

系外惑星を観測しよう ～トランジット法観測入門～

大島 修
(岡山県立鴨方高等学校/JAPOA 会員)

1. 高精度測光でトランジットを検出しよう

まず手始めに、系外惑星で有名なペガサス座にある HD209458 のトランジットの観測に挑戦してみよう。世界的にこの星のトランジットの検出には、すでに何人ものアマチュアが成功している。この星の系外惑星によるトランジットを自分の手で検出できれば、今後「すばる」を使った視線速度法でこれから発見されるであろう系外惑星のトランジットを世界で初めて検出することも夢ではない。その意味は単に別の方法で系外惑星の存在を追試するというだけではない。トランジットの測光観測から、新たに惑星の半径、軌道傾斜角がわかり、視線速度法と合わせると惑星の質量を正確に決定できるという非常に重要な情報が得られるからである。

この星 HD209458 がトランジットを起こす時の変光範囲は 0.02 等級以下であるため、その観測には 0.01 等級以下の高い測光精度が要求される。その精度を達成するには様々な工夫が必要であり、一点一点の観測精度を確保しながら、多数の観測点を稼ぐことによりさらに信頼性を向上させる必要がある。鑑賞用撮像の常識とは、ある場合には正反対の方法がとられる場合（ピントをはずして撮像など）もあるので細心の注意が必要である。

ここで扱うトランジットの観測方法とは、位置のわかったトランジット候補天体を同一視野内にある数個の恒星と明るさを比較する方法である。トランジットの観測と言っても他に、200mm 程度のと CCD を組み合わせ、広視野で莫大な数のトランジット現象を見つけ出し、系外惑星というプロジェクトもある。なかなか興味深いのでここで前者のみを扱う。

ここで示す観測の実例は、10cmf/4 アクロ望遠鏡+ST-9EX (図 1) を使う。また編集部で使用するソフトは「ステライメージ 4」をタ処理の実際を扱う。



同じトラン
望遠レンズ
星の中から
検出すると
方法である

マート屈折
の要請によ
使ったデー

2. 観測計画—ネットを活用しよう—

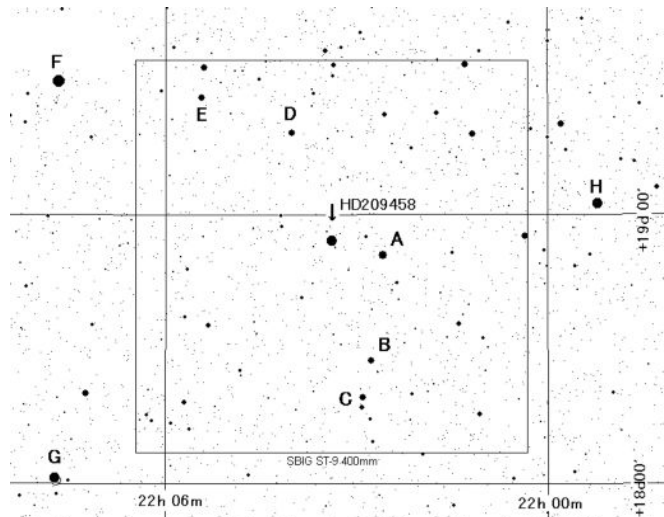
観測する星が定まったら、比較星・チェック星を決める。ステラナビゲータなど星図表示ソフトを使い、目的星を含む視野で 12 等程度の星まで表示する。CCD の視野を表す枠を設定し、同一視野に入る星で目的の星と同じかより明るい星と少し暗い星を 10 個程度選び、座標または HD 番号を調べ「メモ帳」などに貼り付けておく。それらすべての星について Simbad データベース (注 1) などを利用し、詳しい情報を得る。その例を図 2 と表 1 に示す。これらの情報を元にして最適な比較星とチェック星数個を選び出す。

記号	Name	R.A.	Dec.	V	B	B-V	Sp.
	HD209458	22h 03m 10.7s	18d 53' 04"	7.65	8.18	0.53	G0V
A	HD209346	22h 02m 21.3s	18d 49' 59.2"	8.33	8.58	0.25	A2
B	HD209357	22h 02m 32.6s	18d 26' 15.7"	8.68	9.31	0.63	K0
C	HD209379	22h 02m 40.3s	18d 18' 13.5"	8.86	9.35	0.49	G5
D	BD+18 4920	22h 03m 48.5s	19d 17' 01.3"	8.98	10.05	1.07	G5
E	HD209724	22h 05m 13.4s	19d 24' 50.1"	8.57	8.92	0.35	F
F	HD210074	22h 07m 28.6s	19d 28' 31.9"	5.77	6.10	0.33	F2V
G	HD210090	22h 07m 30.0s	18d 00' 02.6"	6.35	7.96	1.61	M1
H	HD208897	21h 58m 59.7s	19d 01' 13.1"	6.50	7.51	1.01	K0

