

# 系外惑星のtransitの検出 -ミリ等級代の高精度CCD測光-

大島 修 (岡山県立鴨方高等学校)

## 0. はじめに—Transit(測光)観測の意義—

- (1) 視線速度法(分光観測)で発見された惑星の別な方法による追試
- (2) 分光観測だけでは得られない物理パラメータがわかる(連星系の測光観測と事情は同じ)
  - ・軌道傾斜角がわかる
  - 分光観測と合わせて正確な質量がわかる。
  - ・食の光度曲線から半径がわかる。
  - 密度がわかる。
  - ・親星の周縁減光がわかる
- (3) 分光観測による惑星の大気の成分の検出を支援できる

※すばる HDS ですでに未発見の数個の惑星候補が見つかっていて、transit 法による観測が待たれている

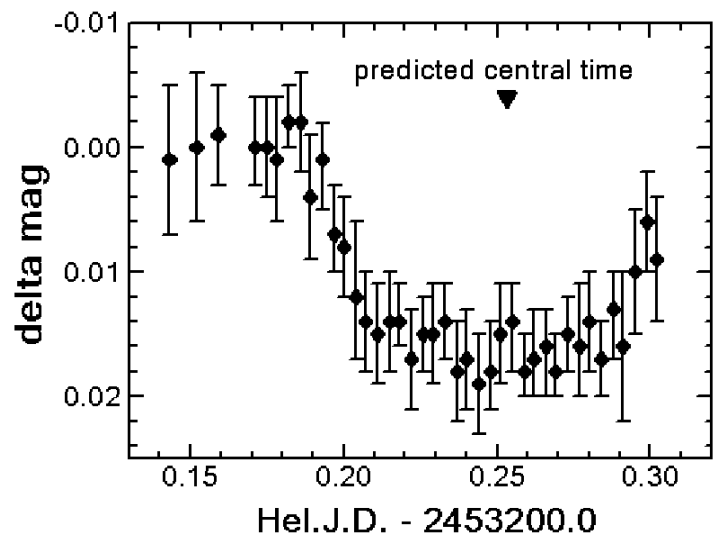


図1 HD209458b の transit 観測  
(2004年7月14日) 梅雨明け直後で数ヶ月に1度のすばらしい透明度の夜と transit が重なる幸運に恵まれた。倉敷市内で天の川が良く見えていた。

## 1. Transitを検出するための精度

期待されるtransit現象を考えると、惑星は親星の直径の1/10以下であろうから、transit現象による光量変化は、可視光では面積比に比例するので1/100以下であろう。実際に、測光観測でtransitが最初に観測されたHD209458の場合は減光量0.017等級の減光であった。この程度の現象に対して要求される測光精度は1/1000=1ミリ等級であることが理想。地球大気により生じる測光誤差を含めても、トータルの測光誤差は千分の数等に抑えることが望ましい。transit観測は、ミリ等級代の高精度測光観測である。

それを達成するには、職人芸でも体力勝負でもなく、要求される精度を達成する上で障害となる誤差要因をすべて減らす冷静な作戦を立てて観測に望むことが必要である。

## 2. 高精度測光のポイント

transit 観測で効いてくる次の主要な5つの要因について逐次検討する。

- (1) 光子統計で決まる精度 (0.1~0.001 等)
- (2) 比較星の明るさ (不適切な比較星は S/N 比を数倍悪化させる)
- (3) フラットフレーム (S/N 比の悪いものは S/N 比を数倍悪化させる)
- (4) CCD のもつ誤差 (最大 1 等の誤差)
- (5) 地球大気の変動の影響 (0.05 等程度)

どれか1つでも目標とする精度に達成していなければ、それが測光精度を決める。

なお、ここでは系外惑星の transit 観測をテーマに論じているが、もちろん一般の変光星の高精度測光にそ

のまま適用できることが多く含まれている。

## (1) 光子統計で決まる精度

光子はランダムな時系列で入ってくるため統計的な揺らぎを持つ。従って、その測光精度は、星からの光子数（正確には CCD で検出した光子数 = 量子効率 × 入射光子数）で、まず測光精度が決まる。基本的に S/N 比は検出光子数の√で与えられると思えばよい。検出器が CCD の場合、その他の要素が入り、次に示すいわゆる「CCD 方程式」で S/N 比は表される（例えば Howell(1989)PASP101,616）。

$$S/N = \frac{N_*}{\sqrt{N_* + n_{pix}(N_{sky} + N_{dark} + N_{read}^2)}} \quad (1)$$

