

# すばる/FOCAS データ解析講習会資料

服部堯、柏川伸成

平成 19 年 1 月 7 日

## 1 準備

### 1.1 IRAF の準備

今回の講習会では IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) を用いた FOCAS データの解析を行います。光赤外データ解析ワークステーション (sb 系マシン) にはすでに IRAF がインストールされているのでそれを使用しますが、自分のパソコンに入れて使うことも可能です。インストールについては以下のサイトを参照して下さい<sup>1</sup>。

- <http://iraf.noao.edu>
- <http://iraf.net>

sb 系マシンで初めて IRAF を使う場合、コマンド `mkiraf` を実行して準備をする必要があります。terminal type は `xgterm` を選択して下さい。

```
bash-2.05$ mkiraf
-- creating a new uparm directory
Terminal types: xgterm,xterm,gterm,vt640,vt100,etc.
Enter terminal type: xgterm
A new LOGIN.CL file has been created in the current directory.
You may wish to review and edit this file to change the defaults.
```

作成された `login.cl` に以下の 2 行を追加して下さい。

```
set imtype = "fits"
task $focasred.pkg = "/home/hattriak/FOCASRED/IRAF/focasred.cl"
```

一行目は IRAF でデータを出力する際の、デフォルトのデータ形式を設定しているものです。二行目は FOCAS データ用の解析ツールを使用するための設定です。

準備が出来たら

```
bash-2.05$ xgterm -sb &
```

とやって `xgterm` を立ち上げ<sup>2</sup>、`xgterm` 内で `login.cl` のあるディレクトリに行き、`cl` と打ち込めば IRAF が立ち上がります。

<sup>1</sup>FOCAS の解析ツールを使用するには別に準備が必要です。相談して下さい。

<sup>2</sup>「-sb」はスクロールバーを出すためのオプションです。

## 1.2 データの準備

今回の講習で使用するデータは約 180MB で、解析を進めたとしても数百 MB に収まるはずですが、一応作業用のディレクトリを使用します。自分の名前のディレクトリを/mb25b/に作成して下さい。

テストデータは以下に置いてあります。

```
/home/hattriak/testdata.tar.gz
```

以下の要領で、自分の作業ディレクトリに展開して下さい。

```
bash-2.05$ mkdir /mb25b/hattriak
bash-2.05$ cd /mb25b/hattriak
bash-2.05$ tar zxvf /home/hattriak/testdata.tar.gz ./
./testdata
./testdata/FCSA00079273.fits
./testdata/FCSA00079261.fits
.
.
.
```

テストデータは以下からも取得可能です。

```
http://optik2.mtk.nao.ac.jp/subaru\_red/FOCAS/testdata\_20061204.tar.gz
```

## 1.3 その他

すばる望遠鏡 (に限らず多くの望遠鏡) で取られたデータは、FITS(Flexible Image Transport System) と呼ばれる形式のファイルに保存されます。この FITS ファイルを表示したり、IRAF を用いたインタラクティブな解析をするために ds9 と呼ばれるソフトウェアを使用します。先ほどデータを展開したディレクトリに入り、ds9 を立ち上げておいて下さい。

```
bash-2.05$ cd testdata
bash-2.05$ ds9 &
```

また、解析のために実行したコマンドは全てテキストファイルにログとして残すようにすると便利です。emacs 等を立ち上げておいて、実行したコマンドは全てコピー&ペーストで記録しておけば、後でやり直さなければならなくなった時や、似たような事を別のデータで行う場合に役に立ちます。解析の履歴を記録しておくという意味もあります。

## 2 FOCAS 分光データについて

FOCAS には 2 つの CCD(それぞれ 2k×4k) があり、図 1 のような視野を持っています。ロングスリットには場所が異なる center と offset の 2 種類があり、それぞれの場所で様々な幅のスリットを目的に応じて使っています。

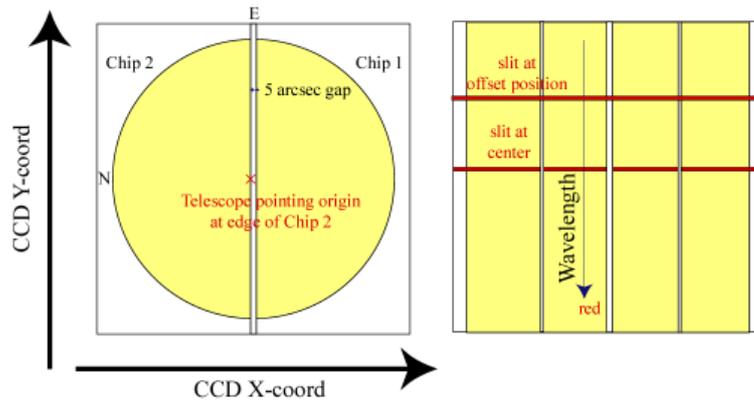


図 1: FOCAS field of view

図 2 の左は FOCAS の撮像モードで取った R-band 画像 (片方の CCD チップのみ) で、中心付近にいる渦巻銀河が今回のテストデータのターゲット、SDSS J000347.01-000350.3 です。目的の天体をスリットの位置まで持ってきてからスリットを入れ、スリットと垂直な方向に光を分散させる事でスペクトルを得ます。

実際の分光観測では、CCD の電荷を読み出す前に足し合わせるという操作 (ピニング) を行います。図 3 は今回の解析に使用する比較光源のスペクトルで、空間 (x) 方向に 3pixel、波長 (y) 方向はピニング無しで読み出しているため、683×4095pixel という非常に縦に長いデータになっています。

## 2.1 FITS ヘッダー

FOCAS 画像の FITS ヘッダーについて説明します。FITS ファイルのヘッダー部分には、どのような状況・設定で観測を行ったかという情報が含まれており、特にアーカイブデータではその内容を理解して解析することが重要になります。IRAF でヘッダーの内容を見るためには

```
> imheader FCSA00079568.fits l+
```

とします。

長いリストが出てきますが、重要なものを以下に挙げておきます<sup>3</sup>。

**AIRMASS** データ取得時の大気量。天頂を向いていれば 1。

**DEC** 赤緯。データ取得時の望遠鏡ステータスから来ているので、FOCAS の視野中心がどの方向に向いているかを表す。精度は数秒角。

**RA** 赤経。DEC に同じ。

**SLT-PA** CCD 画像左向きのスリット方向に対応する position angle。

<sup>3</sup>グリズム、フィルターなどの詳細については、  
<http://www.naoj.org/Observing/Instruments/FOCAS/Detail/UsersGuide/index.html> の、「Grism Selection Guide」や「Filter lists and transmission curves」を参照して下さい。

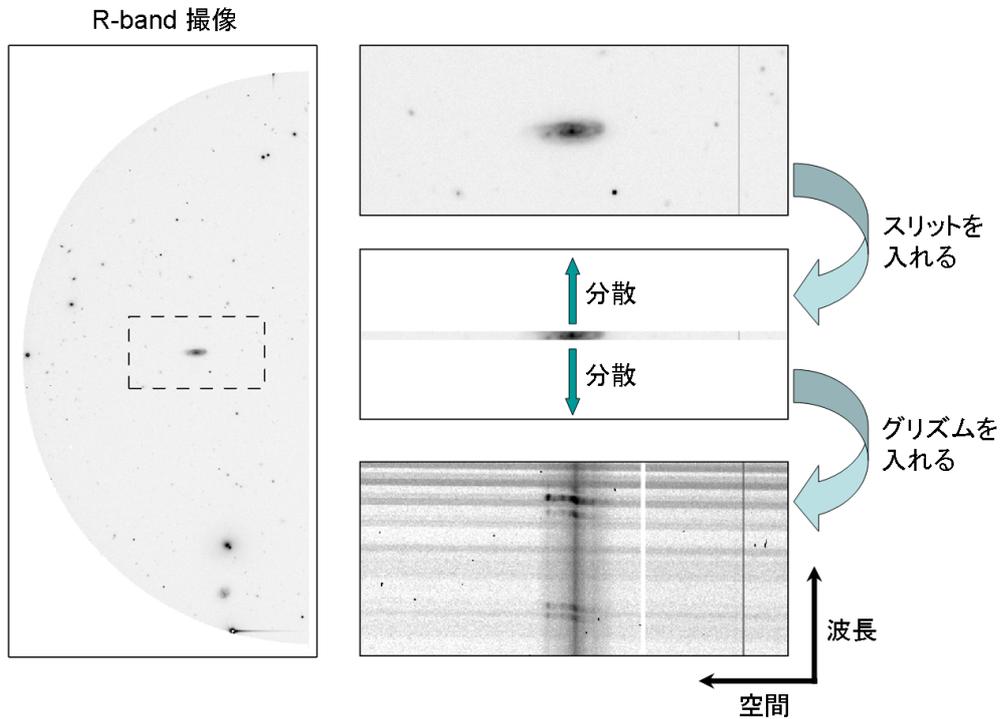


図 2: ロングスリット分光

**BIN-FCT1** x 方向ビンニング

**BIN-FCT2** y 方向ビンニング

**DATA-TYP** データタイプ。BIAS, COMPARISON, DOMEFLAT, OBJECT など。

**DET-ID** CCD チップの番号。

**DISPERSR** 分散素子 (グリズム) の ID。詳細は Appendix の表 2 を参照。

**FILTER01-03** フィルターの ID。詳細は表 4 を参照。

**SLIT** スリットの ID。詳細は表 3 を参照。

**SLT-WID** スリット幅についてはここに書いてある値は信用せずに、スリット ID を参照すること。

**WAVELEN** 波長設定は、使用しているグリズム、フィルター、スリットから判断すること。

## 2.2 アーカイブデータについて

アーカイブデータを解析する際は、天体名や座標などで検索した後、カレンダー検索で目的のデータを取得した前後の FOCAS 観測をチェックして下さい。目的のデータと同じ日に必要な calibration データを全て取っている場合は良いですが、前日取得したフラットを次の日のデータに使ったりす

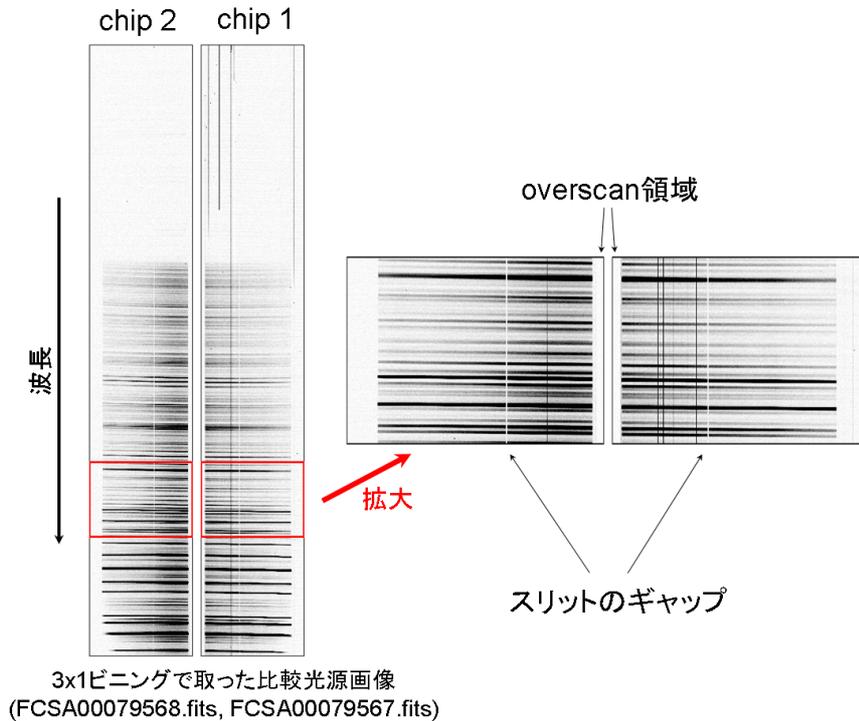


図 3: 比較光源 (ThAr ランプ) スペクトル

るのは良くある事なので、calibration データが揃わない場合は前後の FOCAS 観測の際に取っていないかどうかをチェックする必要があります。

FOCAS 観測での calibration データの取り方は、目的や観測者によって様々ですが、大体以下のようになっています。

**bias** 明け方か夕方にとりまて取ります。観測者によっては取らない場合も多いですが、なければ overscan 領域を使うというので大抵は問題ないです。ただし、chip 1 のデータも使う場合はあった方が better です。

**flat** これも明け方か夕方にとります。上に書いたように、同一日に見つからなければ、前後の FOCAS 観測のデータをチェックして下さい。

**comparison** 短い波長 ( $< 5000\text{\AA}$ ) の観測ではスカイ輝線が波長較正に使えないため、ターゲットと同じ姿勢で取った comparison フレームがある事が望ましいです。もし無ければ、明け方か夕方にとったものを使う事になりますが、姿勢が異なるため数 pixel 程度のずれは覚悟する必要があります。一本でも波長の分かっているスカイ輝線があれば補正可能ですが、そのためのツールは今のところありません。

