

# Johdatus IRAFiin : CCD-kuvien redusointi ja fotometria

Kari Nilsson

2. syyskuuta 2014

The screenshot displays the IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) software interface. It is divided into several panels:

- Top Left:** A plot window titled 'xgterm' showing a spectrum. The y-axis is labeled 'Pixel Value' and ranges from 6250 to 7000. The x-axis is labeled 'Column (pixels)' and ranges from 0 to 2000. The plot shows a noisy baseline with several sharp peaks, notably around 1000 and 1500 pixels.
- Top Right:** A control panel for the '0505sum' image. It includes fields for 'Value', 'VCS', 'Physical' (X, Y), 'Image' (X, Y), 'Frame', 'Zoom' (1.000), and 'Ang' (0.000). There is a small thumbnail image of the star field.
- Bottom Left:** A terminal window showing a list of files and commands. The file list includes:
  - 0650psf2.fits
  - 0650psf3.fits
  - 0650siirrettavat
  - 0650siirrettyt
  - 0650small.fits
  - 0650star15.par
  - 0650sum.fits
  - 0650sum.mag.1
  - 0650sum.psf.1.fits
  - 0650sum.psf.2.fits
  - 0650sum.psg.1
  - 0650sum.pst.1
  - 0650sum.pst.2
  - 0650sum\_1.dat
  - simupsf.par
  - star101.mask
  - star121.mask
  - star141.mask
  - star181.mask
  - star41.mask
  - star41\_0505.mask
  - star61.mask
  - star81.mask
  - testipotko
  - uparm
  - vali.fits
  - zernike.fits
  - zeropoints1412.txtCommands entered include:

```
c1> displ 0505sum 1
z1=5942.335 z2=6895.699
Unable to open parameter file `uparm$tvdispaly.par`.
c1> e
displ 0505sum 1 fill+
z1=5942.335 z2=6895.699
Unable to open parameter file `uparm$tvdispaly.par`.
c1>
c1> imexamine
```
- Bottom Right:** A large window displaying a star field image. The stars are of varying brightness and are distributed across the field. A small vertical scale bar is visible on the right side of the image.

# Sisältö

<b>1 Johdanto</b>	<b>3</b>
<b>2 Yleistä</b>	<b>3</b>
2.1 Unix-komennoista . . . . .	3
2.2 IRAFin Esivalmistelut . . . . .	4
2.3 Käynnistäminen . . . . .	4
2.4 Perusasiat . . . . .	5
2.4.1 Hyödyllisiä komentoja . . . . .	8
2.4.2 Muita hyödyllisiä ominaisuuksia . . . . .	10
2.5 FITS -tiedostomuodosta . . . . .	11
<b>3 CCD-kuvien redusointi</b>	<b>12</b>
3.1 Bias -vähennys . . . . .	12
3.1.1 Bias -kuvien yhdistäminen . . . . .	12
3.1.2 Bias -vähennyksen tekeminen . . . . .	14
3.2 Dark -vähennys . . . . .	17
3.2.1 Dark -kuvien yhdistäminen . . . . .	17
3.2.2 Dark -vähennyksen tekeminen . . . . .	17
3.3 Flat-field -korjaus . . . . .	18
3.3.1 Flat-field -kuvien yhdistäminen . . . . .	18
3.3.2 Flat-field -korjauksen tekeminen . . . . .	18
3.4 Jälkisiivous . . . . .	20
3.4.1 Taustan tasoittaminen . . . . .	20
3.4.2 Kosmisten säteiden poistaminen . . . . .	24
<b>4 CCD-kuvien yhdistämisestä</b>	<b>26</b>
<b>5 Fotometria</b>	<b>27</b>
5.1 Phot -komennon parametrit . . . . .	27
5.1.1 Datapars . . . . .	28
5.1.2 Centerpars . . . . .	28
5.1.3 Fitskypars . . . . .	30
5.1.4 Photpars . . . . .	31
5.2 Mittausten suoritus . . . . .	33
5.3 Kohteen magnitudin laskeminen . . . . .	33
5.4 Virherajojen arvioiminen . . . . .	35

# 1 Johdanto

Tämän ohjeen tarkoituksena on tarjota riittävä johdatus IRAF kuvankäsittelyohjelmistoon, jotta tähtitieteen harjoitustyöt I -kurssiin liittyvä kuvankäsittelyosuus voidaan suorittaa. Koska IRAF on erittäin laaja ohjelmisto, keskitytään tässä vain kuvien jälkikäsittelyyn (redusointiin) ja fotometristen mittausten tekemiseen ja niihinkin melko pintapuolisesti. Tarkemman kuvauksen eri komentojen toiminnasta saa `help` -komennon avulla. Lisäksi IRAFin kotisivuilta <http://iraf.noao.edu> löytyy lisätietoja IRAFista ja sen mahdollisuuksista. Sieltä löytyy myös kattava dokumentaatio ja erilaisia tutoriaaleja, joihin tutustuminen on erittäin suositeltavaa mikäli aikoo käyttää IRAFia jatkossakin. Tässä ohjeessa oletetaan, että lukija hallitsee havaintomenetelmät I -kurssissa käsitellyt kuvankäsittelyn perustiedot.

IRAF on lyhenne sanoista Image Reduction and Analysis Facility. Ohjelmaa kehittää ja ylläpitää National Optical Astronomy Observatories (NOAO) Tucsonissa, Arizonassa. IRAF on edelleen suosittu kuvankäsittelyohjelmisto tähtitieteilijöiden keskuudessa huolimatta ESO:n kehittämistä "eurovaihtoehdoista". Tosin eri instrumenteille räätälöidyt erikoisohjelmat ovat pikkuhiljaa korvaamassa IRAFia. IRAFille on kehitetty useita erikoispaketteja mm. avarusteleskoopin havaintodatan käsittelyä varten. Ohjelma on tekstipohjainen, ts. komennot kirjoitetaan komentoriviltä. IRAFiin on kehitteillä myös graafinen liittymä, mutta se ei ole vielä yleisesti käytössä.

## 2 Yleistä

### 2.1 Unix-komennoista

IRAF toimii tällä hetkellä vain Unix-ympäristössä (käytännössä Linux), joten pohjatiedot tästä järjestelmästä ovat suureksi avuksi. Alla on lueteltu lyhyesti tärkeimmät komennot:

Komento	Merkitys
<code>mkdir</code> hakemisto	luo uusi hakemisto (kansio)
<code>cd</code> hakemisto	siirry hakemistoon
<code>ls</code>	listaa hakemiston tiedostot
<code>ls -l</code>	enemmän tietoja tiedostoista
<code>cd ..</code>	siirry yksi hakemisto ylöspäin (huomaa välilyönti <code>cd:n</code> jälkeen)
<code>rm</code> tiedosto	tuhoa tiedosto
<code>pwd</code>	missä hakemistossa parhaillaan ollaan
<code>mv</code> tiedosto1 tiedosto2	nimeä tiedosto uudelleen tai siirrä se toiseen paikkaan

On erittäin suositeltavaa tutustua jonkin verran Linux-ympäristöön, varsinkin tiedostojärjestelmässä navigointiin ja tekstitiedostojen editointiin ennen töiden aloittamista.

## 2.2 IRAFin Esivalmistelut

Nämä esivalmistelutoimenpiteet tarvitsee suorittaa silloin kun IRAFia käyttää ensimmäisen kerran, jatkossa voi siirtyä suoraan IRAFin käynnistämisen.

Luo hakemisto (esim. iraf) ja kopioi havaintodata tähän hakemistoon. Kirjoita tässä hakemistossa

```
mkiraf
```

ja anna kysymykseen "Enter terminal type:" vastaukseksi `xgterm`. Mkiraf luo hakemiston `uparm` ja tiedoston `login.cl`. Ensimmäiseen IRAF tallentaa eri komentojen asetuksia, eikä sen sisällöstä tarvitse välittää. Tiedostoa `login.cl` täytyy sen sijaan editoida hieman. Kirjoita

```
emacs login.cl
```

ja mene riville 26 (noin), jossa lukee

```
#set stdimage = imt800
```

Ota kommenttimerkki `# pois` ja korvaa `800` luvulla `2048`. Tämä parantaa näytön resoluutiota. Tämän jälkeen mene riville 33 (noin), jossa lukee

```
#set imtype = "imh"
```

Ota kommenttimerkki `# pois` ja korvaa `"imh"` sanalla `"fits"`, jolloin voit käyttää suoraan FITS -muotoisia kuvia. Tallenna muutokset ja poistu emacsista. Esivalmistelut on nyt tehty.

## 2.3 Käynnistäminen

- 1) Siirry hakemistoon, jossa `login.cl` -tiedosto sijaitsee.
- 2) Kirjoita `xgterm&`, mikä avaa uuden ikkunan. **Tästä eteenpäin kaikki komennot annetaan tässä ikkunassa.** Xgterm on pääteohjelma, joka on erityisesti suunniteltu käytettäväksi IRAFin kanssa. Voit myös kirjoittaa `xgterm -fn 10x20&` mikäli haluat fonttikoon vähän isommaksi.
- 3) Kirjoita `ds9&`, mikä käynnistää kuvien näyttöohjelman.
- 4) Kirjoita `ecl`, mikä käynnistää IRAFin. IRAF on nyt valmis käytettäväksi.

NOAO PC-IRAF Revision 2.11.3 EXPORT Tue Oct 26 21:01:12 MST 1999  
This is the EXPORT version of PC-IRAF V2.11 supporting most PC systems.

Welcome to IRAF. To list the available commands, type ? or ??. To get detailed information about a command, type 'help command'. To run a command or load a package, type its name. Type 'bye' to exit a package, or 'logout' to get out of the CL. Type 'news' to find out what is new in the version of the system you are using. The following commands or packages are currently defined:

dataio.	images.	lists.	obsolete.	proto.	system.
dbms.	language.	noao.	plot.	softools.	utilities.

ec1>

Kuva 1: IRAFin käynnistysruutu.

## 2.4 Perusasiat

Käynnistyessään IRAF tulostaa kuvan 1 mukaisesti lyhyen käyttöohjeen ja käytössä olevat analysointipaketit (dataio., images., ...). Nimen jäljessä oleva piste kertoo, että kyseessä on paketti eikä yksittäinen komento. Paketit ovat tavallaan hakemistoja, joihin pääsee kirjoittamalla paketin nimen. Paketit sisältävät joko lisää paketteja tai komentoja. Paketista pääsee pois kirjoittamalla bye. IRAFista poistutaan kirjoittamalla logout.

Kullakin komennolla on omat parametrinsa, jotka vaikuttavat komennon suorittamiseen. IRAF tallettaa parametrit uparm-hakemistoon. Parametreja voi tarkastella ja muuttaa komennolla epar *komento*. Tarkastellaan esimerkin vuoksi display -komentoa. Kuvan näyttäminen tapahtuu komennolla

```
display kuva 1
```

jolloin kuvan kuva.fits pitäisi ilmestyä ds9:n ruudulle (jos ei tule, jokin on pielessä). Huomaa, että tarkenninta .fits ei tarvitse kirjoittaa. Luku 1 komennon perässä tarkoittaa, että kuva siirretään näyttöpuskuriin 1, näitä puskureita on ds9 -näyttöohjelmassa 16 kappaletta. Tutki ds9:n ominaisuuksia. Sen avulla voi suorittaa jo melkoisen määrän kuvankäsittelyoperaatioita, mm. kuvan zoomausta, rivi- ja kolumniplottauksia, väripaletin vaihtamisen, jne. Yksi tärkeimmistä on kuvan kirkkauden ja kontrastin säätö, mikä tapahtuu liikuttamalla hiirtä kuvan päällä oikea nappi alaspainettuna.

Kuvan voi näyttää myös kirjoittamalla pelkästään display, jolloin IRAF kysyy kuvan nimen (anna se taas ilman .fits -tarkenninta) ja näyttöpuskurin numeron. Kuvan nimi ja puskurin numero ovat esimerkkejä näkyvistä parametreista, jotka kysytään aina mikäli niitä ei ole annettu komentorivillä.

