

## 分光観測

河北 秀世 < kawakita@astron.pref.gunma.jp >

### (1) 天体からの光の情報と分光観測

天体からやってくる光、どんな情報を持っているだろうか？われわれが観測できるのは、光の強度である（ここでは、光の偏りである「偏光」については言及しないことにしよう）。天球上のさまざまな位置の光の強度を（写真や冷却 CCD で画像を得ることによって）測ると、星の位置（赤経、赤緯）が分かる。また、天体の明るさはいつも一定ではなく、時間にも依存している。そしてもうひとつ、「波長」によっても光の強度は異なっている。光は様々な色の光に分けることができることが知られている。太陽光をプリズムで虹に分けるのが、まさにその例である。こうしてできた虹の中で、様々な色というのが、異なる光の「波長」に対応している。光というのは、波としての性質を持っており、その波の山と山の間隔が「波長」なのである。人間の目に見える光は、波長が約 0.4 ミクロンから 0.7 ミクロン程度の範囲であり、「可視光」とも呼ばれる。たとえば、星はさまざまな波長の光を発しているが、私たちにとって「赤く見える星」というのは、青い光よりも赤い光を多く出している星ということになる。

分光観測によって彗星のスペクトルが得られれば、そこから多くの物理量が得られる。ガスの量、ダストの量はもちろん、波長分解能の高い分光器があれば、ガスの温度を推定することも可能になる。分光観測は、彗星の物理を探る上で、非常に強力な観測手法である。観測、データ解析を含めて敷居が高い点が多いが、得られる結果は、必ずや皆さんの知的好奇心を満足させることができるであろう。また、フィルターを用いた撮像観測も、波長分解能の低い分光観測だと思えば、画像の意味するところが分かってくる。いったい、どの波長で、何を観測しているのか（分子か？ダストか？）を常に意識して観測していただきたい。

### (2) 分光器の構造

分光観測とは、ある天体から来る光について、波長ごとの光の強さを記録する観測であると言える。波長ごとに光の強さを示したものを「スペクトル」という。このスペクトルを観測するために、これまで様々な観測装置が考案されてきた。ここでは、現在、一般的に用いられている「スリット分光器 (slit spectrograph)」について簡単に説明し、それを用いた分光観測の手法について述べる。まずは、図 1 (a) の光学系をみていただきたい。図中、左側が望遠鏡（図には描かれていない）であり、望遠鏡によって集光された光が、焦点を結ぶ位置には破線で焦点面が書かれている。焦点面のすぐ後ろにはコリメータ・レンズ、次いでカメラ・レンズが配置されており、その更に後ろに CCD チップを置いている。コリメータ・レンズによって望遠鏡からきた光は一度、平行な光に戻され、カメラ・レンズによって再び集光されて像を結んでいる。ここでは、わざわざ一度、望遠鏡で集光したものを平行に戻してから、再度集光するという二度手間になっていることに注意してほしい（コリメータ・レンズとカメラ・レンズの焦点距離の比を適当に選べば、任意の倍率で撮像ができる）。コリメータ・レンズがアイピース、カメラ・レンズと CCD チップが人間の眼（レンズと網膜に対応する）と思えば、CCD 上に天体の像が得られることは容易に想像することができるであろう。さて、次に、望遠鏡の焦点位置に「細長い切れ目の入った薄い板」

(スリット slit)を置いて彗星に望遠鏡を向けたとしよう。どんな画像が撮れるだろうか？答えは、彗星のコマのうち、細長い領域に入ってきた部分だけが CCD に写るのである。CCD の上に、細長く写っている部分があって、残りは真っ暗なのである。せっかくの CCD の一部しか使わないのではもったいない。そこで、この細長い画像の切れ端を、異なる色ごとに CCD 上にびっしりと並べることができるようにした装置が、「スリット分光器」である。