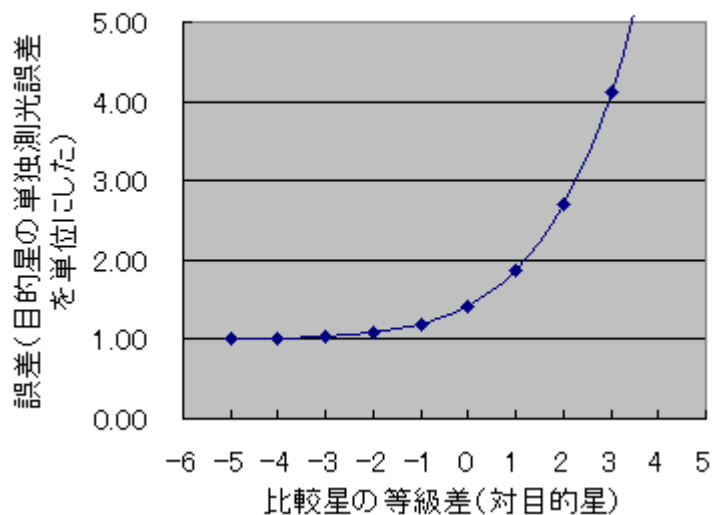
(注1) Simbad データベースを使おう
<http://simbad.u-strasbg.fr/sim-fid.pl>
 HD カタログ番号か赤経赤緯の値を入力する。
 座標で入力する場合は"around object queries" は位置精度例えば「1 arc min」
 と指定する。正確な座標 (FK5 準拠)、正確な B と V 等級、スペクトル型、出典などが表示される。それが変光星である場合は出てくるタイトルに変光星と表示されるので一目でわかる

比較星は、できるだけ目的星より明るい星を選びたい。その方が測光精度が上がるからである。図 3 に、比較星と目的星の等級差が測光誤差に与える影響を示す。さらに比較星選びで重要なポイントに、色 (色指数 B-V の値) が似ている星を選ぶということがある。地球の大気による減光の度合いは短波長ほど大きいので、減光の様子が星の色により変わるためである。トランジット観測の場合は、観測時間が長く、広い高度に渡り観測することが多いので、この影響は大きい。例えば、比較星に選んだ星が目的星よりも青い (B-V の値が小さい) 場合、高度が下がっていくと青い星のほうが大気減光が大きいので、比較星との等級差 (目的星-比較星) は、マイナス側にふれる。つまり、見かけ上目的星が明るくなっていくように観測される。ただし、現実には、目的星より明るくかつ同じ色の星を見つけるのは困難であるのでどこかで妥協することになる。

比較星・チェック星の色指数が目的星と異なっても、目的星の色をはさむように青い星と赤い星の複数を選ぶ。
 HD209458 の場合、私は図 2 のように H の星を比較星に、A の星をチェック星 1 にした。



比較星の明るさと測光精度



露出時間の決定

測光精度を上げるためには、星からの光子数を十分稼がなければならない。測光精度に影響するものには様々な要素があるが、まず重要なのは、星からの光子数だ。精度 1% (精度 0.01 等、S/N 比で 100 に対応) を得るには 10000 個以上の検出光子数が必要だ。S/N 比は、大きく検出光子数の平方根に比例するからだ。なお、検出光子数は、カウント数 × ADU (AD 変換単位) である。ADU の値は CCD ごとに異なるが、CCD カメラの仕様表に明記されていて、例えば ST-9 の場合は ADU = 2.8 電子/カウントである。ただ実用的な目安としては、光子数に換算しなくても、カウント数で 1 万以上、できれば 100 万くらいは欲しい、と覚えておけば良い。カウント数は、主に望遠鏡の口径と露出時間に比例するが、その他に、S/N 比には、ダークノイズや背景の空の明るさ、測光時のアパーチャ径などが影響する。次のサイトを利用すると簡単に S/N 比を見積もることができるので、自分の機材や場所について計算してみたい。

