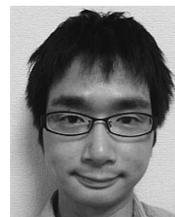


# トランジット系外惑星に対する 高精度測光観測の実現



福井 暁彦

〈自然科学研究機構国立天文台 岡山天体物理観測所 〒719-0232 岡山県浅口市鴨方町本庄 3037-5〉

e-mail: afukui@oao.nao.ac.jp

トランジット系外惑星に対する高精度な測光観測から、ほかの手法では得られない惑星に関するさまざまな情報を得ることができる。本稿では、地上望遠鏡を用いて高精度な測光観測を実現するための工夫や解析方法を紹介する。そのポイントの一つは星の位置を検出器上で固定すること、もう一つはデフォーカスを行うことである。筆者らはそれらの工夫を行うことで、岡山天文台 188 cm 望遠鏡+近赤外検出器 ISLE を用いた観測により、国内で初めて近赤外での約 1 ミリ等級の測光精度を実現した。今後日本が所有する複数の近赤外望遠鏡を用いて、高精度測光観測によるトランジット惑星のさまざまな研究ができるであろう。

## 1. はじめに

トランジット法<sup>1)</sup>は概念として非常にわかりやすく、また最も「簡単な」系外惑星の観測手法である\*1。惑星が主星の一部を隠すために主星がわずかに暗くなるのをとらえればよい。その減光率は惑星と主星の面積比で決まり、例えば木星と太陽の場合、減光率は 1% 程度である。この減光を「とらえるだけ」なら、口径 10 cm 程度の小型の望遠鏡と一般的な市販のデジカメがあれば、明るい星であれば十分可能である。トランジット惑星はすでに 100 個以上\*2 (ケプラー衛星の候補天体を含めると 1,000 個以上<sup>2)</sup>) 見つかっており、毎晩常にどれかの惑星がトランジットを起こしているような状況である。そのため、観測しやすい (主星が明るく、減光率が大きい) 天体を選べばトランジット惑星の測光観測は比較的簡単に行うことができる。そのような観測は教育的な目的や

新しく導入する観測システムの性能評価などにも適している。

しかし、近年急成長する系外惑星研究分野においてトランジット測光観測から研究成果を上げるためには、より高精度な測光観測を追求していかなければならない。そのためには高性能な望遠鏡やカメラを使用するだけでなく、観測方法にも工夫を凝らす必要がある。本稿では、まずトランジットの測光観測から得られるサイエンスについて紹介し、高精度な測光観測を達成するための工夫と解析方法について紹介する。つづいて筆者らがこれまでにを行った近赤外での観測例を紹介し、最後に今後の展望について述べたい。

## 2. トランジットの測光観測で得られるサイエンス

トランジットの測光観測から得られる情報は主に惑星と主星の半径比、惑星の公転周期、トラン

\*1 ただし、新たな惑星を「発見」するのは簡単ではない。多数の星に対する大規模探索や視線速度法での追観測など地道な努力が必要である。詳しくは本号の成田憲保氏の記事を参照。

\*2 <http://exoplanet.eu/>

ジットの中心時刻、トランジット継続時間、天球面に対する公転面の傾斜角、主星の周辺減光に関する情報などである。このうち惑星と主星の半径比は特に重要である。このパラメーターと他の観測（主星の視線速度観測やスペクトル型を決める観測）を組み合わせることで惑星の半径と質量が求まるため、惑星の平均密度が測定できる。これにより惑星がガス惑星なのか、岩石惑星なのかなどを知ることができる。さらに、いくつかの波長域で観測し波長ごとに惑星半径を測ることで、惑星の大気成分の情報を得ることも可能である。また、同じ惑星のトランジットを何度も測光観測し、惑星の公転周期の時間変動(Transit Timing Variations; TTV)をとらえる事で、その重力摂動源となる別の惑星の存在を見つける事ができる。これらの情報を精度良く得るためには、高精度なトランジット測光観測が不可欠である。

主星が惑星の前を横切る「二次食(secondary eclipse)」の際にもわずかな減光がみられる。これは惑星自身の熱放射や主星の光の惑星表面での反射光が主星によって隠されてしまうために起こり、その減光率から惑星の表面温度や反射率を測定することが可能である。また二次食の中心時刻の情報を使うと、惑星の軌道離心率を精度良く決定することができる。惑星の温度は低く可視光ではたいへん暗いため、惑星の熱放射による二次食をとらえるには近赤外波長での高精度観測が不可欠である。(以上について、詳しい内容は本特集の他の記事や文献3を参照。)