では、細長い画像の切れ端を波長ごとに分けるには、どうすればいいだろうか。そのためには、コリメータ・レンズとカメラ・レンズの間に、プリズムや回折格子といった「分散素子」を入れればよい、というのが答えである(図1(b))。分散素子に入ってきた光は、波長によって進行方向が曲げられてしまう。プリズムで太陽の光を虹に分けるという実験も、プリズムに入ってきた光の進行方向が色ごとに違うことを利用しているのである。最近では、分散素子として回折格子(ガラス等の表面に細い溝を1mmあたり数百から数千本刻んだもの)が使われていることが多い。ここでは、その詳細については言及しないが、興味ある諸氏は参考文献を読んでみてほしい。要は、スリット分光器では、スリットを通ってきた部分について、異なる波長ごとの絵がびっしりと並んだ絵が撮れるということ覚えておいてほしい。また、このスリットのある板に写った画像を、別途、撮像することができるようなカメラを用意することが多い。これは、スリットに目的の天体がちゃんと入っているかを監視する(望遠鏡がその方向をちゃんと向くように調整する)ためのものである。これを「スリット・ビューアー(slit viewer)」と呼ぶ。

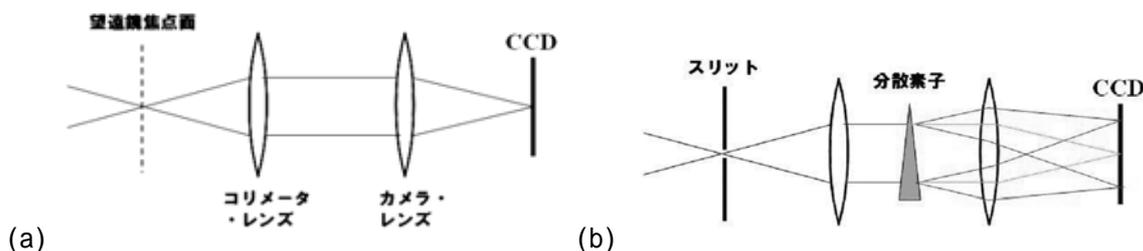


図1：分光器の光学系

(a) コリメーターレンズとカメラレンズだけの光学系

(b) スリットと分散素子を置いた場合(分光器)の光学系

### (3) 分光観測データの特徴

いま、望遠鏡を彗星に向け、図2のようにスリット上に彗星の明るい部分が入るようにした場合、どんな絵が撮れるであろうか。答えは図3である。この例では、スリットを通ってきた光が波長ごとに分けられて、横方向にびっしりと並んでいる。ではこれで、彗星からくる光の強度が波長ごとに得られたかという、そうではない。実は、CCDチップの感度が波長によって異なるため、CCDで得られたカウントを、波長ごとにそのまま比較できないのである。たとえば普通のCCDは、青い波長域では赤い波長域に比べて感度が低いことが多い。そのため、見かけ上、青い光のカウントが低くなってしまいうのである。こうした波長ごとの感度差を補正し、CCDのカウント値から正しい光強度を求める処理が必要となる(波長感度補正)。また、スリット方向について