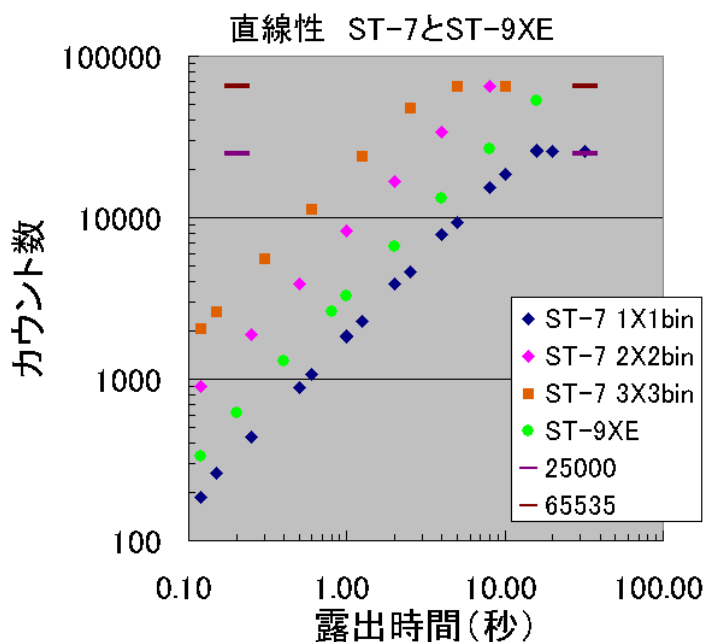
<http://stupendous.rit.edu/richmond/signal.shtml>

CCDカメラの直線性とダイナミックレンジ

露出時間を決める時に考慮しなければならないことにダイナミックレンジがある。一般に CCD は、入力する光子数と出力のカウント数が正比例するという良好な直線性があるが、ある範囲を越えると明

るい光に対して、正比例の関係が成立しなくなる。ABGが効く場合や、ABGなしの場合でもあふれた電子が隣のピクセルに漏れるなどするためだ。測光では、直線性が成立している範囲内で使用しなければならない。この範囲をCCDカメラのダイナミックレンジと呼んでいる。これは機種ごとに異なるし、ピンニングの有無でも変わるので、自分のCCDカメラがどの範囲で利用できるのか一度は測っておく必要がある。図4はその実例である。測り方は筆者のWebページを参照されたい。特別な装置を使用せずに測る実例を示してある。

<http://scox.kamokou.jp/~ohshima/photometry/measureCCD.html>



3. 観測に必要な機材・ソフト

必要な機材は、望遠鏡、冷却CCDカメラまたは光電測光装置、ソフトウェアである。

望遠鏡は、短焦点のものを

トランジット法に使う望遠鏡は、CCDとの組み合わせで、できれば1度以上の広い視野が確保できる短い焦点距離のものが適している。視野1度というのは、同一視野内に8等から10等の比較星チェック星を数個以上確保できるからだ。高精度測光を実現するためには、比較星・チェック星として、目的の星よりできれば明るい星が欲しい。この記事の機材の組み合わせでは1.4度の視野が得られる。光学系は、反射系でも屈折系でどちらでもよく、星像はシャープでなくてよい。第4章で述べるように、ピントを外して使うので望遠鏡の光学系は、シャープである必要はまったくない。これはコスト上、大変ありがたい。例えば、同じ10cm F/4という明るい屈折望遠鏡でも安いアクロマートレンズ製では、シャープで高価なEDレンズ等のものと較べると10分の1のコスト入手できる。目的の星は明るいことが多いので口径も大きくなくてよい。必要なら、露出時間を掛けて光子数を稼げばよいからだ。F比の大きい望遠鏡しかない時は、フォーカルレデューサを使って思い切って焦点距離を縮めよう。20cmシュミットカセグレンにF3.3レデューサとST-7を組み合わせでHD209458のトランジットの検出に成功している実例がある。なお、F比が明るい光学系の場合は、CCDカメラの接続部でケラレが生じやすいので、2インチ用の太い接続チューブを使うのがよい。接続部の遊びやたわみをなくしないと、フラットフィールドの再現性が得られないので注意が必要だ

望遠鏡の架台

トランジット法では、測光精度を上げるために、大気条件のよいできるだけ高い高度で、しかも長時間観測する必要がある。子午線をはさんで連続観測できるフォーク式がお勧めだ。ドイツ式の場合は、赤道儀の反転を行う必要があり、その操作中観測も中断されるし、天体の画像は180度反転する。その場合、フラットフィールドもテレスコープ・イーストとウェストの両方でフラットを撮らないといけない。経緯台では、常に画面の位置角が変化するので、フラットフィールドの全体的な傾きがあると、測定結果に系統的な誤差となって入り込む。これらは、明るい星のtransit観測のように広視野でかつ高精度測光が要求される場合に、特に問題になってくる事項である。

CCDカメラと望遠鏡の接続にタワミやガタがあると、望遠鏡の向いている高度や位置角、ドイツ式赤道儀の切替などで、フラットフィールドに誤差が入り込むので、タワミやガタの原因を特定しなくす努力が必要である。それがどの程度かは、いろいろな高度(時角)でフラットを撮り、異なる高度のフラットフィールド同士で割り算するとその誤差を知ることができる。

冷却CCDカメラ

できるだけ広い視野を得るために、CCD全体のサイズは大きいものほどよい。しかし、適切な比較星が同一視野に確保できる場合には、例えばST-7のような小型のものでも実用になる。ピクセルの

