

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΚΗ ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ



Κοσμάς Γαζέας

Αστρονομική φωτομετρία

Η αστρονομική φωτομετρία αποσκοπεί στη συλλογή φωτός από τα ουράνια σώματα, όπως αυτά ακτινοβολούν στο σύμπαν.

Η συλλογή του φωτός όμως μπορεί να γίνει είτε απεικονιστικά (λαμβάνοντας μια εικόνα), είτε απλώς φωτομετρικά (με τη χρήση ενός φωτόμετρου) είτε και φασματοσκοπικά (με την ανάλυση του φωτός και την καταγραφή της κατανομής της ακτινοβολίας του στα διάφορα μήκη κύματος).

Ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται, η εξαγωγή των αστροφυσικών συμπερασμάτων μπορεί να περιλαμβάνει:

- Μέτρηση απόστασης και λαμπρότητας των ουρανίων σωμάτων
- Το απόλυτο μέγεθος του αντικειμένου που παρατηρείται
- Η ενεργός θερμοκρασία του ακτινοβολούντος σώματος
- Κίνηση (π.χ. ιδία κίνηση ή άλλη)
- Ακτινική ταχύτητα προσέγγισης/απομάκρυνσης σε σχέση με τον παρατηρητή
- Χημική σύσταση

...

Διαφορική φωτομετρία

Η διαφορική φωτομετρία είναι η σύγκριση (διαφορά) της φωτομετρίας ενός ουρανίου σώματος με ένα άλλο ουράνιο σώμα γνωστής και κατά προτίμηση σταθερής λαμπρότητας.

Με τη μέθοδο αυτή εξαλείφονται παράγοντες ατμοσφαιρικής απορρόφησης και τύρβης, οι οποίοι θα μετέβαλαν το φως του ουρανίου σώματος που μελετάται ούτως ή άλλως.

(βλ. διαλέξεις σχετικά με την επίδραση ατμοσφαιρικών παραγόντων στην παρατήρηση)

Στα προγράμματα φωτομετρίας επιλέγουμε συνήθως τον μεταβλητό αστέρα (V-variable) και έναν αστέρα σύγκρισης (C-comparison) και για τον έλεγχο του αστέρα σύγκρισης έναν ακόμη αστέρα (K-check), ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα του αστέρα σύγκρισης.

Έτσι, το εξαγόμενο σε μια φωτομετρία είναι τα φωτομετρικά μεγέθη των τριών αυτών αστερών ή απευθείας οι διαφορές τους (διαφορική φωτομετρία).

Η αστρονομική φωτομετρία μετράει τη λαμπρότητα των αντικειμένων σε αυθαίρετες μονάδες (counts), τα οποία πρέπει να μετατραπούν σε αστρονομικό μέγεθος με τη χρήση του νόμου Pogson.

Φωτομετρία διαφράγματος (aperture photometry)

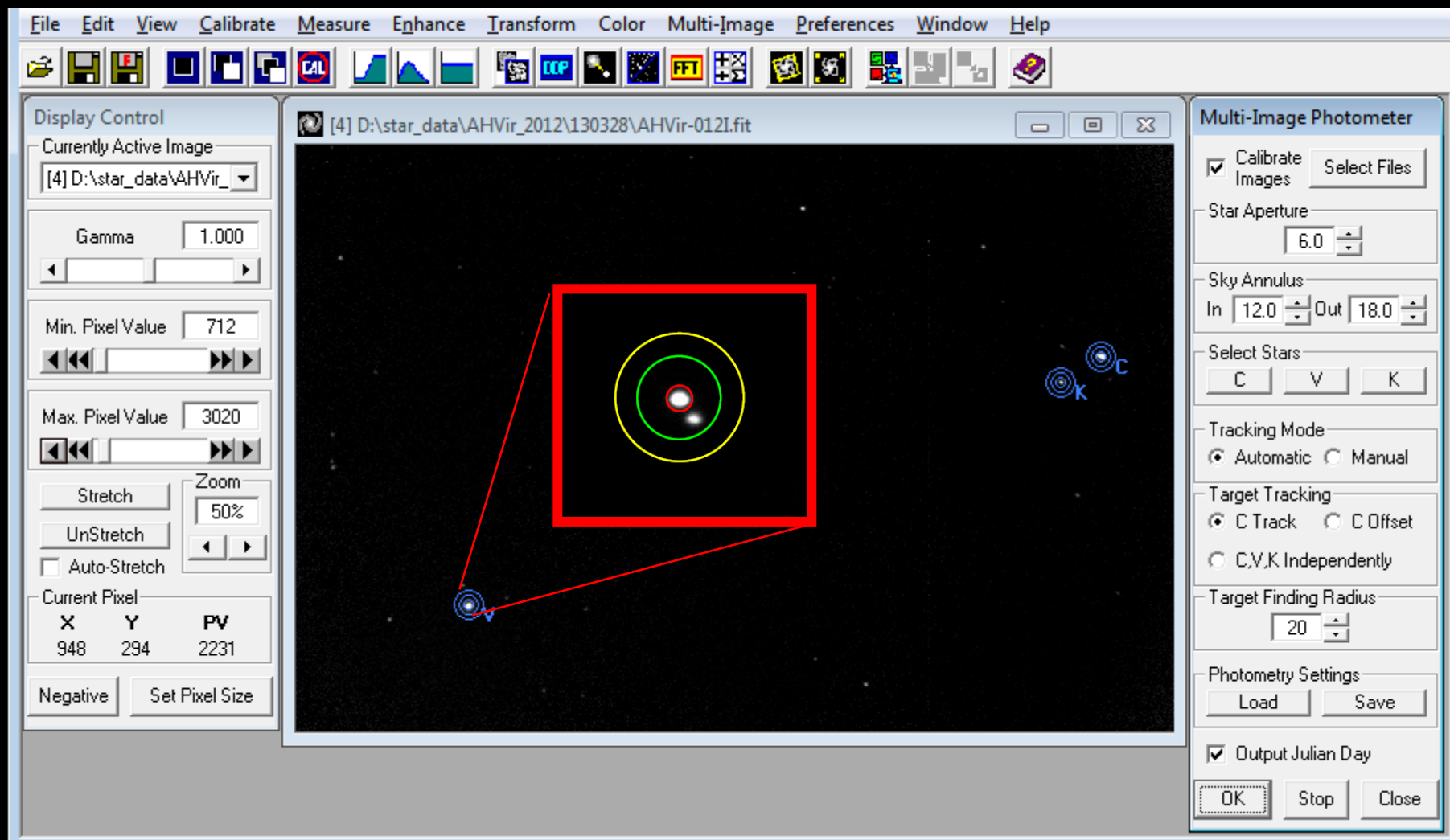
Για τη μέτρηση της λαμπρότητας ενός αντικειμένου στο ουρανό, η τεχνική εξαρτάται από το όργανο παρατήρησης.

Το φωτόμετρο χρησιμοποιεί **διαφράγματα** για την επιλογή ενός μόνο αστέρα στον ουρανό, ενώ η φωτογραφική τεχνική (αναλογική ή ψηφιακή) χρησιμοποιεί **διαφράγματα** που τοποθετούνται στη φωτογραφία για τη μέτρηση μόνο μιας περιοχής της εικόνας που έχει ληφθεί.

Υπάρχουν κι άλλες τεχνικές (π.χ. PSF photometry) οι οποίες αποσκοπούν στην **προσαρμογή πολυωνύμου** στο προφίλ του αστρικού αντικειμένου για τη μέτρηση του φωτός που έχει γνωστή κατανομή στην επιφάνεια της εικόνας.

Η επιλογή του διαφράγματος σχετίζεται με την **κλίμακα ειδώλου** στο εστιακό επίπεδο, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (seeing), καθώς και από άλλους παράγοντες που εξαρτώνται από τη φύση του ουρανίου σώματος (αν είναι αστέρας, ή εκτεταμένο αντικείμενο, αν έχει κοντά του άλλα ουράνια σώματα κτλ).

Φωτομετρία διαφράγματος (aperture photometry)



(V:Variable, C:Comparison, K:Check)

Το λογισμικό αθροίζει όλες τις τιμές των pixels που βρίσκονται μέσα στον εσωτερικό κύκλο.
Στον εξωτερικό δακτύλιο μετρείται η συνεισφορά του φωτεινού υποβάθρου (ουρανού).



Image Display Control

Current Active Image

[6] 130112_13_14_all_i.fit

Display Defaults Imager



User Black/White

3657.94 16661.96

Change

+B -C 10 +C -B <-Slow Fast->

Auto

Auto Min/Max
Default B/W

☐ Display Image as Negative

Gamma

1.00

< >

Zoom

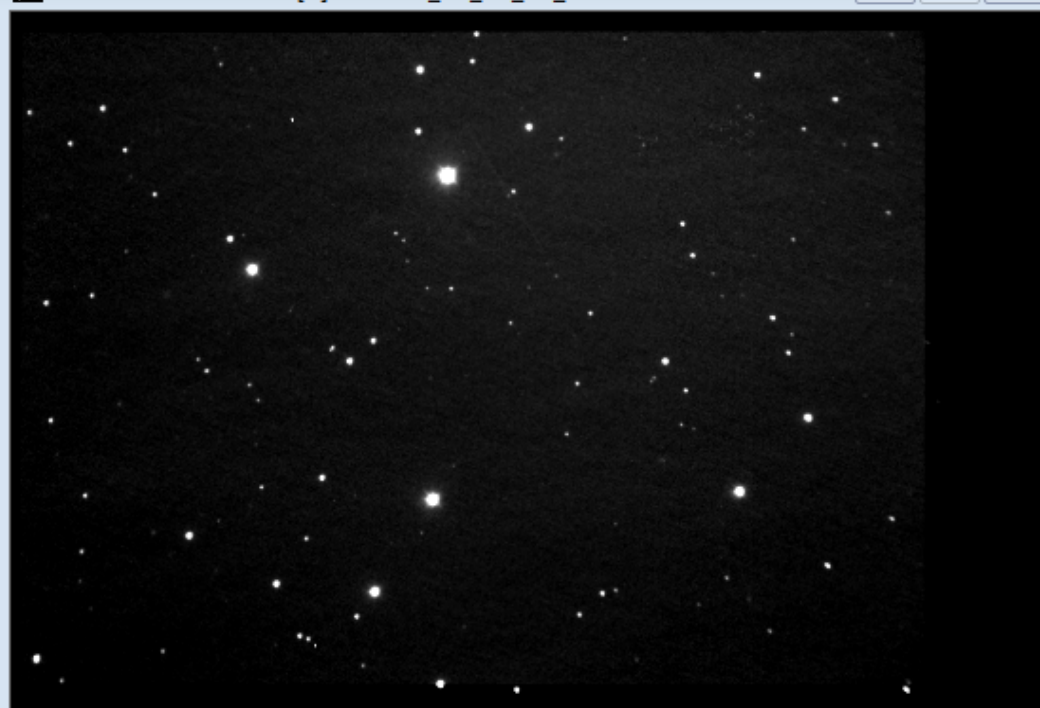
50.0%

< >

Current Pixel

X Y PV
1072 488 0.0

[6] 130112_13_14_all_i.fit



Multi-Image Photometry

Setup Report J.D. Settings

Radii

8.0 11.0 14.0
< > < > < >

Integration Time

Integration (sec): 100.0

Instrument Parameters

Zero Point: 20.6

Gain [e/adu]: 1.0

R.O. Noise [e rms]: 10.0

Dk Curr [e/s/pix]: 1.0

Default

Save

Recall

Execute

Stop

Close

Οι κύκλοι των διαφραγμάτων ορίζονται στο πάνω-δεξιά μέρος της οθόνης.

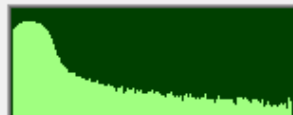


Image Display Control

Current Active Image

[6] 130112_13_14_all_i.fit

Display Defaults Imager



User Black/White

3657.94 16661.96

Change

+B -C 10 +C -B <-Slow Fast->

Auto

Auto Min/Max
Default B/W

☐ Display Image as Negative

Gamma

1.00

Zoom

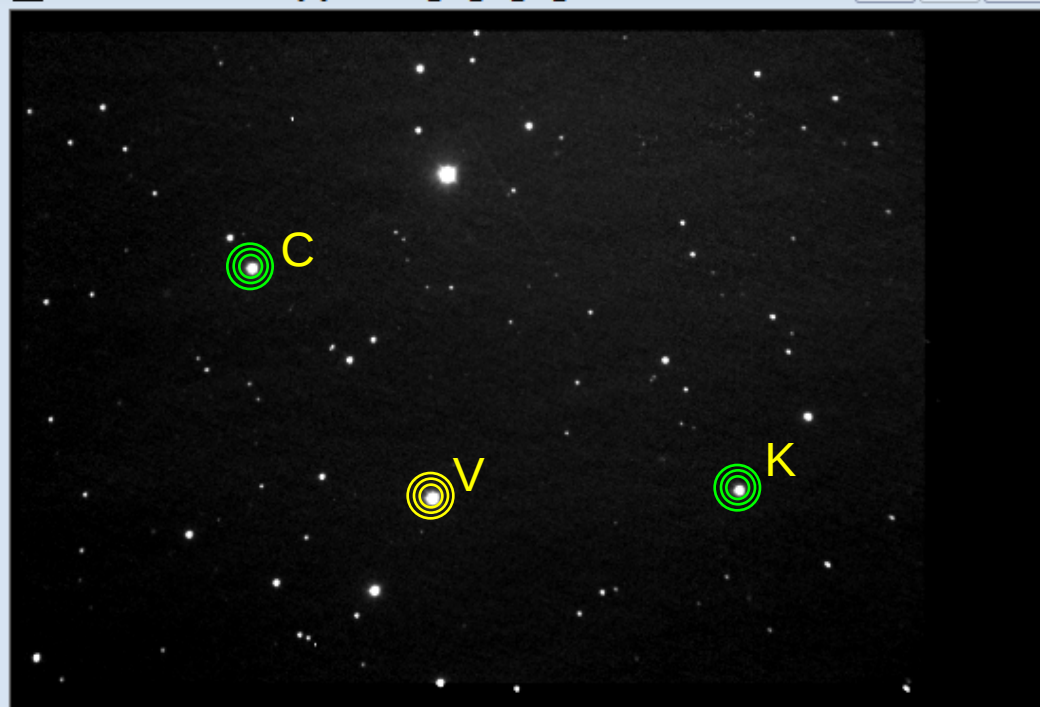
50.%

1072 488 0.0

Current Pixel

X Y PV
1072 488 0.0

[6] 130112_13_14_all_i.fit



Multi-Image Photometry

Setup Report J.D. Settings

Radii

8.0 11.0 14.0

Integration Time

Integration (sec): 100.0

Instrument Parameters

Zero Point: 20.6

Gain [e/adu]: 1.0

R.O. Noise [e rms]: 10.0

Dk Curr [e/s/pix]: 1.0

Default

Save

Recall

Execute

Stop

Close

(V:Variable, C:Comparison, K:Check)

Το λογισμικό αθροίζει όλες τις τιμές των pixels που βρίσκονται μέσα στον εσωτερικό κύκλο.

Στον εξωτερικό δακτύλιο μετρείται η συνεισφορά του φωτεινού υποβάθρου (ουρανού).



