

Κεφάλαιο 5: Φωτομετρία – μέτρηση των εικόνων

Τώρα που έχετε μια σειρά από προσεκτικά βαθμονομημένες εικόνες CCD, ήρθε η ώρα για τη μέτρηση της φωτεινότητας των άστρων που έχουν καταγραφεί. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως φωτομετρία. Όπως και για την απόκτηση εικόνων δεδομένων και βαθμονόμησης, υπάρχει διαθέσιμο λογισμικό που κάνει την περισσότερη δουλειά, αλλά είναι σημαντικό να το καταλαβαίνετε και να το χρησιμοποιείτε σωστά αλλιώς τα αποτελέσματά σας μπορεί να μην είναι επιστημονικώς χρήσιμα.

Δεδομένου ότι υπάρχει ποικιλία λογισμικού που είναι διαθέσιμο, συμπεριλαμβανομένου και του προγράμματος φωτομετρίας της AAVSO, του VPhot, αυτός ο οδηγός δεν θα προσπαθήσει να εμβαθύνει σε λεπτομέρειες για το πώς θα χρησιμοποιήσετε οποιοδήποτε συγκεκριμένο πρόγραμμα. Αντ'αυτού, θα επικεντρωθεί σε έννοιες και τεχνικές που είναι κοινές σε όλα αυτά, το οποίο θα σας βοηθήσει να παράγετε καλής ποιότητας δεδομένα.

Τι είναι η Διαφορική Φωτομετρία;

Δύο είδη φωτομετρίας εφαρμόζονται συνήθως στην αστρονομία:

- Διαφορική φωτομετρία, στην οποία το μέγεθος που εξάγεται για τον μεταβλητό συγκρίνεται με αυτό αστέρων γνωστής λαμπρότητας στην ίδια περιοχή και χρόνο. Μ' αυτό τον τρόπο μπορεί να καθοριστεί «κανονικοποιημένο» μέγεθος για τον μεταβλητό.
- Φωτομετρία all sky, που είναι πιο πολύπλοκη διαδικασία στην οποία τα αστρικά μεγέθη καθορίζονται απ'ευθείας με βάση τα αποτελέσματα βαθμονόμησης του συστήματος και των τρεχουσών ατμοσφαιρικών συνθηκών. Η βαθμονόμηση επιτυγχάνεται με παρατήρηση μιας προκαθορισμένης ομάδας αστέρων γνωστής λαμπρότητας που βρίσκονται έξω από το οπτικό πεδίο και γίνεται την ίδια νύχτα με την παρατήρηση του μεταβλητού.

Ο οδηγός αυτός θα καλύψει μόνο τη διαφορική φωτομετρία επειδή είναι πολύ ευκολότερη και δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα. Επίσης είναι αποτελεσματική ακόμα κι αν οι συνθήκες παρατήρησης δεν είναι ιδανικές. Για παράδειγμα, αν περάσει κάποιο λεπτό νέφος από το πεδίο ενώ λαμβάνετε εικόνα, υπάρχουν πολλές πιθανότητες να επηρεάσει εξίσου τον μεταβλητό και τον αστέρα συγκρίσεως. Έτσι, η διαφορά μεγέθους που θα μετρήσετε θα είναι πρακτικά η ίδια και δε θα αλλοιωθούν τα αποτελέσματά σας.

Τα βήματα για να κάνετε διαφορική φωτομετρία είναι:

1. Έλεγχος εικόνων
2. Ταυτοποίηση των άστρων
3. Καθορισμός διαφράγματος
4. Επιλογή αστέρων συγκρίσεως και ελέγχου
5. Μέτρηση μεγεθών
6. Καθορισμός σφάλματος

1. Έλεγχος των εικόνων

Παρόλο που μπορεί να το έχετε κάνει από πριν, η οπτική επιθεώρηση κάθε εικόνας μπορεί να σώσει πολύ χρόνο και απογοήτευση. Ψάξτε για σύννεφα, ίχνη αεροπλάνων, δορυφόρων ή αποτυπώματα κοσμικών ακτίνων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν οποιοδήποτε από τα αστέρια που θέλετε να μετρήσετε (μεταβλητό και συγκρίσεως). Αν έχετε λάβει χρονοσειρά εικόνων του ίδιου πεδίου, πρέπει να τις εξετάσετε όλες και να ψάξετε για αλλαγές κατά την πάροδο του χρόνου.

Ελέγξτε προσεκτικά όλα τα άστρα που θα μετρήσετε για να είστε σίγουροι ότι κανένα δεν είναι κορεσμένο. Να θυμάστε ότι μόνο και μόνο επειδή δεν μπορείτε να δείτε τις αιχμές του blooming ενός αστέρα, δεν σημαίνει ότι δεν είναι κορεσμένος. Ένας τρόπος για να διαπιστώσετε αν ένα αστρικό είδωλο είναι κορεσμένο ή όχι, είναι να εφαρμόσετε τη διαδικασία point spread (PSF) που θα παρουσιάσει το προφίλ φωτεινότητας του άστρου. Αν η κορυφή της καμπύλης μοιάζει να είναι επίπεδη, είναι πολύ πιθανόν να έχει κορεστεί ο ανιχνευτής και τότε δεν υπάρχει κανένας τρόπος για να αντλήσετε χρήσιμη μέτρηση μεγέθους για τον αστέρα. Εάν δεν έχετε ακόμη καθορίσει τη γραμμικότητα της κάμεράς σας, πρέπει να το κάνετε (βλέπε Κεφάλαιο 3, σελίδα 16). Με την εξάσκηση, θα αποκτήσετε την ικανότητα επιλογής της βέλτιστης έκθεσης που θα χρησιμοποιείτε για τις εικόνες σας με βάση το φίλτρο και το μέγεθος ενός άστρου.