ここで、N\*は星の光子数、n\_pix は測光アパーチャ内のピクセル数、N\_sky と N\_dark はそれぞれ 1 ピクセルあたりのカウント数、N\_read は読み出しノイズである。

明るい星の測光では、分子及び分母の√の中の N\*の項が圧倒的に大きいので、S/N 比は√N\*と考えるとよい。S/N 比 1000 を達成するには、右表のように検出光子数 100 万カウントが必要である。100 万カウントを超えるように、望遠鏡の口径や露出時間を設定する必要がある。

（なお、ここでは安全を見込んで、カウント数 = 検出光子数として扱っているが、厳密には CCD の検出光子数はカウント数に AD 変換係数（ゲイン、3 程度の物が多い）を掛けたものである。）

## (2) 比較星の明るさと測光誤差

### 明るい比較星 = 明るい光学系

目的の星(obj)と比較星(comp)の等級差、次式で定義される。

$$\Delta m = -2.5 \log(L_{obj}/L_{comp}) \quad (2)$$

この場合、最終的な S/N 比  $\sigma_{total}$  は、目的星と比較星の S/N 比をそれぞれ  $\sigma_{obj}$  と  $\sigma_{comp}$  とすると次の式で与えられる。

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{obj}^2 + \sigma_{comp}^2} \quad (3)$$

(2) と (3) 式から、最終的な測光誤差を目的星の測光誤差の単位で表すと次式のようなになる。

$$\frac{\sigma_{total}}{\sigma_{obj}} = \sqrt{1 + 10^{-0.4(m_{obj} - m_{comp})}} \quad (4)$$

これをグラフに示すと図 2 のようになる。基本的に、比較星は目的星より暗い時に S/N 比を急激に悪化させることがわかる。

とは言うものの、現実の星野で目的星より明るい比較星を見つけるのはかなり困難であり、表 2 に示すように 8 等級の星を見つけるには 1 度以上の広い視野を持った望遠鏡光学と CCD チップの組み合わせが必要である。すなわち、transit 観測のためには、望遠鏡の焦点距離が短いものを使うことが重要で、少しでも明るい

表 1 光子数と s/n 比

光子数	S/N比	精度(%)	等級精度
10	3.2	31.6	0.298
100	10.0	10.0	0.103
1000	31.6	3.2	0.034
10000	100.0	1.0	0.011
100000	316.2	0.3	0.003
1000000	1000.0	0.1	0.001

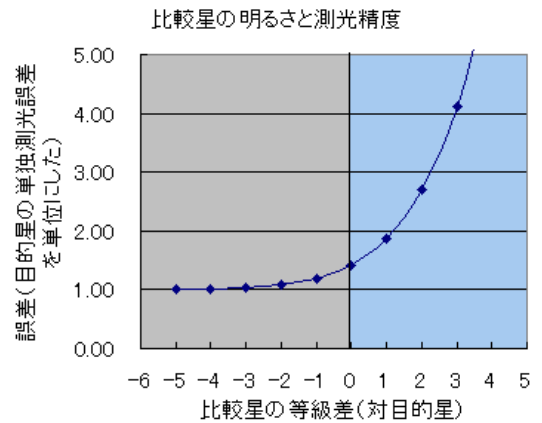


図 2 比較星の明るさと測光精度

表 2 比較星の選択と視野

	全天の星の数 (理科年表)	視野1平方度 内に期待される 数(個/度^2)	その等級の星を 1個見つけるのに 必要な視野(度^2)
6等	5.6E+03	0.14	7.32
7等	1.6E+04	0.39	2.56
8等	4.3E+04	1	0.95
9等	1.2E+05	2.9	0.34
10等	3.5E+05	8.5	0.12
11等	8.7E+05	21	0.05

比較星を目的星と同一視野に確保できるようにしなければならない。口径も大きい方が光子統計上有利なので、結局 **F 値の小さな明るい光学系が適した望遠鏡** ということになる。(筆者は 10cm f/4 という望遠鏡を新調し、今年 7 月に HD209458 の transit の検出に成功した。8 月に世界で初めて Transit 法による系外惑星の発見を発表した TrES プロジェクトは、10cm という小口径ぶりが注目されているが、このプロジェクトでは f/2.5 というシュミット光学系を使って短焦点化を図り 6 度の視野を確保していることが本質的に重要である。)