Image Display Control

Current Active Image

[6] 130112_13_14_all_i.fit

Display Defaults Imager



User Black/White

3657.94 16661.96

Change

+B -C 10 +C -B <-Slow Fast->

Auto

Auto Min/Max
Default B/W

☐ Display Image as Negative

Gamma

1.00

Zoom

50.%

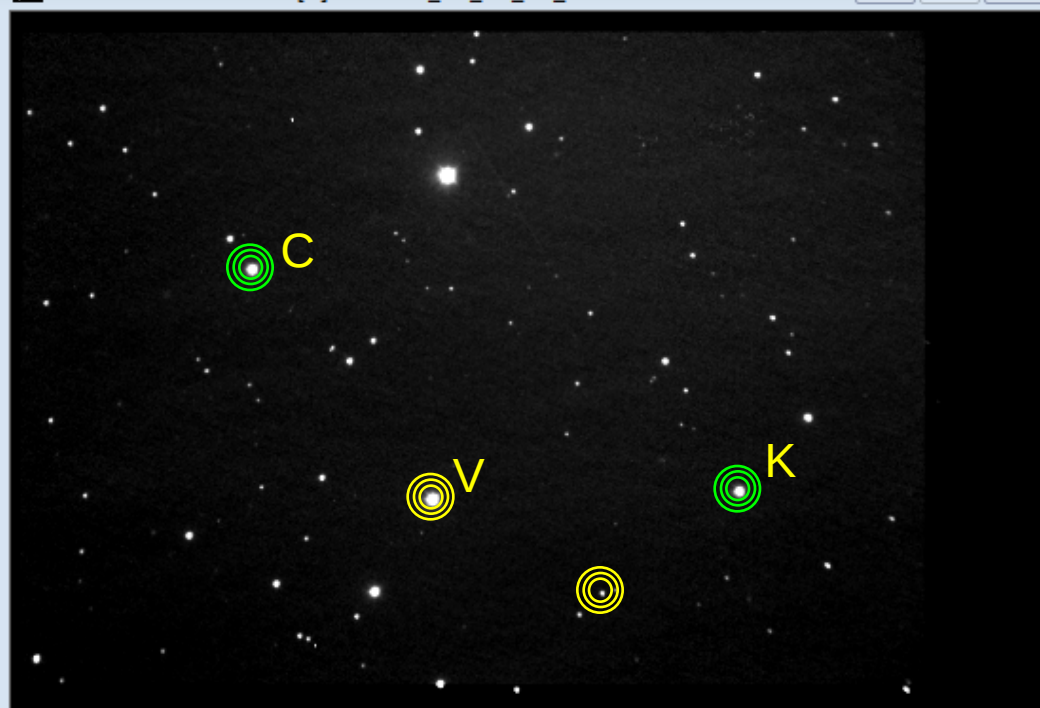
100.0

50.0

Current Pixel

X Y PV
1072 488 0.0

[6] 130112_13_14_all_i.fit



Multi-Image Photometry

Setup Report J.D. Settings

Radii

8.0 11.0 14.0

Integration Time

Integration (sec): 100.0

Instrument Parameters

Zero Point: 20.6

Gain [e/adu]: 1.0

R.O. Noise [e rms]: 10.0

Dk Curr [e/s/pix]: 1.0

Default

Save

Recall

Execute

Stop

Close

Οι κύκλοι επιλέγονται έτσι ώστε να μην υπάρχουν αστέρια στον εξωτερικό δακτύλιο.
Ο εσωτερικός δακτύλιος περιλαμβάνει μόνο τον αστέρα που μελετάται.

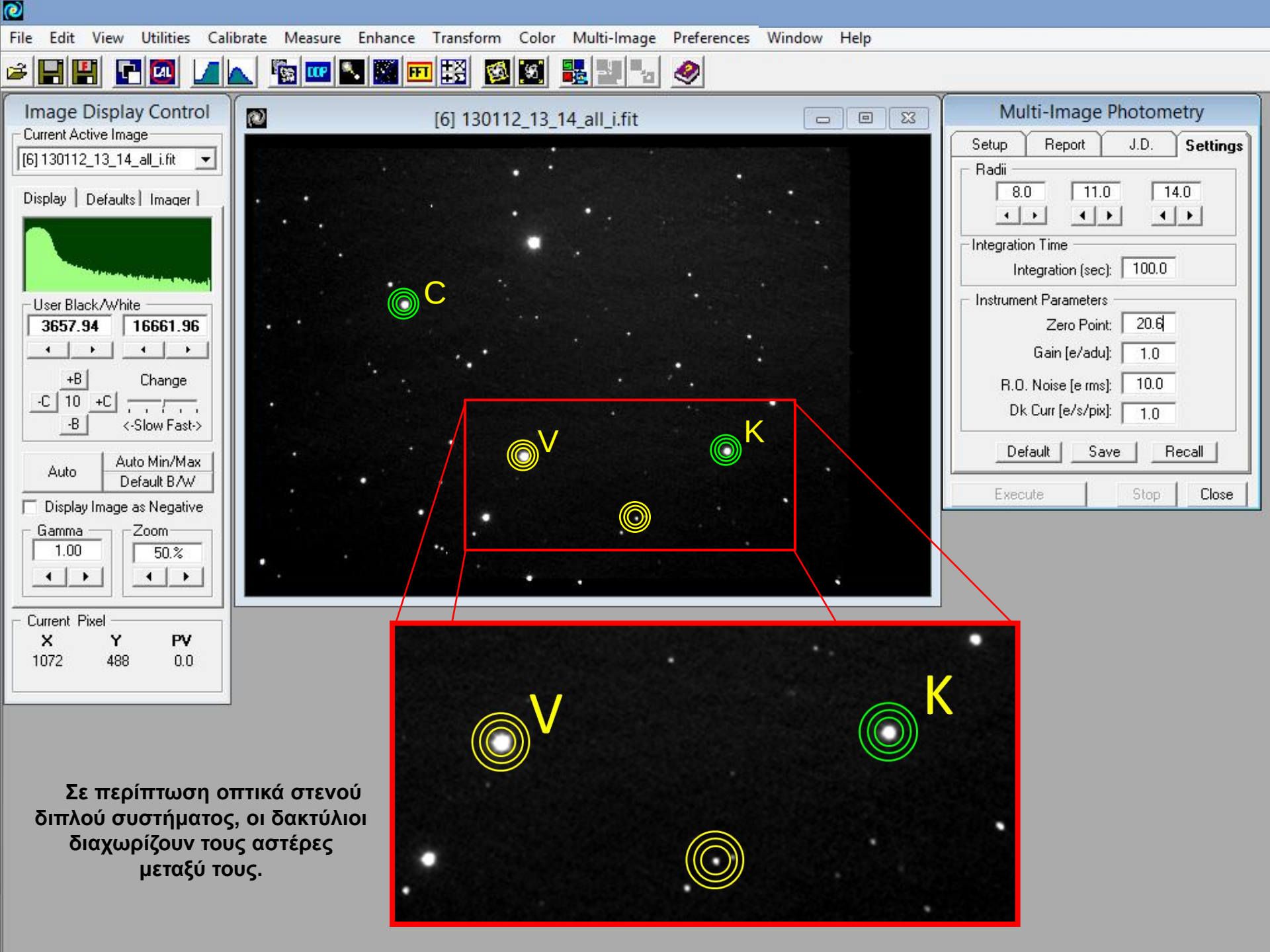




Image Display Control

Current Active Image

[6] 130112_13_14_all_i.fit

Display Defaults Imager



User Black/White

3657.94 16661.96

Change

+B -C 10 +C -B <-Slow Fast->

Auto

Auto Min/Max
Default B/W

☐ Display Image as Negative

Gamma

1.00

Zoom

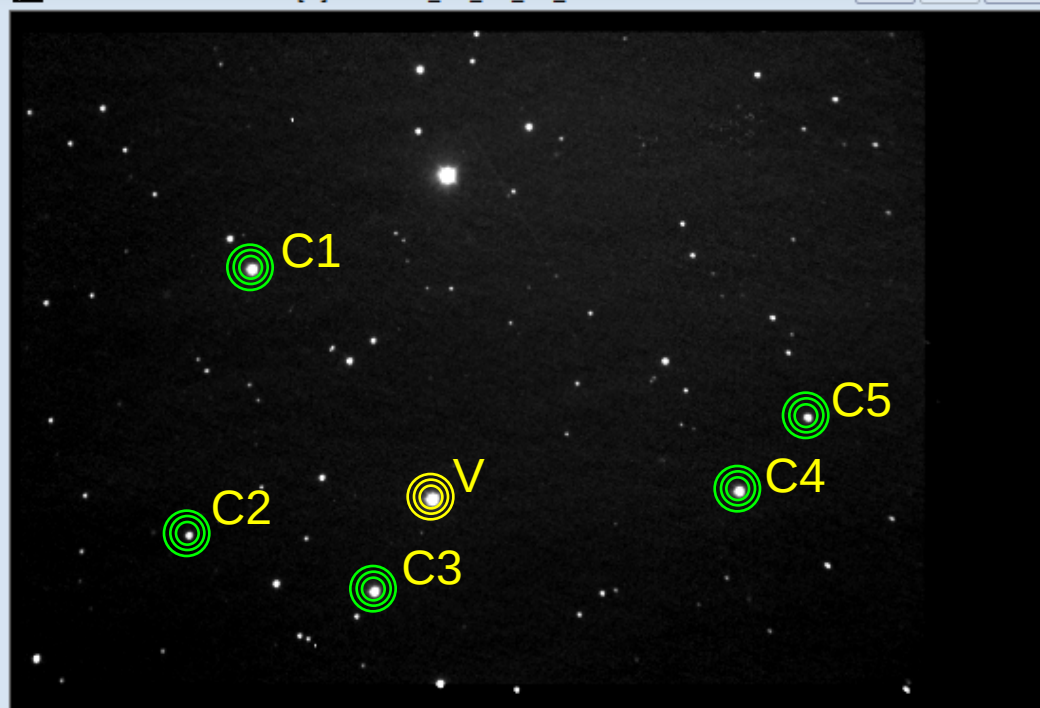
50.0%

<-Slow Fast->

Current Pixel

X Y PV
1072 488 0.0

[6] 130112_13_14_all_i.fit



Multi-Image Photometry

Setup Report J.D. Settings

Radii

8.0 11.0 14.0

Integration Time

Integration (sec): 100.0

Instrument Parameters

Zero Point: 20.6

Gain [e/adu]: 1.0

R.O. Noise [e rms]: 10.0

Dk Curr [e/s/pix]: 1.0

Default

Save

Recall

Execute

Stop

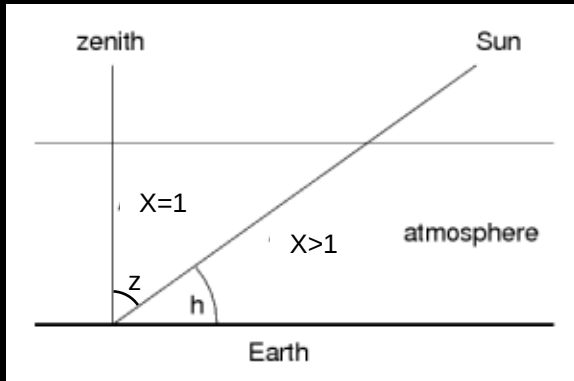
Close

Περισσότεροι από ένας αστέρας σύγκρισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο ίδιο πεδίο, όπως επίσης και όλοι μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους.

Στάδια επεξεργασίας παρατηρήσεων

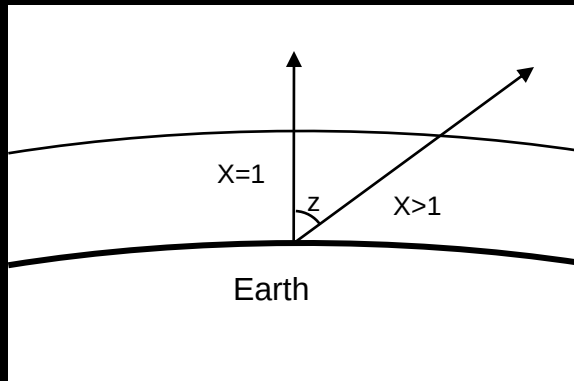
- Φωτομετρικές διορθώσεις
 - Υπολογισμός αέριας μάζας
 - α΄τάξης (ατμοσφαιρικής απορρόφησης)
 - β΄τάξης (χρωματικής εκτροπής)
 - Αναγωγή στο πρότυπο φωτομετρικό σύστημα
 - Διάγραμμα φωτεινής ροής
- Χρονικές διορθώσεις
 - Αναγωγή σε χρόνο του μέσου της έκθεσης
 - Μετατροπή JD σε HJD και BJD
- Κανονικοποίηση και υπολογισμοί
 - Υπολογισμός χρόνου ελαχίστου
 - Υπολογισμός αστρονομικής εφημερίδας
 - Διάγραμμα φάσης
 - Διάγραμμα O-C

Αέρια Μάζα - Air Mass



$$\sin(h) = \cos(90 - h) = \cos(z) = \frac{1}{X}$$

$$X = \frac{1}{\cos(z)} = \sec(z)$$



$$X = \sec(z)$$

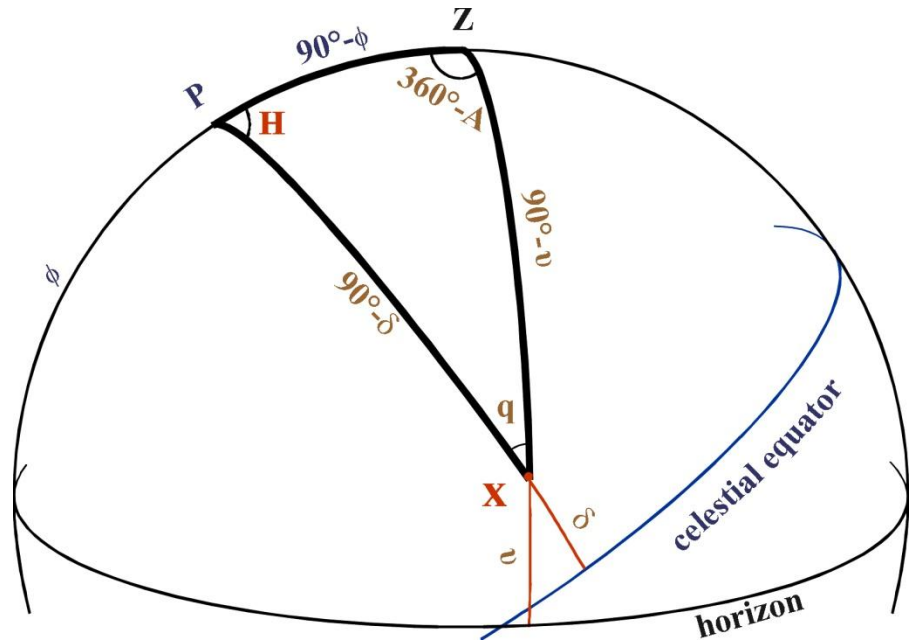
$$-0.0018167[\sec(z) - 1]$$

$$-0.0028750[\sec(z) - 1]^2$$

$$-0.0008083[\sec(z) - 1]^3 \dots$$

Hardie (1962)