Näkyvien parametrien lisäksi komennolla on ns. piiloparametrejä, joita ei kysytä erikseen. Piiloparametrejä voi muuttaa kahdella tavalla. Tapa 1 on kirjoittaa esim. epar display, jolloin avautuu editori, jossa kaikki parametrit ovat näkyvissä (kuva 2). Editorissa piiloparametrit näkyvät suluissa. Parametreja voi editoida kulkemalla nuolinäppäimillä ylös- ja alaspäin ja kirjoittamalla haluttu arvo kenttään. Joskus riittää kirjoittaa vain halutun arvon 3-4 ensimmäistä kirjainta kenttään ja IRAF arvaa loput kun painetaan <return>, joskus taas täytyy kirjoittaa haluttu arvo kokonaan. IRAF ei valitettavasti ole kovin johdonmukainen tässä suhteessa. Kun parametrit on asetettu halutunlaisiksi, poistutaan editorista painamalla ctrl-d, jolloin parametrien arvot tallentuvat. Painamalla ctrl-c voi poistua editorista muuttamatta parametrien arvoja.

I R A F  
Image Reduction and Analysis Facility

```
PACKAGE = tv
  TASK = display

image =          image to be displayed
frame =          1 frame to be written into
(bpmask =        BPM) bad pixel mask
(bpdysl=        none) bad pixel display (none|overlay|interpolate)
(bpcolor=        red) bad pixel colors
(overlay=        ) overlay mask
(ocolors=        green) overlay colors
(erase =        yes) erase frame
(border_=        no) erase unfilled area of window
(select_=        yes) display frame being loaded
(repeat =        no) repeat previous display parameters
(fill =         no) scale image to fit display window
(zscale =        yes) display range of greylevels near median
(contras=        0.25) contrast adjustment for zscale algorithm
(zrange =        yes) display full image intensity range
(zmask =         ) sample mask
(nsampl=        1000) maximum number of sample pixels to use
More-----
                                                    ESC-? for HELP
```

Kuva 2: Parametrien editointi IRAFissa (display -komento).

Harjoituksen vuoksi ja **ongelmien välttämiseksi jatkossa aseta display -komennossa fill = yes** ja aja display -komento uudestaan. Nyt IRAFin skaalaa kuvan siten, että se näkyy kokonaan ds9:ssä. Mikäli fill = no näytetään vain se osa kuvaa, joka mahtuu ds9:n näyttöön, mikä saattaa hämätä käyttäjää luulemaan, että kuva on pienempi kuin se oikeasti on. Tämä on aiheuttanut aikojen saatossa sen verran hämmennystä, että kirjoittaja lämpimästi suosittelee kuvan 3 printtamista ja asentamista monitorin välittömään läheisyyteen.

Tapa 2 on muuttaa piiloparametrejä suoraan komennon yhteydessä, kirjoittamalla esim.

```
display kuva 1 fill+
```

missä plus -merkki asettaa ko. paramerin arvoon "yes" ja miinus -merkki arvoon "no". Huomaa että tavassa 1 parametrin arvo jää asetettuun arvoon, mutta tavassa 2 ei. Vielä yksi tapa ajaa komento on ensin editoida parametrejä kirjoittamalla *epar komento* ja kun parametrit on asetettu kirjoittaa editorissa :go. IRAF poistuu editorista ja ajaa komennon kysyen vielä näkyvät parametrit. On makuasia minkä eri komennon ajo- tai editointivaihtoehdoista valitsee.

Kaikista komendoista ja niiden parameterista saa lisätietoa kirjoittamalla *help komento*

# Muista asettaa display-komennon

**parametri**

**fill = yes**

## 2.4.1 Hyödyllisiä komentoja

Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti joitakin IRAFin komentoja.

**imhead** : Imhead -komento tulostaa FITS -kuvan otsikon. Mikäli longhea = yes, tulostuu koko otsikko, muuten ainoastaan kuvan koko.

**imarith** : Imarithilla voi suorittaa yksinkertaisia laskutoimituksia kuvien välillä, esim.

```
imarith kuva1 + kuva2 summa    tai
imarith kuva1 - 104.0 vah
```

Syntaksi on siis **imarith op1 operaattori op2 tulos**, missä *op1* ja *op2* voivat olla joko kuvia tai numeroita, *tulos* on aina kuva ja operaattoriksi kelpaa jokin vaihtoehdoista +/-/\*/. Monimutkaisempia operaatioita varten on olemassa komento **imfunction**.

**imstat** : Imstatilla saadaan kuvasta erilaisia статистиikkoja, kuten esim. minimi, maksimi, keskiarvo, keskihajonta, jne.

**imexamine** : Imexamine on monipuolinen työkalu kuvan analysointiin. Se käynnistetään komennolla

```
imexamine kuva
```

jolloin IRAF näyttää kuvan ds9:ään (ellei se jo ole siellä) ja on valmis vastaanottamaan komentoja. Yleisimmät näppäinkomennot ovat :

```
l : riviplottaus kursorin kohdalta
c : kolumniplottaus kursorin kohdalta
e : kontuuriplottaus kursorin kohdalta
s : pintaplottaus kursorin kohdalta
r : radiaaliplottaus kursorin kohdalta (kuva 4)
m : статистиikka kursorin kohdalta
a : fotometriaa kursorin kohdalta (kuva 5)
v : plottaus kahden kursorilla merkityn paikan väliltä
n : näytä seuraava kuva listassa
p : näytä edellinen kuva listassa
q : poistu imexaminesta.
```

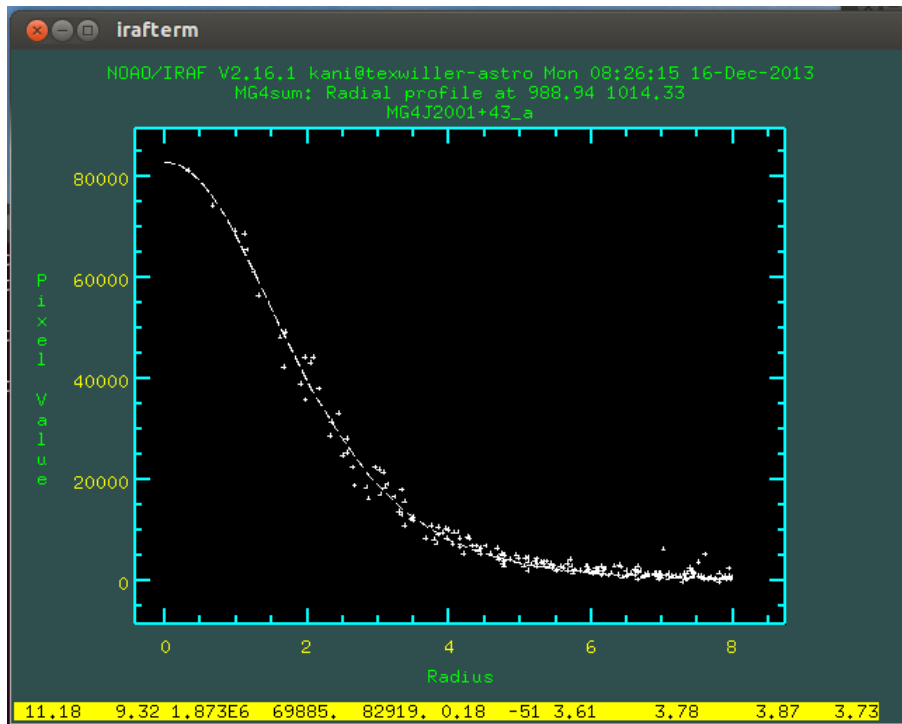
Useimpia **imexamine:n** näppäinkomentoja varten on olemassa oma parametritiedostonsa, esim. kirjoittamalla **epar rimexam** (huom. ei **epar rimexamine**) voi muuttaa **r**-näppäimeen liittyviä parametreja.

**implot** : Tällä komennolla voi tehdä rivi- ja kolumniplottauksia monipuolisemmin kuin **imexamine:lla**. On mahdollista plotata mm. usean rivin/kolumnin keskiarvo tai sama rivi eri kuvista päällekkäin. Jälkimmäistä voi tarvita esim. kun halua verrata kahta tai useampaa kuvaa keskenään.

**imdel** : Tuhoaa kuvan tai kuvia. Suositellaan lämpimästi asetettavaksi **verify = yes**.

**imrename** : Muuttaa kuvan nimen.





Kuva 4: Tähtien kirkkausprofiili imexamine-komennon r-näppäimellä.

```

# COL LINE COORDINATES
# R MAG FLUX SKY PEAK E PA BETA ENCLOSED MOFFAT DIRECT
988.94 1014.33 988.94 1014.33
11.18 9.32 1.873E6 69885. 82919. 0.18 -51 3.61 3.78 3.87 3.73

```

Kuva 5: Imexamine-komennon tulostus kun painetaan a-näppäintä kuvan 4 tähden kohdalla. Kolumni PEAK antaa tähden huippukirkkauden ADUissa (vrt. kuva 4) ja MOFFAT kirkkausprofiilin puoliarvoväyden (3.87 pix).

**unlearn** : Tämän komennon avulla voi minkä tahansa komennon parametrit resetoida default-arvoihin.

## 2.4.2 Muita hyödyllisiä ominaisuuksia

- Yksi tärkeä IRAFin ominaisuus on mahdollisuus käyttää listoja useamman kuvan käsittelemiseen yhdellä kertaa. Esimerkiksi jos halutaan lisätä 314 ADUa kuviin kuva1, kuva2, ..., kuva10 (10 kpl), luodaan ensin tekstieditorilla esim. tiedosto nimeltä *kuvat*, jossa on kaikki käsiteltävät kuvat kuva1 ... kuva10 lueteltuina, yksi kullakin rivillä ja ilman .fits -päätettä. Tämän jälkeen annetaan komento

```
imarith @kuvat + 314 @kuvat
```

Huomaa siis, että @-merkki ilmoittaa että kuvat on lista kuvia eikä yksittäinen kuva. Huomaa myös, että yllämainitussa esimerkissä käsiteltävät kuvat korvautuvat uusilla kuvilla.

- IRAFissa on oma merkintätapansa kun halutaan tarkastella jonkin kuvan osakuva. Jos esim. halutaan tietää статистиikkaa suorakulmaiselta alueelta, jota kuvassa kuva1 rajoittavat kolumnit 100–120 ja rivit 200–230, kirjoitetaan

```
imstat kuva1[100:120,200:230]
```

eli osakuva spesifioidaan

```
[alin kolumni:ylin kolumni,alin rivi:ylin rivi].
```

Huomaa, että tällä tavalla voi määritellä vain suorakulmaisia alueita.

