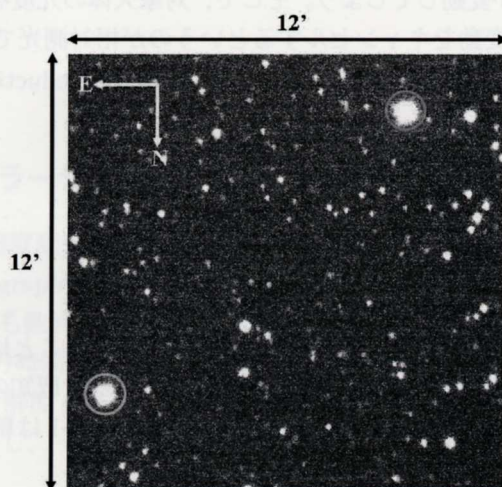


Fig. 2. 2005 年 10 月 12 日の観測で撮像した画像。右上の○内あるのが既知のトランジット天体である HD189733、左下の○内にあるのがリファレンスとして用いた天体 (RA=20h00'57",Dec=+22° 50'49")

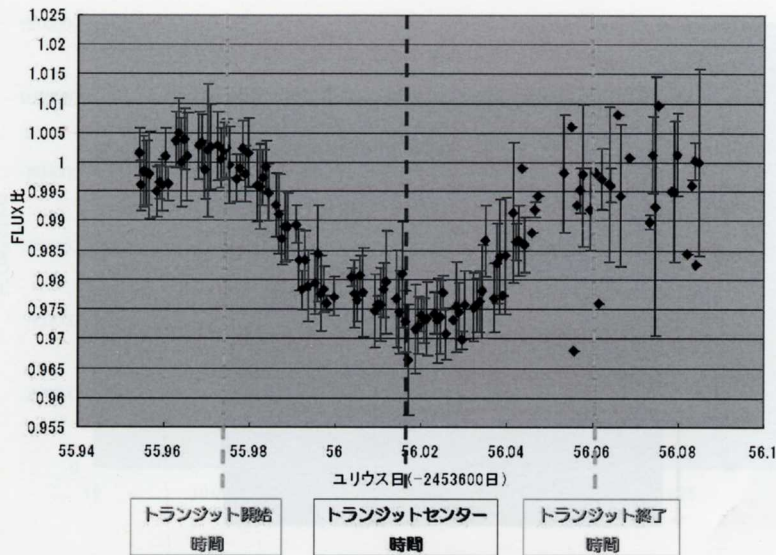


Fig. 3. 横軸にユリウス日、縦軸に FLUX 比をとった HD189733 の光度曲線。四角のプロットは 5 フレームの平均値を表し、その 5 点内の標準偏差をエラーバーとして表した。なお、トランジット時間外の FLUX 比の標準偏差は 0.29%。

(b) HD209458

HD209458 は先にも述べた通り、世界で初めて系外惑星のトランジットが検出された天体である。減光率は 1.5% と 6-1-1 の HD189733 のおよそ半分である (Charbonneau et al. 2000)。以下に観測画像と光度曲線を示す。図 5 の光度曲線内の予想光度曲線は、Ohta et al. (2005) より HD209458 の惑星系のパラメータ (主星半径、惑星半径、公転周期、軌道長半径、軌道傾斜角) をそれぞれ代入して得られたもので、limb darkening による効果は考慮されていない。トランジットセンター時刻以降は天候の悪化に伴い予想光度曲線と一致せずエラーバーも大きい。トランジットセンター時間までは観測点と予想光度曲線がよく一致している。天候が悪化したことは、オブジェクトのみの FLUX の時間変動 (図 6) を見てもよくわかる。図 5 のデータがばらつきはじめた後半からオブジェクトの FLUX が急に小さくなりばらついている。

● HD209458

- 観測日: 2005 年 9 月 2 日
- 座標: RA=22h03'11", Dec=+18° 53'04"
- 積分時間: 4 秒
- 取得フレーム数: 2650 枚
- リファレンス: TYC 1688-1903-1
- リファレンスの R 等級=10.7 等