Παραδείγματα μερικών από τα προβλήματα που μπορεί να δείτε όταν ελέγχετε τις εικόνες σας φαίνονται στη σελίδα 39.

2. Ταυτοποίηση των άστρων

Μελετήστε προσεκτικά τις εικόνες σας - ειδικά σε πυκνά πεδία ή σε περιπτώσεις όπου τα άστρα που επιθυμείτε να μετρήσετε είναι πολύ αμυδρά. Δεν είναι ασυνήθιστο να συγχέεται ένας συνοδός ή κοντινό άστρο με τον μεταβλητό που μελετάτε, ιδιαίτερα όταν ο συνοδός είναι πιο λαμπρός. Θα πρέπει πάντα να συμβουλευέστε ένα χάρτη μεγάλης κλίμακας (μεγέθυνσης) όταν απεικονίζετε ένα νέο πεδίο, ώστε να μπορείτε να είστε σίγουροι ότι δεν υπάρχουν απρόοπτα και μπορείτε να παρατηρήσετε και να αναλύσετε το σωστό άστρο.

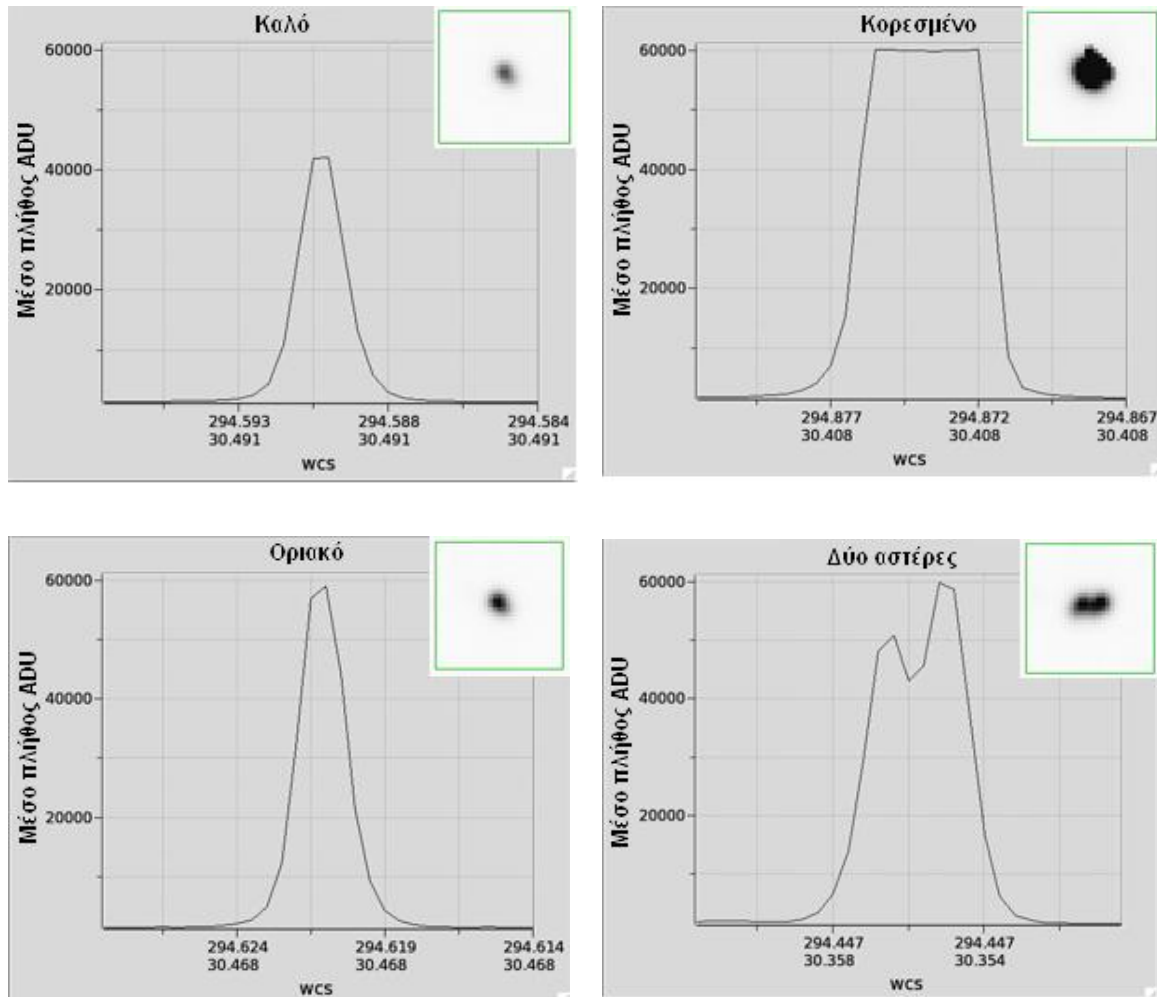
Ανάλογα με το λογισμικό που χρησιμοποιείτε, η ταυτοποίηση των αστέρων μπορεί να γίνει είτε αυτόματα ή θα πρέπει να την κάνετε μόνοι σας χρησιμοποιώντας χάρτες. Σε κάθε περίπτωση, είναι σημαντικό να ελέγξετε και να βεβαιωθείτε ότι ο μεταβλητός και οι αστέρες συγκρίσεως αναγνωρίζονται σωστά. Κάποιο λογισμικό αστρομετρίας θα βοηθήσει, αλλά δεν είναι τέλειο! Μπορεί να αποτύχει από ελαττώματα στις εικόνες σας ή λανθασμένη ταυτοποίηση αστέρων με κοντινούς συνοδούς.