### 3. 高精度測光観測を実現するには

#### 3.1 目指せ1ミリ等級

通常トランジットの測光観測では、ターゲット天体と明るさや色の近い比較星を同一視野に導入して、比較星との相対測光を行う。その「測光精度」(測光値の理論モデルに対する標準偏差)を決める第一のノイズ源は、主星や比較星からやってくる光子数のポワソン揺らぎ(フォトンノイズ)

である。フォトンノイズは露光時間(積分時間)を伸ばせば小さくできるが、積分時間を伸ばしすぎると検出器が飽和してしまうのに加え、長時間積分を行っても観測機器由来の系統誤差が到達出来る測光精度を制限してしまう。そのため、これまでの変光星などに対する地上望遠鏡を用いた測光観測では、到達できる測光精度はせいぜい数ミリ等級であった。しかし近年のトランジットの測光観測では、後述するようなさまざまな工夫により、地上観測でも1ミリ等級以下の精度が達成されるようになってきている。そのため、積分時間にかかわらず1ミリ等級の精度が出せるかどうか、地上観測で得られるトランジット測光精度の一つの目安となっている。

#### 3.2 検出器上で星の位置を固定せよ

1ミリ等級は、シグナルノイズ比(S/N)で言えば約1,000である。星からのフォトンノイズのみを考えると、 $S/N=1,000$ を得るためには $1,000^2 \times \sqrt{2} = 141$ 万光子(比較星が主星と同じ明るさの場合)が必要であるが、これは例えば $V=10$ 等級の星を口径1mの望遠鏡で観測すると、わずか10秒程度の積分時間で得られる。一方、撮像された画像には通常検出器の感度ムラや光学系由来のムラが乗っているため、一様光源を使って作成するフラットフィールド画像を用いて補正を行うが、この画像にも1ピクセル当たり $S/N \sim$ 数百程度の高い精度が求められる。しかし、理想的な一様光源を作ることは一般的に難しく、また(特に経緯台式望遠鏡では)光学系のムラが時間とともに変化するため、フラットフィールド補正をそれほど高精度に行うことは実質不可能である。そこで、そのようなフラットフィールド補正の不完全性(特に検出器の感度ムラ)からくる系統誤差をなるべく拾わないようにするため、星の位置をオートガイダー機能を使って検出器上で「固定」し、一晩中なるべく同じピクセルだけで星のフラックスを受けるように観測することが非常に重要である\*3。

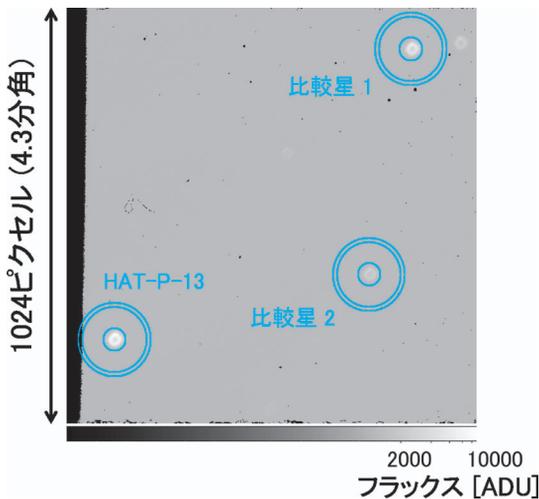


図1 岡山観測所188 cm望遠鏡+ISLE検出器での撮像例。視野は4.3×4.3平方分。HAT-P-13と比較星1, 2をバッドピクセル(視野内の黒い点)にかからないように配置し、星像の半値全幅が4-5秒角になるようデフォーカスして撮像。シアン色の円は内側からアパチャーサイズおよびスカイレベル計算時の円環の内円と外円(それぞれ7.6, 21.6, 24.3秒角)を示す。カラースケールはフラックスを対数で表示し、白いほどカウントが高い。左側の黒い帯はオーバースキャン領域。

また、ターゲット星や比較星が検出器上で欠陥画素(バッドピクセル)の位置にこないように配置することも重要である。トランジット観測では高頻度観測が必要であり通常ディザリング観測を行わないため、星像内に一つでもバッドピクセルが存在すると測光精度に大きく影響してしまう。特に近赤外検出器を使用する場合は可視光のCCDに比べて一般的にバッドピクセルが多いため(図1参照)、細心の注意が必要である。