- Viimeksi annettuja komentoja voi tarkastella painamalla ylöspäin -nuolta, kunhan IRAF vain on käynnistetty komennolla *ec1* (=enhanced *cl*) eikä *cl*. Jälkimmäisessä tapauksessa komennot saa esiin kirjoittamalla *:e <return>*, jolloin viimeksi annettu komento tulee näkyviin. Ylöspäin -nuolella voi selata komentoja. Komentoja on myös mahdollista editoida.
- Paketin kaikki komennot voi listata kirjoittamalla *? <return>*
- Komentoja ei tarvitse kirjoittaa koko pituudessaan, kunhan ne ovat yksiselitteisiä. Riittää esim. kirjoittaa *displ* eikä *display*, mutta *disp* ei vielä riitä erottamaan *display* -komentoa *dispcor* -komennosta.

```

SIMPLE = T / Fits standard
BITPIX = 16 / Bits per pixel
NAXIS = 2 / Number of axes
NAXIS1 = 510 / Axis length
NAXIS2 = 340 / Axis length
EXTEND = F / File may contain extensions
DATE-OBS= '09/01/02' / UT DATE OF START (ASSUMES PC CLOCK=UT)
UT = '22:26:28.00' / UT TIME OF START (ASSUMES PC CLOCK=UT)
INSTRUME= 'SBIG ST-8'
TELESCOP= 'TUORLA1M'
OBSERVER= 'OBSERVER'S NAME'
EXPTIME = 1.8000000000E+02 / EXPOSURE IN SECONDS
SNAPSHOT= 1 / NUMBER OF SNAPSHOTS
EACHSNAP= 1.8000000000E+02 / SNAPSHOT IN SECONDS
PIXWIDTH= 2.7000000000E-02 / PIXEL WIDTH IN MM
PIXHEIGH= 2.7000000000E-02 / PIXEL HEIGHT IN MM
RESMODE = 2 / RESOLUTION MODE
EXPSTATE= '25' / EXPOSURE STATE (HEX)
TEMPERAT= -1.9977100737E+01 / TEMPERATURE IN DEGREES C
RESPONSE= 3.0000000000E+02 / CCD RESPONSE FACTOR
EPERADU = 2.3000000000E+00 / ELECTRONS PER ADU
FOCALLEN= 3.3000000000E+02 / FOCAL LENGTH IN INCHES
APERTURE= 1.2000000000E+03 / APERTURE AREA IN SQ-INCHES
FILTER = 'None' / OPTICAL FILTER NAME
BACKGRND= 6474 / BACKGROUND FOR DISPLAY
RANGE = 545 / RANGE FOR DISPLAY
HISTORY 0 / IMAGE MODIFICATIONS
PEDESTAL= 0 / PEDESTAL OFFSET
COMMENT Picture taken 01/09/02 at 22:26:28
COMMENT File created by the CCDOPS software from SBIG
END

```

Kuva 6: Tyypillinen FITS -otsikko.

## 2.5 FITS -tiedostomuodosta

Teleskoopeilla otettu kuvausdata on nykyisin lähes poikkeuksetta tallennettu FITS (Flexible Image Transport System) -tiedostomuodossa. IRAF pystyy käsittelemään FITS-kuvia suoraan, mikäli kappaleessa 2.2 kuvattu muutos tehdään `login.cl` -tiedostoon. FITS -kuvan tarkennin on joko `.fit`, `.fts` tai `.fits`, viimeinen muoto on suositeltavin. FITS -tiedosto sisältää tekstimuotoisen otsikon, johon on tallennettu mm. kuvan koko ja havaintoon liittyviä tietoja, esim. valotusaika (kuva 6).

Otsikon jälkeen seuraa varsinainen havaintodata binäärimuodossa. Datan yksikkö on ADU (Analog to Digital Unit), jonka yhteyden CCD:lle kertyneisiin elektroneihin antaa vahvistuskerroin  $G$  (yksikkö  $e^-/\text{ADU}$ ). Esim. jos  $G = 2.3 e^-/\text{ADU}$  ja havaitaan 1000 ADUa, on CCD:ltä todellisuudessa luettu 2300 elektronia. Tavallisesti ei ole väliä käytetäänkö ADUja vai elektroneja paitsi kohinalaskuissa, joissa käytetään aina elektroneja.

### 3 CCD-kuvien redusointi

CCD-kuvien jälkikäsitteily on välttämätöntä instrumentin aiheuttamien vääristymien korjaamiseksi. Ainakin seuraavat vaiheet tulisi suorittaa ennen fotometristen mittausten tekemistä :

- bias-vähennys
- pimeävirran vähennys
- flat-field -korjaus.

Teleskoopilla on (toivottavasti) otettu useita bias-, dark-, ja flat-field -kuvia. Nämä kuvat täytyy ensin yhdistää (laskea keskiarvokuva) signaali/kohinasuhteen parantamiseksi ennen kuin niitä käytetään varsinaisten kuvien korjaamiseen. Kaikki jälkikäsitteilyyn liittyvät komennot löytyvät paketista `noao/imred/ccdred`. Alla käydään läpi tarvittavat kuvankäsittelytoimenpiteet siinä järjestyksessä kuin ne kannattaa suorittaa.

Redusoinnin ja fotometria aikana tarvitaan useaan otteeseen CCD-kameran vahvistuskerroin, lukukohina ja pikseliskaala. Nämä on annettu taulukossa 1. **Huom! Tarkista nämä työn ohjaajalta, kamera on saattanut vaihtua.**

Taulukko 1: Vahvistuskerroin (gain), lukukohina ja pikseliskaala Tuorlan ST-1001E -kameralle.

Kamera	gain [e <sup>-</sup> /ADU]	lukukohina [e <sup>-</sup> ]	pikseliskaala "/pix.	huom.
ST-1001E	3.1	17	1.17	2×2 binned

#### 3.1 Bias -vähennys

Kuvareductiot tehdään `noao/imred/ccdred`-paketissa, jonka saa käyttöön kirjoittamalla

```
ecl> noao
noao> imred
imred> ccdred
```

##### 3.1.1 Bias -kuvien yhdistäminen

Editoi ensin tekstitiedosto jossa bias-kuvat on lueteltu yksi kullakin rivillä ilman `.fits` -päätettä. Alla oletetaan, että tämä lista on tallennettu nimellä `biakset`. Bias-kuvien yhdistäminen tehdään komennolla `zerocombine`<sup>1</sup>. Kirjoita siis `epar zerocombine`, jolloin kuvan 7 mukainen ruutu aukeaa. Kuten monet IRAFin komennot, `zerocombine` sisältää paljon parameterja, mutta useimmille parametreille default-arvo on paras vaihtoehto. Kuvaan 7 on merkitty tähdellä ne parametrit jotka täytyy asettaa, muut voi jättää kuvan osoittamiin default -arvoihin (tarkista kuitenkin, että arvot todella ovat samat kuin kuvassa 7). Tärkeimpien parametrien merkitys on :

`input` : Kuvat, jotka yhdistetään. Tähän voi antaa joko listatiedoston nimen (@-merkki edessä) tai yhdistettävät kuvat pilkulla erotettuina. Ensimmäinen tapa on yleensä helpompi.

<sup>1</sup>Joissakin IRAFin versioissa `zerocombine`-komento ei toimi kunnolla. Käytä tällöin `imcombine`-komentoa.

I R A F  
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = ccdred  
TASK = zerocombine

```
*input      =      @biakset List of zero level images to combine
*(output    =      avbias) Output zero level name
*(combine   =      average) Type of combine operation
*(reject    =      ccdclip) Type of rejection
*(ccdtype   =      ) CCD image type to combine
(process    =      no) Process images before combining?
(delete     =      no) Delete input images after combining?
(clobber    =      no) Clobber existing output image?
(scale      =      none) Image scaling
(statsec    =      ) Image section for computing statistics
(nlow       =      0) minmax: Number of low pixels to reject
(nhigh      =      1) minmax: Number of high pixels to reject
(nkeep      =      1) Minimum to keep (pos) or maximum to reject (neg)
(mclip      =      yes) Use median in sigma clipping algorithms?
*(lsigma    =      3.) Lower sigma clipping factor
*(hsigma    =      3.) Upper sigma clipping factor
*(rdnoise   =      17.) ccdclip: CCD readout noise (electrons)
*(gain      =      3.1) ccdclip: CCD gain (electrons/DN)
(snoise     =      0.) ccdclip: Sensitivity noise (fraction)
(pclip      =      -0.5) pclip: Percentile clipping parameter
(blank      =      0.) Value if there are no pixels
(mode       =      ql)
More_____
```

ESC-? for HELP

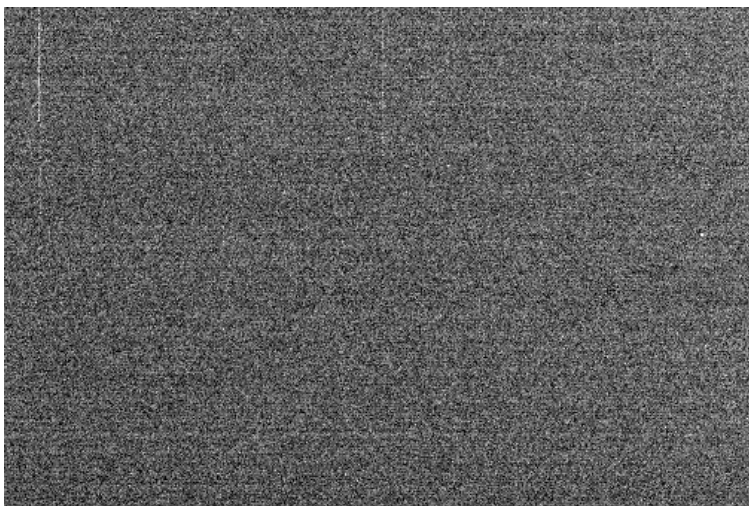
Kuva 7: zerocombine -komennon parametrien editointi. Tärkeimmät parametrit on merkitty tähdellä, loput parametrit voi yleensä jättää kuvan osoittamiin default-arvoihin.

output : Yhdistetyn kuvan nimi.

combine : Kuvien yhdistämistäpa. Vaihtoehdot ovat average tai median. Yhdistämisessä tavoitellaan yleensä mahdollisimman hyvää signaali/kohinasuhdetta ja erilaisten satunnaisten virheiden (esim. kosmisten säteiden) eliminointia. Ensimmäinen tavoite saavutetaan parhaiten laskemalla keskiarvo kussakin pikselissä. Mediaani taas suodattaa parhaiten satunnaiset häiriöt, mutta mediaanikuvan kohina on aina hieman keskiarvokuva suurempi. Valitaan siis keskiarvo (average) ja hoidetaan satunnaisten häiriöiden eliminointi erillisellä algoritmilla (ks. reject alla).

reject : Algoritmi, jolla satunnaiset häiriöt hylätään. Vaihtoehtoja on useita: none|minmax|ccdclip|crreject|sigclip|avsigclip|pclip. Tarkan kuvauksen kustakin vaihtoehdosta saa kirjoittamalla help combine (zerocombine on IRAFin skripti, joka käyttää combine -komentoa kuvien yhdistämiseen). Käytäntö on osoittanut vaihtoehdon ccdclip toimivan hyvin, joten valitaan se. Kun reject = ccdclip hylätään kaikki pikselit, jotka eivät ole konsistentteja CCD-kameran kohinaparametrien kanssa. Nämä parametrit (vahvistuskerroin ja lukukohina) annetaan myös zerocombine:lle (ks. alla).

lsigma, hsigma : Yllämainittu ccdclip -algoritmi arvioi kameran kohinaparametrien perusteella odotetun rms kohinan  $\sigma$  jokaisessa pikselissä ja hylkää kaikki pikselit, jotka ovat



Kuva 8: Yhdistetty bias -kuva (Tuorlan ST-8, neljän kuvan keskiarvo).

$l\sigma \times \sigma$  ADUa kuvan mediaanitason alapuolella tai  $h\sigma \times \sigma$  ADUa sen yläpuolella. Käytäntö on taas osoittanut, että  $l\sigma, h\sigma = 3.0$  on hyvä arvo., sillä satunnaiset virheet, kuten kosmiset säteet, ovat lähes poikkeuksetta tämän alueen ulkopuolella.

`rdnoise`, `gain`: Käytetyn CCD-kameran kohinaparametrit (lukukohina ja vahvistuskerroin). Kuvan 7 arvot sopivat Tuorlan SBIG ST-1001E -kameralle. Mikäli olet käyttänyt jotain muuta kameraa, täytyy tähän laittaa vastaavat arvot.

Kun parametrit on editoitu kuvan 7 mukaisiksi, poistu editorista ja aja komento. Tuloksena on yhdistetty bias -kuva `avbias.fits`. Tarkasta, että `avbias` on "järkevä", ts. että sen keskimääräinen intensiteetti on todella yksittäisten bias -kuvien keskiarvo ja että kohina on pienentynyt kertoimella  $\sqrt{N}$ , missä  $N$  on yhdistettyjen kuvien lukumäärä. Kohinan voi mitata esim. `imexamine:n m-näppäimellä`.

