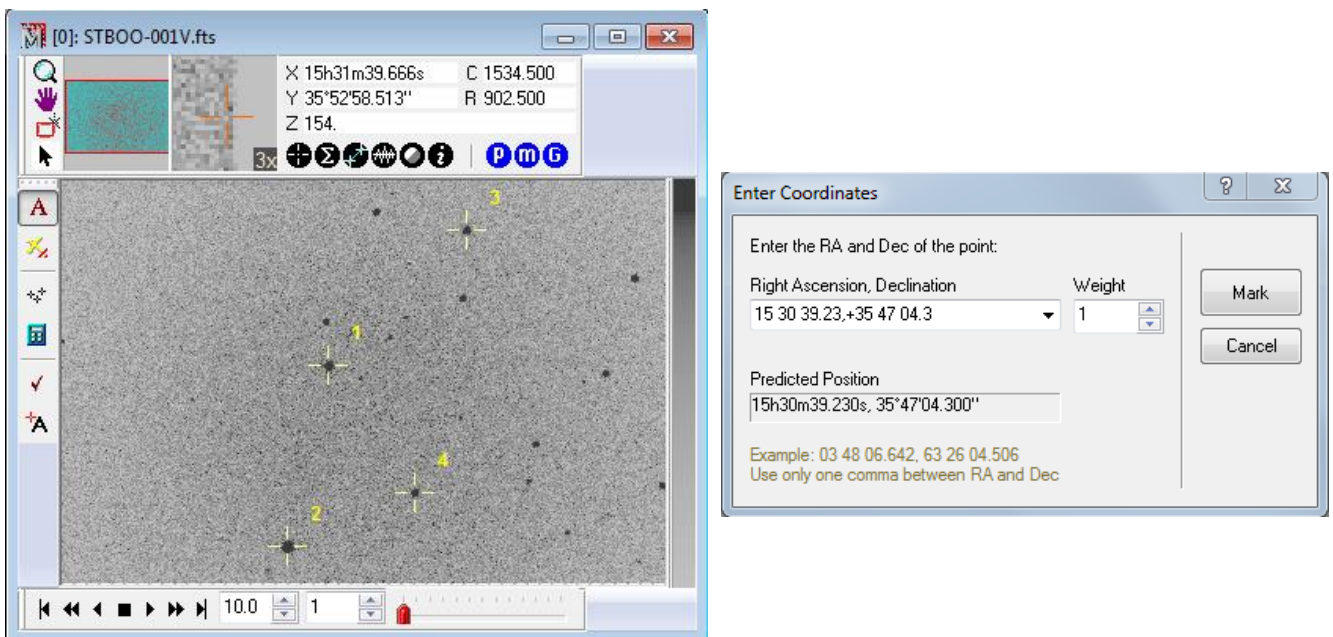


Fotometria con Calibrazione Astrometrica delle Immagini Astronomiche utilizzando Mira Pro

Maurizio Martinengo

Applicando la calibrazione astrometrica alle immagini, vengono inserite alcune keywords WCS (World Coordinate System) nell'intestazione delle immagini FITS, che permettono di associare ad ogni pixel presente nelle immagini CCD le relative coordinate equatoriali. Avendo a disposizione un set di immagini con soluzione astrometrica sarà quindi possibile, utilizzando opportuni cataloghi contenenti le coordinate degli oggetti da misurare e le magnitudini delle stelle standard, eseguire la fotometria su tutto il set senza la necessità di allineare le immagini e senza dover posizionare manualmente i cerchi fotometrici, in quanto gli oggetti saranno identificati automaticamente dalle loro coordinate equatoriali. Sarà inoltre possibile il calcolo della massa d'aria, utile per l'analisi dei risultati e necessaria per il calcolo dei coefficienti di estinzione atmosferica. Viene di seguito riportata una procedura di calibrazione astrometrica e di fotometria d'apertura utilizzando il software Mira Pro 7.972.

La procedura di calibrazione astrometrica consiste nell'identificare almeno 4 stelle presenti (3 per la soluzione e 4 o più per la valutazione dell'errore) nel campo inquadrato, inserendo per ognuna di esse le relative coordinate equatoriali ricavate da un catalogo astrometrico:



A questo punto, eseguendo la calibrazione, sarà possibile visualizzare la corrispondenza tra coordinate in pixels e coordinate equatoriali nonché i residui, ovvero la differenza tra le coordinate calcolate e quelle di catalogo. Qualora un oggetto presentasse un errore elevato, sarà possibile ricontrollare i valori inseriti oppure cambiare oggetto. E' infine possibile fornire pesi diversi ai vari oggetti se, ad esempio, i dati di calibrazione provenissero da diversi cataloghi con differenti incertezze, oppure per stelle deboli per le quali il calcolo del centroide possa essere suscettibile di maggiore incertezza.