### 3.3 ピンぼけ撮像がベスト!?

もう一つ測光精度を上げる方法として、わざと星像をぼかせて撮るデフォーカスの手法がある<sup>4)</sup>(図1, 2参照)。これには二つのメリットがある。一つは、星からくる光量をより多くのピクセル

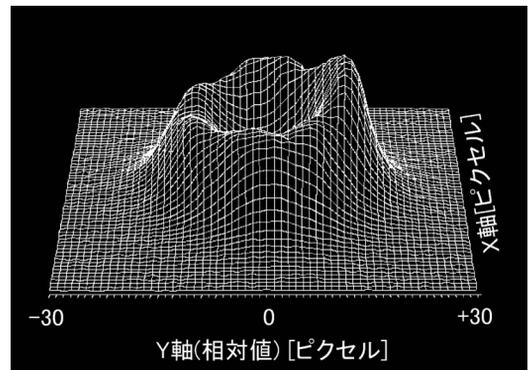


図2 デフォーカスを行った際の星像の例。岡山観測所188 cm望遠鏡+ISLE検出器で撮像。X軸, Y軸は検出器上の座標をピクセル(相対値)で示し、高さはフラックスのカウント数(相対値)を示す。1ピクセル=0.27秒角。

で受けることで、前述したフラットフィールドの不完全性由来の系統誤差を減らせる点である。また星の位置が多少変化してもこの系統誤差の影響を受けにくくなる。もう一つのメリットは、デフォーカスをする事で検出器を飽和させることなく積分時間を伸ばすことができる点である。これにより、1露光当たりの読み出し時間のデッドタイムや読み出しノイズを減らすことができるため、一晩の観測のトータルで考えるとS/N比が上がることになる。

ただし、デフォーカスをする事でスカイバックグラウンドノイズや検出器由来のノイズ(暗電流ノイズや読み出しノイズ)も増えるため、ノイズレベルが高い場合は、デフォーカスしないほうが良い場合がある。また、暗い天体を撮る場合や小口径の望遠鏡で撮る場合、デフォーカスが必要になるほど露光時間を伸ばすと観測頻度が大きく下がり、測定したい物理量(主星-惑星半径比、トランジット継続時間、トランジット中心時刻など)の決定精度が下がってしまう可能性がある。さらにターゲット星の近傍に伴星もしくは他の星がいる場合は、デフォーカスすると別の星の光が

<sup>4)</sup> オートガイダーがない場合は、撮像した画像と参照画像のずれを計算し、露光と露光の合間に望遠鏡にフィードバックをかけるようなソフトウェアを導入するのも有効。

混ざってしまうため良くない\*4。このように、デフォーカスの可否や最適な露光時間は観測する天体や観測システム（望遠鏡の口径や検出器のノイズ特性、読み出し時間など）によって異なるため、その都度検討が必要である。

#### 4. 解析方法について

ここで、高精度なトランジット光度曲線を得るための解析方法についても少し紹介したい。

測光を行う際は通常「アパチャー測光法」を用いる。これは星像の重心位置を中心としたある円（アパチャー）内のフラックスを足し合わせ、対応するスカイバックグラウンドを差引く方法である。スカイバックグラウンドのレベルは星から十分離れた同心円環内のフラックスの中央値をとる（図1参照）。アパチャーのサイズは、最終的な光度曲線のトランジット外（ベースライン）でのばらつきが最小になるように選択する。

測光したフラックスは以下のように相対フラックスに換算する。まず同一視野内のいくつかの比較星（変光星でないもの）のフラックスを足し合わせて参照フラックスとし、ターゲット星のフラックスを参照フラックスで割る。次にベースラインの平均値が1になるように、相対フラックスの規格化を行う。

次に、得られた光度曲線に対してトランジットの理論曲線によるフィットを行う。解析的な理論曲線のモデルはいくつか提示されており、最も有名なものはマンデル&エイゴルのモデル<sup>5)</sup>である\*5。このとき、光度曲線のベースラインの傾きを補正する関数も同時にフィットで求める<sup>7)</sup>。ベースラインの傾きは、主に光が通過してくる地球の大気量（エアマス）の時間変化によって生じる。光の波長によって大気による減光量が異なる

ため、ターゲット星と比較星の色が異なる場合にターゲット星の相対的な明るさが変化するためである。このベースライン補正を精度良く行うためにはできるだけ長時間ベースラインを観測することが重要であり、トランジットの前後それぞれ1時間以上観測するのが望ましい。