Οι τιμές της αέριας μάζας είναι πάντα μεγαλύτερες της μονάδας



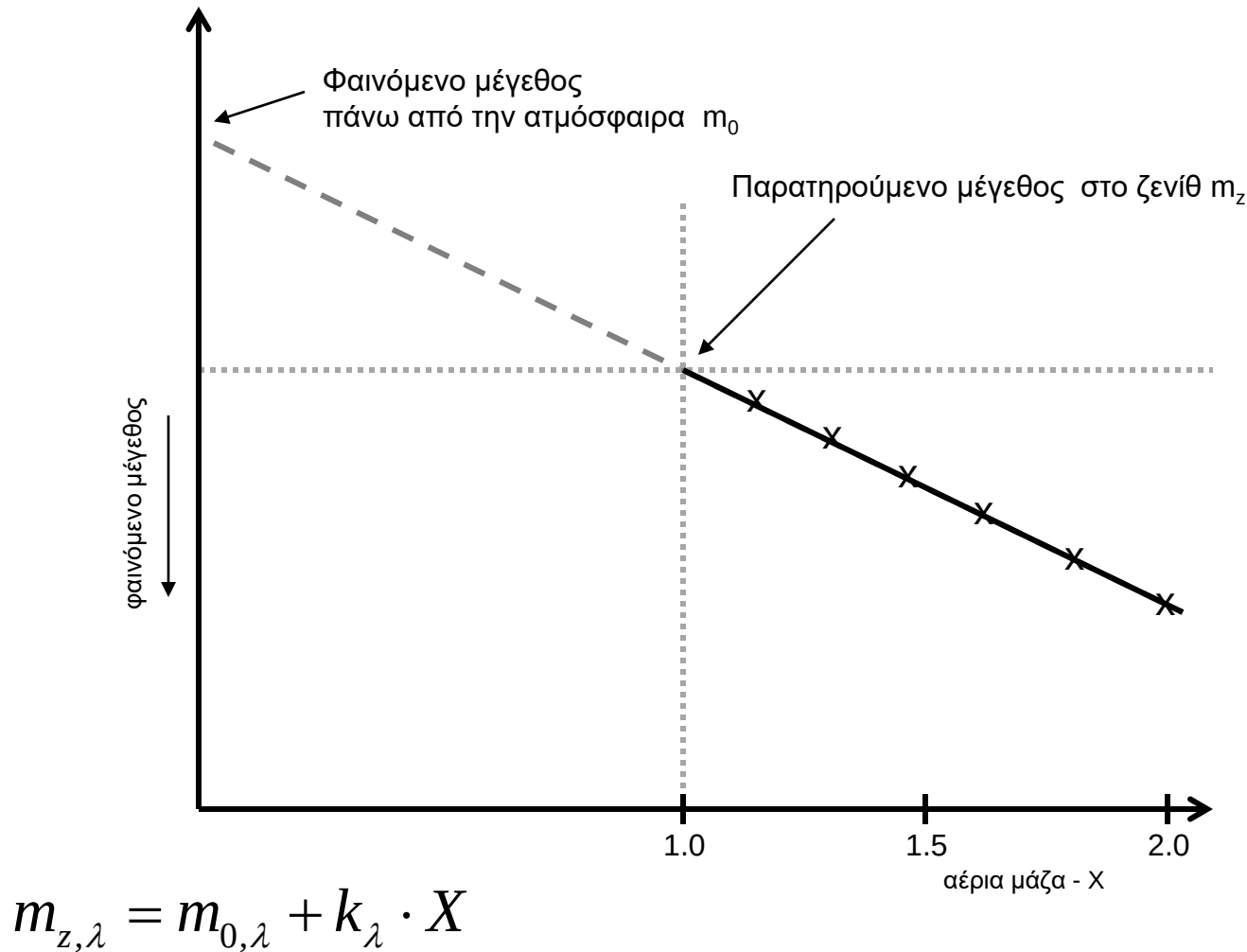
$$ST = a + H \quad (\alpha = RA)$$

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{\sec(z)} = \cos(z) = \cos(90 - \nu) = \cos \phi \cdot \cos H \cdot \cos \delta + \sin \phi \cdot \sin \delta$$

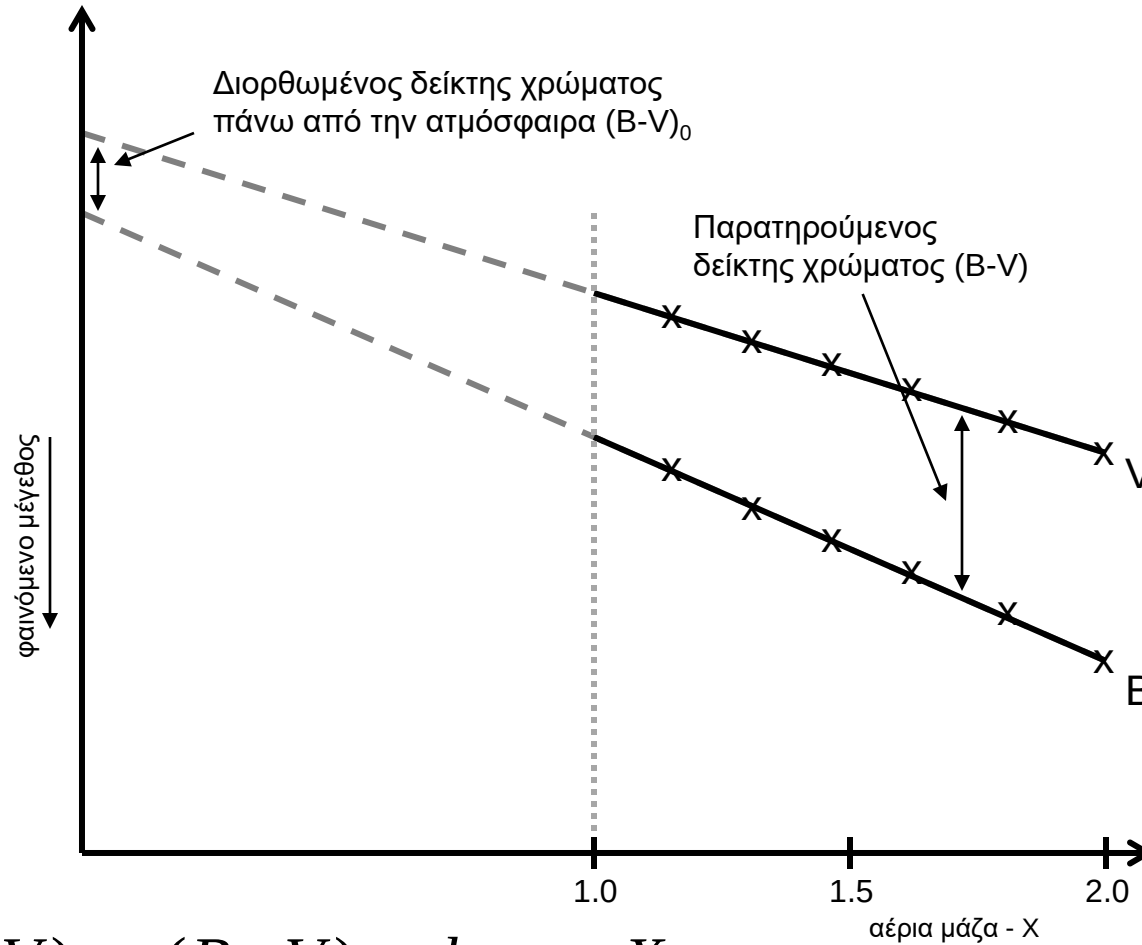
$$\sin(A) = \frac{\sin \delta - \sin \phi \cdot \sin \nu}{\cos \phi \cdot \cos \nu} = \frac{\sin \delta - \sin \phi \cdot \cos z}{\cos \phi \cdot \sin z}$$

$$X = \sec(z) - 0.0018167[\sec(z) - 1] - 0.002875[\sec(z) - 1]^2 - 0.0008083[\sec(z) - 1]^3$$

Μεταβολή του φαινόμενου αστρικού μεγέθους με την αέρια μάζα



Παρατηρούμενος και διορθωμένος δείκτης χρώματος



$$(B-V)_z = (B-V)_0 + k_{(B-V)} \cdot X$$

Φωτομετρικές διορθώσεις

α' τάξης (ατμοσφαιρικής εξασθένισης)

$$m_{z,\lambda} = m_{0,\lambda} + k_{\lambda} \cdot X$$

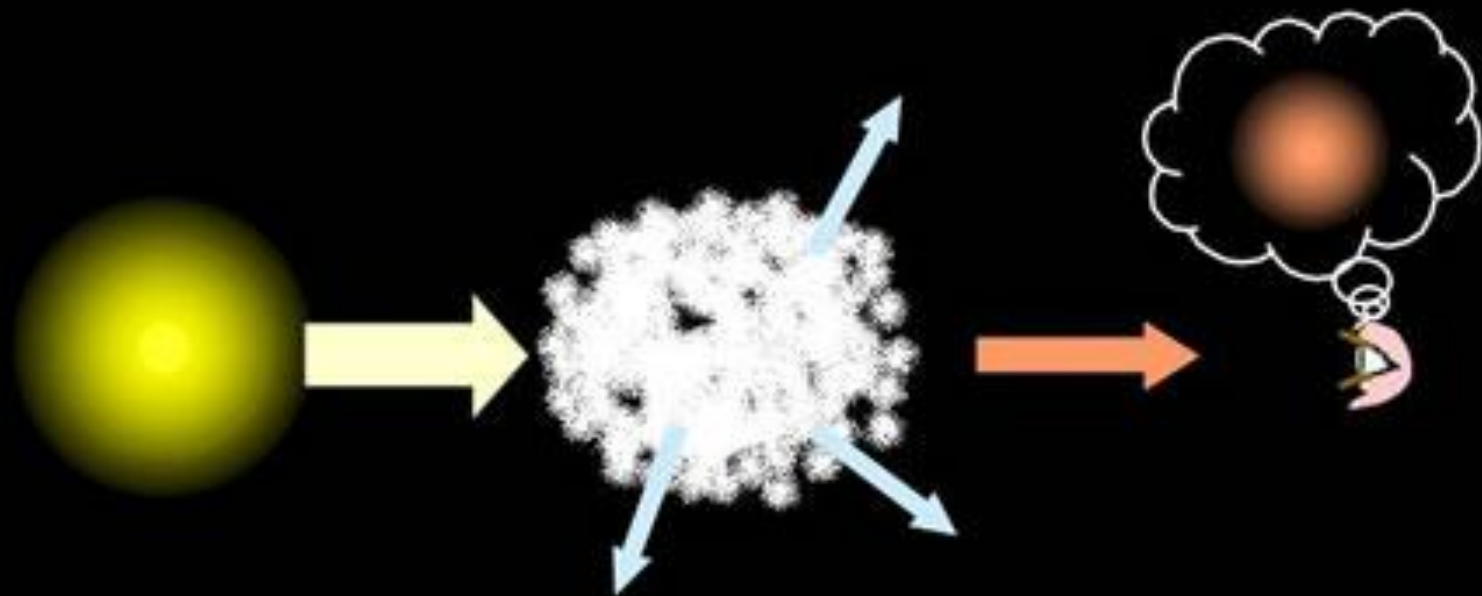
$$m = m_0 + k' \cdot X$$

β' τάξης (χρωματικής εκτροπής)

$$(B-V)_z = (B-V)_0 + k_{(B-V)} \cdot X$$

$$C = C_0 + k'' \cdot X$$

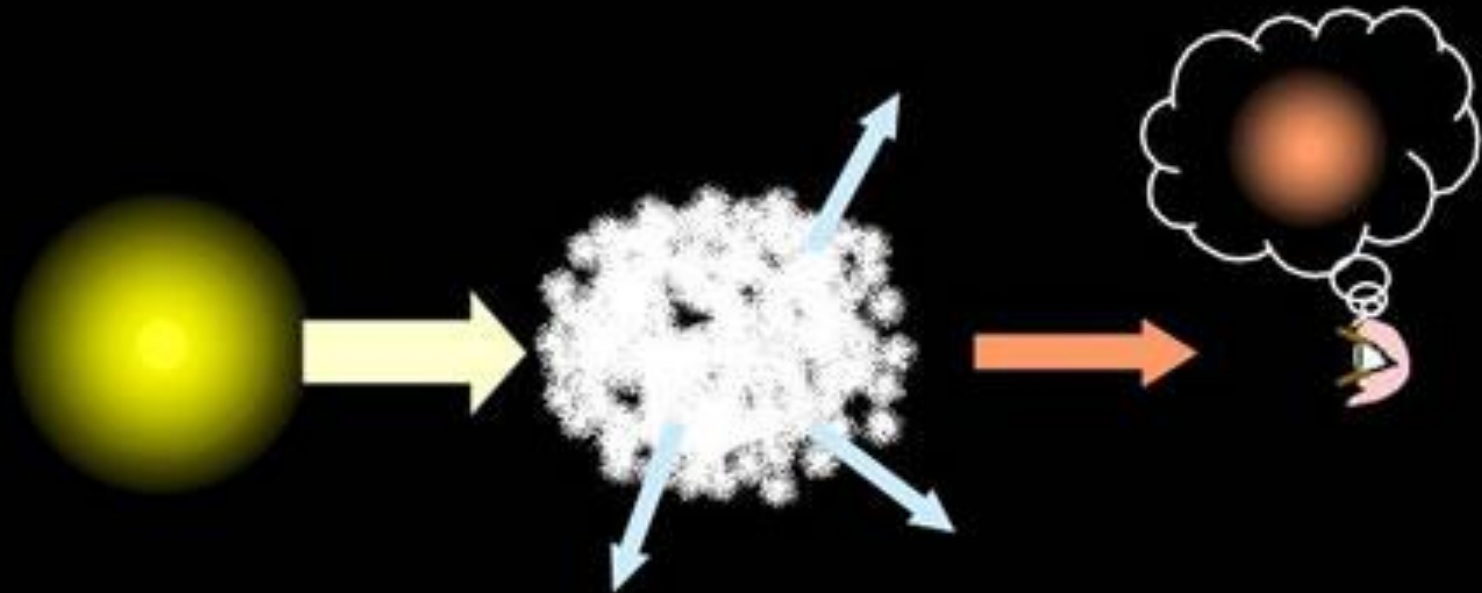
Μεσοαστρική απορρόφηση



Τα ουράνια σώματα φαίνονται πιο **αμυδρά** από ό,τι είναι στην πραγματικότητα

$$m - M = 5 \cdot \log r - 5 - A_v$$

Μεσοαστρική ερύθρωση



Τα ουράνια σώματα φαίνονται πιο **ερυθρά** από ό,τι είναι στην πραγματικότητα

$$E(B-V) = (B-V)_{\text{observed}} - (B-V)_{\text{intrinsic}}$$

Ο νόμος του Pogson και η φωτεινή ροή (flux)

Το 1856 ο N.R. Pogson επιβεβαίωσε την ανακάλυψη του Herchel ότι ένας αστέρας 1ου μεγέθους είναι 100 φορές λαμπρότερος από έναν αστέρα 6ου μεγέθους. Καθιέρωσε λοιπόν την κλίμακα μεγεθών πλέον μαθηματικά, λέγοντας ότι ένας αστέρας είναι $100^{1/5}$ φορές (ισούται με 2.512) λαμπρότερος από έναν άλλο, ένα μέγεθος μεγαλύτερο από τον πρώτο. Η διαφορά αυτή είναι γνωστή και ως κλίμακα μεγεθών του Pogson. Έτσι, για δύο αστέρες με φωτεινές ροές (λαμπρότητες) F_1 και F_2 θα ισχύει η σχέση:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \cdot \log\left(\frac{F_1}{F_2}\right)$$