#	Image	Obj	Col	Row	RA	Dec	RA Resid	Dec Resid	Weight	Status
1	STBOO-001V.fits	1	679.527	471.324	15h30m39.230s	35°47'04.300"	-0.3201	+0.0782	1.00	Used
2	STBOO-001V.fits	2	575.460	930.292	15h30m32.478s	35°53'38.053"	+0.3065	-0.0747	1.00	Used
3	STBOO-001V.fits	3	1030.617	126.088	15h31m03.374s	35°42'03.732"	+0.2169	-0.0533	1.00	Used
4	STBOO-001V.fits	4	898.174	793.624	15h30m54.932s	35°51'36.229"	-0.2033	+0.0498	1.00	Used

Verranno quindi visualizzati i seguenti risultati per ogni immagine del set:

```
Field Center (Centro del Frame):
  RA: 15h30m45.472s at column 768.000
  Dec: 35°47'37.674" at row 512.000

Plate Solution Errors (Errori rms della soluzione):
  RA rms: 0.2668 arcsec using 4 points
  Dec rms: 0.0652 arcsec using 4 points

Image Scale (Scala dell' immagine):
  X scale: 0.8518 arcsec/pixel
  Y scale: 0.8544 arcsec/pixel

Rotation of the sky on the image (Orientamento della camera CCD):
  RA Axis: 1.0541 degrees.
  Dec Axis: -179.0172 degrees.

WCS CD Matrix (Coefficienti della matrice di trasformazione):
  x0=0.000072115529 C_11=0.000236619210 C_12=0.000004059032
  y0=-0.000021760748 C_21=-0.000004366891 C_22=0.000237338671
```

E scritte le seguenti keywords nell' header delle immagini FITS:

```
RA      = '15:30:45.472'
DEC     = '35:47:37.674'
EPOCH   = 2000.                / epoch of coordinate system
EQUINOX = 2000.                /
CTYPE1  = 'RA---TAN'           / NAXIS1 physical coordinate system
CUNIT1  = 'Degrees'           / NAXIS1 physical units
CRVAL1  = 232.6894679873       / NAXIS1 physical coord of reference pixel
CRPIX1  = 768.                 / NAXIS1 reference pixel number
CDELT1  = 2.366540224655E-004 / NAXIS1 physical coord scale per pixel
CROTA1  = 1.054089507088       / NAXIS1 physical coord rotation angle
CTYPE2  = 'DEC--TAN'          / NAXIS2 physical coordinate system
CUNIT2  = 'Degrees'           / NAXIS2 physical units
CRVAL2  = 35.79379821385       / NAXIS2 physical coord of reference pixel
CRPIX2  = 512.                 / NAXIS2 reference pixel number
CDELT2  = 2.373788416897E-004 / NAXIS2 physical coord scale per pixel
CROTA2  = -179.017228521       / NAXIS2 physical coord rotation angle
CD1_1   = 2.366192101371E-004 /
CD1_2   = 4.059032296245E-006 /
CD2_1   = -4.36689113386E-006 /
CD2_2   = 2.373386709826E-004 /
SECPPIX = 3070.758806732      /
```

E' possibile a questo punto lanciare il tool per eseguire la fotometria di apertura sul set di immagini, importando un file-catalogo contenente le coordinate e le magnitudini standard degli oggetti da fotometrare. Tale file sarà del tipo:

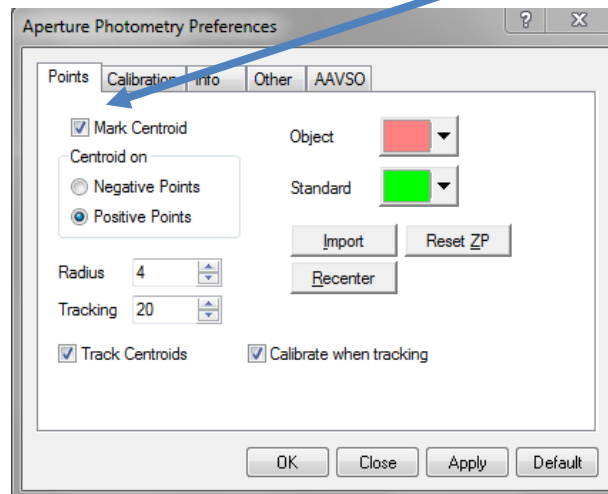
Name	Std?	X	Y	Mag	Std	Weight	Notes
ST Boo		15h30m39.23s	35°47'04.3s			1	
000-BJR-376 (Ref1)	*	15h30m32.52s	35°53'37.9s	9.441		1	Label 94
000-BBW-227 (Ref2)	*	15h31m03.41s	35°42'03.6s	11.662		1	Label 117
000-BBW-222 (Ref3)	*	15h30m54.94s	35°51'36.2s	12.018		1	Label 120

Qualora, come nell'esempio sopra riportato, si indichi più di una stella di confronto, il task di fotometria applicherà la soluzione ensemble. Da notare che nella fotometria ensemble, si potranno utilizzare pesi diversi per le stelle di confronto. Tali pesi statistici potranno prendere in considerazione l'incertezza con cui sono conosciute le magnitudini di riferimento e la magnitudine delle stesse, ovvero a stelle più luminose potremo attribuire pesi maggiori rispetto a quelli degli oggetti più deboli.

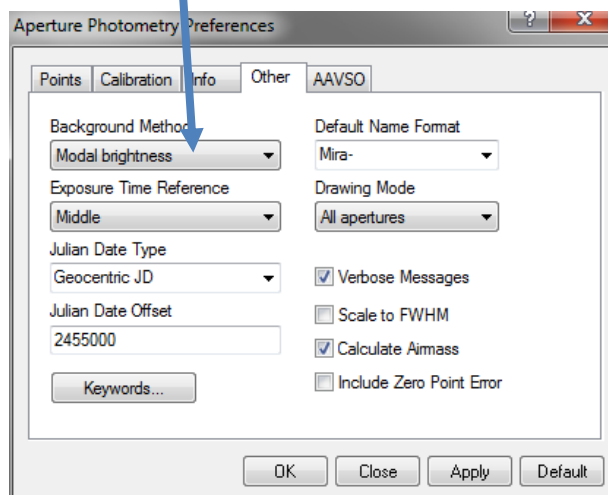
Se invece, nella colonna Std? inseriamo una sola stella standard, Mira utilizzerà la classica soluzione fotometrica differenziale con una sola ref.