Εάν το λογισμικό σας δεν εισάγει πληροφορίες ακολουθίας αστέρων συγκρίσεως από την AAVSO, θα πρέπει να το κάνετε μόνοι σας. Ο καλύτερος τρόπος για να πάρετε τις πληροφορίες που χρειάζεστε είναι να χρησιμοποιήσετε το Variable Star Plotter (VSP) της AAVSO για να δημιουργήσετε ένα χάρτη και να πάρετε πίνακα φωτομετρίας. Χρησιμοποιώντας το χάρτη, μπορείτε να αναγνωρίσετε τους αστέρες συγκρίσεως και να καταγράψετε τα στοιχεία των δημοσιευμένων μεγεθών για κάθε φίλτρο στις κατάλληλες θέσεις. Επιθέτοντας μια εικόνα DSS στο χάρτη σας, μπορεί επίσης να είναι πολύ χρήσιμο.

InfoBox 5.1 – Το γράφημα PSF

Το λογισμικό φωτομετρίας σας πρέπει να παρέχει ένα τρόπο να εκτελείται η συνάρτηση point spread (PSF) ενός επιλεγμένου άστρου της εικόνας σας. Γενικά, πρόκειται για δισδιάστατο ή τρισδιάστατο γράφημα του πλήθους των ADU κάθε εικονοστοιχείου ως προς το προφίλ του αστέρα στην εικόνα σας.

Αυτό το γράφημα είναι πολύ χρήσιμο για να προσδιοριστεί αν το είδωλο του αστέρα είναι κορεσμένο ή αναμιγνύεται με κάποιου γειτονικού άστρου. Παρακάτω θα δείτε παραδείγματα γραφημάτων που δημιουργήθηκαν με το DS9 με ένθετες τις αντίστοιχες εικόνες του άστρου.



3. Καθορισμός του διαφράγματος

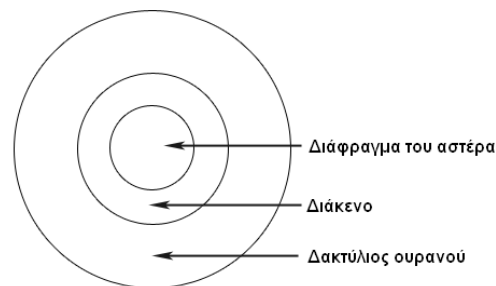
Για να κυριολεκτήσουμε, φωτομετρία είναι απλά η μέτρηση της ποσότητας της ενέργειας του φωτός που λαμβάνεται ανά μονάδα χρόνου. Σε αυτόν τον οδηγό, θα ασχοληθούμε μόνο με τη μέθοδο που είναι γνωστή ως φωτομετρία διαφράγματος, που ονομάστηκε έτσι επειδή μετράμε τη ένταση του φωτός μέσω μικρών κύκλων ή διαφραγμάτων, επικεντρωμένων σε μεμονωμένα άστρα της εικόνας μας. Δύο άλλοι τρόποι με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί φωτομετρία περιλαμβάνουν προσαρμογή point spread (PSF) και «αφαίρεση» της εικόνας. Αυτές οι τεχνικές είναι χρήσιμες για την πραγματοποίηση μετρήσεων σε πολύ πυκνά πεδία, αλλά επειδή και οι δύο είναι πολύ περίπλοκες και σπάνια περιλαμβάνονται σε εμπορικά πακέτα λογισμικού CCD, δεν καλύπτονται εδώ.

Το διάφραγμα αποτελείται από τρία μέρη, όπως φαίνεται στο διάγραμμα:

Διάφραγμα του αστέρα (ή διάφραγμα μετρήσεων) – είναι ο εσωτερικός κύκλος που περιβάλλει τον αστέρα που μετράμε.

Διάκενο – είναι απλά μια περιοχή μεταξύ του κύκλου σήματος και του δακτυλίου του ουρανού.

Δακτύλιος ουρανού – είναι η εξωτερική στεφάνη που συλλέγει πληροφορία για το υπόβαθρο του ουρανού.