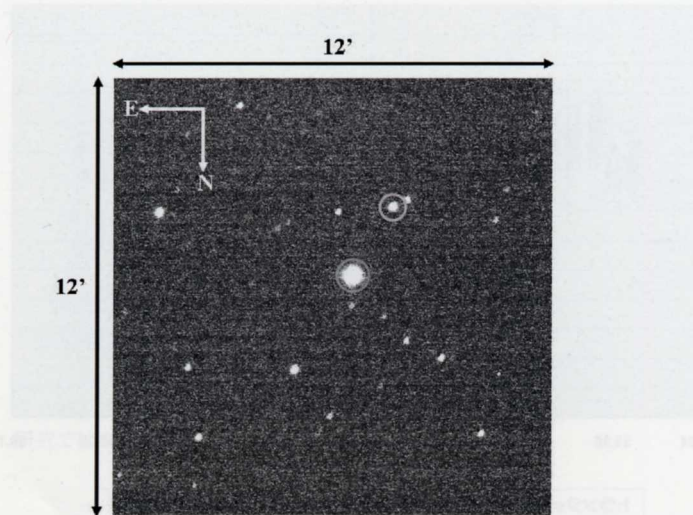


Fig. 4. 2005年9月2日の観測で撮像した画像。中央の○内にあるのが既知のトランジット天体である HD209458、その右上の○内にあるのがリファレンスとして用いた天体 (RA:22h03'7", Dec:+18° 51' 34")

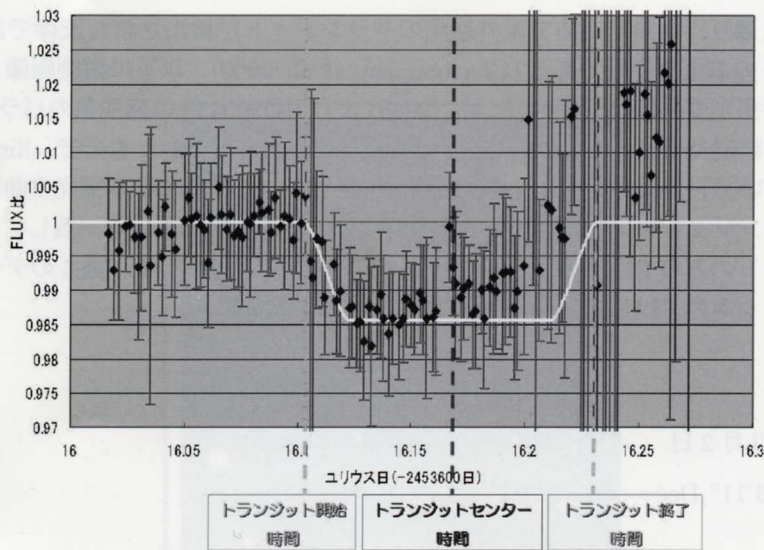


Fig. 5. 横軸にユリウス日、縦軸に FLUX 比をとった HD209458 の光度曲線。四角のプロットは 20 フレームの平均値を表し、その 20 点内の標準偏差をエラーバーとして表した。なお、トランジット時間外の FLUX 比の標準偏差は 0.28%。さらに、白色の曲線は HD209458 の惑星系のパラメータを代入して得られた予想光度曲線 (Ohta et al. 2005) を表す。