Rispetto ad altri software, Mira permette inoltre di utilizzare un file senza stelle standard. In questo caso verrà eseguita la fotometria di apertura sui singoli oggetti fornendo in output le pure magnitudini strumentali. Questa ultima possibilità è molto utile nel calcolo e nella successiva applicazione dei coefficienti di trasformazione nel sistema standard.

Per la selezione degli oggetti da fotometrare indicati nel file-catalogo, si potrà scegliere se utilizzare l'esatta posizione indicata oppure se applicare successivamente il calcolo del centroide.

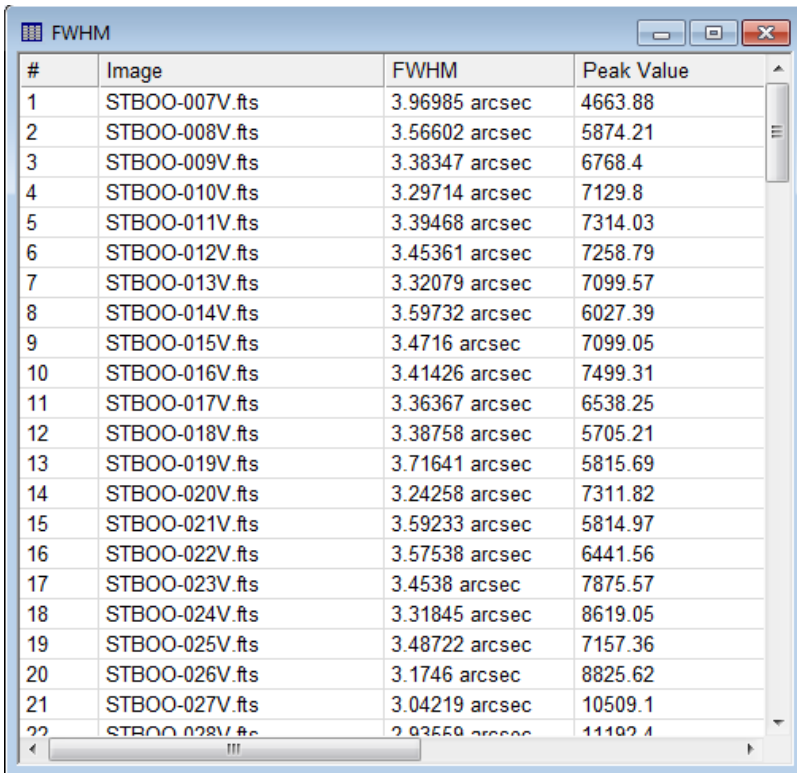


Sarà anche possibile indicare la modalità di calcolo del valore di fondo cielo, scegliendo tra Media, Mediana e valore Modale:



Converrà scegliere “Modal Brightness”, per eliminare più facilmente valori fuori media; mentre il calcolo del fondo cielo utilizzando la Media o la Mediana fornirà migliori risultati quando saremo ragionevolmente sicuri di non avere contaminanti nell’anello di fondo cielo.

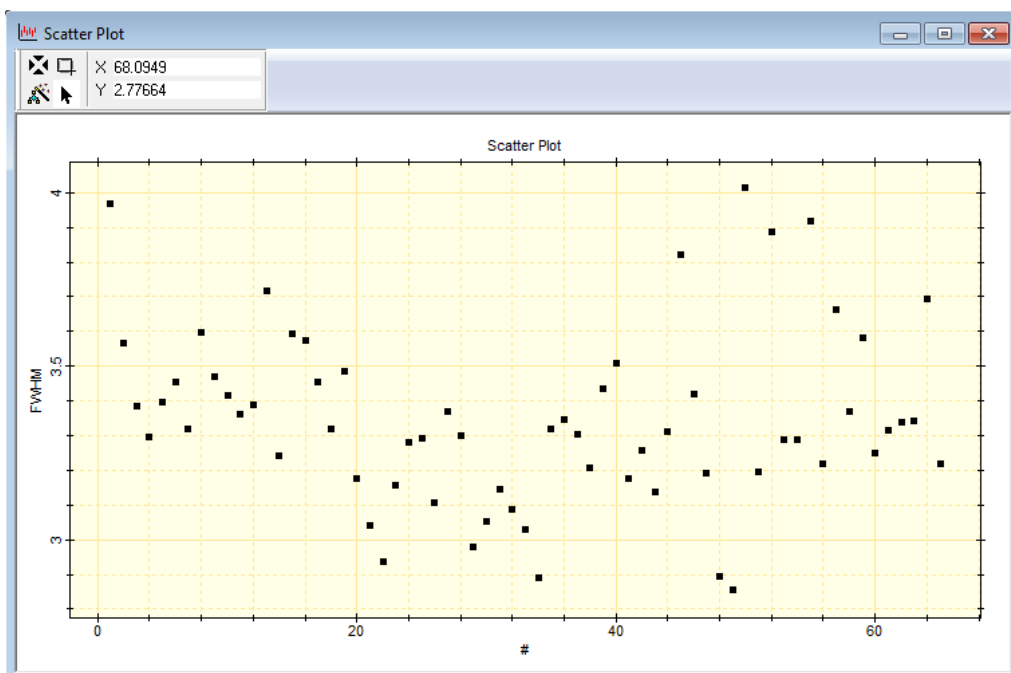
A questo punto, utilizzando il comando “Align by WCS”, allineiamo le immagini. Dopo di che, puntando il cursore sulle stelle che vogliamo fotometrare, eseguiamo il comando FWHM che ci fornirà una tabella contenente le Full Width at Half Maximum (in secondi d’arco), nonché i valori massimi in ADU registrati:



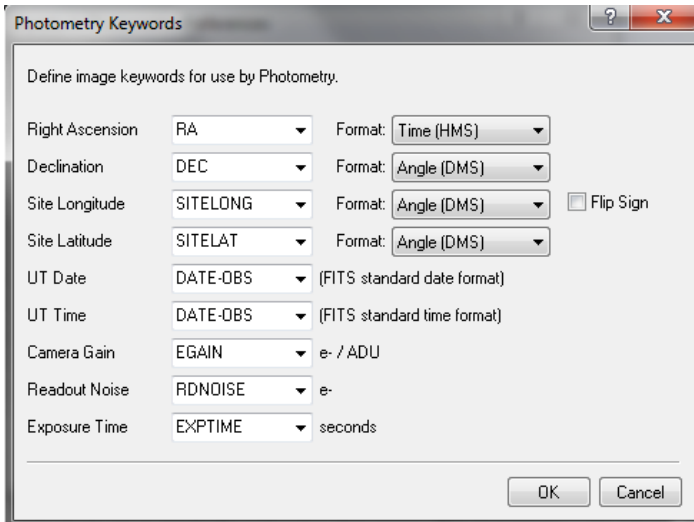
#	Image	FWHM	Peak Value
1	STBOO-007V.fts	3.96985 arcsec	4663.88
2	STBOO-008V.fts	3.56602 arcsec	5874.21
3	STBOO-009V.fts	3.38347 arcsec	6768.4
4	STBOO-010V.fts	3.29714 arcsec	7129.8
5	STBOO-011V.fts	3.39468 arcsec	7314.03
6	STBOO-012V.fts	3.45361 arcsec	7258.79
7	STBOO-013V.fts	3.32079 arcsec	7099.57
8	STBOO-014V.fts	3.59732 arcsec	6027.39
9	STBOO-015V.fts	3.4716 arcsec	7099.05
10	STBOO-016V.fts	3.41426 arcsec	7499.31
11	STBOO-017V.fts	3.36367 arcsec	6538.25
12	STBOO-018V.fts	3.38758 arcsec	5705.21
13	STBOO-019V.fts	3.71641 arcsec	5815.69
14	STBOO-020V.fts	3.24258 arcsec	7311.82
15	STBOO-021V.fts	3.59233 arcsec	5814.97
16	STBOO-022V.fts	3.57538 arcsec	6441.56
17	STBOO-023V.fts	3.4538 arcsec	7875.57
18	STBOO-024V.fts	3.31845 arcsec	8619.05
19	STBOO-025V.fts	3.48722 arcsec	7157.36
20	STBOO-026V.fts	3.1746 arcsec	8825.62
21	STBOO-027V.fts	3.04219 arcsec	10509.1
22	STBOO-028V.fts	2.93558 arcsec	11192.4

L’analisi di questa tabella è un valido aiuto per valutare se un oggetto è fuori linearità, per dimensionare i cerchi di apertura e per capire se durante la sessione osservativa sono cambiate le condizioni di fuoco.

In Mira, ogni colonna di una tabella di output, può essere rappresentata come grafico tramite il comando “Scatter Plot”, per cui in questo caso potremmo voler plottare l’andamento del FWHM rispetto al numero del frame:



Prima di eseguire la fotometria occorre inoltre verificare che le seguenti keywords siano presenti nell'header delle immagini FITS da processare:

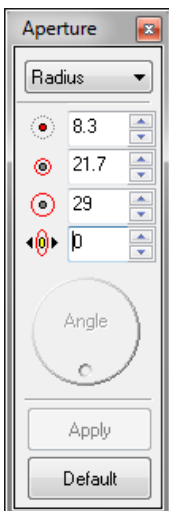


Qualora alcune non fossero disponibili, sarà necessario inserirle preventivamente tramite il software di acquisizione oppure direttamente in Mira utilizzando la procedura di editing automatico delle keywords FITS. Nel mio caso ho dovuto aggiungere la keyword:

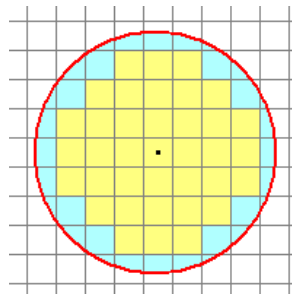
RDNOISE=14.73 (Readout Noise camera CCD)

Perché non inserita automaticamente dal software di acquisizione.