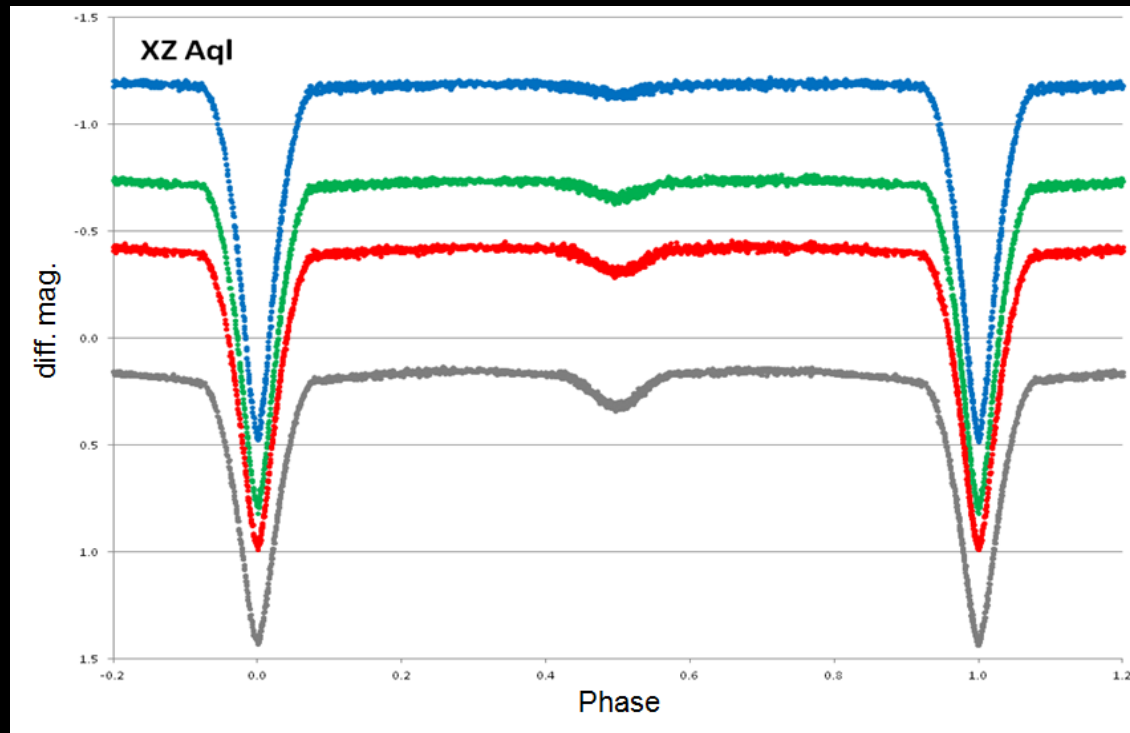
Χρησιμοποιώντας το νόμο του Pogson για δύο αστέρες που συγκρίνουμε μεταξύ τους και **θέτοντας τον ένα αστέρα (αναφοράς) να έχει ροή σταθερά ίση με τη μονάδα**, τότε η φωτεινή ροή του άλλου αστέρα θα είναι:

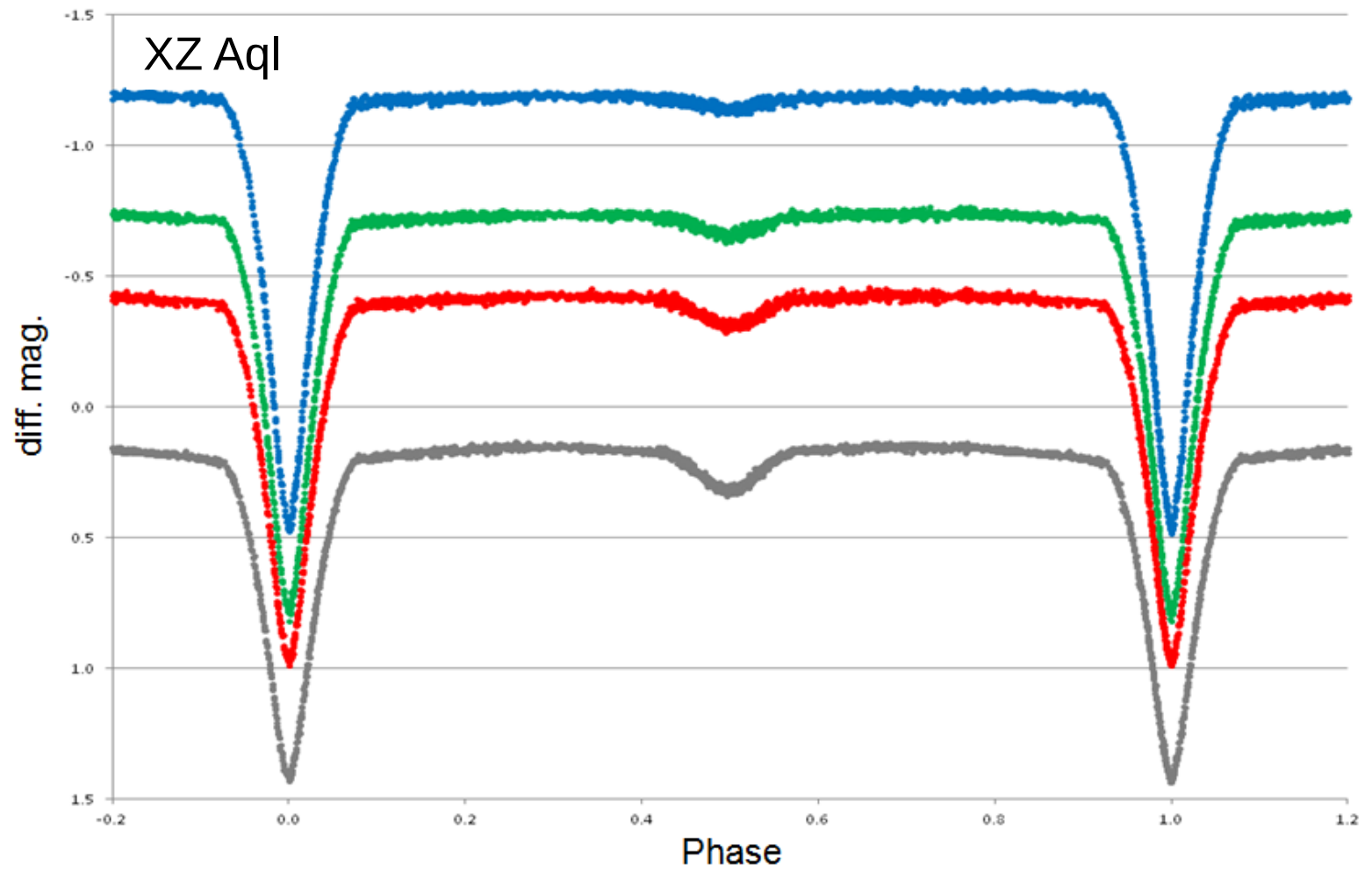
$$F = 10^{-0.4 \cdot (m - m_0)}$$

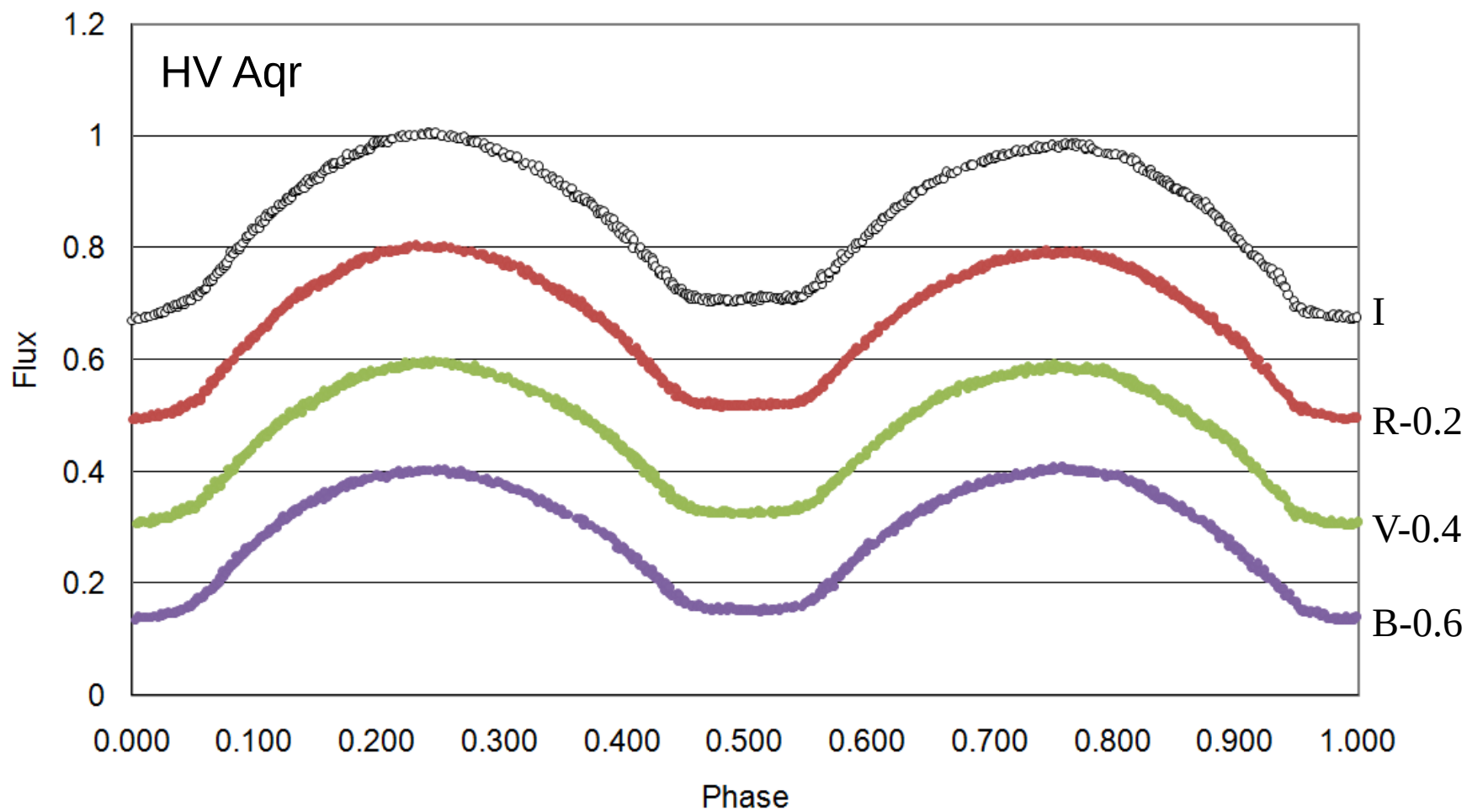
Φωτομετρικά συστήματα

Ο λόγος για τον οποίο αναφερόμαστε σε μεγέθη αστέρων σε συγκεκριμένες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, πηγάζει από το γεγονός ότι είναι εξαιρετικά δύσκολο να μετρήσουμε τη συνολική φωτεινή ροή ενός αστήρα με μεγάλη ακρίβεια, ενώ αντιθέτως είναι πολύ εύκολο να την μετρήσουμε, σε σχέση με κάποιον άλλο, γνωστής ροής αστέρα.

Είναι προφανές λοιπόν ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούμε πάντοτε αστέρες σύγκρισης (standard stars) για να κάνουμε αναγωγή των μετρήσεών μας και για να υπολογίσουμε την πραγματική φωτεινότητα των αστέρων που μελετούμε.







Φωτομετρικά συστήματα

Στην αρχή, όταν η φωτομετρία γινόταν με μοναδικό όργανο το ανθρώπινο μάτι, το φωτομετρικό «σύστημα» που χρησιμοποιούνταν ήταν όσο και το εύρος απόκρισης του ανθρώπινου ματιού. Το ανθρώπινο μάτι ανιχνεύει φως από 4000 Å έως 7000 Å περίπου με μέγιστη απόκριση στα 5100-5500 Å.

Η ευαισθησία μειώνεται στο μισό στα 4680 Å και στα 5480 Å. Έτσι το FWHM για το μάτι σαν ανιχνευτής είναι μόλις 800 Å. Τα φωτομετρικά μεγέθη που αναφέρονται σε αυτήν την φασματική περιοχή καλούνται και **οπτικά μεγέθη (visual magnitudes)**.

Λίγες δεκαετίες μετά την πρώτη εφαρμογή της φωτογραφικής τεχνικής στην αστρονομία και περίπου την δεκαετία του 1890, ένα δεύτερο φωτομετρικό σύστημα εμφανίστηκε. Τα φωτογραφικά γαλακτώματα και τα ορθοχρωματικά φιλμ που χρησιμοποιούνταν την εποχή εκείνη είχαν μέγιστη ευαισθησία στα 4600 Å και η πτώση της ευαισθησίας ήταν ραγδαία καθώς το μήκος κύματος αυξανόταν. Έφτανε στο μισό στα 4950 Å, ενώ από τα 5200 Å και μετά το φιλμ ήταν εντελώς «αναίσθητο» στο φως! Τα φωτομετρικά μεγέθη που αναφέρονταν σε αυτήν την φασματική περιοχή καλούνται και **φωτογραφικά μεγέθη (photographic magnitudes)**.

Η πρόοδος της φωτογραφικής τεχνολογίας έφερε γρήγορα στο προσκήνιο τα παγχρωματικά φιλμ με ευαισθησία μεταξύ 4950 Å και 5800 Å. Οι παρατηρήσεις με τα φιλμ αυτά γινόταν συνήθως με κίτρινο φίλτρο, ώστε να αποκόπτονται οι άλλες φασματικές περιοχές που ενδεχομένως να εισήγαγαν παράσιτο φως. Τα μεγέθη που μετριόνταν σε αυτήν την περιοχή καλούνται και **φωτοοπτικά μεγέθη (photovisual magnitudes)**.

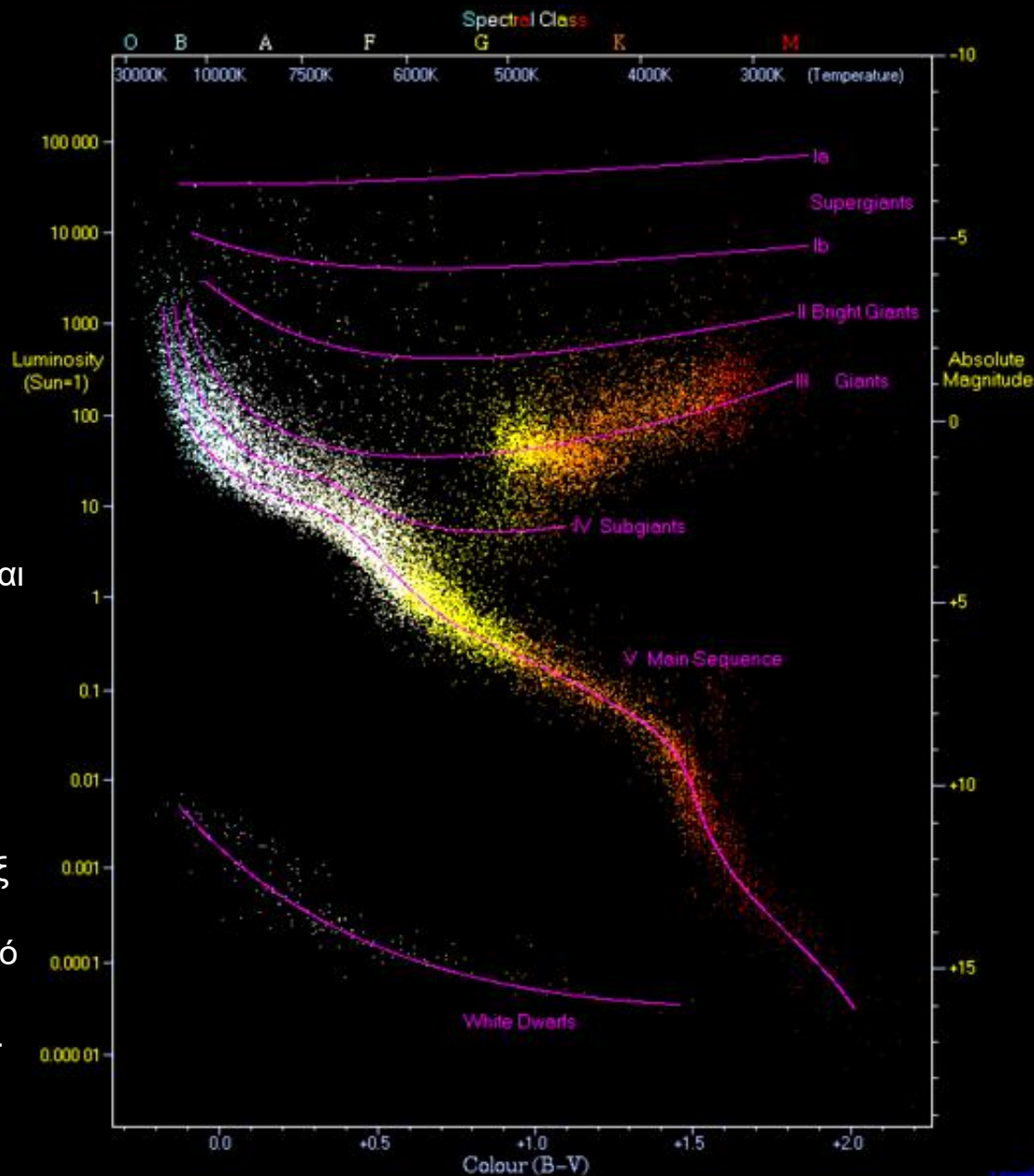
Φωτομετρικά συστήματα

Η δυνατότητα άμεσης σύγκρισης δύο φωτομετρικών μεγεθών σε διαφορετικά φίλτρα έδωσε το έναυσμα για την πρώτη ταξινόμηση των αστέρων με βάση τον δείκτη χρώματός τους (color index).