最後に測光誤差について述べる。ミリ等級レベルの測光をする際、その誤差にはフォトンノイズや検出器由来のノイズなどの時間依存しないランダムノイズ（ホワイトノイズ）に加え、時間依存するような「レッドノイズ」と呼ばれるノイズが顕著になる<sup>8)</sup>。レッドノイズは例えば薄雲の通過やシーイングの時間変化、フラットフィールド補正の不完全性などから生じる。このレッドノイズを考慮しなければ誤差を過小評価してしまうことになる。レッドノイズを正確に評価することは一般的に難しいが、これを含めた誤差を近似的に評価する方法がいくつか提案されている。例えば「時間平均法」<sup>9)</sup>は、光度曲線全体の理論曲線に対する標準偏差を $\sigma_1$ としたとき、光度曲線を $N$ 点ごとに $M$ ピンにビニングした際の標準偏差の実測値 $\sigma_{N, \text{real}}$ と、統計的に期待される標準偏差 $\sigma_{N, \text{exp}} (= \sigma_1 \sqrt{M/(M-1)} / \sqrt{N})$ の比 $\beta (= \sigma_{N, \text{real}} / \sigma_{N, \text{exp}})$ を元々のデータ点の誤差（ホワイトノイズ）に乗じるという方法である\*6。

#### 5. 観測例

次に、筆者らが実際に行ったトランジット測光観測について紹介したい。

筆者らは岡山天体物理観測所(OAO)の口径188 cm望遠鏡+近赤外検出器ISLEを用い、トランジット惑星HAT-P-13bに対する近赤外の観測を行った。この惑星は先行研究でTTVの検出が報告されており<sup>11)-13)</sup>、このTTVを検証すること

\*4 フォーカスを合わせても二つの星像が分離できない場合は、両方の星像を合わせて測光し、あとで無関係な星のフラックスの寄与を差引く作業が必要。

\*5 ほかに太田らのモデル<sup>6)</sup>などがある。

\*6 そのほかに「数珠法」<sup>10)</sup>などがある。

が観測の主目的である。可視光ではなく近赤外で観測することで、主星の周辺減光の影響や惑星が主星の黒点上を通過する際の光度曲線への影響が軽減し、トランジット中心時刻の測定精度の向上が期待される<sup>14)</sup>。また、今回の観測はISLEによる測光観測の精度評価を行うことも一つの目的である。これまで国内では、近赤外域ではスカイバックグラウンドの高さや検出器の安定性などの点から高精度な測光観測は難しいと考えられていたが、工夫次第で高精度な観測ができることがわかれば、今後トランジット惑星に対する近赤外で

のさまざまな観測（二次食の観測、惑星半径の波長依存性の観測、低温度星周りのトランジット惑星の観測など）を提案していくことが可能になる。

筆者らは2010年12月に、前節で述べたような工夫（オートガイドを使用した位置の固定、パッドピクセルの回避、デフォーカス）を行い、Jバンド、60秒積分で観測を行った。そのときの画像例を図1に、またデフォーカスした際の星のPSFの例を図2に、得られた光度曲線を図3に示す。図3の上のプロットはベースラインの傾きを補正した光度曲線（黒点）および先行研究<sup>13)</sup>のパラメーターを当てはめた理論曲線（シアン）、下のプロットは理論曲線に対する残差を示す。残差の標準偏差は1.05ミリ等級であり、全体を通してほぼ1ミリ等級の測光精度が達成できた。これは国内において初めて達成された近赤外での測光精度であり、また世界にも十分通用するレベルである（表1に、これまでに世界の地上望遠鏡で達成された近赤外の測光精度との比較を載せた）。筆者らは現在このデータを含め、HAT-P-13bのTTVの検証を行う解析を進めているところである。

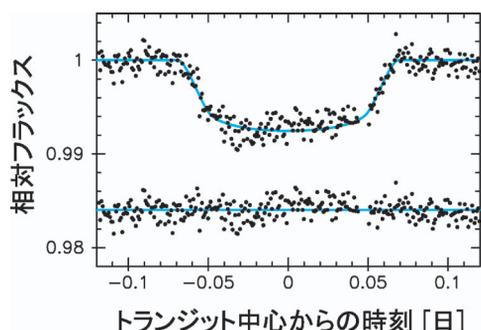


図3 岡山観測所の188 cm望遠鏡+近赤外検出器ISLEで観測したトランジット惑星HAT-P-13bの光度曲線（上のプロット）。Jバンド、60秒積分で観測。シアンの実線は先行研究<sup>13)</sup>で得られたトランジットモデルを示す。下のプロットはその残差（0.984を加算）。