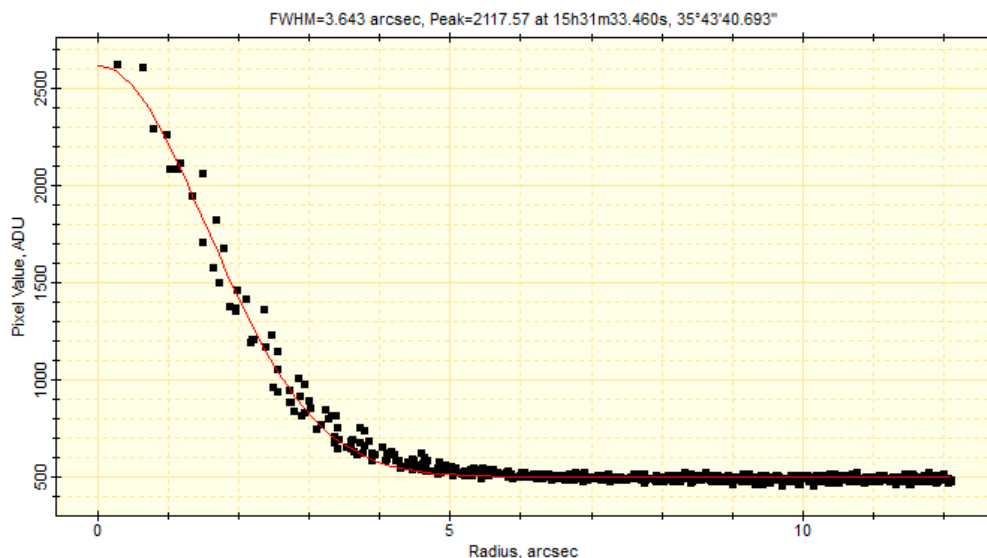
A questo punto non resta che scegliere i cerchi di apertura e sky, che in Mira possono essere circolari o ellittici. I valori possono essere espressi in Raggi oppure in multipli di FWHM:



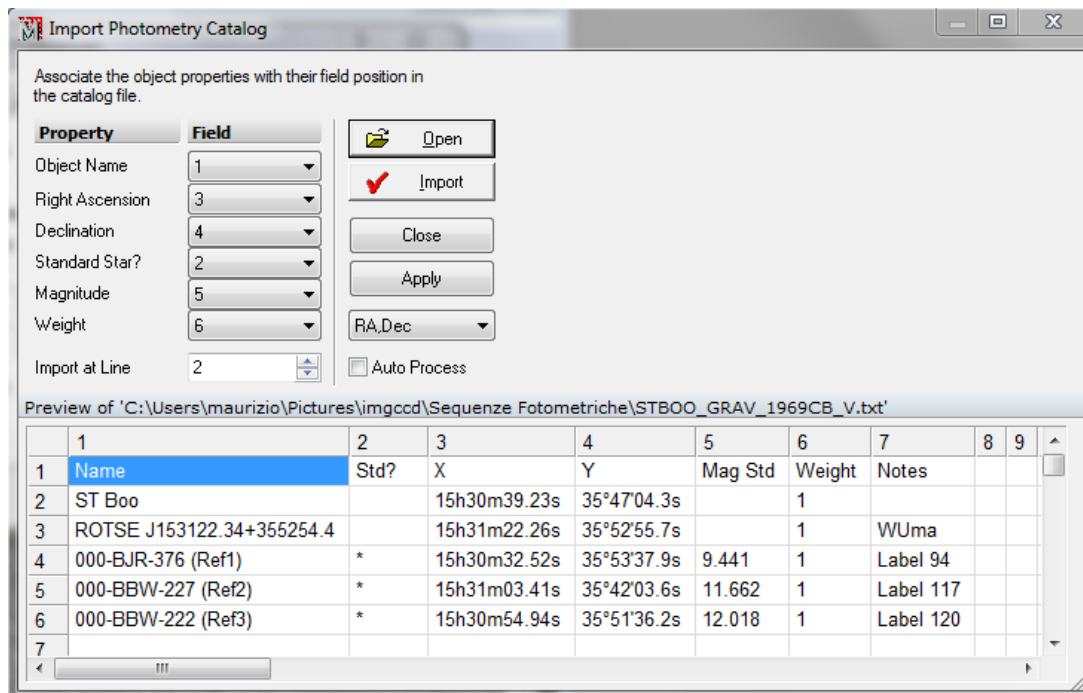
In ogni caso Mira, durante il calcolo, terrà in considerazione i pixels parziali lungo la circonferenza dell'apertura:



Per la scelta potrà essere utile utilizzare il "Radial Profile" e/o mediare le immagini, per verificare la presenza di contaminanti ed il profilo stellare rispetto al raggio di apertura:



A questo punto si può lanciare il comando per eseguire la fotometria di apertura, caricando il file di riferimento fotometrico:



Indicando opportunamente il contenuto delle colonne del file (i campi dovranno obbligatoriamente essere separati da TAB).

Importando il file, verranno posizionati i cerchi di apertura sulle stelle indicate per l'intero set di immagini e verrà eseguita la fotometria.

L'output sarà composto da un file - sommario per ogni immagine del set:

```

===== Aperture Photometry Calibration Results =====
Aperture Summary:
Mode: Radius, R1=8.00, R2=15.00, R3=20.00, E=0.000, Theta=0.00

Zero Point Calculation for 'C:\...\Pictures\imgccd\img_2010_04_25\STBOO-007V.fts'
Calibration Summary:
Zero point : 18.8832 +/- 0.0087 mag (error of the mean)
Standards : 3, Sum of weights: 3.

Obj Name      Ref Mag Error  Error(T) Residual Weight Notes
3 * 000-BJR-376 9.4410 0.0012 0.0012 -0.0052 1.00
4 * 000-BBW-227 11.6620 0.0050 0.0051 +0.0170 1.00
5 * 000-BBW-222 12.0180 0.0068 0.0069 -0.0117 1.00
    
```

Contenente tra le altre cose l'errore sul calcolo dello Zero Point ed i residui della soluzione ensemble relativi alle singole stelle di confronto.