Το λογισμικό που χρησιμοποιείτε δημιουργεί πιθανότατα αυτούς τους κύκλους αυτόματα όταν φορτώνει την εικόνα. Εν τούτοις πρέπει να ελέγχετε το μέγεθος κάθε κύκλου και ενδέχεται να χρειαστούν μικρές διορθώσεις για να ταιριάξουν με την εικόνα ή να αποτρέψουν προβλήματα. Πρέπει να θυμάστε ένα σημαντικό κανόνα: *χρησιμοποιούμε πάντοτε το ίδιο σαιτ κύκλων για κάθε άστρο της εικόνας.*

Μερικές άλλες προτάσεις και οδηγίες για το μέγεθος των κύκλων:

- Η διάμετρος του διαφράγματος του άστρου πρέπει χονδρικά να είναι 3-4 φορές μεγαλύτερη από το μέσο FWHM όλων των άστρων που θα μετρήσετε. Το λογισμικό σας πρέπει να παρέχει τρόπο υπολογισμού του FWHM (Full Width at Half Maximum) όρος που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3, σελίδα 17.
- Βεβαιωθείτε πως το λαμπρότερο από τα άστρα που θα μετρήσετε βρίσκεται πλήρως μέσα στο διάφραγμα. Αν το διάφραγμα είναι πολύ μικρό, δε θα γίνει σωστή μέτρηση κι αν είναι πολύ μεγάλο διακυνδυνεύετε να περικλείσει και αμυδρά γειτονικά άστρα.
- Η διάμετρος του εσωτερικού κύκλου του δακτυλίου ουρανού πρέπει να είναι περίπου 5 φορές το μέσο FWHM ή αλλιώς περίπου 10 pixels,
- Αν είναι απαραίτητο, ρυθμίστε τον εξωτερικό κύκλο του δακτυλίου ουρανού. Μεγάλος δακτύλιος σημαίνει καλύτερος λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) αλλά δεν πρέπει – κατά το δυνατόν – να περιέχει άστρα, ακόμα και αμυδρά.
- Εν δεν υπάρχει τρόπος να αποφύγετε την παρουσία αστέρων πεδίου μέσα στο δακτύλιο ουρανού, μην πανικοβληθείτε! Το λογισμικό σας έχει τη δυνατότητα να εξομαλύνει αυτόματα την επίδρασή τους. Συμβουλευτείτε το εγχειρίδιο χρήσης του για να δείτε πώς γίνεται.

4. Επιλογή αστέρων συγκρίσεως και ελέγχου

Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα, διότι θα έχετε διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με το ποιους αστέρες συγκρίσεως θα χρησιμοποιήσετε. Σε γενικές γραμμές, όσο περισσότερους χρησιμοποιήσετε, τόσο το καλύτερο, δεδομένου ότι τυχόν λάθη ή μικρή μεταβλητότητα θα εξομαλυνθούν από το μέσο όρο τους. Ωστόσο, είναι σημαντικό να επιθεωρήσετε τους αστέρες συγκρίσεως που σκοπεύετε να χρησιμοποιήσετε και να τους επιλέξετε με προσοχή για να βεβαιωθείτε ότι έχουν παραληφθεί αυτοί που θα σας δώσουν χειρότερα αποτελέσματα.

Αν είναι δυνατόν, χρησιμοποιήστε ακολουθίες αστέρων συγκρίσεως της AAVSO. Πολλά πακέτα λογισμικού θα τους φορτώσουν αυτόματα. Αν όχι, μπορείτε να βρείτε τις συντεταγμένες των αστέρων συγκρίσεως για κάθε πεδίο, χρησιμοποιώντας το εργαλείο VSP της AAVSO και επιλέγοντας να τους εξάγει με τη μορφή ενός «πίνακα φωτομετρίας». Ο πίνακας θα σας δώσει τη θέση του κάθε αστέρα συγκρίσεως μαζί με το μέγεθός του και το σφάλμα μεγέθους σε κάθε ζώνη διέλευσης.

Οι ακολουθίες της AAVSO έχουν σχεδιαστεί προσεκτικά ώστε να χρησιμοποιούνται αστέρες για τους οποίους έχουν καθοριστεί τα μεγέθη με μεγάλη ακρίβεια, είναι γνωστό ότι δεν μεταβάλλονται ή έχουν κοντινούς συνοδούς και έχουν χρώμα παρόμοιο με του μεταβλητού. Το άλλο πλεονέκτημα είναι ότι χρησιμοποιώντας ένα τυποποιημένο σύνολο αστέρων συγκρίσεως, τα αποτελέσματα σας θα συσχετίζονται καλύτερα με εκείνα άλλων παρατηρητών της AAVSO όταν τα δεδομένα σας ενσωματωθούν στη διεθνή βάση δεδομένων της AAVSO. Αυτό αρέσει στους ερευνητές που θα χρησιμοποιήσουν τα στοιχεία σας.