### 3.1.2 Bias -vähennyksen tekeminen

Ennen bias -vähennystä on hyvä tutkia, onko bias-taso vakio yli koko kentän vain riippuko se paikasta CCD:llä. Tutki tarkkaan yhdistettyä bias -kuvaa. Onko kuvan intensiteetti vakio (satunnaista kohinaa lukuunottamatta) vai muuttuuko se kuvan yli? Esim. aikaisemmin Tuorlassa käytetyssä ST-8 -kamerassa näkyi bias -kuviissa satunnaisten pikselistä toiseen -variaatioiden lisäksi heikkoja vaakaraitoja (kuva 8), mutta niiden paikka ja intensiteetti vaihtelevat kuvasta toiseen ja ne ovat siten satunnaisia. Joskus voi olla vaikea päättää onko jokin piirre kuvassa satunnainen vai pysyvä. Mitä useampia bias -kuvia on otettu, sitä helpompaa asian tutkiminen on.

Mikäli bias -taso riippuu paikasta CCD:llä täytyy yhdistetty bias -kuva vähentää kaikista kuvista. Mikäli bias taso on vakio, riittää periaatteessa keskimääräisen bias -tason (puhdas luku) vähentäminen. Näissä töissä kuitenkin vähennetään aina bias -kuva, vaikka silloin lisätäänkin kuvaan hieman kohinaa. Lisätty kohina on kuitenkin hyvin pieni verrattuna kirkkaan taustataivaan aiheuttamaan fotonikohinaan.

Tee lista niistä kuvista (esim. `biasvah`), joihin bias -vähennys tehdään. Tähän listaan kuuluvat yleensä kaikki muut kuvat paitsi itse bias -kuvat, eli dark -kuvat, flat-field -kuvat ja kohteiden kuvat. Kaikki redusointioperaatiot, myös bias -vähennys, suoritetaan `ccdproc` -

komennolla. Kirjoita `epar ccdproc` ja saat `ccdproc`:in parametrit editoitaviksi (kuva 9). Aseta parametrit kuvan 9 mukaisesti (tarkista kuitenkin taas default -arvot).

Tärkeimpien parametrien merkitys on :

`images` : Kuva tai kuvat, joihin kuvankäsittelyoperaatiot kohdistetaan.

`output` : Käsittelyn tuloksena syntyvät kuvat. Mikäli tämä jätetään tyhjäksi, korvataan käsittelemättömät kuvat käsitellyillä. Ensimmäisissä kokeiluissa on ehkä syytä luoda toinen lista, jossa ovat käsiteltyjen kuvien nimet (eri nimet kuin alkuperäiset). Huomaa, että `output` -kuvia täytyy olla yhtä monta kuin `images` -kuvia.

`ccdtype` : Käsiteltävien kuvien tyyppi (`bias`, `dark`, ...). Koska Tuorlan CCD-kuvat eivät sisällä tietoa kuvan tyypistä, jätetään tämä tyhjäksi.

`fixpix` : Korjataan huonot pikselit interpoloimalla?

`overscan` : Käytetäänkö `overscan` -aluetta `bias` -tason määrittämiseen? Joissakin CCD-kameroissa on mahdollista käyttää erillistä `overscan` -aluetta `bias` -tason muutosten seuraamiseen. ST-1001E -kamerassa tätä mahdollisuutta ei kuitenkaan ole.

`trim` : Tallennetaanko vain osa lopputuloksesta? Joskus esim. kuvan laatu on huono CCD-sirun reunoilla, jolloin ne voidaan jättää käsitelystä kuvasta pois.

`zerocor` : Vähennetäänkö `bias` -kuva?

`darkcor` : Vähennetäänkö `dark` -kuva?

`flatcor` : Jaetaanko `flat-field` -kuvalla?

`zero` : `Bias` -kuvan nimi.

`dark` : `Dark` -kuvan nimi.

`flat` : `Flat-field` -kuvan nimi.

Kun parametrit on asetettu kuvan 9 mukaisesti aja komento, jolloin IRAF vähentää `bias` -kuvan `avbias` jokaisesta listan `biasvah` kuvasta. `Bias` -vähennys on nyt tehty. Huomaa, että tässä on oletettu `bias` -tason pysyvän vakiona koko havaintoyön aikana, mikä ei aina välttämättä pidä paikkaansa. `Bias` -tason muutoksia voi seurata ottamalla useita `biaksia` yön aikana. Näitä `bias` -kuvia voi myös käyttää `bias` -tason tarkempaan korjaamiseen, mikäli se on tarpeen.

I R A F  
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = ccdred  
TASK = ccdproc

```
*images = @biasvah List of CCD images to correct
*(output = ) List of output CCD images
*(ccdtype= ) CCD image type to correct
(max_cac= 0) Maximum image caching memory (in Mbytes)
(noproc = no) List processing steps only

*(fixpix = no) Fix bad CCD lines and columns?
*(oversca= no) Apply overscan strip correction?
*(trim = no) Trim the image?
*(zerocor= yes) Apply zero level correction?
*(darkcor= no) Apply dark count correction?
*(flatcor= no) Apply flat field correction?
(illumco= no) Apply illumination correction?
(fringec= no) Apply fringe correction?
(readcor= no) Convert zero level image to readout correction?
(scancor= no) Convert flat field image to scan correction?
(readaxi= line) Read out axis (column|line)
(fixfile= ) File describing the bad lines and columns
(biassec= ) Overscan strip image section
(trimsec= ) Trim data section
*(zero = avbias) Zero level calibration image
*(dark = ) Dark count calibration image
*(flat = ) Flat field images
(illum = ) Illumination correction images
(fringe = ) Fringe correction images
(minrepl= 1.) Minimum flat field value
(scantyp= shortscan) Scan type (shortscan|longscan)
(nscan = 1) Number of short scan lines

(interac= no) Fit overscan interactively?
(funcio= legendre) Fitting function
(order = 1) Number of polynomial terms or spline pieces
(sample = *) Sample points to fit
(naverag= 1) Number of sample points to combine
(niterat= 1) Number of rejection iterations
(low_rej= 3.) Low sigma rejection factor
(high_re= 3.) High sigma rejection factor
(grow = 0.) Rejection growing radius
(mode = ql)
```

ESC-? for HELP

Kuva 9: Ccdproc -komennon parametrit. Kuvan parametrit on asetettu bias -vähennystä varten. Tähdellä on merkitty parametrit, joita tämän työn kuluessa täytyy muuttaa.



I R A F

Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = ccdred

TASK = darkcombine

```
*input      =      @darkit List of dark images to combine
*(output =      avdark) Output dark image root name
*(combine=      average) Type of combine operation
*(reject =      avsigclip) Type of rejection
*(ccdtype=      ) CCD image type to combine
*(process=      no) Process images before combining?
(delete =      no) Delete input images after combining?
(clobber=      no) Clobber existing output image?
*(scale =      exposure) Image scaling
(statsec=      ) Image section for computing statistics
(nlow =      0) minmax: Number of low pixels to reject
(nhigh =      1) minmax: Number of high pixels to reject
(nkeep =      1) Minimum to keep (pos) or maximum to reject (neg)
(mclip =      yes) Use median in sigma clipping algorithms?
*(lsigma =      3.) Lower sigma clipping factor
*(hsigma =      3.) Upper sigma clipping factor
(rdnoise=      0.) ccdclip: CCD readout noise (electrons)
(gain =      1.) ccdclip: CCD gain (electrons/DN)
(snoise =      0.) ccdclip: Sensitivity noise (fraction)
(pclip =      -0.5) pclip: Percentile clipping parameter
(blank =      0.) Value if there are no pixels
(mode =      ql)
```

ESC-? for HELP

Kuva 10: Darkcombine -komennon parametrit.

## 3.2 Dark -vähennys

### 3.2.1 Dark -kuvien yhdistäminen

Dark -kuvat yhdistetään darkcombine -komennolla. Editoi ensin lista dark -kuvista. Anna sitten komento `epar darkcombine`, jolloin kuvan 10 mukainen ruutu aukeaa. Darkcombine -komento on periaattessa aivan sama kuin `zerocombine` yhtä poikkeusta lukuunottamatta. Ennen yhdistämistä dark -kuvat pitää skaalata samaan valotusaikaan, minkä vuoksi asetetaan `scale = exposure`, jolloin darkcombine lukee valotusajan kuvan otsikosta. Tämä edellyttää, että kuvan otsikossa on kenttä `EXPTIME`, jossa valotusaika on annettu (ks. kuva 6).

Huomaa myös että kuvassa 10 on käytetty `reject = avsigclip` eikä `reject = ccdclip`. Molempien algoritmien pitäisi periaatteessa toimia yhtä hyvin. Muista asettaa `rdnoise` ja `gain` oikeisiin arvoihin mikäli käytät `reject = ccdclip`. Kun parametrit on asetettu, aja darkcombine -komento ja tarkista taas, että yhdistetty kuva on "järkevä".

### 3.2.2 Dark -vähennyksen tekeminen

Editoi lista, jossa ovat kaikki ne kuvat, joihin dark -vähennys tehdään (eli flat-field -kuvat ja kohteiden kuvat), esim. *darkvah*. Dark -vähennys tehdään `ccdproc` -komennolla. Aseta

```
image      = @darkvah
darkcor    = yes      (muut parametrit väliltä fixpix-scancor = no)
dark       = avdark   (yhdistetyn dark -kuvan nimi)
```



Kuva 11: Kolmen dark-kuvan keskiarvo (Tuorlan ST-8). Huomaa lukuisat "kuumat pikselit".

ja aja komento. Dark -vähennyksen jälkeen kuvien tulisi näyttää huomattavasti selkeämmiltä, kuvan kohinan pitäisi olla pienempi ja kuumien pikselien pitäisi eliminoidua lähes kokonaan. Kuvaan jää vielä joitakin teräviä piikkejä. Osa niistä on ns. kosmisia säteitä, jotka aiheutuvat CCD-sirulle osuvista kosmisen säteilyn hiukkasista, osa on pikseleitä, joiden pimeävirta ei ole vakio.

### 3.3 Flat-field -korjaus

#### 3.3.1 Flat-field -kuvien yhdistäminen

Editoi lista flat-field -kuvista, esim. *flatit*. Editoi *flatcombine* -komennon parametreja ja aseta ne kuvan 12 mukaisiksi. Flatcombine on hyvin samankaltainen *zerocombine:n* ja *darkcombine:n* kanssa. Ainoa ero jälkimmäiseen on, että kuvia ei skaalata valotusajan avulla vaan mittaamalla kuvan kirkkaus sen keskeltä ja skaalamalla kaikki kuvat samaan kirkkauteen. Parametri *statsec* kertoo mistä kohtaa kuvaa kirkkaus mitataan. Ajettuasi komennon tarkista taas yhdistetty kuva, mm. että kohina on pienentynyt (ei välttämättä kertoimella  $\sqrt{N}$ , mieti miksi) ja ettei yhdistäminen ole vääristänyt kuvaa millään lailla.