**標準星** ターゲットと同じ日に、同じ設定 (グリズム、フィルター) で取ったものを選びます。広めのスリット (2" 幅) を使って取る事が多いですが、例えば大気吸収の補正に使うような場合はターゲットと同じスリットを使う事もあります。

ターゲット名 : SDSS J000347.01-000350.3  
 スリット : 0".8 center  
 グリズム : 300B (SCFCGRMB01)  
 フィルター : Y47 (SCFCFLSY47)  
 露出時間 : 600 秒 ×3 (±3" dither)  
 ビニング : 3×1 (空間方向 3pixel, 波長方向 1pixel)

Frame 番号	オブジェクト
FCSA00079163-172	ドームフラット (5 枚 1 セット)
FCSA00079183, 184	標準星 (BD+28d4211)
FCSA00079261-268	SDSS J00347.01 導入画像
FCSA00079269-274	SDSS J00347.01 分光データ
FCSA00079567-570	comparison
FCSA00079961-970	bias (5 枚 1 セット)

表 1: 観測、データ内容の概略

### 3 データ整約

#### 3.1 テストデータについて

今回使用するテストデータは 2006 年 10 月に行われた総研大実習で観測され、PI の許可を得て使わせてもらうものです。表 1 に、観測の内容とデータの中身について簡単にまとめておきます。

##### 天体の導入

図 4 は天体導入画像を並べたものです。観測の時は、まずスリット画像を撮影します (FCSA00079262)。次にスリットを抜いて天体の画像を取りながら、スリットに天体に乗るように望遠鏡を動かして行きます (FCSA00079264→FCSA00079266→FCSA00079268)。

実際に ds9 に画像を表示して、その流れを確認してみてください。

まずスリット画像 (FCSA00079262.fits) を開けて (「File」→「open」ボタン)、適当なサイズにズーム (「Zoom」→「in」または「out」) します。次に「Frame」→「new」で新たなフレームを作成し、そこで FCSA00079264.fits を開きます。Tab キーを押すと、別のフレームが表示されるので、何度も押す事でスリットと天体の位置関係を比較することができます。FCSA00079264 のフレームで FCSA00079266, FCSA00079268 を順次開いて、銀河がスリットに近づいている様子を確認して下さい。フレームを複数作成した状態でズーム等を変更した場合は、メニューの

Frame → Match Frames → Image

とする事で全てのフレームの位置を合わせることができます。

導入画像はアーカイブデータの場合でも見ることはできます。特に広がった天体の場合にはどのようにスリットを当てているかの重要な情報源なので、分光データと一緒に取ってくる事をお勧めします。

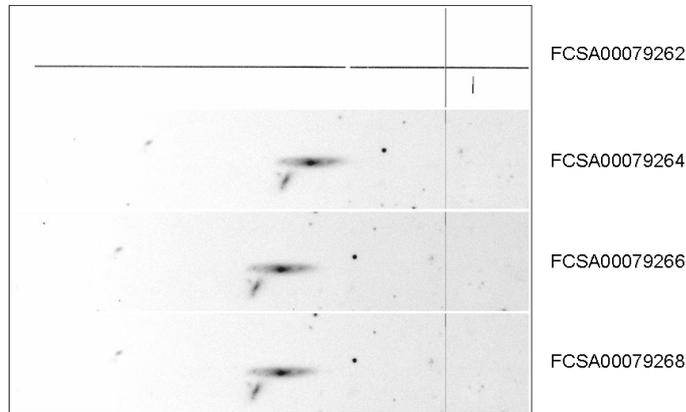


図 4: 天体導入

### 3.2 解析の流れ

スリット分光データの解析方法はデータの内容、目的、人によって変わり、やり方は非常に多岐に渡ります。ここでは、

- 非常に暗い天体を分光した場合、一回の露出では何も見えず、何枚も露出を重ねてようやく信号が見えてくる場合があること
- 一般に long-slit 分光では、空間方向の情報も保っておきたい場合がある事

を考慮して、最後までスペクトルの抽出を行わずに 2 次元のまま解析する方針で行きます。この場合、

- x 軸を空間方向、y 軸を波長方向に線形対応させ、かつその対応関係を求める事
- カウントをエネルギー ( $\text{erg/s/cm}^2/\text{\AA}$ ) に変換する事

の 2 つが一次処理の目的です。

大まかな手順を並べると以下ようになります (Appendix D も参照)。

1. bias/dark 引き
2. フラットフィールド (flat fielding)
3. ゆがみ補正 (distortion correction)
4. 波長較正 (wavelength calibration)
5. スカイ引き (sky subtraction)
6. フラックス補正 (flux calibration)

上にも書いたように、解析の手順は目的などに応じて大きく変わります。例えば明るい星のスペクトルであれば、その星自身の光を使ってスペクトル抽出 (1次元化) することで、手順を簡略化することができます。上記はあくまで一例であると捉えて下さい。

### 3.3 準備 (リスト作成)

まず、解析に使用するリストを作成します。ここで言うリストとはファイル名の一覧が書かれたテキストファイルの事で、複数のファイルをまとめて処理するために使用します。

まず chip 1 と chip 2 にファイルを分けます。

```
bash-2.05$ mkdir chip1
bash-2.05$ mkdir chip2
bash-2.05$ mv *[13579].fits chip1/
bash-2.05$ mv *.fits chip2/
```

3行目では、「.fits」の直前の文字が13579のいずれかであるファイル、つまり frame 番号が奇数であるファイルを全て chip1/ 以下に移動しています。

今回の解析では chip2 しか使用しないので、例えば以下のような感じでリストを作成します。

```
bash-2.05$ ls chip2/FCSA000799*.fits > list.bias
bash-2.05$ ls chip2/FCSA000791[67]*.fits > list.flat
bash-2.05$ ls chip2/FCSA0007918*.fits > list.obj
bash-2.05$ ls chip2/FCSA0007927*.fits >> list.obj
bash-2.05$ ls chip2/FCSA000795*.fits >> list.obj
```

ここでは標準星、比較光源も list.obj に含めています。

IRAF のタスク hselect を使って以下のようにデータの内容を確認しておいてから行う事もできます。

```
c1> hselect chip2/*.fits $I,DATA-TYP,OBJECT yes
FCSA00079164.fits      BIAS    BIAS
FCSA00079166.fits      BIAS    BIAS
FCSA00079168.fits      BIAS    BIAS
.
.
.
c1> hselect chip2/*.fits $I,DATA-TYP,OBJECT yes > list
bash-2.05$ awk '$2=="OBJECT"{print $1}' list > list.obj
```

など。

noao.imred.ccdred.ccdgroups を利用するのも良いでしょう。

```
c1> imred
im> ccdred
cc> ccdgroups chip2/*.fits output="list." group=title
```

### 3.4 bias/dark 引き

前の節で作ったリストを使って、標準バイアスフレームを作成します。

```
cl> imcombine @list.bias bias combine=median
```

ここで出力ファイル名を「bias」にしていますが、デフォルトの出力形式を fits に設定しているため (1.1 節)、「bias.fits」という名前で出力されます。ds9 で表示して問題がないかどうか確かめて下さい。x=530 付近の dead column 以外は、大体 11700 カウントくらいの一様な画像になっているはず<sup>4</sup>です。

次にバイアス以外のフレームのリストを作成し、さらに引いた後のファイル名が書かれたリストを作ります。

```
bash-2.05$ sed -e 's/chip2/bs/' -e 's/fits/bs.fits/' list.flat > list.flat.bs
bash-2.05$ sed -e 's/chip2/bs/' -e 's/fits/bs.fits/' list.obj > list.obj.bs
bash-2.05$ mkdir bs
bash-2.05$ cat list.flat.bs
    bs/FCSA00079164.bs.fits
    bs/FCSA00079166.bs.fits
.
.
.
```

ここでは sed (Stream EDitor) を使って文字列”chip2”を”bs”に、”fits”を”bs.fits”に変換していますが、ファイルをコピーして emacs 等で編集しても OK です。

タスク imarith を用いて bias.fits を引き算し、結果を list.flat.bs, list.obj.bs 内のファイルとして保存します。

```
cl> imarith @list.flat - bias @list.flat.bs
cl> imarith @list.obj - bias @list.obj.bs
```

ディレクトリ bs/ 内にバイアスを引いた画像が出来ている事を確認して下さい。

次に overscan 領域を引きます。ここでは FOCAS データ用のパッケージを使うので、まずパッケージ focasred を読み込みます。

```
cl> focasred
fo> wcsreset @list.flat.bs world
fo> wcsreset @list.obj.bs world
fo> ovsb @list.flat.bs @list.flat.bs ybox=15
fo> ovsb @list.obj.bs @list.obj.bs ybox=15
```

wcsreset で画像の座標を初期化し、ovsb で overscan 領域の差し引きを行います。上の例では、結果を上書きしています。

一般的にはこの後 dark の引き算を行いますが、FOCAS の場合、30 分露出程度までであればダークは無視できます。

<sup>4</sup>ここだけに限らず、正常に処理が進んでいるかどうかを確認するために、慣れるまでは全てのステップで画像を目で見確認するよう心がけて下さい。

### 3.5 フラットフィールド

バイアスと同様の手順で、標準フラットフレームを作成します。

```
fo> imcombine @list.flat.bs flat combine=median
```

ds9 で flat.fits を表示すると同時に、implot で y 方向のカウントの分布を確認します。

```
fo> implot flat
```

implot を実行すると、「irafterm」と書かれた window が立ち上がります。”Line 2048”と書かれているように、最初は x 方向のプロットになっているので、「:c 350」と入力して中心付近 y 方向をプロットします。右から左に向かってカウントが大きくなっているのが分かると思います。確認できたら「q」を押して implot を終了して下さい。

この分布はドームフラットの光源が赤い色をしているため長波長側が明るく写っているのが原因で、このような傾きを補正してからフラットする解析方法もありますが、ここではそのまま使うことにします。このフラットフレームで天体の画像を割り算するわけですが、その前にフラットフレームの平均的な値が 1 になるように、適当な数で割り算します (normalize)。

```
fo> imarith flat / 10000 flat.nr
```