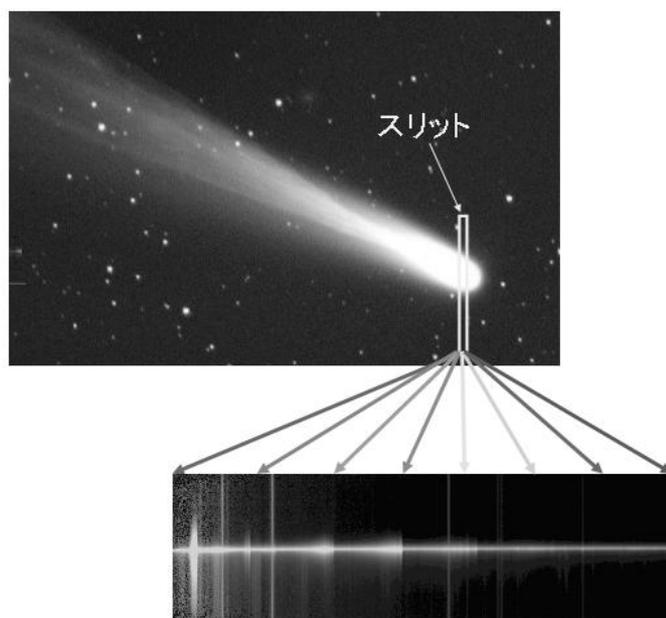


図 2 :スリット分光器の原理。スリットによって切り取られた縦長の細い切れ端が、異なる色ごとに横に並べられたものが CCD 画像として得られることになる。

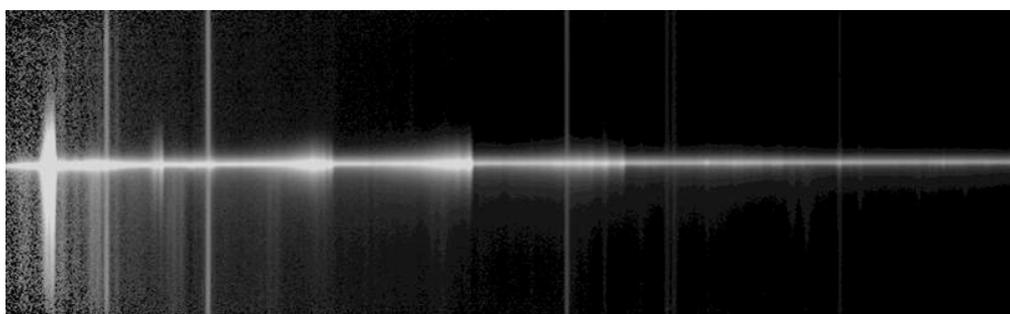


図 3 :スリット分光器で得られる CCD 画像(2次元スペクトル画像)

は、撮像観測と同様、「フラット処理」に相当する処置が必要である。これは、望遠鏡によるケラレなどによって、空間方向にも写り具合が異なる可能性があるためである。これは、白い板などに白熱電球などの光を当てて画像を撮ればよい(但し、蛍光灯では輝線が出るし、昼の空では吸収線が現れるので不適當である)。

#### (4) 解析手順

##### <1> 波長同定

以降、図 3 に示した画像を処理することを考えよう。Y 軸方向はスリットの長手方向であって、空間方向である。一方、X 軸方向が波長の軸となっている。この画像からは、ただ、CCD 上のある座標 (X,Y) におけるカウントがいくつである、ということだけしか分からない。特に、X 軸は波長に対応はしているが、具体的に X の値がいくつなら、波長はいくつ、という対応付け(波長較

正)ができていない。そこで、X軸と波長との対応をとるために、通常は、輝線を多く発するランプ(波長校正光源)の光をスリットから入れて、CCDで画像を得る。大雑把な波長校正でよいならば、図3の画像に写っている市街光を使うこともできる。図3を見れば、Y軸方向に上から下まで写っている縦の線が何本かある。これは、いくつかの特定の波長でのみ光を発していることを示し、しかも、スリットの全体について光を発していることを意味する。つまりこれは、空からやってくる光(背景光 sky background)であり、たとえば町の蛍光灯が発する光を大気中の細かな塵などが反射したものである。また、大気自身が発光している成分もある(酸素原子やナトリウム原子の出す光など)。こうした光は天体からの光ではないので、最終的には観測から取り除く必要がある(後述)。この背景光中の輝線(水銀やナトリウム原子、酸素原子の光など)については、どの波長に生じているか分かっているので、これを利用して波長校正を行ってしまうという方法もあるが、これは波長校正光源を撮り忘れた場合などの非常手段と思っていただきたい。背景光中の輝線は、通常用いられる波長校正光源に比べると輝線の本数が少なく、正確な波長校正には向かないからである(あまり高い波長精度を求めないなら、かまわないだろう)。しかし、輝線の本数が少ないことを除けば、原理的には問題はない。いずれにせよ、背景光中の輝線を利用するか、あるいは波長校正光源を別途撮像することによって、CCD上に写った輝線のX座長をそれぞれ測定する。これらの輝線については、予め実験室などで測定された波長の値(理科年表などにも載っている)があるので、横軸に測定したX座標、縦軸に本来の波長をとってグラフ化することができる。回折格子を使った分光器の場合には、描かれたグラフはほぼ直線になるはずである。広い波長域に渡り、多くの輝線についてデータがとれば、複雑な形の関数(n次多項式やスプライン関数など)を利用してフィットすることが望ましい。必要以上に複雑な関数を用いることは決して良いことではない。