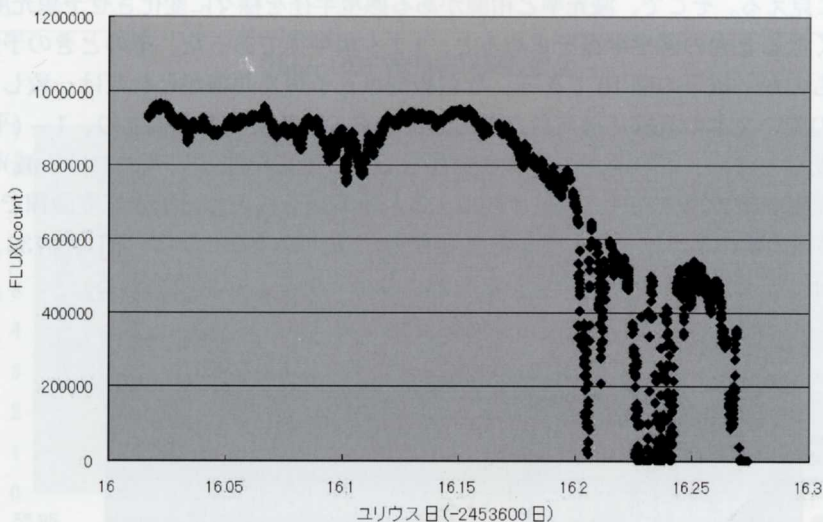


Fig. 6. 横軸にユリウス日、縦軸に FLUX 比をとったオブジェクトのみの明るさの時間変動。

7. 考察

まずは HD189733 を用いて FWHM と測光精度の関係について考察する。以下の図 7 は HD189733 の FLUX の生のデータをプロットしたものである。この光度曲線におけるトランジットセンター時刻よりやや前 (横軸が 56 のあたり) に見られるデータのバラツキは、雲などによる天候の悪化が原因と考えられる。しかし、トランジット終了時間付近にみられるデータのバラツキは天候に因るものではない。そこでアンダーサンプリングの可能性を考えた。FWHM の 2 分の 1 の値がピクセルサイズ以下になると星の PSF の決定が正確に出来なくなる。このことをアンダーサンプリングという。一般的に FWHM、すなわちシーイングの大きさは地球大気の乱れの大きさを表すのでより小さい方が良いのだが、小さすぎるとこのようなことが起こる。図 8 を見ると、時間経過とともに明らかに星の FWHM の値が小さくなっているのが分かる。さらに今回の場合、シーイングが時間とともによくなったために、サチュレーションを起こした画像も多く見られた。そこで FWHM が 2.5pixel 以下のデータを除き、図 3 を得た。図 3 を見ると、後半に多少バラツキが残っているが、惑星による減光が十分に検出されているのが分かる。

図 3 に予想光度曲線 (Ohta et al. 2005) を重ねたものが、図 9 と図 10 である。図 9 の予想光度曲線には以下の論文値 (Bouchy et al. 2005) を代入した。ここには limb darkening の効果も考慮している。

- 主星半径:0.76 太陽半径
- 惑星半径:1.26 木星半径
- 軌道長半径:0.0313AU
- 公転周期:2.219 日
- 軌道傾斜角:85.3°

ここで注目したいのはトランジットセンター付近、すなわち減光率である。本研究での観測点の方が、わずかに減光率が小さいように見える。そこで、減光率と相関がある惑星半径を様々に変化させ予想光度曲線を描き、それが観測点に最も近くなる時の惑星半径を求めると、1.2木星半径であった。そのときの予想光度曲線を観測点をプロットしたものが、以下の図10である。なお観測点と予想光曲線がどれだけ一致しているかの指標として、図9、10中の濃い2本の直線で挟まれた部分のデータの平均をそれぞれとり、 $1 - (\text{平均値}) \times 100$ を求めた。その値を減光率と考え、これを用いて評価を行なった。その結果本研究における減光率は2.50%、論文値を代入した予想光度曲線では2.83%、惑星半径に1.2木星半径を代入した予想光度曲線では2.57%となり、明らかに1.2木星半径の時のほうに一致していることが分かる。このことから、HD189733の回りを公転する惑星の半径はBouchy et al. (2005)で求められたものより小さいことが示唆される。

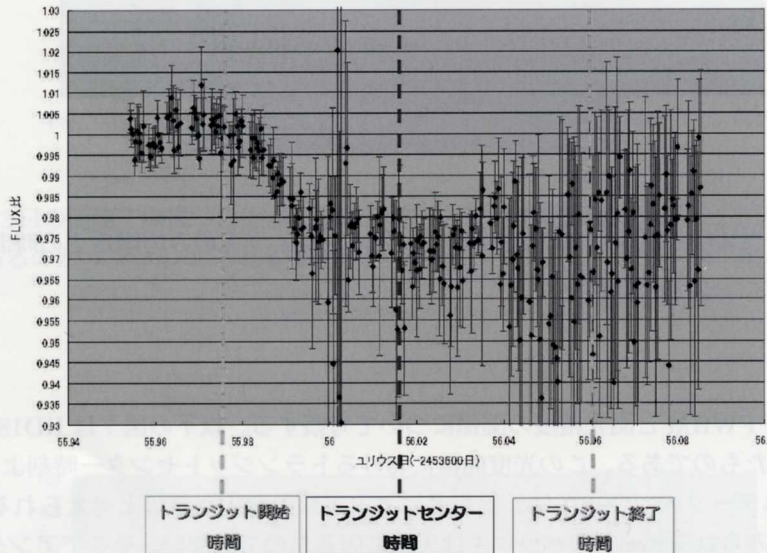


Fig. 7. 横軸にユリウス日、縦軸にFLUX比をとったHD189733の光度曲線。四角のプロットは5フレームの平均値を表し、その5点内の標準偏差をエラーバーとして表した。なお、トランジット時間外のFLUX比の標準偏差は0.37%。