この normalize したフラットを使って、オブジェクト (含標準星) を割り算します。

```
bash-2.05$ sed 's/bs/ff/g' list.obj.bs > list.obj.ff
```

```
bash-2.05$ mkdir ff
```

```
fo> imarith @list.obj.bs / flat.nr @list.obj.ff
```

### 3.6 ゆがみ補正

図 5 に示すように、FOCAS には視野中心から外側に向かって広がるような形の distortion パターンがあります。分光データの場合、これはスペクトルの曲がりとして見えてきます。

以下のように、データを y 方向に圧縮して ds9 で表示してみると、左 (視野の端) の方では曲がっていて、右の方 (視野中心付近) では大体まっすぐになっているのが分かると思います。

```
fo> blkavg ff/FCSA00079270.ff.fits temp.fits 1 30
```

補正には、focasred 内のタスク distcalib を使用します。

```
bash-2.05$ sed 's/bs/dc/g' list.obj.bs > list.obj.dc
```

```
bash-2.05$ mkdir dc
```

```
fo> distcalib @list.obj.ff @list.obj.dc obsmode=spec
```

今回取り扱うのは分光データなので「obsmode=spectroscopy」を指定します。ちなみに撮像データの場合は「obsmode=imaging」です。

### 3.7 波長較正

今回の解析では、SDSS J00347.01 の波長較正には sky 輝線を使い、標準星には比較光源を使います。

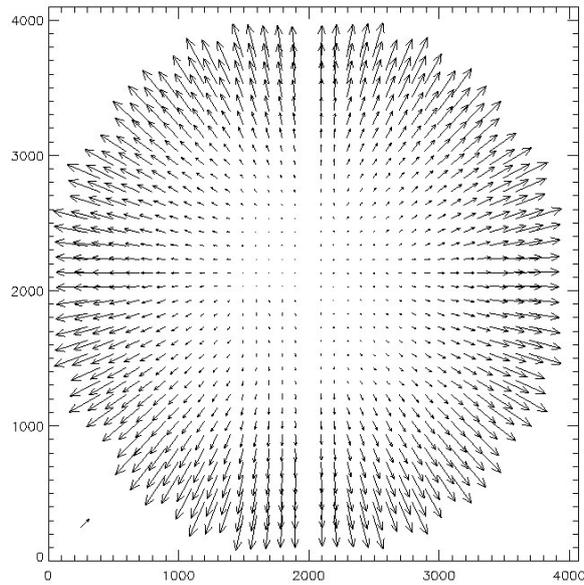


図 5: FOCAS 撮像モードの distortion パターン ([2])。格子状のマスクを撮像し、CCD 上での分布が等間隔格子からどれだけずれているかを示したもの。

### 3.7.1 SDSS J00347.01 の波長較正

これまでは得られた画像をそのまま使用してきましたが、ここで必要な領域だけを切り取ります。使わない事が明らかな部分ではできるだけ取り去って、後々のトラブル (解析上の困難) を避けるのが目的です。dc/FCSA0007927[024].dc.fits を ds9 で確認しながら、例えば x 方向は 201 から 500、y 方向は 41 から 2630 までを切り出す事にすると、

```
fo> imcopy dc/FCSA00079270.dc.fits[201:500,41:2620] obj1
fo> imcopy dc/FCSA00079272.dc.fits[201:500,41:2620] obj2
fo> imcopy dc/FCSA00079274.dc.fits[201:500,41:2620] obj3
```

という風にします (3 行コマンドを並べましたが、もちろんリストを使っても良いです)。

sky 輝線の S/N を上げるためにこの 3 枚を重ね、その画像に対してラインの同定を行うタスク identify を走らせます<sup>5</sup>。

```
fo> imcombine obj?.fits skycomp combine=median
fo> identify skycomp section="middle column"
      coordli="FOCASREDHOME$/IRAF/skyline_midres.dat" fwidth=8 order=3
      function=legendre
```

ここで「fwidth」は波長同定を行う輝線が何ピクセル程度の太さを持っているかを指定します。何も変えなければ fwidth=4 になっていると思いますが、このままだと feature 位置検出の値がおか

<sup>5</sup>これは今回使用するデータの露出時間が、10 分間と比較的短いから行うものです。通常の 30 分露出などでは必要ないですし、観測時間の離れたデータを重ねてしまうと姿勢差 (装置の姿勢によって検出器上での像の位置が移動する現象) の影響が出て、正確な較正ができなくなってしまいます。

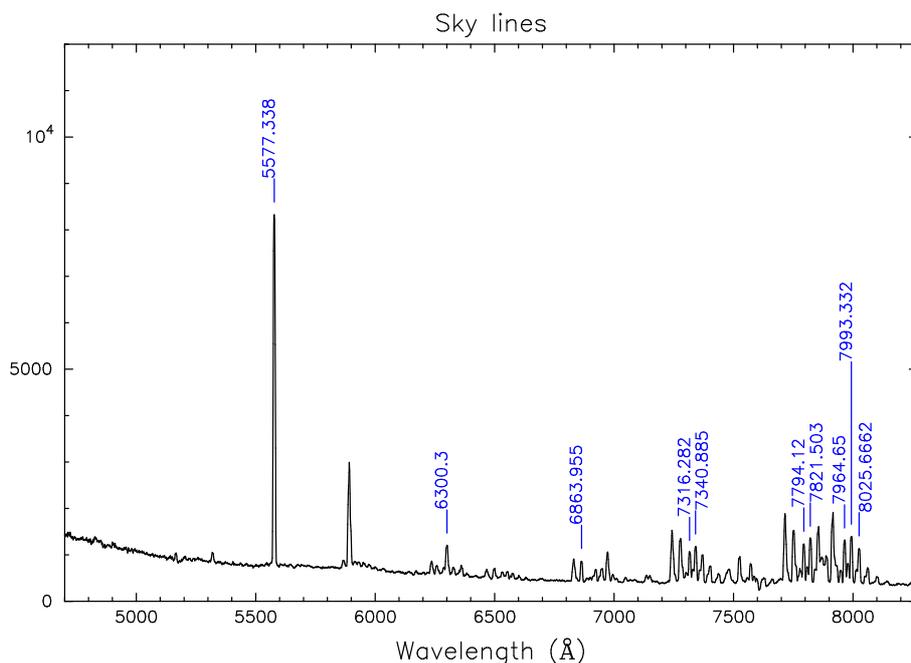


図 6: スカイ輝線の同定

しくなったり、identify や次に使う reidentify で feature の検出ができなくなったりしてしまうので、常に適切な値を使うよう注意して下さい。

identify を走らせると、irafterm ウィンドウに図 6 を左右逆にしたようなグラフが出てきます。マウスを波長が分かっているラインの近くに持って行った状態で「m」(mark) を押し、波長を聞かれるので数値を入力する、というのが基本操作になります。使用するラインのリストを「coordli」として指定しているので、波長は整数部分だけ入力すれば、正確な値は補完してくれます。

以下に主要な操作を挙げるので、図 6 に書かれたラインを全て同定し、fit を行ってください。いくつかのラインを同定した段階で fit すれば、他のラインの同定が楽になります。また、identify のオプションで与えている「order=3」は fitting の次数ですが、fit する範囲が広がると、この次数では足りなくなり、fitting の残差にパターンが出てきてしまいます。このような場合は fit の画面で「:order 4」などと入力して次数を変更します。全体をうまく fit するにはどれくらいの order が必要なのかを確認しておいて下さい。残差 (rms) は  $0.2(\text{\AA})$  程度になるはずで

key	動作
m	マウスカーソル付近で feature を探す
d	マウスカーソルに一番近い feature を消す
f	ピクセル vs 波長での fitting 画面に入る
X	マウスカーソルを中心に x 方向に拡大
Y	マウスカーソルを中心に y 方向に拡大
Z	マウスカーソルを中心に x と y 方向に拡大
>	カーソル位置を y 座標の最大値に設定
<	カーソル位置を y 座標の最小値に設定
r	redraw (上記の拡大等の操作をキャンセル)
c	カーソル近くの feature の座標表示
q	identify 終了
C	カーソル位置の座標を表示
?	help 表示
fitting 画面の操作	
f	再 fit
d	feature の消去
c	カーソル近くの feature の座標表示
q	fitting 画面から抜ける
?	help 表示
:order 4	fitting の order を変更
:func chebyshev	fitting に使用する関数を変更

sky 輝線のより詳しい情報については FOCAS HP や参考文献 [3], [4] を参照して下さい。

先ほどの identify は画像の x 方向中心付近でのものでしたが、他の x 座標でも同様の事を行うために、reidentify を使います。

```
fo> reidentify skycomp skycomp overr+ refit+ trace+ nlost=1 ver+
      section="middle column"
```

「ver+」とする事によって各 x 座標での identify の結果が表示されますが、途中で止まったり、rms が急に大きくなったりしていないか、しっかり確認して下さい。

次に、identify/reidentify で測定した座標を用いて、波長を x と y の関数として 2 次元の fitting を行います。

```
fo> fitcoords skycomp func=legendre
```

「Fit skycomp interactively (yes):」と聞かれるので yes と答えて (リターンキーを押せば OK) 下さい。

key	動作
x,y	plot の x,y に割り当てる座標を変更する x : skycomp の x 座標、 y : skycomp の y 座標 z : 同定された feature の波長、 s : $z=f(x,y)$ でフィットした時の $f(x,y)$ の値 r : fitting からの残差 (s-z) 例 1 x に引き続いて x を押せば、plot の横方向の座標が skycomp の x 座標になる 例 2 y に引き続いて z を押せば、plot の縦方向の座標が波長になる
d	d を押した後に p を押すと、マウスに最も近いデータを消去します (fit に使わなくなる)
r	再描画
f	fit、再 fit
q	fitcoords 終了
:xorder 4	x 方向の fitting order を変更
:yorder 4	y 方向の fitting order を変更
:func chebyshev	fitting に使用する関数を変更

まず「`xyy`」と押して横方向が  $x$  座標、 $y$  方向が  $y$  座標のグラフになるよう設定し、再描画 (`r`) してグラフを更新します。この表示でラインが画像全体に渡って検出されている事を確認して下さい。その後、「`yr`」で縦座標を残差に設定し、 $x$  方向の fit がおかしくならない範囲で `xorder` を下げていきます (設定や `order` を変えたら常に再描画や再フィットが必要です)。`yorder` は `identify` の時の `order` にするのが良いでしょう。「`xy`」とやって横方向を  $y$  座標に設定し、fit が問題ないかどうかを確認して下さい。満足したら「`q`」を押して終了し、保存するかどうかの問いに「`yes`」と答えます。

`fitcoords` で行った fitting の結果を用いて、ターゲット画像を変換します。

```
fo> transform obj1 obj1.wc skycomp
fo> transform obj2 obj2.wc skycomp
fo> transform obj3 obj3.wc skycomp
```

以上で波長較正は終了です。出来た画像を `ds9` で表示し、`sky` 輝線が横にまっすぐ並んでいる事、`sky` 輝線の波長が予定通りの値になっていることなどを確認して下さい。

### 3.7.2 標準星の波長較正

標準星の波長較正は、比較光源画像を使用するという事以外はターゲットと一緒になので、全く同じようにできます。が、標準星の場合は 2 次元で fit する必要性は全くないので、別の方法でやってみます。標準星に限らず、対象が明るくて積分されたスペクトルだけが必要な場合は、同様のやり方でやる事ができます<sup>6</sup>。

この場合、ゆがみ補正は必要ないので、フラット済みの標準星フレーム (`ff/FCSA00079184.ff.fits`) を使用します。

```
fo> imcopy ff/FCSA00079184.ff [501:650,6:2650] std
fo> imcopy ff/FCSA00079568.ff [501:650,6:2650] arccomp
```