Εδώ είναι μερικές οδηγίες που πρέπει να ακολουθήσετε όταν επιλέγετε ποιους αστέρες συγκρίσεως θα χρησιμοποιήσετε:

- Προσπαθήστε να επιλέγετε αστέρες συγκρίσεως κοντά στο μεταβλητό κι όχι στα άκρα του πεδίου σας, επειδή εκεί μπορεί τα είδωλά τους να παραμορφώνονται.
- Οι αστέρες συγκρίσεως πρέπει να είναι παρόμοιου χρώματος μεταξύ τους, αλλά όχι κατ'ανάγκη και με τον μεταβλητό.
- Μην χρησιμοποιείτε ερυθρά άστρα (που πολλές φορές είναι και τα ίδια μεταβλητά) ή πολύ μπλε άστρα. Καλή πρακτική είναι να επιλέγετε ακολουθία άστρων με ίδιο δείκτη χρώματος μεταξύ +0.3 και +1.0 με ιδανικό το $B-V=+0.7$. καθώς όμως περιορίζεστε από το εύρος του πεδίου, θα αξιοποιήσετε αυτά που υπάρχουν αν οι επιλογές είναι λίγες.
- Επιλέξτε αστέρες συγκρίσεως με παραπλήσιο μέγεθος προς τον μεταβλητό.
- Βεβαιωθείτε πως κανείς από αυτούς που επιλέξατε δεν έχει συνοδό.
- Επιλέξτε αστέρες συγκρίσεως με λόγο σήματος προς θόρυβο τουλάχιστον 100.
- Θα πρέπει να έχουν παρόμοια αβεβαιότητα μεγέθους, κατά προτίμηση λιγότερο από 0.01-0.02 mag.
- Βεβαιωθείτε πως κανείς από τους αστέρες συγκρίσεως που επιλέξατε δεν βρίσκεται κοντά στο όριο κορεσμού.

Οι αστέρες ελέγχου είναι σημαντικοί επειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιοριστεί εάν κάποιος από τους αστέρες συγκρίσεως μεταβάλλεται ή αν υπάρχουν άλλα προβλήματα με την εικόνα σας. Ένα αστέρι ελέγχου είναι απλά ένα αστέρι γνωστής λαμπρότητας που δεν μεταβάλλεται και το οποίο θα αντιμετωπίζεται όπως κι ο μεταβλητός σας. Θα πρέπει να είστε σε θέση να συγκρίνετε το μέγεθος που θα βρείτε για αυτό με το δημοσιευμένο μέγεθός του (στο ίδιο χρώμα) και τα αποτελέσματα θα πρέπει να είναι πολύ κοντά. Ο αστέρας ελέγχου θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν παρόμοιος σε χρώμα και μέγεθος με τον μεταβλητό και μπορεί να επιλεγεί από τη λίστα των διαθέσιμων αστέρων συγκρίσεως στο ίδιο πεδίο με τον μεταβλητό.

Αν θέλετε να επεξεργαστείτε αρκετές ή πολλές εικόνες που λαμβάνονται στο ίδιο πεδίο, το ίδιο βράδυ (χρονοσειρές) είναι χρήσιμο να κάνετε το γράφημα του μεγέθους του αστέρα ελέγχου συναρτήσει του χρόνου. Αν όλα πάνε καλά, το αποτέλεσμα θα πρέπει να είναι ευθεία οριζόντια γραμμή. Αν το μέγεθός του μεταβάλλεται, τότε κάτι δεν πάει καλά. Μήπως έχει περάσει κάποιο σύννεφο όταν δεν παρακολουθούσατε;

5. Μετρώντας τα μεγέθη

Στο πιο σύγχρονο λογισμικό, με την εισαγωγή ή την λήψη των δεδομένων των αστέρων συγκρίσεως, ένα κλικ του ποντικιού θα σας εμφανίσει το μέγεθος του στόχου σας. Είναι καλό ωστόσο να καταλάβουμε τι συμβαίνει στο εσωτερικό του λογισμικού σας για να γίνει αυτό (ειδικά αν έχετε παλαιότερο λογισμικό που δεν είναι τόσο αυτόματο).

Το πρώτο βήμα που κάνει το λογισμικό είναι να μετρηθεί το μέγεθος οργάνου (*instrumental magnitude*). Αυτό είναι απλά ένας αριθμός που σχετίζεται με την καταμέτρηση των φωτονίων (ή ADU) που συλλέγονται εντός του τηλεσκοπίου. Αφαιρώντας το μέγεθος οργάνου ενός άστρου σύγκρισης από το μέγεθος οργάνου του στόχου, μπορείτε να πάρετε αυτό που είναι γνωστό ως διαφορικό μεγέθους. Ο τύπος είναι:

$$\Delta v = v_{\text{measured}} - c_{\text{measured}}$$

Όπου Δv είναι η διαφορά μεγέθους, v_{measured} είναι το μέγεθος οργάνου του μεταβλητού και c_{measured} είναι το μέγεθος οργάνου του αστέρα συγκρίσεως που μόλις μετρήσατε. Για να κάνετε τις παρατηρήσεις σας πιο χρήσιμες για την επιστημονική κοινότητα, θα πρέπει τώρα να μετατρέψετε από το διαφορικό μεγέθους σε ένα τυποποιημένο μέγεθος, με την προσθήκη σε αυτό του δημοσιευμένου μεγέθους του αστέρα συγκρίσεως όπως:

$$V = \Delta v + C_{\text{published}}$$

Σχεδόν όλα τα πακέτα λογισμικού που είναι διαθέσιμα σήμερα, θα σας επιτρέψουν να εκτελέσετε αυτό που είναι γνωστό ως φωτομετρία συνόλου - *ensemble photometry*. Αυτό που κάνουν είναι να συγκρίνουν τον μεταβλητό με κάθε αστέρα συγκρίσεως που επιλέξατε. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις παραπάνω, θα υπολογίσουν το τυποποιημένο μέγεθος του μεταβλητού βασισμένο σε κάθε αστέρα συγκρίσεως και θα παρουσιάσουν το αποτέλεσμα ως σταθμισμένο μέσο όρο όλων αυτών των τιμών. Θα έχετε λοιπόν ένα τυποποιημένο μέγεθος για τον μεταβλητό σας, που γενικά θα εμπεριέχει μικρότερο σφάλμα από ό, τι εάν είχε χρησιμοποιηθεί μόνο ένας αστέρας συγκρίσεως. Αν φαίνεται πως ένας από τους αστέρες συγκρίσεως έχει πρόβλημα ή προσθέτει θόρυβο στο σύνολο, κάτι που επηρεάζει αρνητικά τα αποτελέσματά σας, δοκιμάστε να τον αφαιρέσετε και να υπολογίσετε εκ νέου το μέσο όρο.

Παρακαλείσθε να σημειώσετε ότι χρησιμοποιούμε τη σύμβαση που τα πεζά γράμματα υποδηλώνουν μεγέθη οργάνου, ενώ τα κεφαλαία, πλάγια γράμματα (όπως V) είναι για τα τυποποιημένα μεγέθη και με μη-πλάγια κεφαλαία γράμματα είναι για μεγέθη που έχουν *μετασχηματιστεί*. Θα εξηγήσουμε τα περί μετασχηματισμών στην επόμενη ενότητα, αλλά για να συνοψίσουμε γρήγορα: μπορεί να έχετε πάρει κάποια εικόνα με ένα πρότυπο φίλτρο Johnson V , αλλά θα πρέπει να εκτελέσετε κάποιους επιπλέον υπολογισμούς για να τοποθετήσετε το μέγεθος " v " που μετρήσατε στο σύστημα Johnson V με την υψηλότερη δυνατή ακρίβεια. Θα σας δείξουμε πώς γίνεται στο Κεφάλαιο 6.

InfoBox 5.2 – Σημείωση περί μεγεθών

Το σύστημα μεγεθών χρονολογείται από τον δεύτερο αιώνα π.Χ., και αποδίδεται στον Έλληνα αστρονόμο Ίππαρχο. Είναι ένα λογαριθμικό σύστημα όπου τα φωτεινότερα αστέρια αντιστοιχούν σε μικρότερα μεγέθη. Το σύστημα αναπτύχθηκε για να ταξινομήσει άστρα ορατά με γυμνό μάτι, αλλά έχει προσαρμοστεί στην εποχή των τηλεσκοπίων για τη μέτρηση της οπτικής λαμπρότητας για πολλά είδη αστρονομικών αντικειμένων. Υπάρχει μια άμεση σχέση μεταξύ των μεγεθών και των ροών ακτινοβολίας: διαφορά πέντε μεγεθών στη φωτεινότητα αντιστοιχεί σε πολλαπλασιαστικό συντελεστή 100 σε διαφορά ροής, πράγμα που σημαίνει ότι κάθε μέγεθος αντιστοιχεί σε ένα συντελεστή περίπου 2.5 σε ροή. Επειδή η κλίμακα μεγέθους είναι λογαριθμική, οι λόγοι ροών μπορούν να εκφραστούν ως διαφορές μεγεθών. Η σχετική διαφορά σε μεγέθη μεταξύ δύο αντικειμένων με διαφορετικές μετρούμενες ροές μπορεί να ληφθεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{mag}_1 - \text{mag}_2 = -2.5 \log_{10} (\text{flux}_1 / \text{flux}_2)$$

Για εκτενέστερη αναφορά, δείτε την ιστοσελίδα της AAVSO: <http://www.aavso.org/magnitude>

Το λογισμικό σας θα μετατρέψει μάλλον τις μετρηθείσες ροές (πλήθος ADU μέσα στο διάφραγμα της μέτρησης σας) σε μεγέθη οργάνου, αλλά να γνωρίζετε ότι μπορεί να χρησιμοποιεί αυθαίρετα σημεία μηδέν για αυτά τα μεγέθη οργάνου. Τούτο μπορεί να οδηγήσει σε περίεργη (κατά τα άλλα όμως, απολύτως θεμιτή) εμφάνιση μεγεθών όπως το "-12.567". Τέτοια μεγέθη οργάνου είναι αποδεκτά, εφ' όσον όλα τα άστρα μετρούνται με το ίδιο σημείο μηδέν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα σημεία μηδέν αλληλοεξουδετερώνονται όταν υπολογίζονται διαφορικά μεγέθη.