表1 世界の地上望遠鏡により達成された近赤外の測光精度（60秒ビニングに換算）の比較

望遠鏡 (口径[m]) /検出器	天体名	フィルター	測光精度 [ミリ等級]
TCST (1.52) /CAIN-II	GJ436	H	0.56 <sup>15)</sup>
CFHT (3.6) /WIRCam	WASP-12	J	0.75
<b>OA0188 cm (1.88)/ISLE</b>	<b>HAT-P-13</b>	<b>J</b>	<b>1.1</b>
VLT (8.2) /ISAAC	WASP-4	Ks	1.1 <sup>17)</sup>
WHT (4.2) /LIRIS	TrES-3	K	2.0 <sup>18)</sup>

## 6. 今後の展望

筆者らのISLEを用いた観測から、近赤外において世界にも通用する高精度なトランジット測光観測が可能であることがわかった。筆者らは今後この観測技術を活かし、日本が所有する他の近赤外撮像装置（南アフリカ1.4 m IRSF望遠鏡/SIRIUS, チリ1.0 m mini-TAO望遠鏡/ANIRなど）も使用して、近赤外トランジット測光観測によるさまざまなサイエンスを行っていきたいと考えている。

特に、今後筆者らは近赤外測光観測により低温度星周りのトランジット惑星の探索を進めていく予定である（詳しくは本特集第4回の記事を参照）。低温度星は太陽型星に比べて半

径が小さいため、岩石惑星のような小さな惑星でも比較的大きな減光が得られる。また太陽型星に比べて惑星表面に液体の水が存在できるようなハビタブル（生命居住可能）領域が主星に近い場合、そのような領域に存在する岩石惑星（ハビタブル惑星）を発見しやすくなる<sup>19)</sup>。筆者らは近赤外の測光観測から、是非とも日本独自のトランジット惑星、特にハビタブル惑星の発見につなげたいと考えている。

## 謝 辞

本稿を執筆する機会を与えてくださった成田憲保氏にたいへん感謝いたします。またISLEでの観測を共に行ったIRDサイエンスチーム/トランジット班の皆様にも感謝いたします。さらに、ISLEにおいてトランジット観測に適した環境を整備して下さった柳澤顕史氏に御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Charbonneau D., et al., 2000, ApJ 529, L45
- 2) Borucki W. J., et al., 2011, ApJ 736, 19
- 3) Winn J. N., 2010, EXOPLANETS (University of Arizona Press: Tucson, AZ), ed. S. Seager (arXiv: 1001.2010)
- 4) Southworth J., et al., 2009, MNRAS 396, 1023
- 5) Mandel K., Agol E., 2002, ApJ 580, L171
- 6) Winn J. N., et al., 2009, AJ 137, 3826
- 7) Ohta Y., Taruya A., Suto Y., 2009, ApJ 690, 1
- 8) Pont F., Zucker S., Queloz D., 2006, MNRAS 373, 231
- 9) Winn J. N., et al., 2008, ApJ 683, 1076
- 10) Gillon M., et al., 2007, A&A 471, L51
- 11) Nascimbeni V., et al., 2011, A&A 532, 24
- 12) Pál A., et al. 2011, MNRAS 413, L43
- 13) Fulton B. J., et al., 2011, AJ 142, 84
- 14) Carter J. A., et al. 2011, ApJ 730, 82
- 15) Alonso R., et al. 2008, A&A 487, L5
- 16) Croll B., et al. 2011, AJ 141, 30
- 17) Cáceres C., et al. 2011, A&A 530, A5
- 18) de Mooij E. J. W., Snellen I. A. G., 2009, A&A 493, L35
- 19) Nutzman P., et al., 2008, PASP 120, 317

## High-Precision Photometry for Transiting Extrasolar Planets

Akihiko FUKUI

Okayama Astronomical Observatory, NAOJ

Abstract: Precise photometry for transiting extrasolar planets provide valuable information about these planets. In this article, we present several techniques to achieve high-precision photometry from ground-based observations. One of them is keeping stellar positions on a device during a night, and another one is defocusing. Using these techniques, we have achieved about 1-mmag photometric precision in infrared wavelength for the first time in Japan, by using the OAO 188 cm telescope/ISLE instrument. We expect that several Japanese-owned infrared telescopes can be used for many kinds of transit sciences through high-precision infrared photometry.