Έτσι, ο δείκτης χρώματος ορίστηκε αρχικά ως η διαφορά μεταξύ του φωτογραφικού και του φωτοοπτικού μεγέθους ενός αστέρα:

$$CI = m_{pg} - m_{pv} + c \quad (c: \text{σταθερά})$$

Οι αστέρες με φασματικό τύπο A0 έχουν εξ ορισμού δείκτη χρώματος μηδέν. Οι θερμότεροι (κυανοί) αστέρες είχαν αρνητικό δείκτη χρώματος και οι ψυχρότεροι (ερυθροί) αστέρες θετικό δείκτη χρώματος.



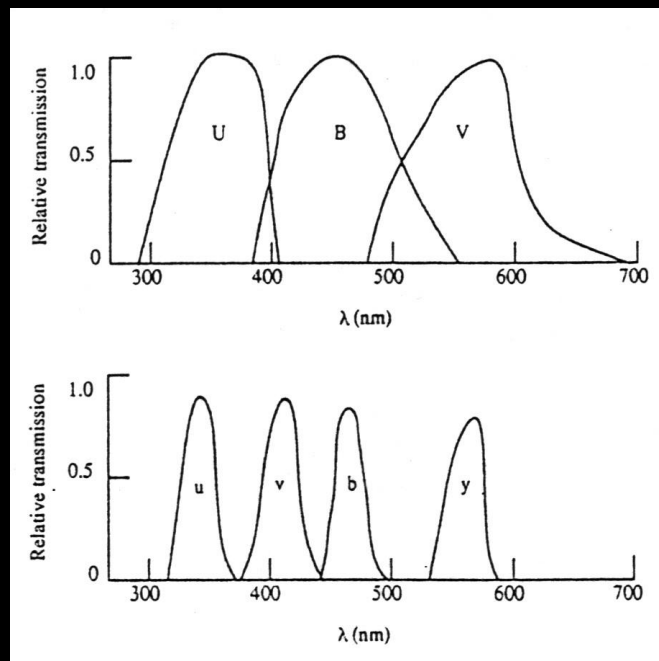
Φωτομετρικά συστήματα

Λίγα χρόνια μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο η φωτοηλεκτρική φωτομετρία με **τους φωτοπολλαπλασιαστές τύπου 1P21** έδωσαν μια νέα ώθηση στους αστρονόμους **Harold Johnson** και **W.W. Morgan** την ιδέα να κατασκευάσουν ένα πρότυπο φωτομετρικό σύστημα, βασισμένο στην ευαισθησία του φωτοηλεκτρικού ανιχνευτή.

Οι δύο παραπάνω αστρονόμοι, εκτός από το μπλε (B) και κίτρινο (V) φίλτρο που χρησιμοποίησαν για να αποδώσουν το φωτογραφικό και το φωτοοπτικό μέγεθος, πρόσθεσαν ακόμη ένα το υπεριώδες (U) φίλτρο, ώστε να διευκολύνεται η ταξινόμηση και ο διαχωρισμός των αστερών σε διαφορετικούς φασματικούς τύπους.

Παρά το γεγονός ότι σήμερα υπάρχουν πολλά τέτοια φωτομετρικά συστήματα, **το UBV σύστημα των Johnson και Morgan**, μετά την επέκταση του **Andrew Cousins** και **John Menzies** σε **UBVRI**, έγινε το standard σύστημα που χρησιμοποιείται κατά κόρον στον αστρονομική φωτομετρία.

Ένα άλλο φωτομετρικό σύστημα καθιερώθηκε από τον **Stroemgren** και χρησιμοποιεί τέσσερα φίλτρα, τα **u v b y**. Με τη χρήση των φίλτρων αυτών ο Stroemgren μπορούσε να βγάλει άμεσα αστροφυσικά συμπεράσματα για τους αστέρες που μετρούσε.



Φωτομετρικά συστήματα

Πολλές βέβαια παραλλαγές υπήρξαν κατά καιρούς στα ήδη υπάρχοντα πρότυπα συστήματα όπως το **σύστημα Kron-Cousins** και τα **φίλτρα στενού εύρους (narrow band filters)**, τα οποία χρησιμοποιούνταν σε επιλεγμένες φασματικές περιοχές ή ακόμη και γραμμές εκπομπής και απορρόφησης ορισμένων ατομικών στοιχείων (H_α , H_β , OIII, κ.α.).

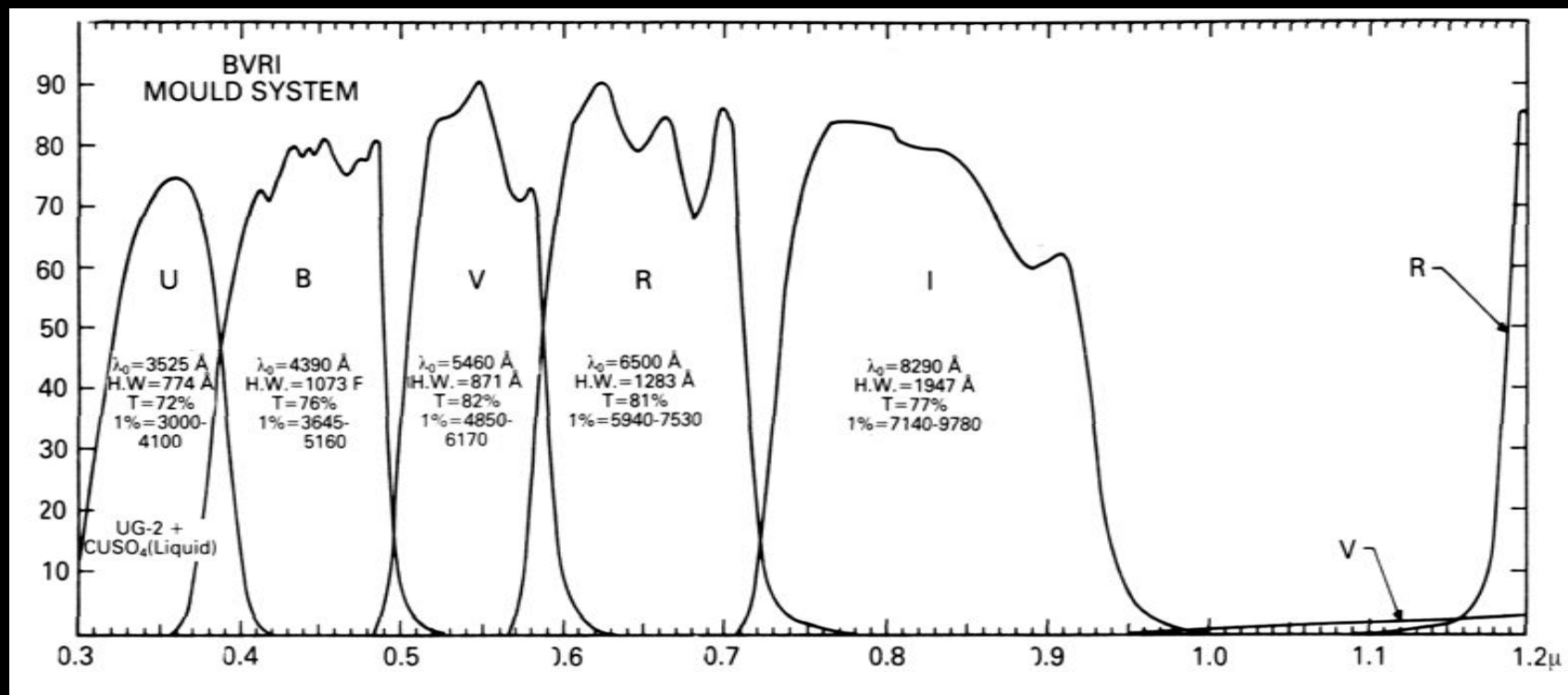
Οι σύγχρονες τεχνικές φωτομετρίας έφεραν μια επανάσταση στην αστρονομία, αυξάνοντας ταυτόχρονα και την ακρίβεια στις μετρήσεις των αστρικών μεγεθών. Η φωτομετρική ακρίβεια του ανθρώπινου ματιού αγγίζει περίπου τα 0.2 μεγέθη. Η φωτογραφική φωτομετρία άγγιξε εύκολα τα 0.05 μεγέθη. Το φωτοηλεκτρικό φωτόμετρο κατάφερε να μετρήσει μεγέθη με αβεβαιότητα μόλις 0.01 μεγέθη. Σήμερα, η CCD φωτομετρία, έχει ξεπεράσει κάθε προσδοκία, φτάνοντας σε φωτομετρική ακρίβεια ορισμένων μόνο mmag (χιλιοστών του μεγέθους) από τα επίγεια τηλεσκόπια και ακόμα μεγαλύτερη από το διάστημα.

Η CCD φωτομετρία όμως έχει σημαντικές διαφορές από την φωτοηλεκτρική φωτομετρία. Τα μεγέθη που δίνονται από τα φίλτρα **UBVRI (Johnson και Morgan)** δεν ταίριαζαν με αυτά που έδιναν οι φωτοπολλαπλασιαστές. Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού οι ανιχνευτές CCD είναι πολύ διαφορετικά κατασκευασμένοι από έναν φωτοπολλαπλασιαστή.

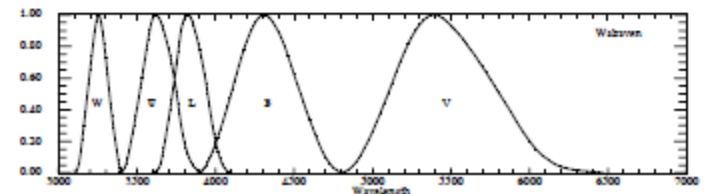
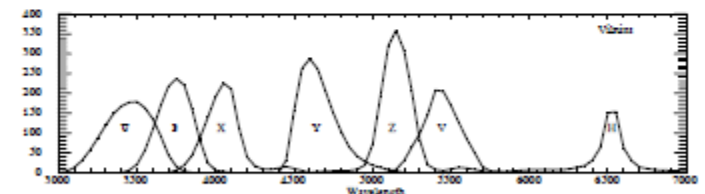
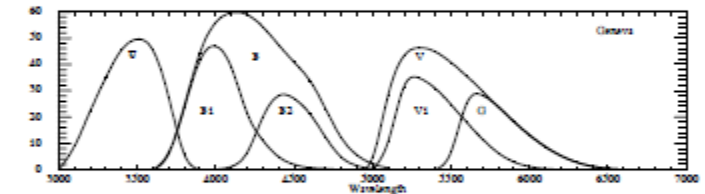
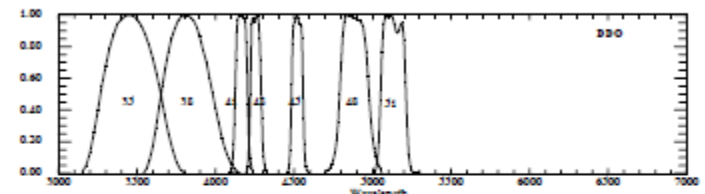
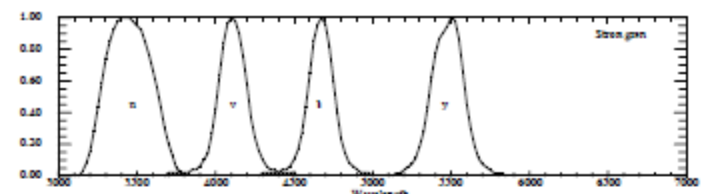
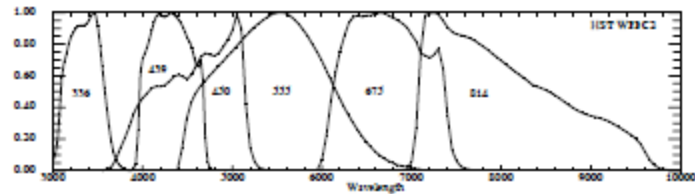
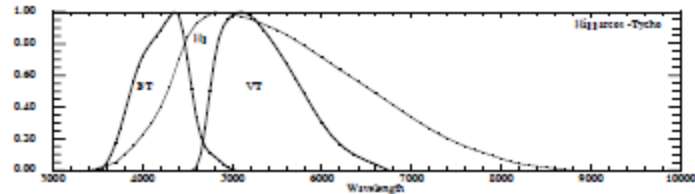
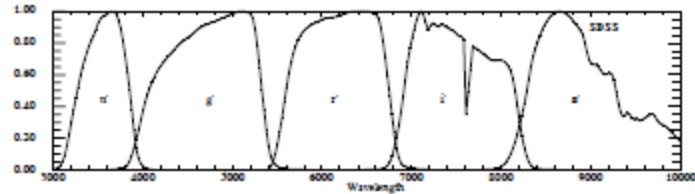
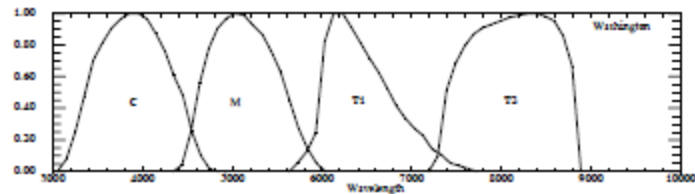
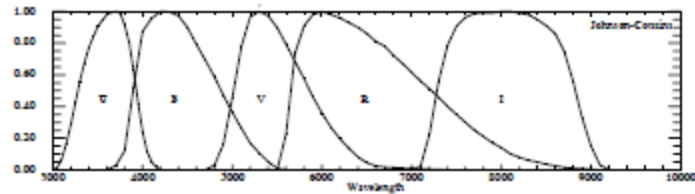
Για να υπάρχει σύμπτωση των μεγεθών, ένα νέο σύστημα φίλτρων καθιερώθηκε ειδικά για τις CCD (το **σύστημα UBVRI - Bessell**) με βάση το οποίο ένα νέο σετ φίλτρων UBVRI με διαφορετικά όμως χαρακτηριστικά θα έδινε τα ίδια μεγέθη όταν αυτό εφαρμόζεται μπροστά από έναν ανιχνευτή CCD.

Εύρος και απόκριση διαφόρων φίλτρων στο σύστημα UBVR_I.

Filter	Περιγραφή φίλτρου
U	1mm UG1 + 2mm S8612 + 2mm WG295
B	1mm GG385 + 2mm BG1 + 2mm BG39
V	2mm GG495 + 3mm BG40
R	3mm OG570 + 2mm KG3
I	2mm RG9 + 3mm WG295
From Bessell, "UBVRI filters for CCD Photometry", CCDA, Vol. 2, No. 4, p. 21.	