サイズは小さいものより大きいものの方が、大きな光量まで飽和せずに使える（＝ダイナミックレンジが広い）ので有利である。しかし、小さいピクセルサイズのものでも、2×2または3×3にオンチップビンニング（注2）することにより同様の効果が得られる（むしろこの方が、後で述べるピクセル内感度ムラが少なくてもよいかもしれない）。

ABG機能については、無しの方が、広い直線性と感度の面で、はるかに有利である。しかし、ABG有りのものしかない場合は、ビンニングにより見かけの直線性を上げることができる。（図4のST-7の例を参照）

（注2）ビンニングは、読み出し時間を劇的に短縮できるし、保存容量や画像処理時間の面でも有利である。デメリットは、分解能の低下であるが、恒星の測光ではまず問題にならない。

フィルター

ノーフィルターでもトランジット観測はできる。しかしできれば、測光用標準システムであるUBVRIのうち数種類を使って観測したい。これから発見される系外惑星では、恒星の周縁減光のモデル計算との比較から、より詳しい情報が得られるためだ。RGB三色分解用のフィルターセットでもノーフィルターよりは良いだろう。もちろん口径が小さく光子数が稼げない場合はノーフィルターでよい。

ソフト

撮像時に使うCCD制御ソフトは、ノーフィルターや1色の観測の場合は、連続撮像さえできれば、CCDに付属しているソフトで間に合う。フィルターを交換しながら多色測光を行う場合は、フィルター毎に露出を設定して自動でスケジュール撮像できる「ステラギア」のようなものが最適だ。

データの整約と測光を行うソフトは、測光を十分意識して作られたソフトが望ましい。ここでは「ステライメージ4」を例に解説する（注3）。

（注3）国立天文台広報普及室が配布しているマカリは、アストローツと組んで開発したFITS画像解析ソフトだ。「ステライメージ」の多彩な画像処理機能を削り測光機能に特化したサブセット版と言えるソフトで、操作性は「ステライメージ」と似ている。天文教育普及目的であればどなたでも利用できる。<http://www.nao.ac.jp/J/OutReach/Makalii/>
Web以下の記述をよく読んで利用して欲しい。

その他、英語版のソフトでは、MaximDLやMIRAが良く使われている。有名なIRAFは、プロの天文学者が使うCCD画像解析ソフトで、奥が深く全貌を把握するのはかなり困難であるが精度と機能は折り紙付きだ。LinuxやMac OS Xで利用できる。これらのソフトの詳細は検索サイトで調べて欲しい。

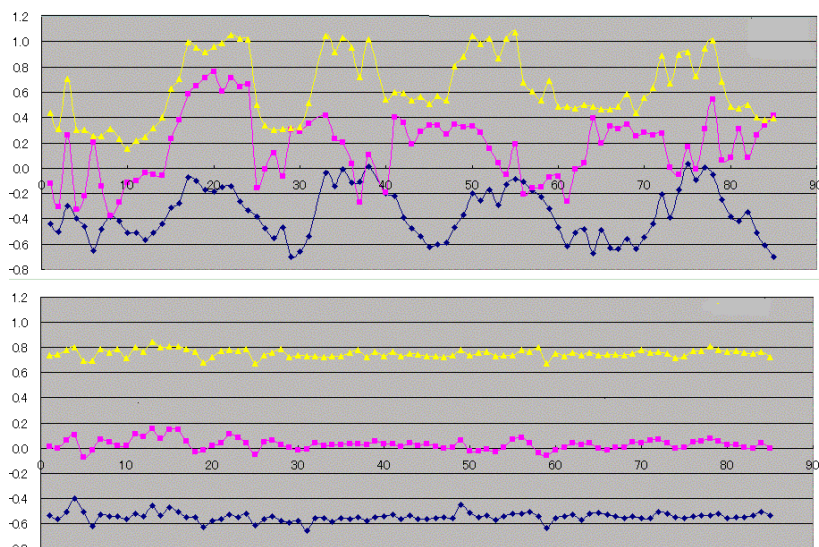
天文用ソフトウェア Windows・Mac・UNIX用 <http://www.cox-internet.com/ast305/software.html>

4. 撮像の実際-ピントを外す-

トランジットの観測は、時間分解能は1分もあれば十分なので、十分な露出時間をかけ、より大きなS/N比を確保して、間隔を空けずに連続して行う。読み出し時間の短いUSB接続のCCDカメラが有利だ。観測継続時間は、予想されるトランジットの時間を十分カバーする時間が必要だ。追尾精度や赤道儀の切り替え、天気悪化などの心配がない時は、ソフト任せの自動観測でよい。