標準星のスペクトルを抽出するためにタスク `apall` を使いますが、非常に多くのパラメータを持っているので、`epar` (`edit parameter`) を使ってその確認から行います。

```
fo> epar apall
```

`interac` から `review` までは `yes`、ただし `resize` は `no`、`backgro` が `fit` になっている事を確認して下さい。「`:wq`」で `edit parameter` を終了します。

```
fo> apall std format=oned nfind=1
Find apertures for std? (yes):
Edit apertures for std? (yes):
```

上と同じ表示であれば、リターンキーを押し続けるだけで良いです。() の中身が違ったら、正しい値を入力して下さい。

`irafterm` ウィンドウに図 7(a) のようなグラフが表示されたらスペクトル抽出の始まりです。手動で調整するのはスペクトルを切り出す `aperture` の大きさと、`background` の引き算に使用する場所です。図 7(a) はスリット方向の断面図ですが、既に標準星が自動的に検出されている状態になっ

<sup>6</sup>ただし、通常は `background` の引き算だけは自分で行い (次節参照)、結果を目で確認するようにした方が良いでしょう。

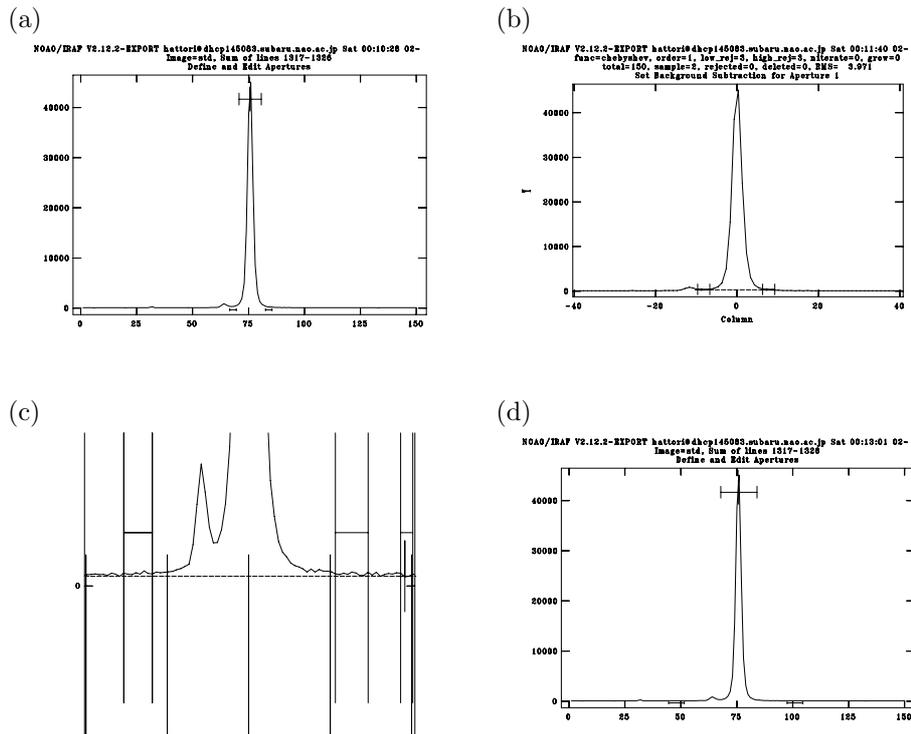


図 7: apall 画面

ています。標準星のすぐ左、 $x=65$  付近にいるのは隣の星です。今回はこの星からの影響が無視できる範囲でできるだけ aperture を広めに取りするという操作をしてみましょう。identify の時と同様なズーム操作を適宜行いながら aperture の左端にカーソルを持って行って「l」(エル)を、右端に持って行って「u」を押す事で aperture の大きさを調整できます。

aperture の大きさが決まったら、「b」を押して background の調整に入ります (図 7(b))。標準星の両サイドに background の設定領域が表示してありますが、このままでは標準星と隣の星にかぶってしまっているので、まず「t」を押して領域を初期化します。次に「Y」を何度か押して  $y=0$  付近を拡大し (図 7(c))、「s」を 2 回押して標準星の左サイドに、もう一度 2 回押して右サイドに background 領域を設定します。設定が終わったら「f」を押して fit をやりなおし、「q」で background 調整モードを終了します。

図 7(d) の状態に戻ったら「q」を押して設定を終了し、聞かれる質問には全て「yes」で答えてスペクトルの抽出を行います。途中で天体を trace した結果が表示されるので、order を変更して (「:order 4」など) fit が正常に行われるように調整して下さい。結果は std.0001.fits という名前で出力されます。

次に標準星用の comparison を抽出します。

```
fo> apall arccomp format=oned reference=std find- recen- resize- edit-
      trace- backgro-
```

標準星と全く同じ抽出をしたいので、「reference=std」とし、centering 等の調整は一切しないオプションで行います。出力は arccomp.0001.fits です。

```
fo> identify arccomp.0001 coordli="FOCASREDHOME$/IRAF/thar.300b_y47.dat"
```

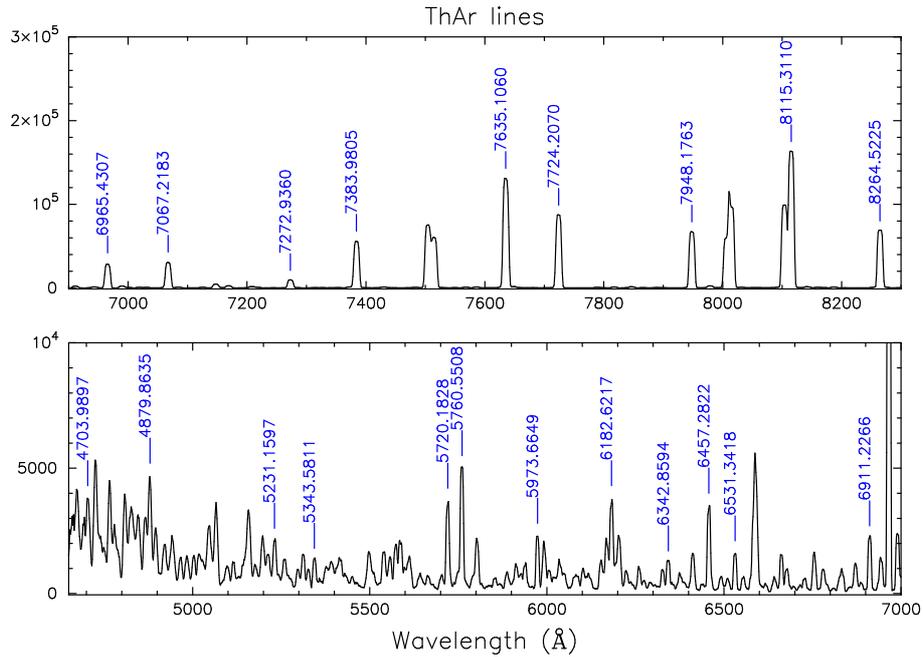


図 8: ThAr ランプ輝線の同定

`fwidth=8 order=3 function=legendre`

`identify` は前節と同様です。図 8 を参考に同定と `fitting` を行って下さい (6900Å 付近を境に急激にラインの明るさが変わっている事に注意)。ThAr スペクトルの詳細については FOCAS HP や HDS の ThAr アトラスを参照して下さい。

波長較正には、1次元スペクトル用のパッケージ `noao.onedspec` の `dispcor` を使います。まず `refspec` を用いて比較光源スペクトルを指定し (ヘッダーに `REFSPEC1='arcomp.0001'` が追加される)、`dispcor` で波長較正を行います。この時、`std.0001[* ,1,1]` に抽出スペクトル、`std.0001[* ,1,2]` に抽出した際の sky スペクトルが含まれているので、抽出スペクトルだけを波長較正します。

```
fo> refspec std.0001 reference=arcomp.0001 select=match sort="" group=""
fo> dispcor std.0001[* ,1,1] std.wc
```

最後に `splot` を使って波長較正されたスペクトルを確認して下さい。

```
fo> splot std.wc
```

`splot` の使い方については後ほど説明します。

### 3.8 スカイ引き

タスク `background` を用いて、波長較正した SDSS J000347 のスペクトルからスカイを引き算します。

```
fo> background obj1.wc obj1.bg axis=1 order=2 low_rej=3 high_rej=3 nit=3
```

まず、「Fit line」を聞かれますが、ここでは fit 領域を決定するのに用いる y 座標を入れます。y 方向のサイズは 2600 ピクセル程度になっているので、中心付近に相当する「1000 1500」や「500 2000」を指定して下さい。

その後に表示されるグラフは、指定した y の範囲で平均を取ったスリット方向断面図になっているので、apall の時の background と同じ要領で「s」を使って sky の領域を決定して下さい。領域設定が終わったら「f」で fit し、「q」で抜け、再び line 番号を聞かれるのをリターンキーでキャンセルして終了です。

この作業がどれだけうまく行っているかはデータの質を大きく左右するので、必ず ds9 で画像を見て問題がないかどうかを確認して下さい。ある程度うまくいった場合でも、fitting の次数や fit 領域を変えてみたり、以下の要領で一部の y 座標だけやりなおしたりして、試行錯誤をしてみるのが良いと思います。

```
fo> background obj1.bg[* ,1000:1100] obj1.bg[* ,1000:1100] axis=1 order=2 ....
```

obj2, obj3 についても同様の操作を行って下さい。

### 3.9 フラックス補正

まず波長較正された標準星データを使って、各波長でのカウントとフラックスの関係を求めます。タスク standard のパラメーターで、extinct と caldir を以下のような設定にして下さい。input と output も設定したら「:go」でタスクを走らせます。

```
fo> epar standard
PACKAGE = onedspec
TASK = standard

input = std.wc Input image file root name
output = std.dat Output flux file (used by SENSFUNC)
(samesta= yes) Same star in all apertures?
(beam_sw= no) Beam switch spectra?
(apertur= ) Aperture selection list
(bandwid= INDEF) Bandpass widths
(bandsep= INDEF) Bandpass separation
(fnuzero= 3.6800000000000E-20) Absolute flux zero point
(extinct= FOCASREDHOME$/IRAF/mkoextinct.dat) Extinction file
(caldir = onedstds$spec50cal/) Directory containing calibration data
(observa= )_..observatory) Observatory for data
(interac= yes) Graphic interaction to define new bandpasses
(graphic= stdgraph) Graphics output device
(cursor = ) Graphics cursor input
star_nam= Star name in calibration list
airmass = Airmass
exptime = Exposure time (seconds)
```

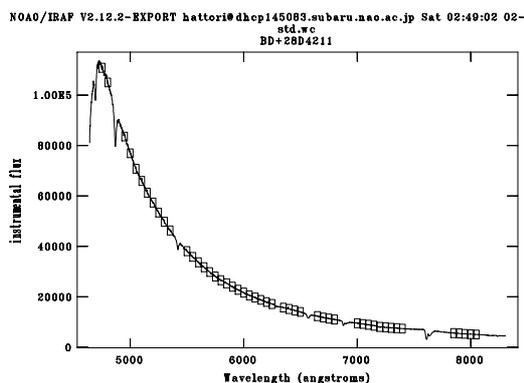


図 9: standard の画面

まず星の名前を聞かれますが、何も入れずにリターンキーを押すと、「caldir」で指定したディレクトリに含まれている星の一覧が出てきます。ここでは「bd284211」を選択します（「bd284211」と入力してリターン）。「Edit bandpasses?」と聞かれたら「yes」と答えます。