次に、積分時間やリファレンスと測光精度について考察する。ある観測日において、天体の高度上昇に伴い星のカウント値も上昇しサチュレーションを起こす可能性が予想されたので、途中で観測時間を3秒から1秒に変更した。その後今度は天体の下降に伴いカウント値も下降してきたので、光子をよりかせぐため積分時間を1.5秒に変更した。その結果、データのバラツキが生じた。一晩の観測では積分時間は変更する必要がなくなるように、初めに天体の動きを考えた積分時間の決定が必要となる。また、相対測光ではリファレンスの明るさが精度に大きく関わってくる(もちろんリファレンスは変光していないことが最低条件)。同じ視野内に明るいリファレンスが無い場合、いくつかの星をリファレンスとしてそれらのFLUXを合計し、その値でオブジェクトのFLUXを割るという方法をとる。また、明るいリファレンスがある場合でもこの方法は有効である。

さらに、2004年の観測・解析結果を見ると2005年以降のそれに比べて標準偏差が大きかったことが分かった。2004年の観測では、同じ観測日にトランジット予想されているN2K天体が複数個あったために、一晩に複数個の天体の観測を行っていた。この場合一天体あたりに対して得られる光子の数が、一晩で一天体のみを観測し続けている場合よりも少なくなる。これはもちろん決められた観測時間が複数の天体に分けられてし

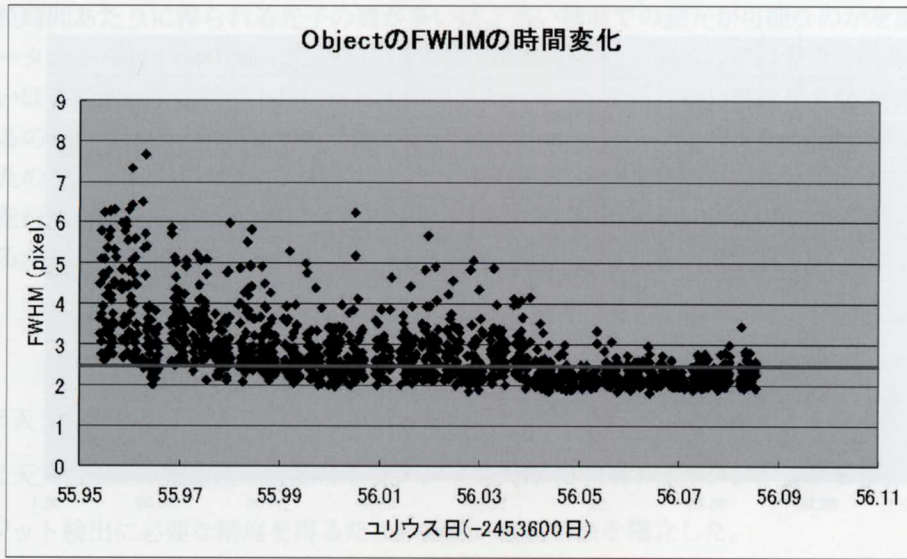


Fig. 8. オブジェクトの FWHM の時間変動。横軸がユリウス日、縦軸がオブジェクトの FWHM の大きさを表す。FWHM=2.5pixel のところを濃い横線で示した。