### (3) 高精度なスカイフラットフィールド

フラットフィールドも高精度な物の方が、当然ながら測光精度は向上する。「高精度」とは、空間周波数の低周波成分も高周波成分とも S/N 比が高いという意味であり、大域的ムラがなく(スカイフラットを使うと好結果が得られる)、かつザラザラ感のない滑らかなもの(数万カウントを持つフレームが 50 枚程度以上は欲しい)をメジアン処理し、「マスタースカイフレーム」を得る。薄明時の明るい空を撮像すると両者を一度に満足できることが多い(この場合はベースレベルが時間変化するので、規格化してからメジアンをとるとよい)。スカイフラットはどうしても星が写り込むので嫌がられることがおおいが、これは視野を少しずつ変えて撮像し、あとでメジアン処理するときれいに消すことができるので心配はいらない。会場では、高画質のフラットフィールドの画像を示したが、印刷では再現が困難なのでこの集録では省略するが、次の URL で見ることができる。

<http://www.kamokou.jp/~ohshima/photometry/flatfield.html>

### (4) CCD の持つ測光誤差

最も大きな誤差要因ピクセル内感度ムラ

比較星の項で述べたように、視野確保のために望遠鏡を短焦点化すると、今度はアンダーサンプリングという問題が生じる。サンプリング定理の教えるところでは、2 ピクセル以上に渡り星像を検出しなければならないが、広視野望遠鏡では、1 ピクセル内に星像が落ちてしまい測光精度に影響する。

その上、表面照射型 CCD ではピクセル内感度ムラという厄介な現象が生じる。図 3 は、1 ピクセルより小さな星像を持つ光学系で CCD を組み合わせて、恒星時追尾を少しずつらせて撮像したものである。上の図は正確にピントを合わせたもので、0.6 等以上の変動が現れている。下の図はピントを外して星像を 3 ピクセル程度にぼかして撮像したもので、測光精度が随分向上していることがわかる。図 4 は、ピクセル中心からの距離と感度の関係を調べたものである。ピクセル中心が最も感度が低いことがわかる。

この **ピクセル内感度ムラを 0.1% 以下に抑えるには、ピントを外し、星像を十分大きくする** しかない。感度ムラの影響を 0.1% 以内に抑えるには 10 ピクセル以上の星像直径にする必要がある。