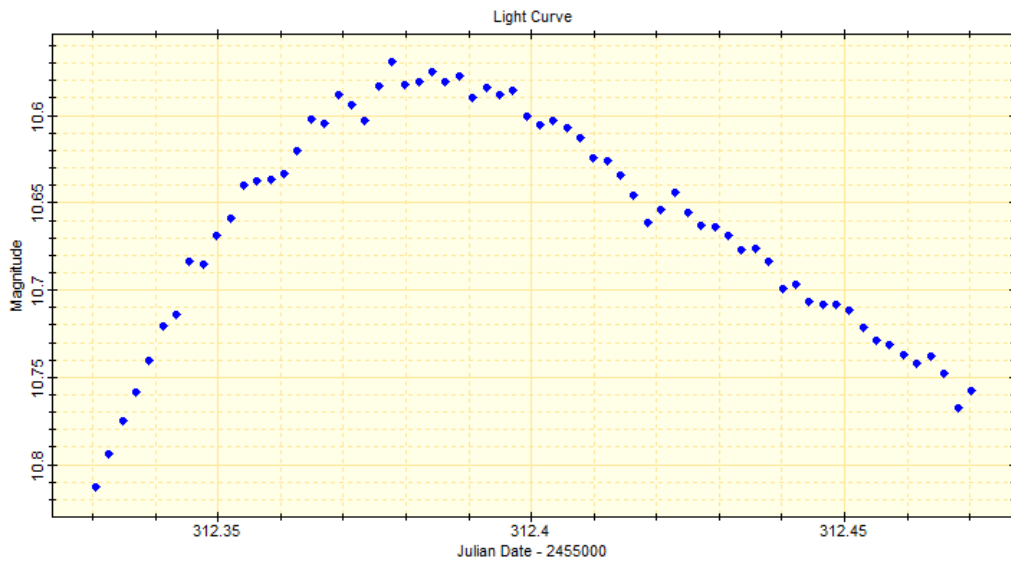
Il file dei risultati fotometrici sarà invece di tipo tabellare, salvabile come .csv, contenente un ingente numero di informazioni.

Riportiamo di seguito un esempio di tale file e la descrizione dei singoli campi:

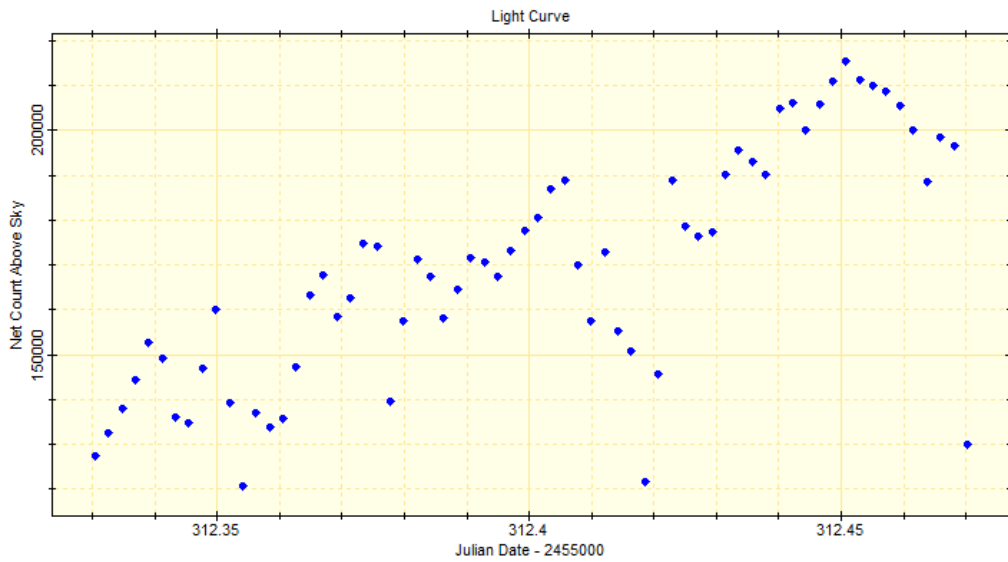
#	Image	Obj	Name	Magn	Std?	Error	Error(T)	X	Y	Col	Row	Backgr	S/N	Mag Std	Resid.	Net Count	Filter
1	STBOO-007V.fits	1	ST Boo	10.8080		0.0028	0.0028	15h30m39.260s	35°47'04.190"	419.491	526.094	539.109	391.4		0	127384	V
2	STBOO-007V.fits	2	ROTSE J153122.34+355254.4	14.1642		0.0436	0.0440	15h31m22.291s	35°52'55.411"	1026.472	948.356	537.682	24.7		0	5789.75	V
3	STBOO-007V.fits	3	000-BJR-376 (Ref1)	9.4462	*	0.0012	0.0012	15h30m32.523s	35°53'37.804"	315.996	985.194	538.779	913.6	9.4410	0.0052	446523	V
4	STBOO-007V.fits	4	000-BBW-227 (Ref2)	11.6450	*	0.0050	0.0051	15h31m03.410s	35°42'03.587"	770.334	180.354	539.617	211.7	11.6620	-0.0170	58926.4	V
5	STBOO-007V.fits	5	000-BBW-222 (Ref3)	12.0297	*	0.0068	0.0069	15h30m54.963s	35°51'36.084"	638.344	848.295	536.406	156.4	12.0180	0.0117	41346.1	V
6	STBOO-008V.fits	1	ST Boo	10.8017		0.0025	0.0027	15h30m39.262s	35°47'04.171"	419.512	526.071	523.291	404.7		0	132134	V
7	STBOO-008V.fits	2	ROTSE J153122.34+355254.4	14.1495		0.0354	0.0417	15h31m22.295s	35°52'55.452"	1026.533	948.405	523.114	26.0		0	6051.5	V
8	STBOO-008V.fits	3	000-BJR-376 (Ref1)	9.4520	*	0.0011	0.0012	15h30m32.523s	35°53'37.823"	315.990	985.216	524.641	930.1	9.4410	0.0110	458001	V
9	STBOO-008V.fits	4	000-BBW-227 (Ref2)	11.6578	*	0.0048	0.0050	15h31m03.410s	35°42'03.591"	770.330	180.359	523.976	217.0	11.6620	-0.0042	60056.4	V
10	STBOO-008V.fits	5	000-BBW-222 (Ref3)	12.0112	*	0.0059	0.0066	15h30m54.962s	35°51'36.080"	638.328	848.290	521.329	164.6	12.0180	-0.0068	43371.5	V
11	STBOO-009V.fits	1	ST Boo	10.7803		0.0025	0.0026	15h30m39.260s	35°47'04.190"	419.489	526.094	518.761	419.4		0	138342	V
12	STBOO-009V.fits	2	ROTSE J153122.34+355254.4	14.2313		0.0410	0.0437	15h31m22.299s	35°52'55.377"	1026.581	948.319	520.671	24.9		0	5761.84	V
13	STBOO-009V.fits	3	000-BJR-376 (Ref1)	9.4552	*	0.0012	0.0012	15h30m32.523s	35°53'37.828"	315.990	985.222	520.923	943.9	9.4410	0.0142	468786	V
14	STBOO-009V.fits	4	000-BBW-227 (Ref2)	11.6504	*	0.0063	0.0049	15h31m03.411s	35°42'03.599"	770.336	180.368	521.351	223.4	11.6620	-0.0116	62074.3	V
15	STBOO-009V.fits	5	000-BBW-222 (Ref3)	12.0154	*	0.0062	0.0065	15h30m54.962s	35°51'36.100"	638.321	848.313	517.649	168.2	12.0180	-0.0026	44350.6	V
16	STBOO-010V.fits	1	ST Boo	10.7609		0.0024	0.0025	15h30m39.260s	35°47'04.193"	419.481	526.097	504.161	436.4		0	144970	V
17	STBOO-010V.fits	2	ROTSE J153122.34+355254.4	14.1475		0.0332	0.0388	15h31m22.296s	35°52'55.436"	1026.548	948.386	503.234	28.0		0	6406.72	V
18	STBOO-010V.fits	3	000-BJR-376 (Ref1)	9.4545	*	0.0011	0.0011	15h30m32.518s	35°53'37.844"	315.931	985.239	505.474	963.4	9.4410	0.0135	482909	V
19	STBOO-010V.fits	4	000-BBW-227 (Ref2)	11.6493	*	0.0045	0.0047	15h31m03.411s	35°42'03.597"	770.341	180.366	501.987	231.4	11.6620	-0.0127	63963.3	V
20	STBOO-010V.fits	5	000-BBW-222 (Ref3)	12.0172	*	0.0059	0.0062	15h30m54.964s	35°51'36.088"	638.352	848.300	501.781	173.9	12.0180	-0.0008	45579.2	V
21	STBOO-011V.fits	1	ST Boo	10.7381		0.0021	0.0024	15h30m39.258s	35°47'04.210"	419.464	526.116	482.673	458.6		0	153564	V
22	STBOO-011V.fits	2	ROTSE J153122.34+355254.4	14.0402		0.0263	0.0225	15h31m22.291s	35°52'55.574"	1026.473	948.410	520.410	23.4		0	7540.9	V

- #: Indice della misura
- Image: Nome del file Immagine
- Obj: Indice Oggetto Misurato
- Name: Nome dell'Oggetto Misurato
- Magn: Magnitudine Strumentale Calcolata
- Std?: Indica se la stella è stata utilizzata come Ref
- Error: Errore fotometrico, calcolato stimando il rumore presente nel cerchio di fondo cielo e considerando anche il Gain, il raggio dell'apertura ed il livello del segnale
Qualora si utilizzino più ref in una soluzione ensemble, si può scegliere se sommare in quadratura anche l'errore sul valore dello Zero Point
- Error(T): Errore teorico, calcolato in funzione del Redout Noise, Gain, Tempo di esposizione e livello del segnale. Anche in questo caso si può scegliere se includere l'errore dello Zero Point
- X: Ascensione Retta dell' Oggetto Misurato
- Y: Declinazione dell' Oggetto Misurato
- Col: Colonna dell' Oggetto Misurato (in pixels)
- Row: Riga dell' Oggetto Misurato (in pixels)
- Background: Valore calcolato del Fondo Cielo
- S/N: Rapporto Segnale / Rumore
- Mag Std: Magnitudini Imposte alle stelle di confronto
- Resid.: Residui della soluzione ensemble rispetto al valore imposto
- Net Count: Flusso Netto, a cui è già stato sottratto il valore di fondo cielo
- Filter: Filtro Utilizzato (letto dall'intestazione FITS)
- Date: Data Osservazione
- Time: Ora Osservazione, impostabile come tempo di inizio, medio o fine esposizione
- JD-Offset: Giorno Giuliano con offset impostabile. Il JD può essere Geocentrico, Eliocentrico, Geocentrico Modificato o Eliocentrico Modificato
- Airmass: Massa d'aria
- ExpTime: Tempo di esposizione
- Weight: Peso statistico dell'Oggetto misurato