6. Καθορισμός του σφάλματος

Τα μεγέθη που μετράτε παρέχουν μόνο ένα μέρος των πληροφοριών της παρατήρησής σας. Κάθε έγκυρο κομμάτι επιστημονικών δεδομένων δεν έρχεται μόνο με μέτρηση, αλλά και με μια *αβεβαιότητα*, που λέει στον ερευνητή ο οποίος χρησιμοποιεί τα δεδομένα σας πόσο καλά καθορίζεται η μέτρηση σας. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να υπολογίσετε με ακρίβεια και να υποβάλετε την αβεβαιότητα στα μεγέθη σας μαζί με το ίδιο το μέγεθος.

Η αβεβαιότητα των μετρήσεων σας θα περιλαμβάνει τόσο ένα *τυχαίο* στοιχείο όσο και ένα *συστηματικό*. Ο τυχαίος θόρυβος περιλαμβάνει πράγματα όπως ο θόρυβος φωτονίων (θόρυβος ανάγνωσης) που είναι ανάλογος προς την τετραγωνική ρίζα του αριθμού των φωτονίων που λαμβάνει η κάμερα σας και θερμικός θόρυβος στον ανιχνευτή CCD. Αυτές οι πηγές θορύβου πρέπει να προσδιορίζονται, αλλά πολύ λίγα μπορούν να γίνουν για τη μείωσή τους και βάζουν ένα κατώτερο όριο στην αβεβαιότητά σας. Οι συστηματικές αβεβαιότητες που σχετίζονται με τα όργανα σας και μπορεί να περιλαμβάνουν θέματα όπως ο τρόπος που τα διαφράγματα μέτρησης επηρεάζουν τα μεγέθη που εξάγετε ή αν έχετε αβεβαιότητες ή λάθη στα flat ή στα μεγέθη που χρησιμοποιείτε για τις τιμές των αστέρων συγκρίσεως. Δεν θα μπορούμε εδώ σε λεπτομερή συζήτηση της θεωρίας των αβεβαιοτήτων, αλλά σας προτείνουμε το επιλεγμένο σεμινάριο της AAVSO "*Uncertainty about Uncertainties*" και τις συνοδευτικές σημειώσεις του Aaron Price για περαιτέρω διερεύνηση. Θα περιοριστούμε απλά στο πώς να το κάνουμε αυτό.

Ο πιο εύκολος, αλλά όχι ιδανικός τρόπος είναι να αφήσουμε το λογισμικό του CCD να κάνει τη δουλειά. Τα περισσότερα λογισμικά CCD είτε θα παρουσιάσουν την αβεβαιότητα σε μεγέθη ή θα σας δώσουν το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR ή S / N). Μια εύχρηστη προσέγγιση είναι να υποθέσουμε ότι η αβεβαιότητα σε μεγέθη είναι 1/SNR, έτσι ώστε για SNR 50 να έχουμε αβεβαιότητα 0.02 μεγεθών. Ο λόγος που λέμε ότι αυτό δεν είναι ιδανικό είναι (α) το SNR θα υπολογίζεται μόνο για κάθε εικόνα που έχετε μετρήσει και δεν θα σας δηλώσει τίποτα για το θόρυβο από μη φωτομετρικές συνθήκες για παράδειγμα και (β) θα πρέπει να είστε βέβαιοι ότι το λογισμικό κάνει αυτή τη διαδικασία σωστά. Τα περισσότερα λογισμικά *σήμερα* κάνουν μια σημαντική διεργασία για να γίνει αυτό, αλλά ιστορικά αυτό δεν ίσχυε για όλα τα προγράμματα. Όπως πάντα, ελέγξτε τα αποτελέσματά σας για να δείτε αν έχουν νόημα.

Πέρα από αυτή την πρώτη μέθοδο, δεν υπάρχει κανένας καλύτερος τρόπος για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων, αλλά αυτό εξαρτάται από το τι και πώς σκοπεύετε να παρατηρήσετε. Αν θέλετε να κάνετε πολλαπλές μετρήσεις ενός άστρου κατά τη διάρκεια μιας νύχτας (χρονοσειρές), μπορείτε να χρησιμοποιήσετε τις διακυμάνσεις που παρατηρούνται είτε στο μεταβλητό σας ή τους αστέρες συγκρίσεως και ελέγχου για να εκτιμηθεί η συνολική φωτομετρική αβεβαιότητα. Υπάρχουν δύο επιλογές εδώ. Εάν γνωρίζετε ότι ο μεταβλητός δεν αλλάζει φωτεινότητα σε σύντομο χρονικό διάστημα (ένα αστέρι Mira, για παράδειγμα), τότε μπορείτε να υπολογίσετε το μέγεθος του μεταβλητού σε κάθε εικόνα και στη συνέχεια να υπολογίσετε την τυπική απόκλιση των μετρήσεων αυτών για να εξαγάγετε την αβεβαιότητα. (Σημείωση: ιδανικά, για ένα αργά μεταβαλλόμενο αστέρα, θα πάτε ένα βήμα παραπέρα και θα συνδυάσετε όλες τις μετρήσεις του μεταβλητού που έγιναν σε μία νύχτα σε ένα μέγεθος, αντί να υποβάλετε το σύνολο της χρονοσειράς). Αν ο μεταβλητός αλλάζει σε σύντομο χρονικό διάστημα (έναν κατακλυσμικό μεταβλητός, για παράδειγμα), τότε θα πρέπει να εξαγάγετε την αβεβαιότητα από τις πολλαπλές μετρήσεις των αστέρων συγκρίσεως και ελέγχου. Σε όλες τις περιπτώσεις, θα υπολογίσετε την αβεβαιότητα, χρησιμοποιώντας την εξίσωση για την τυπική απόκλιση, σ:

$$\sigma = ((\sum(x_i - x)^2) / (N-1))^{1/2}$$

όπου x_i είναι τα μεμονωμένα μεγέθη, το x είναι ο μέσος όρος του μεγέθους, και το N είναι ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων από τις οποίες εξήχθη ο μέσος όρος. Στη συνέχεια, θα αναφέρετε την αβεβαιότητά σας ως σ . Σημειώστε ότι εάν χρησιμοποιείτε την τυπική απόκλιση ενός αστέρα συγκρίσεως ή ελέγχου για αυτή τη διαδικασία, θα πρέπει να χρησιμοποιήσετε κάποιον που έχει παρόμοια φωτεινότητα με το μεταβλητό.

Αν αντίθετα λαμβάνετε μόνο μία εικόνα ανά φίλτρο ενός συγκεκριμένου πεδίου, περιορίζετε στον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων με βάση τις πληροφορίες που περιέχονται σε αυτή τη μοναδική εικόνα. Για την περίπτωση ενός αμυδρού άστρου, πρέπει να χρησιμοποιήσετε την εξίσωση CCD:

$$S/N = N_{star} / (N_{star} + n(N_{sky} + N_{dark} + (N_{readnoise})^2))^{1/2}$$

Όπου N είναι ο αριθμός των φωτονίων που λαμβάνονται από κάθε αστέρα, τον ουρανό, το ρεύμα σκότους και τον θόρυβο ανάγνωσης του CCD, ενώ n είναι ο αριθμός των pixels μέσα στο διάφραγμα του αστέρα. Μπορεί να δείχνει περίπλοκο αλλά πρόκειται απλώς για τροποποίηση της περίπτωσης που μετράται η αβεβαιότητα μόνο από το θόρυβο ανάγνωσης. Για να το διαπιστώσετε, φανταστείτε ότι το N_{star} είναι πολύ μεγαλύτερο από τους υπόλοιπους όρους. Τότε η εξίσωση CCD προσεγγίζει το όριο της τετραγωνικής ρίζας του αριθμού των φωτονίων που ελήφθησαν.

Παρατηρείστε εδώ δύο πράγματα: πρώτα, σημειώστε ότι το N στην παραπάνω εξίσωση είναι ο αριθμός των φωτονίων κι όχι το πλήθος των ADU το οποίο είναι αυτό που μετρά το CCD. Αυτό εισάγει μια μικρή τροποποίηση στην εξίσωση που θα περιλαμβάνει το κέρδος G του μετατροπέα (gain):

$$S/N = N_{ADU} \times G / ((N_{ADU} \times G) + n_{pix} \times ((N_{ADU,sky} \times G) + N_{dark} + (N_{r,n})^2))^{1/2}$$

Δεύτερον, σημειώστε ότι *αντί της πλήρους εξίσωσης CCD μπορείτε να χρησιμοποιήσετε την τιμή SNR από το λογισμικό σας* για την εκτίμηση της αβεβαιότητας στην περίπτωση ενός άστρου του οποίου η φωτεινότητα είναι πολύ πάνω από το υπόβαθρο του ουρανού και τον θόρυβο ανάγνωσης.

Η επόμενη καλύτερη επιλογή στη φωτομετρία μιας εικόνας, είναι η περίπτωση όπου έχετε διαθέσιμους πολλούς αστέρες συγκρίσεως στο πεδίο. Σε αυτή την περίπτωση, μπορείτε να μετρήσετε όλους τους αστέρες συγκρίσεως μαζί με το μεταβλητό, να υπολογίσετε το μέγεθος του μεταβλητού που λαμβάνεται χρησιμοποιώντας κάθε μία από τις συγκρίσεις και στη συνέχεια να υπολογίσετε την τυπική απόκλιση όλων αυτών των μεγεθών. Αυτό θα λαμβάνει υπόψη τις εγγενείς αβεβαιότητες τόσο του μεταβλητού, όσο και των αστέρων συγκρίσεως.

Η εξίσωση CCD είναι καθολική, αλλά εμπλέκεται επίσης σε υπολογισμούς, δεδομένου ότι θα πρέπει να μετρήσετε όλους αυτούς τους όρους ξεχωριστά και δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με άλλες πηγές αβεβαιότητας πέρα από αυτές που ήταν παρούσες στη συγκεκριμένη εικόνα, όπως είναι οι συνθήκες του ουρανού. Ωστόσο, σε μια μοναδική εικόνα, αυτό είναι το καλύτερο που μπορείτε να κάνετε και πρέπει να το χρησιμοποιήσετε, ιδιαίτερα στην περίπτωση που εργάζεστε με αμυδρά άστρα και χαμηλό S/N.