Φωτομετρικά συστήματα



Διόρθωση μηδενικού σημείου

Αφού εφαρμόσουμε τις δύο βασικές φωτομετρικές διορθώσεις για τα αστρικά μεγέθη ίσως να διαπιστώσουμε ότι το οργανικό μέγεθος (instrumental) που βρήκαμε για τους αστέρες σύγκρισης ($m_{\lambda i}$), δεν ανταποκρίνεται σε αυτό που δίνεται στους φωτομετρικούς καταλόγους $m_{\lambda s}$ (standard magnitude).

Αυτό μπορεί να οφείλεται σε καθαρά τοπικούς παράγοντες ή ακόμη και στη μέθοδο παρατήρησης και αναγωγής που χρησιμοποιήθηκε.

Η διαφορά του οργανικού μεγέθους από αυτό των καταλόγων είναι μια σταθερά, η οποία ονομάζεται συντελεστής μηδενικού σημείου ή απλά zero point και θα πρέπει να προστεθεί σε όλα τα μεγέθη που μετρήθηκαν στο ίδιο φίλτρο.

$$m_{\lambda i} = m_{\lambda s} - Z_{\lambda}$$

Από την παραπάνω εξίσωση, υπολογίζουμε τη σταθερά Z_{λ} και επομένως ανάγουμε όλα τα παρατηρούμενα (και διορθωμένα) μεγέθη στα πραγματικά μεγέθη u , b , v , r , i , τα οποία μπορούν να συγκριθούν άμεσα με αυτά που δίνονται στους φωτομετρικούς καταλόγους.

Αναγωγή στο πρότυπο σύστημα

Για να μπορούμε να επεξεργαστούμε δεδομένα από διαφορετικά παρατηρητήρια θα πρέπει τα δεδομένα να έχουν μια ομοιομορφία και να αναφέρονται στην ίδια φασματική περιοχή. Γι' αυτό λοιπόν πρέπει να ανάγουμε τα μεγέθη των αστέρων σε ένα απόλυτο σύστημα (Standard System). Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι της μορφής:

$$\begin{aligned}V &= v + k_1 \cdot (B-V) + Z_v \\ B - V &= k_2 \cdot (b-v) + Z_{(B-V)} \\ U - B &= k_3 \cdot (u-b) + Z_{(U-B)}\end{aligned}$$

όπου Z_v , $Z_{(B-V)}$, $Z_{(U-B)}$ είναι οι συντελεστές μηδενικού σημείου (zero point) για την αναγωγή στο πρότυπο σύστημα και τα k_1 , k_2 και k_3 οι συντελεστές μετατροπής από το ένα σύστημα φίλτρων στο άλλο (υπολογίζονται παρατηρησιακά ή δίνονται από πίνακες).

Εάν οι κατάλογοι των πρότυπων αστέρων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διόρθωση των παρατηρούμενων μεγεθών αναφερόταν στο πρότυπο σύστημα, τότε η αναγωγή των παρατηρούμενων μεγεθών στο πρότυπο σύστημα έχει ήδη γίνει με τις διορθώσεις της ατμοσφαιρικής εξασθένισης και του μηδενικού σημείου.

Πολλοί κατάλογοι όμως αναγράφουν τα διορθωμένα μεγέθη των αστέρων σε άλλα συστήματα από αυτά των Johnson και Bessell (που είναι τα πιο γνωστά). Για να γίνει η αναγωγή από το ένα σύστημα στο άλλο, θα πρέπει να γνωρίζουμε κάποιους αστέρες μετρημένους και διορθωμένους και στα δύο συστήματα, ώστε να βρούμε τους συντελεστές μετατροπής k και Z .

Υπολογισμός φάσης - Διάγραμμα φάσης

Στην περίπτωση των περιοδικών μεταβλητών αστερών, μπορούμε να παραστήσουμε την καμπύλη μεταβολής του φωτός τους ως προς το χρόνο ή ως προς τη φάση ϕ του κύκλου μεταβολής.

Για να έχουμε την εποπτεία της μεταβολής του φωτός σε όλες τις φάσεις του κύκλου, πρέπει να μετατρέψουμε το χρόνο παρατήρησης (JD) σε φάση του κύκλου μεταβολής.

Αυτό γίνεται εύκολα από την εξίσωση της εφημερίδας:

$$MinI = t_0 + P \cdot E$$

όπου t_0 είναι η χρονική στιγμή ενός παρατηρούμενου ελαχίστου, P η περίοδος σε ημέρες και E η εποχή (Epoch).

Επιλύνοντας την εξίσωση ως προς E έχουμε:

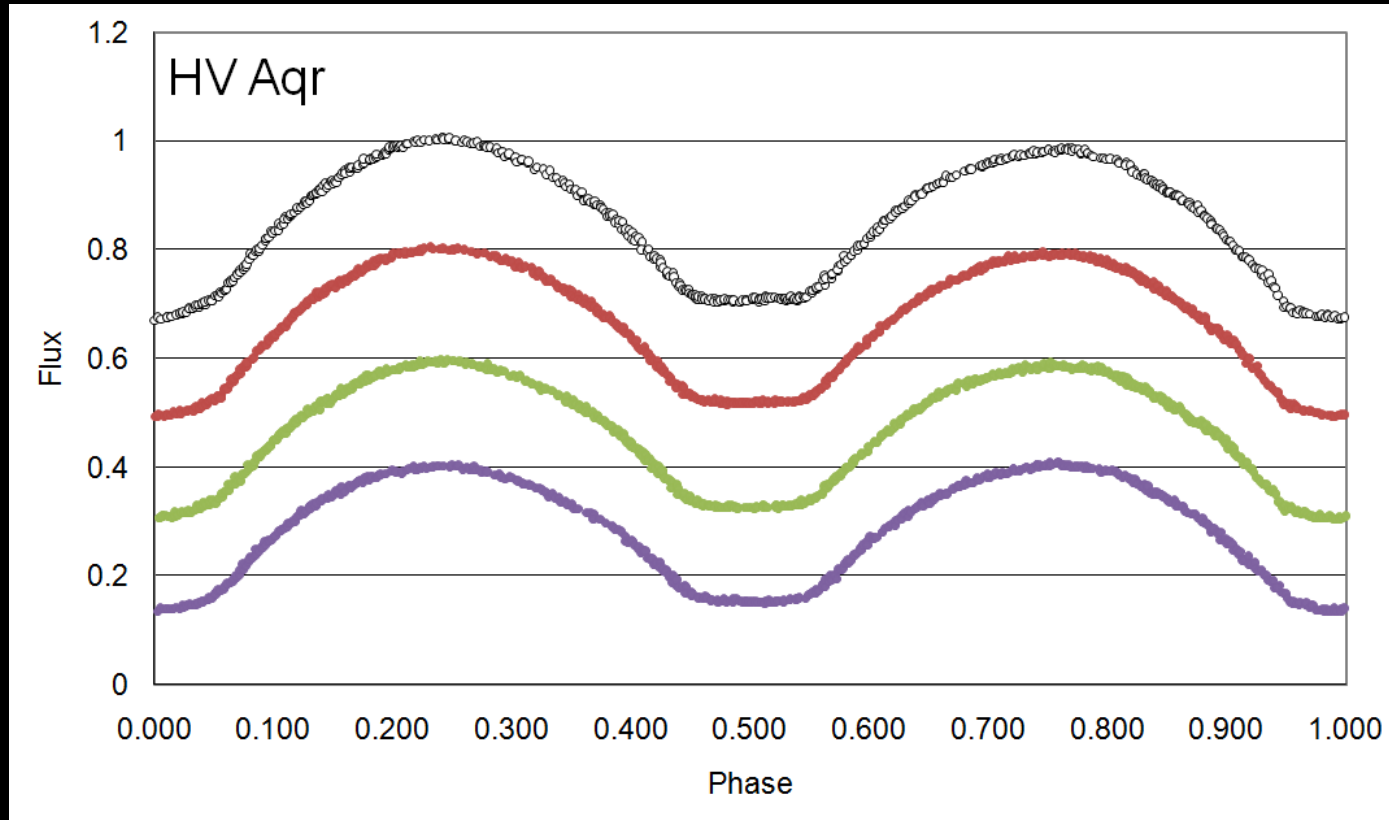
$$E = \frac{(MinI - t_0)}{P}$$

Το δεκαδικό μέρος του E , είναι ίσο με τη φάση ϕ του κύκλου μεταβολής, ενώ το ακέραιο μέρος του (integer ή INT) εκφράζει το πλήθος των πλήρων κύκλων μεταβολής που μεσολάβησαν από το χρόνο του πρωτεύοντος ελαχίστου που παρατηρήθηκε ($MinI$) και του αυτού που χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά (t_0).

$$\phi = \frac{(MinI - t_0)}{P} - INT \left[\frac{(MinI - t_0)}{P} \right]$$

Υπολογισμός φάσης - Διάγραμμα φάσης

Απεικονίζοντας σε ένα διάγραμμα την μεταβολή του μεγέθους ενός αστέρα ως προς τη φάση ϕ της μεταβολής του (διάγραμμα φάσης), είναι σαν να συγκεντρώνουμε όλες μας τις παρατηρήσεις σε έναν και μόνο κύκλο από 0 έως 1.

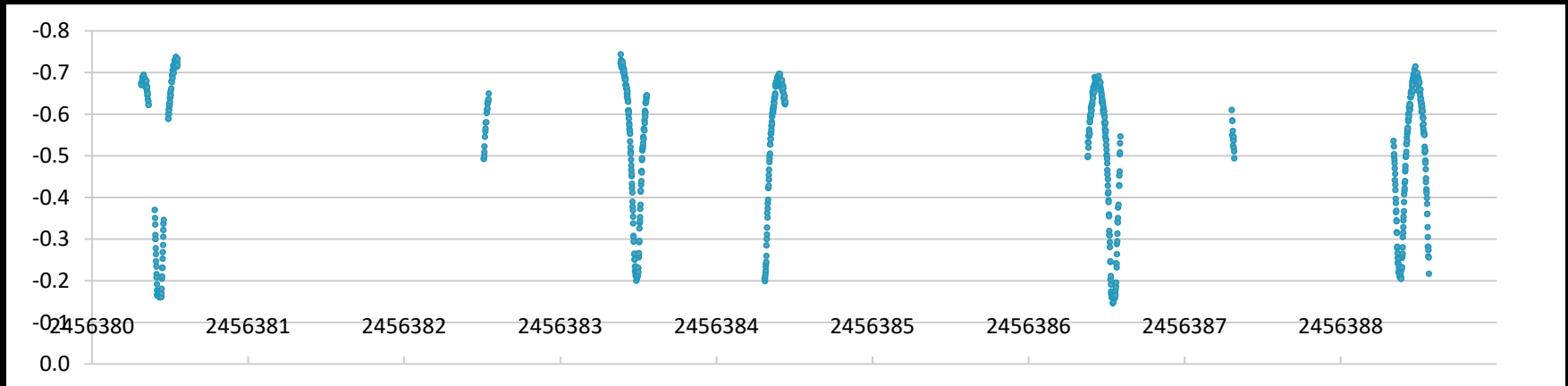


Το διάγραμμα φάσης είναι χρήσιμο εργαλείο σε μεταβλητούς με μεγάλη περίοδο και χρησιμοποιείται σε αστέρες οι οποίοι δεν εμφανίζουν ραγδαίες μεταβολές της λαμπρότητας από κύκλο σε κύκλο.

Υπολογισμός χρόνου ελαχίστου/μεγίστου φωτός

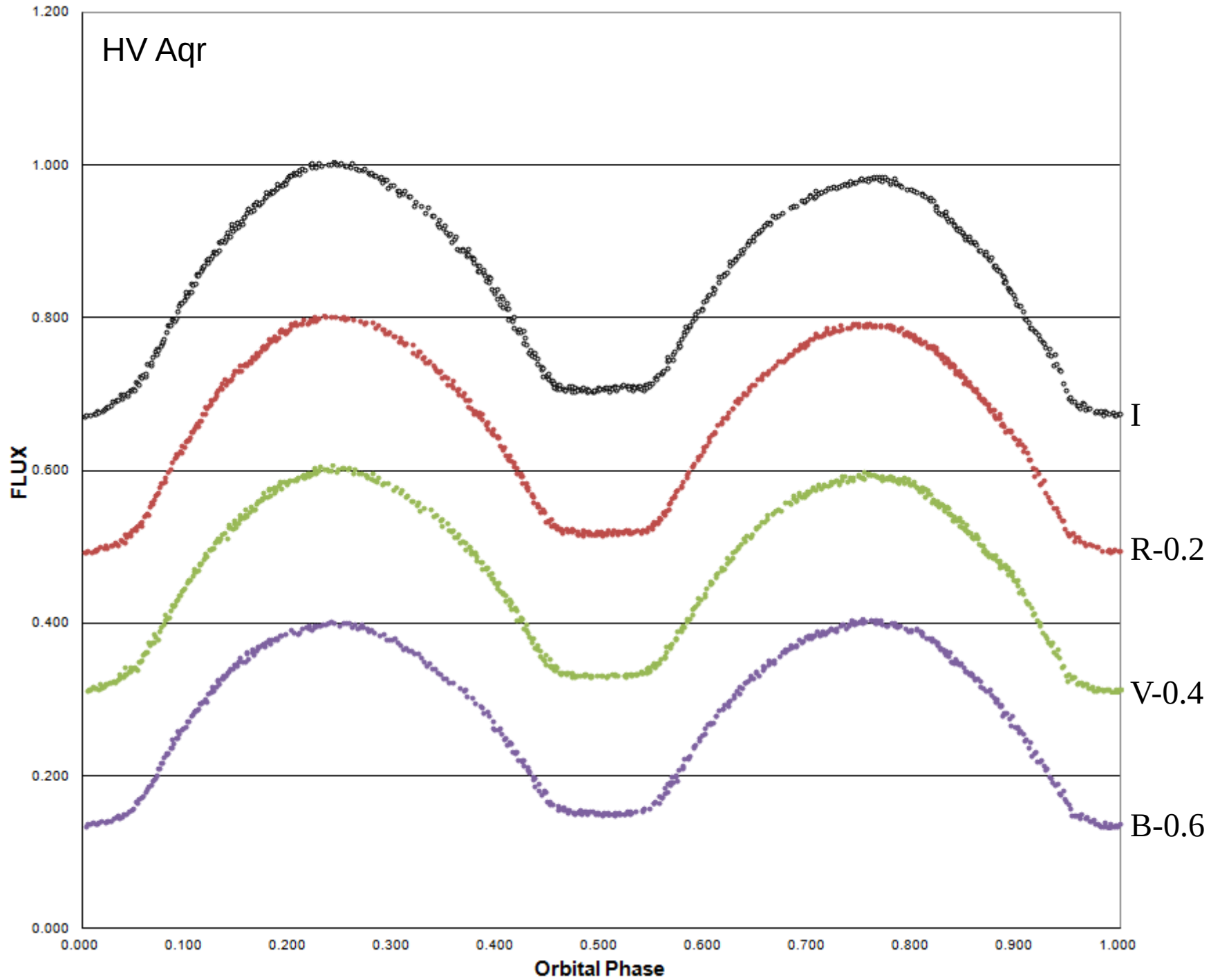
Στους περιοδικούς μεταβλητούς παρουσιάζονται φαινόμενα όπως εκλείψεις (στους διπλούς αστέρες) ή μέγιστα λαμπρότητας (στους παλλόμενους), τα οποία επαναλαμβάνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Είναι κρίσιμο να υπολογιστούν οι ακριβείς χρόνοι που συμβαίνουν αυτά τα φαινόμενα, διότι προσδιορίζουν τις χρονικές στιγμές που τα δύο σώματα (στο διπλό σύστημα) ευθυγραμμίζονται με τη Γη ή όταν ο παλλόμενος αστέρας βρίσκεται στο μέγιστο της λαμπρότητάς του. Αυτές οι χρονικές στιγμές χρησιμοποιούνται σαν σημεία αναφοράς για την ανάλυση των φωτομετρικών καμπυλών.