#### 3.3.2 Flat-field -korjauksen tekeminen

Editoi lista kuvista, joihin flat-field -korjaus tehdään (tavallisesti kohteiden kuvat), esim. *flatdiv*. Flat-field -korjaus tehdään myös *ccdproc*:illa. Aseta

```
image      = @flatdiv
flatcor    = yes          (muut parametrit väliltä fixpix-scancor = no)
flat       = avflat      (yhdistetyn flat-field -kuvan nimi)
```

ja aja komento. Tarkista lopullisista kuvista että ne ovat kunnossa, eli että :

I R A F

Image Reduction and Analysis Facility

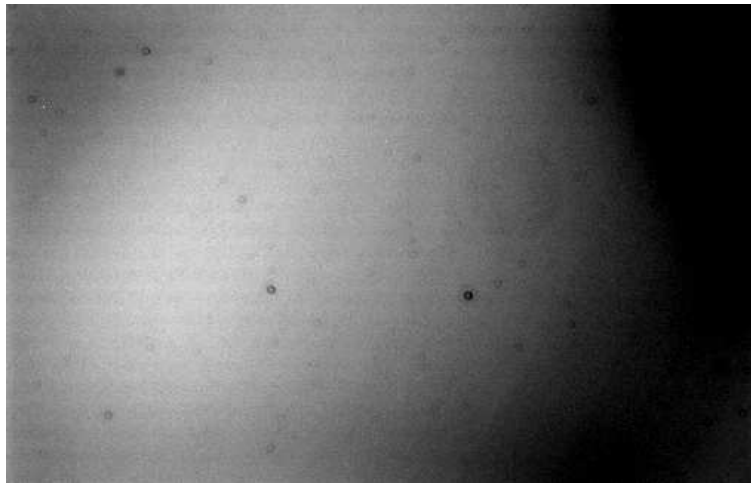
PACKAGE = ccdred

TASK = flatcombine

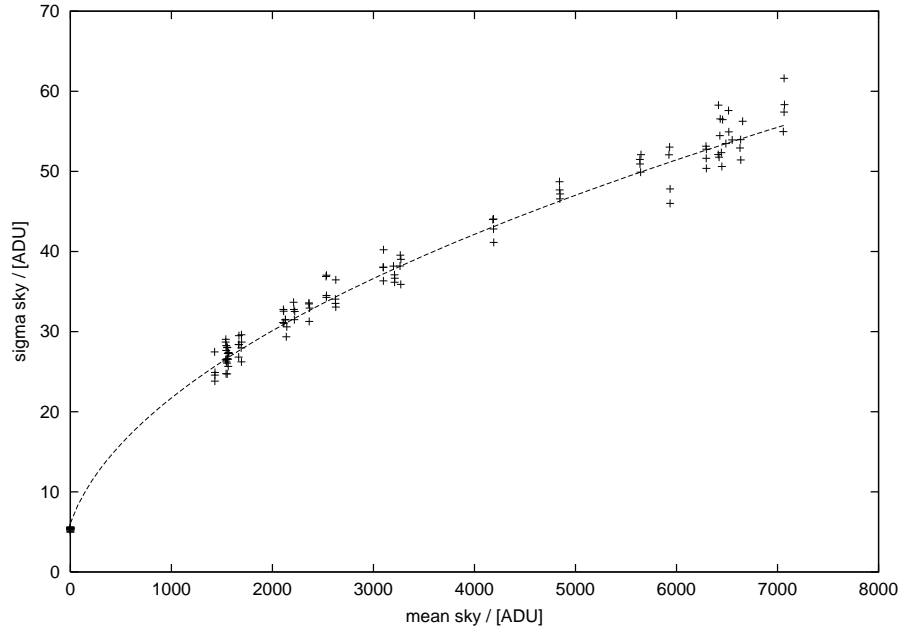
```
*input      =      @flatit List of flat field images to combine
*(output    =      avflat) Output flat field root name
*(combine   =      average) Type of combine operation
*(reject    =      avsigclip) Type of rejection
*(ccdtype   =      ) CCD image type to combine
*(process   =      no) Process images before combining?
*(subsets   =      no) Combine images by subset parameter?
(delete     =      no) Delete input images after combining?
(clobber    =      no) Clobber existing output image?
*(scale     =      median) Image scaling
*(statsec   =      [200:300,100:200]) Image section for computing statistics
(nlow      =      1) minmax: Number of low pixels to reject
(nhigh     =      1) minmax: Number of high pixels to reject
(nkeep     =      1) Minimum to keep (pos) or maximum to reject (neg)
(mclip     =      yes) Use median in sigma clipping algorithms?
*(lsigma    =      3.) Lower sigma clipping factor
*(hsigma    =      3.) Upper sigma clipping factor
(rdnoise    =      0.) ccdclip: CCD readout noise (electrons)
(gain      =      1.) ccdclip: CCD gain (electrons/DN)
(snoise    =      0.) ccdclip: Sensitivity noise (fraction)
(pclip     =      -0.5) pclip: Percentile clipping parameter
(blank     =      1.) Value if there are no pixels
(mode      =      ql)
```

ESC-? for HELP

Kuva 12: Flatcombine -komennon parametrin.



Kuva 13: Neljän flat-field -kuvan keskiarvo (Tuorlan ST-8). Kuvan kirkkaus ei ole tasainen johtuen CCD-sirun herkkyysvaihteluista (kirkkauden muutos on n. 12% kulmasta kulmaan). Pienet renkaan muotoiset varjot aiheutuvat CCD-kameran ikkunalla olevasta pölystä.



Kuva 14: Taustataivaan kohina taustan kirkkauden funktiona Tuorlan ST-8 -kameralla. Katkoviiva antaa kameran kohinaparametrien perusteella odotetun riippuvuuden.

- Tausta on tasainen, ts. että siinä ei ole gradientteja mihinkään suuntaan. Tausta on harvoin täysin tasainen johtuen siitä, että flat-field -kuvat otetaan usein kuvun sisäpinnasta tms. lähteestä, jolloin valo ei tule teleskooppiin samalla tavalla kuin taivaalta. Iltataivaasta otetut flat-field -kuvat ovat parempia tässä suhteessa, mutta nekään eivät takaa sataprosenttista tulosta, sillä teleskooppiin saapuu mm. hajavaloa eri suunnista. Mikäli kuvassa esiintyy gradientti, jonka suuruus (laidasta laitaan) on suurempi kuin 1% taustan kirkkaudesta, täytyy se vielä korjata ennen fotometrian aloittamista (ks. kappale 3.4).
- Taustataivaan kohina on konsistentti kameran kohinaparametrien kanssa (kuva 14). Mittaa imexamine:lla taustan kirkkaus ja rms kohina yhdestä kuvasta. Mikäli taustan kirkkaus on  $N$  ADUa, pitäisi rms kohinan  $\sigma$  olla

$$\sigma = \frac{\sqrt{G * N + R^2}}{G} \text{ ADU}$$

missä  $G$  on kameran vahvistukerroin (gain) ja  $R$  lukukohina. Mikäli  $\sigma$  poikkeaa huomattavasti “ennustetusta”, on redusoinnissa tapahtunut jokin virhe. Toista mittausta muutamalle kuvalle ja varmista, että kohinan suuruus on oikein.

- Kohteiden päällä ei ole “kosmisiä säteitä”. Kosmiset säteet ovat yleensä lähinnä esteettinen häiriö, mutta jos sellainen osuu kohteen tai vertaustähden päälle, täytyy se poistaa ennen fotometrinen mittausten tekemistä (kappale 3.4).

## 3.4 Jälkisiivous

### 3.4.1 Taustan tasoittaminen

Taustan tasoittaminen tehdään luomalla ensin malli taustataivaan vaihteluista ja korjamalla tällä mallilla tausta “suoraksi”. Malli luodaan `insurfit` -komennolla. Kun parametrit on

asetettu kuvan 15 mukaisesti, sovittaa `imsurfit` taustataivaaseen parhaiten sopivan pinnan ja luo mallikuvan taustasta tämän perusteella. Tärkeimpien parametrien merkitys on :

`input` : Kuva, johon pinta sovitetään.

`output` : Tulokuva. Tämä voi olla sovitettu pinta, residuaalikuva, jne. (katso parametri `type_ou`).

`xorder`, `yorder` : Sovitettavan pinnan polynomiaste  $x$ - (vaaka) ja  $y$ - (pysty) suunnassa. Kun valitaan `functio = leg` (ks. alla), muodostuu sovittettava pinta Legendren polynomeista. Parametrit `xorder` ja `yorder` antavat polynomin korkeimman asteen (1 = vakio, 2 = suora, 3 = 2. asteen polynomi, 4 = 3. asteen polynomi, jne. ). Esim. kuvassa 15 on käytetty `xorder = yorder = 3`, eli sovittettava pinta on paraabelin muotoinen sekä  $x$ - että  $y$ -suunnassa.

`type_ou` : Tulokuvan tyyppi. Tulokuva voi olla esim sovitettu pinta (`fit`), residuaalit sovituksen suhteen (`residual`), jne.

`functio` : Käytetty sovitusfunktio.

`cross_t` : Käytetäänkö sovituspinnan kuvaamiseen myös ristitermejä, esim. muotoa  $xy$  tai  $xy^2$  olevia termejä.

`xmedian`, `ymedian` : Sovitusta ei tehdä suoraan pikseli pikseliltä vaan ensin lasketaan mediaaniarvo `xmedian`  $\times$  `ymedian` kokoiselta alueelta ja tehdään sovitus näihin mediaaniarvoihin. Koska taustan muutokset ovat hyvin "hitaita", voidaan käyttää `xmedian = ymedian = 50`. Samalla helpotetaan tähtien eliminointia kuvasta (ks. alla) ja vähennetään laskentakapasiteetin tarvetta.

`median_`, `lower`, `upper`, `ngrow`, `niter` : Huonojen pikselien hylkäysparametrit. Koska sovitus halutaan tehdä nimenomaan taustaan, täytyy esim. tähtien kohdalla olevat pikselit hylätä. Ennen mediaanin laskemista erillinen hylkäysalgoritmi tutkii jokaisen `xmedian`  $\times$  `ymedian` kokoisen alueen sisällä mitkä pikselit ovat enemmän kuin `lower`  $\times \sigma$  mediaanitason alapuolella tai `upper`  $\times \sigma$  sen yläpuolella ja hylkää nämä pikselit. Mikäli jokin pikseli hylätään, hylätään myös kaikki pikselit säteen `ngrow` etäisyydeltä hylätystä pikselistä. Hylkäysalgoritmi toistetaan `niter` kertaa.

`regions` : Mitkä osat kuvasta sovitetään. Tässä työssä käytetään `regions = invcirc`, eli sovitus tehdään koko kuvaan lukuunottamatta ympyränmuotoista aluetta. Sovituksen ulkopuolelle jäävä alue asetetaan kentän kirkkaimman tähden kohdalle.

`circle` : Sovituksen ulkopuolelle jäävän ympyränmuotoisen alueen määrittely:  $x$ -koordinaatti,  $y$ -koordinaatti ja säde.

Tarkemman kuvauksen `imsurfit` -komennon parameterista saa kirjoittamalla `help imsurfit`. Kuvan 15 parametreilla sovituksen pitäisi yleensä onnistua, ts. tuloksena syntynyt kuva seuraa taustan muutoksia kohtuullisen tarkasti. Mikäli tulos ei tyydytä auttaa yleensä hylkäysparametrien säätäminen. Joskus voi joutua kokeilemaan pitkään, ennekuin toimivat parametrit löytyvät. Tulosta voi pitää tyydyttävänä, mikäli tasoitetussa kuvassa gradientit ovat pienempiä kuin 1% taustan tasosta.