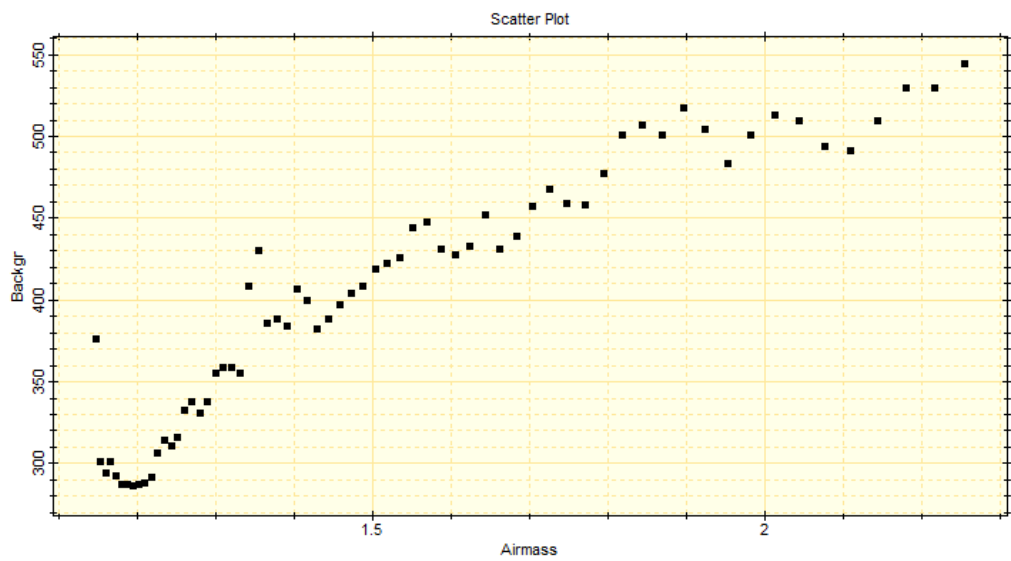
A questo punto, non resta che provare a plottare qualche curva in magnitudini:



Oppure in flussi:



O magari il valore del fondo cielo rispetto alla massa d'aria:



Sarà infine possibile generare un report nel nuovo formato Esteso AAVSO:

```
#TYPE=EXTENDED
#OBSCODE=MMG
#SOFTWARE=Mira Pro Ultimate Edition 7.972
#DELIM=,
#DATE=JD
#NOTES=
#NAME,DATE,MAG,MERR,FILT,TRANS,MTYPE,CNAME,CMAG,KNAME,KMAG,AMASS,GROUP,CHART,NOTES

# STBOO-007V.fts, RA:15h30m39.260s, Dec:35°47'04.190", Filter:'V', Exptime:180, TimeObs:2010-04-25T19:55:50.000
ST Boo,2455312.330440,10.813,0.003,V,NO,ABS,ENSEMBLE,na,na,na,2.2545,1,1969CB,

# STBOO-008V.fts, RA:15h30m39.262s, Dec:35°47'04.171", Filter:'V', Exptime:180, TimeObs:2010-04-25T19:58:55.000
ST Boo,2455312.332581,10.794,0.003,V,NO,ABS,ENSEMBLE,na,na,na,2.2163,1,1969CB,

# STBOO-009V.fts, RA:15h30m39.260s, Dec:35°47'04.190", Filter:'V', Exptime:180, TimeObs:2010-04-25T20:02:01.000
ST Boo,2455312.334734,10.775,0.003,V,NO,ABS,ENSEMBLE,na,na,na,2.1792,1,1969CB,

# STBOO-010V.fts, RA:15h30m39.260s, Dec:35°47'04.193", Filter:'V', Exptime:180, TimeObs:2010-04-25T20:05:07.000
ST Boo,2455312.336887,10.759,0.002,V,NO,ABS,ENSEMBLE,na,na,na,2.1434,1,1969CB,

# STBOO-011V.fts, RA:15h30m39.258s, Dec:35°47'04.210", Filter:'V', Exptime:180, TimeObs:2010-04-25T20:08:13.000
ST Boo,2455312.339039,10.740,0.002,V,NO,ABS,ENSEMBLE,na,na,na,2.1088,1,1969CB,

# STBOO-012V.fts, RA:15h30m39.261s, Dec:35°47'04.170", Filter:'V', Exptime:180, TimeObs:2010-04-25T20:11:18.000
ST Boo,2455312.341181,10.720,0.002,V,NO,ABS,ENSEMBLE,na,na,na,2.0755,1,1969CB,

# STBOO-013V.fts, RA:15h30m39.260s, Dec:35°47'04.173", Filter:'V', Exptime:180, TimeObs:2010-04-25T20:14:23.000
ST Boo,2455312.343322,10.714,0.002,V,NO,ABS,ENSEMBLE,na,na,na,2.0432,1,1969CB,
```