その後、図 9 のようなグラフが表示されますが、実線が観測データ（標準星のカウント）、四角がライブラリで標準星のフラックスが測定されている波長とバンド幅を示しています。この際、星の吸収線（ $H\alpha$  6563Å,  $H\beta$  4861Å 等）や大気の吸収帯（6900Å, 7600Å 付近）は「d」で取り除いておきます（図 9 参照）。

standard では、各バンド内で積分したカウント値を計算し、波長や対応するフラックスなどと共に結果をファイル std.dat に出力します。その測定結果に対し、タスク sensfunc を用いて fitting を行い、カウントをフラックスに変換する関数を求めます。

```
fo> sensfunc std.dat sens extinct="FOCASREDHOME$/IRAF/mkoextinct.dat"
```

「Fit paerture 1 interactively?」と聞かれたら「yes」と答えて下さい。

図 10 のようなプロットが出てきます。原理的には、この結果はドームフラットランプスペクトルから実際のフラックスへの変換に対応しているので、ここで滑らかな曲線が出てこなければ、それまでの解析に問題があるという事を意味します。図 10 では、測定点をいくつか除いて（×印）fit していますが、このうち 7200-7300Å 付近の盛り上がりは、ライブラリ側の問題だと思われます。結果は sens.0001.fits に出力されます。

sensfunc によって作成された sens.0001.fits を使って、オブジェクトフレームのカウントをフラックスに変換します。また、マウナケア標準の大気減光曲線を用いて大気吸収の補正を行います。

```
fo> fluxcalib obj1.bg obj1.fc sens fnu- exposur="EXPTIME"  
fo> extinct obj1.fc obj1.ex extinct="FOCASREDHOME$/IRAF/mkoextinct.dat"
```

### 3.10 その他

#### 重ね合わせ

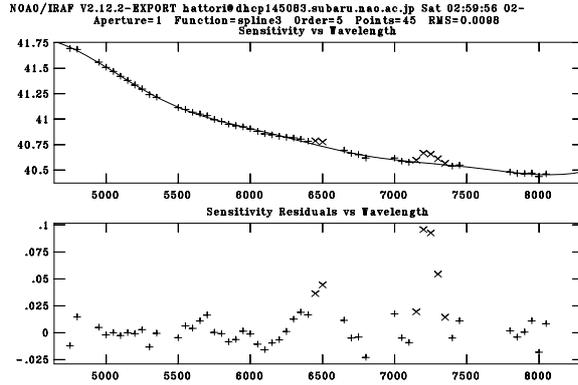


図 10: sensfunc の画面

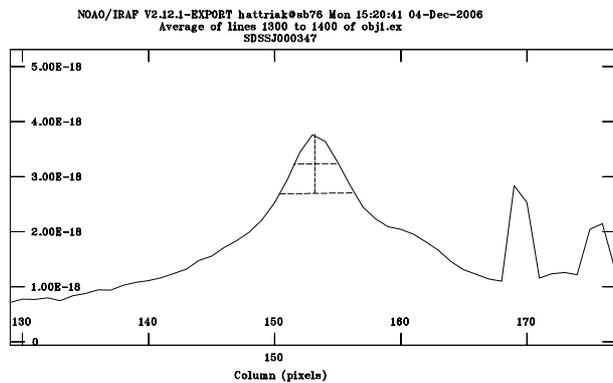


図 11: 銀河中心位置の測定。下側の破線の左端で「p」を押し、右端で再び「p」を押した結果。

3枚あるオブジェクトフレームを重ね合わせます。

位置合わせのやり方は色々ありますが、ここでは比較的構造が少なくシーイング変化などの影響を受けにくい、銀河本体の連続光ピークを使う事にします。

```
fo> implot obj1.ex
:1 1300 1400
```

これで  $6500\text{\AA}$  付近の連続光での断面図が表示されます。「X」を使って銀河中心付近を拡大し、「p」を2回押して中心のx座標を測定します(図11)。

obj2.ex と obj3.ex が obj1.ex に対して  $\pm 9.7\text{pixel}$  程度ずれているという結果になるはずですが、FOCASの1pixelは $0''.1038$ なので、このデータのビニングでは $0''.3114/\text{pixel}$ になります。3" ditherの場合 $3/0.3114=9.63\text{pixel}$ が期待される移動量なので、大体その通りに動いていると言えます。imshiftで画像を動かし、imcombineで重ね合わせます。

```
fo> imshift obj2.ex obj2.sh -9.7 0
fo> imshift obj3.ex obj3.sh 9.7 0
fo> imcombine obj1.ex,obj2.sh,obj3.sh obj.comb combine=median
```

上では cosmic ray の除去を意識して median を使っています。

### 星間減光

系外の天体であれば、HI 21cm 線や遠赤外線放射などから求められたダスト量を用いて、銀河系内でどの程度の星間減光を受けているかが分かります。NED(NASA/IPAC Extragalactic Database, <http://nedwww.ipac.caltech.edu>) で SDSS J000347.01-000350.3 を検索すると、この銀河の方向の星間減光が  $A_v=0.106$  となっているので、タスク `deredden` を用いて補正します。

```
fo> deredden obj.comb obj.comb.dred 0.106 type="A(V)"
```

このタスクでは参考文献 [1] による関数形を使用しています。

### helio centric velocity

低分散分光では問題にならない事が多いですが、観測されたデータには地球の自転や公転による赤方 (青方) 偏移が含まれています。その大きさを調べるにはタスクパッケージ `astutil` に含まれる `rvcorrect` を使います。日付や UT(Universal Time)、座標は FITS ヘッダーを見れば分かります。

```
fo> astutil
as> rvcorrect observa=subaru vobs=0.
# RVCORRECT: Observatory parameters for Subaru Telescope, NAOJ
#   latitude = 19:49.5302375
#   longitude = 155:28.5611198
#   altitude = 4163
Year of observation: 2006
Month of observation (1-12) (1:12): 10
Day of observation (1:31): 14
UT of observation (hours) (0.:24.): 7.6
Right ascension of observation (hours) (0.:24.): 0
Declination of observation (degrees) (-90.:90.): 0
##   HJD           VOBS   VHELIO    VLSR   VDIURNAL   VLUNAR  VANNUAL   VSOLAR
2454022.82205     0.00  -10.92  -10.61     0.141    0.012  -11.076    0.310
```

観測された視線速度が 0km/s の時 (`vobs=0.`)、太陽から見た視線速度 (`VHELIO`) が -10.92 になっているので、観測されたスペクトルを少し (10.92km/s) 青側にずらさなければいけない事になります。タスク `dopcor` を使って補正します。

```
as> dopcor obj.comb.dred obj.fin 10.92 isveloc+ add- disp+ flux-
```

## 4 その後の解析

### 4.1 redshift 測定

この銀河を観測した実習の目的は、色々な redshift のスペクトルを集める事と銀河の回転曲線を見ることだったので、とりあえず  $H\alpha$  輝線の redshift を測定してみましょう。ここではタスク `splot` を使います。



key	動作
a	異なる 2 箇所では「a」を押すと、カーソル位置を左右の端としたプロットが表示される。上下のスケールは表示範囲のデータに応じて自動的に調整される。元に戻すには、「c」を押すかカーソルを動かさずに「a」を 2 回押す。
b	現在のプロットの y 方向の最小値を 0 にする
c	表示範囲を元に戻す
d	deblending(複数のラインに対して同時に fit) モードに入る
e	「e」を 2 回押すと、カーソルに囲まれた領域の等価幅などを調べる
f	y 軸の値を変換する。対数、2 乗根、定数倍など
g	新しいファイルを読み込む
k	2 回押す事によってプロファイルフィッティングを行う。2 回目の key が l,v の場合はそれぞれ Lorentzian、Voigt profile のフィッティングになる。それ以外は Gaussian。
l	縦軸が単位周波数あたりエネルギーになっているプロットを単位波長あたりのエネルギーに変換
m	2 回押す事で、その範囲の平均や分散などを測定する
n	l の逆
o	次のプロットを現在のプロットに重ねて書く
q	splot 終了
r	redraw
s	現在表示しているスペクトルにスムージングをかける
u	横軸のスケールを変換する。例えば「u」を押した後、H $\alpha$ にカーソルを合わせて 6562.8 と入力すれば rest frame の波長で表示される。
t	現在表示されているスペクトルへの連続光フィットモードに入る。フィットした結果を引いたり、フィットした結果で規格化する等のオプションがある。
z	カーソル位置を中心に横軸方向を拡大。縦軸のスケールは表示範囲のデータに応じて自動的に調整される。元に戻すには「c」を押すかカーソルを動かさずに「a」を 2 回。
)	次のスペクトルに進む。今回のデータだと、x=153 から x=154 に移動という風に。
(	「)」の逆
#	何番目のスペクトルを表示するか、数字を入力して選択
-	「d」でフィットした結果を引き算する
,	短波長方向に移動
.	長波長方向に移動
?	ヘルプ表示
:nsum 3	2 次元のスペクトル画像のみ。空間方向に何 pixel 足し合わせるかを設定。この例だと 3pixel 足し合わせる。

## 4.2 1次元化、テキスト化

例えば x=153 を中心として 5pixel(=1".5) のスペクトルを抽出 (1次元化) する場合、

```
as> blkavg obj.fin[151:155,*] obj.nucleus 5 1 option=sum
as> imcopy obj.nucleus[1,*] obj.nucleus
```

とします。なんらかの rejection 等をかけたい場合には

```
obj.fin[151,*]  
obj.fin[152,*]  
obj.fin[153,*]  
obj.fin[154,*]  
obj.fin[155,*]
```

というファイルを用意しておいて、scombine を使うのも良いでしょう。

例えば既存のツールを使ったり、モデルスペクトル等と比較するためにデータをテキストファイルに落とすには、タスク wspectext を使います。

```
as> wspectext obj.nucleus.fits obj.nucleus.dat header-
```

これによって、第一列が波長、第二列がフラックスになっているテキストデータが obj.nucleus.dat に出力されます。

## 参考文献

- [1] Cardelli et al. (1989), ApJ, **345**, 245
- [2] Kashikawa et al. (2002), PASJ, **54**, 819
- [3] Osterbrock et al. (1996), PASP, **108**,277
- [4] Osterbrock et al. (1997), PASP, **109**,614

## A グリズム、フィルター、スリット ID

ID	グリズム名
SCFCGREL01	75/mm
SCFCGRLD01	150/mm
SCFCGRMB01	300B
SCFCGRMR01	300R
SCFCGRHDEC	Echelle
SCFCGRHD45	VPH450
SCFCGRHD52	VPH520
SCFCGRHD65	VPH650
SCFCGRHD68	VPH680
SCFCGRHD80	VPH800
SCFCGRHD95	VPH950

表 2: 分散素子 (グリズム) の ID。各グリズムの詳細については FOCAS HP 参照。

ID	スリット
SCFCSLLC02	0".2 center
SCFCSLLC04	0".4 center
SCFCSLLC06	0".6 center
SCFCSLLC08	0".8 center
SCFCSLLC10	1".0 center
SCFCSLLC20	2".0 center
SCFCSLLO02	0".2 offset
SCFCSLLO04	0".4 offset
SCFCSLLO06	0".6 offset
SCFCSLLO08	0".8 offset
SCFCSLLO10	1".0 offset
SCFCSLLO20	2".0 offset
SCFCMS0???	MOS マスク