Kuvan tasoittaminen tehdään seuraavasti : laske ensin `imsurfit` -komennolla tehdyn mallikuvan keskiarvo

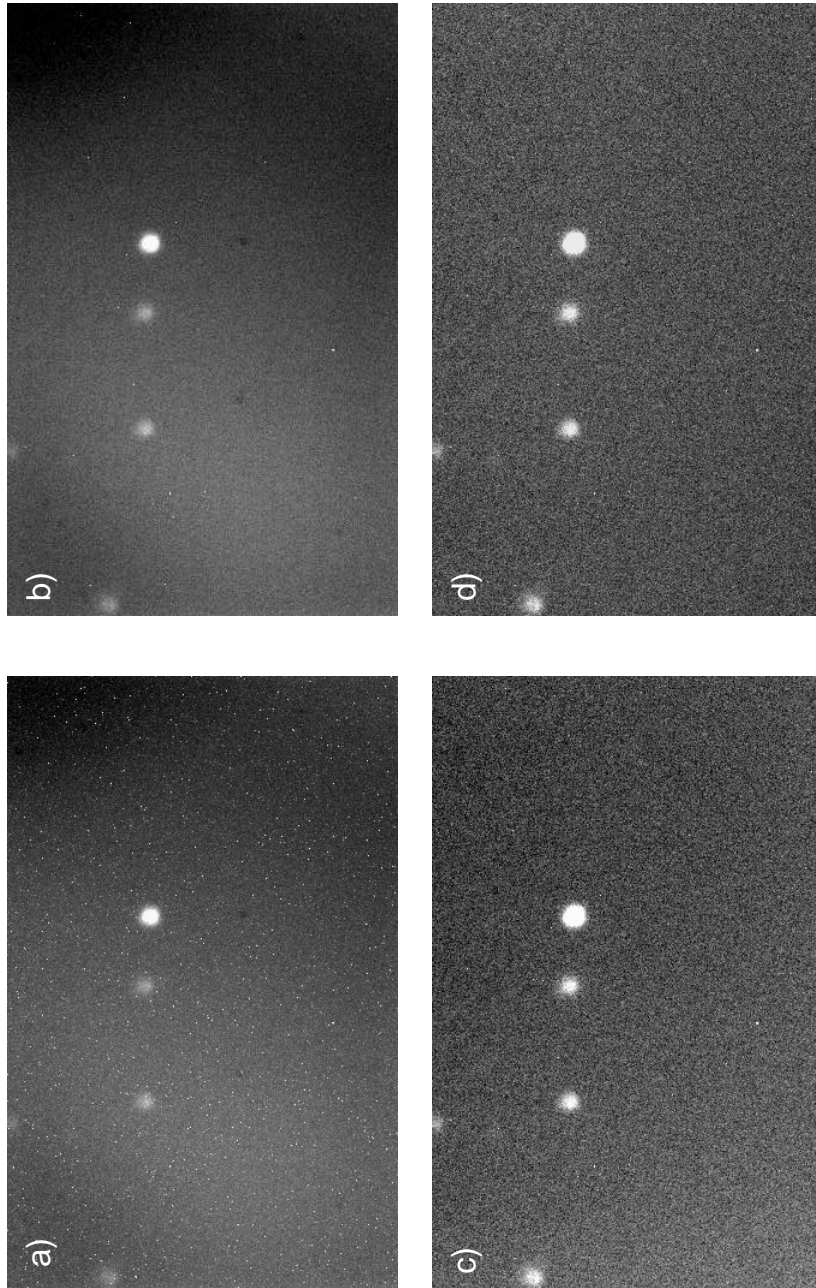
I R A F  
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = imfit  
TASK = imsurfit

\*input = BL090127 Input images to be fit  
\*output = surf Output images  
\*xorder = 3 Order of function in x  
\*yorder = 3 Order of function in y  
\*(type\_ou= fit) Type of output (fit,residual,response,clean)  
\*(functio= leg) Function to be fit (legendre,chebyshev,spline3)  
\*(cross\_t= no) Include cross-terms for polynomials?  
\*(xmedian= 50) X length of median box  
\*(ymedian= 50) Y length of median box  
\*(median\_= 50.) Minimum fraction of pixels in median box  
\*(lower = 3.) Lower limit for residuals  
\*(upper = 3.) Upper limit for residuals  
\*(ngrow = 5) Radius of region growing circle  
\*(niter = 10) Maximum number of rejection cycles  
\*(regions= invcirc) Good regions (all,rows,columns,border,sections,c  
(rows = \*) Rows to be fit  
(columns= \*) Columns to be fit  
(border = 50) Width of border to be fit  
(section= ) File name for sections list  
\*(circle = 123 108 30) Circle specifications  
(div\_min= INDEF) Division minimum for response output  
(mode = ql)

ESC-? for HELP

Kuva 15: Imsurfit -komenttien parametrin.



Kuva 16: Esimerkki redusoinnista: a) "raaka" kuva, b) bias- ja dark -vähennetty kuva, c) kuva on jaettu flat-field -kuvalla, d) taustan gradientti on poistettu.

`imstat surf`

ja kirjoita kuvan keskimääräinen intensiteetti ylös. Jaa kuva `surf` keskiarvolla, esim.

`imar surf / 1288 surf`

jolloin sen keskiarvoksi tulee = 1.0. Jaa tällä kuvalla korjattava kuva, jolloin taustan pitäisi tasottua, esim.

`imar BL090127 / surf BL090127`

Huomaa, että sama korjauskuva toimii yleensä hyvin kaikkiin samasta kohteesta otettuihin kuviin, sillä teleskoopin suunta on pysynyt likimain vakiona, jolloin hajavalon määräkin on vakio. Kun teleskooppi käännetään uuteen kohteeseen muuttuu hajavalon suunta ja määrä, ja tarvitaan uutta korjauskuva.

### 3.4.2 Kosmisten säteiden poistaminen

Kosmisten säteiden poistamista varten in IRAFissa komento `cosmicrays`. Tämä komento on hyvä silloin kun halutaan poistaa suuri määrä kosmisiä säteitä kerrallaan. Koska Tuorlan CCD-kuvissa tähän harvoin joudutaan (ellei pyritä visuaalisesti parhaaseen lopputulokseen), käytetään `cosmicrays` -komennon sijasta `imedit` -komentoa. Näissä harjoitustöissä kosmisten säteiden poisto on tarpeellista vain silloin kun ne sijaitsevat niin lähellä mittavia kohteita, että ne ovat mittausapertuurin sisällä. Kuvassa 17 on annettu `imedit` -komennon parametrit. Aseta parametrit kuvan mukaisiksi, ja aja komento. `Imedit` odottaa nyt näppäinkomentoa. Mene kursorilla poistettavan kosmisen säteen päälle ja paina `b`-näppäintä, jolloin `imedit` korvaa "huonot" pikselit lähiympäristön pikseleillä. Kun kosmiset säteet on poistettu, poistu `q`-näppäimellä. Kirjoittamalla `help imedit` saat tarkempaa tietoa komennon toiminnasta ja eri parametrien merkityksestä.



I R A F  
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = tv  
TASK = imedit

```
*input =          BL091027 Images to be edited
output =          Output images
(cursor =         ) Cursor input
(logfile=         ) Logfile for record of cursor commands
(display=         yes) Display images?
(autodis=        yes) Automatic image display?
(autosur=        no) Automatic surface plots?
(apertur=        circular) Aperture type
(radius =         2.) Substitution radius
(search =         2.) Search radius
(buffer =         1.) Background buffer width
(width =          2.) Background width
(xorder =         2) Background x order
(yorder =         2) Background y order
(value =          0.) Constant value substitution
(sigma =          INDEF) Added noise sigma
(angh =          -33.) Horizontal viewing angle (degrees)
(angv =           25.) Vertical viewing angle (degrees)
(command= display $image 1 erase=$erase fill=yes order=0 >& dev$null)
(graphic=        stdgraph) Graphics device
(default=        b) Default option for x-y input
(fixpix =        no) Fixpix style input?
(mode =          ql)
```

ESC-? for HELP

Kuva 17: Imedit -komennon parametrin.

I R A F  
Image Reduction and Analysis Facility

```
PACKAGE = immatch
TASK = imshift
```

```
*input = @kuvat Input images to be fit
*output = @kuvat2 Output images
*xshift = 0. Fractional pixel shift in x
*yshift = 0. Fractional pixel shift in y
*(shifts_ = siirrot) Text file containing shifts for each image
*(interp_ = poly5) Interpolant (nearest,linear,poly3,poly5,spline3,
(boundar= nearest) Boundary (constant,nearest,reflect,wrap)
(constan= 0.) Constant for boundary extension
(mode = ql)
```

ESC-? for HELP

Kuva 18: Imshift -komennon parametrit.

## 4 CCD-kuvien yhdistämisestä

Joskus voi olla tarpeen yhdistää (laskea summa, keskiarvo, mediaani, ...) useampi kuva yhdeksi kuvaksi signaali/kohinasuhteen parantamiseksi. Esim. kun kohde on hyvin himmeä on syytä summata kaikki kuvat fotometrian helpottamiseksi.

Koska tähtien paikat eivät pysy samoina kuvasta toiseen (teleskooppi ei pysty täysin seuraamaan tähtien liikettä taivaalla), täytyy kuvat siirtää ennen summaamista siten, että kentan tähdet ovat kohdakkain. Valitse yksi kuvista referenssikuvaksi ts. kuvaksi, jonka mukaan muut kuvat siirretään. Ellei mitään muuta painavaa syytä ole, voi referenssikuvaksi valita havaintosarjan ensimmäisen kuvan. Valitse sen jälkeen jokin kirkas (mutta ei saturoitunut) tähti, ja mittaa sen x- ja y -koordinaatit kaikissa havaintosarjan kuvissa (käytä esim. `imexamine` -komennon `r-` tai `a-`näppäintä). Pyöristä koordinaatit lähimpään kokonaislukuun. Laske sen jälkeen jokaiselle kuvalle tarvittava siirto x- ja y-suunnassa, jotta tähden koordinaatit olisivat samat kuin referenssikuvassa. Alla on esimerkin vuoksi annettu neljän kuvan sarja ja niistä mitatut koordinaatit yhdelle tähdelle. Taulukossa on annettu myös tarvittavat siirrot. Huomaa, että referenssikuvan (tässä esimerkissä ensimmäinen kuva) siirto on aina = 0.

Kuva	x	y	xshift	yshift
BL090123	163	88	0	0
BL090124	160	88	+3	0
BL090125	164	90	-1	-2
BL090126	164	91	-1	-3

Kuvien siirtäminen tapahtuu `imshift` -komennolla (kuva 18). Komennon voi ajaa yhdelle kuvalle kerrallaan tai käyttämällä listoja (ks. `help imshift`). Kuvan 18 esimerkin tapauksessa kuvat BL090123-126 ovat listassa `kuvat`, kukin kuva omalla rivillään, toisessa listassa `kuvat2` ovat siirrettyjen kuvien nimet (esim. `shBL090123-126`) ja kolmannessa tiedostossa `siirrot` ovat vaadittavat siirrot, kukin omalla rivillään. Kun kaikki kuvat on siirretty, voi kuvat summata `imsum` -komennolla. Tarkista vielä summatusta kuvasta, että siirrot oli laskettu oikein, ts, että tähdet näyttävät "normaaleilta".

## 5 Fotometria

Tuorlan monitorointiprojektissa käytetään ns. differentiaalifotometriaa, ts. kentästä mitataan kohteen lisäksi tunnetujen vertaustähtien magnitudit, joista sitten kohteen kirkkaus voidaan laskea. Kohteen magnitudin mittausta tapahtuu periaatteessa seuraavasti :

1. Valitaan mittaussapertuurin halkaisija.
2. Keskitetään mittaussapertuuri mitattavan kohteen päälle.
3. Mitataan kokonaisvuo mittaussapertuurin sisällä.
4. Mitataan taustataivaan kirkkaus kohteen ympäriltä.
5. Vähennetään taustataivaan vuo kokonaisvuosta, jolloin saadaan kohteen vuo.
6. Lasketaan kohteen magnitudi kaavasta

$$m = m_0 - 2.5 \log(F)$$

missä  $m_0$  on nollapistemagnitudi ja  $F$  on kohteen vuo. Käytännössä IRAF suorittaa kohdat 1–6 yhdellä komennolla ja käyttäjän tarvitsee vain huolehtia mittaussapertuurin asettamisesta. Mittauksen tuloksena ei saada heti kohteiden “oikeita” magnitudia vaan ns. instrumentaalimagnitudia. Koska vertaustähtien oikeat magnitudit tunnetaan, voidaan määrittää instrumentaalimagnitudien ja oikeiden magnitudien välinen erotus ja tästä edelleen kohteen oikea magnitudi.