## <2> 感度補正

CCDの感度補正については、予め、各波長でどれくらいの光強度があるか分かっているものを観測し、それを基準として、望遠鏡と装置・CCDを含めた全体の感度を求める必要がある。通常は、「分光測光標準星」と呼ばれる恒星を基準にする。分光測光標準星と呼ばれるいくつかの恒星については、すでに詳細に波長ごとの光強度が測定されており、その中から観測できる適当な恒星を選んで波長感度補正の基準とする。今、彗星のスペクトルと分光標準星のスペクトルを観測によって得たとする。星のスペクトルは、CCD画像の上で、横にそった一本の線のように写る(点状の星を、波長ごとに横に引き伸ばすからである)。この線に沿ったカウントの値を調べて、X座標を先ほど述べたような手順で波長に変換しておく。こうして得られたグラフ(横軸が波長、縦軸はCCDカウント)を、すでに他人によって測定された分光測光標準星のデータで、波長ごとに割り算すれば、波長ごとの感度が求まる。ここで、波長を横軸にとって示した感度のグラフを、「分光感度曲線」と呼ぶ。結局、 $(\text{感度}) = (\text{分光測光標準星の CCD カウント}) / (\text{分光測光標準星の本当の光強度})$ という計算をしたことになる。こうして求めた分光感度曲線は天体に依存しないので、彗星の観測にも適用できる。最終的には彗星の本当の光強度を知りたいのだから、 $(\text{彗星の CCD カウント}) \times (\text{感度})$ という計算をすればよい。但し、観測の際の積分時間が彗星と分光測光標準星で異なっている場合には、その分の補正をしないとイケない。得られるCCDのカウント(但しダークやバイアスを引いた後の値)は、積分時間に比例するので、分光標準星の

カウントを、(彗星の積分時間 / 分光測光標準星の積分時間) 倍する必要がある。

また、彗星は恒星と違って広がっているので、分光器で得られた CCD 画像についても画像の Y 軸方向 (スリットの長手方向) に沿って広がっている (恒星が X 軸方向に沿った線状に写ると対照的である)。できるだけ CCD カウントを多くしてノイズの少ないスペクトルを得るために、画像の Y 軸方向に幾分か足し合わせて、波長対 CCD カウントのグラフを作ることが多い。

### <3> バックグラウンド補正

最後に、背景光の差し引きについて触れておこう。波長較正のところでも少し触れたように、図 3 のスペクトル画像には、彗星からの光のほかに大気中からの光 (背景光) が含まれているので、背景光を引き算する必要が生じる。幸い、スリット分光器では、天体の部分も空の部分も同時に撮ることができる。例えば星をスリットの中心に置いた場合には、スリットの端のほうは、空からの光だけを見ていることになる (図 2 を見よ)。そこで、天体の部分のスペクトル (背景光のスペクトルを含んでいる) から、空の部分のスペクトル (背景光のスペクトル) を引き算するという作業を行うことができるのである。ただし、彗星の場合には、スリットいっぱい彗星が広がっていると空だけのスペクトルが撮れていないことになる。そこで、望遠鏡の方向を少し変えて、空だけのスペクトルを別途、観測する必要が生じる場合もある。

### <5> 大気減光について

さて、以上の話の中では意図的に無視していた効果がある。地球大気による減光の波長依存性である。先に述べた処理は、彗星と分光測光標準星を同じ水平高度で観測している限り問題はない。その場合には、観測を行った高度における減光が、装置の感度の一部として考慮された格好になっているからである。そもそも天体からの光は地球の大気中を通る間に減光されるが、その減光の度合いは波長によって異なっている。しかも、通過してくる大気量 (大気量 air mass) に対する依存性が波長ごとに異なるのである。そこで、彗星のデータを補正するには、彗星を観測した高度における大気減光の様子を再現する必要がある。先に述べたように、大気減光の効果は、観測で得た分光測光標準星のスペクトルを本当のスペクトルで割って求める「装置全体の感度」という中に含まれている。そこで、異なる高度で、何度も分光測光標準星を (ひとつでも、複数でも) 観測し、それぞれに「分光感度」を求める。これら異なる高度における分光感度曲線をつかって、望みの高度 (つまり彗星観測を行った高度) における分光感度曲線を推定することになる。

### <4> 処理手順のまとめ

- 彗星、分光測光標準星を観測する。
- フラット光源、波長較正光源の観測をする。
- ダーク画像 (あるいはバイアス画像) を撮る
- 通常の撮像観測と同様、天体の画像からバイアス及び暗電流成分の引き算をする (ダーク処理)。
- 通常の撮像観測と同様、天体の画像をフラットで割り算する (フラット処理)。
- 分光測光標準星の画像から、スペクトルを抽出する (X 座標対 CCD カウントのグラフを作る)。