表 3: スリットの ID

a

ID	フィルター名
SCFCFLBU01	U-band
SCFCFLBB01	B-band
SCFCFLBV01	V-band
SCFCFLBR01	R-band
SCFCFLBI01	I-band
SCFCFLN373	373nm narrow-band
SCFCFLN386	386nm narrow-band
SCFCFLN487	487nm narrow-band
SCFCFLN502	502nm narrow-band
SCFCFLN512	512nm narrow-band
SCFCFLN642	642nm narrow-band
SCFCFLN670	670nm narrow-band
SCFCFLBSZ1	SDSS z'
SCFCFLSO58	O58
SCFCFLSY47	Y47
SCFCFL600	L600
SCFCFL550	L550
SCFCFLC50	C50

表 4: フィルターの ID。各フィルターの詳細については FOCAS HP 参照。

a

## B 練習問題

1. 今回解析した SDSS J000347.01-000350.3 の観測の、もう一つの目的は回転曲線を得る事です。銀河の各場所で  $H\alpha$  の視線速度を測定し、横軸を銀河中心を 0 とした  $\text{kp}$  スケール  $c$ 、縦軸を視線速度 ( $\text{km/s}$ ) にしたグラフを作成して下さい。4.1 節で行った測定と同様の事を各スリットポジションで行う事も可能ですが、結構大変です。splot の使い方を help で詳しく調べれば、ほぼ自動的にいるんな場所での測定を行う事も可能なので、チャレンジしてみてください。
2. SDSS J000347.01-000350.3 のスペクトルから連続光を引き算して輝線だけのスペクトルを作成し (タスクは continuum というのが使えると思います)、 $H\alpha$  を拡大表示した画像を作ってください。この際、速度の変化が見えやすいように波長方向にだけ拡大した表示にし、縦軸のラベルは  $\text{km/s}$ 、横軸のラベルは銀河中心を 0 とした  $\text{kpc}$  スケールにしてください。表示ソフトウェアは何を使用しても結構です。
3. SDSS J000347.01-000350.3 のスペクトルには  $H\beta$ , [OIII], [NII],  $H\alpha$ , [SII] などの輝線が見えています。これらのライン強度比を測定し、例えば銀河中心とディスク上の HII 領域ではどの程度異なっているか、その違いを金属量の違いとして解釈すると金属量はどの程度違うか、などを調べてみてください。
4. 標準星 BD+28d4211 のスペクトルをフラックス較正し、実際にライブラリ通りのスペクトルになっている事を確認してみてください。ライブラリのファイルは  
`/iraf/iraf/noao/lib/onedstds/spec50cal/bd284211.dat`  
にあります。これを用いて横軸を波長、縦軸をフラックス ( $\text{erg/s cm}^2 \text{ \AA}$ ) にし、観測結果とライブラリの両方をプロットしたグラフを作ってください。ライブラリのデータは等級で書かれているので、フラックスに変換するにはタスク standard 等が内部でどういう計算をしているのか具体的に調べる必要があります。  
web 上で波長 vs. フラックスのデータを見つけてきて比較するというのも OK です。

## 練習問題方針

1. `splot` には `cursor` というオプションがあります。ここでファイル名を指定すると、ファイルに書かれた内容のキー操作を行うので、毎回マウスを使って測定する必要がなくなります。また、「d」キーで始まる `deblending` モードというのがあり、赤方偏移測定で用いた「k」よりは半自動的処理に適していると思います。
2. まずはタスク `continuum` を使って連続光を引き算します。使い方はヘルプを参照して下さい。図を作るのには例えば `wip` などのツールを使うと良いでしょう。縦軸横軸のラベルは、自分で計算して与えてやる必要があるだろうと思います。
3. 銀河中心付近と、 $x=124$  付近の HII 領域のスペクトルを比べてみてください。[OIII]/ $H\beta$ 、[NII]/ $H\alpha$  などのライン強度比が大きく違うのが分かると思います。金属量への変換は、  
Liang et al. (2006)  
Nagao et al. (2006)  
Pettini and Pagel (2004)  
などが参考になるとと思います。
4. タスク `standard` のヘルプに、等級からフラックス (ただし単位周波数あたり) への変換式が書いてあります。

## C MOSのスペクトル切り出し –fcsmosredの使い方– $\beta$ 版

IDLの `fcsmosred.pro` を用いて FOCAS/MOS で取得された複スペクトルデータを1つ1つのスペクトルに切り出す方法について解説します。この操作では切り出した後にフラットフィールドイング、distortion 補正、簡単な cosmic ray 除去を行います。切り出した後の操作（波長較正から）は基本的に long slit の解析の場合と同じです。

なお、本ソフト及び解説にはバグがある可能性があるため、もし不都合が生じた場合には適宜ご報告ください。

### C.1 FOCASRED(IDL版)のインストール

[http://optik2.mtk.nao.ac.jp/subaru\\_red/FOCAS/FOCASRED\\_IDL.tar.gz](http://optik2.mtk.nao.ac.jp/subaru_red/FOCAS/FOCASRED_IDL.tar.gz)

を適当な dir(以下/home/user/を仮定します) にコピーして解凍、展開して下さい。

### C.2 IDLの設定

本プロセスには IDL を用います。IDL はすばるの sb マシンにはインストールされています。

- ・ FOCASRED/setup\_focasred\_local に例があるように、各 dir を setenv しておくとその後の作業が楽になります。  
FOCASRED\_DATA\_IN, FOCASRED\_DATA\_OUT は /home/user/FOCASRED/DATA/ にしておきます。
- ・ /home/user/FOCASRED/setup\_focasred を起動します。IDL の window が現れます。

注: 以下のやり方でも IDL を起動できます。

```
> idlde
```

で IDL の window が立ち上がります。

sb 系のマシンはなぜか毎回 IDL の path が切れるので毎回設定しなおす必要があります。

File>Preferences>Paths>で

```
/home/user/FOCASRED
```

```
/usr/local/rsi/idl_6.0
```

に path を切ります (チェックボックスにチェックする)。

### C.3 fcsmosred 使用方法

#### 1. wmdp\_mos による sbr ファイル作成

マスクデザインの際に既に\*\_ccd.sbr を作成している場合はスキップして下さい。

IDL を起動し、window の一番下のコマンドラインで wmdp3 を起動します。

```
IDL> wmdp3
```

wmdp3 の使い方については以下のページ

に記述されていますが、\*\_ccd.sbr ファイルの作り方だけを以下に簡単に述べます。

- ・ まず、Input Distortion Data File という window が現れますので、DistChipDat ファイルの最新のもの (2006 年 12 月 7 日現在では DistChipDat.MIT.090904.dat) を選びます。
- ・ 次に Input CCD Bad Pixel Table という window が現れるので、ここでは (一番下にある) badpixelst.dat を選びます。次に上部メニューの File で、マスクデザインに使用した bigimage と mdp ファイルを読み出します。
- ・ 上部メニュー Option の Grism select で観測の時に用いた grism+filter セットを選びます。左横メニューの Redraw ボタンを押すと、擬似スペクトルが現れます。
- ・ File のところで\*.sbr を CCD 座標で保存します。この時、distortion 補正済みのイメージを用いている場合は、CCD Dist. Corrected Img を選択、distortion 補正していないイメージを用いている場合は CCD Dist. UN-Corrected Img を選択します。Save の段階で FOV 中心の座標を尋ねられますので、デザイン時の FOV 中心を入力します。これで wmdp3 は終了しましょう。

注: 実際の分光取得 MOS データは実際のデザインとマスク alignment の際に生じるオフセットによりずれています。これが気になる場合は、CCD 座標で保存する場合に、適宜 FOV 中心座標の x にオフセットをはかせます。\*\_ccd.sbr ファイルをそのまま awk など edit してもよいですし、wmdp.mos 上で FOV の中心位置をずらして\*\_ccd.sbr ファイルを save し直すことによっても作成できます。

## 2. 分光 bigimage 作成

バイアス補正をした flat、comparison、object の MOS 画像の bigimage (2 枚の CCD 画像をつなぎ合わせて 1 枚の画像にする) を作成します。

この際、distortion 補正のオプション (wmdp.mos 上の distortion 補正は imaging データについてのものであって分光データのものではないため) は選ばないように気をつけてください。

```
IDL> focasmenu
```

で、"combine chip1&2" を選択します。処理したい 2 枚のファイルを選びます。

## 3. fcsmosred による分光イメージ切り出し

IDL を起動し、

```
IDL> fcsmosred '切り出したデータを保存するディレクトリ名'  
'用いるファイルを記述したファイル名 (フルパスで)'  
' CCD 座標の sbr ファイル名 (フルパスで)'
```

という書式で、下の起動例のように fcsmosred を動作させると、あとは自動的にすべてのスペクトルを切り出してくれます。

「用いるファイルを記述したファイル」とは

```
flat1.fits comp1.fits obj1.fits /home/user/FOCASRED/DATA/DistChipDat.MIT.090904.dat 1
flat2.fits comp2.fits obj2.fits /home/user/FOCASRED/DATA/DistChipDat.MIT.090904.dat 1
flat3.fits comp3.fits obj3.fits /home/user/FOCASRED/DATA/DistChipDat.MIT.090904.dat 1
```

のように、flat フレーム、comparison フレーム、object フレームのファイル名と、distortion データ名 (必ずフルパスで)、グリズムの番号 (1 は 300B) を記述したファイルです。comparison に sky line を使う場合は comparison フレーム=object フレームが良いです。複数セットを一度に切り出したい時には各行ごとに 1 セット、それを数行にわたって書けば OK です。

起動例:

```
IDL> fcsmosred, '/work/user/test/', '/work/user/test/fcsmosred.dat', '/work/user/test/test.sbr'
```

この結果、/mb21b/user/test のディレクトリ下に obj#\_\*.fits, comp#\_\*.fits というように object/comparison のデータセットができあがります。obj の後の番号#は sbr ファイル上の行番号に相当します。この後 sky line を用いて波長較正を行う場合は comp#\_\*.fits は必要ありません。処理が終わると”Program caused arithmetic error”というメッセージが現れますが、正常終了です、気にしないでください。

この後 IRAF での波長較正に移る場合には、作業に入る前に

```
cl> wcsreset * world
```

を実行してください。

途中でエラーが生じた場合:(TBD)

## C.4 演習

以下のデータを使って実際に MOS スペクトルデータを解析してみよう。

[http://optik2.mtk.nao.ac.jp/subaru\\_red/FOCAS/mostest\\_20061207.tar.gz](http://optik2.mtk.nao.ac.jp/subaru_red/FOCAS/mostest_20061207.tar.gz)

をコピーして解凍、展開してください。以下のデータが含まれています。

test.obj[a,b,c].bs_[1,2].fits	オブジェクトデータ
test.flat.bs_[1,2].fits	オブジェクトのドームフラットデータ (imcombine 済)
test.feige34.bs.fits	標準星 (星の名前: Feige34) データ
test.feige34.dome.bs.fits	標準星のドームフラットデータ (imcombine 済)
test.arccomp.bs.fits	comparison データ
test.mdmp	MDP ファイル (マスクデザインファイル)
test.image.fits	マスクデザインの際に用いた direct image

観測: 300R グリズム+O58 フィルター

FOV 中心 (X, Y) = (1950, 2001)

注 1: \*\_1.fits は chip1、\*\_2.fits は chip2 のデータ

注 2: 簡単のため今回のデータはすべてバイアス・オーバースキャンが差し引かれて (解析マニュアル §3.4 参照) います。またドームフラットデータは 5 枚のデータが imcombine されて (§3.5 参照) います。

### long slit と異なるところ

- chip1 と chip2、2 枚の CCD データを使います。
- 標準星 (long slit で取得) のドームフラットとオブジェクト (MOS で取得) のドームフラットは異なります。
- 一般的に long slit と比べると空間方向のピクセル数が少ないです。パラメーターを注意深く選ばないとオブジェクトを失くしてしまったり、余計なノイズを混入させてしまったりします。画像上で確認しながら作業を進めましょう。
- long slit の演習の時とはグリズム (波長域) も違うことに注意してください。

### 問題

初級編 : オブジェクト NO=23 を解析してみましょう。楕円銀河に特徴的な吸収線が見えてくるはずですが、何の吸収線かわかりますか? 赤方偏移はいくつでしょう?