結論を先に書くと、ピントを外して観測することがお勧めだ。精度を上げるために、星像サイズをFWHM（ピーク値の半分になる星像の裾野の直径）で5ピクセル以上にすることが大切だ。視野確保のために短焦点の望遠鏡を使った場合、合焦後の星像はピクセルサイズよりも小さくなるのが少なくない。その場合、測光精度が極端に悪化する。その理由は、私たちが通常使う表面照射型CCDは、構造上、1ピクセルの中で感度のムラがあり、シャープな星像はもろにピクセル内の感度ムラを拾い、場合によっては0.6等以上大きな測光誤差を引き起こすことが判っているからだ（図5）。これではとてもトランジット現象を測光的に検出することはできない。しかし、わざとピントを外し5ピクセル以上に星像を太らせると、ピクセル内感度ムラの影響を1%以下に押えることができる。なお、焦点内外像が非対称

になる場合は、星像の外側の輪郭がくっきりする側を選ぶ。反射系ではピントを外すと副鏡などの影が出てドーナツ状の星像になるが、測光上も重心検出上もまったく問題は生じない。



ピントをはずして撮像することは、別の利点もある。地球大気のシンチレーションの周期には、長いものでは数秒にも達するものがあり、その影響を少なくするには20秒以上の露出時間が必要である。しかし、ピントを合わせた明るい星では、20秒も露出するとCCDチップのダイナミックレンジを簡単に越

してしまい測光が困難になる。そこでピントを外すと星像が広がり、1ピクセルあたりの光量が下がるので、その分だけ露出時間を増すことができる。つまり、星像全体でより多くの光子数を得ることができるので、その分、S/N比が向上し測光精度が上がる。つまり、ピントを外した撮像は、ピクセル内感度ムラ、シンチレーション及び光子統計の3点でメリットがあることがわかる。

なお、誤解のないように書いておくと、以上の議論は、明るい星を短焦点望遠鏡で測光する場合に関するものだ。使う望遠鏡の焦点距離が長く、ピクセルサイズが小さいCCDカメラで、暗い天体を観測する場合は、ピントを合わせた方が測光精度は向上する。

紙面の関係で詳しくは書けないので、筆者の Web ページを参照して欲しい。
<http://scox.kamokou.jp/~ohshima/photometry/>

フラットフィールドの取得

測光精度を上げるためには良質のフラットフィールドも重要だ。フラットフィールドの全体的な傾きは1%以下にしたいが、同じ天体を同じ位置で観測する限りは、1%程度でも何とかなる。しかし、広視野の場合は傾きのない良質のフラットフィールドを得るのはなかなか困難だ。その方法はいろいろと工夫して欲しいがスカイフラットが最も良さそうだ。望遠鏡を薄明中の天頂付近に向けて、フィルターもピントも（ゴミの付着も含めて）、トランジット観測時と全く同じ光学系で撮像する。1万カウント以上得られれば、ダイナミックレンジの上限に近い範囲になるようにすれば、露出時間は短いほどよい。星が写り込むのを避けるためにも、できるだけ明るい空がよい。ただし、シャッタームラの影響を避けるために、最低1秒程度の露出は掛けた方がよい。冷却温度は可能な限り低温にする。できるだけ多量のフレームを得る。多色測光を行う場合は、フィルター毎にフラットフィールドを得る。フラットフィールド用のダークも同じ冷却温度で多数枚撮る。

天体フレームとダークフレームの取得

冷却温度は、できるだけ低温がよいが、他の日付の観測とダークの特性を比較するためには五度刻みで設定するのもよい。

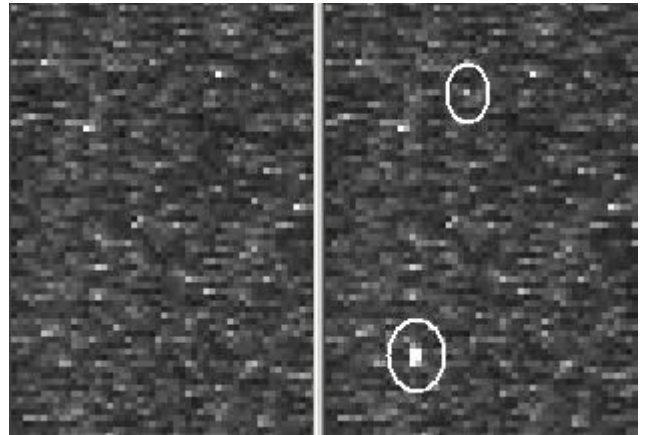
露出は20秒以上をかけ、測定する星のうち最も明るい星の1ピクセルあたりのカウント数が、CCDカメラのダイナミックレンジの上限に達しない範囲でできるだけ多い値（CCDによっても異なるが数万カウント）になるように露出する。HD209458では、恒星面通過時間は三時間程度なので観測の時間分解能は一分もあれば十分である。多色測光を行う場合は、フィルターを交換しながら撮像する。オートグラブなどの機能を使い自動観測するとよい。天体フレーム用のダークフレームは、同じ冷却温度で、天体撮像の前と後にまとめて20枚程度づつ撮っておけばよい。