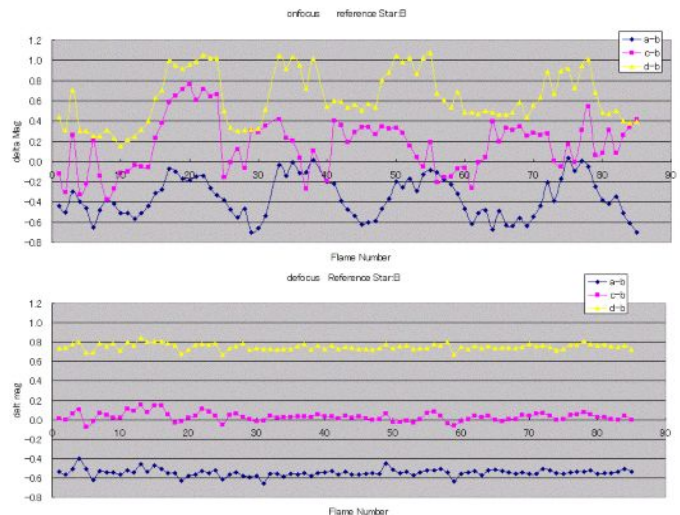


図 3 ピクセル内の感度ムラ  
(上図) ピントを合わせた時  
(下図) ピントを外した時

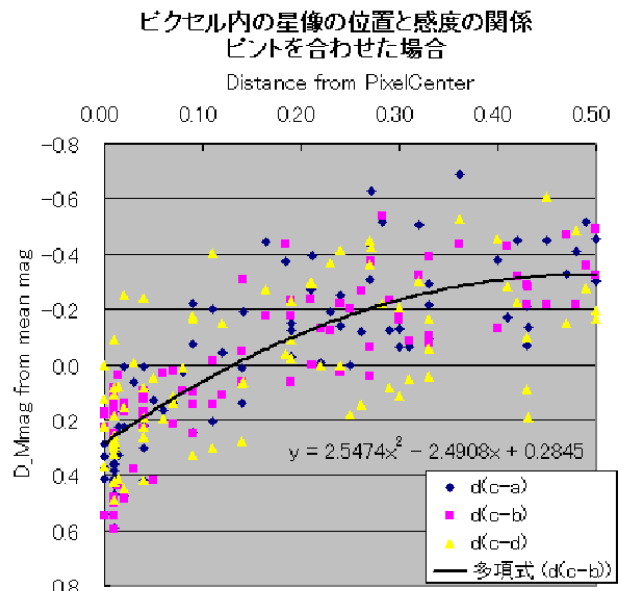


図 4 ピクセル内位置と感度

## (5) 地球大気の変動

衛星からの観測と異なり、地上からの観測では常に大気の変動との戦いがある。CCD 測光では、同一視野内の星同士を比較する相対測光であるので、誤差は少なくなるが、それでも目的星と比較星の間で常に 0.1% 以下の精度で透明度が保たれているとは言い難い。

そこで、要求されるのは、できるだけ近い比較星を用いる（しかし、これは（2）で述べることと矛盾する要求である。現実には複数の比較星を用い、加重平均した結果を得るとよい）

・**透明度が非常に良い夜（＝透明度変化が少ない）を選び観測する**しかない。このような、いわゆる測光夜（Photometric Night）以外では「骨折り損のくたびれ儲け」となるので transit 観測は行わないで、そこまで精度を要求しない種類の観測を行うことをお勧めする。transit のタイミングと合わないという致命的な矛盾があるがいたしかたない。

図 5 は、一応 transit 現象が起こったことがわかる観測であるが、図 1 と比較するとデータの分散が大きい。1 ヶ月に 2 回ほどある測光夜における観測であったが、日本ではこの程度の精度しかでない。図 1 のように数ヶ月に 1 度の好条件下で観測が行われることが望ましい。

### ・最低 20 秒間以上の積分時間をかける

シンチレーションは長い方では数秒の周期を持つため少なくとも 20 秒程度の積分は必要である。

### ・天頂に近い位置で観測する

Air mass が小さいほど大気変動の影響が少ないので夜半ころに南中する現象を見逃さない。

### ・観測点 10 点以上を時間平均する

これは、さらに 10 倍ほど光子統計を稼ぐという意味もあるが、それよりも地球大気による変動を平均化してキャンセルする効果の方が大きい。transit 観測では、時間分解能はそれほど求められない。

などの工夫が要求される。

## おわりに

詳しいことは次の URL を参照ください。 <http://www.kamokou.jp/~ohshima/photometry>

「星ナビ」9月号の特集にも概要を書きました。未公表の系外惑星の情報を得るには、メーリングリスト-transit に入りましょう。これは井田茂（東工大）＋渡部潤一（国立天文台）さん主宰の ML で [ida@geo.titech.ac.jp](mailto:ida@geo.titech.ac.jp) へメールを送るとメンバーになれます。

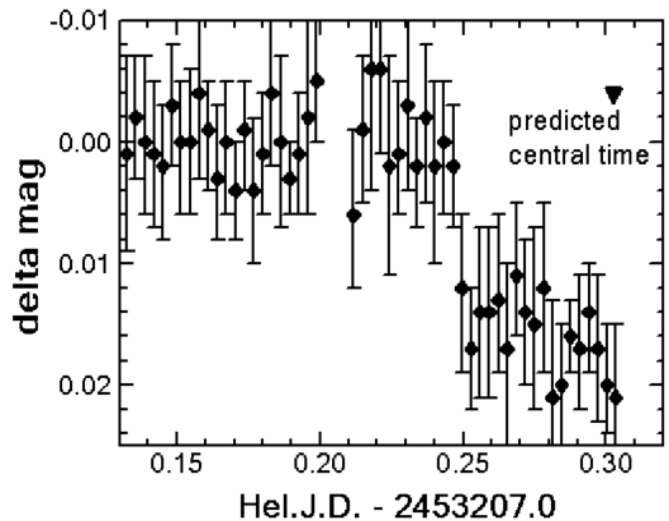


図 5 大気条件の測光精度への影響

1 ヶ月に 2 度程度ある比較的良好な透明度の夜の観測（2004 年 7 月 21 日）。図 1 と比較してデータの分散が大きいことがわかる。