Το πρόβλημα αυτό ανάγεται άμεσα στον μαθηματικό τρόπο υπολογισμού ενός ελαχίστου μιας σειράς δεδομένων, τα οποία μπορεί να παρουσιάζουν αρκετές αυξομειώσεις από τη θεωρητική (προσαρμοζόμενη) καμπύλη μεταβολής.

Η εύρεση των ελαχίστων (ειδικά εάν αυτά είναι διαδοχικά) δίνει την άμεση μέτρηση της περιόδου μεταβολής και έτσι προσδιορίζει με ακρίβεια την εφημερίδα που θα συνταχθεί.



Υπολογισμός χρόνου ελαχίστου/μεγίστου φωτός

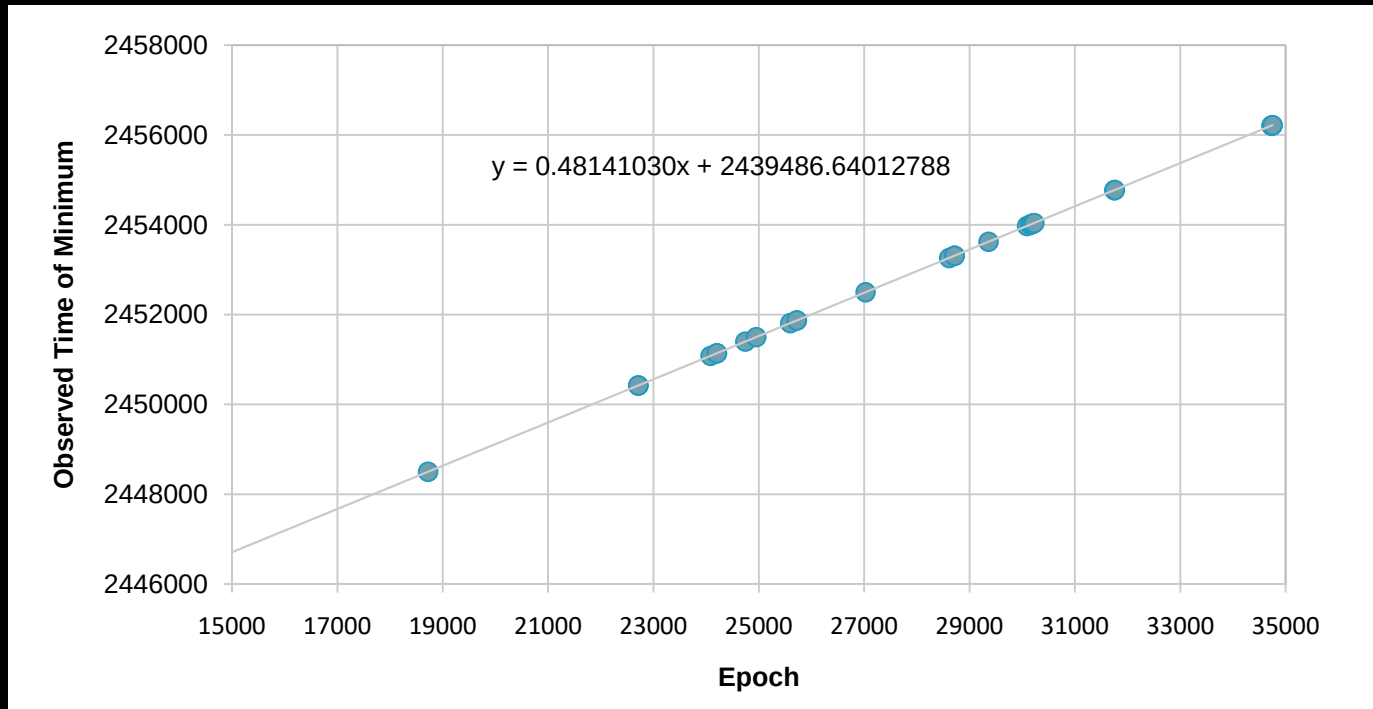
Η χρονική στιγμή στο μέσο μιας εκλείψεως κατά την οποία το φως που έρχεται από το μεταβλητό είναι ελάχιστο, ο **χρόνος ελαχίστου φωτός**, προσδιορίζεται με διάφορους τρόπους:

Γραφικά, σχεδιάζοντας την καμπύλη φωτός με μονάδα χρόνου την ηλιοκεντρική Ιουλιανή ημερομηνία (HJD) και ενώνοντας τα σημεία ίσης λαμπρότητας στις δύο πλευρές του ελαχίστου ορίζουμε ένα σύνολο οριζόντιων χορδών. Τότε είναι εύκολο να χαράξουμε μια κατακόρυφη ευθεία που διχοτομεί με την καλύτερη προσέγγιση όλες αυτές τις χορδές και ορίζει το χρόνο ελαχίστου στην τομή της με τον άξονα του χρόνου.

Με προσαρμογή πολυωνύμου (προσαρμογή (fitting) μιας παραβολής με τα κοίλα άνω, εφόσον βέβαια τα δεδομένα είναι συμμετρικά και η καμπύλη δεν εμφανίζει απότομες αυξομειώσεις).

Μέθοδος Kwee & van Woerden (1956). Η μέθοδος στηρίζεται στον υπολογισμό των κλίσεων των ευθύγραμμων τμημάτων που ενώνουν δύο διαδοχικά σημεία (των στιγμιαίων «παραγώγων» δηλαδή) από τη μία και από την άλλη πλευρά του ελαχίστου.

Υπολογισμός αστρονομικής εφημερίδας



Μια σειρά υπολογισμένων χρόνων ελαχίστου επιτρέπει τον προσδιορισμό της περιόδου περιφοράς με εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Η περίοδος της μεταβολής είναι η κλίση της ευθείας.

ΠΡΟΣΟΧΗ: βασική προϋπόθεση είναι οι εκλείψεις να έχουν ταυτοποιηθεί ορθά ως κύριες ή δευτερεύουσες, είτε με σύγκριση του βάθους τους, είτε με τη βοήθεια παλαιότερης εφημερίδας.

Διάγραμμα O-C

προφέρεται: «O minus C»

Με τη μέθοδο υπολογισμού των χρόνων ελαχίστου, μας επιτρέπεται να κάνουμε προβλέψεις για το χρόνο που θα συμβούν οι εκλείψεις του διπλού συστήματος στο μέλλον.

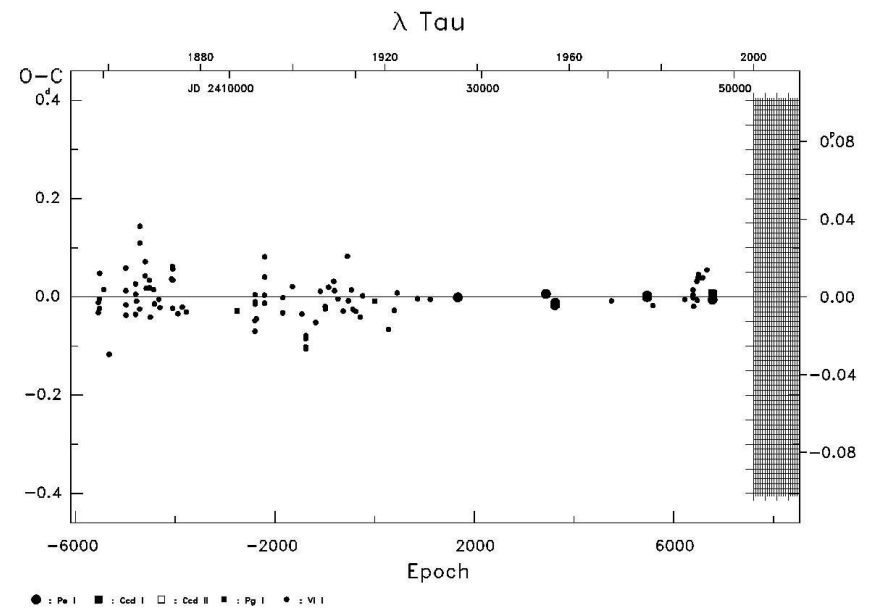
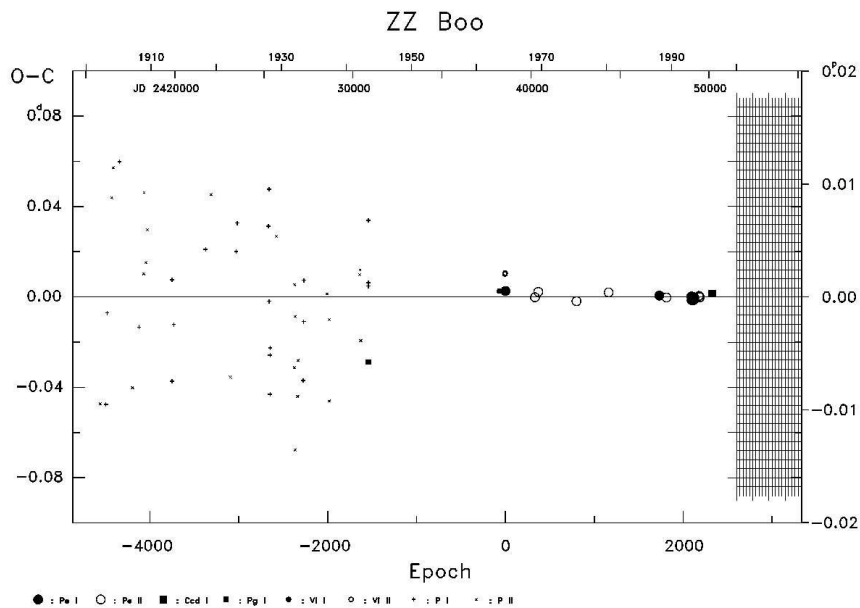
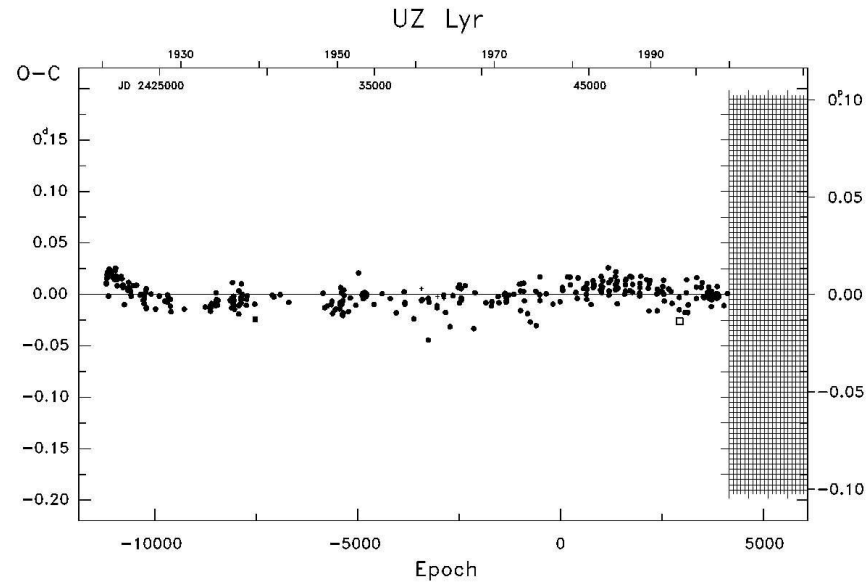
Παρόλα αυτά, μεταβολές στην περίοδο μπορεί να παρατηρηθούν σε μεγάλες χρονικές κλίμακες, ή όταν τα μέλη του ζεύγους των αστέρων είναι σε στενή αλληλεπίδραση. Η μεταφορά μάζας π.χ. από το ένα μέλος στο άλλο, μπορεί να αλλάξει σημαντικά την περίοδο περιφοράς του συστήματος.

Συγκρίνοντας παλιές αστρονομικές εφημερίδες με πιο σύγχρονες ανιχνεύουμε τέτοιες μεταβολές.

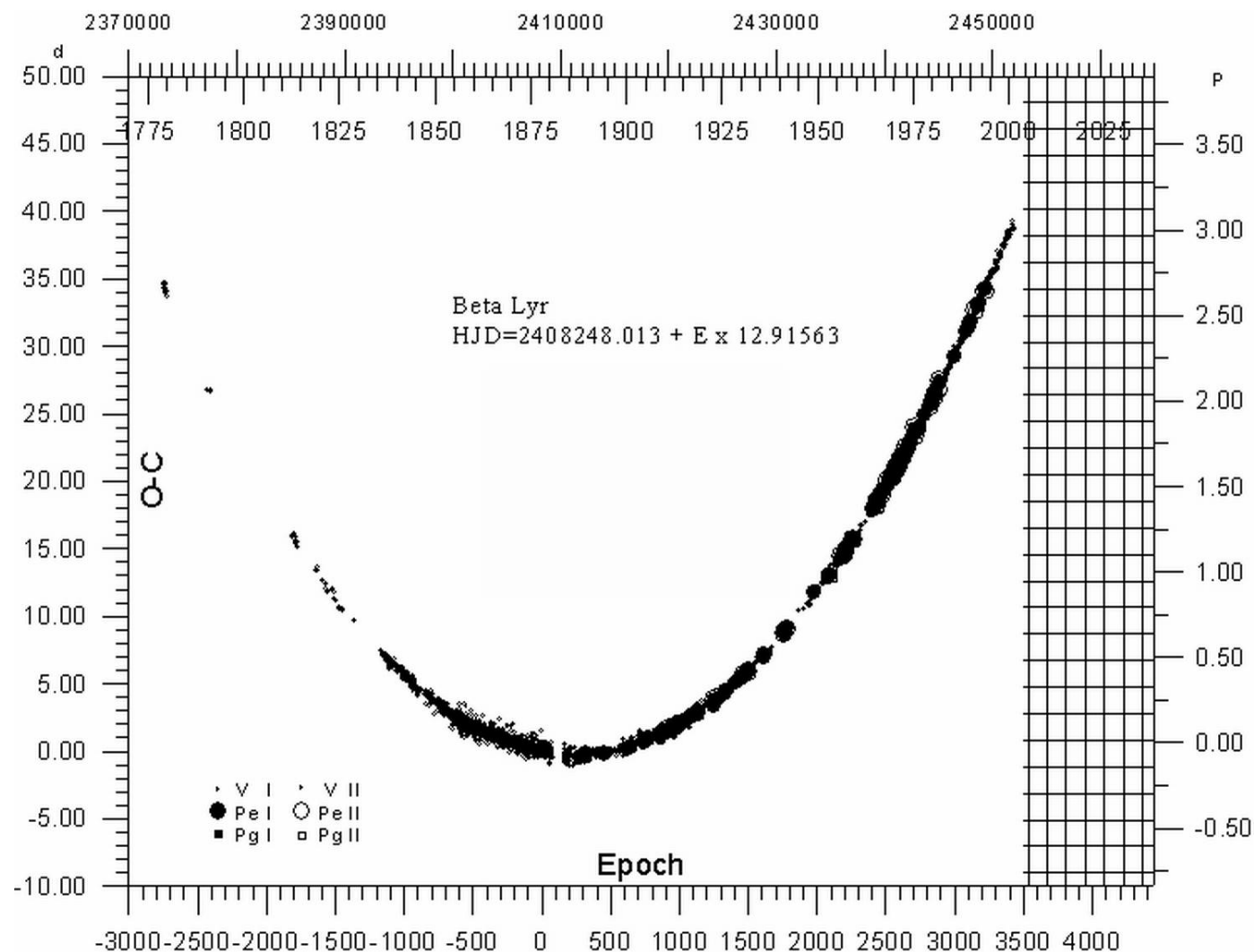
Για να έχουμε μια πιο εποπτική εικόνα των μεταβολών αυτών, καταστρώνουμε διαγράμματα, όπου απεικονίζουμε τη διαφορά μεταξύ του παρατηρούμενου (**Observed**) χρόνου ελαχίστου και του υπολογιζόμενου (**Calculated**).