5. データの一次処理と測光法

まずは一次処理と呼ばれるダークとフラット補正を行う。天体フレームから同じ冷却温度と同じ露出時間のダークフレームを引き、さらにフラット用ダークフレームを差し引いたフラットフレームで割る。

これを、天体を撮ったすべてのフレームについて行う。特に大量の撮像データを相手に、これらのすべてを手動で行うのは大変だ。その点、ステライメージ4の「バッチ」→「共通ダーク/フラット補正」機能を利用すると自動でこの一次処理を行ってくれるので便利だ。

なお、これらの処理に使うダーク、フラット、フラット用ダークの3枚のフレームは、多数枚撮像したものから、あらかじめ「バッチ」→「コンポジット」を使って「中央値」でマスターフレームを作成しておく。平均値ではなく中央値を用いる理由は、単純な平均では、たった1枚に飛び込んだ宇宙線イベントにより平均値が引きずられるからである。中央値では、1フレームだけが飛び離れた値を持っていてもほとんど影響はなく、きれいなマスターフレームが得られる。



(図6)

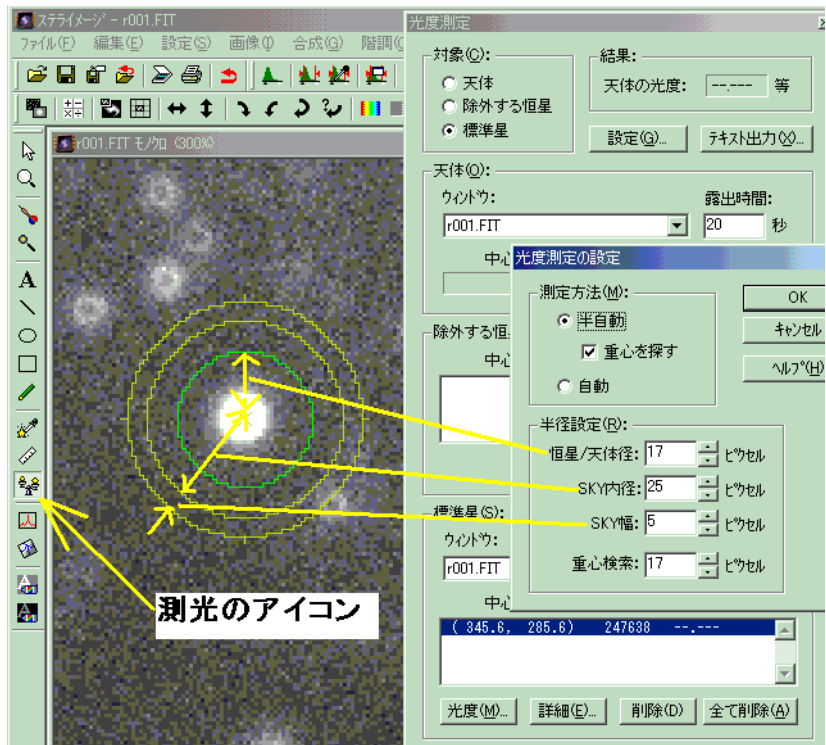
なお、中央値の処理は非常に時間がかかるので、「ファイルから追加」ではなく、必要な画像はすべて読み込んでから処理すると圧倒的に速い。

こうして一次処理が終了したら、次はいよいよ測光である。

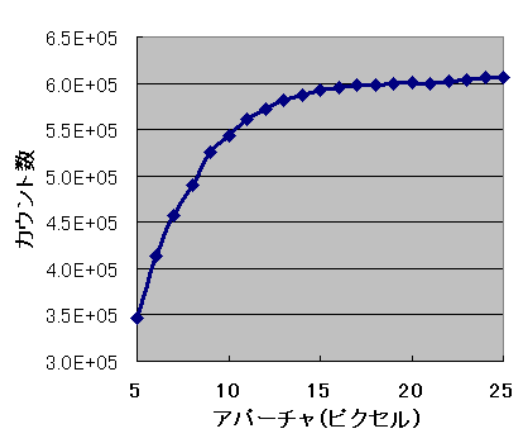
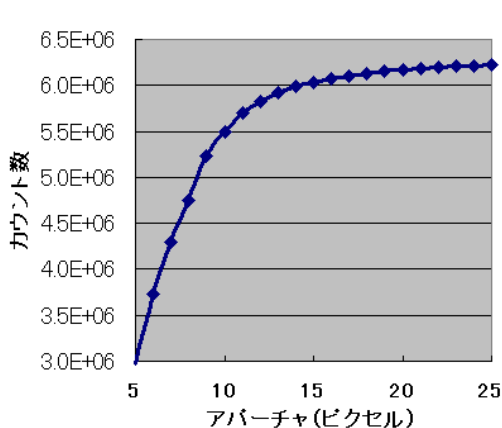
測光アパーチャを決めよう