また、同じ画像より夜空のスペクトルを抽出して、先に求めたグラフから引く（背景光の引き算）。

- 同様な処理を彗星についても行う。
- 同様な処理を波長較正光源の画像についても行う。
- 波長較正光源のスペクトルから、X 座標と波長との関係式を求め、彗星・分光測光標準星のスペクトルについて適用する。これによって、彗星と分光測光標準星について、波長対 CCD カウントのグラフが得られた。
- 分光測光標準星について、予め知られている波長対光強度のデータをもとにして、装置全体の分光感度曲線を、波長ごとに求める。
  - (分光感度曲線) = (観測されたスペクトル) / (本当のスペクトル)
- 得られた分光感度曲線を彗星に適用し、彗星の本当のスペクトルを得る。こうして、波長対光強度のグラフが得られる。
  - (彗星の本当のスペクトル) = (観測されたスペクトル) / (感度感度曲線)

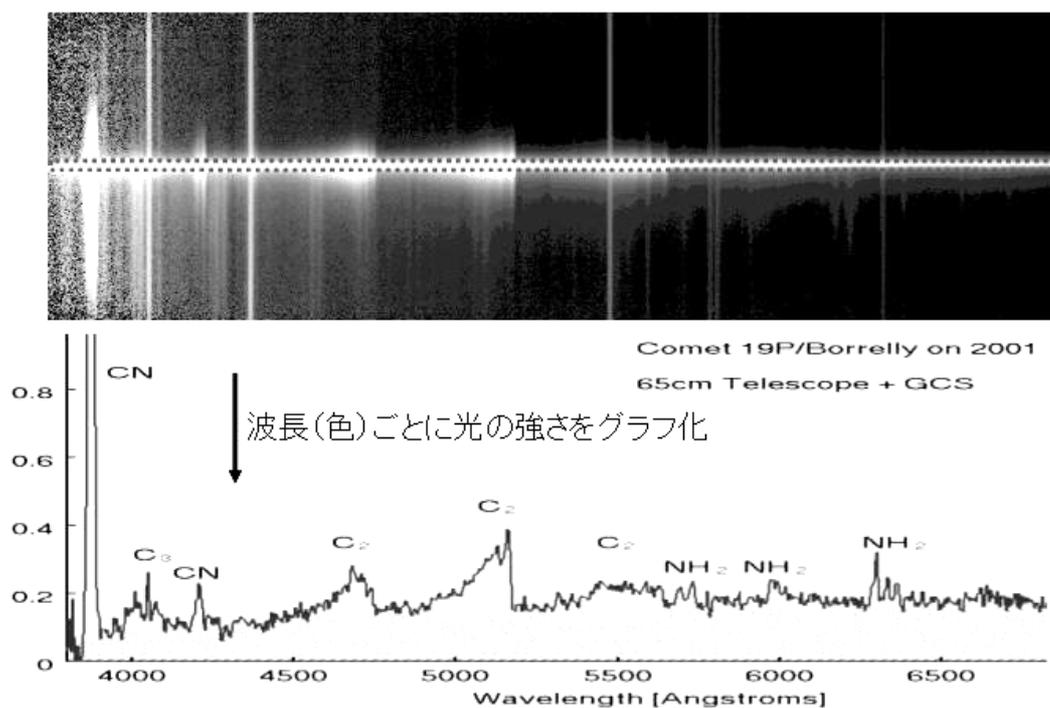


図4：スペクトル画像からの1次元スペクトルの抽出（ただし、背景光を引いた後のスペクトルを下に示している）。

#### (5) 解析ソフトウェア

以上のような作業を行うには、どのようなソフトウェアがあればよいであろうか。日本国内では、多くの研究者は IRAF と呼ばれる天体画像処理ソフトを使っている。IRAF は非常に膨大なパッケージの集合体であり、イメージ処理からスペクトルの処理まで何でもできてしまうという優れたものであるが、通常は UNIX 系の OS である Linux や MacOS X などではしか用意されていない点は、

敷居が高いと感じるだろう。世界中の研究者が利用しているソフトウェアのひとつであるから、安心して用いることができるという利点があるし、IRAF 自体はコマンドラインから操作するタイプのソフトであり、よほど大きなサイズの画像を扱わないかぎり一昔前のパソコンでも十分な能力がある。最近では Linux をインストールする記事や雑誌も見られるし、Linux をプリインストールしたマシンもショップでは売られているようなので、IRAF のインストールに挑戦することも可能であろう。インストールは、特定のディレクトリに必要なファイルをコピーするという形である。MacOS X の場合はインストーラーがあって、簡単にインストールできるという話である（執筆者が実際に試していないのでこれ以上は述べられない）。IRAF の入手は、以下の URL から行うことができる：