### 5.1 Phot -komennon parametrit

Fotometriakomennot löytyvät paketista noao/digiphot/daophot. Kirjoita

```
epar phot
```

Jolloin kuvan 19 mukainen ruutu aukeaa. Tärkeimmät parametrit ovat :

`image` : Kuva, jossa ovat mitattavat kohteet.

`coords` : Kohteiden x- ja y-koordinaatit kuvassa. Koska mittaukset tehdään interaktiivisesti, ts. kohteet osoitetaan hiirellä, jätetään tämä tyhjäksi.

`output` : Tulostiedoston nimi. Tähän voi laittaa minkä nimen tahansa, mutta suositeltavaa on käyttää `default` -vaihtoehtoa. Tällöin tulostiedosto nimetään `nimi.mag.N`, missä `nimi` on kuvan nimi ja `N` juokseva numero. Kuvan 19 tapauksessa tulostiedoston nimi olisi `BL090101.mag.1`. Mikäli mittausta tehdään samaan kuvaan uudestaan, tallentuisivat tulokset tiedostoon `BL090101.mag.2`, jne.

`datapar` : Dataan liittyvät parametrit, esim. vahvistuskerroin, lukukohina, jne. Asetetaan erikseen (ks. alla).

`centerp` : Apertuurin keskittämiseen liittyvä parametri (ks. alla).

`fitskyp` : Taustataivaan määrittämiseen liittyvät parametrit (ks. alla).

I R A F  
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = daophot  
TASK = phot

```
*image =          BL090101  Input image(s)
*coords =          Input coordinate list(s) (default: image.coo.?)
*output =          default  Output photometry file(s) (default: image.mag.?)
  skyfile =        Input sky value file(s)
  (plotfil=        ) Output plot metacode file
*(datapar=        ) Data dependent parameters
*(centerp=        ) Centering parameters
*(fitskyp=        ) Sky fitting parameters
*(photpar=        ) Photometry parameters
*(interac=        yes) Interactive mode ?
  (radplot=        no) Plot the radial profiles?
  (verify =        )_.verify) Verify critical phot parameters ?
  (update =        )_.update) Update critical phot parameters ?
  (verbose=        )_.verbose) Print phot messages ?
  (graphic=        )_.graphics) Graphics device
  (display=        )_.display) Display device
  (icomman=        ) Image cursor: [x y wcs] key [cmd]
  (gcomman=        ) Graphics cursor: [x y wcs] key [cmd]
(mode =           ql)
```

ESC-? for HELP

Kuva 19: Phot -komennon parametrit.

photpar : Fotometriaparametrit (ks. alla).

interac : Mitataanko kohteet interaktiivisesti (hiirellä osoittamalla) vai käyttäen valmiiksi mitattuja koordinaatteja.

Parametrit `datapar`, `centerp`, `fitskyp` ja `photpar` sisältävät itse asiassa useita parametreja, jotka täytyy asettaa erikseen. Tämän voi tehdä kahdella tavalla. Tapa 1 on mennä `phot`:in editoitiruuudussa halutun parametrin kohdalle ja kirjoittaa `:e`, jolloin halutun parametrin editointiruuutu aukeaa. Poistuminen tapahtuu `<ctrl>-d`:llä, jolloin palataan `phot`:in editointiruuutuun. Tapa 2 on poistua `phot`:in editointiruuudusta ja kirjoittaa esim. `epar datapars` (tai pelkkä `datapars`).

### 5.1.1 Datapars

Kuvassa 20 on annettu dataan liittyvät parametrit, jotka saa esille yllämainitulla tavalla. Tuorlan monitorointidatan tapauksessa riittää, että asettaa lukukohinan ja vahvistuskertoimen. IRAF tarvitsee näitä mitattujen magnitudien virherajojen arvioimiseen, itse magnitudiarvoihin niillä ei ole vaikutusta. Huomaa, että kuvan 20 arvot pätevät vain Tuorlan ST-1001E -kameralle.

### 5.1.2 Centerpars

Nämä parametrit (kuva 21) kontrolloivat apertuurin keskittämistä kohteen päälle. Tärkeimpien parametrien merkitys on :

`calgori` : Apertuurin keskitys algoritmi. Mikäli valitaan `centroid` on kohteen keskipiste

I R A F

Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = daophot  
TASK = datapars

(scale = 1.) Image scale in units per pixel  
(fwhmpsf= 2.5) FWHM of the PSF in scale units  
(emissio= yes) Features are positive ?  
(sigma = 0.) Standard deviation of background in counts  
(datamin= INDEF) Minimum good data value  
(datamax= INDEF) Maximum good data value  
(noise = poisson) Noise model  
(ccdread= ) CCD readout noise image header keyword  
(gain = ) CCD gain image header keyword  
(readnoi= 17.) CCD readout noise in electrons  
\*(epadu = 3.1.) Gain in electrons per count  
(exposur= ) Exposure time image header keyword  
(airmass= ) Airmass image header keyword  
(filter = ) Filter image header keyword  
(obstime= ) Time of observation image header keyword  
(itime = 1.) Exposure time  
(xairmas= INDEF) Airmass  
(ifilter= INDEF) Filter  
(otime = INDEF) Time of observation  
(mode = ql)  
(\$nargs = 0)

ESC-? for HELP

Kuva 20: Fotometrian dataparametrit (datapars).

I R A F  
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = daophot  
TASK = centerpars

```
*(calgori=      centroid) Centering algorithm
*(cbox   =      20.) Centering box width in scale units
  (cthresh=    0.) Centering threshold in sigma above background
*(minsnra=     3.) Minimum signal-to-noise ratio for centering algo
  (cmaxite=   10) Maximum iterations for centering algorithm
*(maxshif=     5.) Maximum center shift in scale units
  (clean  =    no) Symmetry clean before centering
  (rclean =     1.) Cleaning radius in scale units
  (rclip  =     2.) Clipping radius in scale units
  (kclean =     3.) K-sigma rejection criterion in skysigma
  (mkcente=    no) Mark the computed center
  (mode   =     ql)
  ($nargs =     0)
```

ESC-? for HELP

Kuva 21: Mittausaperttuurin keskitysparametrit (centerpars).

sama kuin sen intensiteettijakauman painopiste.

**cbox** : Keskittämis"laatikon" koko. Keskipisteen määrittäminen suoritetaan tämän kokoisen nelikulmaisen alueen sisällä. Hyvä arvo on n. 2 kertaa tähden profiilin puoliarvoveveys (puoliarvovevyyden saa esim. `imexamine:n r-näppäimellä`).

**minsnra** : Minimi signaali/kohinasuhde keskittämiselle. Mikäli kohde on hyvin himmeä ( $S/N < \text{minsnra}$ ), antaa `phot` -komento varoituksen.

**maxshif** : Mikäli laskettu keskipiste on kauempana kuin `maxshift` aloituspisteestä (ts. hiiren paikasta kun mittaus aloitettiin), antaa `phot` varoituksen. Tällä on merkitystä lähinnä tilanteissa, joissa mitataan kahta kohdetta, jotka ovat hyvin lähellä toisiaan. Tällöin saattaa käydä niin, että keskitys algoritmi valitsee "väärän" kohteen.

### 5.1.3 Fitskypars

Näiden parametrien avulla kontrolloidaan taustataivaan mittausta. Taustataivaan tarkka määrittäminen on erittäin tärkeää varsinkin himmeille kohteille, sillä suurin osa aperttuurista mitattusta kokonaisvuosta tulee taustasta. Himmeillä kohteilla voi siten pienikin taustataivaan virhe merkitä suurta virhettä kohteen vuossa. Tärkeimpien parametrien merkitys on (kuvat 22 ja 23):

**salgori** : Algoritmi, jolla taustan taso määritetään. Pikseliarvojen moodi (`mode`) eli jakaumassa eniten esiintyvä arvo toimii käytännössä parhaiten. Moodi on myös vähiten herkkä taustassa esiintyvälle "ylimääräiselle" valolle, kuten kosmisille säteille, tähdille, jne.

**annulus** : Taustataivaan taso määritetään kohteen ympäriltä rengasmaiselta alueelta. Parametri `annulus` antaa tämän renkaan sisäsäteen (kuva 23). Sisäsäde pitäisi valita riittävän kaukaa, jottei siihen osuisi kohteen valoa, muttei liian kaukaa, jotta todella mitattaisiin taustan taso kohteen lähiympäristössä (tarkoitushan on arvioida taustan taso kohteen kohdalla, jos kohde ei olisi siinä). On myös syytä välttää sellaisia arvoja, jotka toisivat kirkkaita kohteita

I R A F  
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = daophot  
TASK = fitskypars

```
*(salgori=          mode) Sky fitting algorithm
*(annulus=         25.) Inner radius of sky annulus in scale units
*(dannulu=        10.) Width of sky annulus in scale units
(skyvalu=         0.) User sky value
(smaxite=        10) Maximum number of sky fitting iterations
(sloclip=         0.) Lower clipping factor in percent
(shiclip=         0.) Upper clipping factor in percent
(snrejec=        50) Maximum number of sky fitting rejection iteratio
(sloreje=         3.) Lower K-sigma rejection limit in sky sigma
(shireje=         3.) Upper K-sigma rejection limit in sky sigma
(khist =         3.) Half width of histogram in sky sigma
(binsize=        0.1) Binsize of histogram in sky sigma
(smooth =        no) Boxcar smooth the histogram
(rgrow =         0.) Region growing radius in scale units
(mksky =         no) Mark sky annuli on the display
(mode =          ql)
($nargs =        0)
```

ESC-? for HELP

Kuva 22: Taustataivaan mittausparametrit (fitskypars).

taustarenkaaseen (himmeeät tähdet tai kosmiset säteet eivät yleensä haittaa).

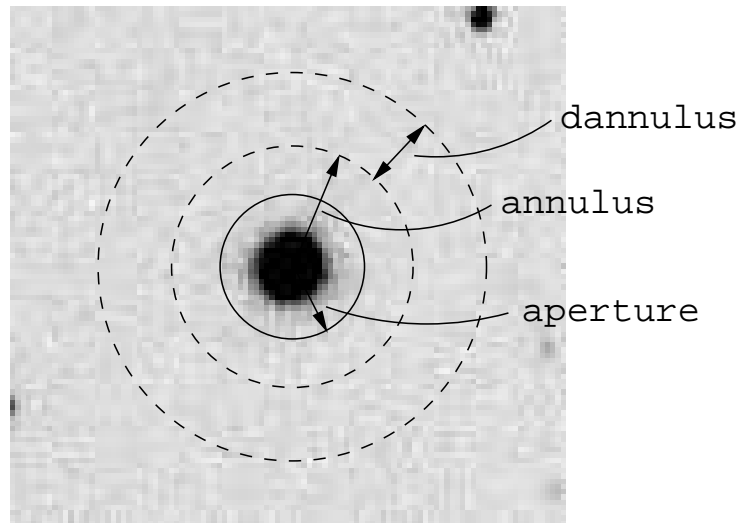
dannulu : Taustarenkaan “paksuus”. Yleensä voi käyttää dannulu = 10 pix.

#### 5.1.4 Photpars

Näiden parametrien avulla säädellään itse mittaustapahtumaa (kuvat 23 ja 24) :

aperture : Mittauspertuurin säde pikseleissä (kuva 23). Optimaalinen mittausedapertuuri differentiaalifotometriassa on  $r_{AP} \sim 1 - 1.5 \times \text{FWHM}$ , missä FWHM on tähden profiilin puoliarvoveveys. Tuorlan monitorointikohteilla kuitenkin käytetään aina  $r_{AP} = 7.5$  kaarisekuntia, sillä monilla kohteilla on huomattavan kirkas emogalaksi, jonka magnitudi riippuu mittausedapertuurin säteestä (Huom! Poikkeus: kohteelle Mkn 180 käytetään  $r_{AP} = 5.0$  kaarisekuntia). Tähän kohtaan sijoitetaan siis sädettä  $r_{AP} = 7.5$  kaarisekuntia vastaava pikseliarvo, jonka voi laskea taulukon 1 avulla.

zmag : Nollapistemagnitudi. Tällä ei differentiaalifotometriassa ole merkitystä, sillä mitataan vain magnitudieroja. Tämän voi mittausten edistyessä kuitenkin asettaa sellaiseen arvoon, että mitatut instrumentaalimagnitudit ovat lähellä oikeita arvoja.