ステライメージやマカリを使って測光する場合は、アパーチャ測光(注4)という方法を使う。アパーチャとは、測光する円形のマスクの開口のことで、この中に星のすべての光を含まないと正確な測定値は得られない。ピクセル単位で表した半径で表すことが多い。星像は見かけよりもずっと大きく広がっているので大き目のアパーチャを使おう。

では、アパーチャのサイズはいくらにすると良いのだろうか。これは、観測に使った光学系や星野の混み具合によって異なるため、一般的な数値で示すことはできない。ただ、高精度測光では、測定ソフトの「自動」に任せると、星ごとに異なるアパーチャサイズになり、測光誤差を引き起こすので固定したアパーチャで測光するのがよい。デフォルト値が適切であるという保証はないので、自分で調べる方法を次に述べる。図7



測定方法は「半自動」+「重心を探す」で行う。「重心検索」は星像を十二分にカバーするピクセル数を指定して固定する。まず sky の内径をかなり大きめに設定し、星を



測るアパーチャ径を3ピクセル程度にして目的の星を測光する。結果をテキストファイルに出力する。この手順を、恒星の測定径を1ピクセルずつ増やして十二分なアパーチャ径になるまで、繰り返す。これらの出力ファイルを「メモ帳」などで1つのテキストファイルにまとめ、それをExcelで読み込みグラフ化すると図7のようになる。アパーチャを増やしていくと、最初は急増していた曲線が横に寝て変化は少なくなっていることがわかる。求めるアパーチャ径は、径が変化してもカウント数の変化が少ない所だ。この例ではアパーチャ径XXピクセルあたりが良さそうだ。

なお、近接した隣の星が測光アパーチャに入ると測光精度に影響がありそうだが、うまく分離できない時は、いっそのこと一つのアパーチャの中に2つの星をすっぽり入れてしまう方が良い。欲しいデータは、絶対的な明るさの値ではなく、等級差の変化なので、いつも同じ明るさの星が加わるだけなら問題は生じないからだ。ただし、他の観測者と連結してデータを解析してもらう場合には、隣の星を含めて測光したことを報告に明記する必要がある。

次に、星の測光アパーチャサイズが決まったら、スカイの幅についても1ピクセルずつ変えて測ってみるとよい。あまり影響はないことがわかるが、周りの明るい星がスカイの同心円に入ってこない限り、スカイ幅は広い方が測光精度は向上する。以上のことは、ぜひ自分で確認して見て欲しい。

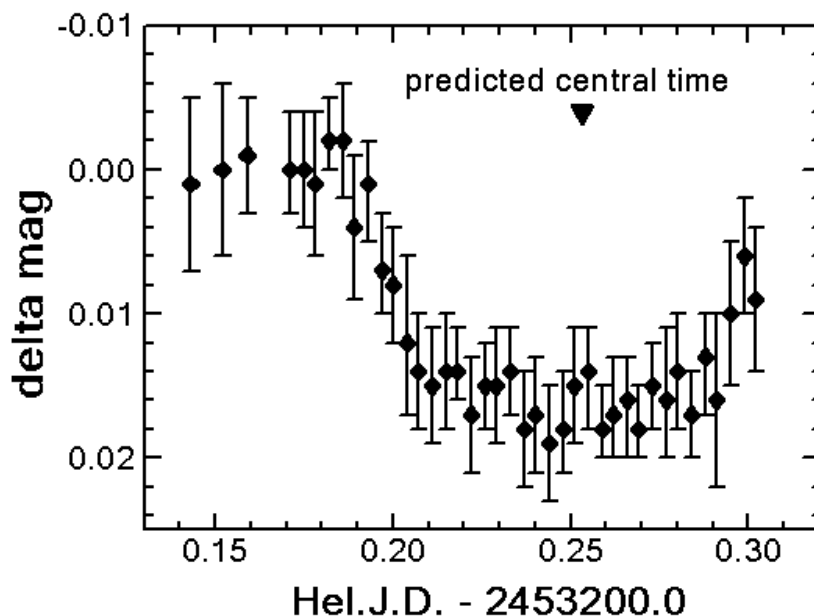
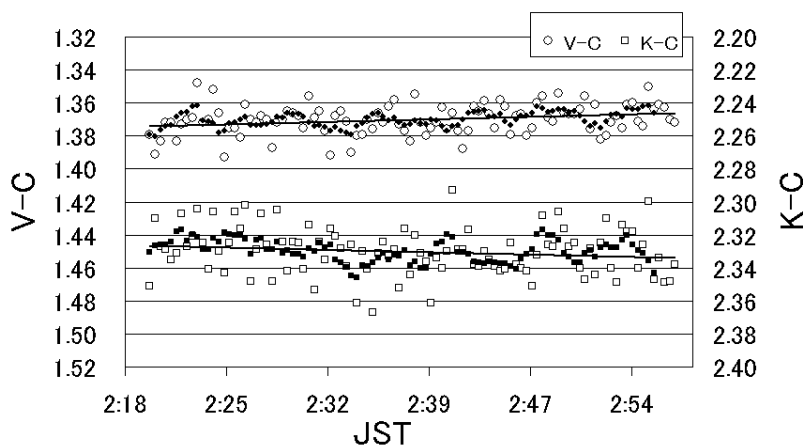
6. 光度曲線を描く