Το διάγραμμα αυτό είναι γνωστό διεθνώς ως **O-C diagram** και εφαρμόζεται σε οποιοδήποτε μετρήσιμο μέγεθος, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί και θεωρητικά.

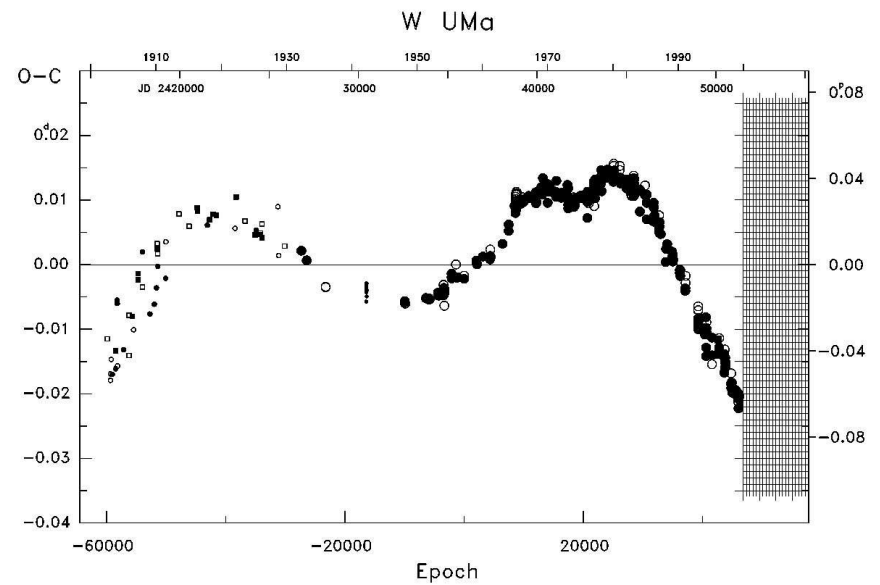
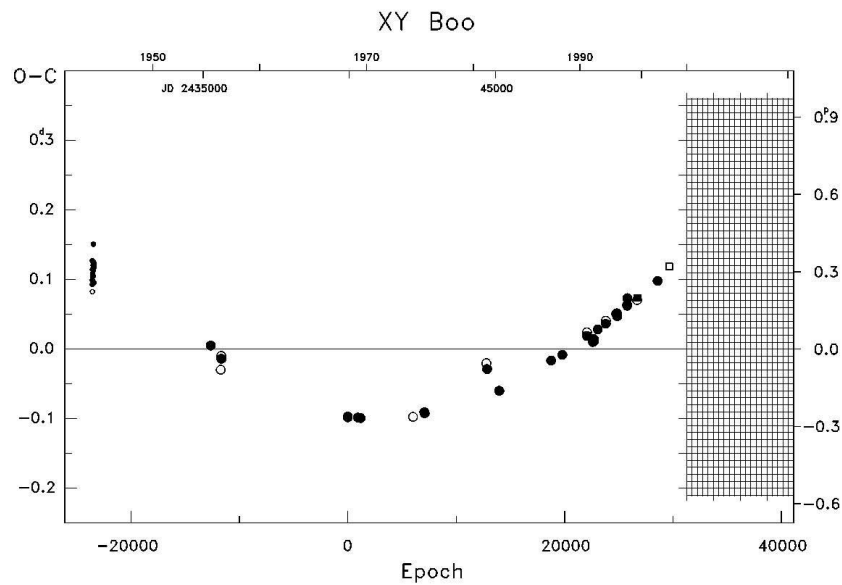
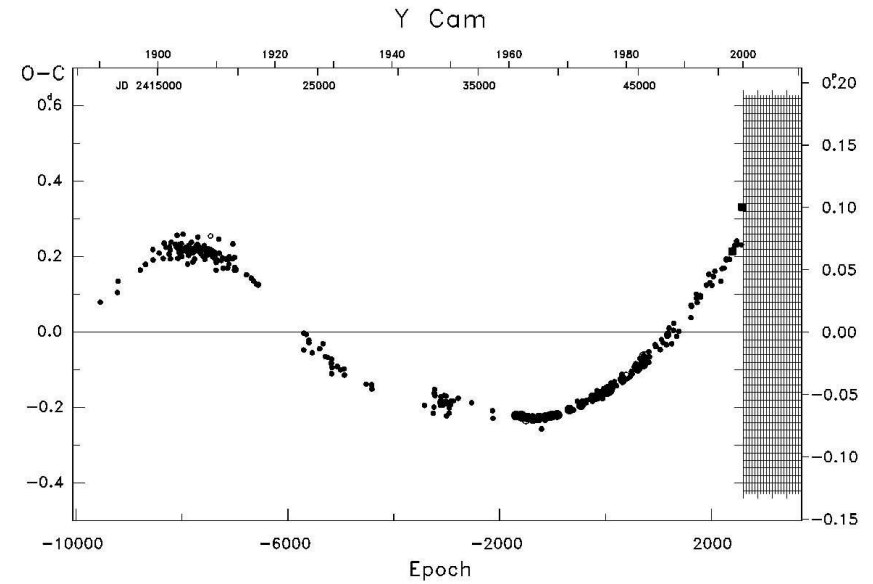
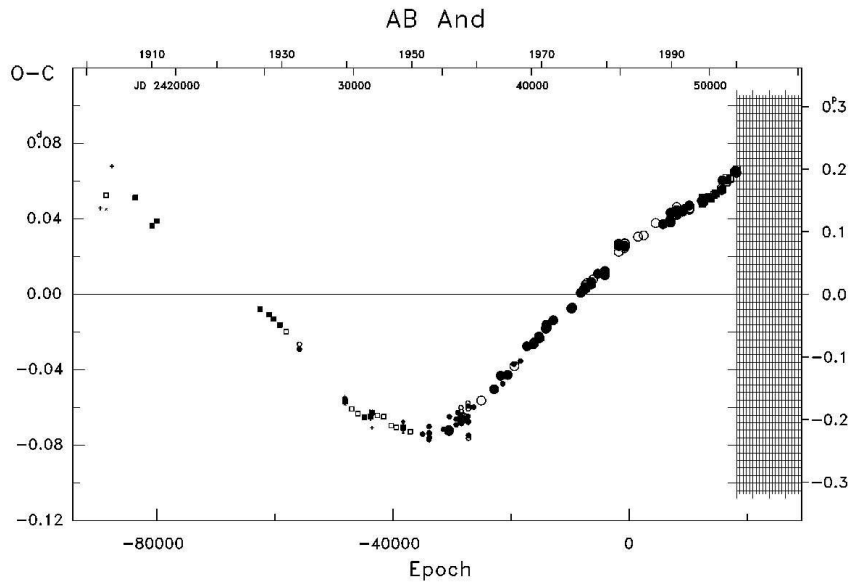
Διαγράμματα O-C διπλών εκλειπτικών συστημάτων

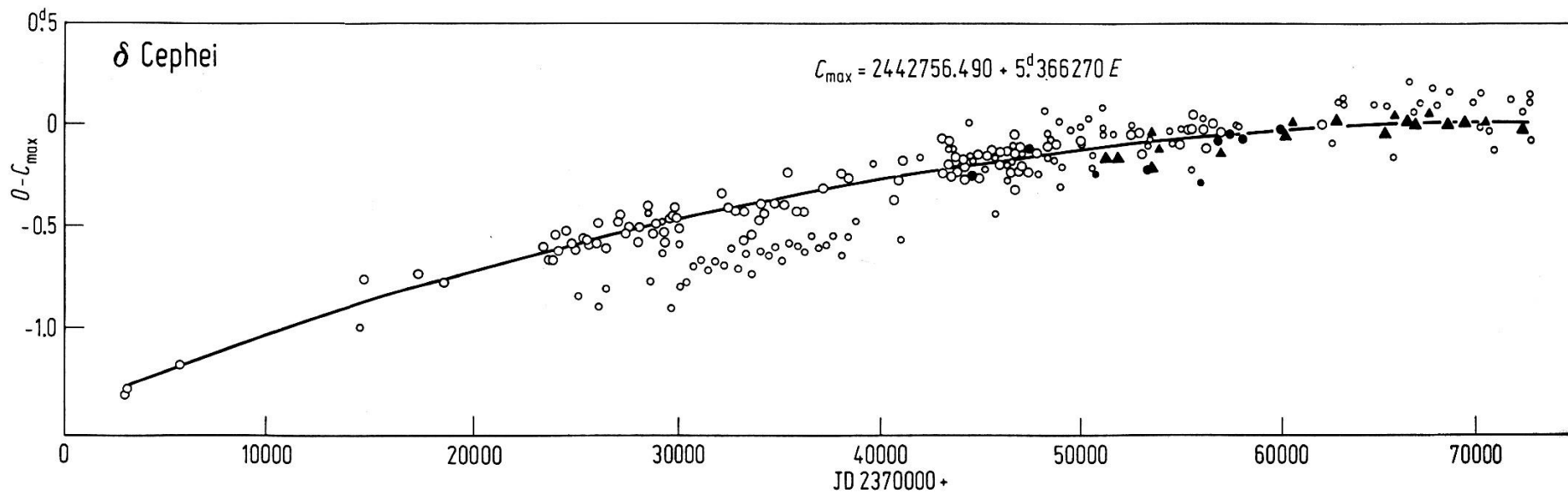


Διαγράμματα Ο-С του β Lyr

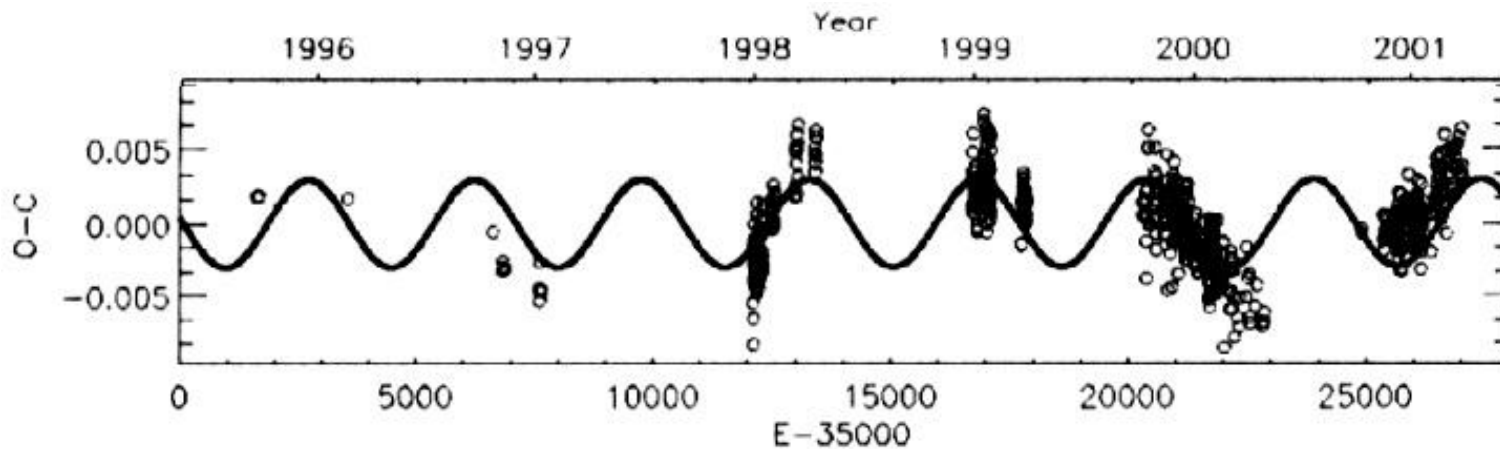


Διαγράμματα O-C διπλών εκλειπτικών συστημάτων

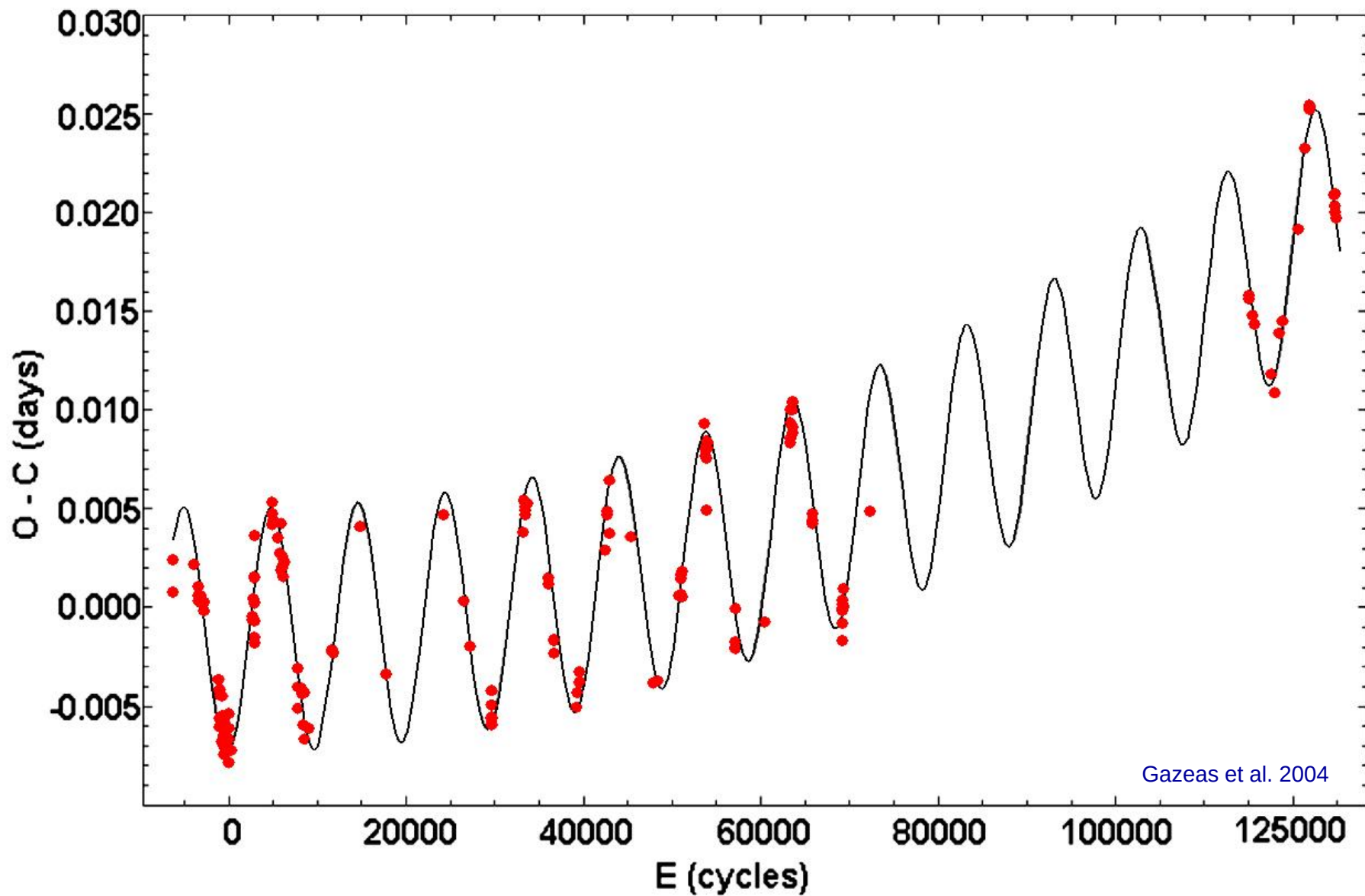




Το διάγραμμα O-C του παλλόμενου αστέρα δ Cep.



Το διάγραμμα O-C του παλλόμενου αστέρα V1162 Ori.



Το διάγραμμα O-C του παλλόμενου αστέρα *SZ Lyn* (δεδομένα: 1961-2004).