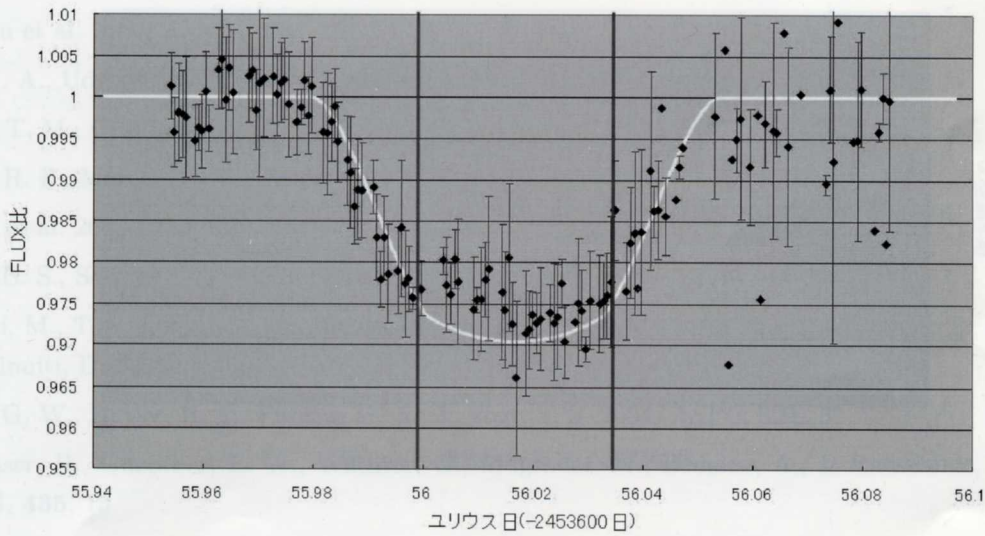


Fig. 9. 横軸にユリウス日、縦軸に FLUX 比をとった HD189733 の光度曲線。四角のプロットは 5 フレームの平均値を表し、その 5 点内の標準偏差をエラーバーとして表した。白色の曲線は惑星の軌道要素として論文値を代入した時の予想光度曲線。