上級編 1: オブジェクト NO=1 を解析してみましょう。 $z=5.7$  のライマン  $\alpha$  銀河が映っています。連続光はほとんど見えず、ある狭い波長範囲にしかシグナルが検出されません。どこにシグナルがあるかわかりますか?

上級編 2: オブジェクト NO=9 を解析してみましょう。 $z=6.5$  のライマン  $\alpha$  銀河が映っています。連続光は全く見えません。どこにシグナルがあるかわかりますか?

## D 分光データ整約のまとめ

第3章で行ったデータ整約の中身についてまとめます。

### D.1 バイアス引き

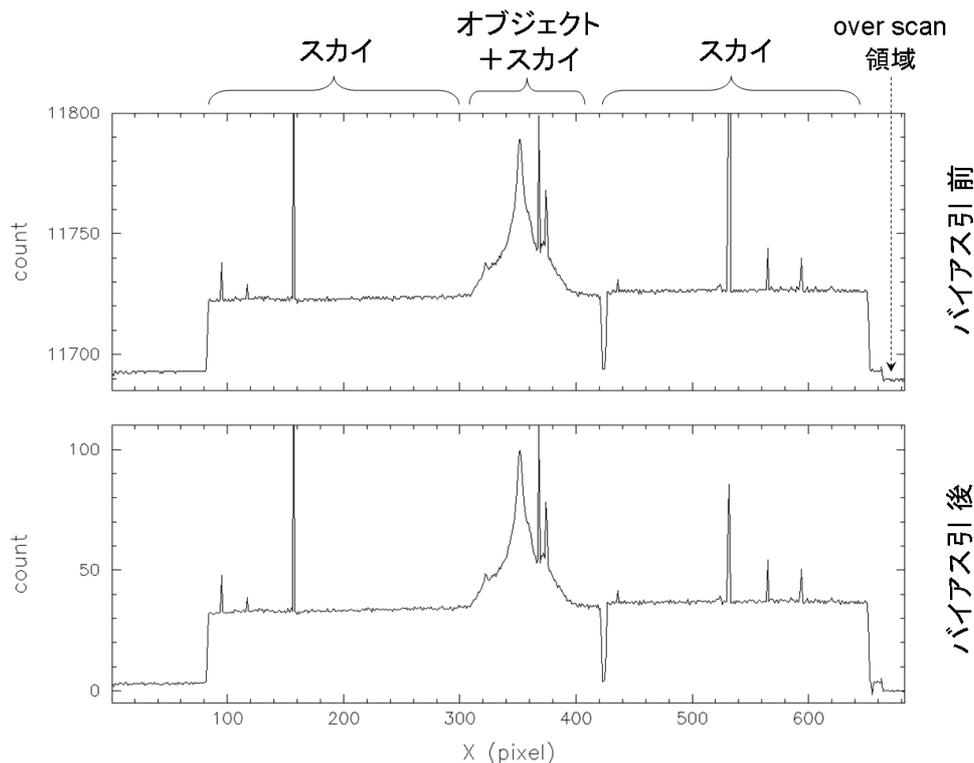


図 13: オリジナルデータ (FCSA00079270.fits) とバイアス引き後 (FCSA00079270.bs.fits) の画像を x 方向に切ってプロットしたもの。光が当たっていない状態の画像を引き算する事で、CCD データに乗っているゲタの成分 (この場合は ~11700 カウント) を取り除きます。

```
cl> imcombine @list.bias bias combine=median
```

imcombine は画像を足し合わせるタスクです。

- list.bias : 足し合わせを行う画像のリストが書いてあるファイル名
- bias : 出力画像のファイル名
- combine=median : 各ピクセル位置で median(中央値) を求めるというオプション  
選択肢としては他に、average(平均) と sum(合計) がある  
「combine」以外にも、rejection の仕方などたくさんの  
オプションがある

```
cl> imarith @list.flat - bias @list.flat.bs
```

imarith は画像と画像、画像と定数の間の演算を行うタスクです。上の例では list.flat の中の画像全てから bias.fits を引き算し、結果を list.flat.bs の中に書いてあるファイル名で保存します。

```
fo> ovsb @list.flat.bs @list.flat.bs ybox=15
```

ovsusb は FOCAS データ専用のタスクです。各 y 座標で、overscan 領域が 0 になるように定数を引き算します。この時、y 方向にスムージングをかけるオプションが ybox で、この場合は 15 ピクセルで平均を取っています。

バイアスフレームの引き算でバイアスのパターンを引いて、その後に overscan 領域を引くことで全体のカウントの変動を補正しています。

## D.2 フラットフィールド

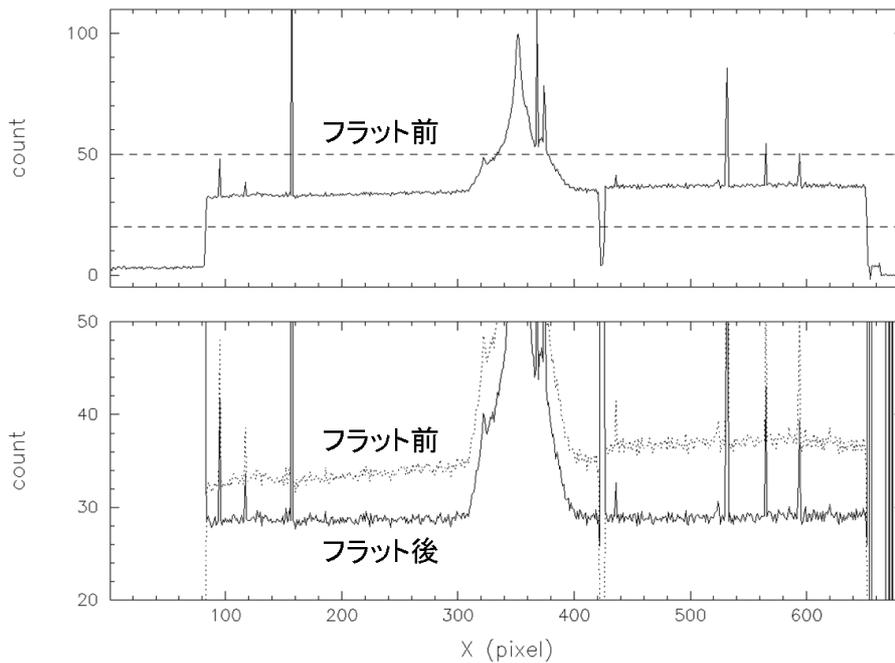


図 14: 上はバイアスを引いた後の画像。下は y 方向に拡大し、フラット前後のカウント分布を比較したもの。一様光源のデータで割り算することで、装置や検出器などによる固有のパターンを取り除きます。フラット後の画像では、背景光の傾きやガタガタが補正されて平らになっている事がわかります。分光データの場合、上の図で示した空間方向だけではなく、波長方向にもならず意味があります。

### D.3 ゆがみ補正

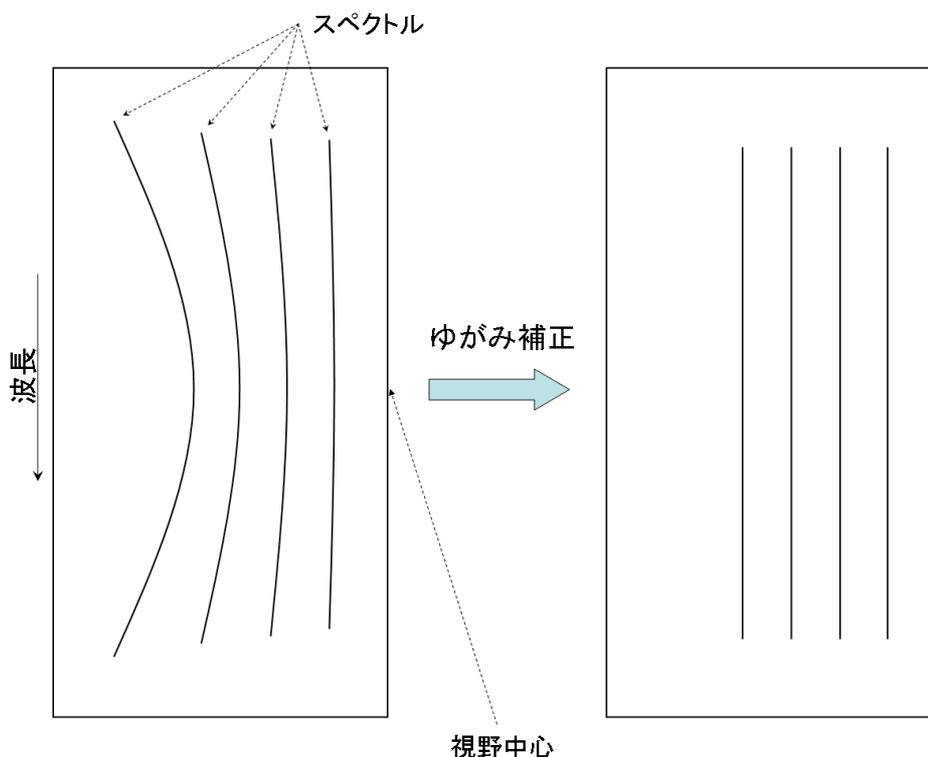


図 15: ゆがみ補正の概念図。FOCAS 光学系起源のゆがみを補正して、スペクトルを真っ直ぐにします。

```
fo> distcalib @list.obj.ff @list.obj.dc obsmode=spec
```

distcalib は FOCAS データ専用のタスクです。装置で直接測定された結果を使って補正を行うので、オプションは観測モード (obsmode=imaging or spectroscopy) のみです。

### D.4 波長較正

波長分かっているラインを同定し (identify, reidentify)、CCD データ内で波長がどのように変化しているかを  $xy$  座標の関数として求め (fitcoords)、 $\lambda = a + b y(\text{pixel})$  となるように画像を変換します (transform)。

今回は省略しましたが、分散方向に傾きがある場合は、スリットのギャップや標準星を使って空間方向の identify, reidentify, fitcoords を行い、transform 実行時に波長と同時に補正を行います。

```
fo> identify skycomp section="middle column"  
      coordli="FOCASREDHOME$/IRAF/skyline_midres.dat" fwidth=8 order=3  
      function=legendre
```