Kuva 23: Fotometriparametrien merkitys.

```

                                I R A F
                                Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = daophot
  TASK = photpars

(weighti=      constant) Photometric weighting scheme
*(apertur=      15) List of aperture radii in scale units
*(zmag  =      25.) Zero point of magnitude scale
(mkapert=      no) Draw apertures on the display
(mode  =      q1)
($nargs =      0)

                                ESC-? for HELP

```

Kuva 24: Fotometian mittausparametrit (photpars).



## 5.2 Mittausten suoritus

Kun kaikki parametrit on asetettu, näytä mitattava kuva ds9:n ruudulle ja tunnista kuvasta kohde ja vertailutähdet. Yleisimmistä kohteista löytyvät etsintäkartat linkistä

[http://users.utu.fi/kani/1m/finding\\_charts/ftable.html](http://users.utu.fi/kani/1m/finding_charts/ftable.html)

muille on saatavissa paperiversio tai jokin muu linkki, jonka saa työn ohjaajalta (tilanne elää koko ajan tämän suhteen). Aja phot -komento. Komento kysyy vielä näkyvät parametrit, minkä jälkeen se odottaa näppäinkomentoja. Phot voi tässä vaiheessa antaa virheilmoituksen

Warning: Graphics overlay not available for display device.

mutta tästä ei tarvitse välittää. Siirry hiirellä mitattavan kohteen päälle ja paina <space>-näppäintä. Kursori kannattaa sijoittaa mahdollisimman tarkasti tähden keskustan kohdalle, jotta vältyttäisiin turhilta virheilmoituksilta. Phot suorittaa mittauksen ja tulostaa ruudulle magnitudin yms. tietoja. Tulokset menevät myös tiedostoon, joten niitä ei kannata kirjoittaa ruudulta ylös. Mittaa kaikki haluamasi kohteet kentstä ym. tavalla ja lopetettuasi paina q -näppäintä. Siirry vielä xgterm -ikkunaan ja paina q -näppäintä uudestaan poistuaksesi phot:ista.

## 5.3 Kohteen magnitudin laskeminen

Kuvassa 25 on phot:in kirjoittaman tulostiedoston loppuosa (alkuosassa on lueteltu kaikki asettamasi parametrit). Mitatun kuvan nimi oli BL090105.fit, jolloin mittaustiedoston nimeksi tuli BL090105.mag.1. Kuvasta on mitattu kolme kohdetta, jokaisesta kohteesta on viisi riviä tuloksia. Ensimmäisellä rivillä ovat kuvan nimi ja keskityksen aloituskoordinaatit (eli kursorin asema kun <space>-näppäintä painettiin). Rivillä 2 ovat keskitysalgoritmin tuottamat koordinaatit, muutos aloituskoordinaatteihin nähden ja koordinaattien virherajat. Rivillä 3 on Taustataivaan taso ja sen hajonta. Lisäksi seuraa tietoa mm. siitä montako taustataivaan pikseliä hylätiin, jne. Rivillä 5 on annettu mittausapertuurin säde, kokonaisvuo, mittausapertuurin pikselien lukumäärä, kohteen vuo ja lopuksi magnitudi virherajoineen. Virherajat on arvioitu kuvan kohinan ja CCD:n kohinaparametrien avulla.

Kuvan 25 tapauksessa on mitattu BL Lac -kohdetta 3C 66A, jolle saadaan siis seuraavat mittaustulokset :

kuva	kohde	mag $\pm\sigma_{IRAF}$	
BL090105	3C 66A	13.902 $\pm$ 0.040	(kohde)
	tähti B	14.060 $\pm$ 0.048	(vertailutähti)
	tähti C2	13.455 $\pm$ 0.027	(vertailutähti)

Vertailutähtien oikeat magnitudit ovat  $V(B) = 14.77$  ja  $V(C2) = 14.18$ . Yksinkertaisin tapa määrittää kohteen kirkkaus on laskea ensin kuvan nollapiste, ts. oikeiden ja mitattujen magnitudien välinen erotus ja tästä kohteen kirkkaus. Nollapiste (zp) lasketaan vertailutähdistä :

$$\begin{aligned} \text{tähti B : } \quad zp &= m(\text{oikea}) - m(\text{mitattu}) = 14.77 - 14.060 = 0.710 \\ \text{tähti C2 : } \quad zp &= m(\text{oikea}) - m(\text{mitattu}) = 14.18 - 13.455 = 0.725 \end{aligned}$$

Eri tähdistä mittattujen nollapisteiden tulisi olla samat virheiden puitteissa, muuten jotain on pielessä joko mittauksessa tai vertailutähden "oikeassa" magnitudissa. Yllä olevassa esimerkissä ero on  $0.725 - 0.710 = 0.015$  mag, mikä on pieni verrattuna näiden kahden tähden mittausrvirheeseen (0.048 ja 0.027 mag).

```

#N IMAGE          XINIT      YINIT      ID  COORDS          LID
#U imagename     pixels    pixels    ##  filename        ##
#F %-23s         %-10.3f   %-10.3f   %-5d %-23s        %-5d
#
#N XCENTER       YCENTER    XSHIFT    YSHIFT  XERR   YERR          CIER CERROR
#U pixels        pixels     pixels    pixels  pixels pixels        ##  cerrors
#F %-14.3f      %-11.3f   %-8.3f    %-8.3f  %-8.3f %-15.3f       %-5d %-9s
#
#N MSKY          STDEV      SSKEW      NSKY   NSREJ         SIER SERROR
#U counts        counts     counts     npix   npix          ##  serrors
#F %-18.7g      %-15.7g   %-15.7g   %-7d   %-9d         %-5d %-9s
#
#N ITIME         XAIRMASS   IFILTER     OTIME
#U timeunit      number     name        timeunit
#F %-18.7g      %-15.7g   %-23s      %-23s
#
#N RAPERT        SUM         AREA        FLUX      MAG   MERR   PIER PERROR
#U scale         counts     pixels      counts    mag   mag   ##  perrors
#F %-12.2f      %-14.7g   %-11.7g    %-14.7g   %-7.3f %-6.3f %-5d %-9s
#
BL090105         221.500    48.500     1  nullfile        0
  221.099    47.712    -0.401    -0.788  0.019  0.021  0  NoError
  6440.541    52.7041    27.09703  1875  10  0  NoError
  1.          INDEF     INDEF     INDEF
  10.00    2052142.    314.362    27480.9  13.902  0.040  0  NoError
BL090105         133.500    249.500     2  nullfile        0
  132.717    249.440    -0.783    -0.060  0.019  0.025  0  NoError
  6440.105    54.50272    -9.909338  1880  7  0  NoError
  1.          INDEF     INDEF     INDEF
  10.00    2048702.    314.4265    23762.36  14.060  0.048  0  NoError
BL090105         369.500    145.500     3  nullfile        0
  369.153    144.338    -0.347    -1.162  0.021  0.018  0  NoError
  6451.184    54.33397    17.09523  1876  7  0  NoError
  1.          INDEF     INDEF     INDEF
  10.00    2069559.    314.3689    41507.95  13.455  0.027  0  NoError

```

Kuva 25: Phot:in tulostiedoston loppuosa.

Käytännössä eri vertailutähdistä lasketuissa nollapisteissä on usein eroja johtuen siitä, että niiden värit eivät ole samat. Koska ylläoleva yhtälö toimii tarkasti vain kun vertailutähtien ja kohteen värit ovat täsmälleen samat, on useimmiten parempi käyttää tarkempaa kaava

$$z_{p_i} = m_i(\text{oikea}) - m_i(\text{mitattu}) - \lambda(V - R)_i \quad (1)$$

missä  $z_{p_i}$  on tähdestä  $i$  laskettu nollapiste,  $\lambda$  on käytetyn laitteen värikerroin ja  $(V - R)_i$  tähden väri. Tuorlan 1.03 m teleskoopin R-suodattimelle ja ST-1001E -kameralle mittattu värikerroin on  $\lambda = -0.05$ . Yllä olevassa esimerkissä saadaan siis

$$z_{p_B} = 14.77 - 14.060 + 0.05 \times 0.49 = 0.734$$

$$z_{p_{C2}} = 14.18 - 13.455 + 0.05 \times 0.56 = 0.753$$

Kun yksittäiset nollapisteet on laskettu lasketaan kuvan nollapiste  $z_{p_{av}}$  ottamalla keskiarvo yksittäisistä arvoista. Kohteen magnitudi saadaan tämän jälkeen yhtälöstä

$$m_{obj} = m_{obj}(\text{mitattu}) + z_{p_{av}} + \lambda(V - R)_{obj} \quad (2)$$

BL Lac -kohteille voidaan paremman puutteessa käyttää arviota  $V - R = 0.5$ . Yllä olevassa esimerkissä saadaan 3C 66A:n kirkkaudeksi siis  $13.902 + 0.744 - 0.05 \times 0.5 = 14.621$ .

**Huom!** Tarkista käytetty CCD-kamera ja värikerroin ennen lopullisten tulosten laskemista!

## 5.4 Virherajojen arvioiminen

Kohteen magnitudiin vaikuttavat hyvin monet tekijät, ja onkin lähes mahdotonta arvioida täydellisesti niiden aiheuttamia virheitä. Onneksi on kuitenkin mahdollista arvioida suurimpien virhetekijöiden vaikutus ja siten saada hyvä arvio kokonaisvirheestä. Suurimmat virhelähteet ovat kohteen mittauksen virhe ( $\sigma_{\text{fot}}$ ) ja nollapisteen virhe ( $\sigma_{z_p}$ ).

IRAFin antama magnitudin virheraja on sama kuin mittausvirhe  $\sigma_{\text{fot}}$ . Tähän virheeseen lasketaan mukaan kohteen fotonikohina, taustan fotonikohina mittausapertuurissa ja taustan määrityksen aiheuttama virhe. Koska kaikkia virhelähteitä (esim. apertuurin keskittämisestä aiheutuva virhe) ei oteta huomioon, voidaan IRAFin antamaa virhettä pitää lähinnä alarajana. Käytäntö on kuitenkin osoittanut, että virhe on melko realistinen, sillä muiden virhelähteiden vaikutus on pieni. On hyvä muistaa, että lukukohina ja vahvistuskerroin täytyy asettaa oikeisiin arvoihin `datapars` -komennossa jotta IRAF laskisi virheen  $\sigma_{\text{fot}}$  oikein. Lisäksi kuvissa pitää säilyttää alkuperäinen taustataivaan taso.

Nollapisteen virhe  $\sigma_{z_p}$  arvioidaan vertailutähtien mittauksista. Mikäli vertailutähtiä on vain yksi on  $\sigma_{z_p}$  sama kuin IRAFin antama mittausvirhe ko. vertailutähdelle. Mikäli vertailutähtiä on useampi kuin yksi, on  $\sigma_{z_p}$  yhtä kuin nollapisteen  $z_{p_{av}}$  keskiarvon keskivirhe.

Kokonaisvirhe  $\sigma_{\text{tot}}$  voidaan laskea kaavasta

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\sigma_{\text{fot}}^2 + \sigma_{z_p}^2} \quad (3)$$

Ylläolevassa esimerkissä saadaan siis

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{0.040^2 + 0.009^2} = 0.041$$

Lopputulokset kannattaa pyöristää lähimpään sadasosaan, eli 3C 66A:lle saadaan  $R = 14.62 \pm 0.05$  (virheraja pyöristetään ylöspäin).