このステライメージ4のテキスト出力 (CSV ファイル) をExcelなどで表計算ソフトで読み込み、等級差を次式で求める。すなわち、目的星のカウント数をV、比較星のカウント数をCとすると、等級差 dm は、

$$dm = -2.5 \cdot \log_{10} (V/C)$$

ステライメージ4では、1フレームの測光結果を1つのテキストファイルに出力する。多数枚の観測フレームから等級差の変化を見るためには、表計算ソフトに読み込む前に、「メモ帳」などテキストエディタ (オープンソースでは例えば「サクラエディタ」が入手できる、シェアウェアでは「秀丸」が有名) に読み込み、コピー&ペストを繰り返して一枚のテキストファイルにまとめたものを表計算ソフトに読み込ませるとよい。テキストエディタではマクロが使えるものもあるし、WSH や Ruby などのスクリプト言語で、多数のファイルから読み取ったデータを一つのファイルにまとめる方法もある。

なお、AIP4Win (コラム) や Maxim DL というソフトを使えば、多数枚の測光を自動で実行し、一つのテキストファイルに出力してくれ、グラフも自動で示してくれる。



こうして得られたグラフからトランジットがうまく検出できれば観測は成功である。図8は、食が起

こっていない時の高度曲線である。明るい比較星と用いた方が、暗いチェック星と較べてデータのばらつきが少ないことが判る。経験を積めば、天候の状態により測光精度が殿程度変わるかわかってくる。どんな工夫をすれば、さらに測光精度が高まるか、transit メーリングリストで報告して欲しい。

コラム 多数フレームの自動測光

AIP4Win(<http://www.willbell.com/aip/index.htm>)というソフトを使えば、トランジット観測のように連続何百枚という膨大な測光を自動で行ってくれる。V (目的星)、C (比較星)、K (チェック星) を1枚目のフレームで指定すると、測光するファイルのリストにしたがって黙々と3つの星を同定しながら測光を行い、テキストファイルに出力してくれる。観測フレームが多い時ほど救われる機能である。しかし欲を言えば、指定できる星の種類がV,C,Kの3個に制限されていてやや不満である。ステライメージ (とマカリ) の次のバージョンアップでも、ぜひこの機能を取り入れてほしいが、指定する星の数を5ないし7まで増やせればAIP4Winをしのぐソフトになるだろう。

アパーチャ測光 (注1)

CCDを使った測光の主な方法に、アパーチャ測光とPSF測光とがある。PSF測光とは、星像の拡がり関数 (Point Spread Function) を、例えばガウス関数と仮定して、測ろうとしている星像にベストフィットするパラメータを計算し、その関数から光の総量を推定する方法である。この方法には、視野内どこでも同じPSFを適用できるかという制約があるが、星団などのように混み合った星野中の星を測光する場合などはアパーチャ測光よりも有利である。その他、大規模測光 (mass photometry) という方法は、1ピクセル内に複数の星が入っていても分離できないままに光の総量の変化を調べる方法もあり、褐色矮星や系外惑星など光をほとんど出さない天体をマイクロレンズ効果を利用して検出するプロジェクトで用いられている。

(注4) フィルターの安定性がよい

天文学の世界で測光用標準フィルターとして使われているのがUBVRIのジョンソン・クローン・カズンズシステムであり、ドイツショット社の色ガラスフィルターを数枚ずつ組み合わせて使うことが推奨されている。(Bessel) したがって、自分で取り寄せたフィルターで標準システム用のフィルターセットを実現できるが、このうちUとBには、コーティングなしで用いると1年程で内部成分が染み出でてきて表面が曇る現象が生じることがあるので注意が必要である。SBIG社やOptec社のセット品は長持ちしそうである。