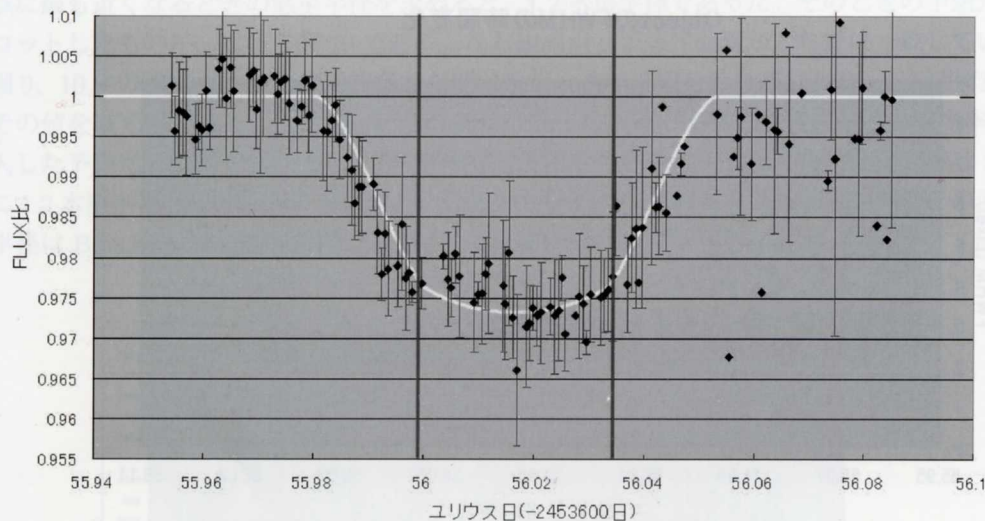


Fig. 10. 白色の曲線は惑星の軌道要素の内、惑星半径のみを 1.2 木星半径に変更して (それ以外は図 9 と同じ論文値) 代入した時の予想光度曲線。

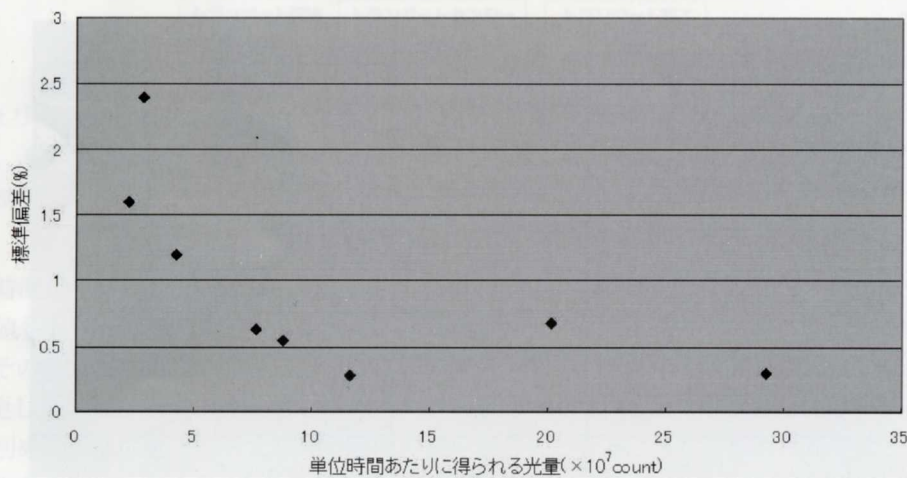


Fig. 11. FLUX と標準偏差の関係。横軸は、一定時間 (今回は 20 分間とした) の間に観測した FLUX の平均値にその時間内に取得したフレーム数をかけたもの。実際にはこの作業をオブジェクトとリファレンス共に行ない、それらを合計した値を採用している。縦軸は、標準偏差を表す。

まうことが最も大きな原因ではあるが、それに加えて望遠鏡をある天体から次の天体まで移動させる時間や、それに連動してドームを回転させる時間、天体を都合のいい場所に導入する時間など様々な要因が考えられる。実際に単位時間あたりに得られる光子の数が多いほど高い精度での測光が可能なかを議論するために、今ある観測データのから図 11 を作成した。FLUX が光子の数を表しているので、単位時間あたりに得られる光子の数が多いほど標準偏差の値が小さくなる傾向が見られる。右から二番目のデータがやや y 軸の正の方にシフトしているのは、このデータを取得した観測日の対象天体がすでに 36° という低い高度からで、あとは沈む一方だったので、十分な精度が得られなかったからであると考えられる。2005 年以降は基本的には一晩一天体の観測を行なっている上に、USB ケーブルを介しての転送が可能な CCD(ST-9) を購入し用いたため、以前よりははるかに効率的に観測が行なえている。

8. 結果

- 西はりま天文台 60cm 望遠鏡での測光観測において、トランジット検出に十分な精度を達成した。
- 西はりま天文台 60cm 望遠鏡で既知のトランジット天体 (2 天体) のトランジットを検出した。
- トランジット検出に必要な精度を得るための観測・解析手法を確立した。
- さらなる観測を続ければ新しいトランジット天体に検出は可能である。

本研究に対し、60cm 望遠鏡操作のご指導や観測にご協力いただいた西はりま天文台のスタッフの皆様にご感謝致します。

《参考文献》

- Beaulieu et al. 2006, *Nature*, **439**, 437
- Bond, I. A., Udalski, A., Jaroszynski, M. et al. 2004, *ApJ*, **606**, 155
- Brown, T. M., Charbonneau, D., Gilliland, R. L., Noyes, R. W., & Burrows, A. 2001, *ApJ*, **552**, 699
- Butler, R. P., Marcy, G. W., Vogt, S. S., & Apps, K. 1998, *PASP*, **110**, 1389
- Fischer et al. 2005, *ApJ*, **620**, 481
- Gaudi, B. S., Seager, S., & Mallen-Ornelas, G. 2005, *ApJ*, **623**, 472
- Konacki, M., Torres, G., Sasselov, D. D., Pietrzynski, G., Udalski, A., Jha, S., Ruiz, M. T., Gieren, W., & Minniti, D. 2004, *ApJ*, **609**, 37
- Marcy, G. W., Butler, R. P., Fischer, D. A., & Vogt, S. S. 2004, *ASPC*, **321**, 3
- Neuhauser, R., Guenther, E. W., Wuchter, G., Mugrauer, M., Bedalov, A., & Hauschildt, P. H. 2005, *A&A*, **435**, 13
- Santos, N. C., Israelian, G., & Mayor, M. 2004, *A&A*, **415**, 1153
- Seager, S., Whitney, B. A., & Sasselov, D. D. 2000, *ApJ*, **540**, 504
- Udalski, A., Jaroszynski, M., Paczynski, B. et al. 2005, *ApJ*, **628**, 109
- Winn, J. N., Suto, Y., Turner, E. L., Narita, N., Frye, B. L., Aoki, W., Sato, B., & Yamada, T. 2004, *PASJ*, **56**, 655