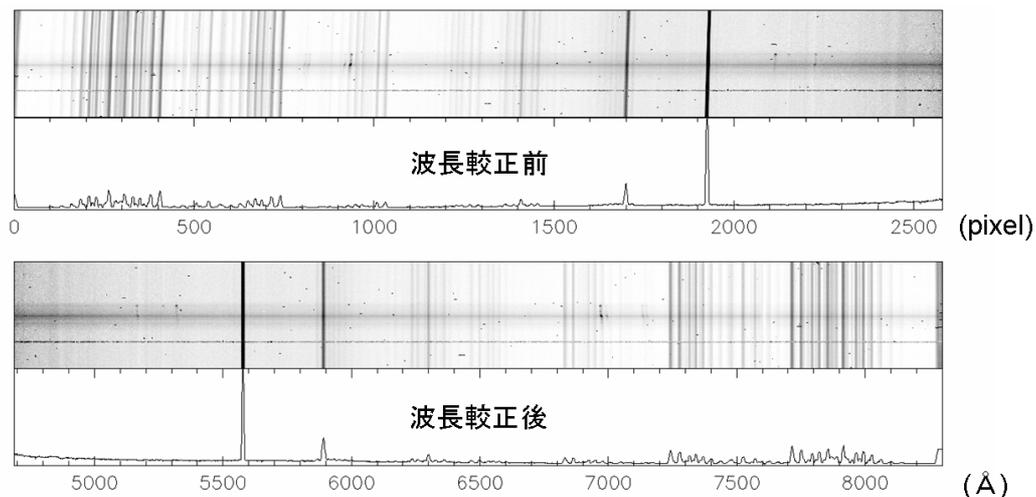


図 16: 波長較正の前と後

skycomp.fits のライン同定を行います。結果は、database/idskycomp に保存されます。

```

section : どこを切り出したグラフで identify を行うか
coordli : identify に使うラインの波長が書かれているファイル
fwidth  : 同定に使うラインの幅。ピクセル単位
order   : フィッティングの次数 (初期値)
         : ここでは次数が低い場合にどうなるかを確認してもらうため、
         : わざと低めに設定してある
function : フィッティングに使用する関数

```

次に reidentify を用い、全ての x で波長と y 座標の関係を調べます。

```

fo> reidentify skycomp skycomp overr+ refit+ trace+ nlost=1 ver+
      section="middle column"

```

「reidentify skycomp skycomp」は「skycomp を reference 画像として skycomp のライン同定を行う」という意味になりますが、この場合は、「identify を用いて”middle column”で同定したラインを、x 方向に trace する」という動作になります。結果は database/idskycomp に追加で書き込まれます。

```

overr : ある column の同定結果がすでに database/idskycomp に書かれてあった場合、
       : それをやりなおして結果を書き換えるかどうかを指定するオプション
refit  : これが no の場合 (refit-)、関数形はそのままシフトだけ求める
       : yes であれば、フィットをやりなおす
trace  : 分散と垂直な方向に trace して行くかどうかを指定
       : 今回は trace するのがそもそもの目的なので yes にする
nlost  : 同定できないラインを何本まで許すかを指定
       : この数字以上のラインが同定できなかった場合、そこで trace が止まってしまう
ver    : 各 x での同定結果を表示するかどうかを指定するオプション
       : 途中で変な事が起きていないか確認するため、必ず yes にするようにして下さい

```

標準星に対してはタスク apall を使ってスペクトルを一次元化し、その後波長較正を行いました。apall は便利なタスクですが、一度に色々な事をやるためたくさんのパラメーターを持ち、内部で

具体的に何をやっているか分かりにくいという面もあります。例えば今回やったようなやり方だと、background がうまく引けているのかを直接確認する事はできません。

実際に自分のデータ解析で使用する場合には、apall が内部で何を行っているのか、何を行わせようとしているのかをしっかりと理解した上で使うようにして下さい。

## D.5 sky 引き

```
fo> background obj1.wc obj1.bg axis=1 order=2 low_rej=3 high_rej=3 niterate=3
```

obj1.wc : 入力画像  
obj1.bg : 出力画像  
axis : スリット方向を指定する。FOCAS は x 方向なので 1  
(以下のオプションはフィッティング時に変更可能)  
order : fitting 関数の次数+1(=パラメーターの数)  
low\_rej : データ点が  $\text{fit} - \text{low\_rej} \times \sigma$  より小さければ、その点を除いてフィットする  
high\_rej : データ点が  $\text{fit} + \text{high\_rej} \times \sigma$  より大きければ、その点を除いてフィットする  
niterate : low\_rej, high\_rej で指定されるリジェクションを何回繰り返すか

## D.6 フラックス補正

あらかじめフラックスが分かっている星(標準星)のスペクトルを使って、カウントをエネルギーに変換します。

1. エネルギーが測定されている各バンドで標準星のカウントを測定 (standard)
2. エネルギーとカウントの比を波長の関数でフィット (sensfunc)
3. 波長較正された画像のカウント値をエネルギーに変換する (fluxcalib)

```
fo> standard std.wc std.dat extinct="FOCASREDHOME$/IRAF/mkoextinct.dat"  
caldir="onedstds$spec50cal/" interac+
```

3.9 節では「epar standard」から「:go」でタスクを走らせたましたが、コマンドラインにすると上のようになります。

std.wc : 入力ファイル。一次元化された標準星のスペクトル (std.wc.fits)  
std.dat : standard の出力ファイル  
extinct : 大気の透過特性データが入ったファイル  
mkoextinct.dat は CFHT での測定結果で、現在は以下のページで文献を見ることができます。  
[http://www.cfht.hawaii.edu/Reference/Bulletin/Bulletin 19 → "The Extinction Curve at Mauna Kea in the Visible Range"](http://www.cfht.hawaii.edu/Reference/Bulletin/Bulletin%2019-%20The%20Extinction%20Curve%20at%20Mauna%20Kea%20in%20the%20Visible%20Range)  
caldir : 標準星のデータが入っているディレクトリ  
onedstds\$ = iraf\$/noao/lib/onedstds/以下にはいくつかディレクトリがあり、使用する星によっては別のディレクトリを指定しなければいけない場合があります。  
interac : マウスを使ってバンドを調整するかどうかを指定するオプション

次に、standard の出力ファイル std.dat に対してタスク sensfunc でフィッティングを行います。

```
fo> sensfunc std.dat sens extinct="FOCASREDHOME$/IRAF/mkoextinct.dat"
```

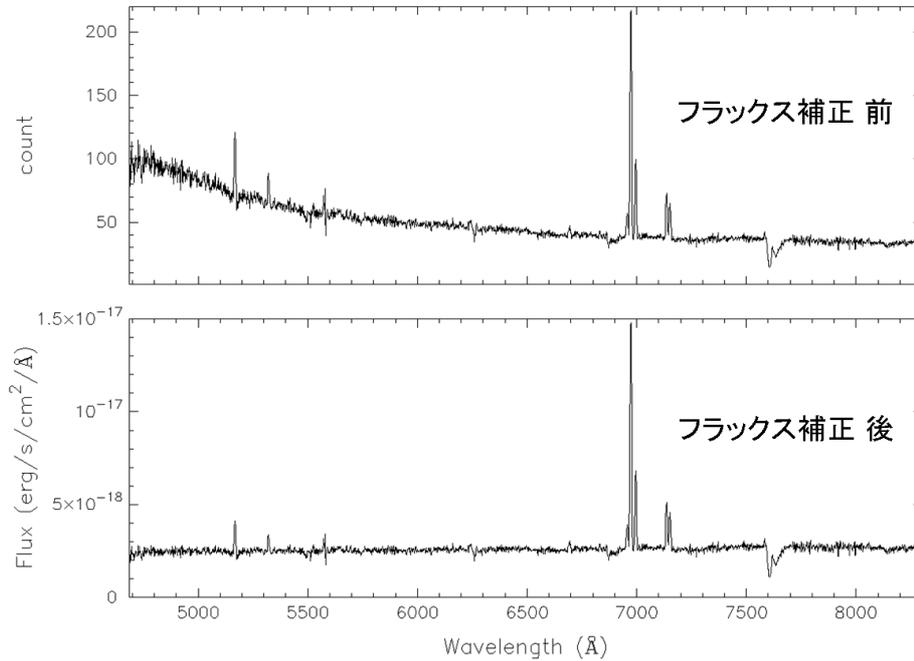


図 17: フラックス補正の前と後

上の例では結果が `sens.fits` として出力されます。

`sens.fits` を使って、タスク `fluxcalib` でオブジェクトフレームのカウントをフラックスに変換します。

```
fo> fluxcalib obj1.bg obj1.fc sens fnu- exposur="EXPTIME"

obj1.bg  : 入力画像
obj1.fc  : 出力画像
sens     : フラックス補正に使用する、sensfunc の出力スペクトル (sens.fits)
fnu      : 単位周波数あたりのフラックスにするかどうかのオプション
exposur  : FITS ヘッダー中の、露出時間を示しているキーワード
```

最後に、`extinct` を使って大気吸収の補正をします。ただしここで行う補正は、波長方向は非常に大雑把なもので吸収帯などは補正されません。

```
fo> extinct obj1.fc obj1.ex extinct="FOCASREDHOME$/IRAF/mkoextinct.dat"
```

補正した結果は、`obj1.ex.fits` として出力されます。

## E その他

### E.1 宇宙線除去

今回のデータは比較的短時間の露出で、かつ最終的に3枚の画像を重ねることで除去できる事もあり、宇宙線については特に処理をしませんでした。しかし、FOCASで分光観測する場合は一枚につき30分程度の露出をする場合が多く、画像内には大量の宇宙線があるのが普通です。さらに露出の枚数が少ない場合は重ね合わせで除去する事が困難なため、単体のフレームで宇宙線を除去する事が必要な場合もあります。また、通常宇宙線の除去は整約の初期の段階で行いますが、その後の整約/解析をスムーズに進める事ができるという利点もあります。一方で、「除去」とは言っても単に宇宙線を検出して周囲のカウントから内挿するだけなので、データが復元されるわけではないという事を意識しておく必要があります。そういう操作をしたという情報はできるだけ保存していつでも参照できるようにしておき、例えばフレームの重ね合わせの時などは使わないようにするのが理想的だと思います。

IRAFには`noao.imred.crutil`以下に`cosmicrays`や`crmedian`等のタスクがありますが、ここではL.A.Cosmic (van Dokkum 2001, PASP, 113, 1420)を使います<sup>7</sup>。時間はかかりますが、性能は優れていると思います。§1.1で準備したFOCASRED内にはすでに含まれていますが、必要な場合は以下のURLから取得可能です。

<http://www.astro.yale.edu/dokkum/lacosmic/>

本来であればバイアスを引いた直後に行うのが理想的なのですが、ここでは簡単のため必要な部分を切り出した後に行います。今回の例で言うと`obj1.fits`等にあたります。

```
fo> stsdas
st> lacos_spec obj1 obj1.cr obj1.crmask

obj1      : 入力画像
obj1.cr   : 出力画像
obj1.crmask : マスク画像
           出力画像と同じサイズの画像で、宇宙線を除去したピクセルは1、
           それ以外のピクセルは0の値を持つ画像が作られます
```

L.A.Cosmicはパッケージ`stsdas`内のタスクを使用するので、あらかじめを読み込んでおく必要があります。それ以外の使用上の注意点としては、

- オリジナルのソースファイルをdownloadして使う場合
  - 使用前に`imdelete`の`verify`が`no`である事を確認
  - パラメーター`gain=2`と`readn=4`を設定
- 3つの引数全てを与えておくこと(省略して後から聞かれる形にはしない)
- 出力画像を必ず目で見確認する事

3つ目の繰り返しになりますが、変な事が起きていないかどうか必ず出力画像を目で見確認するようにして下さい。宇宙線と天体からの信号を混同してしまう事があるので、そういう場合はパラメーター`xorder`を変えてやりなおす事で解決する場合があります。経験上、ターゲットが明るくて複雑な形をしている場合は`xorder`を大きめにし、ターゲットが暗くてほとんど見えなような場合はできるだけ小さくするのが良いです。

<sup>7</sup>L.A.Cosmicを使ったデータで論文を書く場合は、上記文献を引用する必要があります。

## E.2 準備中の項目

- グリズムの傾き補正
- フラットフレームの規格化
- フリンジ除去
- FOCASRED インストール