<http://iraf.nao.ac.jp/iraf/web/>

インストール手順をはじめ、多くのドキュメントが用意されているが、基本的に英語である。かなりハードルが高いかもしれないが、翻訳ソフトや翻訳 Web ページを駆使して挑戦してほしい。

Windows 上で簡単にデータ処理を行うという点では、美星天文台の川端氏が開発した BeSpec が便利である。マニュアル等も日本語で用意されているので、まずはこれを利用するのも良いであろう。BeSpec は、

<http://www.town.bisei.okayama.jp/bao/soft/bespec/>

からダウンロードできる。

#### (6) 分光器の自作

本稿で述べたような分光器は、あまり複雑な機構を必要としていない。がんばれば自作可能であろう。実際に、アマチュアがこうした分光器を自作する例は何例もあり、そうした作例を知ることが大変参考になる（インターネットで検索してほしい）。要は、コリメータ・レンズとカメラ・レンズ、そして分散素子に何を選ぶかである。透過型の回折格子のうち、「グリズム」と呼ばれる分散素子があり、これは回折格子とプリズムをくっつけたような構造になっている。この場合、可視光の適当な波長が分散素子を通り抜けて直進するような構造になっており、コリメータ・レンズ、カメラ・レンズと並べて一直線上に光学素子を配置できるというメリットがある。また、焦点距離 30mm ~ 40mm くらいの質の良いアイピースを 2 個用いてコリメータ・レンズおよびカメラ・レンズとして用いることで、比較的安価に、簡単な分光器を作っている例もある。もちろん、普通の 35mm 判フィルムカメラ用のレンズを使ってもよい。通常、冷却 CCD カメラには 35mm 判フィルムカメラ用のレンズを取り付けるアダプターが用意されていることが多いので、そういったパーツを流用すれば、分光器の自作も楽になるだろう。アマチュアによる作例を複数、参考文献として挙げておいたので、参考にしてほしい。分光器の設計については、参考文献(1)に分かりやすく解説してある。しかし、こうした自作は、なかなか大変だと感じるのも、もっともであろう。現在、国内の公共天文台の中には分光器が装備されているところもある。そうした施設に相談して分光器を利用させてもらうのも、ひとつの手である。

#### 参考文献

1. 「宇宙を観る II <応用編> - 現代天文学実験」、横尾武夫（著）、恒星社厚生閣
2. IRAFについて：<http://iraf.nao.ac.jp/iraf/web/>

3. MacOS X への IRAF のインストール : [http://www.eonet.ne.jp/~okyudo/iraf\\_install.html](http://www.eonet.ne.jp/~okyudo/iraf_install.html)
4. BeSpecについて : <http://www.town.bisei.okayama.jp/bao/soft/bespec/>
5. 鈴木文二, (1987), 「対物プリズムによる彗星スペクトルの整約方法」, 彗星夏の学校集録 1990 .
6. 秋澤宏樹 他, (1987), 「対物プリズム法によるハレー彗星の分光観測 II」 彗星夏の学校集録 1990 .
7. 鈴木文二 他, (1986), 「ハレー彗星の分光観測」, 彗星夏の学校集録 1986 .
8. 菅原 賢, (1986), 「対物プリズム法によるハレー彗星の分光測光観測」, 彗星夏の学校集録 1986 .
9. 栗原 浩, (1985), 「彗星分光器の製作」, 彗星夏の学校集録 1985 .
10. 小関高明, (1982), 「面光源天体用の低分散スリット分光器の試作」, 彗星夏の学校集録 1982-1983 .
11. <http://www.asahi-net.or.jp/~se2k-sgwr/spec/V2/hard.html>
12. <http://web.ffn.ne.jp/~kztanaka/spectroscopy.html>
13. <http://web.ffn.ne.jp/~kztanaka/plspectroscope.html>
14. ヘール・ポップ彗星ハンドブック「分光編」:  
<http://www.obs.misato.wakayama.jp/HB/man/t2-6.html>